

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) NO
ESTADO DE MATO GROSSO: PREENCHIMENTO
DE FALHAS, ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E
PROJEÇÕES FUTURAS**

MARLUS SABINO

**PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA
ORIENTADOR**

**Cuiabá - MT
Maio de 2023**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) NO
ESTADO DE MATO GROSSO: PREENCHIMENTO
DE FALHAS, ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E
PROJEÇÕES FUTURAS**

MARLUS SABINO

*Defesa de Tese apresentada à
Universidade Federal de Mato Grosso,
como parte das exigências do
Programa de Pós-graduação em Física
Ambiental, para obtenção do título de
Doutor em Física Ambiental.*

**PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA
ORIENTADOR**

**Cuiabá – MT
Maio de 2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S116e Sabino, Marlus.

Evapotranspiração de referência (ET0) no estado de Mato Grosso: Preenchimento de falhas, análise de sensibilidade e projeções futuras [recurso eletrônico] / Marlus Sabino. -- Dados eletrônicos (1 arquivo : 141 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Adilson Pacheco de Souza.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2023.

Modo de acesso: World Wide Web: <https://ri.ufmt.br>.

Inclui bibliografia.

1. Penman-Monteith. 2. GapMET. 3. método de Sobol. 4. análise de tendência de Mann-Kendall. 5. mudanças climáticas. I. Souza, Adilson Pacheco de, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO****UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO****PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE PÓS-GRADUAÇÃO****PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM [NOME DO PPG]****FOLHA DE APROVAÇÃO**

TÍTULO: Evapotranspiração de referência (ET_o) no estado de Mato Grosso: preenchimento de falhas, análise de sensibilidade e projeções futuras

AUTOR (A): DOUTORANDO (A) MARLUS SABINO

Tese defendida e aprovada em **31 de maio de 2023**.

COMPOSIÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

1. Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza (Presidente da Banca / **Orientador**)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

2. Prof. Dr. Frederico Terra de Almeida (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal de Mato Grosso

3. Dr. Cornélio Alberto Zolin (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Embrapa Agrossilvipastoril

4. Prof. Dr. Daniel Fonseca de Carvalho (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

5. Prof. Dr. Rivanildo Dallacort (Membro Externo)

INSTITUIÇÃO: Universidade do Estado de Mato Grosso

Cuiabá, 31/05/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Rivanildo Dallacort**, **Usuário Externo**, em 19/06/2023, às 15:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **FREDERICO TERRA DE ALMEIDA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 19/06/2023, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Fonseca de Carvalho, Usuário Externo**, em 20/06/2023, às 15:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cornélio Alberto Zolin, Usuário Externo**, em 20/06/2023, às 16:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADILSON PACHECO DE SOUZA, Docente da Universidade Federal de Mato Grosso**, em 21/06/2023, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5892129** e o código CRC **9F205936**.

DEDICATÓRIA

A minha mãe Adelina Kruger por seu amor incondicional.

A minha família pelo apoio em todas as minhas decisões.

A meus amigos por tornarem a caminhada mais divertida.

Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira (in memoriam) pelo empenho na criação e andamento do PPGFA, bem como, pelos conselhos e incentivo.

AGRADECIMENTOS

- ❖ Agradeço a minha amada mãe, Adelina Kruger por ser esse grande exemplo de vida, ensinando-me a sempre acreditar em minha capacidade e ter orgulho de quem sou;
- ❖ A minha família por estarem sempre de braços abertos para me receber quando preciso de abrigo das turbulências da vida.
- ❖ Ao Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza e Profa Dra. Andréa Carvalho da Silva, por todo o ensinamento, não apenas acadêmico, mas também ético e moral, sendo sempre minha referência de pesquisador e docente.
- ❖ Ao Prof. Dr. Rafael Rosolem pela oportunidade, acolhimento e incentivo durante o período de intercâmbios.
- ❖ Aos amigos e colegas da Pós-Graduação, pelo apoio e companheirismo, em especial a Anísio Alfredo da Silva Júnior, Jonh Billy da Silva, Leilane Gomes Duarte e Rayanna Costa Oliveira;
- ❖ Aos Integrantes do Grupo de Pesquisa Ambiente e Planta pelo companheirismo e oportunidade de crescimento pessoal e científico.
- ❖ A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso por compartilharem seus conhecimentos, contribuindo para esta pesquisa;
- ❖ E a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho
- ❖ O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

EPÍGRAFO

“As pessoas tendem a se concentrar apenas no presente. O problema é que, uma vez que as mudanças climáticas se tornem algo que a maioria das pessoas possa sentir em seu cotidiano, será tarde demais para prevenir mudanças muito maiores e potencialmente catastróficas”. - Elizabeth Kolbert

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1 PROBLEMÁTICA	18
1.2 JUSTIFICATIVA	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA GERAL	22
2.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E VEGETACIONAL DO MATO GROSSO	22
2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO	26
2.2.1 Evapotranspiração de referência	28
2.2.3 Método de Penman-Monteith	29
2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SOBOL	31
2.4 EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	34
2.5 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS DO CMIP5	35
2.5.1 Cenários Climáticos do CMIP5	37
3. ARTIGO 1: PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE DADOS METEOROLÓGICOS NO ESTADO DE MATO GROSSO	40
3.1. INTRODUÇÃO	40
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	41
3.2.1 Local de estudo e processamento dos dados	41
3.2.2 Programa GapMET	43
3.2.3 Métodos de preenchimento de falhas	46
3.2.4 Avaliação dos erros de estimativa e ranqueamento dos métodos	47
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
3.4. CONCLUSÕES	55
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
3.6 ANEXOS	59
4. ARTIGO 2: SENSIBILIDADE GLOBAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DE PENMAN-MONTEITH ÀS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NO MATO GROSSO, BRASIL	60
4.1. INTRODUÇÃO	60
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	62

4.2.1. Área de Estudo e dados.....	62
4.2.2 Cálculo de evapotranspiração de referência (ET_0)	64
4.2.3 Método de Análise de Sensibilidade de Sobol.....	65
4.3. RESULTADOS	68
4.3.1 Distribuição espaço-temporal das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência.....	68
4.3.2 Distribuição espaço-temporal dos coeficientes de sensibilidade de Sobol	71
4.4. DISCUSSÃO.....	75
4.5. CONCLUSÕES.....	77
4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
4.7 ANEXOS	86
5. ARTIGO 3: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DE MATO GROSSO	93
5.1. INTRODUÇÃO.....	94
5.2. MATERIAIS E MÉTODOS	96
5.2.1. Área de estudo e obtenção dos dados	96
5.2.2 Cálculo de evapotranspiração de referência (ET_0).....	99
5.2.3 Avaliação dos erros de estimativa e escolha do MCG.....	100
5.2.4 Análise espaço-temporal e teste de médias das projeções da evapotranspiração de referência (ET_0)	101
5.2.5 Análise de tendências e teste de Sen's.....	101
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
5.3.1 Escolha dos modelos de projeção climática	102
5.3.1 Projeções climática da evapotranspiração de referência (ET_0).....	105
5.3.2 Análise de tendência	116
5.4. CONCLUSÕES.....	121
5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
5.6 ANEXOS	131
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	132
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL	133

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Classificação climática de Koppen no Mato Grosso.	22
Figura 2-2: Massas de ar atuantes no Brasil.	24
Figura 2-3: Mapa da distribuição dos biomas no estado de Mato Grosso.	25
Figura 2-4: Esquema da evapotranspiração de referência (ET_0).	29
Figura 2-5: Esquema simplificado do processo de estimativa da sensibilidade local das variáveis de um modelo. X_1 , X_2 e X_3 representam as variáveis de entrada de um modelo qualquer com resposta igual a Y	32
Figura 2-6: Esquema simplificado do processo de estimativa da sensibilidade global das variáveis de um modelo. X_1 , X_2 e X_3 representam as variáveis de entrada de um modelo qualquer com resposta igual a Y	33
Figura 2-7: Representação esquemática da estrutura de grades de um modelo climático global (MCG) mostrando a interação entre as células e os componentes físicos envolvidos.	36
Figura 2-8: Representação esquemática da evolução temporal da forçantes radioativas nos diferentes cenários das Vias de Concentração Representativas (RCPs).	38
Figura 3-1: Localização das Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos climas do estado de Mato Grosso.	43
Figura 3-2: Fluxograma das etapas de preenchimento de dados meteorológicos do programa GapMET 1.0.	45
Figura 3-3: Boxplot do desempenho do viés (A-E) e RMSE (F-G) entre os dados observados e preenchidos nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso em função da variável meteorológica e do método de preenchimento do GapMET.	51
Figura 3-4: Dispersão entre dados observados e preenchidos das variáveis meteorológicas nos diferentes métodos de preenchimentos do GapMET nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.	52
Figura 3-5: Ranqueamento dos erros de estimativa dos seis métodos de preenchimento de falhas de dados meteorológicos do GapMET nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso.	54
Figura 4-1: Topografia, biomas e localização das Estações Meteorológicas Automáticas do INMET (EMA), no estado de Mato Grosso, Brasil.	64
Figura 4-2: Médias mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil. (Série de dados de 2008-2020).	69
Figura 4-3: Distribuição espacial da evapotranspiração de referência (ET_0) e das variáveis meteorológicas nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil. (Série de dados de 2008-2020).	70
Figura 4-4: Proporção anual e sazonal dos índices de sensibilidade de primeira ordem e total de Sobol das variáveis meteorológicas usadas nas estimativas da	

evapotranspiração de referência (ET_0) por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso, Brasil.....	71
Figura 4-5: Variações mensais dos índices de sensibilidade de primeira ordem e total de Sobol das variáveis meteorológicas usadas nas estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0) por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso, Brasil.	72
Figura 4-6: Distribuição espacial dos índices de sensibilidade total e de primeira ordem de Sobol das variáveis meteorológicas usadas nas estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0) por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso, em escala anual e sazonal.	74
Figura 5-1: Mapas do clima e biomas e localização das Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no Mato Grosso.	98
Figura 5-2 Média das métricas de desempenho do viés, raiz quadrática média normalizada (RMSE Normalizado), coeficiente de correlação de Spearman (ρ_h) e erro ponderado dos 9 MCGs nas estimativas das variáveis meteorológicas radiação solar incidente (R_s), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (VV) obtidas nas localidades das 33 EMAs do estado do Mato Grosso, Brasil.....	103
Figura 5-3: Métricas de desempenho do viés, raiz quadrática média (RMSE), coeficiente de correlação de Pearson dos 9 modelos climáticos globais nas estimativas mensais da evapotranspiração de referência entre os anos de 2007-2020 nas localidades das 33 EMAs do estado do Mato Grosso, Brasil.	104
Figura 5-4: Médias móvel de 5 anos (linha) e desvio padrão (área sombreada) das estimativas da evapotranspiração de referência e suas variáveis meteorológicas projetadas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 entre os anos de 2007 e 2100 nas localidades das EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.	106
Figura 5-5: Variação mensal das médias e desvios padrão das estimativas da evapotranspiração de referência obtida pelo modelo HadGEM2-ES nos três cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) em quatro períodos entre os anos de 2007 e 2100.....	109
Figura 5-6: Médias mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) observadas entre 2007-2020, e estimativas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs (3.6, 4.5 e 8.5) entre os anos de 2007-2100, na localidade das EMAs do Mato Grosso, Brasil.	111
Figura 5-7: Diferença entre as médias mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) observadas entre 2007-2020, e estimativas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs (3.6, 4.5 e 8.5) entre os anos de 2025-2100, na localidade das EMAs do Mato Grosso, Brasil.	112
Figura 5-8: Distribuição espacial interpolada da evapotranspiração de referência (ET_0) média anual observada nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre os anos de 2007 e 2020, e estimativas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) em diferentes períodos do século XXI. século XXI.....	114

Figura 5-9: Diferença entre as médias anuais da evapotranspiração de referência (ET_0) observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre 2007 e 2020, e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 em diferentes períodos do século XXI.	115
Figura 5-10: Tendências da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso (2007-2020), e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 (2007-2100).	119

LISTA DE TABELAS

.....	
Tabela 3-1: Estações meteorológicas automáticas pertencentes a rede do INMET com mais de 10 anos de dados no estado de Mato Grosso, Brasil.....	42
Tabela 3-2: Desempenho médio do preenchimento de dados das 33 EMAs do estado de Mato Grosso em função da porcentagem de falhas e do método de preenchimento	49
Tabela 4-1: Estações meteorológicas automáticas (EMAs) do INMET no estado de Mato Grosso utilizadas nesse estudo.	63
Tabela 4-2: Médias e desvio padrão dos limites amostrais inferiores (Inf) e superiores (Sup) (2,5 e 97,5 percentis) das variáveis meteorológicas observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.	67
Tabela 5-1: Estações meteorológicas automáticas do INMET (EMA) no Mato Grosso utilizadas no estudo.	97
Tabela 5-2: Modelos climáticos globais (MCGs) empregados no estudo, juntamente com suas resoluções e grupos de pesquisa responsáveis.	98
Tabela 5-3: Média anual da evapotranspiração de referência (ET_0) (mm dia^{-1}) dos dados observados nas EMAs do Mato Grosso e simuladas pelo modelo HadGEM2-ES, nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5, em quatro períodos entre os anos de 2007 e 2100.	107
Tabela 5-4: Tendência média da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas (radiação incidente – Rs; umidade relativa – UR; temperatura máxima – Tmax; temperatura mínima – Tmin; e velocidade médias do vento – VV) observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre 2007 e 2020, e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 a curto prazo (2007-2020) e longo prazo (2007 e 2100).	117

RESUMO

SABINO, M. Evapotranspiração de referência (ET_0) no estado de Mato Grosso: preenchimento de falhas, análise de sensibilidade e projeções futuras. Cuiabá, 2023, 141 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A evapotranspiração (ET) é um dos componentes mais relevantes do ciclo da água sendo definida por uma ampla variedade de fatores meteorológicos e biofísicos locais e sazonais os e vulneráveis às mudanças climáticas. O presente estudo objetiva avaliar as alterações, tendências e distribuição espaço-temporal da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas requeridas pelo método de Penman-Monteith (radiação solar incidente - R_s , umidade relativa do ar - UR, temperaturas máxima e mínima do ar - T_{max} e T_{min} , e velocidade do vento - VV) baseados nos cenários das Rotas Representativas de Concentração (RCPs) otimista (RCP 2.6), média (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5) no estado de Mato Grosso, Brasil. O presente estudo foi estruturado em três capítulos com objetivos específicos, sendo: (1) introduzir o programa GapMET, desenvolvido pelos autores, e avaliar o desempenho de seis métodos de preenchimento de falhas em séries históricas de dados meteorológicos buscando obter series completas de evapotranspiração e suas variáveis; (2) analisar as variações espaço-temporal da sensibilidade de Sobol da ET_0 às variáveis meteorológicas requeridas pelo método de Penman-Monteith; e (3) avaliar o desempenho de 9 modelos climáticos globais (MCG) do Projeto de Inter comparação de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5) em simular a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith e suas variáveis climáticas e, a partir das projeções do modelo com melhor precisão, avaliar as alterações espaço temporais e tendências da evapotranspiração no estado para o período de 2007 a 2100. A precisão do preenchimento dos dados foi aferida pela quantidade de falhas não preenchidas, viés, RMSE e correlação de Pearson entre os dados observados e sete bases de dados com variações de 25 a 80% de falhas artificialmente inseridas. A escolha do melhor MCG foi realizada pela comparação das projeções com os dados observados nas estações meteorológicas automáticas (EMAs) no período de 2007 a 2020 por meio do Viés, raiz o erro médio quadrático, e dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman. As projeções do melhor modelo foram avaliadas por comparações gráficas e pelas diferenças médias estatísticas entre a ET_0 simulada nos três cenários e a observada nas EMAs do estado, por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,10$), sendo as diferenças expressas pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Por fim, a análise de tendência foi realizada utilizando-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall e sua magnitude por meio através do teste de Sen. Os resultados demonstram que os métodos de preenchimento do GapMET possuem um bom desempenho em estimar dados meteorológicos, destacando-se os métodos que utilizam apenas uma estação meteorológica vizinha como série referência para as condições da malha meteorológica do estado de Mato Grosso. A análise de Sobol evidencia variações espaço-temporais consideráveis da sensibilidade da ET_0 às variáveis meteorológicas e

suas interações, sendo as variáveis dominante ordenadas como $R_s > VV > UR > T_{max} > T_{min}$. O MCG com melhores estimativas no estado foi o HadGEM2-ES e suas projeções apresentam médias estáticas semelhantes às condições atuais até o fim do século no cenário RCP 2.6, enquanto nos cenários RCP 4.5 e 8.5 apresentam um aumento contínuo da ET_0 , com incremento mais expressivo nos meses do período de seca (maio a setembro) e nas áreas do bioma amazônico, localizado no norte do estado de Mato Grosso. As análises de tendência dos dados do MCG apresentam mudanças significativas da ET_0 e suas variáveis em todo o estado no RCP 4.5 e 8.5, enquanto no RCP 2.6 as tendências significativas na ET_0 ocorrem apenas no norte amazônico. A análise de tendência dos dados observados, apesar de não ocorrerem em todas as EMAs, demonstram mudanças mais intensas na ET_0 além da existência do paradoxo da evapotranspiração, com incremento nas áreas de cerrado e reduções nas áreas do pantanal e sul amazônico.

Palavras-chave: Penman-Monteith, GapMET, método de Sobol, análise de tendência de Mann-Kendall, mudanças climáticas.

ABSTRACT

SABINO, M. Reference evapotranspiration (ET_0) in the state of Mato Grosso: gap filling, sensitivity analysis and future projections. Cuiabá, 2023, 141 f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

Evapotranspiration (ET) is one of the most relevant components of the water cycle and is known to be defined by a wide range of local and seasonal meteorological and biophysical factors that are vulnerable to climate change. The present study aims to evaluate the spatial and temporal distribution, changes, and trends of reference evapotranspiration (ET_0) and its meteorological variables required by the Penman-Monteith method (incident solar radiation (R_s), relative air humidity (UR), maximum and minimum air temperatures (T_{max} and T_{min}), and wind speed (VV)) based on the scenarios of the Representative Concentration Pathways (RCPs) optimistic (RCP 2.6), medium (RCP 4.5), and pessimistic (RCP 8.5) in the state of Mato Grosso, Brazil. The study was structured into three chapters with specific objectives, which are: (1) to introduce the GapMET program developed by the authors. (2) analyze the spatial-temporal variations of the Sobol sensitivity of ET_0 to the meteorological variables required by the Penman-Monteith method. (3) evaluate the performance of 9 global climate models (GCM) of CMIP5 in simulating the Penman-Monteith reference evapotranspiration and its climatic variables, and, additionally, evaluate the space-time changes and trends of evapotranspiration in the state from 2007 to 2100. The results demonstrate that the GapMET methods to gap-filling meteorological data have good performance, highlighting the methods that use only one neighbouring meteorological station as a reference series for the conditions of Mato Grosso meteorological grid. The Sobol analysis shows considerable spatial-temporal variations in the sensitivity of ET_0 to the meteorological variables, with the dominant variable responsible for the fluctuations of ET_0 in the state of Mato Grosso being represented as $R_s > VV > UR > T_{max} > T_{min}$. The GCM with the best estimates in the state was HadGEM2-ES, and its projections show similar static averages to current conditions until the end of the century in the RCP 2.6 scenario, while in the RCP 4.5 and 8.5 scenarios, there is a continuous increase in ET_0 , with a more significant increase in the dry season months (May to September) and in the areas of the Amazon biome in the northern of the Mato Grosso. The trend analysis of the GCM data shows significant changes in ET_0 and its variables throughout the state in the RCP 4.5 and 8.5 scenarios, while in the RCP 2.6 scenario, significant trends in ET_0 occur only in the Amazonian areas in the north. The trend analysis of the observed data, although not occurring in all EMAs, demonstrates more intense changes in ET_0 beyond the existence of the evapotranspiration paradox, with an increase of ET_0 in the cerrado areas and reductions in the Pantanal and southern Amazonian areas.

Keywords: Penman-Monteith, GapMET, Sobol method, Mann-Kendall trend analysis, Climate Change.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1 PROBLEMÁTICA

As mudanças climáticas causadas por ação antrópica são um dos principais desafios da sociedade atual, conforme consta nos objetivos de desenvolvimento sustentável das Nações Unidas. Ao longo dos últimos 100 anos, a temperatura média global da superfície aumentou aproximadamente 0,7 °C, esperando-se um aumento de 3 a 5 °C até o final do século 21 se nenhuma ação for tomada. Além da temperatura do ar espera-se que as mudanças climáticas tenham um impacto significativo em outras variáveis climáticas como a radiação solar incidente, a umidade relativa, a velocidade do vento, entre outras. No entanto, a questão é complexa de ser avaliada, pois, apesar de ser um problema global, os impactos não são homogêneos em todos os territórios, dificultando a coordenação de uma ação coletiva. Assim, há a necessidade de estudos sobre os impactos das mudanças climáticas desenvolvidas em cada região de interesse.

O estado de Mato Grosso, localizado na região Centro-Oeste do Brasil, destaca-se por sua extensão territorial e inserção na área de ocorrência das fitofisnomias do complexo do Pantanal, das formações savânicas (Cerrado) e das formações amazônicas, além de suas áreas de transição, que propiciam uma grande diversidade ecológica, socioeconômicas, de desenvolvimento rural e agroindustrial. As principais atividades econômicas primárias do estado são o extrativismo e a produção agropecuária, adotando-se um modelo de produção monocultural de larga escala. O crescente aumento da demanda de alimentos no mundo tem incentivado a ampliação da produção do setor agropecuário no estado, que vem ocorrendo, de maneira geral, pela expansão da fronteira agrícola por meio do desmatamento de áreas nativas do Cerrado e Amazônia. Nesse contexto, nas últimas décadas tem crescido a preocupação referente à ampliação da produção sem aumento dos impactos ao meio ambiente com a abertura de novas áreas agricultáveis, especialmente, frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Uma alternativa para maximizar a produção de alimentos é fazer uso de sistemas de irrigação, os quais requerem o conhecimento da quantidade de água necessária para o desenvolvimento das culturas, calculada a partir da evapotranspiração. De maneira simplificada, a evapotranspiração (ET) pode ser definida como um processo simultâneo e dinâmico de mudança do estado físico da

água pela evaporação no solo e pela transpiração das plantas, sendo, portanto, um indicativo da quantidade de água utilizada por uma vegetação em um dado intervalo de tempo. A ET é considerada um fator chave nos estudos de avaliação ambiental, no manejo de bacias hidrográficas e na estimativa da necessidade hídrica das culturas. Assim, entender como a evapotranspiração responde aos diferentes níveis de emissões de gases de efeito estufa é essencial para prever mudanças futuras na disponibilidade regional e global de água e na produtividade dos ecossistemas e áreas de agricultura.

Dentro os diversos conceitos de evapotranspiração (evapotranspiração real - ETR; a evapotranspiração potencial - ETP; evapotranspiração de referência - ET_0 ; evapotranspiração de cultura - ETC) a evapotranspiração de referência apresenta grande utilidade nos estudos de necessidades hídricas de culturas, visto que, possibilita a padronização do componente vegetal facilitando assim seu uso nas mais diversas culturas agrícolas. Atualmente, a equação de Penman-Monteith é o método recomendado pela FAO para estimar a ET_0 sempre que houver disponibilidade de dados meteorológicos, tais quais, a temperatura e umidade relativa do ar, a radiação solar incidente e a velocidade do vento.

Nos últimos anos, grupos de pesquisa tem buscado desenvolver modelos climáticos globais (MCGs) para projetar mudanças futuras na evapotranspiração e em outras variáveis hidrometeorológicas sob diferentes cenários de emissões de gases de efeito estufa. O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 5 (“Coupled Model Intercomparison Project Phase 5” - CMIP5) é um desses esforços, que envolve um conjunto coordenado de simulações por vários modelos climáticos para melhorar nossa compreensão do sistema climático da Terra e sua resposta à força antropogênica e cenários de emissão baseados nas Rotas Representativas de Concentração (“Representative Concentration Pathways” - RCPs), que são um conjunto de cenários de emissão de gases e mudanças socioeconômicas e ambientais com impactos no clima desenvolvidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) com o objetivo de padronizar o desenvolvimento de pesquisas sobre as mudanças climáticas e permitir a comparação de resultados de diferentes locais.

Em resumo, o desenvolvimento de pesquisa sobre alterações e tendências da evapotranspiração e suas variáveis meteorológicas usando modelos CMIP5 nos cenários RCPs tem implicações importantes para as estratégias de mitigação e

adaptação às mudanças climáticas ao fornecer informações que ajudam nas decisões relacionadas à gestão da água, agricultura e conservação do ecossistema. Além disso, permite refinar os modelos climáticos e melhorar a precisão das futuras projeções do clima.

1.2 JUSTIFICATIVA

No Mato Grosso, apesar da alta demanda por informações sobre a evapotranspiração, em função do crescimento potencial da agricultura irrigada e potenciais alterações do clima, as pesquisas relacionadas às estimativas da ET_0 ainda são escassas. Aliados à deficiência de pesquisas sobre o tema no estado, em geral, os estudos desenvolvidos no Brasil sobre projeções da evapotranspiração nos cenários climáticos propostos pelo IPCC, em geral, têm empregado o método que utiliza apenas a temperatura do ar, ignorando assim possíveis impactos que as mudanças na radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar podem ter nas estimativas da evapotranspiração.

Assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar as alterações, tendências e distribuição espaço-temporal da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas requeridas pelo método de Penman-Monteith (radiação solar incidente, umidade relativa do ar, temperaturas máxima e mínima do ar, e velocidade do vento) em diferentes cenários climáticos, no estado de Mato Grosso.

Os objetivos específicos do trabalho contemplam:

- Avaliar métodos de preenchimento de dados meteorológicos nas estações meteorológicas automáticas (EMAs) do Mato Grosso.
- Avaliar a sensibilidade global da ET_0 às variáveis meteorológicas do método de Penman-Monteith.
- Avaliar dentre 9 modelos de projeções climáticos do CMIP5, que possuem dados mínimos requeridos para os cálculos da ET_0 de Penman-Monteith, qual apresentou melhor desempenho nas estimativas da ET_0 e suas variáveis meteorológicas para o período de 2007-2020.
- Estimar as projeções espaço-temporais da ET_0 com base nos dados do melhor modelo de projeção CMIP5 nos cenários climáticos RCP 2.6, RCP 4.5, e RCP 8.5.

- Verificar a existência de tendências nas variáveis meteorológicas e ET_0 obtidas nas EMAs do Mato Grosso e nas projeções do melhor modelo CMIP5, e comparar os resultados das projeções do melhor modelo com as tendências observadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA GERAL

2.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E VEGETACIONAL DO MATO GROSSO

De acordo com a classificação climática de Köppen, o estado de Mato Grosso apresenta três tipos climáticos: Equatorial úmido (Af), tropical de savana (Aw) e subtropical úmido (Cwa) (SOUZA et al., 2013, ALVARES et al., 2013, JERSZURKI et al., 2019) (Figura 2-1):

- Equatorial úmido (Af): clima equatorial com temperaturas médias superiores a 18 °C em todos os meses e precipitação anual abundante, maior que a evaporação. Ocorre nas áreas de florestas da região setentrional do Estado.
- Tropical de savana com estação seca de inverno (Aw): clima tropical com estação seca no outono/inverno, e estação chuvosa na primavera/verão. Ocorre na região centro-sul do Estado e em partes do Pantanal.
- Subtropical úmido (Cwa): clima chuvoso com inverno seco, onde as temperaturas do mês mais quente são superiores a 22 °C. Ocorre no sul do Estado, em áreas com altitudes de 700 m.

Mapa Climático do estado de Mato Grosso

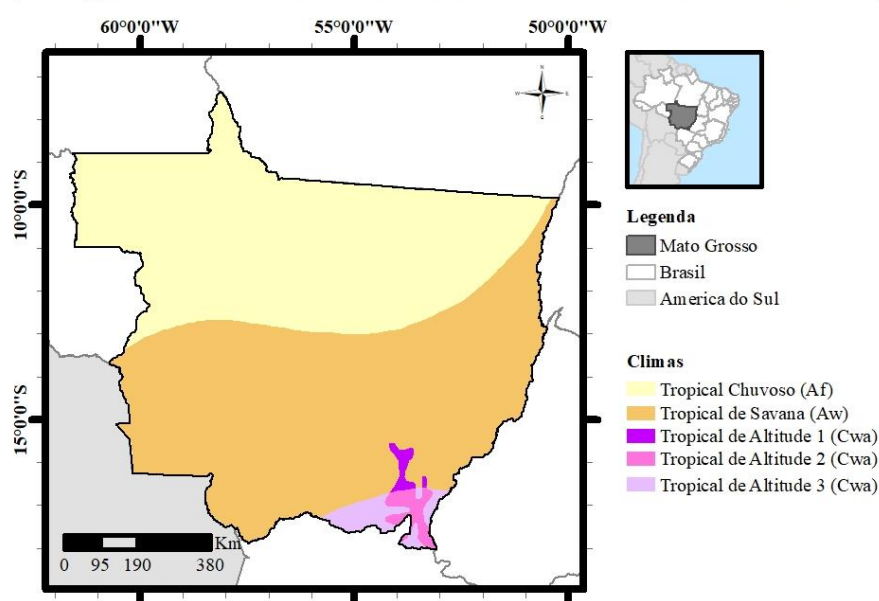


Figura 2-1: Classificação climática de Köppen no Mato Grosso.
Fonte adaptada: Maranholi (2017)

O estado de Mato Grosso, devido à grande extensão latitudinal, caracteriza-se por ser uma região de transição entre os climas quentes de latitudes baixas e os climas tropicais do Brasil Central (SANTOS, 2000). Estas características territoriais, fazem com que persista na estação chuvosa um esquema de circulação atmosférica de superfície associado às baixas pressões do Continente Sul Americano, enquanto, na estação seca ocorre o avanço dos centros de alta pressão sobre as áreas centrais da América do Sul (NIMER, 1972; SANTOS, 2000). De maneira geral, os principais sistemas de circulação atmosférica que atuam no estado de Mato Grosso são a massa equatorial continental (mEc), a massa tropical continental (mTc), a massa tropical atlântica (mTa) e a massa polar (mP) (Figura 2-2)(SERRA; RATISBONNA, 1942; MONTEIRO, 1951; NIMER, 1972), brevemente descritas a seguir:

- **Massa Equatorial Continental (mEc):** está ligada ao cinturão das baixas pressões equatoriais continentais da América do Sul localizado na Floresta Amazônica. Por se formar em uma zona de baixa pressão, essa massa de ar se configura como um sistema atmosférico ciclônico com movimento ascendente e convergente, concentrando e transmitindo para as camadas superiores da atmosfera tanto a umidade gerada pela evapotranspiração da densa vegetação e dos abundantes corpos hídricos da Floresta Amazônica quanto aquela originada pela evaporação do Oceano Atlântico, que é transportada pelos alísios. Essa massa de ar se desloca para o restante do país em uma trajetória NO-SE e por trazer grande proporção de umidade é responsável pelas chuvas durante a primavera-verão.
- **Massa Tropical Continental (mTc):** tem origem na depressão continental do Chaco, uma depressão barométrica quente e árida a leste dos Andes. Por se formar numa zona de baixa pressão, a mTc possui uma circulação ciclônica na superfície, com forte convergência. A baixa umidade da zona de origem impede a formação de nuvens de convecção, acarretando um tempo estável, quente e seco. Essa massa de ar atua de maneira mais expressiva durante a primavera-verão.
- **Massa Tropical Atlântica (mTA):** sua fonte de origem está ligada ao Anticiclone do Atlântico Sul, recebendo, de forma homogênea, muito calor e umidade da superfície oceânica. Ao ter que transpor a barreira topográfica

condicionada pela Serra do Mar, da Mantiqueira, do Espinhaço e pela Chapada Diamantina antes de adentrar o país, toda a umidade dessa massa é precipitada na região litorânea brasileira. Assim, a mTa caracteriza-se como uma massa “continentalizada” ao adentrar o estado de Mato Grosso, apresentando pouca ou nenhuma umidade e condicionando tempo estável, quente e seco;

- **Massa Polar (mP):** este sistema acompanha a evolução e o deslocamento da frente polar no continente Sul Americano. Em função de sua trajetória pode ser classificado como de origem oceânica ou continental, sendo esta última mais frequente durante o inverno quando provoca o fenômeno da “friagem”.

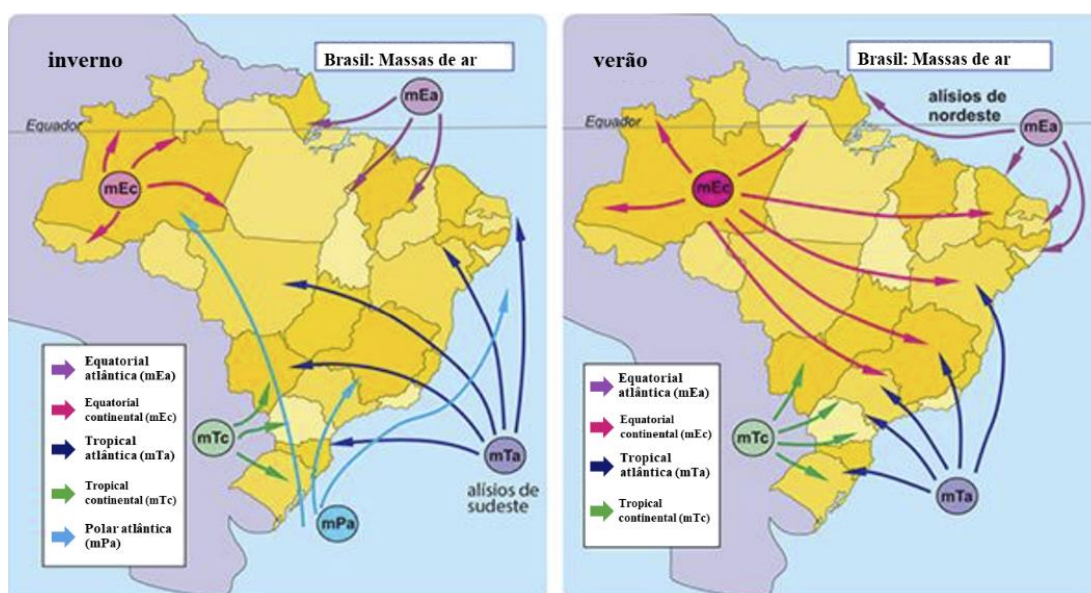


Figura 2-2: Massas de ar atuantes no Brasil.

Fonte adaptada: Nascimento, 2020.

Entre a primavera/verão e outono/inverno ocorre a inversão da atuação e do domínio de massas de ar continentais (mEc e mTc) e marítimas (mTa e mP) no estado de Mato Grosso (Figura 2-2), as quais são responsáveis pela determinação dos períodos sazonais chuvoso e seco, respectivamente. Além dessa massa de ar, a circulação habitual da atmosfera no estado, periodicamente, é interrompida e modificada por sistemas atmosféricos perturbadores, a saber: Zona de Convergência

Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Frente Polar (FP) (NASCIMENTO, 2020; SILVA, et al., 2008)

Segundo Felfili (2002), o conceito de bioma refere-se a uma subdivisão biológica da superfície terrestre que reflete o caráter ecológico e fisionômico da vegetação e que corresponde aproximadamente com as regiões climáticas, embora outros fatores ambientais possam ser importantes. Assim, no estado do Mato Grosso a distribuição dos biomas reflete, em geral a distribuição climática apresentando 3 biomas distintos em seu território: a Amazônia, o Cerrado e o Pantanal (Figura 2-3)

Mapa dos Biomas do estado de Mato Grosso

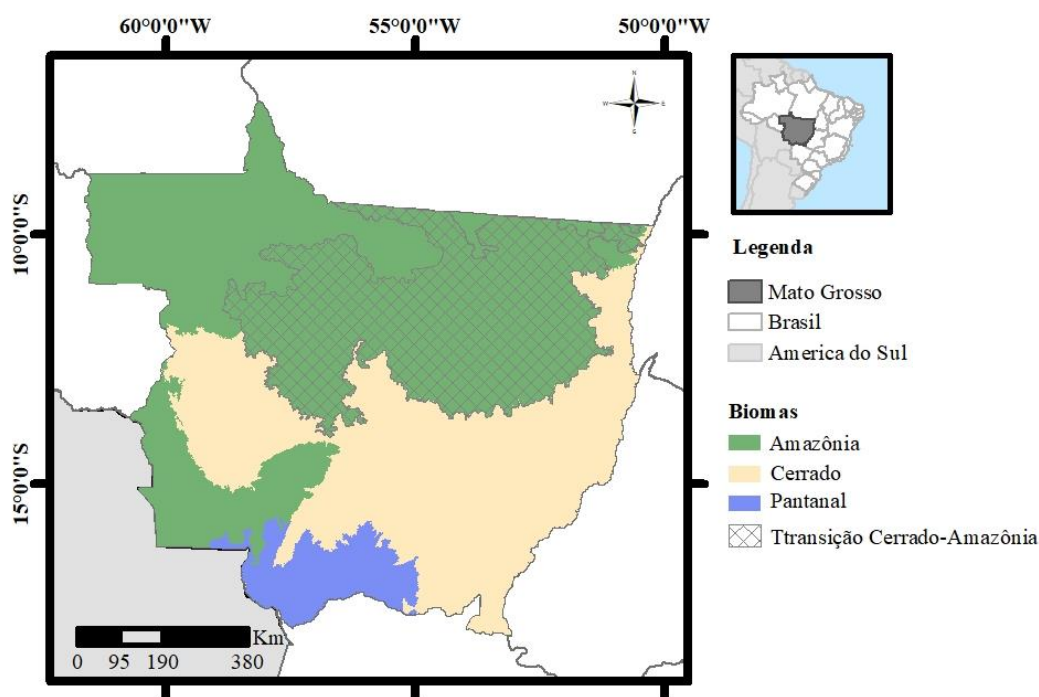


Figura 2-3: Mapa da distribuição dos biomas no estado de Mato Grosso.

O bioma cerrado corresponde a um conjunto de formações campestres, savânicas e florestais que se distribui na região Centro-Sul do estado (SCARIOT, et al. 2005). A porção Amazônica do estado, localiza-se, principalmente, na região Norte do Mato Grosso, apresentando um conjunto de florestas estacional perenifólia e a floresta ombrófila típicas da borda sul da Amazônia (AB'SABER, 2002). Por fim, a formação correspondente ao complexo de áreas sazonal e permanentemente

inundáveis do Pantanal está localizada na região Sul do estado do Mato Grosso, caracterizando-se por um mosaico de florestas semidecíduas, florestas decíduas e diferentes tipos de formações campestres e savânicas (ADÁMOLI, 1982).

2.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O processo combinado de perda de água da superfície do solo através da evaporação e do dossel da planta através da transpiração, é tratado como evapotranspiração (ET) (ALLEN et al., 1998). A evaporação consiste na remoção da água de uma superfície pela conversão de água líquida em vapor de água, sendo esse processo diretamente associado às variáveis meteorológicas como a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade do ar e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998; RENIU, 2017). A transpiração, por sua vez, consiste na vaporização da água no estado líquido que está contida nos tecidos vegetais e sua transferência para a atmosfera. Parâmetros físicos como radiação, temperatura, umidade e vento também afetam a transpiração, no entanto, por ser um processo fisiológico, também depende do teor de água do solo, da capacidade do solo de conduzir a água às raízes, além de características da cultura, aspectos ambientais e práticas de cultivo (ALLEN et al., 1998; TAIZ et al., 2017; MAROUELLI et al., 2011).

A taxa em que a ET ocorre depende basicamente de quatro fatores: clima, umidade do solo, cobertura vegetal e manejo da terra; sendo os dois primeiros os mais importantes (THORNTHWAITE; MATHER, 1951). Considerando os fatores meteorológicos que determinam a evapotranspiração, as principais variáveis são: a radiação solar, a temperatura, a umidade do ar e a velocidade do vento.

- **Radiação solar (Rs):** a radiação é a principal força motriz e fator limitante da ET, pois restringe a quantidade de energia disponível para a vaporização da água (ABTEW, 1996; ALLEN et al., 1998). Devido a diferenças na posição do Sol em relação à Terra a quantidade potencial de radiação que pode alcançar a superfície varia conforme a latitude e época do ano. Além disso, fatores como a turbidez da atmosfera e presença de nuvens podem reduzir a quantidade de radiação incidente, visto que, as condições atmosféricas interferem nos processos de reflexão e absorção de grandes partes da radiação extraterrestre (ALLEN et al., 1998).

- **Umidade do ar (UR):** A umidade representa o teor de vapor de água no ar e seu incremento reduz a taxa de ET de uma superfície (ABTEW; MELESSE, 2013). Uma forma de expressar a umidade é através da pressão de vapor de água, que é uma medida de pressão parcial aplicada por moléculas de vapor de água no ar. A diferença entre a pressão de vapor de água na superfície evapotranspirante e o ar circundante, ou seja, o gradiente de vapor entre dois ambientes define quão rápido o processo de evapotranspiração será realizado, sendo o transporte de moléculas mais forte quanto maior o gradiente (OKE, 1978). Dessa maneira, cultivos bem irrigados em regiões áridas quentes e secas tem a capacidade de transferir grandes quantidades de água, devido à abundância de energia e a capacidade de retenção de água na atmosfera (ALLEN et al., 1998). Por outro lado, em regiões tropicais úmidas, a alta umidade do ar faz com que a demanda de evapotranspiração seja menor, devido ao fato de o ar já estar próximo da saturação, de modo que menos água adicional pode ser armazenada (ALLEN et al., 1998).
- **Temperatura do ar (Tar):** A temperatura do ar é outra variável que atua na ET por meio da regulação dos gradientes de saturação do ar. Segundo Allen et al. (1998), a pressão na qual o ar satura é chamada de pressão de vapor de saturação e aumenta logaritmicamente com a temperatura. Em uma situação na qual a temperatura seja constante, a quantidade de vapor de água necessária para chegar ao ponto de saturação é chamada de déficit de pressão de vapor. Assim, considerando que a temperatura entre a camada de ar e a superfície estejam em equilíbrio, quanto maior for a temperatura maior será o déficit e, conseqüentemente, a taxa evapotranspirativa (OKE, 1978).
- **Velocidade do vento (VV):** Outra variável importante ao processo da evapotranspiração são a velocidade do vento e a turbulência do ar, visto que ambas são responsáveis pelo movimento das camadas de ar sobre a superfície evaporante (MEDEIROS, 2002). O vento impulsiona a ET pela remoção do ar saturado de vapor d'água acima da superfície evaporante, proporcionando assim condições de ambiente seco que aumentam o gradiente de pressão de vapor e da taxa de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração desempenha grande influência nos processos hidrológicos, visto que é o principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, estando diretamente relacionada com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial (LIANG et al., 2008). Assim, estimativas precisas da evapotranspiração são essenciais para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar o efeito do uso da terra e mudanças no balanço hídrico (ORTEGA-FARIAS et al., 2009; DE LA CASA; OVANDO, 2016; NAM et al., 2015; DIAS et al., 2015; LI, et al., 2017). Contudo, apesar de a evaporação, que depende principalmente de características físicas, ser um processo que pode ser estimado com boa precisão, a partição representada pela transpiração, que depende além dos fatores climáticos da fisiologia do vegetal, atualmente, necessita de métodos complexos para suas estimativas. Dessa maneira, a estimativa da ET pode tornar-se um processo moroso uma vez que a evaporação e a transpiração acontecem simultaneamente sendo uma tarefa complexa a distinção entre eles (ALLEN et al., 1998), havendo a necessidade da padronização do tipo de cobertura para facilitar as estimativas da evapotranspiração, como acontece nas estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0).

2.2.1 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência (ET_0) corresponde à perda de água de uma cultura hipotética de gramado verde, com altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo, e sem falta de água (Figura 2-4). Ao padronizar o componente vegetal da área evapotranspirativa (altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cobertura ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1}) a ET_0 passa a expressar o poder evaporativo da atmosfera em localização e tempo específicos (ALLEN et al., 1998) e cujos resultados são comparáveis com valores obtidos em outras localidades ou períodos.



Figura 2-4: Esquema da evapotranspiração de referência (ET_0).
Fonte Adaptada: Allen et al. (1998)

Ao longo dos anos, diferentes métodos foram desenvolvidos para estimar a ET_0 , os quais, segundo seus fatores fundamentais, podem ser divididos em: métodos de transferência de massa, equações de radiação e equações de temperatura (PENMAN, 1948; THORNTHWAITE, 1948; BLANEY; CRIDDLE, 1950; HARBECK, 1962; PRIESTLEY; TAYLOR, 1972; GUITJENS, 1982). A equação de Penman-Monteith é um modelo físico baseado na combinação de métodos de transferência de massa e radiação que incorpora aspectos aero-termodinâmicos, incluindo na sua dedução a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor da água (FERNANDES et al., 2001). Atualmente, o método Penman-Monteith é a metodologia recomendada pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) para estimar a evapotranspiração de referência sempre que os dados de entrada necessários estiverem disponíveis (ALLEN et al., 1998).

2.2.3 Método de Penman-Monteith

Segundo os resultados obtidos por Allen et al. (1989) ao comparar a evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman, Kimberly-Penman, Penman corrigido e Penman-Monteith com medições lisimétricas, o modelo de Penman-Monteith apresentou os melhores ajustes as medições diárias e mensais. Assim, a FAO, a partir do Irrigation and Drainage Paper 56 (ALLEN et al., 1989), passou a recomendar o método parametrizado de Penman-Monteith (Equação 2-1) como o mais adequado para estimar a ET_0 . As principais parametrizações do método foram a proposta de uma “cultura hipotética” com altura de 0,12 m, além do uso da resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T+273} \right) VV(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34VV)} \quad \text{Equação 2-1}$$

Em que:

ET_0 – é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}),

R_n - é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$);

G - é a densidade de fluxo de calor na superfície do solo ($\text{MJ m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$);

T - é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura (valor médio da temperatura máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}), $^{\circ}\text{C}$);

VV - é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});

es - é a pressão de vapor de saturação (kPa);

ea - é a pressão de vapor real (kPa);

Δ - é a inclinação da pressão de vapor de saturação versus curva de temperatura do ar ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ - é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Com base em um conjunto de dados de umidade relativa (UR) e temperaturas máxima e mínima do ar (T_{max} e T_{min}), é possível estimar as variáveis Δ , γ , es e ea conforme as Equação 2-2 a Equação 2-6.

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} \times P_{\text{atm}} \quad \text{Equação 2-2}$$

$$P_{\text{atm}} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad \text{Equação 2-3}$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 \times T}{T+237,3} \right) \right]}{(T+237,3)^2} \quad \text{Equação 2-4}$$

$$e_s = 0,6108 \exp. \left[\frac{17,27 \times T}{T+237,3} \right] \quad \text{Equação 2-5}$$

$$e_a = \frac{e_s \times UR}{100} \quad \text{Equação 2-6}$$

Em que:

P_{atm} = é a pressão atmosférica (kPa);

z = é a altitude em relação ao nível do mar (m);

$\exp.$ = é a base do logaritmo natural (2,7183); e

Visto que poucas estações meteorológicas dispõem de sensores para a determinação da radiação líquida (R_n), é comum a sua estimativa com base na radiação global incidente (R_s), conforme Equação 2-7 a Equação 2-10.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad \text{Equação 2-7}$$

$$R_{ns} = 1 - \alpha(R_s) \quad \text{Equação 2-8}$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max K} + T_{\min K}}{2} \right] \left(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left(1,35 \frac{SRD}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad \text{Equação 2-9}$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} Z) R_a \quad \text{Equação 2-10}$$

Em que:

R_{ns} = é a radiação de onda curta líquida que chega à superfície terrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

R_{nl} = é a radiação de onda longa que chega à superfície terrestre;

α = é o albedo (assume o valor de 0,23 para grama de referência, adimensional);

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

$T_{\max K}$ = é a temperatura máxima absoluta durante o período de 24 h (K);

$T_{\min K}$ = é a temperatura mínima absoluta durante o período de 24 h (K);

R_{so} = é a radiação de céu claro medida ou calculada ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

R_a = é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

A recomendação da equação FAO Penman-Monteith (Equação 2-1) como padrão das estimativas da ET_0 diária e mensal se baseia no fato de a mesma ser usada globalmente sem a necessidade de calibração local, uma vez que incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos, e foi validada em diferentes ambientes usando precisas medidas de lisímetro (BARROS et al., 2009; BERTI et al., 2014; LACERDA; TURCO, 2015; PATEL et al., 2015; LIMA JUNIOR et al., 2016).

2.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE SOBOL

A análise de sensibilidade pode ser definida como o estudo da influência que a variabilidade dos parâmetros de entrada de um modelo tem na variabilidade de sua resposta. A utilização de análises de sensibilidade permite entender o comportamento de modelos hidrológicos, sendo úteis na identificação dos parâmetros de entrada mais críticos, na simplificação de modelos e no estabelecimento de prioridades em futuras

investigações (SALTELLI et al., 2000; SALTELLI et al., 2004; CARIBONI et al., 2007; SALTELLI et al., 2008; SONG et al., 2015). Os métodos de análise de sensibilidade podem ser divididos em locais e globais.

O método determinístico ou método local avalia individualmente a influência de cada parâmetro do modelo na resposta do mesmo. No método, cada parâmetro tem sua variação de entrada ponderada individualmente, mantendo as outras entradas constantes, e obtêm-se a resposta da saída (Figura 2-5). Para resolução desses métodos utilizam-se derivadas parciais, possivelmente normalizadas pelo valor nominal das entradas ou pelo desvio-padrão (SALTELLI et al., 1999). Contudo, os métodos locais determinam a importância do parâmetro em um único ponto do espaço amostral e devem ser aplicados somente a modelos lineares ou aditivos (SALTELLI; ANNONI, 2010; PECHLIVANIDIS et al., 2011; TIAN, 2013).

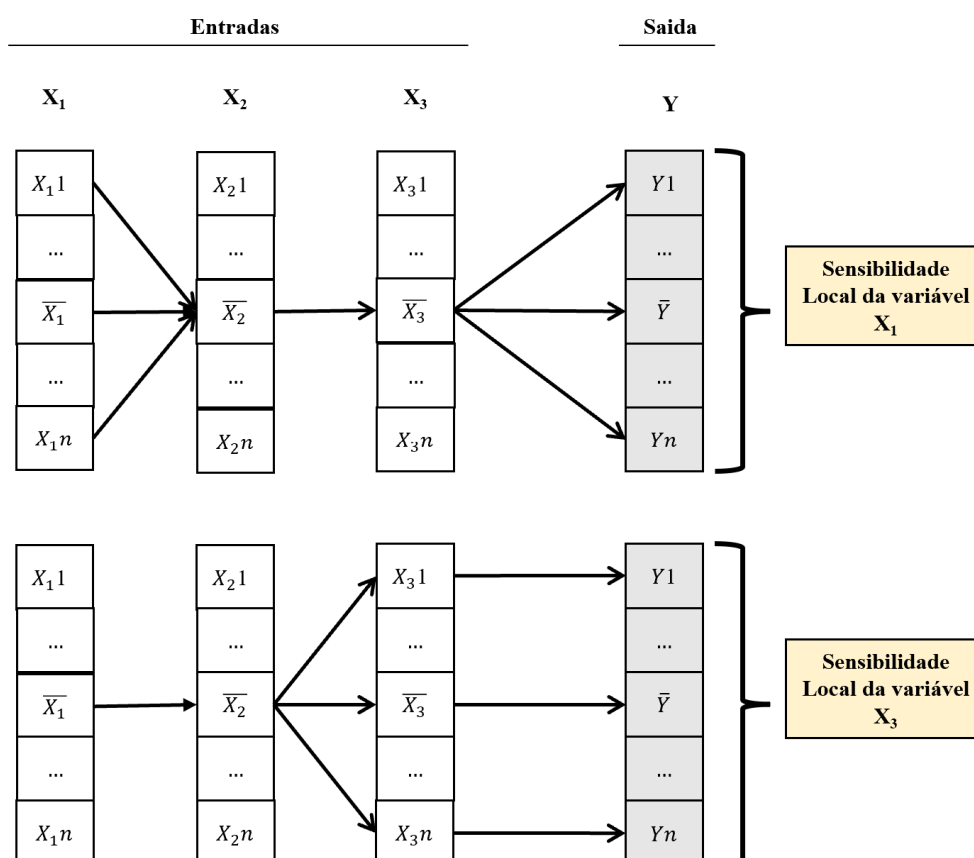


Figura 2-5: Esquema simplificado do processo de estimativa da sensibilidade local das variáveis de um modelo. X_1 , X_2 e X_3 representam as variáveis de entrada de um modelo qualquer com resposta igual a Y .

Os métodos probabilísticos ou métodos globais avaliam a interação entre os dados de entrada e quantificam a influência dos parâmetros na variável resposta do modelo, considerando toda a sua faixa de variação (Figura 2-6). Ele é considerado mais completo por se referir à variação de todas as entradas simultaneamente. Esse método permite uma análise global da influência de diferentes entradas na resposta do sistema. Além disso, possibilita avaliar as interações entre as entradas para a variância do padrão de saída. Assim, esse método é recomendado para modelos não lineares e não monotônicos (MAKLER-PICK et al., 2011; TIAN, 2013). Entre os métodos globais destaca-se o de Sobol (SOBOL, 1993).

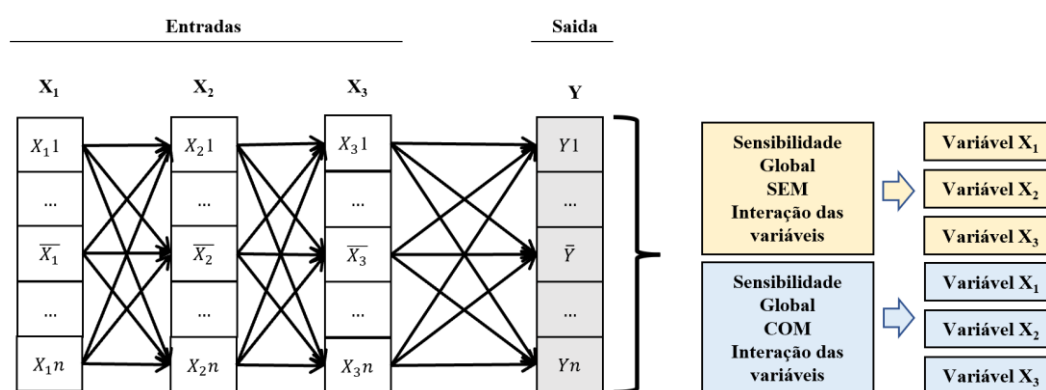


Figura 2-6: Esquema simplificado do processo de estimativa da sensibilidade global das variáveis de um modelo. X_1 , X_2 e X_3 representam as variáveis de entrada de um modelo qualquer com resposta igual a Y

O método de Sobol é um dos principais métodos de análise de sensibilidade global. A análise de sensibilidade de Sobol investiga a contribuição de cada variável de entrada e suas interações para a variância geral da saída do modelo (SOBOL, 1993; SOBOL, 2001; SALTELLI et al., 2008, SALTELLI et al., 2010). O método tem como objetivo determinar quanto da variabilidade da resposta do modelo depende de cada uma das entradas de maneira individual ou pela interação entre diferentes variáveis de entradas.

Para aplicação do método da análise de sensibilidade de Sobol, tem-se o interesse em dois coeficientes de sensibilidade: o índice de sensibilidade de primeira ordem (S_1) e o índice de sensibilidade de ordem total (S_{tot}). Avaliando-se o valor do

índice S_1 para cada variável de entrada é possível determinar qual a variável que individualmente tem o maior efeito sobre a resposta do modelo. O índice S_{tot} de uma dada variável de entrada, por outro lado, leva em conta não somente a influência individual da variável, como também a influência associada a todas as interações com as demais variáveis.

Algumas das principais propriedades dos índices de Sobol são destacadas por Saltelli et al. (2008):

- S_1 indica, em média, o quanto se pode reduzir a variância da resposta do modelo caso a variável tenha seu valor fixado (constante);
- Se S_{tot} for igual a zero, conclui-se que a variável não tem qualquer influência nos resultados, podendo ser desprezada em futuras análises;
- O somatório de todos os índices de primeira ordem é igual a 1 quando não há interação entre variáveis (modelos aditivos) e inferior a 1 quando o efeito das interações é significativo (modelos não-aditivos);

2.4 EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

As mudanças climáticas referem-se a um conjunto de alterações do estado do clima podendo ser identificadas por mudanças nas médias e/ou variabilidade dos parâmetros climáticas persistindo por um período extenso e cuja causas podem ser devido a processos internos, forçantes externas (como as modulações dos ciclos solar, vulcanismo, entre outros), assim como, devido a atividades antrópicas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2007).

As mudanças climáticas são amplamente reconhecidas na comunidade científica havendo consenso que impactem diretamente nos ciclos hidrológicos (HUNTINGTON, 2006). No entanto, seus efeitos na evapotranspiração ainda não são conclusivos devido à complexidade de sua quantificação, assim como, à falta de pesquisa relacionadas (ABTEW; MELESSE, 2013; SERRAT-CAPDEVILA, et al., 2011). De maneira geral, espera-se que a mudança climática altere as taxas de evapotranspiração através de mudanças na temperatura, umidade, velocidade do vento, radiação solar incidente e padrões de precipitação (ABTEW; MELESSE, 2013). Contudo, apesar de alguns estudos proporem que o aumento na ET superaria o

aumento da precipitação, levando a uma redução da cobertura de nuvens, o que, por sua vez, aumentaria a radiação e a temperatura, e reduziria a umidade (HUNTINGTON, 2006). Outros estudos concluem que a ET não aumentará tanto quanto a precipitação global devido à maior concentração de CO₂ o que levaria ao fechamento dos estômatos, reduzindo assim a taxa de transpiração (OKI, 2006).

Outra questão relevante a se considerar nos cenários dos efeitos das mudanças do clima na evapotranspiração é a alteração da capacidade de retenção de água da atmosfera, visto que essa é diretamente afetada pela temperatura (RIND et al., 1990). Deste modo, o incremento das médias da temperatura do ar devido ao aquecimento global desencadeariam um aumento do gradiente de vapor, e, portanto, da evapotranspiração.

Por fim, a literatura sugere que a mudança climática terá impactos significativos nas taxas de evapotranspiração, com consequências potencialmente significativas para os ecossistemas, agricultura e gestão dos recursos hídricos. Entretanto, mais pesquisas são necessárias para entender melhor as complexas interações entre as mudanças climáticas e a evapotranspiração e para desenvolver estratégias eficazes para se adaptar e mitigar os impactos dessas mudanças.

2.5 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS DO CMIP5

Devido à grande extensão territorial e períodos muito longos de tempo dos sistemas climáticos a abordagem por métodos experimentais não é possível em estudos do clima global. Assim, a modelagem climática foi criada com o objetivo de facilitar o entendimento dos sistemas climáticos globais. Inicialmente os modelos climáticos foram derivados de modelos conceituais, os quais foram aprimorados por meio da adição de modelos matemáticos e da implementação dos modelos computacionais, sendo o primeiro Modelo Climático Global (MCG) lançado em 1955, por Norman Phillips (EDWARDS, 2011).

Os modelos de circulação geral ou modelos climáticos globais (MCGs), consistem em simulações computacionais que recriando, através de fórmulas matemáticas, os processos químicos e físicos responsáveis por impulsionar o clima do planeta. Os MCGs, em geral, funcionam em um sistema tridimensional em que os modelos matemáticos são calculados em um sistema de grades compostos por células

horizontais (cartesiana – como latitude e longitude) e verticais (como altitude e pressão atmosférica) (EDWARDS, 2011) (Figura 2-7).

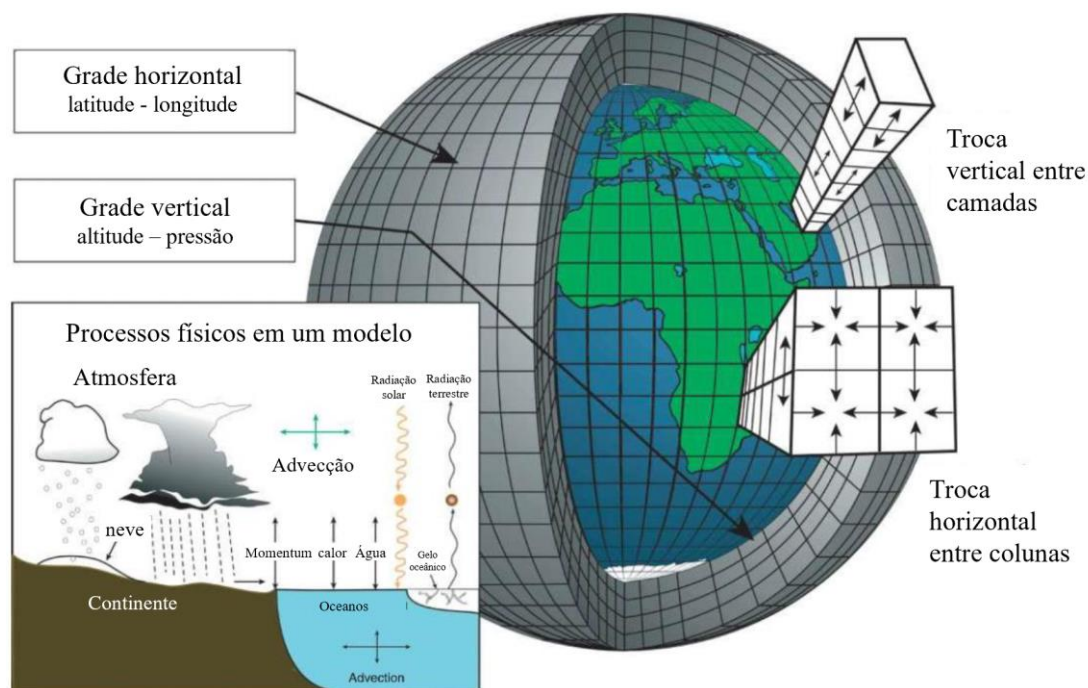


Figura 2-7: Representação esquemática da estrutura de grades de um modelo climático global (MCG) mostrando a interação entre as células e os componentes físicos envolvidos.

Fonte adaptada: Edwards, 2011.

Ao longo do século 20 houve um crescimento constante e organizado da comunidade de modeladores com o objetivo de elaborar modelos de previsão global aprimorados. A este respeito, o Programa Mundial de Investigação Climática iniciou, em 1995, o Projeto Inter-comparação de Modelos Acoplados (do inglês “Coupled Model Intercomparison Project” - CMIP), que visa unificar formatos e comparar informações da comunidade mundial de pesquisadores do clima. Em 1995 iniciou-se a quinta fase do CMIP (CMIP5), que colaborou no desenvolvimento do Quinto Relatório de Avaliação (5AR) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC) que foi responsável pelo lançamento dos cenários de emissão de gases de efeito estufa utilizados nas estimativas de previsão dos MCGs pertencentes ao CMIP5.

2.5.1 Cenários Climáticos do CMPI5

A primeira publicação sobre a ideia de que os gases derivados dos combustíveis fósseis eram o motor de uma possível mudança no clima foi feita por Arrhenius (1896), mas somente após as medições realizadas na ilha de Mauna Loa e publicadas por Keeling (1960) que a ideia começou a ser levantada pela comunidade científica. Finalmente, em 1988, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas foi estabelecido como uma ferramenta de base científica das mudanças climáticas e, a partir disso, foram organizados grupos de pesquisa com a finalidade de entender como o sistema da Terra pode reagir às atividades humanas e como as diferentes contribuições antropogênicas podem afetar as mudanças climáticas, além de, avaliar possíveis impactos futuros de nossas ações atuais (MOSS et al., 2010).

Os primeiros cenários foram desenvolvidos com auxílio de modelos climáticos de maneira a avaliar como o clima responderia, considerando apenas, as alterações das concentrações de dióxido de carbono. Atualmente, contudo, os modelos consideram uma ampla variedade de condições, não apenas físicas, mas também econômicas e políticas (MOSS et al., 2010). Assim, devido à complexidade dos novos cenários, fez-se necessária a elaboração de um esquema conjunto de pesquisas para garantir que os resultados científicos mundiais fossem homogeneizados.

O primeiro conjunto de cenários de emissões proposto pelo IPCC foi elaborado em 1990 no Primeiro Relatório de Avaliação (SA90), e definiu cinco vias de emissão (HOUGHTON et al., 1990). Devido ao surgimento de novas informações relevantes para os desenhos de cenários, o IS92 foi criado no Segundo Relatório de Avaliação contendo seis cenários que revisavam as previsões populacionais e incluíam questões como as emendas do Protocolo de Montreal (IPCC, 1995). No entanto, em 1995, o IS92 foi revisto e a avaliação recomendou alterações significativas, desencadeando a criação do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES) utilizado no Terceiro Relatório de Avaliação (2001) e no 4º Relatório de Avaliação (2007) (IPCC, 2001; GRIGGS; NOGUER, 2002; IPCC, 2007).

A fim de tornar os cenários mais compreensíveis para os formuladores de políticas, os SRES foram complementados com tendências sobre o desenvolvimento socioeconômico futuro (IPCC, 2001). Por fim, tendo em vista a possibilidade de não haver nenhum cenário de emissão considerando ações de formulação de políticas para

mitigar as mudanças climáticas foram desenvolvidas as Vias de Concentração Representativas (do inglês “Representative Concentration Pathways” - RCPs) (MOSS et al., 2010), sendo este sistema de cenários climáticos aplicado no 5º Relatório de Avaliação do IPCC em 2013 (IPCC, 2014) e utilizado na elaboração dos modelos do CMIP5.

Os RCPs são um produto da colaboração entre modeladores climáticos, modeladores de ecossistemas terrestres e especialistas em inventário de emissões, correspondendo a um conjunto de dados abrangente de alta resolução espacial por um período que se estende até 2100 (MOSS et al., 2010). As trajetórias do novo sistema estão associadas a diferentes combinações de futuros econômicos, tecnológicos, demográficos, políticos e institucionais, em vez de cenários socioeconômicos ou de emissões únicos (MOSS et al., 2010). Os RCPs propõem quatro cenários diferentes, nomeados pelo seu forçamento radiativo (Figura 2-8): o RCP2.6, representando um cenário de mitigação com um nível de força muito baixo (VAN VUUREN et al., 2011); o RCP4.5 e RCP6.0 considerados como dois cenários de estabilização média (THOMSON et al., 2011; MASUI et al., 2011); e o RCP8.5 o cenário de alta emissão com aumento contínuo (RIAHI et al., 2011).

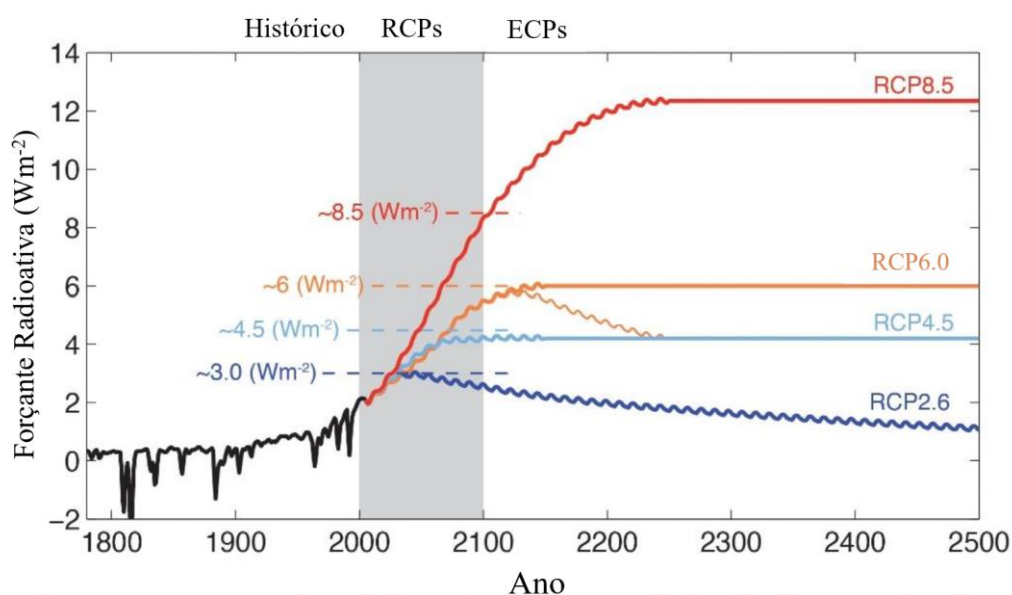


Figura 2-8: Representação esquemática da evolução temporal da forçantes radioativas nos diferentes cenários das Vias de Concentração Representativas (RCPs).

Fonte adaptada: IPCC, 2014.

- **RCP 2.6:** é um cenário otimista que descreve um futuro em que as emissões de gases de efeito estufa são significativamente reduzidas, levando a uma estabilização das concentrações atmosféricas de CO₂ em torno de 450 ppm até 2100 e das forçantes radioativas em 2,6 Wm⁻². Esse cenário pressupõe que as emissões globais atingirão o pico até 2020 e, em seguida, diminuirão rapidamente a partir de então, devido implantação de tecnologias de mitigação generalizadas e mudanças no estilo de vida. O RCP 2.6 projeta um aquecimento limitado a cerca de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais e onde os impactos mais severos das mudanças climáticas são evitados.
- **RCP 4.5 e 6.0:** são cenários de estabilização global de longo prazo do forçamento radiativo da Terra em 4,5 e 6,0 Wm⁻² (aproximadamente 650 e 850 ppm de CO₂). Esse cenário considera que as políticas climáticas tomarão medidas para limitar as emissões e estabilizar a força radiativa de maneira que o pico de emissão ocorram em 2040 e 2080, respectivamente. Os RCP 4.5 e 6.0 projetam um aquecimento limitado a cerca de 2,0 a 2.5 °C acima dos níveis pré-industriais. Nesses cenários, contudo, espera-se que ocorram alguns dos impactos severos das alterações climáticas, tais quais, aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos como ondas de calor, secas e eventos de inundação, mudanças nos padrões de precipitação e derretimento do gelo marinho do Ártico, bem como, impactos negativos na segurança alimentar e nos ecossistemas.
- **RCP 8.5:** Com base em um cenário de altas emissões e vulnerabilidade, o RCP8.5 representa o "cenário de base", onde nenhuma meta específica de mitigação climática é considerada e um forçamento radiativo de 8,5 Wm⁻² (mais de 1.350 CO₂) deve ser alcançado até 2100. Trata-se de um cenário de alta emissão, com um caminho de desenvolvimento socioeconômico caracterizado por taxas lentas de desenvolvimento econômico, rápido aumento populacional e lenta mudança tecnológica. O RCP 8.5 projeta que o aquecimento supere 4,0 °C levando a graves impactos nas sociedades humanas e nos sistemas naturais, sendo considerado como um cenário pessimista e a pior das hipóteses.

3. ARTIGO 1: PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES DE DADOS METEOROLÓGICOS NO ESTADO DE MATO GROSSO

Resumo: A obtenção de series temporais meteorológicas sem falhas é importante nos estudos agro-hidrometeorológicos. Assim, este artigo objetiva introduzir o programa GapMET, desenvolvido pelos autores, e avaliar o desempenho de seis métodos de preenchimento de falhas em séries históricas de temperatura máxima e mínima do ar, velocidade do vento, umidade relativa e radiação global, no estado de Mato Grosso, visando a construção de um banco de dados de referência. Elaborou-se e empregou-se o software GapMET, com preenchimentos de dados baseados em medidas de estações vizinhas e produtos de satélites. A precisão das estimativas foi aferida pela quantidade de falhas não preenchidas, viés, RMSE e correlação de Pearson, em agrupamentos de sete bases diferentes de dados, com variações de 25 a 80% de falhas. O software GapMET apresentou bons resultados no preenchimento de falhas meteorológicas, independentemente do método de estimativa. Métodos que utilizam apenas uma estação meteorológica vizinha como série referência apresentaram melhores resultados visto que, no estado, a distância mínima para que uma estação meteorológica tenha ao menos três estações vizinhas como referência foi de 350 km, reduzindo, assim, a semelhança climática entre elas e, conseqüentemente, a precisão do preenchimento quando mais de uma série de referência foi utilizada. O uso de séries obtidas por satélite reduziu a probabilidade de falhas não serem preenchidas, contudo, apresentou maiores erros de viés, RMSE e menores correlações. Conclui-se que os métodos de preenchimento do GapMET possuem um bom desempenho em estimar dados meteorológicos, destacando-se os métodos que utilizam apenas uma estação meteorológica vizinha como série referência para as condições da malha meteorológica do estado de Mato Grosso.

Palavras-chave: series temporais meteorológicas, dados meteorológicos mínimos, GapMET.

3.1. INTRODUÇÃO

A obtenção de séries temporais de dados meteorológicos de uma região é fundamental na elaboração de projetos agrometeorológicos e ambientais, como modelos de produção e zoneamentos agroclimáticos, balanços hídricos, manejo e dimensionamento de sistemas de irrigação, dentre outros (ARAÚJO-NETO et al., 2020; XIANG et al., 2020; SARNIGHAUSEN et al., 2021). Contudo, nas condições brasileiras, a coleta e armazenamento de series temporais meteorológicas está suscetível a falhas, tanto por fatores instrumentais como operacionais (BIER; FERRAZ, 2017; BRUBACHER et al., 2020). Esses problemas podem comprometer o uso das séries temporais, sobretudo, quando se busca avaliar tendências,

Artigo publicado como:

SABINO, M.; SOUZA, A. P. DE. Gap-filling meteorological data series using the GapMET software in the state of Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 149-156, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p149-156>.

estacionaridade e/ou sazonalidade das variáveis meteorológicas (BOX; COX, 1964), demandando, assim, a necessidade de preenchimento das falhas.

Na literatura, existe uma ampla variedade de métodos de preenchimento de falhas meteorológicas, como a média aritmética simples (MAS) (BIER; FERRAZ, 2017), método do Reino Unido (MUK) (TABONY, 1983), método do Inverso da distância (MID) (HUBBARD, 1994), método da ponderação regional (MPR) (PAULHUS; KOHLER, 1952), regressão linear simples (RLS) (BLEIDORN et al., 2022) e regressão linear múltipla (RLM) (COUTINHO et al., 2018). Um pré-requisito para a utilização desses métodos, contudo, é a existência de uma série de referência, podendo esta ser extraída de estações vizinhas ou dados de sensoriamento remoto.

Apesar desses métodos utilizarem indicativos estatísticos em suas calibrações e validações (análise de desempenho), ainda não há um consenso sobre qual metodologia ou base de dados de referência apresenta melhores resultados, visto que, estes dependem da precisão desejada, da distância e disponibilidade de estações próximas. O Estado de Mato Grosso, por exemplo, apesar da extensão territorial de 903.202.446 km² e de possuir três tipos climáticos distintos, o clima Af (clima equatorial úmido), Aw (clima de savana tropical) e o Cwa (clima tropical), (SOUZA et al., 2013, IBGE, 2019, ALVARES et al., 2013; JERSZURKI et al., 2019), possui apenas 33 estações meteorológicas automáticas (EMA) com mais de 10 anos, pertencentes a rede oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Deste modo, objetivou-se elaborar um software e avaliar a precisão dos métodos MAS, MUK, MID, MPR, RLS, e RLM utilizando dados de estações vizinhas e de sensoriamento remoto, como séries de referência, no preenchimento de falhas dos principais elementos meteorológicos monitorados em estações automáticas, no estado de Mato Grosso.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Local de estudo e processamento dos dados

Os dados utilizados foram obtidos das estações meteorológicas automáticas (EMAs) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas em 33 municípios do Mato Grosso (Tabela 3-1, Figura 3-1) no período de 01/01/2008 a

31/12/2020. As variáveis meteorológicas avaliadas foram radiação global incidente (R_s - MJ m⁻² dia⁻¹), umidade relativa do ar (UR - %), velocidade média do vento a 2 metros (VV - m s⁻¹) e temperatura máxima (Tmax - °C) e mínima do ar (Tmin - °C). Visto que a variável velocidade do vento nas EMAs do estado são obtidas a 10 m, a velocidade média a 2 metros foi obtida conforme Equação 3-1.

Tabela 3-1: Estações meteorológicas automáticas pertencentes a rede do INMET com mais de 10 anos de dados no estado de Mato Grosso, Brasil.

Código	Nome da Estação	Lat.	Lon.	Alt.	Porcentagem de falhas (%)				
					R_s	UR	Tmax	Tmin	VV
A-901	Cuiabá	-15,56	-56,06	242	41,27	14,02	15,25	16,59	26,38
A-902	Tangará da Serra	-14,65	-57,43	440	21,79	18,87	19,14	24,28	28,24
A-903	São José do Rio Claro	-13,45	-56,68	340	59,57	22,53	14,95	20,38	31,65
A-904	Sorriso	-12,56	-55,72	379	16,93	14,05	15,12	17,44	31,80
A-905	Campo Novo do Parecis	-13,79	-57,84	525	17,54	29,02	16,40	22,93	24,93
A-906	Guarantã do Norte	-9,95	-54,90	284	10,02	10,25	10,51	18,34	12,23
A-907	Rondonópolis	-16,46	-54,58	290	8,61	9,18	9,35	11,12	6,76
A-908	Água Boa	-14,02	-52,21	440	15,16	10,32	9,31	15,83	12,00
A-910	Apiacás	-9,56	-57,39	218	20,93	10,44	17,73	23,54	25,56
A-912	Campo Verde	-15,53	-55,14	748	11,69	13,98	12,80	15,14	13,50
A-913	Comodoro	-13,71	-59,76	577	16,32	15,46	11,18	14,23	13,43
A-914	Juara	-11,28	-57,53	263	17,10	14,63	15,03	23,96	26,17
A-915	Paranatinga	-14,42	-54,04	477	35,88	37,65	35,35	41,97	43,12
A-916	Querência	-12,63	-52,22	361	19,88	18,74	12,23	22,76	17,22
A-917	Sinop	-11,98	-55,57	367	25,67	18,57	16,36	22,68	17,20
A-918	Confresa	-10,64	-51,57	233	38,11	33,52	0,00	0,00	37,36
A-919	Cotriguaçu	-9,91	-58,57	265	28,28	16,19	16,99	25,58	15,69
A-920	Juína	-11,38	-58,77	365	8,78	10,49	8,53	0,00	12,30
A-921	São Felix do Araguaia	-11,62	-50,73	201	62,06	42,20	0,00	0,00	30,64
A-922	Vila Bela da Santíssima Trindade	-15,06	-59,87	213	11,41	13,52	14,09	16,55	37,31
A-924	Alta Floresta	-10,08	-56,18	292	44,49	16,30	17,27	26,07	32,11
A-926	Carlinda	-9,97	-55,83	294	10,63	6,93	5,54	8,17	11,22
A-927	Brasnorte (Novo Mundo)	-12,52	-58,23	426	31,84	23,08	22,87	26,26	33,29
A-928	Nova Maringá	-13,04	-57,09	334	8,00	7,73	9,43	18,30	20,13
A-929	Nova Uiratã	-13,41	-54,75	466	52,41	15,12	15,96	19,77	17,33
A-930	Gaúcha do Norte	-13,18	-53,26	376	17,69	14,76	15,86	19,75	21,08
A-931	Santa Antônio do Leste	-14,93	-53,88	664	10,78	10,25	8,99	13,71	11,64
A-932	Guiratinga	-16,34	-53,77	525	14,80	5,12	6,44	9,27	31,31
A-933	Itiquira	-17,17	-54,50	593	21,94	21,58	21,50	25,18	25,52
A-934	Alto Taquari	-17,84	-53,29	862	6,28	6,00	7,20	9,50	24,36
A-935	Porto Estrela	-15,32	-57,23	148	24,41	22,74	24,89	27,52	28,85
A-936	Salto do Céu	-15,12	-58,13	301	11,50	12,68	12,95	19,48	11,31
A-937	Pontes de Lacerda	-15,23	-59,35	273	7,64	6,15	8,55	13,33	10,07

OBS: Lat. = Latitude (graus); Log. = Longitude (graus); Alt. = Altitude (m). Variáveis meteorológicas: R_s - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m.

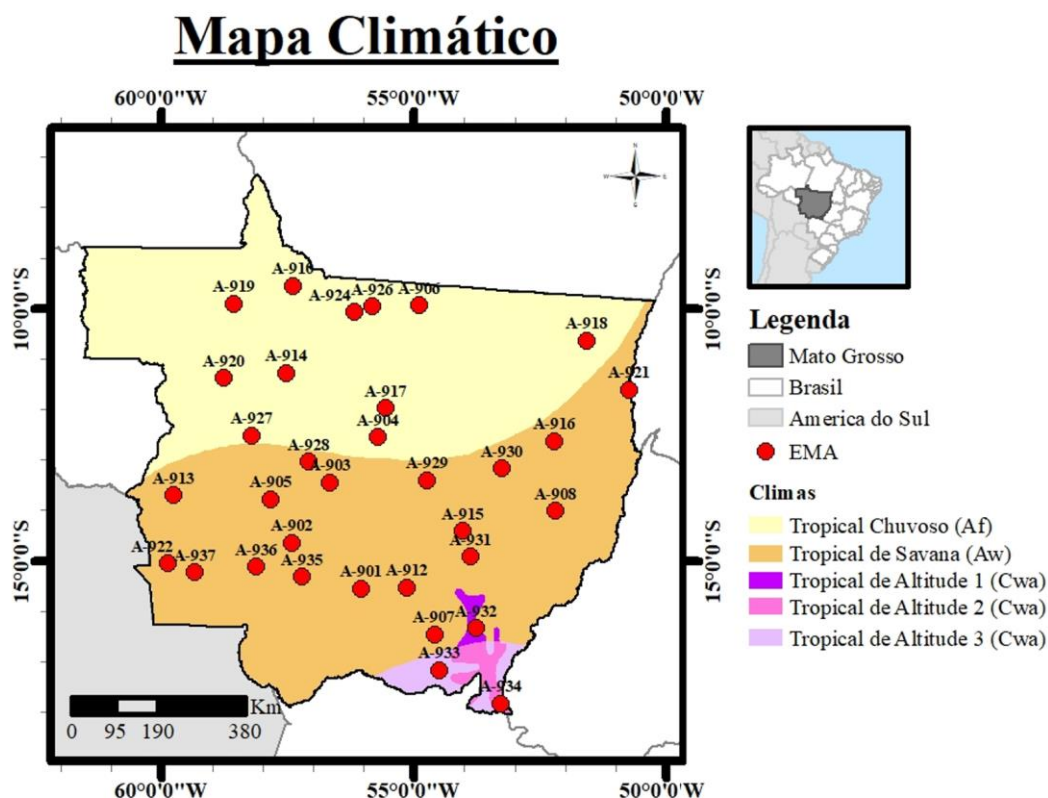


Figura 3-1: Localização das Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) nos climas do estado de Mato Grosso.

OBS: Identificação numérica das EMAs de acordo com a Tabela 3-1.

$$VV_2 = \frac{VV_{10} \times 4.87}{\ln(67.8 \times (H - 5.42))} \quad \text{Equação 3-1}$$

em que:

VV_2 - é a velocidade do vento a 2 metros (m s^{-1});

VV_{10} - é a velocidade do vento a 10 metros (m s^{-1});

H - é a altura em que a velocidade do vento foi obtida (m) – 10 metros;

3.2.2 Programa GapMET

Para a realização do preenchimento das falhas foi desenvolvido um programa em linguagem MATLAB e R denominado GapMET 1.0. Os arquivos com os scripts necessários para utilizar o GapMET estão disponíveis em: (<https://github.com/Marlus->

[Sabino/GapMET](#)). O GapMET permite escolher entre seis métodos de preenchimento de dados, assim como, definir as bases de dados de referência entre postos vizinhos ou séries externas.

O fluxograma do GapMET é apresentado na Figura 3-2. No programa, o usuário precisa definir cinco parâmetros de entrada: 1) tipo de série de referência (EMAs vizinhas ou séries externas); 2) método de preenchimento (MAS, MUK, MID, MPR, RLS ou RLM); 3) máximo de desvios padrão (limita os valores de preenchimento entre “D” desvios padrão (S_x) em relação à média ($\bar{x}$) dos dados observados de maneira que são descartados os dados preenchido que se encontrem fora do limite $\bar{x} \pm D \cdot S_x$); 4) Distancia Máxima entre EMAs (define um limite, em km, para que uma EMA seja incluída como série de referência); e 5) mínimo de EMAs de referência (define a quantidade mínimas de EMAs de referência necessárias no preenchimento). Além disso, o usuário deve prover a base de dados originais a ser preenchida, assim como, as coordenadas geográficas das EMAs (nos métodos que utilizam EMAs vizinhas como referência) ou a base de dados de referência externas.

Na seleção das EMAs de referência vizinhas foram estabelecidos como critérios de inclusão, as EMAs que estivessem a uma distância menor que 350 km, distância escolhida por indicar a distância mínima necessária para que sempre existissem no mínimo 3 EMAs de referência para cada EMA avaliada (Anexo 3-1). Nos métodos em que o preenchimento é realizado utilizando apenas 1 EMA por iteração (RLS e MUK), dentro das estações que passam pelo critério da distância, foi selecionada àquela com maior valor absoluto do coeficiente de correlação de Pearson. Por fim, visto que as medidas de velocidade do vento não apresentaram distribuição gaussiana, adotou-se um máximo de cinco desvios padrão ($D = 5$).

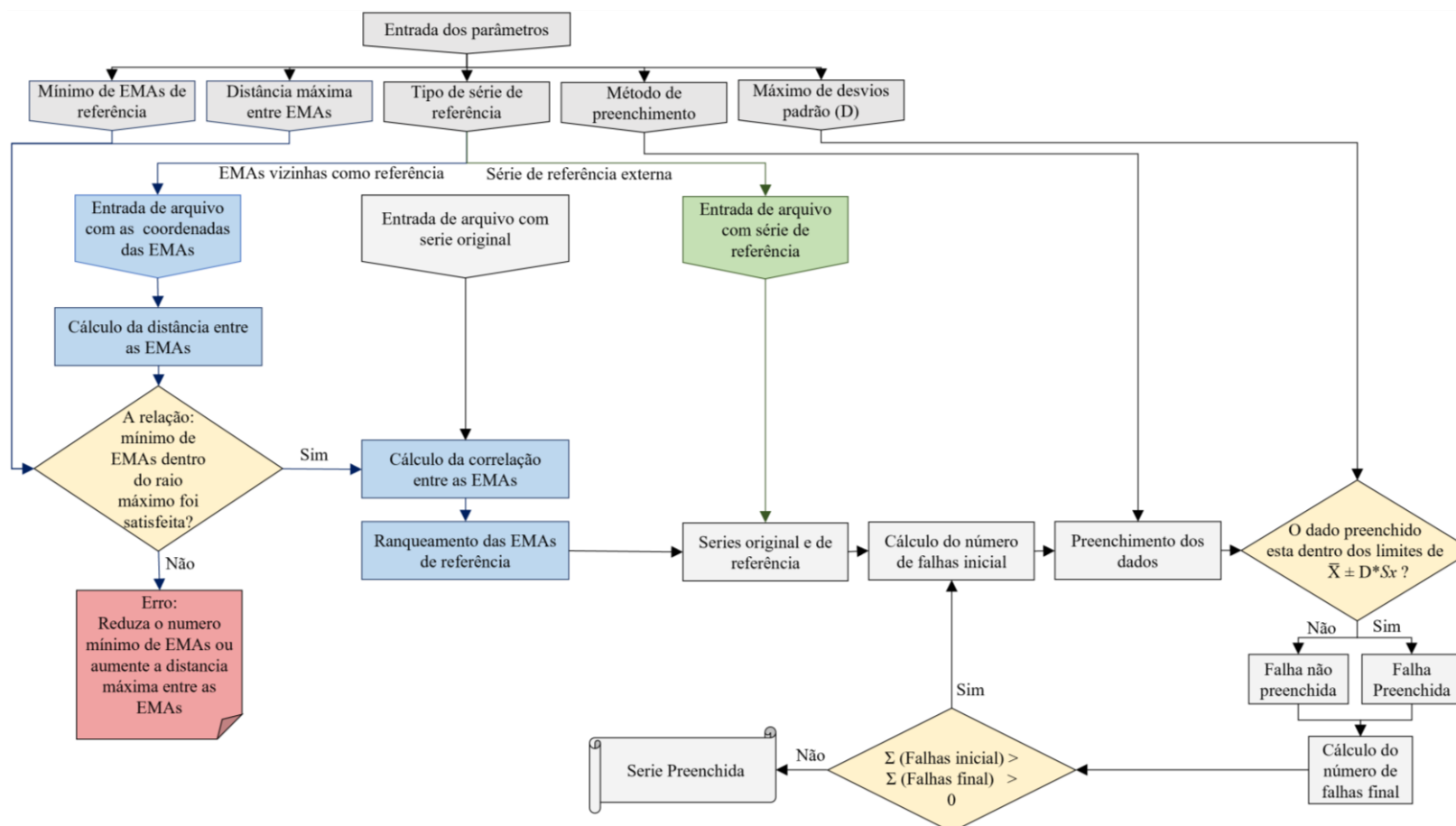


Figura 3-2: Fluxograma das etapas de preenchimento de dados meteorológicos do programa GapMET 1.0.

Nos métodos que utilizam dados de sensoriamento remoto como séries de referência foram utilizados os dados dos produtos de reanálise meteorológica do ERA5-Land. Esses produtos são gerados pela assimilação de dados de observações de superfície e atmosféricos, de várias fontes, em modelos que apresentam consistência tanto do ponto de vista físico quanto dinâmico, conforme Muñoz Sabater et al. (2021). Os produtos do ERA5-Land são distribuídos gratuitamente por Muñoz Sabater (2019), em parceria com a organização intergovernamental “Copernicus Climate Change Service”, em resolução temporal horária ou mensal e resolução espacial de 9x9 km.

3.2.3 Métodos de preenchimento de falhas

Foram avaliados seis métodos de preenchimentos de dados, separados em dois grupos: 1) métodos que utilizam como séries de referência apenas EMAs vizinhas, denotados como (v); 2) métodos que utilizam como séries de referência tanto EMAs vizinhas (v) quanto series externas do ERA5-Land (s).

Os métodos pertencentes ao grupo 1 foram: i) média aritmética simples (MAS) (Equação 3-2), no qual o dado faltante é obtido pela média dos valores observados nas EMAs vizinhas; ii) método do inverso das distâncias (MID) (Equação 3-3), cujo preenchimento da falha é realizado pela média ponderada pelo inverso da distância entre a localização da EMA com a falha ser preenchida e das EMAs vizinhas; iii) método da ponderação regional (MPR) (Equação 3-4), que utiliza a média ponderada em relação as médias históricas das EMAs vizinhas; iv) regressão linear múltipla (RLM) (Equação 3-5), na qual a estimativa é obtida pelos coeficientes linear e angulares da regressão linear entre os dados da EMA com a falha a ser preenchida e das EMAs vizinhas.

Os métodos pertencentes ao grupo 2 foram: i) método tradicional do Reino Unido (MUK) (Equação 3-6), no qual a estimativa é feita assumindo-se um valor constante de diferença entre o valor médio histórico da série de referência e da EMA com a falha a ser preenchida; ii) método da regressão linear simples (RLS) (Equação 3-7), que utiliza os coeficientes obtidos da regressão linear entre a série de dados da EMA com a falha a ser preenchida e da série de referência.

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n X_r \quad \text{Equação 3-2}$$

$$X_i = \frac{\sum_{r=1}^n \left(\frac{X_r}{d_r} \right)}{\sum_{r=1}^n \left(\frac{1}{d_r} \right)} \quad \text{Equação 3-3}$$

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \left(\frac{X_r}{X_{m_r}} \right) X_{m_i} \quad \text{Equação 3-4}$$

$$X_i = \beta_0 + \sum_{r=1}^n \left(\beta_{1r} * X_r \right) \quad \text{Equação 3-5}$$

$$X_i = X_r + (X_{m_r} - X_{m_i}) \quad \text{Equação 3-6}$$

$$X_i = \beta_0 + \beta_1 * X_r \quad \text{Equação 3-7}$$

em que:

X_i - é variável a ser preenchida na EMA “i”.

n - é o número de EMAs consideradas.

X_r - é o dado observado correspondente na EMA de referência “r”.

d_r - é a distância entre a EMA a ser preenchido e a EMA de referência “r”.

X_{m_r} - são as Médias históricas na EMA de referência “r”.

X_{m_i} - é a média histórica na EMA a ser preenchida.

β_0 - é o coeficiente linear da regressão.

β_{1r} - são os coeficientes angulares a estimados nos postos de referência “1” até “n”.

3.2.4 Avaliação dos erros de estimativa e ranqueamento dos métodos

A análise preliminar das 33 estações meteorológicas automáticas no estado de Mato Grosso demonstrou que cada EMA apresentava, em média, 18,61% de falhas nas séries temporais para cada variável avaliada (Tabela 3-1). Assim, a fim de testar o potencial de cada método de preenchimento em estimar as variáveis em diferentes possibilidades de quantidade de falhas, a partir da base de dados original de cada variável meteorológica, foram produzidas sete bases de dados contendo falhas artificialmente e aleatoriamente inseridas, de maneira que, em cada EMA houvesse 25, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% de falhas nas séries temporais.

Os erros de estimativas foram obtidos comparando os dados observados com os dados preenchidos das falhas artificialmente inseridas por meio das medidas de Viés (Equação 3-8), da raiz o erro médio quadrático (RMSE (Equação 3-9), e RMSE

normalizado (Equação 3-10), do coeficiente de correlação de Pearson (Equação 3-11), e da porcentagem de dados não preenchidos. Por fim, os métodos de preenchimento foram ranqueados, de maneira que recebessem melhores posições (menores valores), os métodos cujos resultados de viés, RMSE e porcentagem de falhas finais estiverem mais próximos a zero, e cujos coeficientes de Pearson, em valores absolutos, estivessem próximos a um.

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i) \quad \text{Equação 3-8.}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad \text{Equação 3-9.}$$

$$RMSE_Normalizado = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}} \quad \text{Equação 3-10.}$$

$$roh = \frac{\sum ((O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))}{\sqrt{\sum ((O_i - \bar{O})^2)} \sqrt{\sum ((P_i - \bar{P})^2)}} \quad \text{Equação 3-11.}$$

em que:

P_i - é o dado estimado.

O_i - é o dado observado.

$\bar{O}$ - é a média dos dados observados.

$\bar{P}$ - é a média dos dados observados.

N - é o número de valores da amostra.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os efeitos do aumento da porcentagem de falhas na precisão das estimativas nos diferentes métodos (Tabela 3-2) indicam que os erros se tornam mais expressivos com o aumento do número de falhas nas séries de dados, atingindo em média, nas séries com até 80% de dados faltantes, 2,5% de falhas não preenchidas, 1,4% de Viés, 10,1% de RMSE normalizado e correlação mínima de 0,68.

Tabela 3-2: Desempenho médio do preenchimento de dados das 33 EMAs do estado de Mato Grosso em função da porcentagem de falhas e do método de preenchimento

	Falhas (%)	MAS (V)	MID (V)	MPR (V)	RLM (V)	MUK (V)	MUK (S)	RLS (V)	RLS (S)	Média
Falhas restantes (%)	25	0,05	0,05	0,05	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02
	30	0,05	0,05	0,06	0,05	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03
	40	0,08	0,08	0,09	0,08	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04
	50	0,11	0,11	0,13	0,11	0,01	0,01	0,00	0,00	0,06
	60	0,19	0,19	0,23	0,46	0,01	0,01	0,01	0,00	0,14
	70	0,50	0,50	0,55	3,22	0,03	0,02	0,02	0,00	0,61
	80	3,03	3,03	3,16	9,94	0,10	0,02	0,09	0,00	2,42
	Média	0,57	0,57	0,61	1,99	0,02	0,01	0,02	0,00	
Viés (%)	25	0,35	0,25	5,05	-0,10	0,55	-0,06	-0,04	-0,01	0,75
	30	0,23	0,11	4,83	-0,10	0,55	-0,04	0,07	-0,03	0,70
	40	0,28	0,11	5,23	-0,14	0,34	-0,06	0,03	-0,05	0,72
	50	0,48	0,32	5,71	0,03	0,42	-0,07	0,12	-0,06	0,87
	60	0,58	0,47	6,51	0,00	0,44	-0,03	0,14	-0,01	1,01
	70	0,62	0,54	6,52	-0,18	0,51	-0,08	0,10	-0,06	1,00
	80	0,82	0,78	8,77	-0,12	0,49	0,02	0,18	-0,01	1,37
	Média	0,48	0,37	6,09	-0,09	0,47	-0,05	0,09	-0,03	
RMSE normalizado (%)	25	10,24	10,08	9,71	7,39	9,11	9,95	8,43	9,39	9,29
	30	9,99	9,86	9,34	7,26	8,90	9,71	8,24	9,32	9,08
	40	9,66	9,55	9,16	7,34	8,57	9,28	7,93	8,90	8,80
	50	9,79	9,70	9,50	8,04	8,69	9,25	8,03	8,85	8,98
	60	9,86	9,79	9,89	8,77	8,82	9,12	8,13	8,78	9,15
	70	10,05	10,00	10,23	9,93	9,00	9,09	8,27	8,61	9,40
	80	10,73	10,70	11,60	11,67	9,44	9,19	8,66	8,64	10,08
	Média	10,04	9,96	9,92	8,63	8,93	9,37	8,24	8,93	
Correlação de Pearson	25	0,7034	0,7145	0,8131	0,8598	0,8033	0,7479	0,8137	0,7480	0,7755
	30	0,7007	0,7101	0,8101	0,8568	0,8005	0,7389	0,8104	0,7366	0,7705
	40	0,6862	0,6943	0,7974	0,8381	0,7931	0,7341	0,8033	0,7313	0,7597
	50	0,6723	0,6791	0,7837	0,8038	0,7841	0,7333	0,7948	0,7303	0,7477
	60	0,6551	0,6612	0,7677	0,7618	0,7725	0,7321	0,7832	0,7292	0,7328
	70	0,6317	0,6374	0,7467	0,7003	0,7562	0,7313	0,7666	0,7280	0,7123
	80	0,6025	0,6074	0,7144	0,6243	0,7340	0,7296	0,7420	0,7269	0,6851
	Média	0,6646	0,6720	0,7761	0,7778	0,7776	0,7353	0,7877	0,7329	

OBS: Métodos de preenchimento: MAS - Médias aritméticas simples; MID - Método da distância inversa; MPR - Método de ponderação regional; RLM - Regressão linear múltipla; MUK - Método tradicional do Reino Unido; RLS - Regressão linear simples. Os métodos de preenchimento seguidos de (v) utilizaram séries de estações meteorológicas vizinhas como referência, enquanto os métodos seguidos de (s) utilizaram dados de sensoriamento remoto como referência.

Dentre os métodos analisados, os pertencentes ao grupo 1 (MAS, IDD, MPR, RLM) apresentaram, em geral, maior magnitude e incremento dos erros com o aumento do número de falhas. Essa característica é mais explícita na capacidade de preenchimento dos dados, os quais apresentam uma variação de falhas restantes de 0,05% a 9,94% nos métodos do grupo 1, enquanto nos métodos do grupo 2 (MUK (v) e RLS (v)), as falhas restantes não ultrapassam 0,1%. Isso ocorre pois os métodos do

grupo 1 requerem ao menos 3 EMAs próximas com dados para realizar o preenchimento, contudo, o aumento do número de falhas reduz a probabilidade de atendimento dessa condição.

Além disso, como o GapMET permite que o dado preenchido em uma EMA possa ser utilizado como dado de referência no preenchimento de uma EMA vizinha, pode ocorrer a propagação de erros ao se estimar uma variável a partir da estimativa e não da medida original da variável. Esse processo, contudo, não ocorre nos métodos que utilizam séries externas (MUK (s) e RLS (s)), pois, essas séries, a priori, não apresentam falhas, permitindo que os erros se mantenham de maneira relativamente constante, independentemente da quantidade de falhas na série a ser preenchida, e sendo, portanto, a precisão dependente apenas da qualidade dos dados externos.

No entanto, é importante notar que os erros de desempenho são semelhantes entre os métodos nos testes com até 40% de falhas. Portanto, nas circunstâncias reais da série temporal das EMAs do estado de Mato Grosso, cujo número de dados faltantes é de aproximadamente 20%, todos os métodos de preenchimento mostraram bons resultados.

Os resultados dos erros de estimativa do Viés e RMSE, assim como, a dispersão e correlação dos dados observados e estimados em função da variável meteorológica e métodos avaliados são apresentados nas Figura 3-3 e Figura 3-4, respectivamente. Observa-se que as variáveis umidade relativa do ar (UR), temperatura máxima (Tmax) e mínima do ar (Tmin) apresentaram preenchimentos mais precisos, com Viés variando entre -1,0 e 1,5% e correlação entre 0,69 e 0,91. Por outro lado, as variáveis radiação global incidente (Rs) e velocidade do vento (VV), apesar de gerarem Viés entre -3 e 5% (com exceção do método MPR), apresentaram maior dispersão dos dados estimados com correlações inferiores a 0,60 para a Rs e 0,75 para a VV.

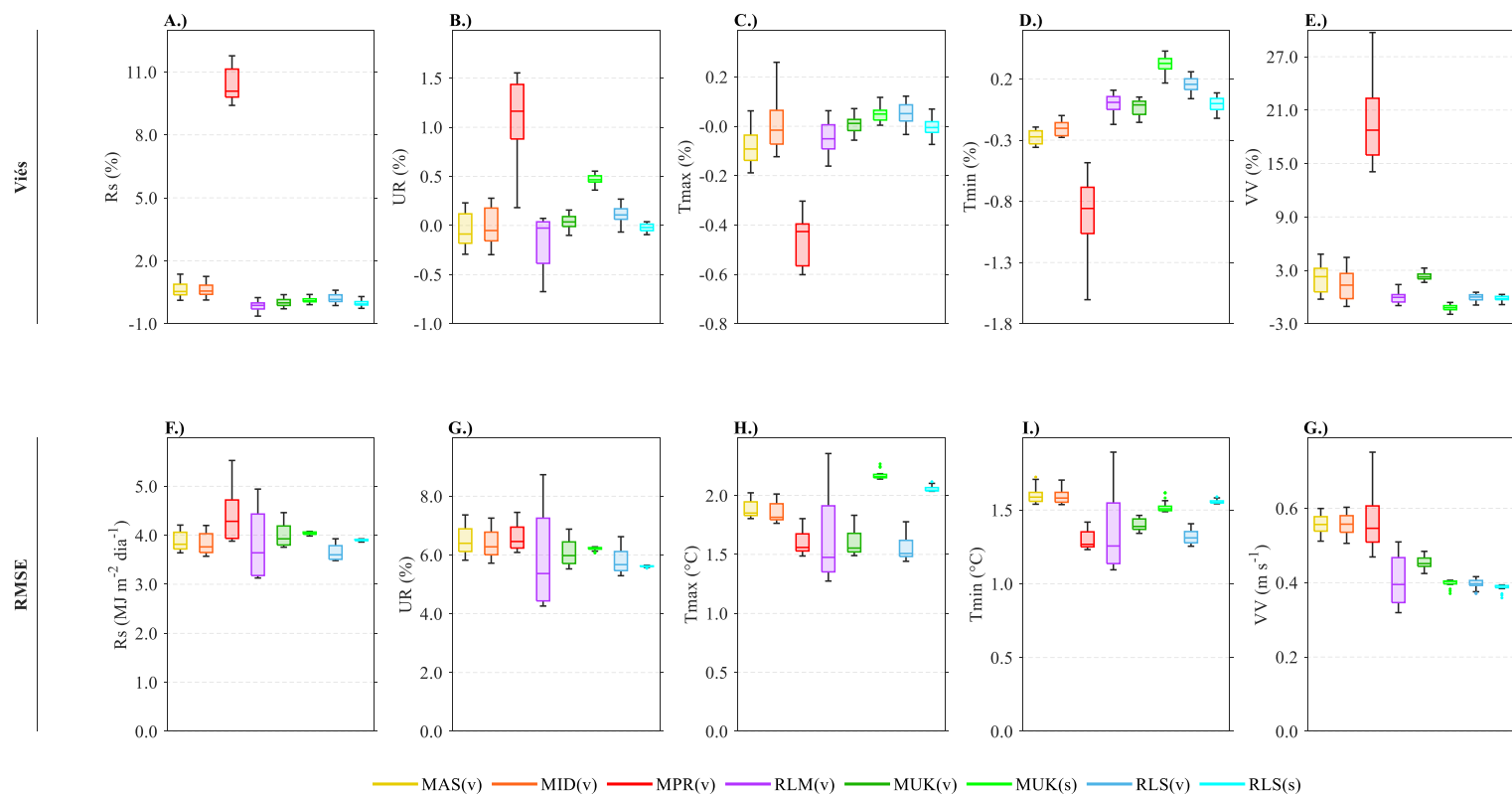


Figura 3-3: Boxplot do desempenho do viés (A-E) e RMSE (F-G) entre os dados observados e preenchidos nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso em função da variável meteorológica e do método de preenchimento do GapMET.

OBS: Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m. Métodos de preenchimento: MAS - Médias aritméticas simples; MID - Método da distância inversa; MPR - Método de ponderação regional; RLM - Regressão linear múltipla; MUK - Método tradicional do Reino Unido; RLS - Regressão linear simples. Os métodos de preenchimento seguidos de (v) utilizaram séries de estações meteorológicas vizinhas como referência, enquanto os métodos seguidos de (s) utilizaram dados de sensoriamento remoto como referência.

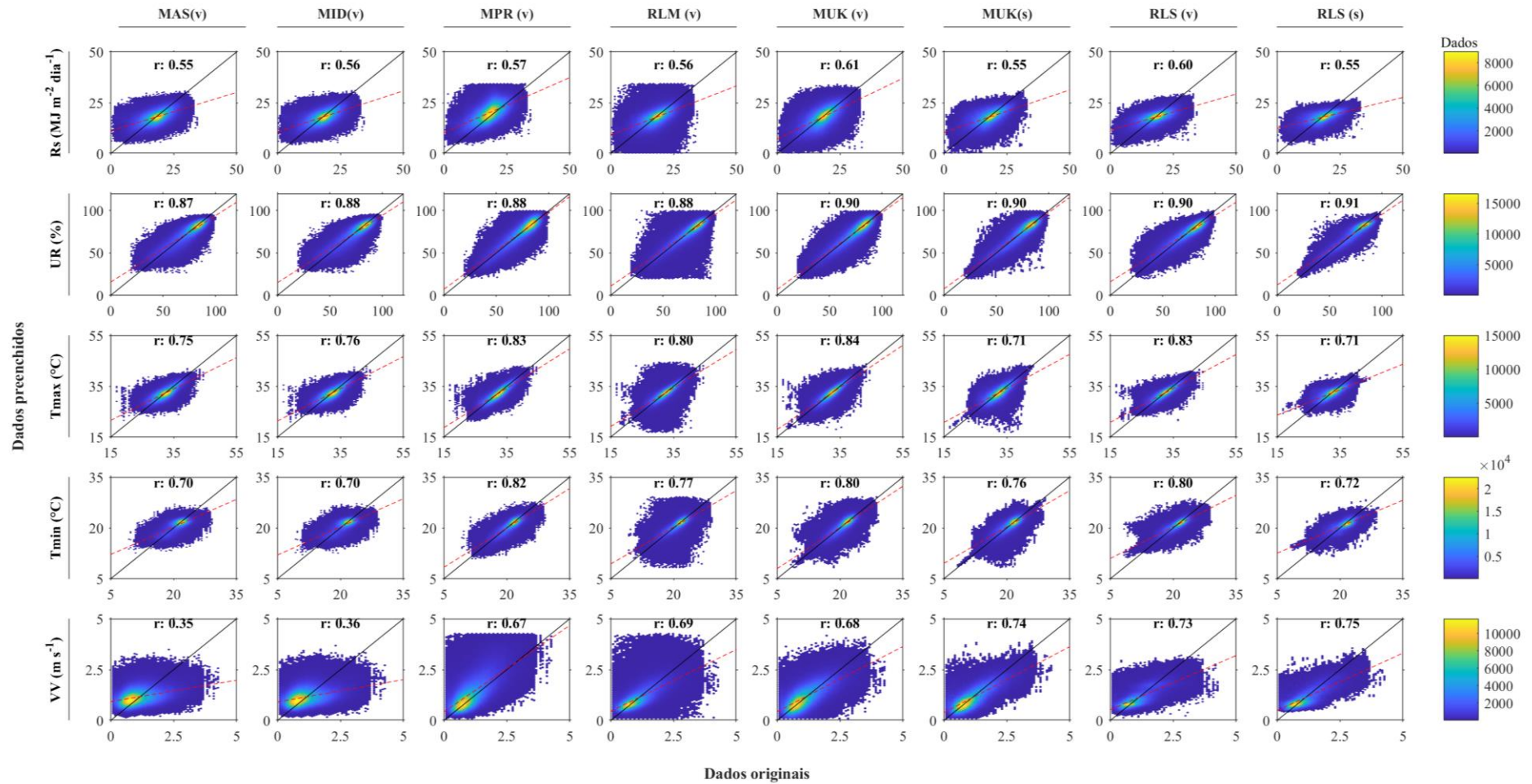


Figura 3-4: Dispersão entre dados observados e preenchidos das variáveis meteorológicas nos diferentes métodos de preenchimentos do GapMET nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

OBS: Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m. Métodos de preenchimento: MAS - Médias aritméticas simples; MID - Método da distância inversa; MPR - Método de ponderação regional; RLM - Regressão linear múltipla; MUK - Método tradicional do Reino Unido; RLS - Regressão linear simples. Os métodos de preenchimento seguidos de (v) utilizaram séries de estações meteorológicas vizinhas como referência, enquanto os métodos seguidos de (s) utilizaram dados de sensoriamento remoto como referência. Linha vermelha representa a reta da correlação de Pearson (r) e variação das cores do diagrama a quantidade de dados na coordenada x e y.

Resultados semelhantes foram observados por Ventura et al. (2016) e Xavier et al. (2016), que relataram melhores estimativas de preenchimento de falhas nas variáveis temperatura e umidade relativa do ar em comparação às variáveis velocidade do vento e radiação solar incidente. A menor precisão no preenchimento das variáveis Rs e VV pode ser explicada pelo fato dos valores diários dessas variáveis, apresentarem maiores variações espacial quando comparado com Tmin, Tmax e UR, além de efeitos locais não considerados nos métodos, como a altitude e nebulosidade (XAVIER et al., 2016).

Pelo resultado do ranqueamento em função dos diferentes erros avaliados (Figura 3-5), observa-se melhores desempenhos para os métodos do grupo 2, principalmente o método RLS. Nesse grupo, os métodos baseados em dados de ERA5-land apresentaram menor performance quanto ao RMSE e correlação de Pearson. Contudo, esses métodos foram capazes reduzir a probabilidade de falhas não preenchidas e apresentaram menor dispersão dos erros com aumento do número de falhas, indicando que o teste com outras bases de dados externos além do ERA5-land, podem promover melhoras nas estimativas.

Por outro lado, o método RLM, apesar de obter boas posições na análise dos erros de viés, RMSE e correlação, apresentou maior dificuldade de preenchimento de falhas para todas as variáveis meteorológicas estimadas. Esses resultados discordam dos obtidos por Fernandez (2007), Ventura et al. (2016) e Bier; Ferraz (2017), que sugeriram o método RLM como mais preciso dentre métodos semelhantes aos avaliados nesse estudo, entretanto, esses autores não levaram em consideração o impacto do aumento do número de falhas e distância entre as EMAs, uma vez que foram avaliadas apenas séries temporais com porcentagens de falhas inferiores a 30% e EMAs com distancias máximas entre si de 100 km.

Bleidorn et al. (2022), por exemplo, comparando os métodos MAS, RLS, e RLM com variações no número de falhas entre 5% e 40%, também observaram melhores desempenhos com o método RLS. Nesse caso, esses desempenhos dependeram do algoritmo utilizado, que semelhantemente ao GapMET, seleciona a EMA de referência pelo maior coeficiente de correlação, permitindo a mudança da EMA de referência ao encontrar dados faltantes, o que não ocorre com o método RLM que demanda ao menos 3 EMAs de referência.

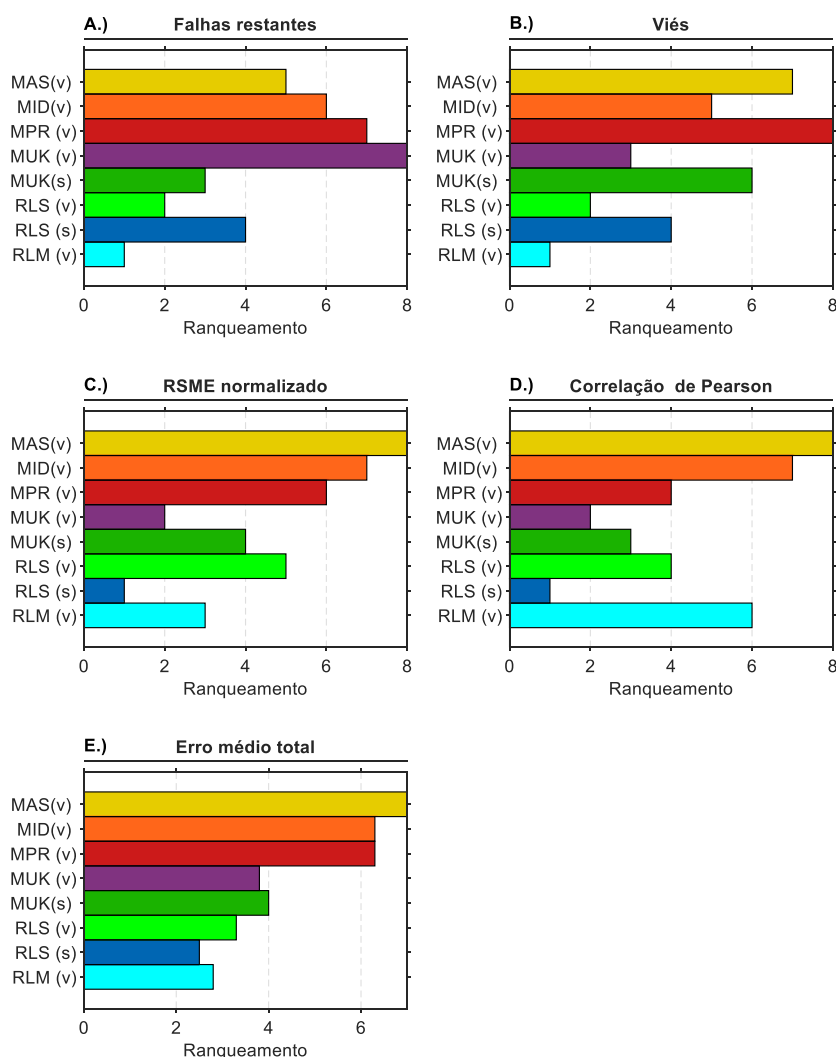


Figura 3-5: Ranqueamento dos erros de estimativa dos seis métodos de preenchimento de falhas de dados meteorológicos do GapMET nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso.

OBS: Métodos de preenchimento: MAS - Médias aritméticas simples; MID - Método da distância inversa; MPR - Método de ponderação regional; RLM - Regressão linear múltipla; MUK - Método tradicional do Reino Unido; RLS - Regressão linear simples. Os métodos de preenchimento seguidos de (v) utilizaram séries de estações meteorológicas vizinhas como referência, enquanto os métodos seguidos de (s) utilizaram dados de sensoriamento remoto como referência. Métodos com menor valor no ranque apresentam melhores resultados.

O menor desempenho dos métodos do grupo 1, bem como as divergências entre esses resultados e a literatura em relação às diferenças entre os métodos RLS e RLM, resultam, assim, do fato de que neste estudo foram avaliadas número de falhas potencialmente superiores as médias encontradas nas EMAs do estado (aproximadamente 20%), além de, a distância mínima para que todas as EMAs tivessem pelo menos três outras como base de referência de 350 km, enquanto nos

estudos como de Fernandez (2007), Ventura et al. (2016) e Bier; Ferraz (2017) essa distância foi, geralmente, inferior a 100 km devido à maior densidade de rede de EMAs das regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Usualmente, no Brasil, tem se adotado uma distância limite de 100 km ao se utilizar EMAs próximas como referência (VENTURA et al. 2016, BIER; FERRAZ, 2017; BRUBACHER et al., 2020), visto que o uso da uma EMA próxima como referência, em geral, aumenta a probabilidade haver uma alta correlação entre a série de referência e a serie da EMA a ser preenchida, reduzindo assim o risco de utilização da se series de dados de estações que estejam em diferentes regiões climáticas (BRUBACHER et al., 2020)., entretanto o uso desse critérios de 100 km pode limitar o preenchimento de lacunas em áreas com baixa densidade de rede de EMAs, como é o caso do estado de Mato Grosso. Dessa maneira, ao adotar uma maior flexibilidade com relação a distancia entre as EMAs de referência houve uma redução do desempenho dos métodos que utilizam mais de uma EMA vizinha devido a uso de series possíveis diferentes condições climáticas.

3.4. CONCLUSÕES

Todos os seis métodos de preenchimento de dados meteorológicos do software GapMET tiveram bom desempenho para preencher serie de dados com menos de 40% de falhas.

Nas condições de densidade da rede de estações meteorológicas do INMET no estado de Mato Grosso, cuja distância mínima entre EMAs é de aproximadamente 150 km, sendo necessário adotar uma distância de 350 km para que a estação a ser preenchida tenham três EMAs vizinhas de referência, os melhores desempenhos estatísticos são obtidos nos métodos que utilizam apenas uma EMA de referência, especialmente o método de regressão linear simples (RLS).

O uso de séries de referência externas obtidas a partir de sensoriamento remoto reduz a probabilidade de lacunas não preenchidas; no entanto, é necessária uma análise de outras fontes de produtos de satélite para reduzir os erros do RMSE e melhorar as correlações entre os dados observados e externos.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO-NETO, R. A. A.; DOS SANTOS NASCIMENTO, J. W.; DE OLIVEIRA, F. F.; REBELO, G. R. P.; DE LIMA SILVA, F. D. A.; DE CARVALHO, A. L. Models generated by multiple regression in filling meteorological data failures in an automatic meteorological station in Alagoas. **Revista Geama**, v.6, n.2, p.4-10, 2020.
- BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas em dados meteorológicos para estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, p.215-226, 2017. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220008>.
- BLEIDORN, M. T.; DE PAULA PINTO, W.; SCHMIDT, I. M.; MENDONÇA, A. S. F.; DOS REIS, J.A.T. Methodological approaches for imputing missing data into monthly flows series. **Ambiente e Água**, v.17, n.2, p.1-27. 2022. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2795>.
- BOX, G. E.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)**, v.26, n.2, p.211-243, 1964.
- BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G. DE; GUASSELLI, L. A. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, p.615-629, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786354006>.
- COUTINHO, E. R.; SILVA, R. M. DA; MADEIRA, J. G. F.; COUTINHO, P. R. DE O. DOS S.; BOLOY, R. A. M.; DELGADO, A. R. S. Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in the Gap Filling of Meteorological Time Series. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.33, p.317-328, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332013>.
- FERNANDEZ, M. N. **Preenchimento de Falhas em Séries Temporais**. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande, 2007.
- HUBBARD, K. G. Spatial variability of daily weather variables in the high plains of the USA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.68, p.29-41, 1994. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90067-1](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90067-1).

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. 2019. **Banco de dados por Estado**. <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt>> 01 dez 2021.
- JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. D. C. R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1, p. 943-956, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>.
- MUÑOZ-SABATER, J.; DUTRA, E.; AGUSTÍ-PANAREDA, A.; ALBERGEL, C.; ARDUINI, G.; BALSAMO, G.; BOUSSETTA, S.; CHOULGA, M.; HARRIGAN, S.; HERSBACH, H.; MARTENS, B. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. **Earth System Science Data**, v.13, n.9, p.4349-4383, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
- MUÑOZ SABATER, J. **ERA5-Land hourly data from 1981 to present**. <cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land> 01 Jun 2021.
- PAULHUS, J. L. H.; KOHLER, M. A. Interpolation of missing precipitation records. **Monthly Weather Review**, v.80, p.129-133, 1952. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080<0129:IOMPR>2.0.CO;2).
- SARNIGHAUSEN, V. C. R.; GOMES, F. G.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.28, p.766-787, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.71569>.
- SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.1, n.1, p.34-43, 2013. <https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334>.
- TABONY, R. C. The estimation of missing climatological data. **Journal of Climatology**, v.3, p.297-314, 1983. <https://doi.org/10.1002/joc.3370030308>.
- VENTURA, T. M.; SANTANA, L. L. R.; MARTINS, C. A.; DE FIGUEIREDO, J. M. Análise da aplicabilidade de métodos estatísticos para preenchimento de falhas em dados meteorológicos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.19, p.168-177, 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v19i0.44989>.

- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v.36, n.6, p.2644-2659, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.
- XIANG, K.; LI, Y.; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. **Agricultural Water Management**, v.232, p.1-16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>.

3.6 ANEXOS

Anexo 3-1: Matrix das distâncias (Dist), em km, entre as EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

[illegible]

OBS: Legenda das cores: Dist < 100 km (verde); 100 km < Dist < 350 km (amarelo); 350 km < Dist (vermelho).

4. ARTIGO 2: SENSIBILIDADE GLOBAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DE PENMAN- MONTEITH ÀS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS NO MATO GROSSO, BRASIL

Resumo: Entender como as variáveis meteorológicas impactam as flutuações da evapotranspiração de referência (ET_0) é importante nos planos de irrigação e gestão de recursos hídricos, especialmente sob potenciais variações dessas variáveis devido aos cenários de mudanças climáticas. Neste trabalho, utilizamos o método de Sobol para analisar as variações espaço-temporal da sensibilidade global da ET_0 a cinco variáveis meteorológicas (radiação solar, umidade relativa, temperaturas máxima e mínima do ar e velocidade do vento) com base em dados de observados de 33 estações meteorológicas no estado de Mato Grosso entre 2008-2020. Os resultados da análise de Sobol indicam variações espaço-temporais consideráveis da sensibilidade da ET_0 às variáveis meteorológicas e suas interações. A variável dominante responsável pelas flutuações da ET_0 no estado de Mato Grosso é a radiação solar, tendo mais impacto em ambientes úmidos, como observado nas áreas do bioma Amazônico. A umidade relativa do ar e a velocidade do vento tem maiores índices de sensibilidade na estação seca da região de Cerrado do estado. Conclui-se que as mudanças na radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento são fatores que não podem ser ignorados ao analisar mudanças na evapotranspiração de referência no Mato Grosso.

Palavras-chave: análises espaço-temporal, método de Sobol, Micrometeorologia, Mudanças Climáticas, Amazônia, Cerrado

4.1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência (ET_0) é definida como a evapotranspiração potencial de uma superfície hipotética de grama bem regada, em pleno estágio de crescimento e de altura uniforme (ALLEN et al., 1998). Compreender os mecanismos que influenciam a ET_0 é crucial em estudos e projetos agrícolas e hidrológicos em escalas locais, regionais ou globais (LIU et al., 2004; McVICAR et al., 2007; GU et al., 2008; Van der VELDE et al., 2013; ARAÚJO-NETO et al., 2020;), por desempenhar um papel essencial no ciclo hidrológico.

Dada a importância da ET_0 , diferentes métodos foram desenvolvidos para estimá-la, que são divididos em três categorias, segundo seus fatores fundamentais: métodos de transferência de massa, equações de radiação e equações de temperatura (PENMAN, 1948; THORNTHWAITE, 1948; BLANEY; CRIDDLE, 1950; HARBECK, 1962; PRIESTLEY; TAYLOR, 1972; GUITJENS, 1982). A equação de Penman-Monteith é um modelo físico baseado na combinação de métodos de

transferência de massa e radiação e é a metodologia recomendada pela FAO para estimar a evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998).

O método Penman-Monteith é determinado conjuntamente por variáveis meteorológicas como radiação solar (R_s), umidade relativa (UR), temperatura máxima e mínima do ar (T_{max} e T_{min}) e velocidade do vento (VV). Portanto, mudanças nas variáveis nos cenários de mudanças climáticas podem afetar a distribuição espaço-temporal da ET_0 (IRMAK et al., 2006; CONG et al., 2009) e, conseqüentemente, o planejamento e gestão futuro de recursos hídricos (GOYAL, 2004). Por exemplo, o aumento do ET_0 , em alguns cenários de mudanças climáticas, é associado ao aumento na frequência, duração e severidade das secas (TRENBERTH et al., 2013; ZENG et al., 2021), reduzindo o abastecimento de água em lagos, reservatórios e lençóis subterrâneos (SHEFFIELD; WOOD, 2007; NAUMANN et al., 2018). No entanto, em muitas análises hidrológicas e de recursos hídricos, geralmente, apenas as mudanças de temperatura e precipitação são investigadas pelo uso de métodos de estimativa ET_0 baseados em equações de temperatura (JHA et al., 2004; WANG et al., 2012; XU et al., 2013) o que pode causar imprecisão por não levar em conta as mudanças na radiação solar, na velocidade do vento e na umidade relativa do ar.

A análise de sensibilidade é uma metodologia que permite avaliar as relações entre variáveis de entrada e saída de um sistema, sendo um método amplamente utilizados em ciências ambientais, ecologia, hidrologia, entre outros (SALTELLI et al., 2019) sendo comumente separada em análises de sensibilidade local (LSA) e análises de sensibilidade global (GSA) (SONG et al., 2015). Essa metodologia tem sido empregada nos estudos relacionados a evapotranspiração pois permite verificar o impacto da mudança das variáveis meteorológicas nas alterações da ET_0 , bem como, identificar as variáveis dominantes do processo (IRMAK et al., 2006; GONG et al., 2006; MOSAEDI et al., 2015).

Embora nos últimos anos análises de sensibilidade local tenham sido amplamente utilizadas para identificar a influência de variáveis meteorológica na ET_0 (YANG; YANG, 2012; LIU et al., 2017; LIN et al., 2018; JERSZURKI et al., 2019; ZHAO et al., 2020), o método LSA não possui uma maneira de realizar a auto verificação e reflete apenas os efeitos locais das variáveis individualmente (SALTELLI et al., 2019). A análise de sensibilidade global, por outro lado, tem a

vantagem de estimar o impacto de todas as variáveis e seus efeitos combinados nas flutuações da medida estimada (van GRIENSVEN et al., 2006; XU et al., 2014). O método Sobol é um método GSA baseado na análise de decomposição de variância que fornece um desempenho mais robusto em modelos não lineares como o FAO-Penman-Monteith (SALTELLI; ANNONI, 2010; ZHANG et al., 2013). Além disso, o método avalia o impacto das incertezas das variáveis englobando toda sua amplitude de valores, fornecendo, assim, mais informações para quantificar o impacto das variáveis meteorológicas na ET_0 .

O Estado de Mato Grosso se destaca no território brasileiro por sua grande área a qual engloba três Biomas (pantanal, formações de cerrado e floresta amazônica) e está distribuída em três tipos climáticos, o clima Af (clima equatorial úmido), o Aw (clima de savana tropical) e o Cwa (clima tropical) (SOUZA et al., 2013). A principal atividade econômica do Estado é a produção agrícola sendo a maior produtora de grãos do Brasil (DENTZ, 2019). No entanto, apesar da alta demanda por recursos hídricos e do potencial de expansão dos sistemas agrícolas irrigados, o Mato Grosso ainda carece de pesquisas focadas na variabilidade da evapotranspiração devido às mudanças nas variáveis meteorológicas (SOUZA et al., 2016; TANAKA et al., 2016). Por isso, é fundamental identificar as variáveis meteorológicas dominantes que controlam a ET_0 na região a fim de aprimorar o planejamento do uso de recursos hídricos.

Dessa maneira, este estudo possui três objetivos: i) analisar as variações espaço-temporais da ET_0 e suas variáveis meteorológicas (R_s , U_R , T_{max} , T_{min} e VV) no estado de Mato Grosso, Brasil; ii) determinar e discutir a sensibilidade global da ET_0 às variáveis meteorológicas; iii) determinar a variável meteorológica dominante à variabilidade da ET_0 no estado.

4.2. MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1. Área de Estudo e dados

O Estado de Mato Grosso está localizado entre as coordenadas 06°00'S, 19°45'S e 50°06'W, 62°45'W e possui uma grande extensão territorial, com área de 903.202.446 km², o que representa 10,61% do território brasileiro (IBGE, 2022). Climaticamente, o estado é classificado como Af (clima equatorial úmido), Aw (clima de savana tropical) e Cwa (clima tropical), segundo Köppen, apresentando duas

estações bem definidas: a estação chuvosa, de outubro a abril; e a estação seca, de maio a setembro (SOUZA et al.; 2013, ALVARES et al., 2013; JERSZURKI et al., 2019).

As séries temporais referente ao período 2008 - 2020 foram obtidas a partir de estações meteorológicas automáticas (EMAs) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizados em 33 municípios de Mato Grosso, Brasil (Tabela 4-1, Figura 4-1). Em cada EMAs, foram coletados conjuntos de dados das variáveis meteorológicas: radiação solar incidente (R_s - MJ m⁻² dia⁻¹), umidade relativa do ar (UR - %), temperatura máxima do ar (Tmax - °C), temperatura mínima do ar (Tmin - °C) e velocidade média do vento a 2 metros (VV - m s⁻¹).

Tabela 4-1: Estações meteorológicas automáticas (EMAs) do INMET no estado de Mato Grosso utilizadas nesse estudo.

Código	EMA nome	Bioma	Lat.	Lon.	Alt.
A-901	Cuiabá	Cerrado	-15,56	-56,06	242
A-902	Tangará da Serra	Amazônia	-14,65	-57,43	440
A-903	São José do Rio Claro	Cerrado-Amazônia	-13,45	-56,68	340
A-904	Sorriso	Cerrado-Amazônia	-12,56	-55,72	379
A-905	Campo Novo do Parecis	Cerrado	-13,79	-57,84	525
A-906	Guarantã do Norte	Amazônia	-9,95	-54,90	284
A-907	Rondonópolis	Cerrado	-16,46	-54,58	290
A-908	Água Boa	Cerrado	-14,02	-52,21	440
A-910	Apiacás	Amazônia	-9,56	-57,39	218
A-912	Campo Verde	Cerrado	-15,53	-55,14	748
A-913	Comodoro	Cerrado	-13,71	-59,76	577
A-914	Juara	Amazônia	-11,28	-57,53	263
A-915	Paranatinga	Cerrado	-14,42	-54,04	477
A-916	Querência	Amazônia	-12,63	-52,22	361
A-917	Sinop	Cerrado-Amazônia	-11,98	-55,57	367
A-918	Confresa	Cerrado-Amazônia	-10,64	-51,57	233
A-919	Cotriguaçu	Amazônia	-9,91	-58,57	265
A-920	Juína	Amazônia	-11,38	-58,77	365
A-921	São Felix do Araguaia	Cerrado	-11,62	-50,73	201
A-922	Vila Bela da Santíssima Trindade	Amazônia	-15,06	-59,87	213
A-924	Alta Floresta	Amazônia	-10,08	-56,18	292
A-926	Carlinda	Amazônia	-9,97	-55,83	294
A-927	Brasnorte (Novo Mundo)	Cerrado-Amazônia	-12,52	-58,23	426
A-928	Nova Maringá	Cerrado-Amazônia	-13,04	-57,09	334
A-929	Nova Ubiratã	Cerrado-Amazônia	-13,41	-54,75	466
A-930	Gaúcha do Norte	Cerrado-Amazônia	-13,18	-53,26	376
A-931	Santo Antônio do Leste	Cerrado	-14,93	-53,88	664
A-932	Guiratinga	Cerrado	-16,34	-53,77	525
A-933	Itiquira	Cerrado	-17,17	-54,50	593
A-934	Alto Taquari	Cerrado	-17,84	-53,29	862
A-935	Porto Estrela	Cerrado	-15,32	-57,23	148
A-936	Salto do Céu	Amazônia	-15,12	-58,13	301
A-937	Pontes de Lacerda	Amazônia	-15,23	-59,35	273

OBS : * Lat. = Latitude (graus); Log. = Longitude (graus); Alt. = Altitude (m).

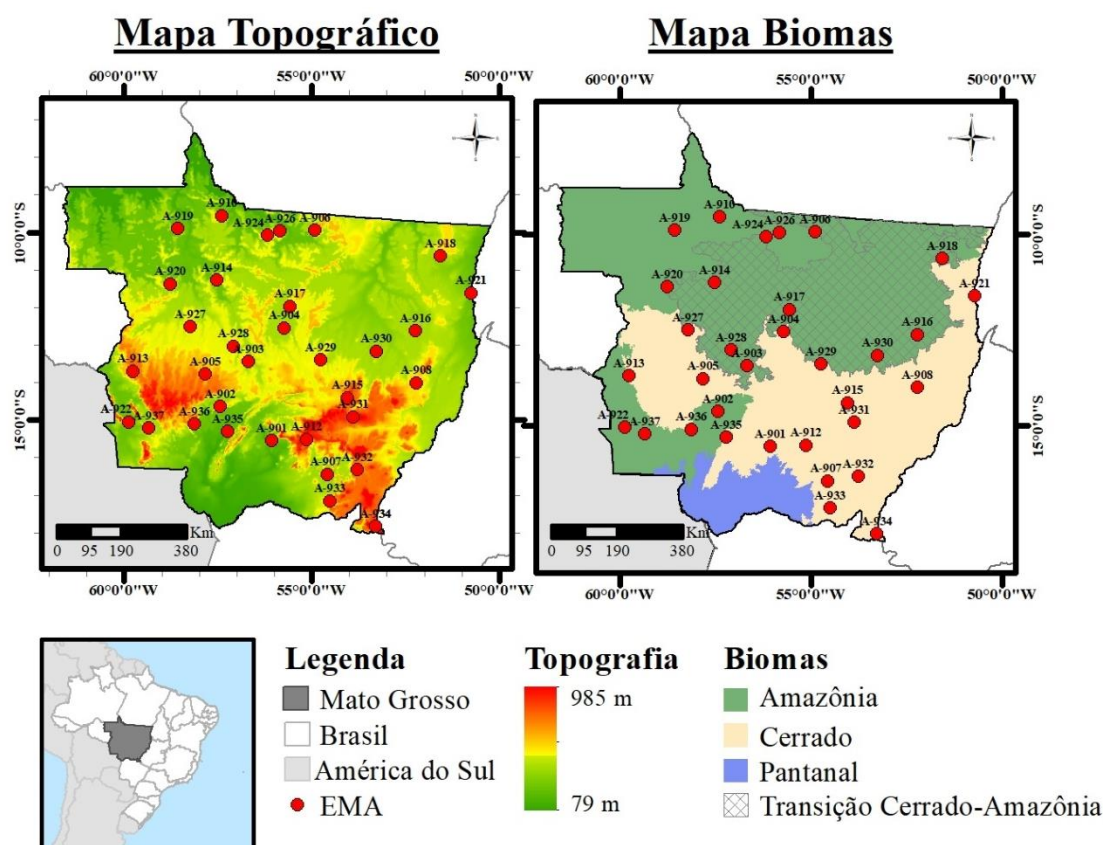


Figura 4-1: Topografia, biomas e localização das Estações Meteorológicas Automáticas do INMET (EMA), no estado de Mato Grosso, Brasil.

OBS: Identificação numérica de acordo com a Tabela 4-1.

4.2.2 Cálculo de evapotranspiração de referência (ET_0)

A FAO-Penman-Monteith (FAO-PM) é um método padronizado e reconhecido pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura na estimativa de evapotranspiração de referência (ET_0). O método combina parâmetros fisiológicos e meteorológicos para estimar a ET_0 em uma superfície hipotética de referência composta por gramado com uma altura de 0,12 m, resistência superficial de $70 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ e albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998). A equação para obtenção da ET_0 pelo método de Penman-Monteith é demonstrado na Equação 4-1:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) VV(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34VV)} \quad \text{Equação 4-1}$$

em que:

ET_0 - é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

R_n - é a radiação líquida na superfície da cultura ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);
 G - é a densidade de fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);
 T - é a temperatura média do ar a 2 m de altura (valor médio de T_{max} e T_{min} , $^{\circ}\text{C}$);
 VV - é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});
 e_s - é a pressão de vapor de saturação (kPa);
 e_a - é a pressão de vapor atual (kPa);
 Δ - é a inclinação da pressão de vapor de saturação versus curva de temperatura do ar ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 γ - é a constante psicométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Os cálculos detalhados de R_n (a partir dos dados do R_s), Δ , γ e outros parâmetros necessários para a computação da ET_0 foram obtidos de acordo com o procedimento descrito em Allen et al. (1998). Os valores de G foram ignorados para fins de estimativas diárias ($G = 0 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Além disso, visto que a variável velocidade do vento nas EMAs do estado são obtidas a 10 metros de altura, a velocidade média a 2 metros foi obtida conforme Equação 5-2.

$$VV_2 = \frac{VV_{10} \times 4.87}{\ln(67.8 \times (H - 5.42))} \quad \text{Equação 4-2}$$

em que:

VV_2 - é a velocidade do vento a 2 metros (m s^{-1});
 VV_{10} - é a velocidade do vento a 10 metros (m s^{-1});
 H - é a altura em que a velocidade do vento foi obtida (m) – 10 metros;

4.2.3 Método de Análise de Sensibilidade de Sobol

O método de análise de sensibilidade de Sobol (SOBOL, 1993; SALTELLI et al., 2000) foi utilizado para avaliar a sensibilidade global da ET_0 às cinco variáveis meteorológicas (R_s , U_R , T_{max} , T_{min} , VV). O método foi escolhido por ser um método de decomposição de variância que tem melhor desempenho para análise de sensibilidade de modelos não lineares e não monotônico (SALTELLI; ANNONI, 2010; YANG, 2011; ZHANG et al., 2013), além de ser capaz de descrever como variáveis individuais e sua interação impactam as saídas do modelo (ZHANG et al.,

2019). A ideia principal por trás do método de Sobol é decompor a função do modelo $f(X)$ (Equação 4-2) em somas de dimensão crescente (Equação 4-3):

$$Y=f(X)=f(X_1,X_2,\dots,X_d) \quad \text{Equação 4-2}$$

$$Y=f_0+\sum_{i=1}^d f_i(X_i)+\sum_{i<j}^d f_{ij}(X_i,X_j)+\dots+f_{1,2,\dots,d}(X_1,X_2,\dots,X_d) \quad \text{Equação 4-3}$$

em que: indica que a função do modelo; f_0 é o valor médio; e X são variáveis de função. Considerando que todos os termos da decomposição funcional são ortogonais, a variância da saída do modelo $Var(Y)$ pode ser decomposta como mostrado nas Equação 4-4 a Equação 4-6:

$$Var(Y)=\sum_{i=1}^d V_i+\sum_{i<j}^d V_{ij}+\dots+V_{1,2,\dots,d} \quad \text{Equação 4-4}$$

$$V_i=Var_{X_i}\left(E_{X_{\bar{i}}}(Y/X_i)\right) \quad \text{Equação 4-5}$$

$$V_{ij}=Var_{X_{ij}}\left(E_{X_{\bar{ij}}}(Y/X_{ij},X_j)\right)-V_i-V_j \quad \text{Equação 4-6}$$

em que: V_i é a contribuição para $Var(Y)$ devido unicamente ao efeito de X_i ; e $V_{i,2,\dots,d}$ é a contribuição para $Var(Y)$ devido à interação de $\{X_1, X_2, \dots, X_d\}$. Posteriormente, foram calculados o índice de primeira ordem (S_1) (Equação 4-7) e o índice de sensibilidade total (S_{tot}) (Equação 4-8):

$$S_1=\frac{V_i}{Var(Y)} \quad \text{Equação 4-7}$$

$$S_{tot}=1-\frac{Var_{X_{\bar{i}}}}{Var(Y)} \quad \text{Equação 4-8}$$

As variâncias no processo de cálculo acima foram estimadas pela integração numérica aproximada de Monte Carlo e os detalhes específicos do cálculo para quantificar a sensibilidade podem ser encontrados em Tang et al. (2007). Neste estudo foi utilizada o método de amostragem quase aleatório (pseudoaleatório) por gerar sequências amostrais mais uniformemente junto com as grades cartesianas do espaço amostral (TANG et al., 2007). O número de amostras foi definido como 20.000 simulações por mês em cada EMA. Os limites amostrais inferior e superior das

variáveis foram definidas como sendo os percentis 2,5 e 97,5 dos dados diários observados de cada mês por EMA. Esta abordagem foi escolhida para evitar definir os intervalos com base em outliers da variável. As médias e desvio padrão dos limites inferiores e superiores dos intervalos das variáveis nas EMAs do estado de Mato Grosso são apresentados na Tabela 4-2 e as médias e desvios observadas nas EMAs individualmente e por biomas são apresentados nos Anexo 4-1 a Anexo 4-6.

Tabela 4-2: Médias e desvio padrão dos limites amostrais inferiores (Inf) e superiores (Sup) (2,5 e 97,5 percentis) das variáveis meteorológicas observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

	Rs (MJ m ⁻² dia ⁻¹)		UR (%)		Tmax (°C)		Tmin (°C)		VV (m s ⁻¹)	
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup
Jan	8,2 (1,5)	27,5 (1,9)	69,8 (4,9)	92,1 (1,7)	26,3 (1,0)	34,9 (1,5)	19,6 (1,0)	23,6 (1,3)	0,4 (0,2)	2,0 (0,6)
Fev	8,1 (1,9)	26,7 (1,6)	71,5 (4,1)	92,3 (1,9)	26,4 (0,9)	34,8 (1,4)	19,9 (1,0)	23,5 (1,2)	0,4 (0,2)	1,9 (0,6)
Mar	8,4 (1,9)	25,6 (1,4)	71,3 (5,4)	91,7 (1,7)	26,9 (0,9)	34,8 (1,5)	19,9 (1,0)	23,5 (1,2)	0,4 (0,2)	1,8 (0,5)
Abr	8,2 (2,1)	23,9 (1,6)	66,5 (5,7)	91,0 (2,1)	26,8 (1,1)	34,9 (1,5)	18,1 (1,6)	23,3 (1,0)	0,3 (0,2)	1,7 (0,5)
Mai	8,0 (2,3)	21,7 (1,7)	61,6 (7,3)	89,2 (2,8)	26,2 (1,4)	34,5 (1,5)	16,2 (1,6)	22,5 (1,1)	0,4 (0,2)	1,9 (0,6)
Jun	9,4 (3,0)	20,0 (2,0)	53,0 (8,1)	85,3 (4,4)	26,4 (1,9)	34,3 (1,3)	15,7 (1,6)	21,4 (1,0)	0,4 (0,2)	1,9 (0,6)
Jul	10,6 (3,9)	20,7 (2,1)	43,5 (8,1)	77,9 (7,8)	27,2 (1,8)	35,4 (1,3)	15,6 (1,8)	21,0 (1,2)	0,5 (0,3)	2,1 (0,6)
Ago	11,3 (3,0)	22,6 (2,1)	38,2 (6,8)	74,9 (6,3)	27,8 (2,1)	37,8 (1,3)	15,7 (1,7)	22,7 (1,3)	0,5 (0,4)	2,1 (0,7)
Set	9,4 (2,1)	24,7 (1,6)	41,3 (10,4)	82,5 (3,3)	28,2 (1,5)	38,8 (1,4)	16,7 (1,4)	24,1 (1,3)	0,5 (0,3)	2,2 (0,7)
Out	8,6 (1,4)	26,4 (1,5)	49,6 (10,1)	86,4 (2,2)	27,4 (1,1)	38,1 (1,7)	18,8 (1,2)	24,1 (1,4)	0,5 (0,3)	2,1 (0,7)
Nov	8,5 (1,5)	27,4 (1,6)	60,7 (8,8)	90,0 (1,9)	26,8 (0,8)	36,0 (1,7)	19,7 (1,2)	23,9 (1,2)	0,4 (0,3)	2,0 (0,6)
Dez	8,2 (1,6)	27,4 (1,8)	67,5 (5,8)	91,8 (2,0)	26,4 (1,0)	35,0 (1,5)	19,7 (1,0)	23,6 (1,3)	0,4 (0,3)	2,0 (0,6)

OBS: O número entre parênteses representa o desvio padrão entre as EMAs. Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m.

Como a temperatura mínima na mesma amostra não pode ser superior à temperatura máxima, este estudo segue a abordagem sugerida por Xu et al. (2014) e Pan et al. (2017). Primeiro, foi calculado a média e a diferença entre Tmax e Tmin; em seguida, realizada a amostragem da média e da diferença das temperaturas; finalmente, restauramos as temperaturas mínimas e máximas das amostras obtidas.

4.3. RESULTADOS

4.3.1 Distribuição espaço-temporal das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência.

As médias mensais de Radiação Solar (R_s), umidade relativa (UR), temperaturas máxima e mínima do ar (T_{max} e T_{min}), velocidade do vento (VV) e evapotranspiração de referência (ET_0) nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso são representadas nos Boxplot da Figura 4-2. Todas as variáveis seguem o padrão sazonal entre os períodos chuvoso e seco. T_{max} e VV atingem sua maior média ao final do período seco ($38,4 \pm 1,3$ °C e $1,3 \pm 0,5$ m s⁻¹), enquanto sua média mais baixa ocorre no final da estação chuvosa ($33,8 \pm 1,3$ °C e $0,9 \pm 0,3$ m s⁻¹). As médias de T_{min} e UR variam de $14,6 \pm 1,0$ °C a $20,0 \pm 1,0$ °C e $52,6 \pm 7,1\%$ a $83,0 \pm 2,5\%$, respectivamente, com máxima na estação chuvosa e mínima na estação seca. A menor média de R_s é observada durante o início da estação seca ($16,2 \pm 2,2$ MJ m⁻² d⁻¹) apresentando aumento gradual até o final da estação seca quando atinge sua média mais alta ($19,1 \pm 1,4$ MJ m⁻² d⁻¹). O início da estação seca também exibe as menores médias de ET_0 ($3,5 \pm 0,3$ mm d⁻¹). A demanda de evapotranspiração aumenta durante o período seco, atingindo máxima em setembro ($5,0 \pm 0,6$ mm d⁻¹) e mantendo-se relativamente constante durante a estação chuvosa (cerca de $4,1 \pm 0,3$ mm d⁻¹).

A distribuição espacial da evapotranspiração e suas variáveis meteorológicas em escala anual e sazonal são exibidas na Figura 4-3. Os resultados mostram uma clara variação zonal que acompanha os biomas e a distribuição de topografia do estado de Mato Grosso. Na região amazônica do estado são observados os menores valores de R_s , T_{max} , VV e ET_0 e os maiores valores de T_{min} e UR. Na região do Cerrado também é possível observar a influência da topografia nas áreas de maior altitude (sudeste do estado) onde há diminuição do R_s , T_{max} , T_{min} e ET_0 , em comparação com o resto do bioma no estado. A distribuição espacial das variáveis no estado é menos evidente durante a estação chuvosa, quando observada homogeneidade na média de R_s , UR e T_{min} entre os dois biomas de Mato Grosso.

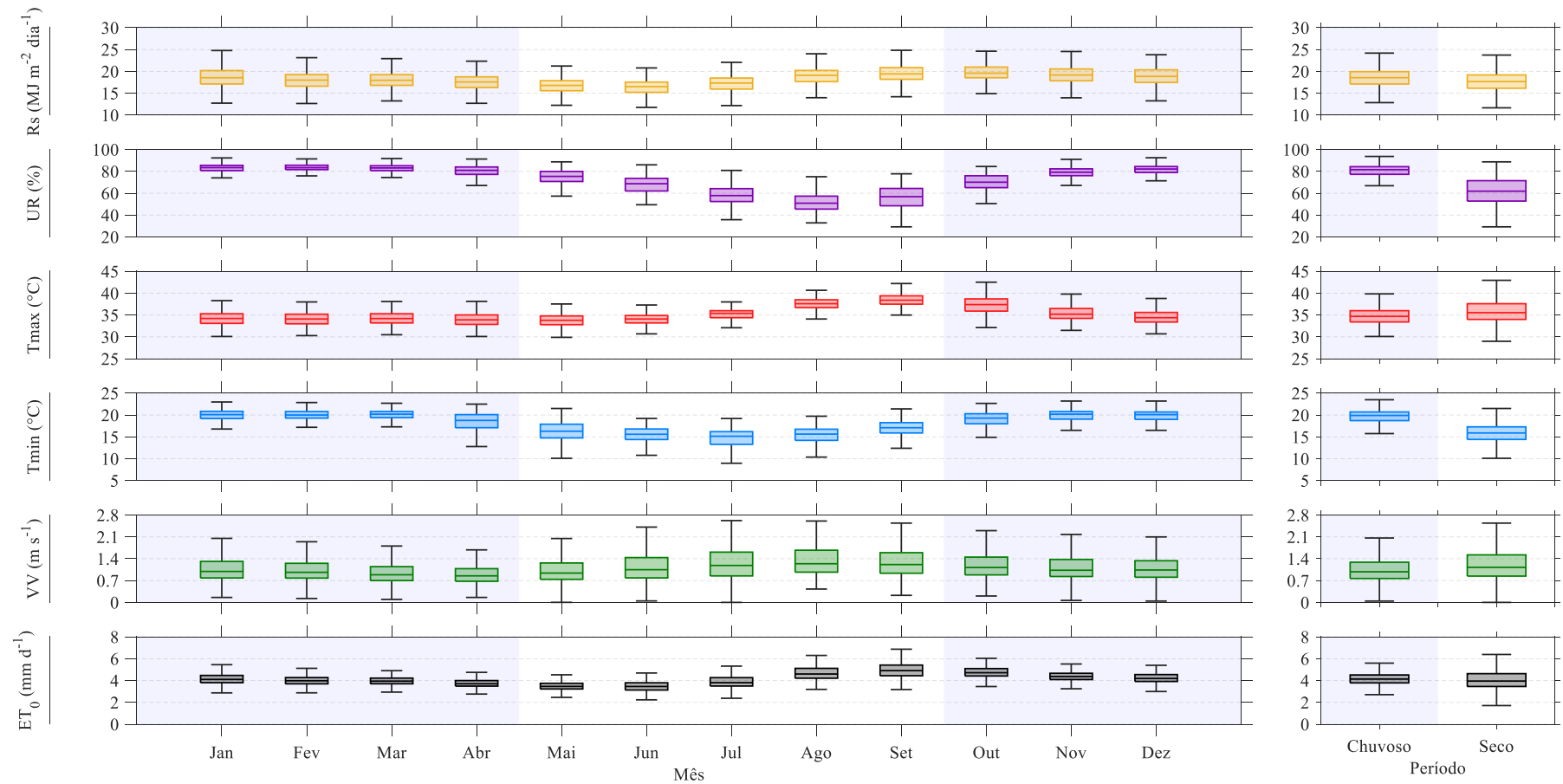


Figura 4-2: Médias mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil. (Série de dados de 2008-2020).

OBS: Variáveis meteorológicas: R_s - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; T_{max} - Temperatura máxima do ar; T_{min} - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m.

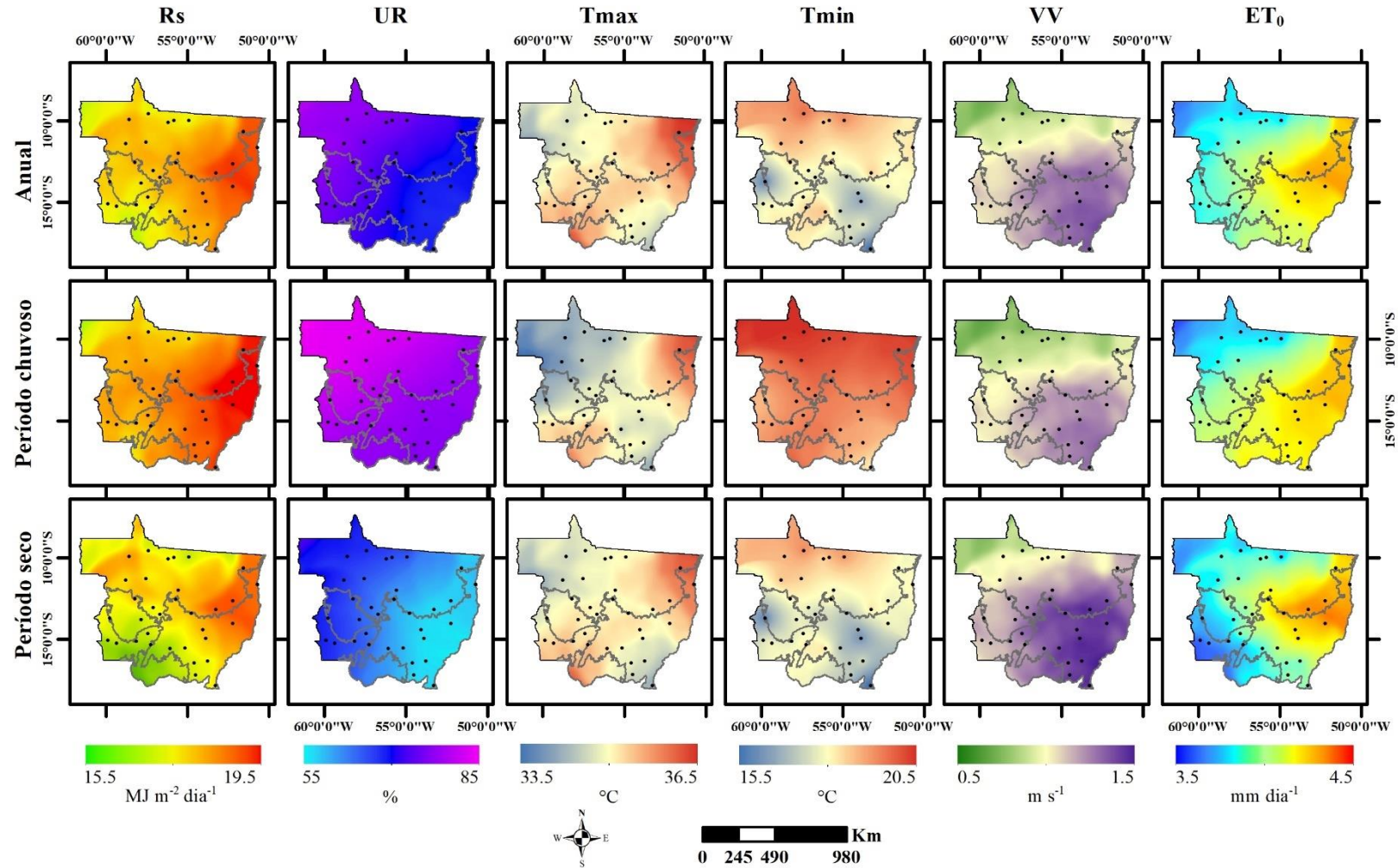


Figura 4-3: Distribuição espacial da evapotranspiração de referência (ET₀) e das variáveis meteorológicas nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil. (Série de dados de 2008-2020)

OBS: Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m. Linhas no mapa demarcam os biomas e pontos as EMAs do estado de Mato Grosso.

4.3.2 Distribuição espaço-temporal dos coeficientes de sensibilidade de Sobol

A variação dos índices de sensibilidade das variáveis meteorológicas da ET_0 obtidas nas 33 EMAs é apresentados em escala de temporal anual e sazonal (Figura 4-4), e mensal (Figura 4-5). Com base no método de Tang et al. (2007), o valor dos índices de sensibilidade de primeira ordem (S_1) e total (S_{tot}) pode ser separado em três níveis de sensibilidade: insensível ($S < 0,01$); sensível ($S \geq 0,01$); e altamente sensível ($S \geq 0,1$). Assim, das cinco variáveis meteorológicas, a ET_0 é altamente sensível a R_s , UR e VV; sensíveis à variável T_{max} ; e insensível a T_{min} .

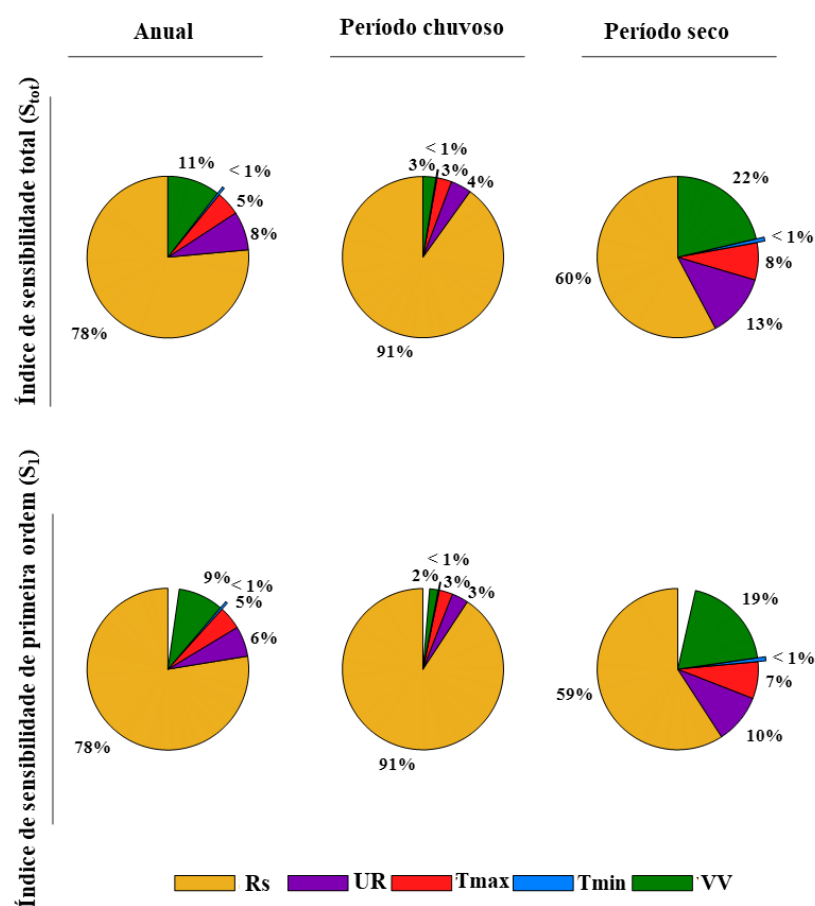


Figura 4-4: Proporção anual e sazonal dos índices de sensibilidade de primeira ordem e total de Sobol das variáveis meteorológicas usadas nas estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0) por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso, Brasil.

OBS: Variáveis meteorológicas: R_s - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; T_{max} - Temperatura máxima do ar; T_{min} - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m.

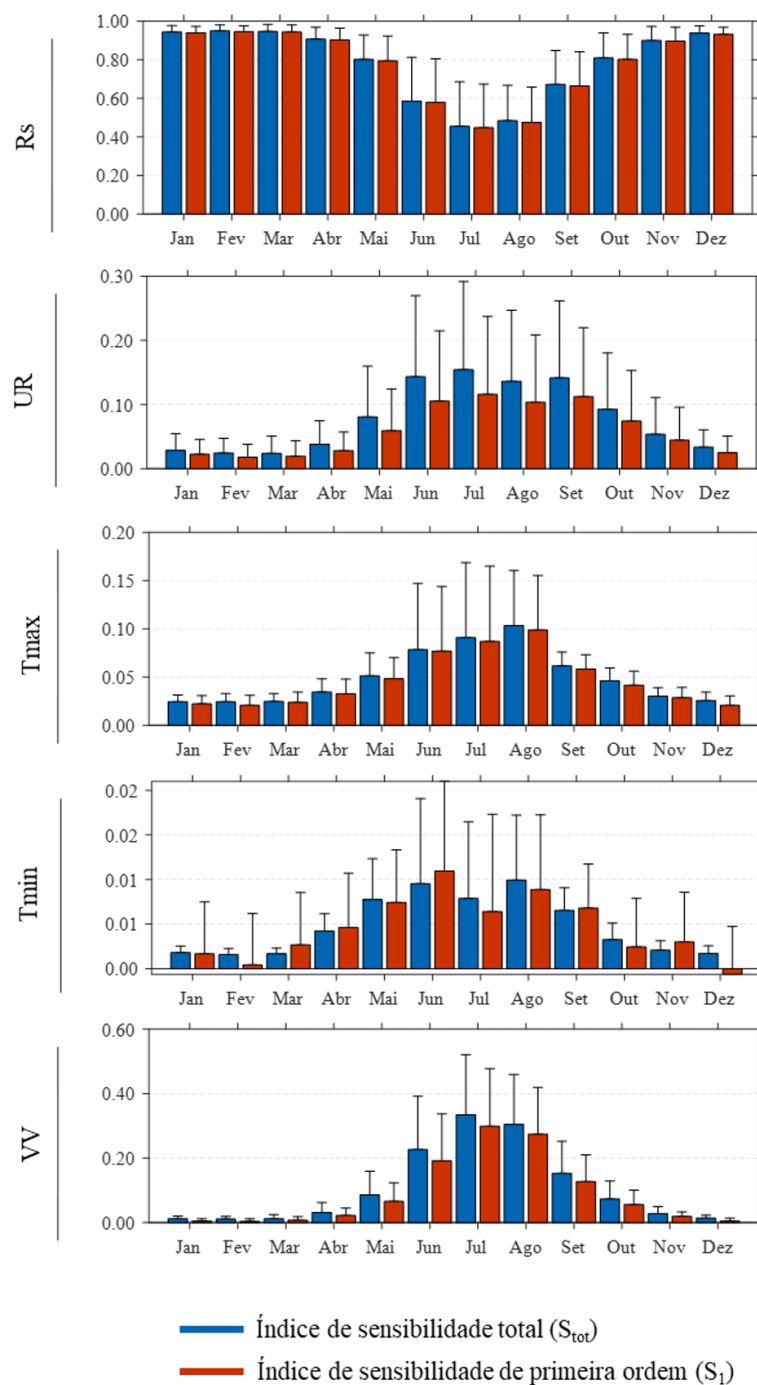


Figura 4-5: Variações mensais dos índices de sensibilidade de primeira ordem e total de Sobol das variáveis meteorológicas usadas nas estimativas da evapotranspiração de referência (ET₀) por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso, Brasil.

OBS: Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m. A barra de erro representa o desvio padrão dos índices nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

Os índices de sensibilidades da ET_0 para cada variável, em geral, apresentaram a seguinte ordem: $Rs > VV > UR > T_{max} > T_{min}$. A radiação solar (Rs) explicou a maior variância, representando pelo menos 59% dos índices de sensibilidade total e de primeira ordem durante o período seco e atingindo, em média, 91% durante os meses do período chuvoso. UR e VV explicam, respectivamente, cerca de 8% e 11% do S_{tot} ; e 6% e 9% da variação S_1 , na escala anual, alternando como a segunda principal variável durante os períodos sazonais, com a UR dominando durante o período chuvoso e VV durante o período seco. As variáveis de temperatura tiveram menor influência no ET_0 mato-grossense. Durante o ano, os índices de sensibilidade de T_{max} variaram de 3% a 10%, enquanto T_{min} atinge um valor máximo de aproximadamente 1% durante o ano.

As distribuições espaciais da média anual e sazonal de S_1 e S_{tot} são apresentadas na Figura 4-6. Os resultados indicam que os coeficientes, além do comportamento sazonal, também possuem características zonais que se assemelham a distribuição dos biomas no estado de Mato Grosso. Embora o Rs seja a variável dominante na determinação da ET_0 no estado, a influência da radiação é diferente nos biomas Amazônia e Cerrado. Enquanto na maior parte da região amazônica os índices de sensibilidade da variável Rs serem, em média, superiores a 80%, no bioma Cerrado, a sensibilidade do ET_0 à radiação varia de 40% a 80% indicando que as variáveis UR , VV e T_{max} também apresentam influência nas flutuações da ET_0 do Cerrado.

Durante a estação seca do bioma Cerrado, quando os índices de sensibilidade da Rs são de cerca de 50%, é possível observar que a segunda variável dominante varia conforme a distribuição espacial. No sudeste do Cerrado, a UR é a segunda é diferente dominante, sendo responsável por 20 a 30% da variação do ET_0 . Na região nordeste do Cerrado, a T_{max} torna-se a segunda variável dominante também com cerca de 20% a 30% de influência. E, na região central do Cerrado a segunda variável dominante é a VV cujo índices de sensibilidade variam de 30% a 40%.

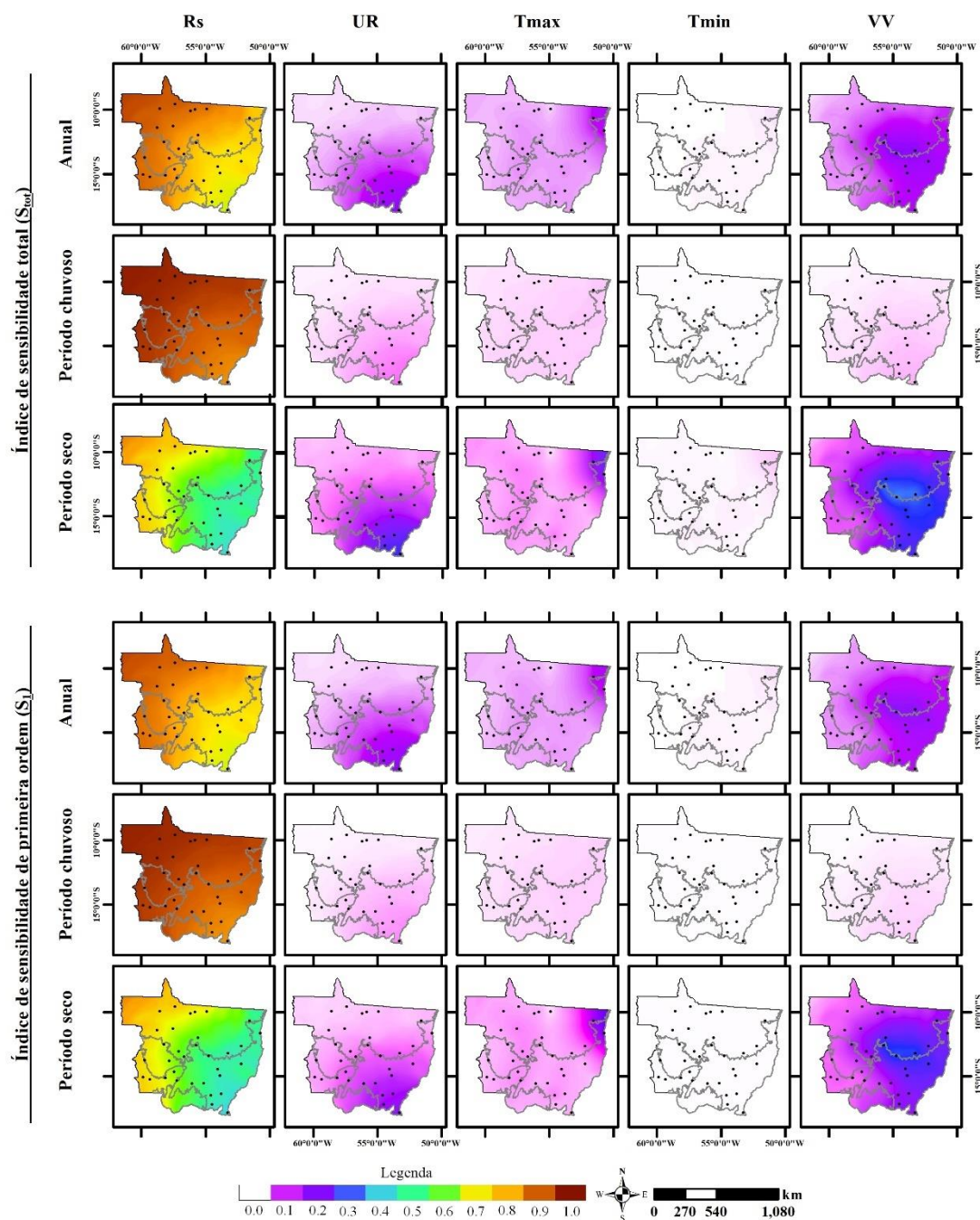


Figura 4-6: Distribuição espacial dos índices de sensibilidade total e de primeira ordem de Sobol das variáveis meteorológicas usadas nas estimativas da evapotranspiração de referência (ET_0) por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso, em escala anual e sazonal.

OBS: Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m. Linhas no mapa demarcam os biomas e pontos as EMAs do estado de Mato Grosso.

4.4. DISCUSSÃO

O entendimento sobre as causas das variações da ET_0 é essencial para a gestão de recursos hídricos e agricultura em Mato Grosso. Os resultados deste estudo destacaram a grande sensibilidade do ET_0 à radiação solar na área de estudo. No geral, a sensibilidade da ET_0 às cinco variáveis meteorológicas no estado tem a seguinte classificação: $Rs > VV \geq UR > T_{max} > T_{min}$. Embora, o Rs seja a variável climática dominante, explicando de 60% a 90% da variabilidade do ET_0 ao longo do ano, a sensibilidade do ET_0 às variáveis meteorológicas, semelhante a trabalhos encontrados na literatura, apresentou fortes indícios de variabilidade espacial (Figura 4-6; GONG et al., 2006; YIN et al., 2010; ZHANG et al., 2011; FAN; THOMAS, 2018). Neste contexto, a variável UR desempenha um papel importante na determinação da variação espacial e sazonal dos índices de sensibilidade da ET_0 no Mato Grosso.

Na região do bioma Amazônico mato-grossense, ao longo do ano, são observados porcentagens mais altas, e praticamente constante, de umidade relativa do ar, assim como, menores valores e grande flutuação das medidas de radiação incidente (Figura 4-3). A principal causa para esse padrão baseia-se no fato de que a região amazônica se caracteriza como uma área tropical úmida na qual, por ação convectiva, força a ascensão da umidade do ar levando a formação de uma cobertura de nebulosidade mais espessa em comparação com a porção do Cerrado do Mato Grosso (ARIAS et al., 2011), conseqüentemente, nesse bioma, não somente ocorre uma maior atenuação do Rs , como também há maior redução das amplitudes das temperaturas. Dessa maneira, a combinação desses fatores poderia explicar por que a Rs é o fator limitante no processo de evapotranspiração no bioma Amazônico.

Esses resultados são consistentes com os encontrados em áreas subtropicais e tropicais úmidas da China (STANHILL; COHEN, 2001; YIN et al., 2010), nas quais são relatados que as mudanças na duração da insolação diária (e consecutivamente Rs) são a principal força motriz para a variabilidade do ET_0 . Comportamento semelhante também pode ser observado na região do Cerrado durante os meses da estação chuvosa quando a umidade relativa passa a ser, em geral, superior a 80%, a temperatura máxima e a amplitude térmica são menores e a cobertura de nuvens aumenta devido à circulação predominante da massa equatorial continental (mEc) e da zona de convergência do Atlântico Sul ($ZCAS$) as quais são transporte de umidade da

Amazônia para as regiões de Cerrado (Figura 4-6; ARIAS et al., 2011; NASCIMENTO, et al., 2020; DINIZ et al., 2018).

Durante a estação seca na região do bioma Cerrado, a distribuição espacial dos índices de sensibilidade pode ser separada em três áreas de influência análogas a subdivisão do bioma proposta por Nascimento et al. (2020): Cerrado Meridional (região sudeste do cerrado mato-grossense), Cerrado Central, e Cerrado Setentrional (região nordeste do cerrado mato-grossense). Na região do Cerrado Meridional, a incursão ocasional de massas de circulação de ar da massa polar (mP) em associação com a topografia faz com que as condições de nebulosidade aumentem e haja menores médias de radiação incidente (Figura 4-6; GARREAUD, 1999; SETTE, 2000; DINIZ et al., 2018), no entanto, devido à menor média e maiores flutuações da RH, em comparação ao observado no bioma amazônico, observa-se um aumento nos índices de sensibilidade da umidade relativa. No Cerrado Central e Setentrional, as reduções da umidade atmosférica, causada pela massa tropical do Atlântico e pela topografia plana, criam condições de céu mais claras (SETTE, 2000; ARIAS et al., 2011; DINIZ et al., 2018; NASCIMENTO, et al., 2020), reduzindo assim as flutuações da R_s . Nesse cenário, o aumento dos índices de sensibilidade das variáveis está ligado à sua capacidade de aumentar a retenção de água na atmosfera. Portanto, na região Setentrional do Cerrado, onde o T_{max} atinge os maiores valores do estado, a T_{max} tem maior sensibilidade que a UR e a VV, pois permite um aumento do déficit de pressão de vapor de saturação. Por outro lado, na região Central do Cerrado, onde o T_{max} é mais baixo e o VV é mais alto, a velocidade do vento tem maior influência por causar distúrbios e movimento da camada limite atmosférica.

Esses resultados são consistentes com os encontrados por Taban; Talaei (2014); Zhao et al. (2015); Fan; Thomas (2018); Zhang et al. (2021), os quais indicam que a circulação atmosférica do ar influencia diretamente os padrões espaciais da sensibilidade global da ET_0 . Esses autores ainda concordam que condições de alta nebulosidade e umidade relativa são os principais fatores por aumentar os índices de sensibilidade da radiação, enquanto condições de céu limpo e baixa umidade relativa aumentam os índices de sensibilidade da velocidade do vento. Assim, em regiões árida e semiárida, a ET_0 é mais sensível às mudanças nas variáveis R_s , VV e UR.

As variáveis de temperatura (T_{max} e T_{min}) em geral explicaram menos de 10% do ET_0 . Embora condições de temperaturas maiores, pela redução da UR e fornecimento energia ao processo, tendam a aumentar o ET_0 , observa-se que os efeitos da T_{max} e T_{min} na sensibilidade da ET_0 , semelhante a Yin et al. (2010); Taban; Talaee (2014); Zhao et al. (2014); Fan; Thomas (2018); Zhang et al. (2021), foram quase insignificantes em comparação com outros fatores.

O método de Sobol forneceu informações úteis para ajudar a entender o impacto das variáveis climáticas na ET_0 . Dado nossos resultados, as estimativas futuras da ET_0 no estado de Mato Grosso com base em formulações que não incluam o efeito das mudanças na radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar devem ser consideradas com cautela. É preciso tomar, ainda, maior atenção na obtenção das estimativas do R_s por ser a variável dominante nas estimativas da ET_0 por Penman-Monteith. Além disso, no Cerrado mato-grossense, principalmente no período seco, as interações entre umidade relativa e velocidade do vento não podem ser ignoradas ao calcular a evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith.

4.5. CONCLUSÕES

A sensibilidade global da ET_0 estimada por Penman-Monteith às variáveis meteorológicas radiação global incidente (R_s), umidade relativa do ar (UR), temperatura máxima (T_{max}) e mínima do ar (T_{min}) e velocidade do vento a 2 metros (VV) apresenta distribuição sazonal e espacial no estado de Mato Grosso.

A variável dominante para a evapotranspiração no Mato Grosso em qualquer período é a radiação solar (R_s), tendo mais influência durante a estação chuvosa e em regiões úmidas (Amazônia). As outras variáveis de impacto secundário na sensibilidade seguem a ordem de classificação de $VV > UR > T_{max} > T_{min}$.

A ET_0 por Penman-Monteith é mais sensível às mudanças no VV, UR e T_{max} nos ambientes áridos e semiáridos, como o Cerrado durante a estação seca. Entretanto, a sensibilidade às variáveis UR e VV é maior na região Meridional e Central do bioma Cerrado, enquanto na região Setentrional a variável secundária com maior sensibilidade é a T_{max} .

A variável meteorológica T_{min} não tem influência significativa na ET_0 estimada por Penman-Monteith no estado de Mato Grosso.

A estimativa da ET_0 por Penman-Monteith para o estado de Mato Grosso carece de dados acurados e precisos de radiação solar incidente (R_s), sejam eles obtidos da série de dados observados em estações meteorológicas ou estimados por preenchimento de falhas.

4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO – Irrigation and Drainage Paper**, 56, 300 p., 1998.
- ARAÚJO-NETO, R. A. A.; DOS SANTOS NASCIMENTO, J. W.; DE OLIVEIRA, F. F.; REBELO, G. R. P.; DE LIMA SILVA, F. D. A.; DE CARVALHO, A. L. Models generated by multiple regression in filling meteorological data failures in an automatic meteorological station in Alagoas. **Revista Geama**, v.6, n.2, p.4-10, 2020.
- ARIAS, P. A.; FU, R.; HOYOS, C. D.; LI, W.; ZHOU, L. Changes in cloudiness over the Amazon rainforests during the last two decades: diagnostic and potential causes. **Climate Dynamics**, v. 37, p. 1151-1164, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0903-2>.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological irrigation data, **Tech. Pap.** v. 96, 48 p., 1950.
- CONG, Z. T.; YANG, D. W.; NI, G. H. Does evaporation paradox exist in China? **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, p. 357-366, 2009. <https://doi.org/10.5194/hess-13-357-2009>.
- DINIZ, F. D. A.; RAMOS, A. M.; REBELLO, E. R. G. Brazilian climate normals for 1981-2010. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 131-143, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018000200001>.
- FAN, Z. X.; THOMAS, A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: Spatial and temporal variability over China 1960–2011. **Journal of Hydrology**, v. 560, p. 461-470, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.080>.

- GARREAUD, R. Cold air incursions over subtropical and tropical South America: A numerical case study. **Monthly Weather Review**, v. 127, n. 12, p. 2823-2853, 1999. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<2823:CAIOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<2823:CAIOSA>2.0.CO;2).
- GONG, L.; XU, C. Y.; CHEN, D.; HALLDIN, S.; CHEN, Y.D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 620-629, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.027>.
- GOYAL, R. K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). **Agricultural Water Management**, v. 69, p. 1-11, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.03.014>.
- GU, S.; TANG, Y.; CUI, X.; DU, M.; ZHAO, L.; LI, Y.; XU, S.; ZHOU, H.; KATO, T.; QI, P.; ZHAO, X. Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. D08118, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JD009173>.
- GUITJENS, J. C. Models of Alfalfa Yield and Evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 108, n. 3, p. 212-222, 1982. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001389>.
- HARBECK, JR. G. E. **A Practical Field Technique for Measuring Reservoir Evaporation Utilizing Mass-transfer Theory**, US Geological Survey, Paper 272-E, 101-105, 1962. <https://doi.org/10.3133/pp272E>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Banco de dados por Estado. 2022. Disponível em: (<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt>). Acesso em: 31 jan. 2023.
- IRMAK, S.; PAYERO, J. O.; MARTIN, D. L.; IRMAK, A.; HOWELL, T. A. Sensitivity Analyses and Sensitivity Coefficients of Standardized Daily ASCE-Penman-Monteith Equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 6, p. 564-578, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:6\(564\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:6(564)).
- JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. D. C. R. Sensitivity of ASCE-Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1, p. 943-956, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>.

- JHA, M.; PAN, Z.; TAKLE, E. S.; GU, R. Impacts of climate change on streamflow in the Upper Mississippi River Basin: A regional climate model perspective. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. D09105, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JD003686>.
- JOE, S.; KUO, F.Y. Constructing Sobol' sequences with better two-dimensional projections. **SIAM. Journal of Scientific Computing**, v. 30, p. 2635–2654, 2008. <https://doi.org/10.1137/070709359>.
- LIN, P. F.; HE, Z. B.; DU, J.; CHEN, L. F.; ZHU, X.; LI, J. Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: historical trends and projected changes. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 2980–2993, 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.5477>.
- LIU, B.; XU, M.; HENDERSON, M.; GONG, W. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. D15102, 2004. <https://doi.org/10.1029/2004JD004511>.
- LIU, Q.; YAN, C.; JU, H.; GARRÉ, S. Impact of climate change on potential evapotranspiration under a historical and future climate scenario in the Huang-HuaiHai Plain, China. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, p. 387–401, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2060-6>.
- McVICAR, T.R.; VAN NIEL, T. G.; LI, L. T.; HUTCHINSON, M. F.; MU, X. M.; LIU, Z.H. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences. **Journal of Hydrology**, v. 338, p. 196–220, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.018>.
- MOSAEDI, A.; GHABAEI, M.; SADEGHI, S. H.; MOOSHAKHIAN, Y.; BANNAYON, M. Sensitivity Analysis of Monthly Reference Crop Evapotranspiration Trends in Iran: A Qualitative Approach. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, p. 857–873, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1740-y>.
- NAUMANN, G.; ALFIERI, L.; WYSER, K.; MENTASCHI, L.; BETTS, R. A.; CARRAO, H.; SPINONI, J.; VOGT, J.; FEYEN, L. Global changes in drought conditions under different levels of warming. **Geophysical Research Letters**, v. 45, p. 3285–3296, 2018. <https://doi.org/10.1002/2017GL076521>.

- NASCIMENTO, D. T. F.; NOVAIS, G. T. Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Élisée - Revista De Geografia Da UEG**, v. 9, n. 2, p. e922021, 2020.
- PAN, S.; FU, G.; CHIANG, Y. M.; RAN, Q.; XU, Y. P. A two-step sensitivity analysis for hydrological signatures in Jinhua River Basin, East China. **Hydrological Sciences Journal**, v. 62, p. 2511-2530, 2017. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1388917>.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 193, p. 120-145, 1948. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81-92, 1972. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2).
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CHAN, K. P. S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. **Technometrics**, v. 41, p. 39-56, 1999. <http://dx.doi.org/10.1080/00401706.1999.10485594>.
- SALTELLI, A.; ANNONI, P.; AZZINI, I.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M.; TARANTOLA, S. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. **Computer Physics Communications**, v. 181, p. 259-270, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- SALTELLI, A.; ALEKSANKINA, K.; BECKER, W.; FENNELL, P.; FERRETTI, F.; HOLST, N.; SUSHAN, L.; QIONGLI, W. Why so many published sensitivity analyses are false: a systematic review of sensitivity analysis practices. **Environmental Modelling & Software**, v. 114, p. 29-39, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.01.012>.
- SARNIGHAUSEN, V. C. R.; GOMES, F. G.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, p. 766-787, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.71569>.

- SETTE, D. M. Os climas do cerrado do Centro-Oeste. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 29-42, 2005. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25225>.
- SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. **Climate Dynamics**, v. 31, p. 79-105, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0340-z>.
- SOBOL, I. M. Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. **Mathematical Modelling and Computational Experiments**, v.4, p.407-414, 1993.
- SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M.; XU, C. Global sensitivity analysis in hydrological modelling: review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 739-757, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.
- SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013. <https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334>.
- SOUZA, A. P.; TANAKA, A. A.; SILVA, A. C.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T.; GOMES, A. W. A.; KLAR, A. E. Reference evapotranspiration by Penman-Monteith FAO 56 with missing data of global radiation. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 2, p. 217-233, 2016. <https://doi.org/10.18011/bioeng2016v10n2p217-233>.
- STANHILL, G.; COHEN, S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, p. 255-278, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0).
- TABAN, H.; TALAEE, P. H. Sensitivity of evapotranspiration to climate change in different climates. **Global and Planetary Change**, v. 115, p. 16-23, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.01.006>.
- TANAKA, A. A.; SOUZA, A. P.; KLAR, A. E.; SILVA, A. C.; GOMES, A. W. A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado

- do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 91-104, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200001>.
- TANG, Y.; REED, P.; WAGENER, T.; VAN WERKHOVEN, K. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 793-817, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-793-2007>.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, p. 55-94, 1948. <https://doi.org/10.2307/210739>.
- TRENBERTH, K. E.; DAI, A.; VAN DER SCHRIER, G.; JONES, P. D.; BARICHIVICH, J.; BRIFFA, K. R.; SHEFFIELD, J. Global warming and changes in drought. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 17-22, 2013. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>.
- DENTZ, E.V. Produção agrícola no estado do Mato Grosso e a relação entre o agronegócio e as cidades: o caso de Lucas do Rio Verde e Sorriso. **Ateliê Geográfico**, v. 13, n. 2, p. 165-186, 2019. <https://doi.org/10.5216/ag.v13i2.54290>.
- VELDE, Y.V.D; LYON, S. W.; DESTOUNI, G. Data-driven regionalization of river discharges and emergent land cover evapotranspiration relationships across Sweden. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, p. 2576-2587, 2013. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50224>.
- GRIENSVEN, A.V.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, p. 10-23, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.008>.
- WANG, G. Q.; ZHANG, J. Y.; JIN, J. L.; PAGANO, T. C.; CALOW, R.; BAO, Z. X.; LIU, C. S.; LIU, Y. L.; YAN, X. L. Assessing water resources in China using PRECIS projections and a VIC model. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 231-240, 2012. <https://doi.org/10.5194/hess-16-231-2012>.
- XIANG, K.; LI, Y.; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration - a review. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 1-16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>.

- XU, Y. P.; ZHANG, X.; RAN, Q.; TIAN, Y. Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China. **Journal of Hydrology**, v. 483, p. 51-60, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.004>.
- XU, Y. P.; PAN, S. L.; FU, G. T.; TIAN, Y.; ZHANG, X. J. Future potential evapotranspiration changes and contribution analysis in Zhejiang Province, East China. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, p. 2174-2192, 2014. <https://doi.org/10.1002/2013JD021245>.
- YANG, H. B.; YANG, D. W. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. **Journal of Hydrology**, v. 414, p. 184-193, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.043>.
- YIN, Y.; WU, S.; DAI, E. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971–2008. **Chinese Science Bulletin**, v. 55, p. 3329-3337, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11434-010-3289-y>.
- ZHANG, K.; ZHU, G.; MA, J.; YANG, Y.; SHANG, S.; GU, C. Parameter analysis and estimates for the MODIS evapotranspiration algorithm and multiscale verification. **Water Resources Research**, v. 55, p. 2211-2231, 2019. <https://doi.org/10.1029/2018WR023485>.
- ZHANG, S.; LIU, S.; MO, X.; SHU, C.; SUN, Y.; ZHANG, C. Assessing the impact of climate change on potential evapotranspiration in Aksu River Basin. **Journal of Geographical Sciences**, v. 21, p. 609-620, 2011. <https://doi.org/10.1007/s11442-011-0867-0>.
- ZHANG, X.; XIAO, W.; WANG, Y.; WANG, Y.; KANG, M.; WANG, H.; HUANG, Y. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in the Shiyang River Basin. **Journal of Water and Climate Change**, v. 12, n. 7, p. 2875-2884, 2021. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.225>.
- ZHAO, J.; XU, Z. X.; ZUO, D. P.; WANG, X. M. Temporal variations of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological factors in Heihe River Basin, China. **Water Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2015.01.004>.
- ZHAO, J.; XIA, H.; YUE, Q.; WANG, Z. Spatiotemporal variation in reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in China under future

scenarios. **International Journal of Climatology**, v. 40, p. 3813-3831, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6429>.

ZHAO, Y. F.; ZOU, X. Q.; ZHANG, J. X.; CAO, L.; XU, X.; ZHANG, K.; CHEN, Y. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau Region of China, during 1961-2012. **Quaternary International**, v. 349, p. 196-206, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.050>.

4.7 ANEXOS

Anexo 4-1: Limites amostrais inferiores e superiores (Inf - Sup), correspondentes ao 2,5 e 97,5 percentis, da variável meteorológica radiação solar incidente (Rs) observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

Código	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembr o	Dezembro
A-901	06,8 - 21,8	08,9 - 19,1	06,5 - 22,4	06,5 - 20,2	06,8 - 18,0	06,7 - 17,0	05,5 - 18,2	06,2 - 19,1	07,2 - 21,1	10,7 - 22,3	10,8 - 23,2	10,5 - 21,7
A-902	17,3 - 24,8	15,5 - 23,1	16,3 - 21,3	14,1 - 19,3	13,5 - 18,5	15,0 - 21,7	12,6 - 19,4	16,2 - 21,5	16,7 - 21,0	14,9 - 20,3	16,9 - 23,7	16,3 - 25,0
A-903	16,3 - 21,7	15,0 - 21,2	15,0 - 20,6	14,4 - 19,9	14,1 - 17,9	12,6 - 18,8	14,5 - 17,7	15,9 - 20,8	14,3 - 21,2	17,2 - 20,9	16,1 - 20,3	15,3 - 21,4
A-904	15,3 - 20,6	15,4 - 19,2	16,1 - 22,9	14,7 - 20,2	15,7 - 19,9	14,7 - 17,3	14,3 - 18,4	15,7 - 20,9	17,0 - 23,3	17,9 - 24,4	16,0 - 23,1	15,4 - 22,2
A-905	14,4 - 20,2	14,0 - 18,8	15,2 - 22,3	12,5 - 18,8	12,8 - 17,6	11,4 - 16,2	12,4 - 16,6	14,0 - 18,8	14,7 - 21,8	14,8 - 21,8	15,2 - 20,8	16,6 - 21,6
A-906	13,0 - 16,8	11,6 - 20,1	07,4 - 18,0	04,1 - 17,9	03,0 - 17,4	02,6 - 18,0	01,9 - 16,9	02,9 - 18,5	05,8 - 18,5	12,4 - 18,8	14,0 - 19,5	12,1 - 20,8
A-907	12,7 - 22,3	15,5 - 21,3	15,0 - 21,2	15,7 - 20,4	14,8 - 16,8	14,9 - 16,4	15,3 - 19,1	17,1 - 19,6	17,3 - 20,2	18,0 - 22,8	17,3 - 22,4	17,0 - 20,9
A-908	15,9 - 22,7	17,1 - 20,9	17,1 - 21,1	16,6 - 20,2	14,1 - 18,9	09,4 - 18,5	09,1 - 19,3	10,2 - 21,3	11,9 - 23,2	15,2 - 23,6	16,5 - 23,2	17,5 - 21,9
A-910	13,9 - 18,9	14,8 - 20,4	15,8 - 19,6	15,1 - 19,5	14,6 - 18,8	15,9 - 19,2	14,5 - 19,0	13,4 - 20,8	14,2 - 22,8	17,2 - 22,9	16,4 - 20,7	14,2 - 20,3
A-912	16,1 - 24,2	14,8 - 19,9	15,9 - 19,7	16,9 - 20,7	16,0 - 19,2	11,7 - 17,7	16,0 - 19,1	18,2 - 20,2	15,9 - 21,4	16,1 - 21,4	18,0 - 22,6	18,7 - 23,1
A-913	16,0 - 19,6	15,2 - 20,4	15,6 - 19,1	14,8 - 18,4	14,2 - 18,2	14,9 - 18,8	15,5 - 19,9	17,8 - 21,2	17,0 - 23,1	18,1 - 22,7	16,6 - 20,9	16,4 - 21,5
A-914	16,2 - 20,4	15,0 - 20,5	16,0 - 19,4	15,1 - 19,2	15,4 - 18,4	13,9 - 16,9	14,6 - 17,3	14,7 - 18,9	16,6 - 21,4	17,6 - 23,6	16,9 - 22,2	15,7 - 20,9
A-915	16,4 - 25,7	15,1 - 22,9	16,4 - 22,7	13,9 - 22,2	14,5 - 19,7	14,5 - 19,3	14,7 - 20,3	15,2 - 21,7	16,0 - 24,5	17,4 - 24,0	12,9 - 24,6	16,6 - 23,6
A-916	15,8 - 21,3	15,3 - 20,8	16,9 - 21,1	16,7 - 21,5	16,8 - 19,2	13,7 - 19,3	17,5 - 19,8	18,7 - 21,5	18,6 - 24,2	17,6 - 23,2	17,2 - 23,6	17,0 - 23,7
A-917	15,5 - 23,5	16,1 - 21,4	16,7 - 21,7	16,8 - 21,5	15,5 - 21,2	15,6 - 23,2	17,9 - 23,3	18,1 - 24,1	16,6 - 24,5	17,7 - 25,3	16,8 - 23,9	17,0 - 22,1
A-918	15,8 - 24,2	13,6 - 20,9	15,8 - 21,9	14,9 - 19,6	15,2 - 17,8	13,0 - 18,7	15,0 - 19,4	17,7 - 21,3	15,4 - 22,7	18,0 - 24,1	17,6 - 26,3	16,3 - 24,8
A-919	12,8 - 17,9	12,1 - 19,1	14,1 - 18,5	14,7 - 18,2	14,2 - 17,9	15,4 - 18,4	16,2 - 18,8	13,6 - 20,0	12,8 - 21,7	13,0 - 21,9	11,8 - 20,6	13,0 - 18,8
A-920	15,0 - 18,8	15,2 - 21,3	16,5 - 19,1	15,1 - 18,1	13,9 - 17,7	13,8 - 17,0	12,8 - 18,9	16,0 - 20,7	16,4 - 21,9	19,2 - 21,9	16,8 - 20,5	15,9 - 21,3
A-921	15,2 - 24,3	13,2 - 22,6	13,0 - 21,1	13,7 - 20,8	13,1 - 19,1	12,7 - 19,0	14,6 - 19,6	17,5 - 21,9	16,6 - 24,8	18,7 - 24,4	17,4 - 27,2	16,5 - 25,7
A-922	07,6 - 22,3	05,2 - 19,6	11,9 - 21,4	08,9 - 19,5	07,6 - 17,1	06,0 - 18,0	10,7 - 18,4	16,9 - 19,7	16,2 - 20,5	14,4 - 19,3	13,6 - 21,2	10,6 - 20,4
A-924	13,6 - 19,5	14,7 - 21,4	13,8 - 18,7	13,6 - 18,6	12,4 - 17,6	12,0 - 18,2	13,2 - 19,2	14,8 - 21,1	15,4 - 22,5	17,5 - 23,2	16,0 - 21,7	15,9 - 21,5
A-926	16,2 - 20,6	16,6 - 23,1	16,3 - 20,6	17,0 - 20,2	16,9 - 19,3	18,2 - 19,9	18,6 - 20,6	19,3 - 21,8	18,8 - 23,0	18,8 - 23,1	18,4 - 21,6	17,1 - 21,5
A-927	18,0 - 23,5	16,5 - 22,0	16,6 - 21,2	16,6 - 21,8	12,0 - 25,2	16,6 - 22,9	21,8 - 29,3	23,4 - 28,6	18,8 - 24,5	19,6 - 24,6	17,6 - 23,5	18,3 - 23,2
A-928	14,9 - 21,1	15,2 - 19,8	15,7 - 19,5	15,9 - 19,1	14,9 - 17,2	14,5 - 17,0	13,6 - 18,0	15,6 - 20,2	16,5 - 22,3	17,5 - 22,2	16,4 - 20,3	16,2 - 21,0
A-929	16,0 - 23,1	16,2 - 22,9	17,2 - 21,6	16,7 - 21,2	15,9 - 20,1	16,2 - 19,1	17,5 - 19,9	19,2 - 21,6	19,1 - 23,5	18,3 - 23,7	16,8 - 23,3	16,5 - 23,8
A-930	16,4 - 24,1	16,0 - 23,9	16,7 - 21,4	17,4 - 21,9	17,0 - 19,4	16,3 - 19,7	16,0 - 20,2	16,8 - 21,6	17,4 - 23,7	18,8 - 23,8	17,3 - 24,0	18,0 - 22,3
A-931	17,2 - 22,6	17,6 - 22,3	17,3 - 21,5	17,4 - 22,3	16,0 - 19,7	16,5 - 19,2	17,2 - 19,4	19,1 - 21,1	18,7 - 24,0	18,9 - 23,6	16,4 - 24,1	18,4 - 23,6
A-932	15,4 - 22,1	14,3 - 19,8	13,1 - 20,1	10,8 - 18,9	13,8 - 19,3	13,7 - 17,7	14,4 - 19,9	15,4 - 20,2	13,6 - 21,1	14,6 - 21,6	15,8 - 22,2	16,3 - 21,3
A-933	17,2 - 23,4	17,2 - 21,2	15,3 - 21,8	16,4 - 20,3	15,3 - 18,6	13,9 - 17,6	15,5 - 18,0	16,9 - 19,9	18,2 - 23,1	19,4 - 23,5	18,6 - 24,7	18,3 - 23,6
A-934	16,5 - 22,7	17,4 - 20,4	14,8 - 21,9	15,9 - 20,1	15,5 - 18,6	15,2 - 17,4	15,9 - 18,0	17,2 - 20,7	18,1 - 22,4	18,0 - 22,9	18,1 - 23,8	17,5 - 21,9
A-935	16,7 - 22,1	15,6 - 21,3	16,2 - 20,3	15,6 - 18,5	13,7 - 16,6	13,0 - 15,5	14,4 - 16,2	13,8 - 18,5	13,2 - 21,3	16,8 - 22,0	17,4 - 22,0	16,3 - 22,9
A-936	16,4 - 20,3	14,1 - 19,4	14,8 - 20,6	14,1 - 18,4	12,5 - 17,3	13,8 - 17,2	14,5 - 18,3	16,8 - 20,2	16,8 - 22,2	17,2 - 21,8	15,6 - 21,4	14,2 - 19,4
A-937	16,7 - 22,2	15,4 - 19,7	15,3 - 20,6	12,7 - 19,2	10,5 - 17,6	11,9 - 17,1	13,9 - 17,6	15,5 - 19,7	17,4 - 21,5	18,6 - 21,8	17,2 - 22,0	15,7 - 21,8

Anexo 4-2: Limites amostrais inferiores e superiores (Inf - Sup), correspondentes ao 2,5 e 97,5 percentis, da variável meteorológica umidade relativa (UR) observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

Código	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembr o	Dezembro
A-901	70,4 - 80,6	74,2 - 82,7	74,6 - 83,2	70,0 - 81,5	57,5 - 74,1	53,5 - 70,0	44,1 - 65,4	38,9 - 52,8	37,1 - 57,6	59,0 - 69,7	64,4 - 79,5	68,2 - 83,7
A-902	75,7 - 88,3	81,6 - 88,5	78,8 - 90,6	75,2 - 91,3	67,6 - 84,4	60,2 - 76,0	44,5 - 70,3	42,2 - 57,6	42,2 - 65,3	59,9 - 78,1	74,9 - 84,5	78,0 - 88,6
A-903	81,2 - 89,7	80,1 - 86,2	76,1 - 85,8	68,4 - 85,0	69,1 - 85,3	61,8 - 77,3	58,9 - 68,9	51,7 - 68,6	48,2 - 77,0	60,7 - 81,7	70,0 - 89,4	67,1 - 88,8
A-904	74,1 - 83,6	74,9 - 83,2	73,8 - 81,1	68,4 - 79,7	60,0 - 73,8	51,4 - 66,6	43,5 - 55,4	40,1 - 51,0	44,7 - 62,7	60,3 - 73,3	67,8 - 81,5	72,2 - 82,6
A-905	80,5 - 89,9	81,9 - 90,7	79,8 - 90,2	69,5 - 86,9	64,2 - 83,2	58,1 - 75,4	46,7 - 63,5	46,3 - 60,8	48,2 - 68,9	59,7 - 83,2	65,5 - 88,5	65,7 - 92,1
A-906	82,7 - 91,4	83,7 - 93,7	84,4 - 90,6	80,5 - 89,1	77,0 - 83,9	68,4 - 80,4	61,2 - 68,4	52,1 - 65,7	55,5 - 77,2	65,6 - 81,7	59,2 - 86,1	78,4 - 87,1
A-907	71,2 - 83,8	76,5 - 83,4	73,2 - 84,3	69,5 - 80,2	63,8 - 76,7	59,5 - 77,0	51,8 - 67,5	41,8 - 55,9	35,3 - 65,0	47,7 - 76,1	52,6 - 81,3	62,4 - 82,7
A-908	76,0 - 86,8	77,4 - 86,2	71,3 - 84,7	67,5 - 83,8	62,2 - 79,3	54,0 - 69,7	44,3 - 57,1	36,4 - 50,0	31,5 - 65,8	52,1 - 76,1	62,2 - 82,8	69,0 - 84,3
A-910	79,2 - 90,4	79,4 - 88,5	83,0 - 87,4	79,1 - 86,1	72,1 - 83,3	56,5 - 77,2	55,4 - 69,2	51,9 - 64,4	52,8 - 73,2	62,1 - 80,7	70,9 - 88,1	73,6 - 89,7
A-912	77,5 - 87,6	80,2 - 86,9	77,1 - 88,1	67,1 - 84,3	68,2 - 80,8	57,7 - 72,7	42,2 - 62,9	40,0 - 56,7	36,8 - 68,8	59,2 - 80,0	64,9 - 84,7	77,6 - 86,9
A-913	83,8 - 90,9	85,0 - 89,2	83,1 - 91,7	81,7 - 91,3	79,9 - 88,7	76,6 - 86,0	67,6 - 80,9	61,1 - 75,6	63,7 - 77,7	75,4 - 82,4	75,5 - 86,7	82,5 - 90,3
A-914	80,0 - 88,5	82,7 - 91,4	83,3 - 87,4	78,4 - 86,7	73,4 - 83,5	66,5 - 77,5	55,3 - 75,0	45,6 - 70,8	51,0 - 72,8	69,8 - 81,9	76,1 - 83,7	80,8 - 92,5
A-915	79,7 - 88,2	81,5 - 85,6	77,1 - 85,2	71,5 - 85,4	61,4 - 81,4	54,8 - 72,4	50,2 - 60,9	44,0 - 56,7	40,9 - 71,5	60,1 - 75,9	72,2 - 82,6	76,7 - 85,6
A-916	71,0 - 88,4	81,4 - 86,4	67,9 - 85,2	64,4 - 86,1	65,5 - 82,8	56,3 - 77,6	52,2 - 70,9	48,1 - 64,3	44,6 - 71,8	51,3 - 80,5	43,3 - 83,9	64,4 - 86,6
A-917	79,8 - 87,8	77,5 - 86,8	77,7 - 85,3	75,9 - 84,5	61,3 - 80,0	52,1 - 71,6	46,5 - 57,8	42,8 - 55,8	46,1 - 71,1	63,4 - 77,0	71,3 - 82,9	77,6 - 86,5
A-918	64,2 - 84,5	76,3 - 88,3	69,1 - 87,2	63,4 - 85,1	65,4 - 79,4	49,5 - 70,6	41,9 - 58,2	33,4 - 51,9	32,5 - 67,8	48,8 - 80,3	46,7 - 84,2	62,4 - 85,3
A-919	83,3 - 92,3	82,9 - 93,2	84,7 - 91,1	75,0 - 90,9	71,8 - 88,1	62,5 - 82,9	55,7 - 72,8	46,6 - 72,3	64,4 - 77,8	70,7 - 82,4	78,4 - 87,2	79,6 - 88,4
A-920	80,6 - 89,8	82,1 - 92,0	83,8 - 89,7	77,9 - 88,4	73,8 - 83,9	58,8 - 78,0	50,0 - 67,9	45,3 - 64,5	53,4 - 75,6	69,8 - 84,5	78,0 - 87,6	77,9 - 87,2
A-921	69,0 - 85,6	77,2 - 85,8	67,8 - 85,6	72,8 - 86,2	68,3 - 80,4	61,8 - 75,8	50,6 - 66,9	46,4 - 60,1	41,2 - 68,2	60,2 - 81,6	50,1 - 83,9	61,8 - 85,5
A-922	77,9 - 85,3	78,0 - 86,1	80,1 - 89,2	76,2 - 87,8	72,9 - 85,4	70,3 - 84,0	60,9 - 78,7	54,7 - 69,1	53,4 - 67,2	62,5 - 74,0	68,4 - 81,8	74,6 - 84,4
A-924	84,6 - 98,1	83,9 - 99,9	84,4 - 90,5	79,8 - 90,5	79,0 - 84,8	58,6 - 81,1	52,7 - 71,2	46,8 - 72,1	52,7 - 76,2	71,9 - 82,1	78,1 - 91,0	81,7 - 92,7
A-926	78,5 - 86,8	72,4 - 87,1	78,5 - 85,8	75,5 - 85,6	72,2 - 81,2	59,8 - 73,5	49,0 - 59,9	43,9 - 60,5	54,6 - 74,9	59,3 - 79,3	61,0 - 85,8	72,9 - 86,1
A-927	79,4 - 88,9	81,6 - 88,1	83,7 - 88,4	76,5 - 86,8	69,8 - 84,6	56,6 - 73,8	45,5 - 61,6	41,1 - 56,7	47,4 - 68,1	64,2 - 82,4	75,3 - 86,5	79,5 - 87,3
A-928	78,9 - 85,0	79,1 - 84,1	77,7 - 83,5	73,8 - 82,3	68,0 - 78,5	62,5 - 75,5	56,0 - 68,2	51,6 - 60,1	55,6 - 67,7	64,3 - 77,5	70,5 - 82,2	74,3 - 83,8
A-929	79,7 - 87,5	77,8 - 88,4	75,9 - 85,9	69,6 - 82,9	60,6 - 79,6	52,6 - 69,7	43,8 - 54,5	35,6 - 51,4	30,6 - 67,0	44,1 - 76,0	56,8 - 86,0	74,2 - 86,6
A-930	67,8 - 84,0	71,4 - 82,7	64,7 - 81,9	59,9 - 80,6	57,5 - 75,4	52,6 - 67,1	41,6 - 58,3	40,5 - 56,6	35,5 - 67,9	50,5 - 76,0	47,4 - 80,1	66,8 - 83,7
A-931	75,8 - 85,5	76,6 - 84,4	76,6 - 84,4	67,6 - 83,0	60,9 - 80,1	54,1 - 69,8	42,3 - 57,5	35,1 - 52,5	29,6 - 66,0	53,7 - 76,6	63,3 - 84,1	71,4 - 84,1
A-932	72,1 - 84,2	74,3 - 83,6	73,2 - 85,3	63,1 - 82,3	56,8 - 75,2	52,0 - 70,5	43,7 - 61,2	37,6 - 49,9	32,7 - 66,1	51,7 - 71,2	55,6 - 81,6	72,0 - 83,1
A-933	75,3 - 88,2	77,9 - 86,7	73,1 - 88,4	67,7 - 84,4	60,9 - 79,9	51,9 - 72,2	35,8 - 63,8	32,9 - 52,5	29,3 - 65,0	51,9 - 75,7	68,2 - 83,9	74,1 - 88,8
A-934	77,3 - 87,7	78,6 - 86,4	75,7 - 88,3	65,9 - 84,5	63,4 - 80,8	54,2 - 75,5	41,4 - 67,0	38,8 - 53,1	36,2 - 70,4	55,9 - 78,0	56,8 - 84,5	68,6 - 86,4
A-935	78,7 - 84,0	80,5 - 86,8	80,2 - 85,9	76,4 - 84,6	72,2 - 83,0	69,3 - 81,1	65,2 - 77,9	55,3 - 67,2	53,8 - 70,7	63,3 - 75,5	67,2 - 83,1	74,4 - 84,0
A-936	78,7 - 87,5	80,9 - 88,4	80,9 - 89,7	77,1 - 88,3	71,7 - 84,7	69,4 - 81,2	61,5 - 77,1	57,4 - 67,0	59,3 - 70,9	68,0 - 76,8	71,5 - 83,9	77,2 - 85,3
A-937	74,5 - 85,0	77,3 - 85,3	77,8 - 83,8	74,0 - 82,3	67,0 - 81,2	61,5 - 80,5	52,4 - 72,8	47,1 - 62,3	49,9 - 64,2	59,3 - 73,0	63,9 - 80,5	69,8 - 80,2

Anexo 4-3: Limites amostrais inferiores e superiores (Inf - Sup), correspondentes ao 2,5 e 97,5 percentis, da variável meteorológica temperatura máxima do ar (Tmax) observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

Código	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembr o	Dezembro
A-901	34,7 - 38,0	34,6 - 37,3	33,3 - 37,8	33,9 - 37,9	33,5 - 37,0	33,5 - 36,9	35,4 - 37,2	37,9 - 41,3	38,9 - 42,0	36,6 - 42,1	34,7 - 39,8	34,8 - 38,7
A-902	32,3 - 35,6	32,3 - 35,0	31,2 - 35,0	31,9 - 35,1	30,5 - 35,2	32,2 - 35,3	33,9 - 35,6	35,9 - 38,7	36,7 - 39,9	34,9 - 39,9	33,1 - 37,8	33,2 - 35,0
A-903	33,1 - 36,9	33,6 - 36,4	33,0 - 35,8	32,7 - 35,9	32,8 - 35,6	32,9 - 35,8	34,6 - 36,9	37,0 - 39,4	37,2 - 40,4	35,8 - 40,2	31,7 - 38,6	32,2 - 37,2
A-904	31,4 - 37,1	33,1 - 36,2	32,5 - 35,6	32,8 - 36,4	32,9 - 36,2	33,4 - 36,0	34,7 - 36,4	36,5 - 39,2	37,9 - 39,7	36,0 - 40,6	34,1 - 38,8	32,6 - 36,8
A-905	31,8 - 35,8	32,2 - 34,8	32,1 - 35,9	31,2 - 36,0	30,7 - 34,6	32,0 - 34,3	33,3 - 35,2	35,5 - 37,9	35,9 - 38,4	34,3 - 38,3	32,8 - 38,0	32,0 - 35,4
A-906	33,1 - 35,7	33,4 - 35,9	32,6 - 35,8	32,8 - 35,5	33,1 - 36,0	34,0 - 35,8	35,0 - 36,6	37,2 - 39,0	36,7 - 39,4	34,8 - 39,1	34,0 - 36,7	33,4 - 37,0
A-907	34,1 - 38,3	34,5 - 36,5	34,3 - 39,9	33,8 - 36,9	33,1 - 36,8	33,2 - 35,7	35,1 - 36,7	37,2 - 39,9	39,0 - 42,3	37,9 - 42,0	34,8 - 39,0	32,3 - 38,1
A-908	31,9 - 35,9	32,5 - 36,6	32,0 - 36,2	32,2 - 35,1	32,0 - 35,8	32,3 - 35,9	33,4 - 35,7	35,8 - 39,2	37,9 - 43,5	35,7 - 43,8	32,3 - 38,0	32,7 - 36,9
A-910	32,8 - 35,5	32,9 - 35,7	32,6 - 36,2	33,6 - 36,7	33,4 - 36,4	33,8 - 36,6	35,8 - 37,3	36,4 - 38,9	37,2 - 38,7	35,5 - 38,8	34,2 - 37,0	33,8 - 35,7
A-912	30,5 - 33,6	31,0 - 33,9	30,6 - 33,2	30,3 - 33,6	29,4 - 32,0	29,8 - 32,2	31,0 - 32,8	32,8 - 35,8	34,6 - 37,3	32,9 - 37,3	31,7 - 34,9	30,7 - 33,1
A-913	30,1 - 33,0	30,3 - 32,8	30,5 - 33,2	31,0 - 33,6	30,3 - 32,4	31,0 - 33,5	32,6 - 34,1	33,9 - 36,9	34,2 - 36,7	32,1 - 36,0	31,6 - 36,5	31,2 - 33,8
A-914	32,8 - 36,1	33,2 - 36,5	32,7 - 37,2	33,3 - 36,1	33,1 - 36,4	33,4 - 36,4	34,9 - 37,8	37,3 - 40,2	37,1 - 40	35,7 - 38,6	33,7 - 36,6	33,6 - 36,6
A-915	31,6 - 35,8	32,4 - 34,9	32,2 - 34,7	31,6 - 35,8	32,2 - 35,2	32,0 - 34,8	32,7 - 35,8	34,9 - 38,4	35,8 - 41,3	34,9 - 41,9	33,2 - 37,5	33,1 - 36,8
A-916	32,9 - 36,4	33,4 - 36,7	33,2 - 36,8	33,2 - 37,1	33,1 - 36,5	32,8 - 36,9	34,0 - 37,8	36,8 - 40,2	38,0 - 41,2	36,0 - 42,5	34,2 - 37,9	34,1 - 38,2
A-917	32,3 - 35,9	32,6 - 36,7	32,5 - 35,8	32,3 - 36,0	32,9 - 36,5	33,8 - 35,9	34,6 - 36,6	36,4 - 38,9	37,1 - 40,5	35,4 - 41,4	33,8 - 38,6	32,4 - 37,1
A-918	33,9 - 40,0	33,5 - 37,1	33,8 - 37,7	33,3 - 36,6	34,0 - 36,7	33,3 - 36,3	34,8 - 37,0	37,8 - 40,7	38,4 - 42,2	35,3 - 43,4	34,7 - 41,6	33,8 - 39,0
A-919	31,6 - 35,7	32,6 - 35,3	31,5 - 35,0	32,3 - 34,7	32,7 - 34,7	33,2 - 35,7	34,1 - 36,9	35,9 - 38,8	36,3 - 38,5	34,8 - 37,6	32,9 - 35,7	33,3 - 35,5
A-920	31,7 - 34,2	31,6 - 34,2	31,1 - 33,9	31,8 - 34,2	31,9 - 35,8	32,0 - 34,4	33,7 - 35,4	35,6 - 37,5	35,1 - 37,7	33,9 - 38,0	32,7 - 35,2	31,2 - 34,6
A-921	34,0 - 40,5	33,9 - 37,7	34,1 - 36,8	32,9 - 37,1	33,3 - 37,1	33,2 - 37,3	34,6 - 38,9	37,6 - 40,0	39,0 - 41,9	35,4 - 44,4	34,5 - 41,1	34,7 - 39,4
A-922	34,0 - 37,1	33,3 - 35,6	34,6 - 39,1	33,3 - 36,7	33,2 - 36,8	33,8 - 36,4	35,2 - 37,1	36,0 - 40,1	38,1 - 40,8	37,1 - 40,7	35,3 - 39,9	35,0 - 37,4
A-924	32,1 - 34,8	32,4 - 35,5	31,5 - 34,2	32,4 - 34,9	31,9 - 35,3	32,1 - 35,6	34,1 - 36,8	35,7 - 38,2	36,1 - 38,7	34,4 - 38,4	33,0 - 37,1	32,1 - 35,8
A-926	31,9 - 34,4	30,5 - 33,6	31,9 - 34,6	31,3 - 34,6	32,3 - 35,0	32,3 - 35,0	33,6 - 35,9	36,0 - 38,0	35,2 - 38,1	33,6 - 38,0	32,2 - 35,2	31,1 - 34,6
A-927	31,3 - 33,9	31,0 - 34,0	31,3 - 36,1	31,3 - 35,4	31,0 - 35,1	32,2 - 35,4	34,1 - 36,0	35,6 - 37,7	36,1 - 38,7	34,3 - 38,5	32,4 - 35,4	31,9 - 34,7
A-928	32,6 - 40,2	32,7 - 40,2	31,9 - 40,2	32,7 - 40,2	33,3 - 40,1	33,2 - 37,9	34,5 - 38,0	36,6 - 38,8	36,9 - 39,9	35,3 - 40,2	34,4 - 39,9	33,4 - 38,2
A-929	31,0 - 35,3	32,0 - 34,8	31,9 - 35,8	32,0 - 36,2	31,6 - 34,8	32,7 - 34,8	33,9 - 36,0	36,1 - 38,2	36,6 - 39,7	35,6 - 41,1	33,3 - 37,7	31,6 - 37,0
A-930	33,8 - 37,6	32,8 - 37,4	32,7 - 36,5	33,3 - 37,7	33,3 - 36,4	33,0 - 36,2	34,7 - 37,8	36,3 - 40,6	38,0 - 43,0	35,9 - 41,8	33,7 - 39,0	33,7 - 38,2
A-931	31,3 - 35,0	31,5 - 34,9	31,2 - 34,6	30,4 - 34,2	31,3 - 33,4	31,3 - 33,3	31,8 - 34,0	34,8 - 37,4	36,1 - 40,1	34,7 - 41,0	32,3 - 38,0	31,8 - 36,0
A-932	33,7 - 37,2	33,3 - 37,2	33,0 - 36,6	32,7 - 36,8	32,2 - 35,6	32,4 - 35,0	33,9 - 36,1	35,9 - 39,5	37,5 - 41,6	35,9 - 42,5	35,1 - 39,5	33,7 - 38,6
A-933	32,4 - 35,7	31,7 - 36,0	30,8 - 36,2	31,4 - 35,2	31,1 - 33,8	31,2 - 36,8	32,2 - 35,8	35,3 - 38,5	37,1 - 39,0	34,7 - 38,8	32,7 - 36,7	32,9 - 35,6
A-934	31,0 - 35,3	30,8 - 35,4	30,7 - 33,2	30,1 - 33,5	29,2 - 31,9	29,0 - 31,3	29,7 - 32,5	32,2 - 35,6	34,1 - 36,5	32,8 - 36,7	31,5 - 35,2	31,2 - 34,4
A-935	34,9 - 36,9	33,6 - 36,8	32,5 - 37,0	33,3 - 38,1	33,3 - 37,5	33,7 - 36,9	35,5 - 37,4	37,8 - 40,5	38,5 - 41,4	36,6 - 41,5	35,6 - 40,1	34,6 - 38,8
A-936	32,6 - 37,1	32,6 - 36,5	32,8 - 36,3	32,7 - 36,6	33,2 - 36,0	33,2 - 36,3	35,0 - 36,7	37,0 - 39,7	37,7 - 40,8	36,0 - 39,9	34,6 - 37,4	34,2 - 36,3
A-937	33,2 - 37,7	33,5 - 36,8	33,8 - 36,9	34,0 - 37,6	33,9 - 35,6	33,6 - 36,0	35,2 - 37,8	36,3 - 40,3	37,6 - 40,6	36,9 - 40,5	34,9 - 39,8	34,4 - 38,1

Anexo 4-4: Limites amostrais inferiores e superiores (Inf - Sup), correspondentes ao 2,5 e 97,5 percentis, da variável meteorológica temperatura mínima do ar (Tmin) observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

Código	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembr o	Dezembro
A-901	17,8 - 22,9	19,9 - 22,1	19,1 - 22,3	16,8 - 21,2	14,4 - 19,9	14,4 - 18,3	13,5 - 17,3	15,5 - 19,2	16,7 - 21,4	17,0 - 21,6	19,2 - 23,2	17,7 - 22,3
A-902	16,7 - 21,1	18,2 - 21,3	16,8 - 21,2	16,2 - 20,7	15,4 - 18,4	15,1 - 17,2	13,3 - 16,9	15,4 - 17,9	16,3 - 20,4	16,1 - 20,9	16,5 - 21,1	16,6 - 20,2
A-903	18,9 - 22,0	18,7 - 21,9	18,9 - 21,7	13,0 - 21,2	10,7 - 17,9	12,5 - 16,3	08,0 - 14,4	11,6 - 15,1	14,3 - 19,0	16,5 - 20,8	17,8 - 21,2	18,3 - 21,5
A-904	18,6 - 21,6	18,2 - 21,4	17,6 - 21,5	15,2 - 20,6	14,0 - 19,8	14,8 - 17,7	13,8 - 17,3	14,4 - 17,7	15,5 - 19,8	17,9 - 21,0	18,2 - 21,1	17,1 - 21,3
A-905	17,0 - 20,3	18,3 - 20,7	16,9 - 21,2	15,8 - 19,9	14,4 - 18,7	15,6 - 17,2	11,5 - 17,1	14,0 - 17,8	16,2 - 20,0	16,8 - 20,5	17,3 - 20,8	16,2 - 20,8
A-906	19,5 - 21,0	19,8 - 21,2	20,0 - 21,7	18,2 - 21,4	17,5 - 20,2	17,5 - 19,2	17,5 - 19,2	17,5 - 19,2	17,5 - 19,6	18,3 - 20,9	19,8 - 21,3	19,2 - 21,4
A-907	14,9 - 22,0	19,3 - 22,0	18,4 - 21,9	14,1 - 20,8	09,0 - 18,3	11,6 - 16,8	10,4 - 14,7	13,3 - 14,8	13,7 - 18,2	14,9 - 22,5	16,9 - 21,9	15,3 - 23,2
A-908	18,1 - 20,7	18,3 - 20,3	18,1 - 20,8	15,6 - 20,5	15,6 - 17,6	15,6 - 16,6	15,6 - 15,8	15,6 - 16,2	15,6 - 18,8	15,9 - 20,7	16,9 - 20,9	18,6 - 20,5
A-910	20,1 - 22,1	20,7 - 22,3	20,8 - 22,6	16,6 - 22,3	15,8 - 21,2	16,6 - 19,1	15,3 - 19,0	16,0 - 19,0	17,4 - 21,0	20,1 - 21,7	20,3 - 22,0	20,0 - 21,7
A-912	16,3 - 19,3	17,3 - 19,7	17,1 - 19,8	15,2 - 18,6	13,1 - 16,8	13,6 - 16,2	12,9 - 15,5	14,6 - 15,9	15,4 - 18,8	15,9 - 19,5	16,8 - 19,2	15,4 - 19,0
A-913	15,1 - 18,7	16,7 - 19,4	11,9 - 19,2	12,0 - 17,9	11,9 - 18,0	12,0 - 17,7	11,8 - 17,1	11,9 - 16,4	12,3 - 20,0	13,2 - 19,7	14,3 - 19,2	12,7 - 19,1
A-914	20,4 - 23,5	20,2 - 24,0	20,5 - 21,5	13,2 - 21,4	10,8 - 20,1	13,5 - 17,6	06,7 - 17,5	11,1 - 17,7	15,6 - 19,7	18,8 - 21,5	19,8 - 22,2	17,4 - 22,4
A-915	16,7 - 21,1	18,2 - 20,0	18,0 - 20,5	11,9 - 19,9	08,2 - 17,5	10,5 - 15,7	07,8 - 15,1	09,4 - 15,7	11,5 - 19,7	15,5 - 20,6	18,2 - 20,8	17,2 - 20,7
A-916	18,2 - 21,0	18,4 - 20,0	16,3 - 21,3	16,2 - 20,6	15,3 - 18,0	15,3 - 16,4	15,3 - 15,7	15,3 - 15,8	15,3 - 19,3	16,2 - 20,1	15,7 - 21,0	18,2 - 20,5
A-917	18,5 - 21,2	18,5 - 20,6	19,1 - 21,3	14,1 - 20,5	12,0 - 18,5	13,5 - 17,7	11,7 - 16,4	12,6 - 16,3	14,4 - 17,9	18,2 - 20,8	18,2 - 21,3	17,0 - 20,7
A-918	19,6 - 23,7	18,5 - 22,5	17,4 - 22,1	16,7 - 21,5	10,8 - 20,1	09,7 - 17,9	09,0 - 17,6	09,7 - 17,7	09,3 - 20,7	16,7 - 22,7	18,8 - 21,7	20,0 - 22,7
A-919	19,9 - 21,6	19,7 - 21,8	19,6 - 21,5	14,4 - 20,8	13,1 - 20,3	15,2 - 18,5	09,6 - 18,2	13,3 - 18,6	17,0 - 20,0	19,4 - 21,5	18,8 - 21,4	19,9 - 21,3
A-920	19,8 - 21,3	19,3 - 21,6	19,4 - 21,3	15,7 - 20,9	15,6 - 19,3	16,5 - 18,5	14,0 - 17,6	15,6 - 19,7	17,3 - 20,2	18,3 - 20,6	19,2 - 21,2	18,3 - 21,1
A-921	19,5 - 23,8	19,9 - 22,9	19,6 - 22,2	16,4 - 22,0	11,0 - 20,5	10,1 - 18,8	08,3 - 17,9	10,2 - 18,9	09,8 - 20,6	15,6 - 21,9	17,4 - 22,2	17,5 - 21,5
A-922	16,6 - 21,8	18,8 - 22,1	16,3 - 22,2	15,2 - 22,0	15,2 - 20	15,1 - 17,1	14,9 - 16,2	15,2 - 16,3	15,2 - 18,4	15,2 - 20,5	15,4 - 22,0	15,8 - 21,8
A-924	19,7 - 21,3	18,5 - 21,2	19,5 - 22,1	14,3 - 21,2	12,6 - 21,5	14,1 - 17,2	12,0 - 17,4	13,3 - 17,2	15,0 - 18,7	17,6 - 21,0	19,2 - 21,0	19,6 - 20,9
A-926	19,1 - 20,9	18,1 - 20,9	19,1 - 20,8	17,4 - 21,0	17,2 - 20,4	17,2 - 17,9	17,2 - 17,6	17,2 - 17,8	17,4 - 20,2	17,7 - 20,2	19,2 - 21,1	19,2 - 21,2
A-927	18,3 - 20,6	18,4 - 21,1	19,0 - 20,8	14,4 - 20,5	14,0 - 18,9	15,4 - 18,9	11,8 - 17,4	14,0 - 19,0	16,9 - 21,2	17,1 - 21,1	18,7 - 20,9	18,7 - 20,6
A-928	19,1 - 21,7	19,3 - 22,5	20,1 - 22,3	12,8 - 21,0	11,2 - 18,3	13,0 - 17,2	08,6 - 15,9	11,7 - 16,4	14,3 - 19,6	17,5 - 21,2	16,7 - 21,3	15,8 - 22,3
A-929	18,0 - 20,9	18,0 - 20,6	17,8 - 20,8	13,5 - 19,9	11,8 - 17,6	12,3 - 16,7	11,6 - 15,2	12,3 - 16,1	13,2 - 17,5	15,1 - 21,1	18,4 - 20,7	16,6 - 20,2
A-930	19,2 - 21,7	18,8 - 21,3	18,8 - 21,9	16,9 - 21,5	16,6 - 19,4	16,6 - 18,2	16,6 - 16,8	16,6 - 17,8	16,6 - 19,6	16,7 - 20,6	19,7 - 21,3	18,8 - 21,3
A-931	16,5 - 20,7	17,3 - 19,5	17,3 - 19,9	12,2 - 19,2	08,8 - 16,0	10,2 - 15,7	07,6 - 14,2	09,7 - 14,3	11,7 - 18,4	15,1 - 20,6	17,5 - 19,7	15,4 - 19,4
A-932	17,0 - 22,1	19,8 - 21,8	19,5 - 21,9	15,7 - 21,0	9,7 - 19,5	11,6 - 18,1	09,5 - 15,8	13,3 - 16,4	13,6 - 20,0	15,8 - 21,7	19,7 - 21,8	15,3 - 21,3
A-933	15,9 - 20,0	18,4 - 20,7	17,5 - 20,5	15,7 - 19,7	12,3 - 18,1	13,1 - 16,4	13,0 - 16,6	14,7 - 16,6	15,7 - 18,4	15,8 - 20,3	17,2 - 19,7	15,9 - 20,0
A-934	14,1 - 18,5	16,5 - 18,4	15,8 - 18,6	12,1 - 18,0	08,7 - 15,3	10,6 - 13,0	09,0 - 13,7	11,7 - 14,4	12,2 - 15,8	13,0 - 18,3	13,3 - 18,5	13,9 - 18,0
A-935	16,6 - 22,1	20,5 - 22,3	18,9 - 22,7	15,1 - 22,5	14,7 - 19,3	14,5 - 17,8	13,0 - 16,2	14,7 - 17,5	14,9 - 20,9	16,4 - 22,5	18,0 - 22,4	15,4 - 22,4
A-936	15,2 - 21,7	19,2 - 21,4	16,4 - 20,8	15,6 - 21,2	15,1 - 19,0	15,1 - 18,0	13,2 - 16,3	14,1 - 16,5	15,1 - 18,7	15,4 - 21,8	15,8 - 21,9	16,3 - 21,1
A-937	17,0 - 21,8	19,4 - 21,5	16,0 - 22,1	15,9 - 20,8	15,8 - 18,3	15,8 - 18,0	14,5 - 16,8	14,6 - 17,0	15,9 - 19,4	16,6 - 20,8	15,8 - 21,8	15,8 - 21,4

Anexo 4-5: Limites amostrais inferiores e superiores (Inf - Sup), correspondentes ao 2,5 e 97,5 percentis, da variável meteorológica velocidade do vento a 2 m (VV) observada nas 33 EMAs do estado de Mato Grosso, Brasil.

Código	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembr o	Dezembro
A-901	0,9 - 1,6	0,7 - 1,5	0,7 - 1,3	0,8 - 1,3	0,9 - 1,4	1,0 - 1,3	1,0 - 1,4	1,1 - 1,6	1,1 - 1,5	0,9 - 1,6	1,1 - 1,6	0,7 - 1,5
A-902	1,3 - 2,0	1,1 - 1,6	1,1 - 1,6	0,9 - 1,7	1,1 - 2,0	1,7 - 2,2	1,6 - 2,4	1,6 - 2,5	1,4 - 2,5	1,1 - 2,3	1,3 - 2,3	1,1 - 2,2
A-903	0,6 - 1,1	0,5 - 0,9	0,5 - 1,0	0,5 - 0,9	0,4 - 1,2	0,5 - 1,3	0,6 - 1,4	0,6 - 1,3	0,6 - 1,2	0,7 - 1,2	0,6 - 1,2	0,6 - 1,1
A-904	0,3 - 1,5	0,4 - 1,5	0,5 - 1,3	0,4 - 1,5	0,4 - 1,8	0,5 - 1,9	0,7 - 2,0	0,6 - 2,2	0,6 - 2,1	0,5 - 1,6	0,4 - 1,7	0,3 - 1,6
A-905	0,9 - 1,4	0,9 - 1,3	0,9 - 1,2	0,9 - 1,3	1,0 - 1,4	1,0 - 1,4	1,0 - 1,6	1,3 - 1,7	1,1 - 1,5	1,1 - 1,5	1,1 - 1,5	1,1 - 1,6
A-906	0,2 - 1,0	0,1 - 0,8	0,1 - 0,6	0,2 - 0,5	0,2 - 0,6	0,2 - 0,8	0,2 - 1,0	0,4 - 1,3	0,2 - 1,0	0,2 - 0,8	0,1 - 1,1	0,2 - 0,9
A-907	0,5 - 1,1	0,7 - 1,3	0,7 - 1,2	0,6 - 1,1	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,7 - 1,2	1,0 - 1,3	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5	0,8 - 1,4	0,8 - 1,4
A-908	1,1 - 2,1	1,0 - 2,0	0,9 - 1,6	1,0 - 1,6	1,2 - 1,9	1 - 2,1,0	1,6 - 2,3	1,9 - 2,5	1,8 - 2,4	1,6 - 2,1	1,5 - 2,0	1,3 - 2,0
A-910	0,3 - 0,8	0,3 - 0,7	0,3 - 0,7	0,3 - 0,8	0,4 - 0,8	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	0,4 - 0,9	0,4 - 0,8	0,4 - 0,9	0,3 - 0,8	0,3 - 0,9
A-912	0,9 - 2,7	1,7 - 2,4	1,5 - 2,2	1,0 - 1,9	1,0 - 2,1	1,1 - 2,1	1,6 - 2,3	1,9 - 2,6	1,6 - 2,5	1,6 - 2,4	1,7 - 2,4	1,6 - 2,3
A-913	0,8 - 1,4	0,8 - 1,3	0,5 - 1,1	0,5 - 1,1	0,7 - 1,1	0,6 - 1,2	0,5 - 1,5	1,0 - 1,4	0,8 - 1,3	0,6 - 1,4	0,4 - 1,3	0,5 - 1,4
A-914	0,6 - 1,2	0,6 - 1,1	0,5 - 1,0	0,6 - 0,9	0,6 - 0,9	0,7 - 1,0	0,7 - 1,2	0,7 - 1,2	0,8 - 1,1	0,4 - 1,1	0,6 - 1,2	0,6 - 1,1
A-915	0,9 - 1,5	1,0 - 1,6	0,8 - 1,3	0,8 - 1,4	0,9 - 1,5	1,0 - 1,6	1,1 - 1,9	1,3 - 1,8	1,2 - 1,8	1,1 - 1,6	1,0 - 1,6	1,0 - 1,5
A-916	0,7 - 1,1	0,5 - 1,2	0,6 - 1,1	0,5 - 1,0	0,4 - 1,3	0,6 - 1,4	0,6 - 1,5	0,6 - 1,5	0,7 - 1,6	0,7 - 1,3	0,4 - 0,9	0,6 - 1,2
A-917	0,8 - 1,5	0,6 - 1,5	0,7 - 1,4	0,6 - 1,2	0,6 - 1,6	0,7 - 1,8	0,9 - 2,1	1,0 - 2,0	1,0 - 1,8	1,1 - 1,6	0,9 - 1,5	0,9 - 1,4
A-918	0,7 - 1,5	0,8 - 1,3	0,7 - 1,1	0,7 - 1,3	0,7 - 1,4	0,8 - 1,7	0,8 - 1,6	1,1 - 1,6	1,0 - 1,6	0,8 - 1,5	0,8 - 1,5	0,7 - 1,5
A-919	0,6 - 0,9	0,5 - 0,9	0,4 - 0,8	0,6 - 0,8	0,7 - 0,9	0,7 - 1,0	0,8 - 1,0	0,8 - 0,9	0,7 - 0,9	0,7 - 0,9	0,6 - 0,9	0,6 - 0,9
A-920	0,4 - 0,9	0,5 - 0,8	0,4 - 0,8	0,5 - 0,9	0,5 - 1,0	0,6 - 1,1	0,7 - 1,3	0,6 - 1,2	0,6 - 1,0	0,5 - 0,9	0,4 - 1,0	0,5 - 0,9
A-921	0,7 - 1,3	0,6 - 1,2	0,7 - 1,1	0,6 - 1,0	0,6 - 1,2	0,8 - 1,4	1,0 - 1,7	1,0 - 1,6	1,2 - 1,7	0,8 - 1,4	0,7 - 1,4	0,7 - 1,2
A-922	0,7 - 1,3	0,8 - 1,2	0,7 - 1,1	0,6 - 1,1	0,6 - 1,2	0,6 - 1,2	0,7 - 1,1	0,9 - 1,2	0,8 - 1,5	1,0 - 1,4	0,8 - 1,5	0,7 - 1,4
A-924	0,9 - 1,2	0,9 - 1,2	0,8 - 1,1	0,8 - 1,1	0,7 - 1,3	1,0 - 1,5	1,1 - 1,7	1,0 - 1,6	0,9 - 1,5	1,0 - 1,3	0,9 - 1,3	0,9 - 1,2
A-926	0,7 - 1,4	0,7 - 1,2	0,6 - 1,1	0,5 - 1,1	0,7 - 1,3	0,8 - 1,4	1,0 - 1,6	0,9 - 1,6	0,9 - 1,3	0,9 - 1,2	0,9 - 1,4	0,8 - 1,5
A-927	0,8 - 1,8	1,1 - 1,8	1,0 - 1,6	0,6 - 1,6	0,7 - 1,9	1,5 - 2,2	1,5 - 2,3	1,5 - 2,3	1,2 - 2,3	0,8 - 2,2	1,1 - 1,9	1,2 - 1,9
A-928	0,5 - 1,1	0,4 - 1,1	0,5 - 0,9	0,4 - 1,0	0,5 - 0,9	0,5 - 1,1	0,7 - 1,3	0,5 - 1,1	0,6 - 1,2	0,5 - 1,2	0,4 - 1,2	0,5 - 1,1
A-929	0,9 - 2,0	1,0 - 2,1	0,7 - 1,8	0,9 - 1,8	1,1 - 2,1	0,9 - 2,3	0,8 - 2,6	0,9 - 2,8	0,9 - 2,5	0,5 - 2,2	0,7 - 1,9	1,0 - 2,0
A-930	0,5 - 1,1	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0	0,6 - 1,1	0,6 - 1,3	0,7 - 1,3	0,7 - 1,5	0,7 - 1,3	0,6 - 1,3	0,5 - 1,2	0,5 - 1,2
A-931	1,2 - 2,0	0,6 - 1,9	0,6 - 1,7	0,9 - 1,8	0,9 - 1,8	1,0 - 2,4	1,4 - 2,5	1,8 - 2,6	1,8 - 2,5	1,3 - 2,4	1,4 - 2,2	1,2 - 2,2
A-932	0,3 - 0,8	0,3 - 1,0	0,3 - 1,0	0,3 - 0,8	0,4 - 0,8	0,4 - 0,9	0,4 - 1,0	0,4 - 1,2	0,4 - 1,1	0,4 - 1,1	0,4 - 0,9	0,4 - 0,8
A-933	0,2 - 1,5	0,2 - 1,2	0,1 - 1,4	0,4 - 1,4	0,4 - 1,7	0,2 - 1,5	0,2 - 1,9	0,5 - 2,2	0,8 - 3,4	0,5 - 1,6	0,3 - 1,5	0,0 - 1,3
A-934	1,5 - 2,3	1,4 - 2,1	1,2 - 2,1	0,9 - 1,9	1,3 - 2,0	1,4 - 2,0	1,5 - 2,1	1,7 - 2,3	1,7 - 2,5	1,6 - 2,4	1,5 - 2,3	1,5 - 2,1
A-935	0,7 - 0,9	0,6 - 0,9	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8	0,6 - 1,1	0,6 - 1,2	0,7 - 1,2	0,7 - 1,1	0,7 - 1,1	0,7 - 1,0	0,6 - 1,0
A-936	0,7 - 1,2	0,5 - 1,2	0,6 - 1,1	0,5 - 1,1	0,6 - 1,1	0,8 - 1,2	0,9 - 1,4	1,1 - 1,4	1,0 - 1,4	0,8 - 1,4	0,7 - 1,4	0,6 - 1,3
A-937	0,4 - 1,0	0,5 - 1,0	0,4 - 0,8	0,5 - 1,0	0,7 - 1,0	0,6 - 1,1	0,6 - 1,2	0,6 - 1,2	0,8 - 1,2	0,7 - 1,3	0,8 - 1,1	0,7 - 1,1

Anexo 4-6: Médias e desvio padrão dos limites amostrais inferiores (Inf) e superiores (Sup) (2,5 e 97,5 percentis) das variáveis meteorológicas observada nas EMAs de cada bioma (Cerrado, Amazônia e área de transição) do estado de Mato Grosso, Brasil.

	Rs (MJ m ⁻² dia ⁻¹)		UR (%)		Tmax (°C)		Tmin (°C)		VV (m s ⁻¹)	
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup
Cerrado										
Janeiro	6,8 (2,8)	25,7 (1,6)	69,0 (4,3)	90,9 (2,8)	30,1 (1,6)	40,5 (2,0)	14,1 (1,4)	23,8 (1,6)	0,2 (0,4)	2,7 (0,5)
Fevereiro	8,9 (2,3)	22,9 (1,3)	74,2 (3,1)	90,7 (2,2)	30,3 (1,4)	37,7 (1,5)	16,5 (1,3)	22,9 (1,4)	0,2 (0,5)	2,4 (0,4)
Março	6,5 (2,8)	22,7 (1,1)	67,8 (4,1)	91,7 (2,6)	30,5 (1,3)	39,9 (2,0)	11,9 (2,0)	22,7 (1,3)	0,2 (0,4)	2,2 (0,4)
Abril	6,5 (3,0)	22,3 (1,3)	63,1 (4,8)	91,3 (2,8)	30,1 (1,3)	38,1 (1,6)	11,9 (1,8)	22,5 (1,4)	0,3 (0,2)	1,9 (0,4)
Mai	6,8 (2,4)	19,7 (1,0)	56,8 (6,3)	88,7 (3,7)	29,2 (1,5)	37,5 (2,0)	8,2 (2,6)	20,5 (1,5)	0,4 (0,3)	2,1 (0,4)
Junho	6,7 (2,7)	19,3 (1,2)	51,9 (7,3)	86,0 (4,8)	29,0 (1,4)	37,3 (1,9)	10,1 (2,0)	18,8 (1,5)	0,2 (0,3)	2,4 (0,5)
Julho	5,5 (3,2)	20,3 (1,3)	35,8 (9,2)	80,9 (7,0)	29,7 (1,7)	38,9 (1,8)	7,6 (2,5)	17,9 (1,3)	0,2 (0,5)	2,5 (0,5)
Agosto	6,2 (3,6)	21,9 (1,1)	32,9 (8,1)	75,6 (7,3)	32,2 (1,8)	41,3 (1,8)	9,4 (2,2)	19,2 (1,6)	0,4 (0,5)	2,6 (0,5)
Setembro	7,2 (3,2)	24,8 (1,4)	29,3 (10,1)	77,7 (4,6)	34,1 (1,8)	43,5 (2,3)	9,8 (2,2)	21,4 (1,5)	0,4 (0,4)	3,4 (0,7)
Outubro	10,7 (2,4)	24,4 (1,0)	47,7 (7,0)	83,2 (4,0)	32,1 (1,7)	44,4 (2,8)	13,0 (1,2)	22,5 (1,2)	0,4 (0,4)	2,4 (0,5)
Novembro	10,8 (2,2)	27,2 (1,7)	50,1 (7,4)	88,5 (2,3)	31,5 (1,5)	41,1 (1,9)	13,3 (1,7)	23,2 (1,5)	0,3 (0,5)	2,4 (0,5)
Dezembro	10,5 (2,0)	25,7 (1,3)	61,8 (6,0)	92,1 (2,9)	30,7 (1,4)	39,4 (2,1)	12,7 (1,6)	23,2 (1,5)	0,0 (0,5)	2,3 (0,5)
Amazônia										
Janeiro	7,6 (2,7)	24,8 (2,2)	71,0 (3,9)	98,1 (3,6)	31,6 (0,7)	37,7 (1,1)	15,2 (1,7)	23,5 (0,7)	0,2 (0,3)	2,0 (0,3)
Fevereiro	5,2 (3,0)	23,1 (1,3)	72,4 (3,3)	99,9 (4,2)	30,5 (0,9)	36,8 (1,0)	18,1 (0,8)	24,0 (1,0)	0,2 (0,3)	1,6 (0,2)
Março	7,4 (2,7)	21,4 (1,2)	67,9 (4,7)	91,1 (2,4)	31,1 (1,1)	39,1 (1,5)	16,0 (1,9)	22,6 (0,6)	0,1 (0,3)	1,6 (0,3)
Abril	4,1 (3,6)	21,5 (1,0)	64,4 (4,2)	91,3 (2,6)	31,3 (0,8)	37,6 (1,1)	13,2 (1,4)	22,3 (0,5)	0,2 (0,3)	1,7 (0,3)
Mai	3,0 (4,0)	19,3 (0,8)	65,5 (3,9)	88,1 (1,8)	30,5 (0,9)	36,8 (0,7)	10,8 (1,9)	21,5 (1,1)	0,2 (0,3)	2,0 (0,3)
Junho	2,6 (4,3)	21,7 (1,4)	56,3 (5,0)	84,0 (3,0)	32,0 (0,7)	36,9 (0,7)	13,5 (1,2)	19,2 (0,8)	0,2 (0,4)	2,2 (0,4)
Julho	1,9 (4,2)	20,6 (1,1)	44,5 (5,2)	78,7 (4,9)	33,6 (0,7)	37,8 (0,8)	6,7 (3,0)	19,2 (1,1)	0,2 (0,4)	2,4 (0,4)
Agosto	2,9 (4,2)	21,8 (1,1)	42,2 (4,6)	72,3 (4,6)	35,6 (0,6)	40,3 (1,0)	11,1 (1,8)	19,7 (1,2)	0,4 (0,3)	2,5 (0,4)
Setembro	5,8 (3,5)	24,2 (1,4)	42,2 (5,9)	77,8 (4,6)	35,1 (1,0)	41,2 (1,2)	15,0 (1,0)	21,0 (0,8)	0,2 (0,3)	2,5 (0,4)
Outubro	12,4 (2,3)	23,6 (1,6)	51,3 (6,2)	84,5 (3,5)	33,6 (1,1)	42,5 (1,4)	15,2 (1,6)	21,8 (0,6)	0,2 (0,3)	2,3 (0,4)
Novembro	11,8 (1,9)	23,7 (1,2)	43,3 (10,4)	91,0 (2,9)	32,2 (1,0)	39,9 (1,5)	15,4 (1,9)	22,2 (0,4)	0,1 (0,3)	2,3 (0,4)
Dezembro	10,6 (2,0)	25,0 (1,7)	64,4 (5,0)	92,7 (3,4)	31,1 (1,2)	38,2 (1,3)	15,8 (1,6)	22,4 (0,6)	0,0 (0,3)	2,2 (0,4)

Transição Cerrado-Amazônia										
Janeiro	14,9	24,2	64,2	89,7	31,0	40,2	18,0	23,7	0,3	
	(0,9)	(1,4)	(6,4)	(2,4)	(1,1)	(2,2)	(0,5)	(0,9)	(0,2)	2 (0,3)
Fevereiro	13,6	23,9	71,4	88,4	31,0	40,2	18,0	22,5	0,4	2,1
	(1,0)	(1,5)	(3,2)	(2,3)	(0,8)	(1,9)	(0,4)	(0,8)	(0,3)	(0,4)
Março	15,0	22,9	64,7	88,4	31,3	40,2	17,4	22,3	0,5	1,8
	(0,7)	(1,0)	(5,8)	(2,5)	(0,8)	(1,6)	(0,9)	(0,6)	(0,2)	(0,3)
Abril	14,4	21,9	59,9	86,8	31,3	40,2	12,8	21,5	0,4	1,8
	(1,1)	(1,1)	(5,8)	(2,4)	(0,7)	(1,5)	(1,6)	(0,6)	(0,2)	(0,3)
Mai	12,0	25,2	57,5	85,3	31,0	40,1	10,7	20,1	0,4	2,1
	(1,5)	(2,5)	(4,7)	(4,0)	(1,0)	(1,6)	(2,1)	(0,9)	(0,2)	(0,4)
Junho	12,6	23,2	49,5	77,3	32,2	37,9	9,7	18,9	0,5	2,3
	(1,5)	(2,3)	(4,9)	(3,8)	(0,5)	(0,9)	(2,1)	(0,8)	(0,4)	(0,4)
Julho	13,6	29,3	41,6	68,9	33,9	38,0	8,0	17,6	0,6	2,6
	(2,7)	(3,9)	(6,6)	(5,5)	(0,3)	(0,8)	(2,9)	(1,1)	(0,3)	(0,5)
Agosto	15,6	28,6	33,4	68,6	35,6	40,7	9,7	19,0	0,5	2,8
	(2,6)	(2,7)	(6,6)	(5,8)	(0,6)	(1,0)	(2,1)	(1,2)	(0,3)	(0,6)
Setembro	14,3	24,5	30,6	77,0	36,1	43,0	9,3	21,2	0,6	2,5
	(1,6)	(1,1)	(8,7)	(4,1)	(0,8)	(1,4)	(2,4)	(1,3)	(0,2)	(0,5)
Outubro	17,2	25,3	44,1	82,4	34,3	43,4	15,1	22,7	0,5	2,2
	(0,8)	(1,4)	(8,0)	(3,2)	(0,5)	(1,4)	(1,0)	(0,6)	(0,2)	(0,4)
Novembro	16,0	26,3	46,7	89,4	31,7	41,6	16,7	21,7	0,4	1,9
	(0,6)	(2,0)	(11,3)	(3,1)	(1,0)	(1,8)	(0,9)	(0,3)	(0,2)	(0,3)
Dezembro	15,3	24,8	62,4	88,8	31,6	39,0	15,8	22,7	0,3	2,0
	(1,1)	(1,3)	(5,8)	(2,1)	(0,8)	(1,3)	(1,4)	(0,8)	(0,3)	(0,4)

OBS: O número entre parênteses representa o desvio padrão entre as EMAs.

5. ARTIGO 3: EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ESTADO DE MATO GROSSO

Resumo: Compreender as variações espaço-temporais da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas tendências de longo prazo é essencial para estudos do ciclo da água, modelagem e gestão dos recursos hídricos, particularmente no contexto das mudanças climáticas. Assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar o desempenho de diferentes modelos climáticos globais do CMIP5 em simular a evapotranspiração de referência por Penman-Monteith e suas variáveis climáticas (temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar incidente, umidade relativa e velocidade do vento) e, a partir das projeções do modelo com melhor precisão, avaliar as alterações espaço-temporais e tendências da evapotranspiração no estado de Mato Grosso, Brasil, para o período de 2007 a 2100. A escolha do melhor modelo foi realizada pela comparação das projeções de 9 modelos climáticos com os dados observados de 33 estações meteorológicas automáticas (EMA) do estado de Mato Grosso no período de 2007-2020, por meio das métricas estatísticas de Viés, raiz do erro médio quadrático, e dos coeficientes de correlação de Pearson e Spearman. Em seguida, foram utilizadas as projeções do melhor modelo para analisar as alterações espaço temporais e tendências da ET_0 nos cenários RCP 2.6, 4.5 e RCP 8.5, para o período de 2007 a 2100. As projeções do melhor modelo foram avaliadas por comparações gráficas e pelas diferenças médias estatística entre a ET_0 simulada nos três cenários e observada nas EMAs do estado, por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($\alpha=0.10$), sendo as diferenças expressas pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Por fim, a análise de tendência foi realizada utilizando-se o teste não paramétrico de Mann-Kendall e sua magnitude através do teste de Sen. Os modelos com piores desempenhos nas estimativas da ET_0 no estado foram CSIRO-Mk3 6.0 e GFDL-ESM2G e os com melhores estimativas o CESM1-CAM5 e o HadGEM2-ES, sendo o modelo HadGEM2-ES o escolhido na avaliação das projeções da evapotranspiração devido às menores variações nos erros estatísticos. As projeções do modelo HadGEM2-ES demonstram médias estáticas semelhantes às condições atuais até o fim do século no cenário RCP 2.6, enquanto nos cenários RCP 4.5 e 8.5 há um aumento contínuo da ET_0 , sendo o incremento mais expressivo nos meses do período de seca (maio a setembro). As áreas do bioma amazônico, localizadas no norte do estado de Mato Grosso, apresentaram os maiores incrementos da ET_0 quando comparadas às médias observadas (2007-2020) e projetadas (2020-2100). As análises de tendência do modelo HadGEM2-ES apresentam mudanças significativas da ET_0 e suas variáveis em todo o estado de Mato Grosso nos cenários RCP 4.5 e 8.5, enquanto no cenário RCP 2.6 as tendências significativas na ET_0 ocorrem apenas nas áreas do norte amazônico. A análise de tendência dos dados observados, apesar de não ocorrerem em todas as EMAs, demonstram mudanças mais intensas na ET_0 além da existência do paradoxo da evapotranspiração com incremento nas áreas de cerrado e reduções nas áreas do pantanal e sul amazônico.

Palavras-chave: Penman-Monteith, Modelos climáticos globais, cenários RCP, Análise de tendência de Mann-Kendall, Amazônia, Cerrado.

5.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, mudanças climáticas globais causadas por fatores antrópicos tem sido observadas em diversas regiões do planeta, impondo riscos aos ecossistemas e ao desenvolvimento humano (KOGO et al., 2021; GARRETT et al., 2021; TREBICKI, 2020). Evidências das mudanças climáticas incluem o aumento da temperatura global, aquecimento dos oceanos, ocorrência de eventos climáticos mais extremos, alterações da sazonalidade climática, entre outros (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC, 2014). Assim, a capacidade de prever as mudanças climáticas torna-se importante para melhor compreender suas alterações e impactos.

A avaliação do impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos é um dos principais desafios atuais nos estudos hidrológicos (ZHAO et al., 2014), uma vez que as projeções da disponibilidade e demanda hídrica permitem a elaboração de estratégias para melhor gerenciar o uso da água, em especial no contexto de fornecer subsídios para o dimensionamento de sistemas de irrigação e distribuição de água utilizados na agricultura e abastecimento urbano (XIANG et al., 2020; SARNIGHAUSEN et al., 2021). Tais projeções, contudo, são altamente dependentes da evapotranspiração por esta desempenhar um papel crucial na determinação das necessidades de água das plantas (PATLE et al. 2019), sendo um componente essencial no planejamento e programação da irrigação além de um importante indicador do funcionamento dos ecossistemas (MAEDA et al., 2017).

Diferentes metodologias são usados para determinar a evapotranspiração sendo o método de Penman-Monteith de "evapotranspiração de referência de culturas (ET_0)" o recomendado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) nas estimativas de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998). A evapotranspiração, contudo, é um parâmetro complexo que controla a troca de energia e massa entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera, sendo governado por diversas variáveis climáticas como a radiação solar, a temperatura, a velocidade do vento e umidade atmosférica (CHEN et al., 2006; KOUSARI; AHANI, 2012). Dessa maneira, visto que a variação em qualquer um desses fatores pode afetar a distribuição espaço-temporal da evapotranspiração (JUN et al., 2012; ZHANG et al., 2007), realizar

projeções espaço-temporais, assim como caracterizar as tendências, da evapotranspiração no cenário das mudanças dessas variáveis climáticas é de fundamental importância (LIU et al., 2013; SUN et al., 2016).

Os modelos climáticos globais (MCGs) são ferramentas importantes para entender e prever o clima complexo da Terra, e consistem em modelos numéricos que representam os processos físicos e químicos da atmosfera e todas as suas interações com os outros componentes do sistema terrestre (hidrosfera, criosfera, litosfera e ciclos biogeoquímicos) a partir da utilização de equações básicas, como conservação de massa e energia, termodinâmica, hidrostática e continuidade (LIMA et al., 2014; SAMPAIO). O estudo e proposição de modelos climáticos globais capazes de projetar os climas futuros são, em geral, realizados por instituições e grupos de pesquisa integrantes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) da União das Nações Unidas (ONU), havendo cerca de 40 MCGs de 20 grupos de pesquisa participantes da quinta fase do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 CMIP5) (TAYLOR et al., 2012), os quais apresentam simulações do clima futuro utilizando diferentes cenários de emissão de gases do efeito estufa, conhecido como cenários RCPs (Representation Concentration Pathway).

Apesar da grande disponibilidade de modelos é necessário realizar sua validação para a região de interesse, a fim de analisar o quanto esses modelos conseguem representar o clima atual (RAJU; KUMAR, 2020), e assim, averiguar a confiabilidade de suas previsões. Além disso, uma vez que as mudanças climáticas variam entre as diferentes regiões do mundo faz-se necessário a existência de estudos sobre mudanças climáticas para cada região de interesse.

O estado de Mato Grosso, localizado na região Centro-Oeste do Brasil, apresenta uma grande extensão territorial e inserção na área de ocorrência das fitofisionomias do Complexo do Pantanal, das formações savânicas (cerrado) e das formações amazônicas, distribuídas em três tipos climáticos distintos (Af - clima equatorial úmido, Aw - clima de savana tropical, e Cwa - clima tropical) (SOUZA et al., 2013). Além da grande diversidade ecológica o Estado destaca-se na produção agrícola sendo a maior produtora de grãos do Brasil (DENTZ, 2019), havendo,

contudo, carência de pesquisas focadas na variabilidade e impactos das mudanças climáticas na evapotranspiração (SOUZA et al., 2016; TANAKA et al., 2016).

Assim, o objetivo deste estudo é avaliar o desempenho de diferentes MCGs, a fim de encontrar um modelo de simulação que tenham um bom desempenho no estado de Mato Grosso, e assim avaliar as projeções e tendências da evapotranspiração de referência e suas variáveis climáticas no estado de Mato Grosso.

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS

5.2.1. Área de estudo e obtenção dos dados

A área de estudo compreende ao estado de Mato Grosso, Brasil, localizado entre as coordenadas 06°00'S, 19°45'S e 50°06'W, 62°45'W. Climaticamente, segundo classificação de Köppen, o estado é dividido em clima equatorial úmido (Af), clima de savana tropical (Aw) e clima tropical de altitude (Cwa) apresentando duas estações bem definidas: a estação chuvosa (outubro a abril) e a estação seca (maio a setembro) (SOUZA et al., 2013, ALVARES et al., 2013; JERSZURKI et al., 2019). O estado ainda apresenta três biomas: a Amazônia, o Cerrado, e o Pantanal.

Foram utilizados séries temporais mensais de dados observados em estações meteorológicas automáticas (EMAs) e dados simulados por 9 modelos climatológicos globais (MCG) provenientes da Fase 5 do Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). As séries temporais observadas foram obtidas a partir das EMAs pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizados em 33 municípios de Mato Grosso, Brasil (**Figura 5-1, Tabela 5-1**) e englobam o período histórico de 2007 a 2020. Os dados simulados pelos MCGs foram obtidos na plataforma da organização intergovernamental Copernicus Climate Change Service (COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE, 2021), englobando os dados referentes aos períodos simulados de 2007 a 2100 em 3 cenários climáticos (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5). Dentre os 40 MCGs do CMIP5 foram selecionados apenas os que apresentassem as mesmas variáveis meteorológicas mínimas necessárias nas estimativas da evapotranspiração disponíveis nas EMAs do estado. A descrição dos nomes, grupos de pesquisa de origem e resolução espacial dos modelos CMIP5 utilizados no estudo são apresentados na **Tabela 5-2**.

Tabela 5-1: Estações meteorológicas automáticas do INMET (EMA) no Mato Grosso utilizadas no estudo.

Código	EMA nome	Clima	Bioma	Lat.	Lon.	Alt.
A-901	Cuiabá	Aw	Cerrado	-15,56	-56,06	242
A-902	Tangará da Serra	Aw	Amazônia	-14,65	-57,43	440
A-903	São José do Rio Claro	Aw	Cerrado-Amazônia	-13,45	-56,68	340
A-904	Sorriso	Af	Cerrado-Amazônia	-12,56	-55,72	379
A-905	Campo Novo do Parecis	Aw	Cerrado	-13,79	-57,84	525
A-906	Guarantã do Norte	Af	Amazônia	-9,95	-54,90	284
A-907	Rondonópolis	Aw	Cerrado	-16,46	-54,58	290
A-908	Água Boa	Aw	Cerrado	-14,02	-52,21	440
A-910	Apiacás	Af	Amazônia	-9,56	-57,39	218
A-912	Campo Verde	Aw	Cerrado	-15,53	-55,14	748
A-913	Comodoro	Aw	Cerrado	-13,71	-59,76	577
A-914	Juara	Af	Amazônia	-11,28	-57,53	263
A-915	Paranatinga	Aw	Cerrado	-14,42	-54,04	477
A-916	Querência	Aw	Amazônia	-12,63	-52,22	361
A-917	Sinop	Af	Cerrado-Amazônia	-11,98	-55,57	367
A-918	Confresa	Af	Cerrado-Amazônia	-10,64	-51,57	233
A-919	Cotriguaçu	Af	Amazônia	-9,91	-58,57	265
A-920	Juína	Af	Amazônia	-11,38	-58,77	365
A-921	São Felix do Araguaia	Aw	Cerrado	-11,62	-50,73	201
A-922	Vila Bela da Santíssima Trindade	Aw	Amazônia	-15,06	-59,87	213
A-924	Alta Floresta	Af	Amazônia	-10,08	-56,18	292
A-926	Carlinda	Af	Amazônia	-9,97	-55,83	294
A-927	Brasnorte (Novo Mundo)	Af	Cerrado-Amazônia	-12,52	-58,23	426
A-928	Nova Maringá	Aw	Cerrado-Amazônia	-13,04	-57,09	334
A-929	Nova Ubiratã	Aw	Cerrado-Amazônia	-13,41	-54,75	466
A-930	Gaúcha do Norte	Aw	Cerrado-Amazônia	-13,18	-53,26	376
A-931	Santo Antônio do Leste	Aw	Cerrado	-14,93	-53,88	664
A-932	Guiratinga	Cwa	Cerrado	-16,34	-53,77	525
A-933	Itiquira	Cwa	Cerrado	-17,17	-54,50	593
A-934	Alto Taquari	Cwa	Cerrado	-17,84	-53,29	862
A-935	Porto Estrela	Aw	Cerrado	-15,32	-57,23	148
A-936	Salto do Céu	Aw	Amazônia	-15,12	-58,13	301
A-937	Pontes de Lacerda	Aw	Amazônia	-15,23	-59,35	273

OBS: Lat. = latitude (graus); Log. = longitude (graus); Alt. = altitude (m); Af = Tropical Chuvoso; Aw = Tropical de Savana; Cwa = Tropical de Altitude.

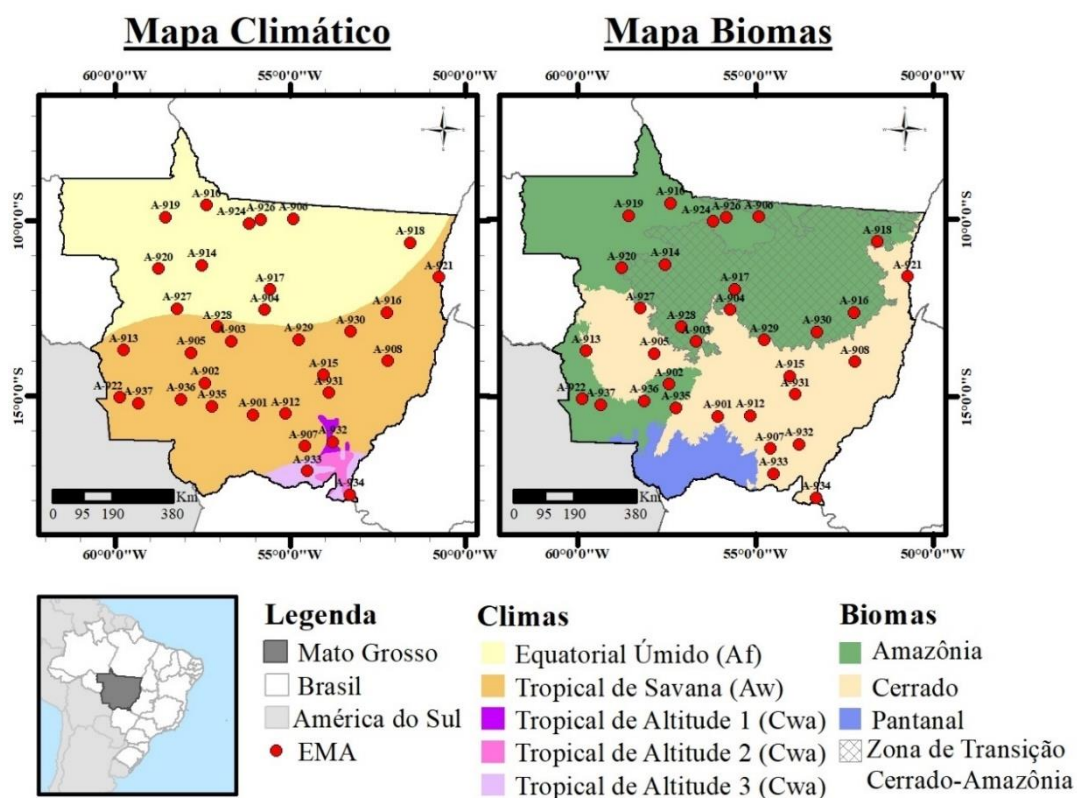


Figura 5-1: Mapas do clima e biomas e localização das Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no Mato Grosso.

OBS: Identificação numérica das EMAs de acordo com a Tabela 5-1.

Tabela 5-2: Modelos climáticos globais (MCGs) empregados no estudo, juntamente com suas resoluções e grupos de pesquisa responsáveis.

MCG	Grupos de Pesquisa	Resolução Espacial (Lat × Long)
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, China	2,8 × 2,8
CESM1-CAM5	Community Earth System Model Contributors, USA	1,25 × 0,94
CNRM-CM5	National Center of Meteorological Research, France	1,4 × 1,4
CSIRO-Mk3 6.0	Organization/Queensland Climate Change Center of Excellence, Australia	1,8 × 1,8
GFDL-CM3	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2,5 × 2,0
GFDL-ESM2G	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA	2,5 × 2,0
HadGEM2-ES	Met Office Hadley Center, UK	1,88 × 1,25
IPSL-CM5A LR	Institut Pierre Simon Laplace, France	3,75 × 1,8
IPSL-CM5A MR	Institut Pierre Simon Laplace, France	2,5 × 1,25

OBS: MCG = Modelo climatológico global; Lat. = latitude (graus); Lon. = longitude (graus).

5.2.2 Cálculo de evapotranspiração de referência (ET₀)

As estimativas de evapotranspiração de referência foram obtidas por meio da equação FAO-Penman-Monteith (FAO-PM) utilizando dados mensais das variáveis meteorológicas: radiação solar incidente (Rs - MJ m⁻² dia⁻¹), umidade relativa do ar (UR - %), temperatura máxima do ar (Tmax - °C), temperatura mínima do ar (Tmin - °C) e velocidade média do vento a 2 m (VV - m s⁻¹), conforme Equação 5-1, sendo os dados das variáveis meteorológicas dos MCGs extraídos do pixel mais próximo a localização de cada EMA do estado. O método FAO-PM foi escolhido por ser o método recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e combinar parâmetros fisiológicos e meteorológicos na estimativa da ET₀ de uma superfície gramada hipotética com altura de 0,12 m, resistência superficial de 70 s m⁻¹ e albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T+273}\right)VV(es-ea)}{\Delta + \gamma(1+0,34VVS)} \quad \text{Equação 5-1}$$

em que:

ET₀ - é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

R_n - é a radiação líquida na superfície da cultura (MJ m⁻² dia⁻¹);

G - é a densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹);

T - é a temperatura média do ar a 2 m de altura (valor médio de Tmax e Tmin, °C);

WS - é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

es - é a pressão de vapor de saturação (kPa);

ea - é a pressão de vapor atual (kPa);

Δ - é a inclinação da pressão de vapor de saturação versus curva de temperatura do ar (kPa °C⁻¹);

γ - é a constante psicométrica (kPa °C⁻¹)

Os cálculos detalhados do saldo de radiação (a partir dos dados do SRD), Δ e γ e outros parâmetros necessários para a computação da ET₀ foram obtidos de acordo com o procedimento descrito em Allen et al. (1998). Além disso, visto que a variável

velocidade do vento nas EMAs do estado e nos MCGs são obtidas a 10 metros a velocidade média a 2 metros foi obtida conforme Equação 5-2.

$$VV_2 = \frac{VV_{10} \times 4.87}{\ln(67.8 \times (H-5.42))} \quad \text{Equação 5-2}$$

em que:

VV_2 - é a velocidade do vento a 2 metros ($m s^{-1}$);

VV_{10} - é a velocidade do vento a 10 metros ($m s^{-1}$);

H - é a altura em que a velocidade do vento foi obtida (m) – 10 metros;

5.2.3 Avaliação dos erros de estimativa e escolha do MCG

A precisão das estimativas dos 9 MCGs foi avaliada a partir da comparação dos dados simulados da ET_0 e suas variáveis meteorológicas entre os anos de 2007 e 2020 com os dados observados nas EMAs do Mato Grosso. Os erros de estimativa foram mensurados por meio das medidas de Viés (Equação 5-3), da raiz do erro médio quadrático (RMSE - Equação 5-4), e RMSE normalizado (Equação 5-5), e dos coeficientes de correlação de Pearson (roh_p - Equação 5-6) e/ou Spearman (roh_s - Equação 5-7). Por fim, os modelos foram ranqueados de maneira que recebessem melhores posições (menor valor de erros ponderados) o MCG cujo resultado de viés e RMSE estiverem mais próximo a zero e cujo coeficiente de correlação, em valores absolutos, estivesse próximo a um.

$$Viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i) \quad \text{Equação 3-3.}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2} \quad \text{Equação 3-4.}$$

$$RMSE_Normalizado = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}} \quad \text{Equação 3-5.}$$

$$roh_p = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum (P_i - \bar{P})^2}} \quad \text{Equação 3-6.}$$

$$roh_s = 1 - \frac{6 \sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{Equação 3-7.}$$

em que:

P_i - é o dado estimado.

O_i - é o dado observado.

$\bar{O}$ - é a média dos dados observados.

$\bar{P}$ - é a média dos dados observados.

N - é o número de valores da amostra.

d - é a diferença de ordem entre os valores simulados e observados.

5.2.4 Análise espaço-temporal e teste de médias das projeções da evapotranspiração de referência (ET₀)

As projeções do melhor MCG foram então avaliadas por meio de comparações gráficas das variações espaço-temporais anuais e sazonal dos três cenários RCPs (Cenário otimista – RCP 2.6, Cenário médio - RCP 4.5, e Cenário pessimista - RCP 8.5) com as condições observadas nas EMAs do Mato Grosso. Além disso, as diferenças médias estatística da ET₀ simulada nos 4 períodos de projeções (atual – 2007 a 2020, curto – 2021 a 2050, médio – 2051-2075 e longo – 2076-2100) dos três cenários foram comparadas entre si e entre a média observada nas EMAs por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($\alpha=0,10$) sendo as diferenças expressas pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney.

5.2.5 Análise de tendências e teste de Sen's

O teste de Mann Kendall (MANN, 1945; KENDALL, 1975) foi utilizado para detectar a existência de tendências anual da ET₀ e sua variáveis meteorológicas no período simulado de 2007-2100 nos três cenários (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP8.5) e no período dos dados observados nas EMAs (2007-2020). Visto que a utilização do teste de Mann Kendall requer séries de dados completas, as falhas nos dados meteorológicos observados foram preenchidas pelo método de regressão linear simples utilizando o software GapMET, conforme recomendado por Sabino; Souza (2023) (ARTIGO 1). O teste de Mann Kendall baseia-se em duas hipóteses: hipótese nula (H₀) que assume que a série é estacionária (sem tendência) e a hipótese alternativa (H₁) que indica a existência de uma tendência. O nível de significância utilizado neste estudo para

rejeição de H_0 foi de 0,10. Além disso, o teste Mann Kendall permite verificar a direção da tendência (positiva ou negativa) por meio do sinal (+ ou -) associado ao valor Z do teste.

Por fim, a amplitude das tendências foram mensuradas pela regressão linear robusta de Sen's (SEN, 1968). O teste de Sen's é um estimador de inclinação não paramétrico baseado na mediana sendo indicado por ser robusto contra outliers e ter ampla utilização nas estimativas de tendências da evapotranspiração e variáveis climáticas (MUELLER et al., 2013; ZHANG et al., 2015).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.3.1 Escolha dos modelos de projeção climática

Os erros relativos médios para as métricas de desempenho dos 9 modelos climáticos globais (MCGs) nas estimativas das variáveis meteorológicas radiação solar incidente (R_s), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (VV) são apresentados na Figura 5-2. Apesar de cada MCG exibir resultados mistos de desempenho das diferentes métricas em cada variável, a comparação de erros ponderados demonstra que os três modelos com estimativas mais precisas foram o CESM1-CAM5, CNRM-CM5 e HadGEM2-ES. Esses MCGs destacaram-se ainda devido aos valores de viés absoluto e RMSE-Normalizado inferiores a 0,1 nas estimativas das variáveis R_s , UR e VV.

Apesar de todos os modelos terem apresentado bons resultados de correlação com os dados observados de UR, T_{max} e T_{min} (em geral, superiores a 0,6), as variáveis R_s e VV apresentaram baixas correlações (inferiores a 0,45) sendo os melhores resultados de correlação da radiação solar incidente obtidos pelos modelos IPSL-XM5A LR, IPSL-XM5A MR e HadGEM2-ES, e os melhores resultados para a velocidade do vento foram observadas nos modelos CESM1-CAM5, HadGEM2-ES e CNRM-CM5. Contudo, embora haja boa correlação dos modelos IPSL-XM5A LR, IPSL-XM5A MR com os dados observados da variável R_s , estes apresentaram, em média, os maiores erros de viés encontrados para a radiação incidente (35% de viés).

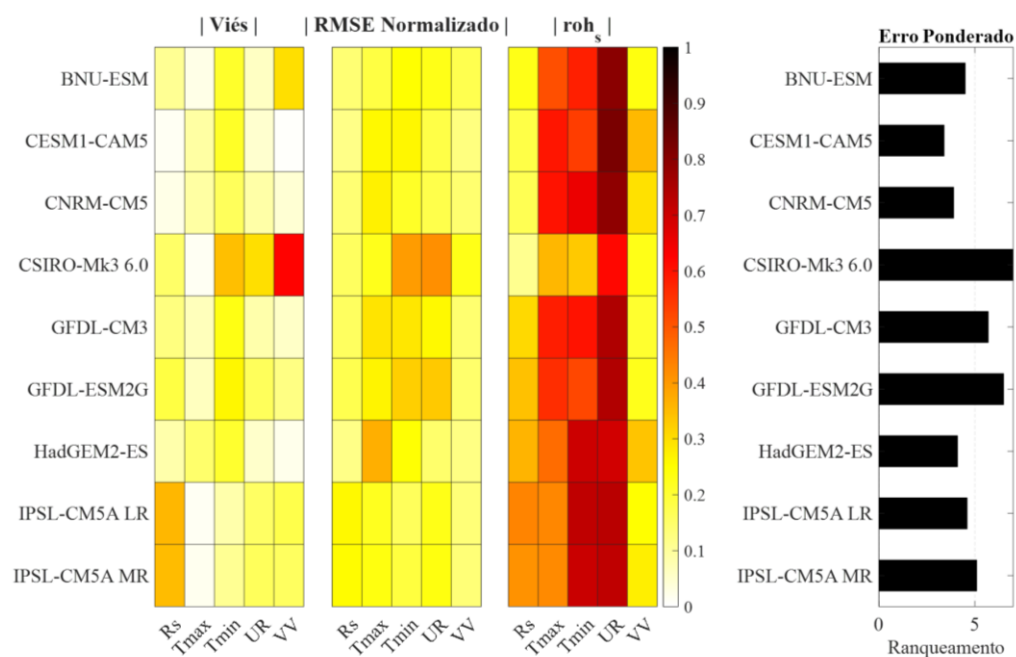


Figura 5-2 Média das métricas de desempenho do viés, raiz quadrática média normalizada (RMSE Normalizado), coeficiente de correlação de Spearman (roh_s) e erro ponderado dos 9 MCGs nas estimativas das variáveis meteorológicas radiação solar incidente (Rs), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (VV) obtidas nas localidades das 33 EMAs do estado do Mato Grosso, Brasil.

Os modelos CSIRO-Mk3 6.0, GFDL-ESM2G e GFDL-CM3 apresentaram os piores desempenhos nas estimativas das variáveis meteorológicas, destacando-se o modelo CSIRO-Mk3 cujo erro de viés variaram de 0,3 a 0,6 para as variáveis Tmin, UR e VV, e correlação máxima de 0,6 (encontrada na variável umidade relativa).

A distribuição das métricas de desempenho dos 9 MCGs nas estimativas da evapotranspiração de referência calculadas nas 33 EMAs do Mato Grosso são apresentadas nos Boxplot da Figura 5-3. Novamente os melhores resultados são encontrados nos MCGs CESM1-CAM5, CNRM-CM5 e HadGEM2-ES ($|viés| < 20\%$, $RMSE < 0,4$ e $0,3 < roh_p > 0,7$) enquanto os MCGs IPSL-XM5A LR, IPSL-XM5A MR, além de maiores médias dos erros, apresentaram uma dispersão maior das métricas ($10\% < |viés| < 60\%$, $0,3 > RMSE < 0,8$ e $0,05 < roh_p > 0,85$). O bom desempenho das estimativas do modelo HadGEM2-ES destaca-se ainda devido à baixa dispersão das métricas estimadas nas 33 estações do estado, demonstrando que o modelo é capaz de estimar a ET_0 nas diferentes condições ambientais e climáticas do Mato Grosso.

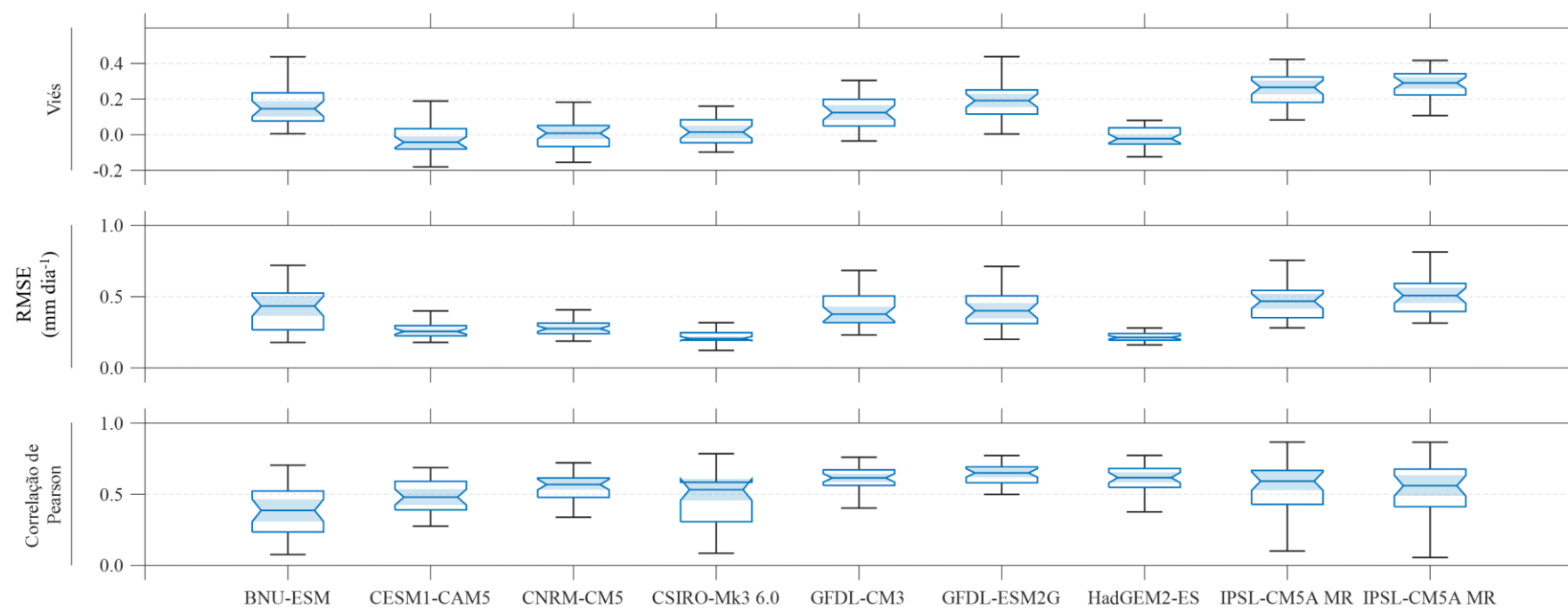


Figura 5-3: Métricas de desempenho do viés, raiz quadrática média (RMSE), coeficiente de correlação de Pearson dos 9 modelos climáticos globais nas estimativas mensais da evapotranspiração de referência entre os anos de 2007-2020 nas localidades das 33 EMAs do estado do Mato Grosso, Brasil.

Tais resultados estão de acordo com os encontrados na literatura para a região da América do Sul, nos quais a maioria dos modelos do CMIP5 foram capazes de simular de maneira satisfatória as variáveis associadas à evapotranspiração. Houve diferentes desempenhos conforme a variável climática analisada, assim como, a indicação do melhor modelo, considerando apenas uma variável climática ou o conjunto de variáveis analisadas concomitantemente, pode ser compostos por diferentes MCGs conforme a região de interesse (GULIZIA; CAMILLONI, 2015; MARTINS; SILVA, 2015; GUIMARÃES et al., 2016; NAITZEL 2021). Apesar disso, o uso do modelo HadGEM2-ES é ainda referenciado como capaz de simular os ciclos de ET_0 com bastante destreza, conforme estudo realizado por Guimarães et al. (2016) na região nordeste do Brasil, assim como, nos estudos de Martins; Silva (2015), Rocha et al. (2016) e Gomes et al. (2021) na bacia amazônica.

De maneira geral, os dois modelos com melhor resultados de estimativa da ET_0 no estado de Mato Grosso no período atual (2007-2020) foram o CESM1-CAM5 e o HadGEM2-ES. Contudo, visto que o modelo HadGEM2-ES apresentou menor dispersão dos erros de estimativa da ET_0 (Figura 5-3), assim como, melhor desempenho na estimativa das variáveis R_s , U_R e V_V (Figura 5-2), variáveis estas que apresentam maior impacto nas estimativas da ET_0 pelo método de Penman-Monteith (ARTIGO 2), nas etapas seguintes deste trabalho, o MCG HadGEM2-ES foi selecionado para as avaliações das projeções da ET_0 .

5.3.1 Projeções climática da evapotranspiração de referência (ET_0)

As médias e desvio padrão anuais das estimativas da evapotranspiração de referência e suas variáveis meteorológicas projetadas pelo HadGEM2-ES nos cenários RCP 2.6, 4.5 e 8.5 entre os anos de 2007 e 2100 nas EMAs do estado de Mato Grosso são apresentadas na Figura 5-4. Observa-se que até meados do século XXI as estimativas da ET_0 são similares entre os três cenários. Além disso, a ET_0 no cenário RCP 2.6 mantém-se próxima à média atual ($3,9 \pm 0,8 \text{ mm dia}^{-1}$) até 2100, enquanto no RCP 8.5 há incremento da ET_0 após 2050 atingindo $5,2 \pm 1,3 \text{ mm dia}^{-1}$ em 2100.

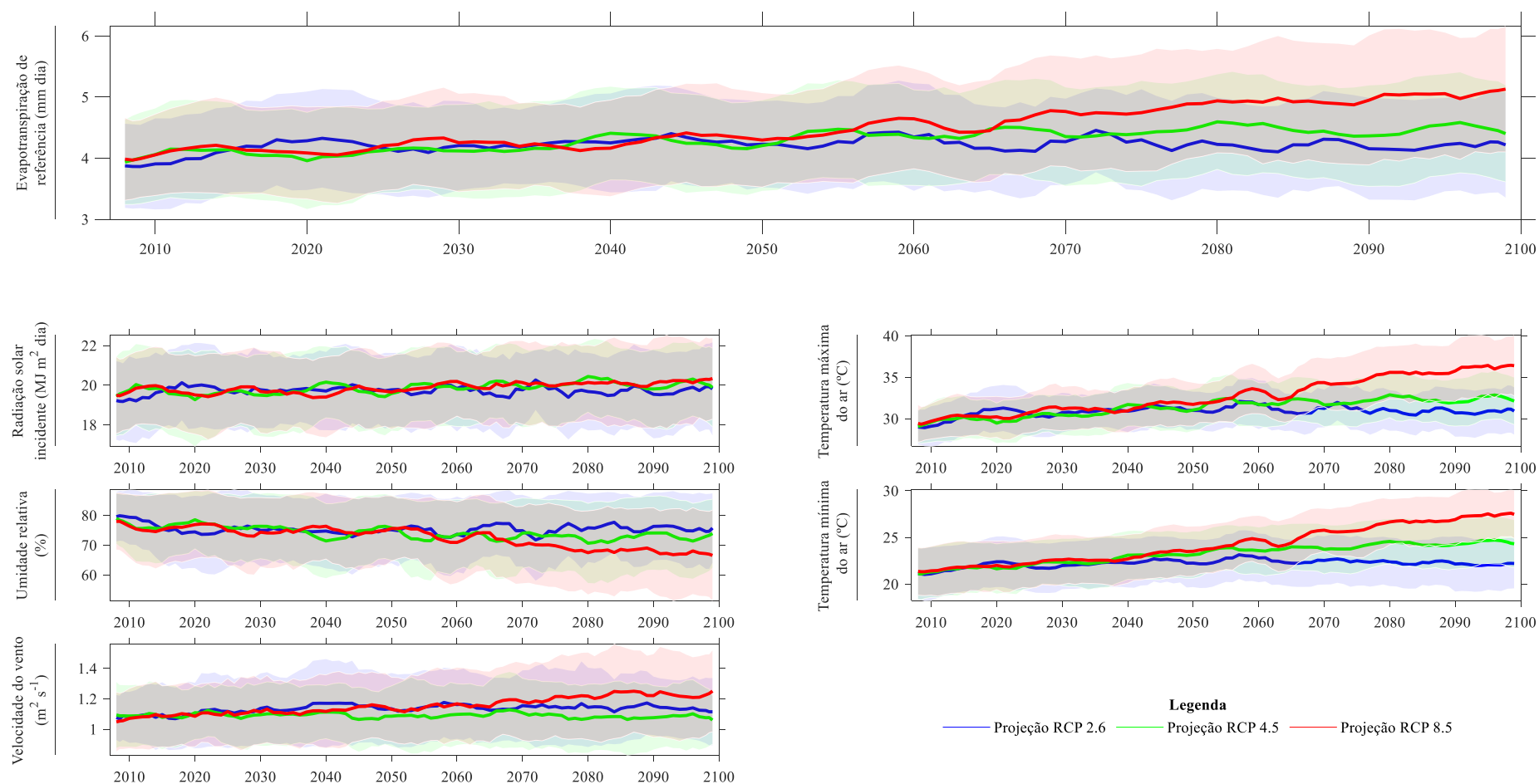


Figura 5-4: Médias móvel de 5 anos (linha) e desvio padrão (área sombreada) das estimativas da evapotranspiração de referência e suas variáveis meteorológicas projetadas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 entre os anos de 2007 e 2100 nas localidades das EMAS do estado de Mato Grosso, Brasil.

Esses resultados visuais são confirmados pelo teste de Kruskal-Wallis (Tabela 5-3) o qual demonstra que diferenças significativas ($\alpha = 0,10$) entre as médias estimadas nas três projeções somente ocorrem a partir do período de 2050-2075, quando a média anual da ET_0 no cenário RCP 8.5 ($4,42 \text{ mm dia}^{-1}$) torna-se estatisticamente maior que a projetada pelo cenário RCP 2.6 ($4,13 \text{ mm dia}^{-1}$). Essa diferenciação entre os cenários projetados continua aumentando nos anos subsequentes, atingindo médias estatisticamente diferentes da ET_0 entre os três RCPs no período 2076-2100.

Tabela 5-3: Média anual da evapotranspiração de referência (ET_0) (mm dia^{-1}) dos dados observados nas EMAs do Mato Grosso e simuladas pelo modelo HadGEM2-ES, nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5, em quatro períodos entre os anos de 2007 e 2100.

	Observado	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
Atual (2007 – 2020)	4,02	3,95 Aa	3,94 Aa	4,10 Aa
Projeção (2021 – 2050)		4,16 Aab	4,13 Aa	4,17 Aa
Projeção (2051 – 2075)		4,13 Ab	4,31 ABb	4,42 Bb*
Projeção (2076 – 2100)		4,08 Aab	4,37 Bb*	4,66 Cc*

Médias seguidas de letras diferentes maiúsculas na linha e minúsculas na coluna diferem estatisticamente pelo teste de Kruskal-Wallis a nível de significância de 10%. Médias seguidas por * diferem dos dados observados entre os anos de 2007 e 2020 nas EMAs do estado de Mato Grosso.

A avaliação das diferenças dentro de cada cenário demonstra que as projeções RCP 4.5 e 8.5 possuem um aumento contínuo da ET_0 , com diferenças significativas em relação à condição atual (2007-2020), a partir de 2050. O cenário RCP 2.6, entretanto, apesar de apresentar um aumento significativo até o período entre 2050-2075 exibe uma redução da média da ET_0 para valores semelhantes ao atual (2007-2020) no último quartel do século XXI.

Com relação às diferenças entre as médias anuais dos cenários nos diferentes períodos avaliados e as médias anuais observadas nas EMAs, conclui-se que as projeções do cenário RCP 2.6 entre 2007 e 2100 não diferem dos dados observados no estado de Mato Grosso, enquanto os cenários RCP 8.5 e RCP 4.5 a ET_0 apresentam um aumento significativo a partir do período de 2050-2075 e 2075-2100, respectivamente.

O aumento da ET_0 a partir de 2050 nas projeções do RCP 4.5 e 8.5 é, em geral, justificado devido ao aumento gradual e contínuo dos valores de temperatura do ar, uma vez que, o cenário RCP 2.6 apresenta estabilização da temperatura e consequente estagnação das médias da ET_0 em meados do século XXI (Figura 5-4) (GUIMARÃES et al., 2016, GOMES et al., 2021). Contudo, as alterações nas demais variáveis meteorológicas geram contribuições importantes nas mudanças da evapotranspiração, visto que as estimativas da ET_0 pelo método de PM no estado são mais sensíveis as alterações da UR e VV do que pela temperatura (ARTIGO 2). Assim, a distinção entre as médias de ET_0 estimada nos RCPs 4.5 e 8.5 deve-se principalmente a redução da umidade relativa e aumento da velocidade do vento (Figura 5-4), os quais ocorrem de maneira mais expressiva no RCPs 8.5, possibilitando que o cenário pessimista torne-se estaticamente diferente das condições atuais observadas já entre os anos de 2050-2075 (Tabela 5-3).

Resultados semelhantes são encontrados na literatura para outras regiões do Brasil, na qual as médias da ET_0 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 tornam-se estaticamente diferentes a partir da metade do século (GUIMARÃES et al., 2016, GOMES et al., 2021) Contudo, as diferenças estatísticas entre os dados observados e projetados terem sido identificadas apenas a partir de 2050 podem, em parte, terem ocorrido devido a decisão de dividir os subperíodos avaliados em aproximadamente 25 anos, visto que, Gomes et al. (2021) ao avaliar subperíodos menores encontrou diferenças significativas entre a ET_0 estimada no cenário RCP 8.5 e as condições atuais a partir intervalo de tempo de 2028-2038.

As variações das médias mensais da evapotranspiração de referência nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 nos quatro períodos avaliados (Figura 5-5) demonstram que o aumento das estimativas da ET_0 é mais expressivo nos meses de seca do estado de Mato Grosso, principalmente entre os meses de julho a outubro. Mesmo no cenário RCP 2.6, no qual as médias anuais se mantem similares ao longo do século, é possível observar um aumento de até $0,50 \text{ mm dia}^{-1}$ nas médias mensais do mês de setembro ao comparar os períodos de 2007-2020 e 2075-2100.

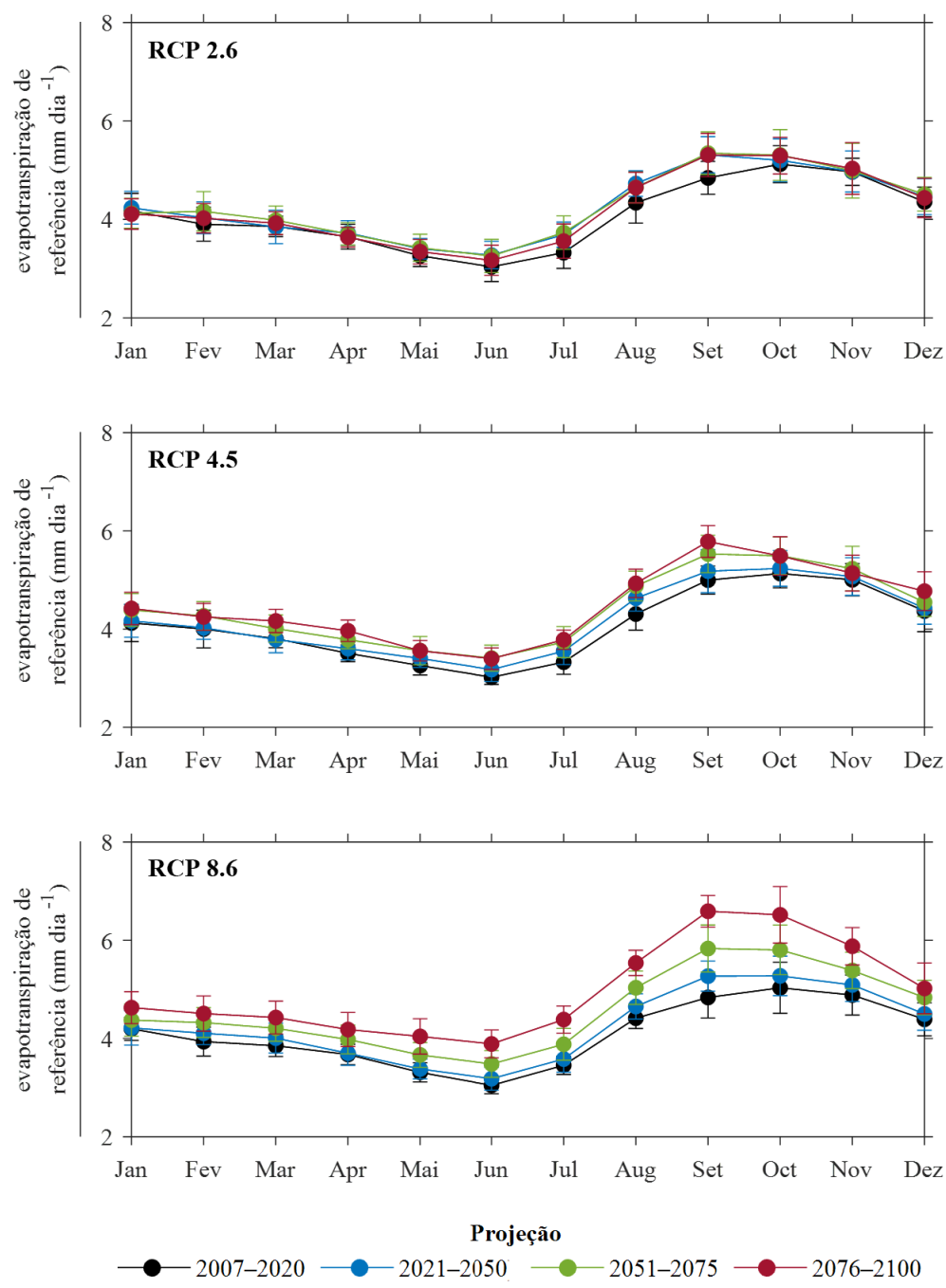


Figura 5-5: Variação mensal das médias e desvios padrão das estimativas da evapotranspiração de referência obtida pelo modelo HadGEM2-ES nos três cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) em quatro períodos entre os anos de 2007 e 2100.

Quando avaliado o cenário pessimista (RCP 8.5), o incremento da ET_0 no período de estiagem (maio-setembro) pode alcançar $1,5 \text{ mm dia}^{-1}$ até o fim do século, gerando uma ET_0 média de $5,2 \pm 1,2 \text{ mm dia}^{-1}$. O incremento da evapotranspiração no

cenário RCP 8.5 é notado mesmo no período chuvoso (outubro-abril) atingindo, em média, $4,8 \pm 0,6 \text{ mm dia}^{-1}$ no período de 2075-2100, o que representa um aumento de até $0,4 \text{ mm dia}^{-1}$ em comparação as médias atuais. Contudo, é importante ressaltar que o aumento da ET_0 pode ser ainda mais acentuado pois, conforme discutido anteriormente, o MCG HadGEM2-ES apresenta um viés não corrigido de subestimação com erro médio quadrático (RMSE) de aproximadamente $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$ no estado (Figura 5-3).

As médias mensais da evapotranspiração de referência observadas nas EMAs do estado entre 2007-2020 e estimadas pelo MCG HadGEM2-ES nos três cenários entre os anos de 2007-2100, assim como, a diferença entre as médias estimadas e observadas pelo MCG são apresentadas na Figura 5-6 e Figura 5-7, respectivamente. Observa-se que além do incremento da ET_0 as mudanças projetadas do clima no estado ainda implicam na alteração do comportamento sazonal da ET_0 .

Nota-se que nas condições atuais os valores mínimos de ET_0 ocorrem entre os meses de abril e julho (com mínima em junho), enquanto as máximas ocorrem entre agosto e outubro (com máxima em setembro). Entretanto, nos cenários RCP 4.5 e 8.5 há uma redução dos meses com ET_0 mínima e um aumento dos meses com máxima ET_0 . Essa condição é mais explícita no cenário RCP 8.5 a partir de 2075 quando a ET_0 passa a apresentar médias similares entre janeiro e julho ($4,3 \pm 0,4 \text{ mm dia}^{-1}$) seguida de um rápido aumento da ET_0 entre os meses de agosto e dezembro, atingindo máximas de até $6,6 \pm 0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ nos meses de setembro-outubro.

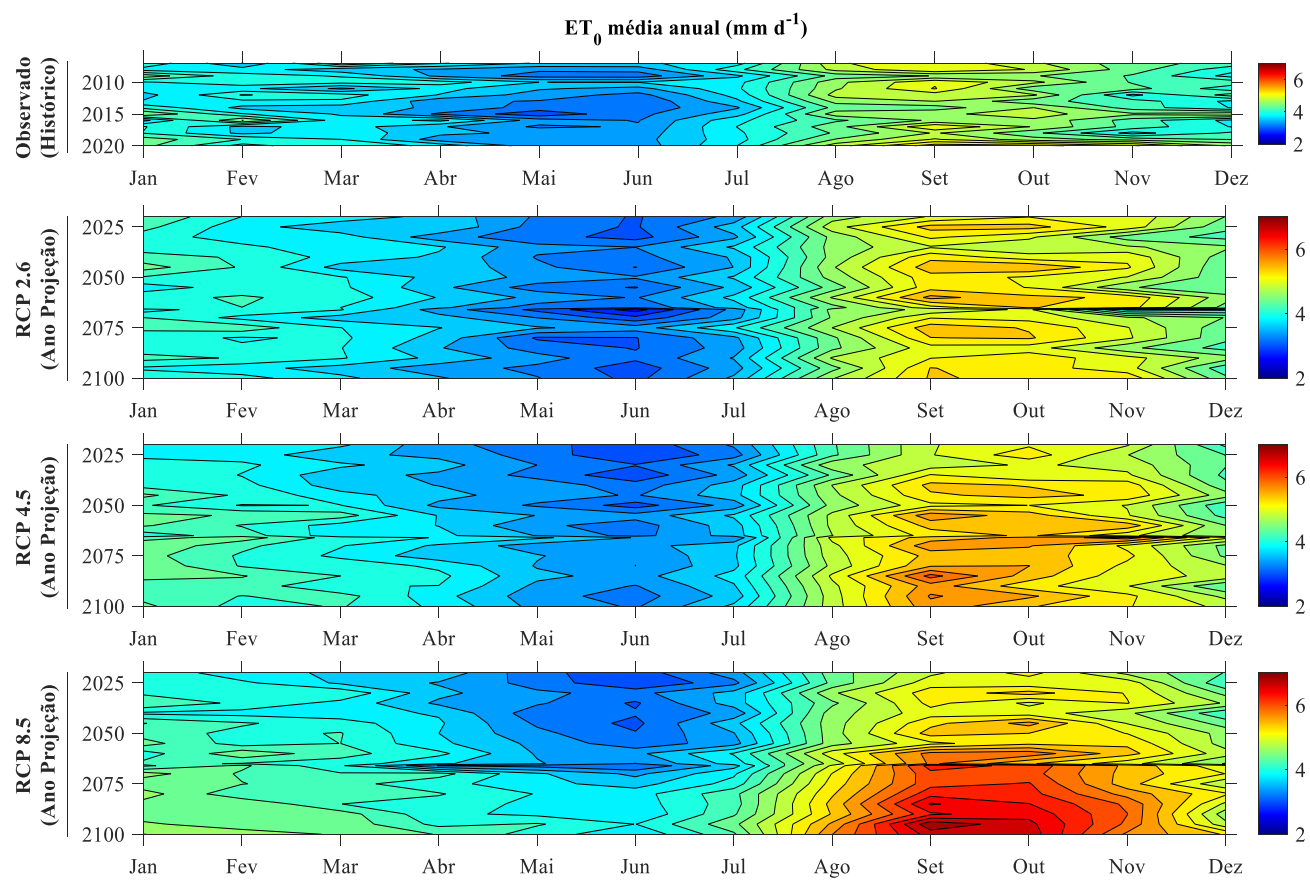


Figura 5-6: Médias mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) observadas entre 2007-2020 e estimativas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) entre os anos de 2007-2100, na localidade das EMAs do Mato Grosso, Brasil.
OBS: Diferença entre as curvas de nível da figura são de $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$.

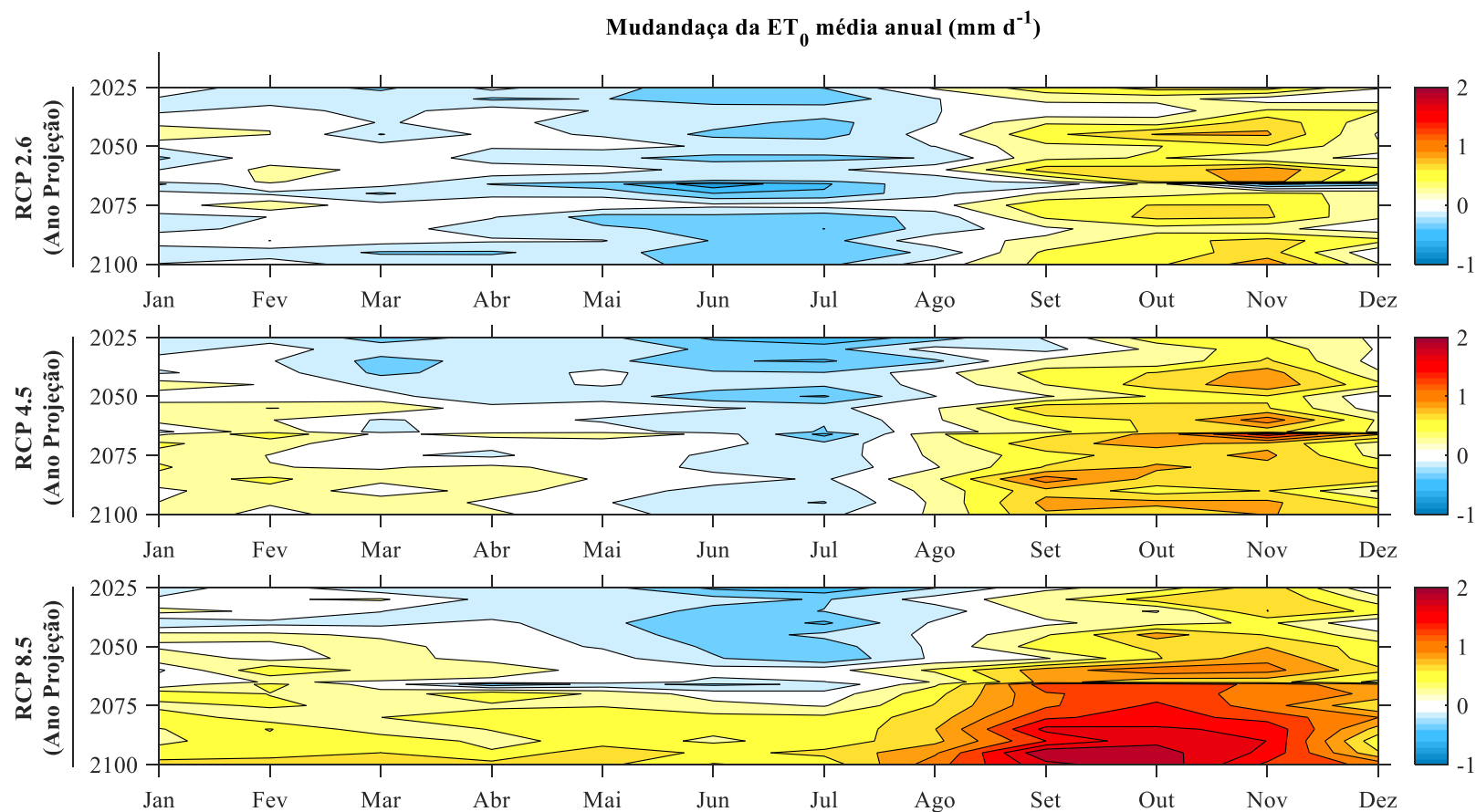


Figura 5-7: Diferença entre as médias mensais da evapotranspiração de referência (ET_0) observadas entre 2007-2020, e estimativas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) entre os anos de 2025-2100, na localidade das EMAs do Mato Grosso, Brasil.
OBS: Diferença entre as curvas de nível da figura são de $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$.

As mudanças na sazonalidade da evapotranspiração de referência mostram-se consistente com a recente literatura a qual demonstra alterações significativas no comportamento sazonal da ET_0 , principalmente após 2050 (GUIMARÃES et al., 2016, GOMES et al., 2021). Tais alterações indicam um incremento médio da ET_0 anual associado ao aumento mais expressivo da ET_0 durante o período seco (CHOU; LAN, 2012; CHOU et al., 2013; GOMES et al., 2021), implicando, em geral, que as regiões que já têm um abastecimento de água inconsistente devido à alta variação sazonal na precipitação pode experimentar balanços de água ainda mais inconsistentes devido ao aumento da demanda evapotranspirativa nos períodos de seca (KONAPALA et al., 2020).

As alterações na sazonalidade com incremento maior durante o fim do período seco e início do chuvoso, conforme comentado anteriormente, podem estar ligadas, principalmente, às reduções na umidade relativa do ar e aumento da velocidade do vento (KONAPALA et al., 2020; RICHTER; XIE, 2008), visto que, conforme Greve; Seneviratne (2015) regiões tropicais e suas áreas de transição na América do Sul podem apresentar tendências a intensificação de condições de ambientes áridos caracterizados por baixa umidade relativa, velocidade do vento maior e altas taxas evapotranspirativas. Além disso, a radiação solar incidente, apesar de não variar de maneira tão expressiva como as demais variáveis (Figura 5-4), deve ser levada em consideração com um dos fatores, uma vez que estudos prévios indicaram este componente como uma dos principais variáveis afetando a sazonalidade da ET_0 na região Amazônica (WERTH; AVISSAR, 2004; SILVA JÚNIOR et al., 2017; MAEDA et al., 2017, ARTIGO 2).

A distribuição espacial das médias da evapotranspiração de referência observada nas EMAs do estado de Mato Grosso no período de 2007-2020 e as médias estimadas pelo modelo HadGEM2-ES nos três cenários climáticos (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5) e quatro períodos avaliados (2007-2020, 2021-2050, 2051-2075 e 2076-2100), assim como, as diferenças entre as médias observadas nas EMA e estimadas pelo modelo são apresentadas nas Figura 5-8 e Figura 5-9, respectivamente.

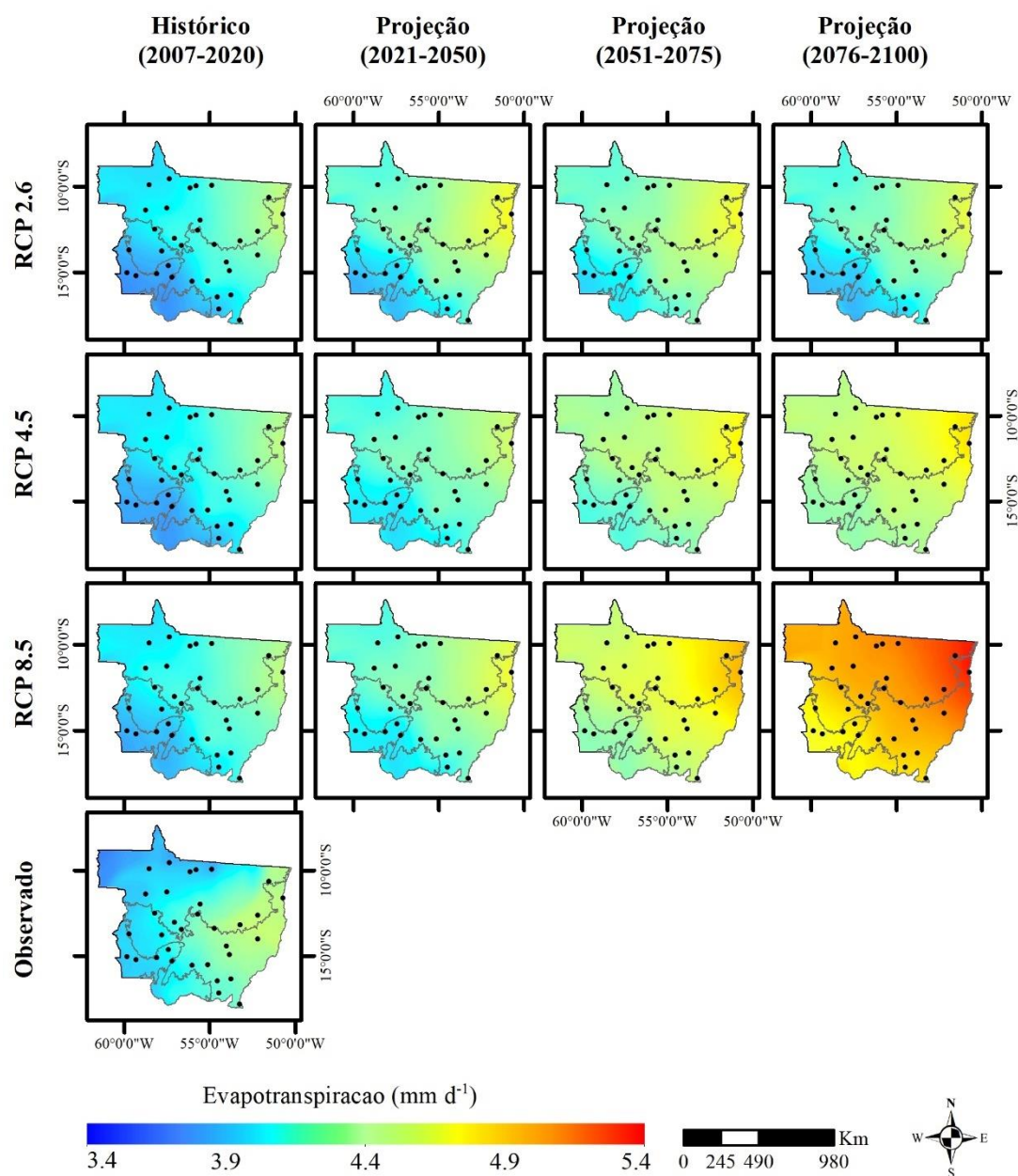


Figura 5-8: Distribuição espacial interpolada da evapotranspiração de referência (ET_0) média anual observada nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre os anos de 2007 e 2020, e estimativas pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) em diferentes períodos do século XXI. século XXI.

OBS: Linhas no mapa demarcam os biomas e pontos as EMAs do estado de Mato Grosso.

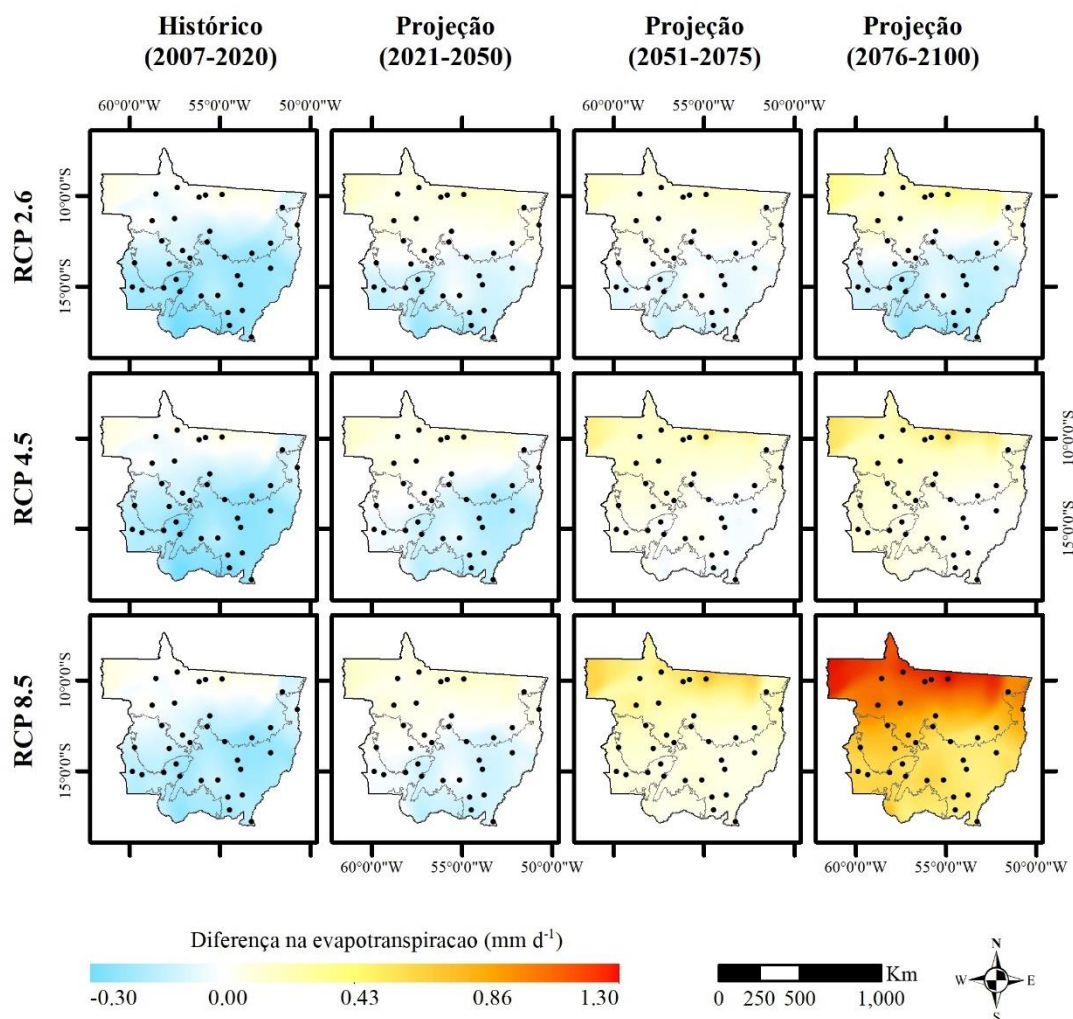


Figura 5-9: Diferença entre as médias anuais da evapotranspiração de referência (ET_0) observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre 2007 e 2020, e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 em diferentes períodos do século XXI.

OBS: Linhas no mapa demarcam os biomas e pontos as EMAs do estado de Mato Grosso.

Nas estimativas do período atual (2007-2020) observa-se que o HadGEM2-ES apresenta viés diferente conforme os biomas do estado de Mato Grosso. Na região Amazônica, ao norte do estado, há uma superestimação de até $0,2 \text{ mm dia}^{-1}$ em todos os cenários, enquanto nas demais áreas do estado (cerrado e próximas ao pantanal) há uma subestimativa da ET_0 de até $0,3 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 5-8, Figura 5-9), destacando-se as áreas de maior altitude no sul do Mato Grosso.

Nas estimativas das projeções do modelo no período entre 2007-2100 o cenário RCP 2.6, conforme discutido anteriormente, é único que se mantém com valores de ET_0 similares ao longo do século em todas as áreas do estado, apresentando, contudo, um pico de evapotranspiração entre os anos de 2050-2075 (Figura 5-8). Nota-se, entretanto, que as estimativas da ET_0 no cenário RCP 2.6 durante o período de pico (2050-2075) é que mais se aproxima das médias observadas nas EMAs do estado de MT no período atual (2007-2020) (Figura 5-9). Nas projeções dos cenários RCP 4.5 e 8.5 observa-se aumento da ET_0 em todo o estado, podendo atingir no último quartel do século uma evapotranspiração média anual variando de 4,3 a 4,8 mm dia⁻¹ no cenários RCP 4.5, assim como, de 4,7 a 5,4 mm dia⁻¹ no cenário pessimista (RCP 8.5) (Figura 5-8).

Em todos os cenários, as maiores ET_0 ocorrem nas áreas de Cerrado do estado, principalmente na região do Cerrado Setentrional (região nordeste do Cerrado mato-grossense), assim como, as menores estimativas encontram-se distribuídas nas áreas próximas do Pantanal e na porção Amazônica da região sudoeste do estado. Contudo, ao comparar-se os dados observados nas EMAs do Mato Grosso com as estimativas dos cenários, nota-se que a maior mudança da taxa de evapotranspiração ocorre na região norte amazônica, onde a ET_0 pode ter um incremento médio anual de até 1,3 mm dia⁻¹ (RCP 8.5), enquanto no Cerrado o incremento é de aproximadamente 0,7 mm dia⁻¹ (RCP 8.5) (Figura 5-9).

5.3.2 Análise de tendência

A avaliação dos comportamentos das tendências anuais das médias observadas e simuladas da ET_0 e suas variáveis meteorológicas no estado de Mato Grosso são apresentados na Tabela 5-4. Com relação a análise das médias dos dados simulados pelo modelo HadGEM2-ES no longo prazo (2007-2100), observa-se que nos cenários RCP 4.5 e 8.5 todas as variáveis apresentaram tendências significativas, enquanto, no cenário RCP 2.6 foram identificadas tendências significativas apenas nas variáveis Tmax, Tmin e VV. Esses resultados concordam com os discutidos anteriormente sobre as projeções da evapotranspiração de referência, sendo possível observar, até o fim do século, comportamento estacionário da ET_0 no cenário RCP 2.6, assim como,

tendência de incremento da ET_0 de 0,05 e 0,12 mm dia⁻¹ por década nos cenários RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

Tabela 5-4: Tendência média da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas (radiação incidente – Rs; umidade relativa – UR; temperatura máxima – Tmax; temperatura mínima – Tmin; e velocidade médias do vento – VV) observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre 2007 e 2020, e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 a curto prazo (2007-2020) e longo prazo (2007 e 2100)

Base de dados	Período	Cenário	Variáveis					
			Rs	UR	Tmax	Tmin	VV	ET_0
Observado	Curto prazo (2007-2020)	Atual	-0,109	-0,276	0,567**	0,220	-0,111**	-0,035
		RCP 2.6	0,731**	-4,709**	2,141**	1,216**	0,016	0,423**
		RCP 4.5	-0,288	-0,204	0,768	0,651**	-0,024	0,051
Simulado	Curto prazo (2007-2020)	RCP 8.5	0,047	-1,211	0,683*	0,587**	0,047**	0,075
		RCP 2.6	0,006	-0,084	0,080**	0,058**	0,005**	0,011
		RCP 4.5	0,061**	-0,539**	0,345**	0,377**	0,001*	0,055**
	Longo prazo (2007-2100)	RCP 8.5	0,075**	-1,152**	0,779**	0,716**	0,019**	0,121**

OBS: Resultados seguidos por * ou ** apresentam tendências significativas pelo teste de Mann Kendall a 0.05 e 0.01, respectivamente. Rs – radiação solar incidente (MJ m⁻² dia⁻¹ dec⁻¹); UR – umidade relativa (% dec⁻¹); Tmax – Temperatura máxima do ar (°C dec⁻¹); Tmin – Temperatura mínima do ar (°C dec⁻¹); VV – velocidade média do vento a 2 metros (m s⁻¹ dec⁻¹); ET_0 – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹ dec⁻¹)

O incremento da ET_0 nos cenários RCP 4.5 e 8.5 é justificado devido as alterações das médias de suas variáveis meteorológicas, tais quais, aumentos na radiação solar incidente, velocidade do vento e temperaturas máximas e mínimas, conjuntamente, as reduções das médias da umidade relativa. Da mesma maneira, a estacionaridade da ET_0 no cenário RCP 2.6 pode ser explicada pelo fato de que a radiação solar incidente, principal variável de influência da evapotranspiração estimada pelo método Penman-Monteith no estado, não ter apresentado tendência significativa. Além disso, apesar de ser possível observar tendências de incremento das variáveis velocidade do vento e temperatura máxima e mínima, as alterações não foram suficientes para influenciar as médias da ET_0 , visto tratarem-se de variáveis com

menor grau de sensibilidade global para o método de Penman-Monteith (ARTIGO 2) e cujo grau de inclinação das retas de tendência são considerados baixos, com incremento até 2100 de aproximadamente $0,04 \text{ m s}^{-1}$ (VV), $0,64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tmax), e $0,46 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tmin).

Com relação aos resultados da análise de tendência dos dados observados nas EMAs do Mato Grosso entre os anos de 2007 e 2020, não foi verificada a existência de tendência significativa na evapotranspiração de referência, sendo a temperatura máxima do ar ($+0,567 \text{ }^{\circ}\text{C década}^{-1}$) e a velocidade do vento ($-0,111 \text{ m s}^{-1} \text{ década}^{-1}$) as únicas variáveis com tendências significativas. Contudo, esses resultados devem ser avaliados com ressalvas devido à base de dados conter poucos anos (2007-2020) o que pode levar a erros na análise de tendências, visto que, as series temporais podem conter anomalias climáticas causadas tanto por eventos de curto prazo como o fenômeno de Oscilação Sul (ENOS ou El Niño), cuja variação podem ocorrerem em períodos de 2 a 10 anos (GRIMM et al., 2000), assim como, eventos de longo prazo como a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), cujo padrão de oscilação pode durar de 20 a 30 anos (MANTUA et al., 1997). A problemática com relação a quantidade de dados necessários a análise de tendência é ainda mais explícita ao considerar-se as tendências dos dados simulados pelo modelo HadGEM2-ES no mesmo período de dados (2007-2020) no qual a ocorrência de tendências significativas não condiz com os resultados obtidos com a base de dados de longo prazo (2007-2100).

Contudo, apesar das ressalvas, alguns pontos importantes podem ser levantados com relação as tendências observadas nos dados coletados nas EMAs do Mato Grosso, principalmente quando avaliadas as EMAs individualmente (Figura 5-10, Anexo 5-1), como é o caso, por exemplo, da concentração de tendências significativas em determinados biomas, assim como, a intensidade das tendências (grau de inclinação da reta de Sen) encontradas nos dados observados serem, em geral, maiores do que a dos dados simulados pelo modelo HadGEM2-ES no curto e longo prazo.

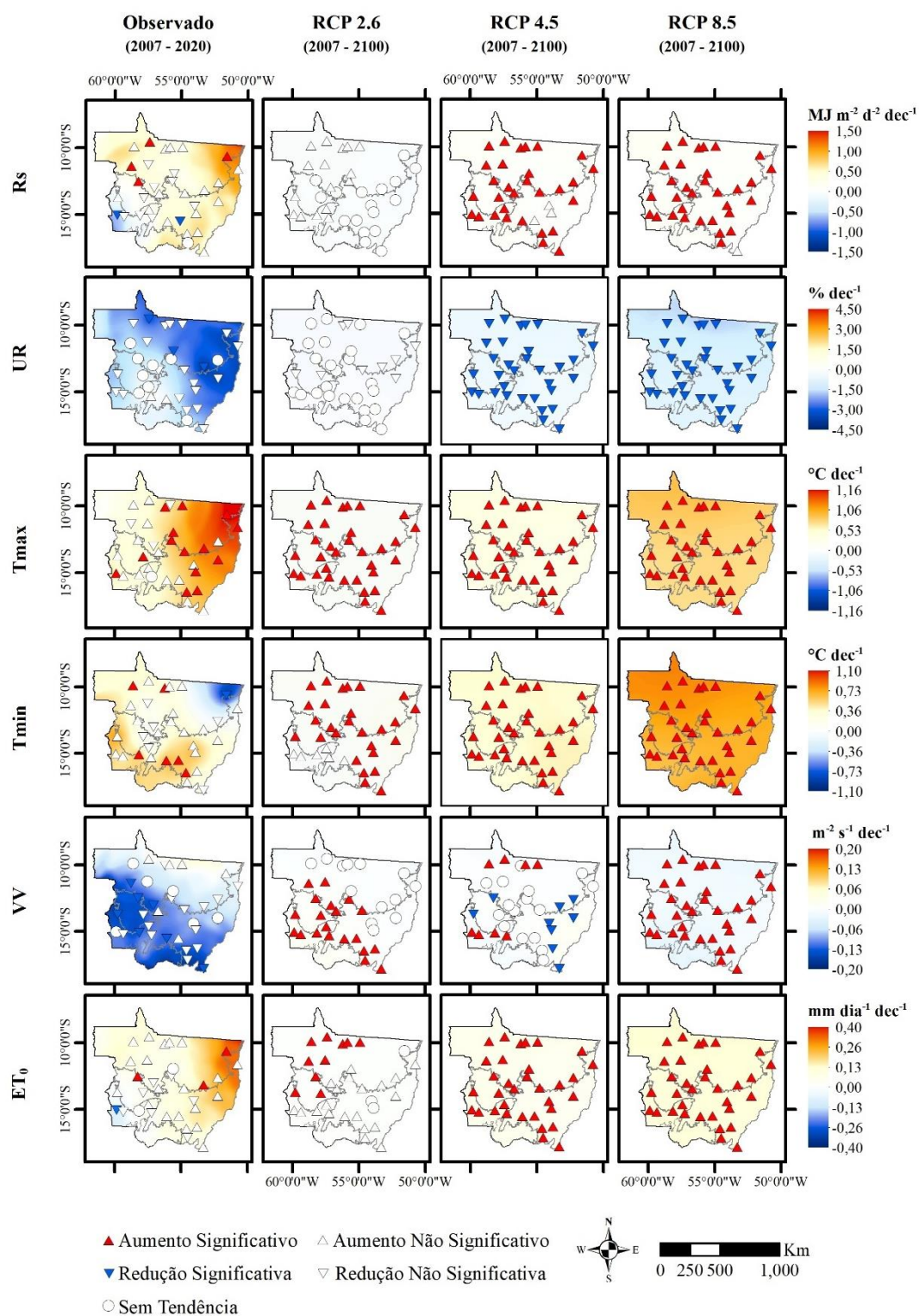


Figura 5-10: Tendências da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso (2007-2020), e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 (2007-2100). OBS: Variáveis meteorológicas: Rs - Radiação solar incidente; UR - Umidade relativa do ar; Tmax - Temperatura máxima do ar; Tmin - Temperatura mínima do ar; VV - Velocidade do vento a 2 m. Linhas no mapa demarcam os biomas e pontos as EMAs do estado de Mato Grosso.

Inicialmente pode-se notar que nos dados simulados pelo HadGEM2-ES todas as EMAs do estado apresentaram tendências significativas de aumento da ET_0 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, assim como, as EMAs da região norte amazônica no cenário RCP 2.6, enquanto, nos dados observados a ocorrência de tendências significativas concentraram-se na região do Cerrado Setentrional e nas áreas amazônicas no sul do estado. Além disso, as tendências nos dados simulados representam uma variação máxima de incremento da ET_0 entre $0,02 \text{ mm dia}^{-1} \text{ decada}^{-1}$ (RCP 2.6) e $0,14 \text{ mm dia}^{-1} \text{ decada}^{-1}$ (RCP 8.5), enquanto na análise dos dados observados nas EMAs da região do Cerrado Setentrional, por exemplo, verifica-se tendências de aumento mais expressivo da ET_0 (tendências significativas de incremento de $0,27$ e $0,51 \text{ mm dia}^{-1} \text{ decada}^{-1}$). Por outro lado, na região próximas ao Pantanal, na área de bioma Amazônico no sul do estado, contrário aos dados simulados, a análise dos dados observados demonstrou tendências de redução da ET_0 ($-0,36 \text{ mm dia}^{-1} \text{ decada}^{-1}$), as quais estão associados a reduções na radiação incidente e velocidade do vento na região.

Resultados semelhantes que evidenciam aumento da evapotranspiração devido a mudanças climáticas global, tanto em dados observados como simulados, tem sido divulgado na literatura nos últimos anos (TERINK et al., 2013; TAO et al., 2015; JIAO; WANG, 2018; SHAN et al., 2016; OBADA et al., 2017; RAHMAN et al., 2018; ZHAO et al., 2020), sendo o aumento da temperatura e a maior quantidade de energia disponível as principais causas do aumento da evapotranspiração (JIAO; WANG, 2018). Por outro lado, a diminuição na evapotranspiração, conforme notada nos dados observados também foram relatadas em certas regiões climáticas do mundo, como em climas secos e úmidos dos Estados Unidos (PETERSON et al., 1995; LAWRIK; PETERSON, 2000), em climas tropicais e subtropicais na China (JIAO; WANG, 2018; MAHYOUB; BUHAIRI, 2010; ZHANG et al., 2019), em clima semiárido da Turquia (YESILIRMAK, 2013; OZDOGA; SALVUCCI, 2004) e em clima árido do Irã (SHADMANI et al., 2012), sendo esse fenômeno conhecido como o "paradoxo da evaporação" (JIAO; WANG, 2018; RODERICK; FARQUHAR, 2004).

O "paradoxo da evapotranspiração" representa uma situação em que o aquecimento global é acompanhado por uma diminuição na evapotranspiração

(NDIAYE et al., 2020), podendo ser explicado pela diminuição da radiação solar, após o aumento da cobertura de nuvens e da concentração de aerossóis e poluentes na atmosfera (PETERSON et al., 1995; RODERICK; FARQUHAR, 2002, HAN et al., 2012), assim como, aumento da umidade relativa (CHATTOPADHYAY; HULME, 1997) e a redução da velocidade do vento (HAN et al., 2012). Assim, a tendência de redução da ET_0 na região do amazônico no sul do estado e próximas ao pantanal podem ser explicadas pelas reduções na radiação incidente e velocidade do vento (Figura 5-10) causadas, provavelmente, devido às mudanças nas concentrações e tipos de aerossóis devido a queima de biomassa, conforme observado por Palácios et al. (2020) e Palácios et al. (2022) que demonstram que a ocorrência de queimadas nas áreas da Amazônia e próximas ao Pantanal mato-grossense estão diretamente associadas ao espalhamento da radiação solar e, conseqüentemente, aos balanços de energia.

5.4. CONCLUSÕES

Os modelos climáticos globais com melhores desempenho nas estimativa da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith no estado de Mato Grosso foram o CESM1-CAM5 e o HadGEM2-ES, sendo o modelo HadGEM2-ES o indicado para avaliar as projeções da ET_0 por apresentar menor dispersão dos erros de estimativa, assim como, melhores estimativas das variáveis radiação solar incidente, umidade relativa e velocidade do vento, com $|\text{viés}| < 20\%$, RMSE normalizado $< 0,4$ e coeficiente de correlação entre 0,3 e 0,7.

A análise das projeções do modelo HadGEM2-ES demonstram no cenário RCP 2.6 médias estáticas semelhantes às condições atuais até o fim do século XXI, enquanto nos cenários RCP 4.5 e 8.5 há um aumento contínuo da ET_0 , com diferenças significativas em relação à condição atual a partir de 2050.

Todos os cenários climáticos (RCPs) do modelo HadGEM2-ES indicam a ocorrência de mudanças na sazonalidade da evapotranspiração no estado de Mato Grosso até 2100, o que inclui aumento do período com maiores valores de ET_0 e incremento mais expressivo das médias da ET_0 nos meses do período de seca, principalmente entre julho e outubro.

A distribuição espacial da ET_0 em todos os cenários projetados mantem-se semelhantes às observadas atualmente com maiores médias nas áreas do Cerrado e menores nas áreas de Amazônia e próximas ao Pantanal. Entretanto, as áreas do bioma amazônico, principalmente no norte do estado de Mato Grosso, exibem os maiores incrementos quando comparadas as médias observadas no período atual e as projeções no período entre 2020-2100.

A análise de tendência dos dados do modelo HadGEM2-ES apresentam mudanças significativas da evapotranspiração e suas variáveis em todos os locais avaliados até o fim do século XXI nos cenários RCP 4.5 e 8.5. No cenário RCP 2.6, apesar da ocorrência de tendência significativa na ET_0 limitar-se as áreas do norte amazônico, observa-se incrementos nas variáveis velocidade do vento e temperaturas máximas e mínimas na maior parte das áreas do estado de Mato Grosso.

A análise de tendência dos dados observados nas EMAs do estado de Mato Grosso entre 2007 e 2020 apresentarem resultados significativos em apenas XX EMAs. Contudo, as tendências nos dados observados apresentaram maior grau do que as obtidas nos dados do modelo HadGEM2-ES. Além disso, observa-se no estado a existência do paradoxo da evapotranspiração no qual há incremento da evapotranspiração nas áreas do cerrado e reduções nas áreas do próximas ao pantanal e na áreas amazônicas no sul do estado.

5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO - Irrigation and Drainage Paper**, v.56, 300 p., 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- CHATTOPADHYAY, N.; HULME, M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.87, n.1, p.55-73, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00006-3).

- CHEN, S. B.; LIU, Y. F.; THOMAS, A. Climatic change on the Tibetan Plateau: potential evapotranspiration trends from 1961–2000. **Climate Change**. v.76, p.291-319, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9080-z>.
- CHOU, C.; CHIANG, J. C.; LAN, C. W.; CHUNG, C. H.; LIAO, Y. C.; LEE, C. J. Increase in the range between wet and dry season precipitation. **Nature Geoscience**, v.6, n.4, p.263-267, 2013. <https://doi.org/10.1038/ngeo1744>
- CHOU, C.; LAN, C. W. Changes in the annual range of precipitation under global warming. **Journal of Climate**, v.25, n.1, p.222-235 2012. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00097.1>.
- COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE. **Climate Data Store: In situ total column ozone and ozone soundings from 1924 to present from the World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre**. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2021. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
- DENTZ, E. V. Produção agrícola no estado do Mato Grosso e a relação entre o agronegócio e as cidades: o caso de Lucas do Rio Verde e Sorriso. **Ateliê Geográfico**, v.13, n.2, p.165-186, 2019. <https://doi.org/10.5216/ag.v13i2.54290>.
- GARRETT, K.A.; NITA, M.; DE WOLF, E.D.; ESKER, P.D.; GOMEZ-MONTANO, L.; SPARKS, A.H. Plant pathogens as indicators of climate change. In: LETCHER, T. **Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth**. Elsevier, 2021. p. 499-513. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821575-3.00024-4>.
- GREVE, P.; SENEVIRATNE, S. I. Assessment of future changes in water availability and aridity. **Geophysical research letters**, v.42, n.13, p.5493-5499, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GL064127>.
- GOMES, W. W. E.; LEITE FILHO, A. T.; SOARES-FILHO, B. S. Simulação dos impactos das mudanças climáticas globais na evapotranspiração de referência da bacia Amazônica brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.28, p.450-470, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.74046>.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R.; DOYLE, M. E. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of climate*, v.13, n.1, p.35-58, 2000. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<0035:CVISSA>2.0.CO;2).

- GUIMARÃES, S. O.; COSTA, A. A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. D. C.; SILVA, E. M. D.; SALES, D. C.; ARAÚJO JÚNIOR, L. M. D.; SOUZA, S. G. D. Projeções de Mudanças Climáticas sobre o Nordeste Brasileiro dos Modelos do CMIP5 e do CORDEX. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.31, p.337-365, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778631320150150>.
- GULIZIA, C.; CAMILLONI, I., Comparative analysis of the ability of a set of CMIP3 and CMIP5 global climate models to represent precipitation in South America. **International Journal of Climatology**, v.35, n.4, p.583-595, 2015. <https://doi.org/10.1002/joc.4005>.
- HAN, S.; XU, D.; WANG, S. Decreasing potential evaporation trends in China from 1956 to 2005: accelerated in regions with significant agricultural influence?. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.154, p.44-56, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.10.009>.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. . Geneva : IPCC, 2014, 151 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. D. C. R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v.53, n.1, p.943-956, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>.
- JIAO, L.; WANG, D. Climate change, the evaporation paradox, and their effects on Streamflow in Lijiang Watershed. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.27, n.6, p.2585-2591, 2018. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81290>.
- JUN, W.; XINHUA, W.; MEIHUA, G.; XUYAN, X. U. Impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Chuxiong City, Yunnan Province. **Procedia Earth and Planetary Science**, v.5, p.113-119, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2012.01.019>.
- KENDALL, M.G. **Rank Correlation Methods**. London : Griffin, 1997, 202 p.
- KOGO, B. K.; KUMAR, L.; KOECH, R. Climate change and variability in Kenya: a review of impacts on agriculture and food security. **Environment, Development**

- and Sustainability**, v.23, p.23-43, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00589-1>.
- KONAPALA, G.; MISHRA, A. K.; WADA, Y.; MANN, M. E. Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and evaporation. **Nature communications**, v.11, n.1, p.3044, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>.
- KOUSARI, M. R.; AHANI, H. An investigation on reference crop evapotranspiration trend from 1975 to 2005 in Iran. **International Journal of Climatology**, v.32, n.15, p.2387-2402, 2012. <https://doi.org/10.1002/joc.3404>.
- LAWRIMORE, J. H.; PETERSON, T. C. Pan Evaporation Trends in Dry and Humid Regions of the United States. **Journal of Hydrometeorology**, v.1, p.543-646, 2000. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2000\)001<0543:PETIDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2000)001<0543:PETIDA>2.0.CO;2).
- LIMA, J.W.M.; COLLISCHONN, W.; MARENGO, J.A. **Efeito das Mudanças Climáticas na Geração de Energia Elétrica**. São Paulo: AES Tietê, 2014, 360 p.
- LIU, X. W.; SHAO, L.W.; SUN, H. Y.; CHEN, S. Y.; ZHANG, X. Y. Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat. **Agricultural Water Management**, v.129, n.173-180, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.08.002>.
- MAEDA, E. E.; MA, X.; WAGNER, F. H; KIM, H.; OKI, T.; EAMUS, D.; HUETE, A. Evapotranspiration seasonality across the Amazon Basin. **Earth System Dynamics**, v.8, p.439-454, 2017. <https://doi.org/10.5194/esd-8-439-2017>.
- MAHYOUB, H.; BUHAIRI, A. Analysis of Monthly, Seasonal and Annual Air Temperature Variability and Trends in Taiz City Republic of Yemen. **Journal of Environmental Protection**, v.1, p.401-409, 2010. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2010.14046>.
- MANN, H.B. Non-parametric test against trend. **Econometrika**, v.13, n.3, p.245e259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>
- MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.78, p.1069-1079, 1997. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2).

- MARTINS, G.; SILVA, C. M. S. Estimativa de Balanço de água na floresta Amazônica no final da primeira metade do século XXI utilizando as simulações do CMIP5. **Boletim de Geografia**, Maringá, v.33, n.3, p.1-16, 2015. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v33i3.23109>.
- MUELLER, B.; HIRSCHI, M.; JIMENEZ, C.; CIAIS, P.; DIRMEYER, P. A.; DOLMAN, A. J.; FISHER, J. B.; JUNG, M.; LUDWIG, F.; MAIGNAN, F.; MIRALLES, D. G. Benchmark products for land evapotranspiration: LandFlux-EVAL multi-data set synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.17, n.10, p.3707-3720, 2013. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-17-3707-2013>.
- NAITZEL, L.T., 2021. **Validação de modelos climáticos globais e análise de projeções futuras para o Rio Grande do Sul**. 2021. Monografia (Graduação) - Engenharia Ambiental. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul - Porto Alegre, 2021.
- NDIAYE, P. M.; BODIAN, A.; DIOP, L.; DEME, A.; DEZETTER, A.; DJAMAN, K.; OGILVIE, A. Trend and sensitivity analysis of reference evapotranspiration in the Senegal river basin using NASA meteorological data. **Water**, v.12, n.7, p.1957, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12071957>.
- OBADA, E.; ALAMOU, E.; CHABI, A.; ZANDAGBA, J.; AFOUDA, A. Trends and changes in recent and future PenmanMonteith potential evapotranspiration in Benin (West Africa). **Hydrology**, v.4, n.3, p.38, 2017. <https://doi.org/10.3390/hydrology4030038>.
- PALÁCIOS, R. D. S.; ARTAXO, P.; CIRINO, G. G.; NAKALE, V.; MORAIS, F. G. D.; ROTHMUND, L. D.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; CURADO, L. F. A.; MARQUES, J. B.; NOGUEIRA, J. D. S. Long-term measurements of aerosol optical properties and radiative forcing (2011-2017) over Central Amazonia. **Atmosfera**, v.35, n.1, p.143-163, 2022. <http://dx.doi.org/10.20937/ATM.52892>.
- PALÁCIOS, R. D. S.; ROMERA, K. S.; CURADO, L. F. A.; BANGA, N. M.; ROTHMUND, L. D.; DA SILVA SALLO, F.; MORAIS, D.; SANTOS, A. C. A.; MORAES, T. J.; MORAIS, F. G.; LANDULFO, E. Long term analysis of optical and radiative properties of aerosols in the Amazon Basin. **Aerosol and Air Quality Research**, v.20, n.1, p.139-154, 2020. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0189>.

- PATLE, G. T.; SENGDO, D.; TAPAK, M. Trends in major climatic parameters and sensitivity of evapotranspiration to climatic parameters in the eastern Himalayan region of Sikkim, India. **Journal of Water and Climate Change**, v.11, p.491-502, 2019. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.121>.
- PETERSON, T. C.; GOLUBEV, V. S.; GROISMAN, P. Y. Evaporation losing its strength. **Nature**, v.377, p.687-688, 1995. <https://doi.org/10.1038/377687b0>.
- RAHMAN, M. A.; YUNSHENG, L.; SULTANA, N.; ONGOMA, V. Analysis of reference evapotranspiration (ET₀) trends under climate change in Bangladesh using observed and CMIP5 data sets. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v.131, p.1-17, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0596-3>.
- RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. **Journal of Water and Climate Change**, v.11, n.3, p.577-599, 2020. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>.
- RICHTER, I.; XIE, S. P. Muted precipitation increase in global warming simulations: a surface evaporation perspective. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.113, n.D24, p.1-20, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JD010561>.
- ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; CHOU, S. C.; LYRA, A.; SILVA, P. R. T.; GOMES, W. B.; VERGASTA, L. Avaliação do balanço de água na Amazônia simulado pelo modelo ETa-HadGem2-es no período de 1985 a 2005. **Revista de Geografia**, v.33, n.4, p.276-298, 2016.
- RODERICK, M. L.; FARQUHAR, G. D. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years. **Science**, v.298, p.1410-1411, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1075390-a>.
- RODERICK, M.; FARQUHAR, G. Changes in Australian Pan Evaporation from 1970 to 2002. **International Journal of Climatology**, v.24, p.1077-1090, 2004. <https://doi.org/10.1002/joc.1061>.
- SABINO, M.; SOUZA, A. P. D. Gap-filling meteorological data series using the GapMET software in the state of Mato Grosso, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.27, p.149-156, 2023. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n2p149-156>.

- SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, v.1., n.103, p.41-54, 2014. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p41-54>.
- SARNIGHAUSEN, V. C. R.; GOMES, F. G.; DAL PAI, A.; RODRIGUES, S. A. Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.28. p.766-787, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.71569>.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v.63, n.324, p.1379–1389, 1968.
- SHADMANI, M.; MAROFI, S.; ROKNIAN, M. Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests in Arid Regions of Iran. **Water Resources Managment**, v.26, p.211-224, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9913-z>.
- SHAN, N.; SHI, Z.; YANG, X.; ZHANG, X.; GUO, H.; ZHANG, B.; ZHANG, Z. Trends in potential evapotranspiration from 1960 to 2013 for a desertification-prone region of China. **International Journal of Climatology**, v.36, p.3434-3445, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4566>.
- SILVA, R. O.; SOUZA, E. B.; TAVARES, A. L.; MOTA, J. A.; FERREIRA, D.; SOUZA-FILHO, P. W.; ROCHA, E. J. D. Three decades of reference evapotranspiration estimates for a tropical watershed in the eastern Amazon. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v.89, n.3, p.1985-2002, 2017. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170147>.
- SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.1, n.1, p.34-43, 2013. <https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334>.
- SOUZA, A. P.; TANAKA, A. A.; SILVA, A. C.; ULIANA, E. M.; ALMEIDA, F. T.; GOMES, A. W. A.; KLAR, A. E. Reference evapotranspiration by Penman-Monteith FAO 56 with missing data of global radiation. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.10, n.2, p.217-233, 2016. <https://doi.org/10.18011/bioeng2016v10n2p217-233>.

- SUN, S.; CHEN, H. S.; WANG, G. J.; LI, J. J.; MU, M. Y.; YAN, G. X.; XU, B.; HUANG, J.; WANG, J.; ZHANG, F.M.; ZHU, S. G. Shift in potential evapotranspiration and its implications for dryness/wetness over Southwest China. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.121, p.9342-9355, 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JD025276>.
- TANAKA, A. A.; SOUZA, A. P.; KLAR, A. E.; SILVA, A. C.; GOMES, A. W. A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o Estado do Mato Grosso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, p.91-104, 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200001>.
- TAO, X.; CHEN, H.; XU, C.-Y.; HOU, Y. K.; JIE, M. Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China. **Water Science and Engineering**, v.8, p.273-281, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2015.11.002>.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.93, n.4, p.485-498, 2012. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
- TERINK, W.; IMMERZEEL, W. W.; DROOGERS, P. Climate change projections of precipitation and reference evapotranspiration for the Middle East and northern Africa until 2050. **International Journal of Climatology**, v.33, n.14, p.3055-3072, 2013. <https://doi.org/10.1002/joc.3650>.
- TREBICKI, P. Climate change and plant virus epidemiology. **Virus research**, v.286, p.198059, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>.
- WERTH, D.; AVISSAR, R. The regional evapotranspiration of the Amazon. **Journal of Hydrometeorology**, v.5, n.1, p.100-109, 2004. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0100:TREOTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0100:TREOTA>2.0.CO;2).
- XIANG, K.; LI, Y.; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration - a review. **Agricultural Water Management**, v.232, p.1-16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>.
- YESILIRMAK, E. Temporal changes of warm-season pan evaporation in a semi-arid basin in Western Turkey. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v.27, p.311-321, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0605-x>.

- ZHANG, K.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R.; RUNNING, S. W.; HONG, Y.; GOURLEY, J. J.; YU, Z. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration. **Scientific reports**, v.5, n.1, p.1-9, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep15956>.
- ZHANG, T.; CHEN, Y.; KYAW THA PAW, U. Quantifying the impact of climate variables on reference evapotranspiration in Pearl River Basin, China. **Hydrological Sciences Journal**, v.64, p.1944-1956, 2019. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1662021>.
- ZHANG, Y.; LIU, C.; TANG, Y.; YANG, Y. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan plateau. **Journal of Geophysical Research**, v.112, p.1-12, 2007. <https://doi.org/10.1029/2006JD008161>.
- ZHAO, J.; XIA, H.; YUE, Q.; WANG, Z. Spatiotemporal variation in reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in China under future scenarios. **International Journal of Climatology**, v.40, n.8, p.3813-3831, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.6429>.
- ZHAO, L.; XIA, J.; SOBKOWIAK, L.; LI, Z. Climatic Characteristics of Reference Evapotranspiration in the Hai River Basin and Their Attribution. **Water**, v.6, p.1482-1499, 2014. <https://doi.org/10.3390/w6061482>.

5.6 ANEXOS

Anexo 5-1: Tendência média da evapotranspiração de referência e suas variáveis meteorológicas observadas nas EMAs do estado de Mato Grosso, entre 2007 e 2020, e projetada pelo modelo HadGEM2-ES nos cenários RCPs 2.6, 4.5 e 8.5 a longo prazo (2007 e 2100).

	Radiação solar incidente (MJ m ⁻² d ⁻¹ dec ⁻¹)				Umidade relativa (% dec ⁻¹)				Temperatura máxima do ar (°C dec ⁻¹)				Temperatura mínima do ar (°C dec ⁻¹)				Velocidade do vento (m s ⁻¹ dec ⁻¹)				Evapotranspiração de referência (mm d ⁻¹ dec ⁻¹)			
	Obs	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Obs	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Obs	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Obs	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Obs	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	Obs	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
A-901	2,88	0,01	0,07*	0,09*	1,41	-0,05	-0,51*	-0,97*	0,25	0,08*	0,34*	0,76*	0,87*	0,03	0,36*	0,66*	-0,27*	0,01*	0,00	0,03*	0,51	0,01	0,06*	0,12*
A-902	1,21	0,01	0,09*	0,11*	0,92	-0,06	-0,54*	-0,97*	0,09	0,08*	0,36*	0,74*	-0,07	0,03	0,34*	0,65*	-0,21	0,01*	0,00	0,02*	0,13	0,01	0,06*	0,12*
A-903	0,09	0,01	0,05*	0,06*	-1,43	-0,01	-0,58*	-1,04*	0,52	0,07*	0,34*	0,76*	0,25	0,04*	0,38*	0,69*	0,08	0,01*	0,00	0,02*	0,19	0,01	0,05*	0,11*
A-904	-0,02	0,01	0,06*	0,06*	-0,86	-0,06	-0,56*	-1,20*	1,24*	0,08*	0,35*	0,79*	0,40	0,06*	0,37*	0,74*	-0,19	0,00*	0,00	0,02*	-0,17	0,01	0,06*	0,12*
A-905	-0,20	0,01	0,06*	0,08*	0,40	-0,11	-0,64*	-0,98*	0,79*	0,09*	0,36*	0,75*	-0,15	0,05*	0,39*	0,69*	-0,08	0,01*	0,00	0,02*	-0,05	0,01*	0,06*	0,12*
A-906	0,28	0,01	0,07*	0,07*	-1,93	-0,07	-0,72*	-1,73*	0,93*	0,08*	0,38*	0,88*	0,19	0,06*	0,38*	0,79*	0,17	0,00	0,00*	0,02*	0,07	0,01*	0,06*	0,13*
A-907	0,56	0,01	0,05*	0,06*	-3,26	-0,03	-0,52*	-0,92*	1,26*	0,09*	0,34*	0,75*	0,75*	0,06*	0,4*	0,68*	-0,07	0,01*	0,00	0,02*	0,15	0,01	0,05*	0,12*
A-908	0,64	0,00	0,03*	0,05*	-4,41	-0,12	-0,5*	-1,05*	1,22*	0,10*	0,31*	0,74*	0,30	0,10*	0,41*	0,70*	0,03	0,00	-0,01*	0,01*	0,42	0,01	0,04*	0,11*
A-910	0,95*	0,02	0,09*	0,12*	-5,31*	-0,10	-0,6*	-1,55*	0,47	0,08*	0,37*	0,88*	0,41	0,07*	0,37*	0,82*	0,08	0,00	0,00*	0,02*	0,24	0,01*	0,06*	0,14*
A-912	-0,61*	0,00	0,03	0,05*	-2,48	-0,06	-0,51*	-0,97*	0,68	0,08*	0,32*	0,76*	0,54*	0,06*	0,41*	0,68*	0,20	0,01*	0,00	0,03*	0,07	0,01	0,05*	0,12*
A-913	0,35	0,01	0,08*	0,08*	-3,47	-0,14	-0,54*	-0,98*	0,47	0,09*	0,35*	0,73*	1,03	0,04*	0,35*	0,68*	-0,26*	0,01*	0,00*	0,01*	0,18	0,02*	0,06*	0,11*
A-914	-0,01	0,02	0,08*	0,09*	-2,26	-0,09	-0,57*	-1,33*	0,75	0,08*	0,35*	0,82*	-0,04	0,07*	0,37*	0,79*	-0,05	0,00	0,00	0,01*	0,08	0,01*	0,06*	0,13*
A-915	-0,73	0,00	0,03	0,05*	-1,24	-0,06	-0,51*	-0,97*	0,99	0,08*	0,32*	0,76*	0,68	0,06*	0,41*	0,68*	-0,02	0,00	-0,01*	0,02*	-0,08	0,01	0,04*	0,11*
A-916	0,57	0,00	0,05*	0,06*	-0,20	-0,14	-0,54*	-1,29*	1,52	0,09*	0,33*	0,77*	-0,02	0,12*	0,37*	0,72*	-0,16	0,00	-0,01*	0,02*	0,14	0,01	0,05*	0,12*
A-917	-0,66	0,01	0,06*	0,06*	-3,96*	-0,06	-0,56*	-1,20*	1,27*	0,08*	0,35*	0,79*	0,37	0,06*	0,37*	0,74*	-0,01	0,00	0,00	0,02*	0,00	0,01	0,05*	0,12*
A-918	1,91*	0,01	0,06*	0,06*	-4,05	-0,07	-0,61*	-1,48*	2,13*	0,08*	0,35*	0,81*	-1,52	0,09*	0,37*	0,75*	0,13	0,00	0,00	0,02*	0,51*	0,01	0,06*	0,13*
A-919	0,03	0,02	0,09*	0,12*	-1,12	-0,10	-0,6*	-1,55*	0,24	0,08*	0,37*	0,88*	0,39	0,07*	0,37*	0,82*	-0,01	0,00	0,00*	0,02*	0,05	0,01*	0,06*	0,13*
A-920	0,62*	0,02	0,08*	0,09*	-0,58	-0,09	-0,57*	-1,33*	-0,10	0,08*	0,35*	0,82*	0,30	0,07*	0,37*	0,79*	-0,15*	0,00	0,00	0,01*	0,06	0,01*	0,06*	0,13*
A-921	0,89	-0,01	0,06*	0,06*	-3,05	-0,17	-0,6*	-1,36*	1,11*	0,10*	0,34*	0,78*	0,31	0,10*	0,37*	0,72*	-0,05	0,00	0,00	0,02*	0,29	0,01	0,05*	0,12*
A-922	-2,73*	0,02	0,07*	0,09*	-1,74	-0,05	-0,45*	-0,88*	1,13*	0,09*	0,34*	0,71*	0,56	0,02	0,31*	0,64*	0,04	0,01*	0,01*	0,03*	-0,36*	0,02	0,06*	0,12*
A-924	0,59	0,02	0,08*	0,09*	-1,12	-0,10	-0,69*	-1,66*	1,39*	0,09*	0,38*	0,89*	0,49*	0,07*	0,38*	0,81*	-0,09	0,00	0,00	0,02*	0,14	0,01*	0,06*	0,14*
A-926	0,37	0,02	0,08*	0,09*	-3,56	-0,10	-0,69*	-1,66*	-0,23	0,09*	0,38*	0,89*	0,08	0,07*	0,38*	0,81*	0,05	0,00	0,00*	0,02*	0,07	0,01*	0,06*	0,14*
A-927	2,00*	0,01	0,06*	0,07*	-1,00	-0,09	-0,59*	-1,16*	0,51	0,08*	0,36*	0,77*	0,18	0,06*	0,36*	0,74*	-0,31*	0,01*	0,00*	0,01*	0,27*	0,01*	0,06*	0,12*
A-928	-0,21	0,01	0,06*	0,06*	0,06	-0,06	-0,56*	-1,20*	-0,05	0,08*	0,35*	0,79*	-0,05	0,06*	0,37*	0,74*	-0,34*	0,01*	0,00	0,02*	-0,10	0,01	0,06*	0,12*
A-929	0,81	0,01	0,04*	0,06*	-1,45	-0,10	-0,48*	-1,09*	1,12*	0,09*	0,32*	0,76*	0,35	0,08*	0,39*	0,70*	-0,10	0,00	0,00	0,02*	0,25	0,01	0,05*	0,12*
A-930	1,07	0,00	0,03*	0,05*	-7,38*	-0,12	-0,5*	-1,05*	1,49*	0,10*	0,31*	0,74*	0,03	0,10*	0,41*	0,70*	-0,15	0,00	0,00*	0,02*	0,24*	0,01	0,05*	0,11*
A-931	0,27	0,00	0,03	0,05*	-2,65	-0,06	-0,51*	-0,97*	0,79*	0,08*	0,32*	0,76*	0,83	0,06*	0,41*	0,68*	-0,09	0,00	-0,01*	0,02*	0,18	0,01	0,04*	0,11*
A-932	1,92	0,01	0,05*	0,06*	-2,84	-0,03	-0,52*	-0,92*	1,29*	0,09*	0,34*	0,75*	0,30	0,06*	0,4*	0,68*	-0,23	0,00	-0,01*	0,02*	0,37	0,01	0,05*	0,11*
A-933	0,00	0,01	0,07*	0,07*	-0,44	-0,05	-0,52*	-0,85*	0,64	0,09*	0,34*	0,73*	0,29	0,07*	0,4*	0,70*	-0,34	0,01*	0,00	0,02*	-0,34	0,01	0,06*	0,11*
A-934	0,54	0,00	0,03*	0,02	-1,71	-0,05	-0,5*	-0,74*	0,78	0,08*	0,32*	0,70*	-0,05	0,10*	0,43*	0,71*	-0,25*	0,01*	-0,01*	0,01*	0,09	0,01	0,05*	0,10*
A-935	-0,45	0,01	0,09*	0,11*	1,58	-0,06	-0,54*	-0,97*	0,00	0,08*	0,36*	0,74*	0,22	0,03	0,34*	0,65*	-0,08	0,01*	0,01*	0,03*	-0,07	0,01	0,06*	0,12*
A-936	-0,20	0,01	0,09*	0,11*	0,58	-0,06	-0,54*	-0,97*	0,58	0,08*	0,36*	0,74*	0,85*	0,03	0,34*	0,65*	-0,18*	0,01*	0,01*	0,03*	-0,01	0,02	0,06*	0,13*
A-937	-1,10	0,02	0,07*	0,09*	-3,46	-0,05	-0,45*	-0,88*	0,12	0,09*	0,34*	0,71*	0,27	0,02	0,31*	0,64*	-0,09	0,01*	0,01*	0,03*	-0,16	0,02	0,06*	0,12*

Resultados seguidos por * apresentam tendências significativas pelo teste de Mann Kendall a $\alpha=0,10$.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo abordou a evapotranspiração (ET), um componente crucial do ciclo da água, sujeito a diversos fatores meteorológicos e biofísicos, assim como vulnerável às mudanças climáticas. Através da análise dos diferentes cenários das Rotas Representativas de Concentração (RCPs) e utilizando o método de Penman-Monteith, o estudo contribui para a compreensão das alterações, tendências e distribuição espaço-temporal da evapotranspiração de referência (ET_0) e suas variáveis meteorológicas no estado de Mato Grosso, Brasil.

Uma das principais contribuições do estudo foi o desenvolvimento e aplicação do programa GapMET, que demonstrou ser uma ferramenta eficaz para preencher falhas em séries de dados meteorológicos e obter séries completas de evapotranspiração e suas variáveis. Isso é especialmente relevante em regiões com uma densidade limitada de estações meteorológicas, como é o caso de Mato Grosso.

Ao analisar a sensibilidade da ET_0 às variáveis meteorológicas do método Penman-Monteith, verificou-se que a radiação solar incidente (R_s) é o fator dominante em todas as regiões do estado, seguido pela velocidade do vento (VV), umidade relativa do ar (UR), temperatura máxima (T_{max}) e temperatura mínima (T_{min}). Essas informações são valiosas para compreender os mecanismos que governam a evapotranspiração e auxiliar na interpretação de resultados obtidos pelo método de Penman-Monteith.

A avaliação do desempenho de diferentes modelos climáticos globais na estimativa da evapotranspiração e suas variáveis, identificou-se o modelo HadGEM2-ES como o mais preciso, especialmente, pela menor dispersão dos erros e precisão das estimativas das variáveis radiação solar incidente, umidade relativa e velocidade do vento.

As projeções futuras e análises de tendências do modelo HadGEM2-ES indicam, até o fim do século, um aumento contínuo da ET_0 no estado de Mato Grosso, nos cenários mais pessimistas (RCP 4.5 e 8.5). Por outro lado, no cenário otimista (RCP 2.6), alterações na ET_0 são observadas apenas a região amazônica do estado. A análise de tendência dos dados observados, apesar de apresentar tendências significativas em apenas XX EMAs, demonstram que a intensidade das alterações são

mais semelhantes às esperadas nos cenários médio e pessimista do que no cenário otimista, além de indicar tendências de redução da ET_0 nas áreas próximas ao Pantanal.

Visto que essas mudanças na evapotranspiração podem ter impactos significativos nos recursos hídricos, na agricultura, nos ecossistemas e em outras atividades dependentes da água é fundamental considerar essas projeções ao planejar estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

Por fim, é importante ressaltar que o estudo identificou desafios e limitações na estimativa da evapotranspiração, como a falta de dados precisos de radiação solar incidente e as diferenças nas tendências encontradas entre os resultados obtidos com dados observados e os modelos climáticos. Essas considerações destacam a necessidade contínua de aprimorar as técnicas de medição e modelagem da evapotranspiração para fornecer estimativas mais confiáveis e robustas. Além disso, visto que a base de dados observados nas EMAs do estado possui cerca de 12 anos sugere-se outros estudos que busquem avaliar as tendências da ET_0 com bases de dados observados com maior extensão temporal de maneira a indicar de maneira mais segura a existência de tendências na evapotranspiração no estado de Mato Grosso.

Em suma, o trabalho contribui para o avanço do conhecimento científico sobre a evapotranspiração no estado de Mato Grosso, oferecendo informações valiosas para a gestão dos recursos hídricos e o desenvolvimento de estratégias de adaptação às mudanças climáticas. As conclusões e resultados apresentados podem servir como base para futuras pesquisas e tomadas de decisão no contexto da segurança hídrica e sustentabilidade ambiental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAL

- AB'SABER, A. N. Bases para o estudo dos ecossistemas da Amazônia brasileira. **Estudos avançados**, v.16, p.7-30, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142002000200002>.
- ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modelling for three wetland systems in South Florida. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v.32, n.3, p. 465-473, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x>.

- ABTEW, W.; MELESSE, A. Climate Change and Evapotranspiration. In ABTEW, W.; MELESSE, A. **Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations**. Netherlands: Springer Dordrecht, Cap. 13, 2013. 224 p. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4737-1_13
- ADÁMOLI, J. O. **Diagnóstico do Pantanal**: características ecológicas e problemas ambientais. Brasília: Programa Nacional do Meio Ambiente, 1995. 50p.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO – Irrigation and Drainage Paper**, v.56, 300 p., 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVES, L. M. Clima da região centro-oeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA N.J.; SILVA M.G.A.J.; DIAS M.A.F.S. **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, Cap. 15, 2009. 463 p.
- ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v.41, n.251, p.237-276, 1896.
- BARROS, V. R.; DE SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p. 198-203, 2009. <https://doi.org/10.5039/agraria.v4i2a13>.
- BERTI, A.; TARDIVO, G.; CHIAUDANI, A.; RECH, F.; BORIN, M. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. **Agricultural Water Management**, v.140, p. 20-25, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.015>.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. Determining water requirements in irrigated areas from climatological irrigation data, **Tech. Pap.** 96, 48 p., 1950.
- DE LA CASA, A.C.; OVANDO, G.G. Variation of reference evapotranspiration in the central region of Argentina between 1941 and 2010. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.5, p. 66-79, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.009>.

- DIAS, L.C.P.; MACEDO, M.N.; COSTA, M.H.; COE, M.T.; NEILL, C. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 108–122, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.010>.
- EDWARDS, P. N. History of climate modeling. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v.2, n.1, p.128-139, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.95>.
- FELFILI, J. M. Padrões de Diversidade do Cerrado do Centro-Oeste Brasileiro. In: ARAÚJO, E. L., MOURA, A. N., SAMPAIO, E. V. S. B., GESTINARI, L. M. S. & CARNEIRO, J. M. T. **Biodiversidade, Conservação e Uso Sustentável da Flora do Brasil**. Recife: UFP/SBB, 2002. 262 p.
- FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em UberabaMG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.3, p. 270-276, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300008>.
- GRIGGS, D. J.; NOGUER, M. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. **Weather**, v.57, n.8, p.267-269, 2002.
- GUITJENS, J. C. Models of Alfalfa Yield and Evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.108, n.3, p. 212-222, 1982. <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001389>.
- HARBECK, JR. G. E. **A Practical Field Technique for Measuring Reservoir Evaporation Utilizing Mass-transfer Theory**, US Geological Survey, Paper 272-E, 101-105, 1962. <https://doi.org/10.3133/pp272E>.
- HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J.; EPHRAUMS, J.J. Climate change: the IPCC scientific assessment. **American Scientist**, v.80, p.6, 1990.
- HUNTINGTON, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. **Journal of Hydrology**, v.319, p.83-95, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.003>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **IPCC second assessment**. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, WMO-UNEP, 1995, 63 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2001: **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. IPCC, Cambridge University Press, 2007, 996 p.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. . Geneva : IPCC, 2014, 151 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- JERSZURKI, D.; DE SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. D. C. R. Sensitivity of ASCE-Penman–Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1, p. 943-956, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04619-1>.
- KEELING, C. D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere. **Tellus**, v.12, n.2, p.200-203, 1960.
- LACERDA, Z. C.; TURCO, J. E. P. Estimation methods of reference evapotranspiration (ET₀) for Uberlândia-MG. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p. 27-38, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p27-38/2015>.
- LI, Y., YAO, N., CHAU, H.W. Influences of removing linear and nonlinear trends from climatic variables on temporal variations of annual reference crop evapotranspiration in Xinjiang, China. **Science of the Total Environment**, v.592, p. 680-692, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.196>.
- LIMA JUNIOR, J. C. DE; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B. DE; NASCIMENTO, F. A. L. DO; MACÊDO, K. G. DE. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, v.47, n.3, p. 447-454, 2016. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160054>..

- LIANG, L.; LIJUAN, L.; ZHANG, L.; LI, J. Sensitivity of Penman Monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River Basin of northeastern China. **Chinese Geographical Science**, v.18, n.4, p. 340-347, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11769-008-0340-x>.
- MAKLER-PICK, V.; GAL, G.; GORFINE, M.; HIPSEY, M. R.; CARMEL, Y. Sensitivity analysis for complex ecological models – A new approach. **Environmental Modelling & Software**, v.26, n.1, p. 124-134, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.010>.
- MAROUELLI, W.A.; OLIVEIRA, A.S.; COELHO, E.F.; NOGUEIRA, L.C.; SOUSA, V.F. 2011. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA VF; MAROUELLI WA; COELHO EF; PINTO JM; COELHO FILHO MA. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças Brasília**: Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, Cap 10, 2011, 769 p.
- MARANHOLI, H. N. G. **Influência da ilha de calor na fenologia de espécies arbóreas em Cuiabá-MT, Brasil**. 104f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade do Estado de Mato Grosso (UFMT), Cuiabá, 2017.
- MASUI, T.; MATSUMOTO, K.; HIJIOKA, Y.; KINOSHITA, T.; NOZAWA, T.; ISHIWATARI, S.; KAINUMA, M. An emission pathway for stabilization at 6 Wm⁻² radiative forcing. **Climatic Change**, v.109, n.1, p.59-76, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0150-5>.
- MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE**. 103 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), Piracicaba, 2002.
- MONTEIRO, C. A de F. Notas para o Estudo do Clima do Centro-Oeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v.13, n.1, p. 3-46, 1951.
- MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VUUREN, D. P.; VAN WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v.463, n.7282, p.747-756, 2010. <https://doi.org/10.1038/nature08823>.

- NAM, W., HONG, E., CHOI, J. Has climate change already affected the spatial distribution and temporal trends of reference evapotranspiration in South Korea? **Agricultural and Water Management**, v.150, p. 129-138, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.019>.
- NASCIMENTO, D.T.F. AND NOVAIS, G.T., Clima do Cerrado: dinâmica atmosférica e características, variabilidades e tipologias climáticas. **Eliséé**, v.9, n.2, p.e922021. 2020.
- NIMER, E. Climatologia do brasil: Introdução à Climatologia Dinâmica. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 34, n. 4; p. 3-30, 1972
- OKE, T. R. **Boundary Layers Climates**. 2 ed. London: Routledge, 1978, 435 p.
- OKI, T. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Science*, v.313, n.5790, p.1068-1072, 2006. <https://doi.org/10.1126/science.1128845>
- ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENCA, R. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, v.28, n.1, p. 1–3, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0184-x>.
- PATEL, J.; PATEL, H.; BHATT, C. Modified Hargreaves equation for accurate estimation of evapotranspiration of diverse climate locations in India. **Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B - Biological Sciences**, v.85, n.1, p. 161-166, 2015. <https://doi.org/10.1007/s40011-014-0314-y>.
- PECHLIVANIDIS, I. G.; JACKSON, B. M.; MCINTYRE, N. R.; WHEATER, H. S. Catchment scale hydrological modelling: a review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **Global NEST Journal**, v.13, n.3, p. 193-214, 2011.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v.193, p. 120-145, 1948. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v.100, p. 81-92, 1972. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2).

- RENIU, M.G. **Evapotranspiration projections in Austria under different climate change scenarios**. 66 f. Dissertação (Mestrado Ciencias Ambientais) - Universität für Bodenkultur Wien, Viena, Áustria, 2017.
- RIAH, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v.109, n.1, p.33-57, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
- RIND, D.; GOLDBERG, R.; HANSEN, J.; ROSENZWEIG, C.; RUEDY, R. Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought. *Journal of Geophysical Research*, v.95(D7), p.9983-10004, 1990. <https://doi.org/10.1029/JD095iD07p09983>
- SALTELLI, A.; ANNONI, P. How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. **Environmental Modelling & Software**, v.25, n.12, p. 1508-1517, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.012>.
- SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, E. M. **Sensitivity Analysis**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2000. 475 p.
- SALTELLI, A.; RATTI, M.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis: the Primer**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2008. 292 p.
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTI, M. **Sensitivity Analysis in Practice: a guide to assessing scientific models**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2004. 219 p.
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CHAN, K. P.-S. Quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. **Technometrics**, v.41, n.1, p. 39–56, 1999. DOI: 10.1080/00401706.1999.10485594.
- SANTOS, M.V. **Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico: diagnóstico sócio-econômico-ecológico do Estado de Mato Grosso e assistência técnica na formulação da 2ª aproximação**. Cuiabá: SEPLAN-MT, 2000. 68 p.
- SCARIOT, A.; SOUSA-SILVA, J. C.; FELFILI, J. M. **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 439 p.
- SERRA, A.; RATESBONNA, L. **As massas de ar na América do Sul**. Rio de Janeiro: Serviço de Meteorologia do Ministério da Agricultura, 1942. 63p.

- SERRAT-CAPDEVILA, A.; SCOTT, R. L.; SHUTTLEWORTH, W. J.; VALDÉS, J. B. Estimating evapotranspiration under warmer climates : Insights from a semi-arid riparian system. *Journal of Hydrology*, v.399, p.1-11, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.021>
- SILVA, F. A. M. da; ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A. Caracterização climática do bioma cerrado. IN: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de; RIBEIRO, J. F. (Orgs.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa, 2008. 1279 p.
- SOBOL, I. M. Sensitivity analysis for non-linear mathematical models. **Mathematical Modeling and Computational Experiment**, New York, v. 1, p. 407-414, 1993.
- SOBOL, I. M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their monte carlo estimates. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 55, p. 271–280, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- SONG, F.; GLENNY, A.; ALTMAN, D. Indirect comparison in evaluating relative efficacy illustrated by antimicrobial prophylaxis in colorectal surgery. *Clinical Trials*, v.21, n.5, p. 488–497, 2000. DOI: 10.1016/s0197-2456(00)00055-6.
- SONG, X.; ZHANG, J.; ZHAN, C.; XUAN, Y.; YE, M.; XU, C. Global sensitivity analysis in hydrological modeling: review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. **Journal of Hydrology**, v.523, n.1, p. 739-757, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>.
- SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.1, n.1, p.34-43, 2013. DOI: 10.31413/nativa.v1i1.1334.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E., MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 888 p, 2017.
- THOMSON, A. M., CALVIN, K. V., SMITH, S. J., KYLE, G. P., VOLKE, A., PATEL, P., EDMONDS, J. A. (2011). RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v.109, n.1, p.77-94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p. 55-94, 1948. <https://doi.org/10.2307/210739>.

- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The role of evapotranspiration in climate. **Archiv Für Meteorologie, Geophysik Und Bioklimatologie**. Serie B, v.3, n.1, p. 16–39, 1951. <https://doi.org/10.1007/BF0224258>.
- TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.20, n.1, p. 411-419, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.014>.
- VAN VUUREN, D. P.; STEHFEST, E.; DEN ELZEN, M. G. J.; KRAM, T.; VAN VLIET, J.; DEETMAN, S.; VAN RUIJVEN, B. RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. **Climatic Change**, v.109, n.1, p.95-116, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0152-3>.