



MARCUS ANDRÉ BRAIDO PINHEIRO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM REQUERIMENTO
MÍNIMO DE DADOS PARA ESTAÇÕES DE MINAS GERAIS E
ADJACÊNCIAS**

**SETE LAGOAS
2017**

MARCUS ANDRÉ BRAIDO PINHEIRO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM REQUERIMENTO
MÍNIMO DE DADOS PARA ESTAÇÕES DE MINAS GERAIS E
ADJACÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Sete Lagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior

**SETE LAGOAS
2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P654e Pinheiro, Marcus André Braidó.
Evapotranspiração de referência com requerimento
mínimo de dados para estações de Minas Gerais e
adjacências / Marcus André Braidó Pinheiro ;
orientador João Carlos Ferreira Borges Júnior. --
Sete Lagoas, 2017.
109 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Ciências Agrárias) -- Universidade Federal de São
João del-Rei, 2017.

1. FAO Penman-Monteith. 2. Manejo dos recursos
hídricos. 3. Hargreaves-Samani. 4. Erro Absoluto
Medio. I. Borges Júnior, João Carlos Ferreira,
orient. II. Título.

MARCUS ANDRÉ BRAIDO PINHEIRO

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM REQUERIMENTO
MÍNIMO DE DADOS PARA ESTAÇÕES DE MINAS GERAIS E
ADJACÊNCIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias da Universidade Federal de São João Del Rei, Campus Sete Lagoas, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias, na área de concentração em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior

Sete Lagoas, 21 de Julho de 2017

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Evandro Chaves de Oliveira – IFES Campus Itapina

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho – UFLA

Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior - UFSJ
Orientador

DEDICO aos meus pais Maria Geralda Braido Pinheiro e
Nivaldo Pinheiro de Faria, pois sem eles, seria
impossível a caminhada até aqui.

AGRADECIMENTOS

À Deus, o criador de todas as coisas. Pelo dom da vida e pelas realizações durante minha vida.

À minha família que mesmo distante me incentivou e apoiou em todos os momentos.

Principalmente aos meus pais Maria Geralda e Nivaldo e minha irmã Ana Paula que estavam todos os dias desse processo ao meu lado.

À minha namorada, Jéssica Ramos, obrigado pelo carinho, companheirismo, paciência, apoio e compreensão em momentos bons e ruins, sempre me dando força para seguir em frente.

Aos amigos, que mesmo distante contribuíram de alguma forma para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado Eduardo, Carlos Eduardo, Matheus, Wellerson, Lucas.

Aos amigos de república Jéssica Mayara e Mayara que conviveram comigo durante este período.

Aos amigos do mestrado pela amizade e descontração.

Ao Prof. Dr. João Carlos Ferreira Borges Júnior pela orientação, amizade, ensinamentos, paciência, dedicação, sabedoria e confiança para execução deste trabalho.

À Universidade Federal de São João Del-Rei, pela oportunidade e financiamento para cursar o mestrado.

À banca examinadora, pela disponibilidade, conselhos e contribuições a este trabalho.

*“Por isso não tema, pois estou com você;
não tenha medo, pois sou o seu Deus.
Eu o fortalecerei e o ajudarei;
eu o segurarei
com a minha mão direita vitoriosa.”*

Isaías 41:10

LISTA DE SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

- a_r - Coeficiente angular da reta de regressão.
- b_r - Coeficiente linear da reta de regressão.
- Δ - Declividade da curva de pressão de saturação de vapor de água.
- A - Amplitude térmica média diária.
- A_{HS} - Coeficiente da equação de Hargreaves-Samani.
- A_{MP} - Coeficiente do Método Proposto.
- ANA - Agência Nacional de Águas.
- a_s - Coeficiente de Angstrom.
- BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa.
- B_{HS} - Coeficiente da equação de Hargreaves-Samani.
- B_{MP} - Coeficiente do Método Proposto.
- b_s - Coeficiente de Angstrom.
- c - Coeficiente regional de ajuste da equação de Blaney-Criddle.
- C - Índice de confiança de Camargo e Sentelhas.
- C_{HS} - Expoente da equação de Hargreaves-Samani.
- C_{MP} - Coeficiente do Método Proposto.
- cv - Coeficiente de variação.
- d - Índice de concordância de Willmott.
- DF - Quantidade de dados após análises de inconsistência.
- DI - Quantidade de dados coleta inicial.
- D_{MP} - Coeficiente do Método Proposto.
- d_r - Distância relativa entre a Terra e o Sol.
- e_a - Pressão atual de vapor de água.
- EAM - Erro absoluto médio.
- EF - Eficiência do método.
- E_{MP} - Coeficiente do Método Proposto.
- EQM - Erro quadrático médio.
- EQMns - Erro quadrático médio não sistemático.
- EQMs - Erro quadrático médio sistemático.
- e_s - Pressão de saturação de vapor de água.
- ETc - Evapotranspiração da cultura.
- ET_0 - Evapotranspiração de referência.

ET_{0m} - Evapotranspiração de referência média mensal.

ET_{0HS} - Evapotranspiração de referência calculada pelo método Hargreaves-Samani.

ET_{0MP} - Evapotranspiração de referência calculada pelo Método Proposto.

ET_{0PM} - Evapotranspiração de referência calculada pelo método FAO Penman-Monteith.

ETP - Evapotranspiração potencial.

FAO - Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.

FAO-PM - Método padrão FAO Penman-Monteith.

G - Densidade do fluxo de calor no solo.

G_{sc} - Constante solar.

HS - Hargreaves-Samani.

HSc - Hargreaves-Samani calibrado.

I - Índice de calor anual da região.

i - Mês do ano.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

J - Dia juliano.

k - Constante da equação de Thornthwaite-Camargo.

K_f - Fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do local.

MP - Método Proposto.

N - Duração astronômica do dia.

ND - Número de dias no mês.

No - Número de observações.

O_i - Valores de ET₀ calculados pelo método FAO Penman-Monteith.

O - Média dos valores O_i.

OMM - Organização Meteorológica Mundial.

p - Fator que representa a percentagem média diária de horas de brilho solar.

P - Pressão atmosférica.

P_i - Valores estimados de ET₀.

\hat{P}_i - Estimador de P_i com base no modelo de regressão linear.

r - Coeficiente de correlação.

R² - Coeficiente de determinação.

Ra - Radiação solar no topo da atmosfera.

REQM - Raiz quadrada do erro quadrático médio.

REQMns - Raiz quadrada do erro quadrático médio não sistemático.

REQMs - Raiz quadrada do erro quadrático médio sistemático.

R_G - Radiação solar incidente à superfície.

R_n - Saldo de radiação à superfície.

R_{nl} - Saldo de radiação de ondas longas.

R_{ns} - Saldo de radiação de ondas curtas.

R_s - Radiação solar.

R_{so} - Radiação solar a céu claro.

sd - Desvio padrão.

T_{ef} - Temperatura efetiva.

T_i - Temperatura média mensal do ar.

T_{max} - Temperatura máxima do ar.

T_{med} - Temperatura média do ar.

T_{min} - Temperatura mínima do ar.

T_{per} - Temperatura média do ar no período estudado.

u_2 - Velocidade do vento a 2 metros da superfície.

UR - Umidade relativa do ar.

u_z - Velocidade do vento medida acima da superfície do solo.

VV - Velocidade do vento.

z - Altitude da estação.

Z_p - Altitude.

α - Albedo da cultura de referência.

γ - Coeficiente psicrométrico.

δ - Declinação solar.

σ - Constante de Stefan-Boltzmann.

ϕ - Latitude.

ω_s - Ângulo horário de nascer ao pôr do sol.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Localização das estações meteorológicas convencionais utilizadas. | 20 |
| Tabela 2 - Resumo da eliminação de dados inconsistentes nas estações meteorológicas. | 22 |
| Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da ET_0 pelo índice “C” proposto por Camargo e Sentelhas (1997). | 27 |
| Tabela 4 - Coeficientes A_{HS} , B_{HS} e expoente C_{HS} , da equação de Hargreaves Samani calibrado localmente para cada estação convencional. | 30 |
| Tabela 5 - Coeficientes A_{MP} , B_{MP} , C_{MP} , D_{MP} e E_{MP} do Método Proposto calibrado localmente para cada estação convencional | 31 |
| Tabela 6 - Estatística descritiva com valores máximo (Máx) e mínimo (Min), média (Méd), desvio padrão (sd), em $mm\ d^{-1}$, e coeficientes de variação (cv) em %, dos métodos FAO Penman-Monteith (FAO-PM) e Hargreaves-Samani original (HS). | 33 |
| Tabela 7 - Estatística descritiva com valores máximo (Máx) e mínimo (Min), média (Méd), desvio padrão (sd), em $mm\ d^{-1}$, e coeficientes de variação (cv) em %, dos métodos Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e Método Proposto (MP). | 35 |
| Tabela 8 - Erro absoluto médio (EAM, $mm\ d^{-1}$), raiz do erro quadrático médio (REQM, $mm\ d^{-1}$), raiz do erro quadrático médio sistemático (REQMs, $mm\ d^{-1}$) e não-sistemático (REQMns, $mm\ d^{-1}$) para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP). | 36 |
| Tabela 9 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), Eficiência do método (EF) e índice de confiança (C) para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP). | 39 |
| Tabela 10 - Classificação segundo índice C para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP). | 41 |
| Tabela 11 - Erro quadrático médio (EQM, $mm^2\ d^{-2}$), Erro quadrático médio sistemático (EQMs, $mm^2\ d^{-2}$) e não-sistemático (EQMns, $mm^2\ d^{-2}$) para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP). | 42 |
| Tabela 12 - Proporção sistemática (EQMs/EQM, %) e não sistemática (EQMns/EQM, %) do erro quadrático médio para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e do Método Proposto (MP). | 43 |
| Tabela 13 - Coeficientes angular a_r , linear b_r e de determinação R^2 das análises de regressão linear dos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e do Método Proposto (MP) relacionados com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM). | 45 |

| | |
|--|----|
| Tabela 14 - Valor de p do teste de Mann-Whitney referente à comparação do método FAO Penman-Monteith com os métodos Hargreaves-Samani original (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e Método Proposto (MP). | 73 |
| Tabela 15 - Desvios entre -1 mm e 1 mm dos métodos Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Propostos (MP) relacionados com o método FAO Penman-Monteith. | 74 |
| Tabela 16 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Araçuaí. | 76 |
| Tabela 17 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Caratinga. | 76 |
| Tabela 18 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Patos de Minas. | 76 |
| Tabela 19 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de São Lourenço. | 77 |
| Tabela 20 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Vitória - ES. | 77 |

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Caracterização da região de estudo. 19
- Figura 2 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Aimorés. 45
- Figura 3 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Araçuaí. 46
- Figura 4 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Araxá. 46
- Figura 5 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Barbacena. 46
- Figura 6 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Conceição do Mato Dentro. 47
- Figura 7 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Poços de Caldas. 47
- Figura 8 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Caparaó. 47
- Figura 9 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Capinópolis. 48
- Figura 10 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Caratinga. 48
- Figura 11 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Coronel Pacheco. 48
- Figura 12 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Diamantina. 49

Figura 13 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Formosa-GO. 49

Figura 14 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Frutal. 49

Figura 15 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Guaratinga-BA. 50

Figura 16 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Itamarandiba. 50

Figura 17 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Ituiutaba. 50

Figura 18 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Juiz de Fora. 51

Figura 19 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Lambari. 51

Figura 20 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Lavras. 51

Figura 21 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Machado. 52

Figura 22 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Paranaíba-MS. 52

Figura 23 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Patos de Minas. 52

Figura 24 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Pedra Azul. 53

Figura 25 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Salinas. 53

Figura 26 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de São Lourenço. 53

Figura 27 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de São Mateus-ES. 54

Figura 28 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de São Sebastião do Paraíso. 54

Figura 29 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Uberaba. 54

Figura 30 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Viçosa. 55

Figura 31 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Vitória-ES. 55

Figura 32 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Aimorés. 57

Figura 33 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Araçuai. 57

Figura 34 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Araxá. 58

Figura 35 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Barbacena. 58

Figura 36 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Poços de Caldas. 59

Figura 37 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Caparaó. 59

Figura 38 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Capinópolis. 60

Figura 39 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Caratinga. 60

Figura 40- Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Conceição do Mato Dentro. 61

Figura 41 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Coronel Pacheco. 61

Figura 42 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Diamantina. 62

Figura 43 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Formosa-GO. 62

Figura 44 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Frutal. 63

Figura 45 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Guaratinga-BA. 63

Figura 46 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Itamarandiba. 64

Figura 47 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Ituiutaba. 64

Figura 48 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Juiz de Fora. 65

Figura 49 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Lambari. 65

Figura 50 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Lavras. 66

Figura 51 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Machado. 66

Figura 52 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Paranaíba-MS. 67

Figura 53 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Patos de Minas. 67

Figura 54 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Pedra Azul. 68

Figura 55 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Salinas. 68

Figura 56 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de São Lourenço. 69

Figura 57 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de São Mateus-ES. 69

Figura 58 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de São Sebastião do Paraíso. 70

Figura 59 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Uberaba. 70

Figura 60 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Viçosa. 71

Figura 61 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Vitória-ES. 71

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| RESUMO | I |
| ABSTRACT | III |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1 Evapotranspiração de referência | 4 |
| 2.2 Elementos meteorológicos que afetam a evapotranspiração de referência | 5 |
| 2.2.1 Radiação solar | 5 |
| 2.2.2 Temperatura do ar | 6 |
| 2.2.3 Umidade do ar | 6 |
| 2.2.4 Velocidade do vento..... | 7 |
| 2.3 Método padrão FAO Penman-Monteith..... | 8 |
| 2.4 Estimativa de ET_0 utilizando apenas a temperatura do ar | 9 |
| 2.4.1 Hargreaves-Samani | 9 |
| 2.4.2 Método Proposto | 10 |
| 2.5 Outros métodos..... | 11 |
| 2.5.1 Hamon | 11 |
| 2.5.2 Kharrufa..... | 12 |
| 2.5.3 Thornthwaite | 12 |
| 2.5.4 Camargo | 13 |
| 2.5.5 Thornthwaite-Camargo | 13 |
| 2.5.6 Blaney-Criddle | 14 |
| 2.6 Análise de tendências | 15 |
| 2.6.1 Teste de Mann-Kendall | 16 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS | 19 |
| 3.1 Caracterização da região de estudo | 19 |
| 3.2 Tratamento dos dados..... | 21 |
| 3.3 Estimativa de evapotranspiração de referência (ET_0) | 23 |
| 3.3.1 Método padrão FAO Penman-Monteith (FAO-PM)..... | 23 |
| 3.3.2 Método Hargreaves-Samani (HS) | 25 |
| 3.3.3 Método Proposto (MP)..... | 25 |
| 3.4 Calibração do método Hargreaves-Samani e Método Proposto..... | 25 |

| | |
|---|----|
| 3.5 Estatísticas descritivas de testes dos modelos | 25 |
| 3.6 Regressão linear | 27 |
| 3.7 Análise de distribuição de probabilidade | 27 |
| 3.8 Análise de tendência de ET_0 | 28 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 29 |
| 4.1 Calibração do método Hargreaves-Samani e Método Proposto..... | 29 |
| 4.2 Análise da estatística descritiva..... | 32 |
| 4.3 Análise de regressão | 44 |
| 4.4 Análise de distribuição de probabilidade | 56 |
| 4.5 Análise de distribuição dos desvios..... | 74 |
| 4.6 Análises de tendência de ET_0 | 75 |
| 5 CONCLUSÃO | 79 |
| 6 REFERÊNCIAS..... | 80 |

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COM REQUERIMENTO MÍNIMO DE DADOS PARA ESTAÇÕES DE MINAS GERAIS E ADJACÊNCIAS

RESUMO - Nas últimas décadas, houve considerável incremento na demanda hídrica no Brasil. A irrigação possui alta contribuição nesse avanço. O estado de Minas Gerais demonstrou forte aumento na irrigação por pivôs centrais, promovendo o aumento da área irrigada no estado. Para melhor manejo dos recursos hídricos, é necessária a utilização da evapotranspiração de referência (ET_0), sendo um dos parâmetros cruciais para desenvolvimento de projetos de irrigação. Utiliza-se o método padrão FAO Penman-Monteith para obtenção da ET_0 . No entanto, existem equações simplificadas que são utilizadas para estimar a ET_0 utilizando apenas dados de temperatura do ar. Objetivou-se com este trabalho, avaliar e calibrar o método Hargreaves-Samani e um Método Proposto (MP) frente ao método padrão e realizar a análise de tendências da ET_0 . Para isso, foram utilizados dados de estações meteorológicas convencionais do INMET, disponibilizados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), de 30 estações localizadas no estado de Minas Gerais e algumas estações adjacentes e este estado, com séries históricas compreendendo dados de 1960 a 2015. Calculou-se a ET_0 pelo método FAO Penman-Monteith, pelo método Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP) com calibração com base no erro absoluto médio (EAM). A análise dos métodos foi conduzida mediante aos seguintes indicadores estatísticos: raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), raiz quadrada do erro quadrático médio sistemático (REQMs), raiz quadrada do erro quadrático médio não sistemático (REQMns), proporções do erro quadrático médio sistemático e não sistemático, índice de concordância de Willmott (d), índice de confiança (C), eficiência do modelo (EF), coeficiente de correlação (r), coeficiente determinação (R^2) e os coeficientes linear e angular da reta de regressão. O ajuste das distribuições de probabilidade dos valores de ET_0 obtidas pelos métodos Hargreaves-Samani original e calibrado e pelo MP à distribuição obtida por meio do método padrão FAO Penman-Monteith foi testado empregando-se o teste de Mann-Whitney ao nível de 5% de significância. Em sequência, verificou-se a frequência dos desvios entre os métodos testados com o método padrão. Já para a análise de tendência de ET_0 , foram escolhidas as estações de Araçuaí, Caratinga, Patos de Minas, São Lourenço e Vitória-ES. Os dados de ET_0 foram divididos por bimestres e submetidos à análise pelo teste de tendência de Mann-Kendall ao nível de 5% de significância. Constatou-se que o após calibração, o método Hargreaves-Samani obteve um desempenho superior ao método HS original em todas as estações estudadas. Considerando a média de todas as estações estudadas, os valores de EAM reduziram de $0,95 \text{ mm d}^{-1}$ para $0,47 \text{ mm d}^{-1}$ com a calibração do método HS. O MP se aproximou da melhoria observada no método HSc, em todas as estações estudadas, havendo pequenas alterações nos valores de EAM ($0,47 \text{ mm d}^{-1}$ para $0,45 \text{ mm d}^{-1}$) e REQM ($0,61 \text{ mm d}^{-1}$ para $0,60 \text{ mm d}^{-1}$) quando comparados com o método HSc. Verificou-se o ajuste entre as distribuições de valores diários de ET_0 obtidas com os métodos Hargreaves-Samani Calibrado e o padrão FAO Penman-Monteith para 10 estações meteorológicas e o ajuste entre o MP e o FAO-PM para 11 estações meteorológicas das 30 estudadas. A análise das distribuições dos desvios demonstrou que o método HS concentrou valores de desvio apontando super estimativas; já os métodos HSc e MP obtiveram valores mais próximos ao calculado pelo método FAO-PM. Resultados referentes à análise de tendência demonstram que houve tendências em todas as estações estudadas. Tendência de redução foi observada para a estação de Patos de Minas, contudo, para as demais estações em que o teste foi aplicado, verificou-se tendências de acréscimo da ET_0 no período estudado.

Palavras-chave: FAO Penman-Monteith. Manejo dos recursos hídricos. Hargreaves-Samani. Erro Absoluto Médio.

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION WITH MINIMUM DATA REQUIREMENT FOR STATIONS OF MINAS GERAIS AND ADJACENCIES

ABSTRACT - In recent decades, there has been a considerable increase in water demand in Brazil. Irrigation has a high contribution in this advance of water use. The state of Minas Gerais showed strong increase in irrigation by center pivots, promoting the increase of the irrigated area in the state. For a better water management resources, it is necessary to use the reference evapotranspiration (ET_0), being one of the crucial parameters for the development of irrigation projects. To obtain ET_0 , the FAO Penman-Monteith standard method is used. However, there are simplified equations that are used to estimate ET_0 using only air temperature data. Therefore, the objective of this work was to evaluate and calibrate the Hargreaves-Samani method and a Proposed Method (MP) against the standard method and perform the trend analysis of ET_0 . For that, data from INMET conventional meteorological stations, made available by the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP), were used for 30 stations located in the state of Minas Gerais and some adjacent stations at this state, with a historical series comprising data from 1960 to 2015. The ET_0 was calculated by the FAO Penman-Monteith method, by the original Hargreaves-Samani (HS) and calibrated (HSc) method and by the Proposed Method (MP) with calibration based on the mean absolute error (MAE). The analysis of the method was carried out using the following statistical indicators: square root of the mean square error (RMSE), square root of systematic root mean square error (RMSEs), square root of unsystematic mean square error (RMSEun), squared error proportions medium systematic and unsystematic, agreement index (d), confidence index (C), correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2) and linear and angular coefficients of the regression line. The adjustment of the probability distributions of the ET_0 values obtained by the original and calibrated Hargreaves-Samani methods and by the MP to the distribution obtained using the FAO Penman-Monteith standard method was tested using the Mann-Whitney test at the level of 5 % of significance. In sequence, the frequency of deviations between the methods tested with the standard method was checked. For the ET_0 trend analysis, the Araçuaí, Caratinga, Patos de Minas, São Lourenço and Vitória-ES stations were chosen. The ET_0 data were divided by two months and submitted to the Mann-Kendall trend test at the 5% level of significance. It was verified that after the calibration, the Hargreaves-Samani method obtained a superior performance to the original HS method in all stations studied. Considering the average of all stations studied, MAE values decreased from 0.95 mm d^{-1} to 0.47 mm d^{-1} with the HS method calibration. The MP approached the improvement observed in the HSc method, in all stations studied, with small changes in the values of MAE (0.47 mm d^{-1} to 0.45 mm d^{-1}) and RMSE (0.61 mm d^{-1} to 0.60 mm d^{-1}) when compared to the HSc method. The analysis of the deviations distributions showed that the HS method concentrated deviation values pointing to super estimates; the methods HSc and MP obtained values closer to those calculated by the FAO-PM method. Results referring to the trend analysis show that there were trends in all the stations studied. The reduction trend was observed for the Patos de Minas station, however, for the other stations where the test was applied, there were trends of increase of ET_0 in the period studied.

Keywords: FAO Penman-Monteith. Water resources management. Hargreaves-Samani. Mean Absolute Error.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui cerca de 6,2 milhões de hectares (ha) de área irrigada segundo dados de 2015 da Agência Nacional de Águas - ANA. Esse dado mostra uma evolução em relação ao censo agropecuário realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE em 2006, que estimou a área irrigada em 4,5 milhões de hectares.

Quando se fala em uso consuntivo da água, verifica-se que em 2010, comparativamente a 2006, houve um aumento de aproximadamente 29% da retirada total de água do país, passando de $1.842 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para $2.373 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Esse aumento ocorreu, principalmente, devido à vazão de retirada para fins de irrigação que passou de $866 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para $1.270 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, totalizando 47% e 54% do total, respectivamente (ANA, 2013).

O estado de Minas Gerais contribui de forma expressiva para a produção de grãos no Brasil, principalmente através da agricultura irrigada. Dados do último Censo Agropecuário realizado pelo IBGE em 2006 registraram a existência, em Minas Gerais, de 525.250 hectares irrigados que são distribuídos pelas diversas formas de irrigação, sendo 11.586 ha em irrigação por inundação, 11.663 ha em irrigação por sulco, 166.690 ha de pivô central, 168.059 ha de aspersão, 66.330 ha de irrigação localizada e 100.919 ha distribuídos por outras formas de irrigação.

Essa área está espalhada em 48.392 estabelecimentos agropecuários. Tais números correspondem, respectivamente, a 1,6% da superfície mineira e 8,8% do total dos estabelecimentos do estado.

Segundo a ANA (2016), o estado já possui 406.024 hectares de pivô central para irrigação. Isto corresponde a cerca de 32% da área coberta por pivô central no Brasil (1,275 milhão de ha), sendo as mesorregiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba e o Noroeste de Minas as que mais utilizam deste tipo de irrigação.

O estado do Espírito Santo tem sua produção voltada para a agricultura familiar, com predominância da cafeicultura em todas as suas regiões. Segundo o censo agropecuário realizado pelo IBGE (2009), o estado contava com 209.840 hectares de área irrigada. Atualmente o estado possui 13.610 hectares de pivô central, concentrados na região norte do estado, possuindo assim, baixa participação na estimativa nacional (ANA, 2016). Contudo, relacionado a agricultura de sequeiro, a evapotranspiração é um importante elemento na criação de zoneamentos agrícolas na região (NUNES et al., 2007).

A irrigação é, basicamente, uma operação agrícola para atendimento das necessidades de água das culturas, tendo extrema importância nos sistemas de produção em regiões que

possuem ocorrências de secas regulares. Para seu melhor uso, a estimativa de evapotranspiração torna-se um processo de extrema importância durante sua execução.

A evapotranspiração é a base do manejo da água, sendo o maior e mais importante componente no balanço hídrico nos sistemas agrícolas. A importância da evapotranspiração é verificada em diversos estudos, não só no campo das Ciências Agrárias, mas também na Meteorologia, Geografia, Hidrologia e Ecologia.

O termo evapotranspiração é entendido como um processo de perda de água para a atmosfera, através da evaporação da água presente no solo e da transpiração dos tecidos vegetais (ALENCAR et al., 2011b; MELO e FERNANDES, 2012). Por definição, a evapotranspiração de referência, ET_0 , é a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura hipotética, com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, com nenhuma restrição de umidade no solo, crescendo de forma ativa e cobrindo completamente a superfície do solo (ALLEN et al., 1998).

A ET_0 é um elemento meteorológico, obtido a partir de dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento, quando utilizado o método padrão, no qual metodologias específicas são descritas em Allen et al. (1998). Além do método padrão, existem métodos diretos (conceituação antiga) e indiretos para determinação da ET_0 .

Os métodos indiretos, podem envolver o uso de equações ou evaporímetros. No caso das equações, envolvem modelagem matemática, usando base de dados provenientes de estações meteorológicas. De posse de equações e dados meteorológicos, pode-se estimar a ET_0 , dado esse de extrema importância no dimensionamento de sistemas de irrigação (MELO e FERNANDES, 2012), bem como no manejo da irrigação, planejamento em agricultura irrigada e de sequeiro e em zoneamento agrícola.

Existem tanto equações básicas, que necessitam apenas valores de temperatura (THORNTHWAITE, 1948; MAKKINK, 1957; CAMARGO e CAMARGO, 1983; HARGREAVES e SAMANI, 1985), quanto equações que necessitam maior quantidade de dados meteorológicos, podendo envolver o balanço de energia ao nível das plantas, como no método FAO - Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), considerado como padrão.

A obtenção da ET_0 através de equações com menor necessidade de dados meteorológicos tornaria esse dado mais acessível a produtores que não possuem condições de obter uma estação meteorológica completa. Também favorece a obtenção de dados de ET_0 na ocorrência de falhas ou inconsistências nos sensores que realizam coleta de umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar.

Considerando-se o processo atual de mudanças climáticas, além da obtenção da ET_0 por diferentes métodos, destaca-se a importância para fins de planejamento de estudos sobre tendências de componentes do ciclo hidrológico, como evapotranspiração, precipitação e vazões de cursos d'água superficiais, e elementos meteorológicos, como a temperatura do ar.

Alterações no padrão diário, semanal, mensal, sazonal e anual dos elementos meteorológicos envolvidos na evapotranspiração podem afetar as mais diversas atividades humanas, dependentes em diferentes graus da relação entre demanda e disponibilidade de água, ressaltando-se aqui aquelas relacionadas ao manejo hídrico em propriedades rurais.

Objetivou-se com este trabalho avaliar e calibrar o método Hargreaves-Samani e um método proposto frente ao método FAO Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência e realizar a análise de tendências da evapotranspiração de referência estimada com o método padrão, considerando séries históricas de dados meteorológicos dos estados de Minas Gerais e algumas adjacentes a esse estado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração de referência

Penman (1948) e Thornthwaite (1948) introduziram a primeira ideia de evapotranspiração. O modelo apresentado possuía uma proposta de estimativa da evapotranspiração em função da temperatura média do ar a partir de um índice térmico anual e do comprimento do dia para um determinado mês em questão. Contudo, o estudo de Penman estava voltado para a parte física do processo de evapotranspiração em busca de uma fórmula que levasse em consideração os elementos climáticos relevantes como a energia radiante, temperatura, umidade e velocidade do vento (SEDIYAMA, 1996).

Porém, a definição de evapotranspiração de referência (ET_0) surgiu apenas na década de 70, visto que as definições anteriores não explicitavam o tipo de vegetação, o grau e a altura da cobertura vegetal em relação ao solo, as dimensões da superfície e as condições de bordadura (PENMAN, 1948, 1956; THORNTHWAITE, 1948). Desta forma, Jensen (1973) propôs como cultura de referência a alfafa, definindo a ET_0 como aquela que se verifica em uma área sem deficiência hídrica, com bordadura mínima de 100 m, cultivada com a cultura da alfafa, com um porte de 0,30 a 0,50 m de altura.

Doorenbos e Pruitt (1977) definiram o termo evapotranspiração de referência como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Com esta definição, a transferência de água do sistema solo-planta para atmosfera ocorre sem interferências relacionadas à vegetação, podendo ser testada para várias condições climáticas através de modelos matemáticos.

Contudo, Smith (1991) define a evapotranspiração de referência como aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência ao transporte de vapor d'água igual a 69 s m^{-1} . Estas características seriam encontradas em um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem deficiência hídrica, sendo assim denominado uma cultura padrão. Neste sentido, a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação-FAO indicou a adoção do método de Penman-Monteith após parametrização como o método padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998).

Observa-se que o conceito de ET_0 foi criado originalmente para realização do estudo da demanda evaporativa da atmosfera, independentemente do tipo de cultura, fenologia e tratos

culturais, tornando-se um termo mais utilizado em estudos climáticos (ALENCAR et al., 2011a).

Mais recentemente, estudos têm sido aplicados na verificação de técnicas para a estimativa da ET_0 oriundas de outras áreas do conhecimento. Um exemplo é a aplicação de redes neurais (FERRAZ, 2014; PANDORFI et al., 2016). Muitos estudos estão sendo desenvolvidos para efeito de planejamento de uso do solo, como por exemplo, estimativas de ET_0 efetuadas com base em imagens de satélites. Nesta linha, como trabalhos de impacto pode-se citar Moreira et al. (2010), Pacheco et al. (2014) e Macedo et al. (2016).

2.2 Elementos meteorológicos que afetam a evapotranspiração de referência

Allen et al. (1998) definem os principais fatores que afetam a evapotranspiração e afirmam que estes estão relacionados com as condições atmosféricas, com a cultura e com o manejo e condições de campo. Os dados meteorológicos, que afetam diretamente a evapotranspiração, são: a radiação solar, a temperatura, a umidade do ar e a velocidade do vento.

2.2.1 Radiação solar

A quantidade de energia disponível é determinante da quantidade de água que pode ser evaporada de um sistema. Desta forma, a radiação solar é a maior fonte de energia que pode ser capaz de transformar a água líquida em vapor de água. A quantidade potencial de radiação que pode alcançar a superfície de evaporação é totalmente determinada pela localização da superfície e época do ano. Esse fato ocorre devido a diferenças na posição do Sol em relação à Terra. A radiação solar real que pode alcançar a superfície de evaporação depende da turbidez da atmosfera e da presença de nuvens que podem refletir e absorver grandes partes da radiação incidente no planeta (ALLEN et al., 1998).

A quantificação da radiação solar que atinge a superfície terrestre possui extrema importância para as diversas atividades, envolvendo o aproveitamento dos recursos naturais, já que é a principal fonte de energia nos processos físicos, químicos e biológicos. Interfere também nos processos de evaporação, evapotranspiração e nos estados de temperatura e umidade relativa (TEIXEIRA et al., 2004).

Sutcliffe (1980) menciona que existem vários fatores meteorológicos que flutuam durante o dia, a radiação solar demonstra estar intimamente relacionada com taxas de transpiração. Isto pode ser explicado principalmente pela sensibilidade dos estômatos à luz e

também ao fato de que a radiação solar fornece energia para que ocorra a evaporação. A energia da luz tem de ser absorvida antes que possa ser utilizada. A cor da superfície evaporante exerce um grande efeito sobre a perda de água por uma planta. Esta perda será maior quando a superfície for escura, ou seja, boa absorvente de luz, do que quando ela for refletora da luz.

Segundo Allen et al. (1998), a partir da associação das equações de Angström-PreScott, para o balanço de ondas curtas (BOC), e de Brunt, para o balanço de ondas longas (BOL), pode-se realizar a estimativa do saldo de radiação em superfícies planas. Esse procedimento é recomendado pela FAO, quando o objetivo é estimar a ET_0 pela metodologia descrita por Penman-Monteith a partir de dados de estações meteorológicas convencionais.

2.2.2 Temperatura do ar

A temperatura do ar atua no processo de evapotranspiração, principalmente pelo motivo de que a radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor que é emitido pela superfície elevam a temperatura do ar. O ar aquecido próximo às plantas transfere energia para a cultura na forma de fluxo de calor sensível. Com isso, há o aumento das taxas de evapotranspiração. A temperatura também interfere na atividade fotossintética das plantas, já que a diferença de temperatura influencia em reações bioquímicas, cujos catalisadores, as enzimas, são dependentes da temperatura ideal para expressar sua atividade máxima.

Para Medeiros (2002), a temperatura do ar possui grande importância na determinação da ET_0 , pela razão de ser um dos elementos climáticos com maior disponibilidade nas estações meteorológicas convencionais e automáticas. A partir desse fato, com falta de dados de radiação, a temperatura do ar pode ser utilizada como indicativo de energia no sistema analisado.

Allen et al. (1998) afirmam que a variação anual da radiação solar é o principal fator que determina a variação da temperatura do ar. Portanto, à medida em que aumenta a latitude, a temperatura média do ar diminui, em decorrência da menor incidência de radiação solar global. Tubelis e Nascimento (1980) explicam que a altitude é outro fator que altera inversamente o valor da temperatura do ar.

2.2.3 Umidade do ar

A diferença entre a pressão de vapor de água na superfície evapotranspirante e o ar circundante é um fator determinante para a remoção deste vapor de água. Cultivos bem

irrigados em regiões áridas quentes e secas tem a capacidade de consumir grandes quantidades de água. Esse elevado consumo ocorre devido à abundância de energia e o poder de retirada do ar úmido da atmosfera. Já em regiões tropicais úmidas, a alta umidade do ar faz com que a demanda de evapotranspiração seja menor. Neste ambiente, o ar já está perto da saturação, de modo que menos água adicional pode ser armazenada e, portanto, a taxa de evapotranspiração é menor do que em regiões áridas (ALLEN et al., 1998).

A diferença entre a pressão do vapor d'água, entre uma cultura e o ar próximo a ela, torna-se um fator determinante para o processo de evapotranspiração. Portanto, cultivos bem irrigados em regiões semiáridas, tem a tendência de consumir grandes quantidades de água, pois existe abundância de energia solar e em virtude do poder dissecante da atmosfera. Já em regiões úmidas, a elevada umidade do ar reduz a demanda da evapotranspiração. Nestas circunstâncias, o ar encontra-se próximo ao ponto de saturação, causando, assim, um menor consumo hídrico da cultura do que em regiões áridas.

2.2.4 Velocidade do vento

De acordo com Sentelhas (1998), para certa região, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e velocidade do vento, e quanto menor for a umidade relativa, maior deverá ser a taxa de evapotranspiração de referência. Medeiros (2002) afirma que o processo de troca de vapor depende sempre da velocidade do vento e da turbulência do ar, já que ambos transferem grandes quantidades de ar sobre a superfície evaporante. Desta forma, o vento remove a camada acima da superfície que está sendo evaporada. Cria-se então uma condição favorável ao aparecimento de um gradiente de pressão de vapor, ocorrendo aumento do poder evaporante no local (ALLEN et al., 1998).

O movimento do ar sobre a superfície de uma folha remove o vapor d'água e, assim, aumenta o gradiente de potencial de água, provocando a transpiração no vegetal. Porém, quando ocorrem grandes velocidades do vento, a transpiração pode diminuir, uma vez que muito vento pode induzir o fechamento estomático, seja por distúrbios mecânicos como resultados da agitação da folha ou pelo aumento do déficit de água que controla a síntese do ácido abscísico e o subsequente fechamento estomático (SUTCLIFFE, 1980).

2.3 Método padrão FAO Penman-Monteith

Segundo Pereira et al. (1997), a FAO reuniu um grupo de especialistas em evapotranspiração para rever o Irrigation and Drainage Paper 24 (DOORENBOS e PRUITT, 1977). A partir deste encontro, foi adotado o método Penman-Monteith como o mais adequado para estimar a ET_0 . Foram adotadas algumas parametrizações, como a proposta de uma “cultura hipotética” com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23.

A equação FAO Penman-Monteith (Equação 1)

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

classificou-se como a melhor equação para estimar a ET_0 diária e mensal em todos os climas, pois pode ser usada globalmente sem qualquer calibração local, já que incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos, e foi validada em diferentes ambientes usando precisas medidas de lisímetro (BERTI et al., 2014).

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

Em que:

ET_{0PM} = evapotranspiração de referência calculada pelo método FAO Penman-Monteith (mm d^{-1});

R_n = saldo de radiação à superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

G = densidade do fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

T_{med} = temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$);

u_2 = velocidade do vento a 2 m da superfície (m s^{-1});

e_s = pressão de saturação do vapor de água (kPa);

e_a = pressão atual de vapor de água (kPa);

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ = coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Diversos estudos no Brasil e no Mundo tem comprovado que o aperfeiçoamento do método original de Penman (1948) para o FAO Penman-Monteith possibilitou maior precisão e aplicabilidade (BARROS et al., 2009; LACERDA e TURCO, 2015; PATEL et al., 2015; LIMA JUNIOR et al., 2016).

Caso não haja disponibilidade de algum parâmetro requerido na entrada de dados da equação FAO Penman-Monteith, pode-se usar a metodologia proposta por Allen et al. (1998), para subsidiar a falta de dados de radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Quando ocorre a falta de dados de temperatura, não é possível a utilização do método padrão FAO Penman-Monteith. Diversas metodologias foram propostas para o requerimento apenas de temperatura para o cálculo da ET_0 .

2.4 Estimativa de ET_0 utilizando apenas a temperatura do ar

A escolha na utilização dos métodos de estimativa da evapotranspiração varia conforme a aplicação, base temporal para estimativa e região de estudo. Para pesquisas de recursos hídricos, há uma exigência de estimativas anuais ou até mensais. Entretanto, em projetos de manejo da irrigação, são requeridos períodos mais curtos, variando de 3 a 10 dias, podendo se trabalhar inclusive em base diária. Isso faz com que um método mais preciso deva ser adotado para aquela condição (MACHADO e MATTOS, 2000).

Porém, deve-se destacar a escolha de métodos mais simples, com demanda de dados de mais fácil obtenção e baixo custo. Desta forma, o manejo hídrico em locais com baixa disponibilidade de dados meteorológicos torna-se mais acessível ao irrigante. Mohawesh (2010) enfatiza que esses métodos simples, com baixa necessidade de dados, devem ser calibrados para locais específicos, de modo a fornecerem valores mais confiáveis.

Entre os diversos métodos utilizados para realizar a estimativa de evapotranspiração de referência, alguns utilizam apenas a temperatura do ar como base para o cálculo, dentre estes podemos destacar o método de Hamon (HAMON, 1961), Kharrufa (KHARRUFA, 1985), Thorntwaite (THORNTWAITE, 1948), Camargo (CAMARGO, 1971), Thorntwaite-Camargo (CAMARGO, 1990), Blaney-Criddle (BLANEY e CRIDDLE, 1950), Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1985).

2.4.1 Hargreaves-Samani

Samani (2000) enfatiza que os parâmetros mais importantes para a estimativa de ET_0 são a temperatura e a radiação solar, já que pelo menos 80% da ET_0 pode ser explicado por estes dois parâmetros.

Hargreaves e Allen (2003) citam que a grande vantagem da equação de Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1985) é em relação aos métodos combinados. Isso é importante para estudos com séries históricas em que há dados faltantes ou inconsistentes de radiação solar, umidade do ar e velocidade do vento (TODOROVIC et al., 2013).

Porém, o método Hargreaves-Samani, HS, foi desenvolvido utilizando dados de ambientes áridos a sub-úmidos e, por ser uma equação empírica, não se tem as mesmas performances em condições muito diferentes das utilizadas para seu desenvolvimento, como por exemplo em clima úmido. Vários autores notificam que o método HS subestima a ET_0 para regiões secas e com ventos intensos, porque não possui um termo relacionado ao vento na sua concepção (HARGREAVES e ALLEN, 2003; BERENGENA e GAVILÁN, 2005).

No entanto, Temesgen et al. (2005) referiram que a precisão do método HS é maior quando são utilizadas em vez de valores diários, médias de ET_0 entre 5 a 7 dias. Mesmo que a equação HS tenha um bom desempenho para muitas aplicações, principalmente quando utilizada para fins de manejo de irrigação, vários pesquisadores trabalham com o objetivo de calibrar os parâmetros da equação (TODOROVIC et al., 2013).

O método HS é recomendado por Hargreaves e Samani (1985) com a seguinte equação.

$$ET_{0HS} = A_{HS} R_a (T_{max} - T_{min})^{C_{HS}} (T_{med} + B_{HS}) \quad 2$$

Em que:

ET_{0HS} = Evapotranspiração de referência calculada pelo método Hargreaves-Samani ($mm\ d^{-1}$)

R_a = Radiação no topo da atmosfera em equivalente de evaporação ($mm\ d^{-1}$);

T_{max} = Temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$);

T_{min} = Temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$);

A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} = Coeficientes da equação (0,0023; 17,8; 0,5 respectivamente).

2.4.2 Método Proposto

Neste método utiliza-se dados de temperatura do ar, levando em consideração, além da temperatura média, a amplitude térmica e proporcionalidade entre a temperatura máxima e mínima local. Também são considerados dados de radiação no topo da atmosfera.

Esse método foi inicialmente trabalhado no estudo proposto por Oliveira (2016), em que houve avaliação do método frente ao método FAO Penman-Monteith para estações meteorológicas convencionais presente na bacia do rio São Francisco dentro do estado de Minas Gerais.

Na concepção do método, tomou-se como base o modelo Borges Júnior para cálculo da radiação solar, proposto em Steidle Neto et al. (2015), adaptando-se para obtenção da ET_0 . Foram feitos pré-testes nos quais foram avaliadas diversas possíveis relações empíricas entre as variáveis consideradas, selecionando-se a fórmula genérica que propiciou melhor desempenho, descrita a seguir.

$$ET_{0MP} = A_{MP} T_{max} R_a \left[B_{MP} (T_{max} - T_{min})^3 + C_{MP} \left(\frac{T_{min}}{T_{max}} \right)^2 + D_{MP} T_{med} + E_{MP} \right]^2 \quad 3$$

Em que:

ET_{0MP} = Evapotranspiração de referência calculada pelo Método Proposto ($mm\ d^{-1}$)

R_a = Radiação no topo da atmosfera em equivalente de evaporação ($mm\ d^{-1}$);

A_{MP} , B_{MP} , C_{MP} , D_{MP} e E_{MP} = Coeficientes de ajuste local do modelo.

2.5 Outros métodos

2.5.1 Hamon

O método foi desenvolvido por Hamon (1961), sendo expresso pela equação abaixo:

$$ET_0 = 0,55 \left(\frac{N}{12} \right)^2 \left(\frac{4,95 \exp^{0,062 T_{med}}}{100} \right) 25,4 \quad 4$$

Em que:

N = Duração astronômica do dia, função da latitude e época do ano.

2.5.2 Kharrufa

A equação foi desenvolvida por Kharrufa (1985) a partir da relação entre ET_0 e a porcentagem de horas de brilho solar máxima diária, conforme a relação:

$$ET_0 = 0,34 p T_{med}^{1,3} \quad 5$$

Em que:

p = Fator que representa a porcentagem média diária de horas de brilho solar, o qual varia em função da latitude e época do ano.

2.5.3 Thornthwaite

Pereira et al. (1997) enfatizam que o método foi proposto por Thornthwaite (1948) para estimativa da evapotranspiração potencial (ETP) mensal de um posto meteorológico, visando estudo de classificação climática. A partir desta proposição, a ETP era considerada como a chuva ideal, para que uma região não obtivesse problemas com deficiência hídrica.

A metodologia proposta foi baseada no balanço hídrico de bacias hidrográficas e em medidas de evapotranspiração feitas em lisímetros. Com isso, o método utiliza apenas a temperatura do ar como variável analisada (PEREIRA et al., 1997). O método estima a ET_{0m} para uma condição padrão de 12 horas de brilho solar e mês com 30 dias, representado pelo conjunto de equações:

$$ET_{0m} = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a, \quad 0^\circ C \leq T_i \leq 26^\circ C \quad 6$$

$$ET_{0m} = -415,85 + 32,24 T_i - 0,43 T_i^2, \quad T_i > 26^\circ C \quad 7$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad 8$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 T_i)^{1,514} \quad 9$$

Em que:

ET_{0m} = Evapotranspiração de referência padrão média mensal ($mm \text{ mês}^{-1}$);

T_i = Temperatura média mensal ($^\circ C$);

i = Mês do ano;

I = Índice de calor da região (média climatológica).

Para que se faça um ajuste do fotoperíodo e do número de dias no mês, há a necessidade aplicação de um fator de correção:

$$ET_0 = ET_{0m} \frac{N}{12} \frac{ND}{30} \quad 10$$

Em que:

ND = Número de dias do mês.

2.5.4 Camargo

O método proposto por Camargo (1971) é baseado nos resultados da equação de Thornthwaite. O objetivo foi a proposição de equações mais simples, mas com eficiência na estimativa da ET_0 em períodos de 10 ou 30 dias, dado pela equação:

$$ET_0 = R_a T_{per} ND K_f \quad 11$$

Em que:

T_{per} = Temperatura média do período;

K_f = Fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do local (Para T até 23°C , $K_f = 0,01$; $T = 24^\circ\text{C}$, $K_f = 0,0105$; $T = 25^\circ\text{C}$, $K_f = 0,011$; $T = 26^\circ\text{C}$, $K_f = 0,0115$; $T > 26^\circ\text{C}$, $K_f = 0,012$);

2.5.5 Thornthwaite-Camargo

Camargo et al. (1999) modificaram a equação de Thornthwaite para que o método possa ser empregado em qualquer condição climática, e não somente em condições onde o método original foi concebido. Para tanto, utiliza-se a temperatura efetiva (T_{ef}), que expressa a amplitude térmica local, ao invés da temperatura média do ar (T_i). Esta modificação faz com que os valores de ET_0 não sejam subestimados em climas secos, sendo dada por:

$$T_{ef} = k (T_{med} + A) \quad 12$$

Em que:

T_{ef} = Temperatura efetiva (°C)

A = Amplitude térmica média diária.

A temperatura média e a amplitude são dadas por Camargo et al. (1999) como:

$$T_{med} = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad 13$$

$$A = (T_{max} - T_{min}) \quad 14$$

Substituindo as Equações 13 e 14 na Equação 12, obtém-se a seguinte equação simplificada:

$$T_{ef} = 0,5k (3 T_{max} - T_{min}) \quad 15$$

Em que:

$k = 0,72$ (CAMARGO et al., 1999);

$k = 0,69$ (PEREIRA e PRUITT, 2004).

Dessa forma, para determinar a evapotranspiração através do método de Thornthwaite modificado, utiliza-se a temperatura efetiva em substituição à temperatura média, conforme equação:

$$ET_{0m} = 16 \left(10 \frac{T_{ef}}{I} \right)^a, \quad 0^\circ\text{C} \leq T_{ef} \leq 26^\circ\text{C} \quad 16$$

$$ET_{0m} = -415,85 + 32,24T_{ef} - 0,43T_{ef}^2, \quad T_{ef} > 26^\circ\text{C} \quad 17$$

2.5.6 Blaney-Criddle

Com o objetivo de definir melhor os efeitos do clima nas necessidades hídricas das culturas, o método original de Blaney-Criddle (BLANEY e CRIDDLE, 1950), foi modificado por (DOORENBOS e PRUITT, 1977) para obtenção da ET_0 média mensal de um gramado,

considerando os níveis gerais de umidade relativa mínima, velocidade do vento e horas de brilho solar.

Embora o método possa ser utilizado para estimar a ET_0 em escalas de tempo menores que a mensal, a representatividade dessas estimativas é questionável visto que o método foi desenvolvido em cima de dados médios mensais.

O método de Blaney-Criddle modificado pela FAO é apresentado a seguir:

$$ET_0 = c p (0,46 T_{med} + 8,13) \quad 18$$

Em que:

c = Coeficiente regional de ajuste da equação;

2.6 Análise de tendências

A obtenção de estimativas precisas da evapotranspiração, torna-se essencial para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos, avaliar o efeito do uso da terra e também verificar mudanças no balanço hídrico (ORTEGA-FARIAS et al., 2009).

Some'e et al. (2012) relatam que a presença de tendências em séries temporais pode demonstrar indícios de como os dados observados refletem o efeito das mudanças climáticas, sendo essas mudanças de caráter natural ou não. A tendência pode ser entendida como uma alteração contínua e sistemática, observada em uma série temporal, a qual reflete o grau de acréscimo ou redução nos valores da variável de interesse.

Assim, Yevjevich, (1972) define tendência em uma série temporal como uma modificação metódica, sistematizada e contínua em qualquer parâmetro de uma determinada série de dados. Deve-se atentar ao termo oscilação climática, que significa a flutuação na qual a variável tende a mover-se de forma gradual, contínua e suave entre sucessivos máximos e mínimos. Já a tendência climática pode constituir-se de uma mudança climática caracterizada por um leve aumento ou diminuição dos valores médios no período de interesse registrado.

Não se deve confundir tendências climáticas com variações climáticas. Tendências climáticas são mudanças suaves no clima, que indicam consequências a longo prazo. Já as variações climáticas referem-se a eventos isolados que fogem de um padrão climático habitual (MARIN et al., 2000).

A Organização Meteorológica Mundial - OMM, visando a padronização da terminologia utilizada pelas ciências da atmosfera, entre as quais a climatologia, em relação às definições utilizadas para caracterizar mudanças climáticas, conceituou tendência climática como o aumento ou diminuição lenta dos valores médios ao longo de uma série de dados de, no mínimo, três décadas, chamada de Normal Climatológica, podendo ou não ocorrer de forma linear.

Sendo a principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, a evapotranspiração possui uma grande influência sobre a maioria dos processos hidrológicos, de forma que esse componente está estreitamente ligado com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial, constituindo um fator importante no balanço hídrico da região de interesse (LIANG et al., 2008).

Nos últimos anos têm sido realizados vários estudos para examinar o impacto das mudanças climáticas na ET_0 em diversas regiões do planeta. Estudos com tendências da ET_0 estão sendo realizados em algumas localidades na Índia (JHAJHARIA et al., 2012), China (TANG et al., 2011; HUO et al., 2013; GAO et al., 2017), Estados Unidos (HOBBINS et al., 2004; IRMAK et al., 2012) e Europa (ESPADAFOR et al., 2011).

No Brasil, existem poucos estudos que se verificam a existência de tendência para a ET_0 . Alencar et al. (2011c), em estudos de dados anuais de ET_0 da localidade de Viçosa, MG, verificaram que as séries apresentaram uma tendência estatisticamente significativa à diminuição. Cordeiro (2010) também verificou redução da ET_0 . Contudo, tendências crescentes da ET_0 foram observadas para o Nordeste do Brasil, por Silva (2004), para Uberaba-MG, por Alencar et al. (2012), e para o município de Catalão, GO, por Alencar et al. (2014).

2.6.1 Teste de Mann-Kendall

Este teste foi inicialmente proposto por Mann (1945) e posteriormente sofreu alterações por Kendall (1975), criando-se a correspondente estatística Mann-Kendall (MK). O teste MK consiste em comparar cada valor da série temporal com os valores restantes da série.

Mann-Kendall é um teste não paramétrico sequencial (MANN, 1945; KENDALL, 1975), atualmente sugerido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais. É o método mais difundido para análise de mudanças climáticas, amplamente aplicado à detecção de tendências em estudos hidrológicos e climáticos.

De acordo com Önöz e Bayazit (2003), o teste possui benefícios como a irrelevância de os dados não pertencerem a uma distribuição particular e a característica de o resultado ser menos afetado por outliers, pois o cálculo baseia-se no sinal das diferenças e não diretamente nos valores da variável. A análise da tendência climática possibilita verificar se houve manutenção, aumento ou redução nos valores das variáveis climatológicas consideradas em um determinado estudo de séries temporais.

Para identificar possíveis tendências climáticas por trimestre em séries de precipitação pluviométricas, utilizando a série temporal de 1975 a 2005, em Araguari (MG), e, aplicando o teste não-paramétrico de Mann-Kendall, Rodrigues e Santos (2007) identificaram uma tendência não significativa no primeiro trimestre. Para o segundo, terceiro e quarto trimestres houve uma tendência negativa.

Blain et al. (2009) verificaram a presença de tendências da temperatura mínima do ar no Estado de São Paulo, concluindo que em apenas três localidades houve uma tendência significativa da temperatura mínima: Campinas, Cordeirópolis/Limeira e Ribeirão Preto. Porém, nas demais localidades não se verificou tendência significativa de elevação da temperatura mínima.

Minuzzi e Caramori (2011), avaliaram tendência climática sazonal e anual da quantidade de chuva no estado do Paraná; resultados demonstraram que houve um aumento na quantidade de chuvas, entre 17 a 37 mm/ década, a partir de metade do século XX, especialmente durante a primavera e ocorrendo na metade leste do estado.

Mann (1945) propôs testar a hipótese nula, H_0 , de que os dados são provenientes de uma população onde as variáveis aleatórias são independentes e distribuídas de forma idêntica. A hipótese alternativa, H_1 , é que os dados seguem uma tendência monotônica no tempo. A estatística do teste é obtida através da soma da série $\text{sign}(X_j - X_k)$.

Para um conjunto de dados $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, com $n > 4$, o teste estatístico de Mann-Kendall (S), usa as seguintes fórmulas para a estatística, sendo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(X_j - X_k) \quad 19$$

Em que:

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_k) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_k) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad 20$$

Um valor positivo de S indica tendência positiva na qual os dados crescem com o tempo. Por outro lado, um valor negativo de S indica uma tendência negativa (HIPEL e MCLEOD, 1994).

A variância de S, denotada por $[\text{Var}(S)]$, é definida por:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad 21$$

Em que:

n = Tamanho da série temporal.

Mann (1945) e Kendall (1975) mostraram que, mesmo para valores pequenos de n, pode-se assumir uma distribuição normal desde que o valor da estatística Z seja dado por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{[\text{Var}(S)]^{\frac{1}{2}}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad 22$$

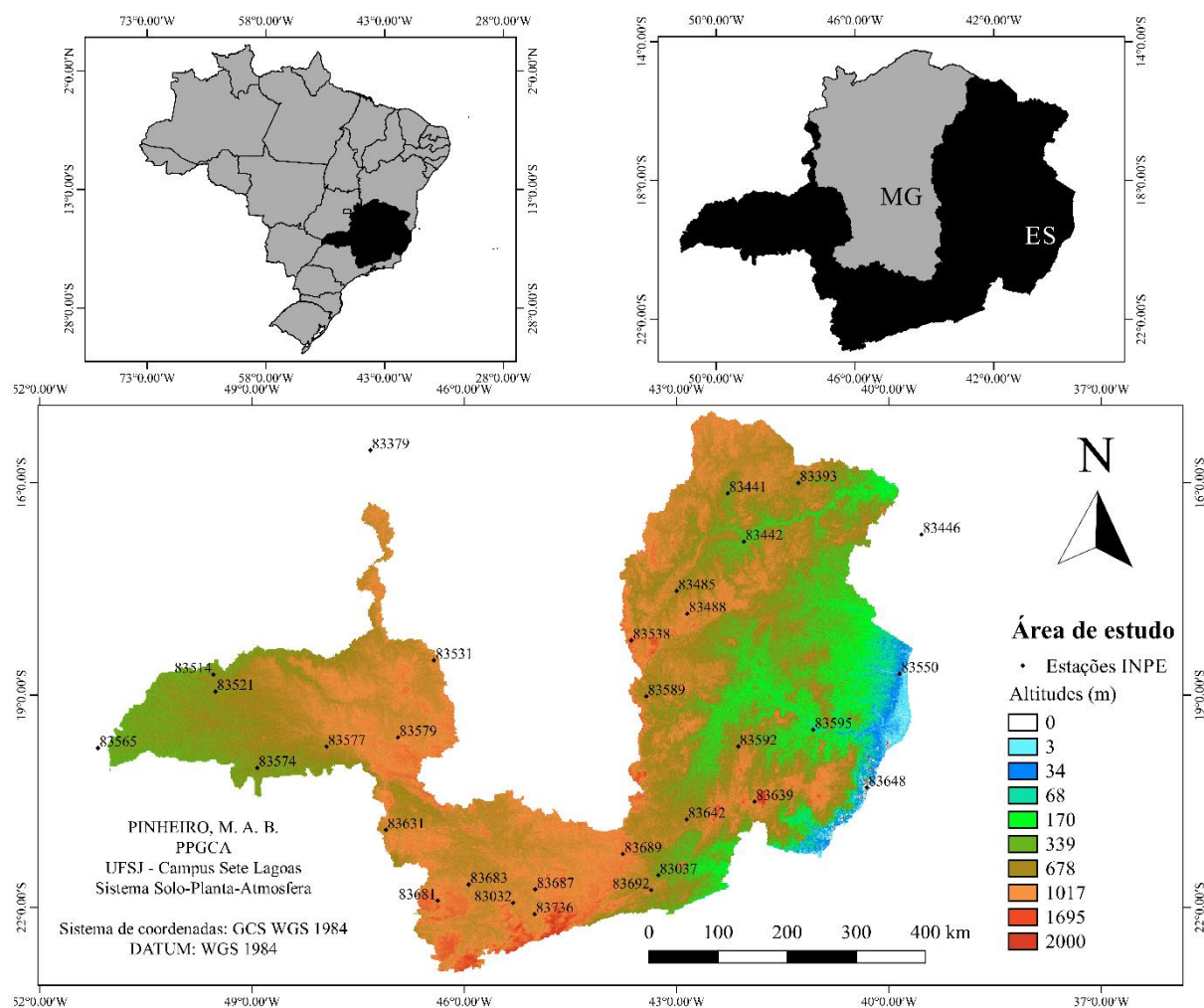
Se a probabilidade p do teste de Mann-Kendall for menor que o nível α , $p < \alpha$, uma tendência estatisticamente significativa existe, enquanto, um valor de $p > \alpha$, confirma uma tendência insignificante.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da região de estudo

A área de estudo é composta por parte da região hidrográfica do Rio Paraná e parte da região hidrográfica do Atlântico trecho leste, contida no estado de Minas Gerais e pelo estado do Espírito Santo (Figura 1).

Figura 1 - Caracterização da região de estudo



Para a realização deste trabalho, foram selecionadas 31 estações meteorológicas convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, disponibilizados pelo Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa - BDMEP (Tabela 1), localizadas em 26 municípios pertencentes a Minas Gerais, 2 estações pertencentes ao estado do Espírito Santo, 1 estação no estado de Goiás, 1 estação no estado do Mato Grosso do Sul e 1 estação no estado da Bahia. Oliveira (2016) trabalhou com estações pertencentes à bacia do rio São Francisco no

estado de Minas Gerais; desta forma, escolheu-se o restante das estações dentro do estado mineiro.

Foram escolhidas algumas estações adjacentes à área de estudo pois as mesmas se encontravam próximas a região de interesse que não continha nenhuma estação meteorológica, criando assim, uma melhor caracterização da região de interesse do estudo.

Tabela 1 - Localização das estações meteorológicas convencionais utilizadas.

| Estações | Código | Latitude | Longitude | Altitude (m) | Conjunto de dados (dias) |
|------------------------|--------|----------|-----------|--------------|--------------------------|
| Aimorés - MG | 83595 | -19,49° | -41,07 ° | 82,74 | 14.143 |
| Araçuaí - MG | 83442 | -16,83 ° | -42,05 ° | 289,00 | 18.158 |
| Araxá - MG | 83579 | -19,60 ° | -46,94 ° | 1.023,61 | 15.854 |
| Barbacena - MG | 83689 | -21,25 ° | -43,76 ° | 1.126,00 | 18.062 |
| C. do Mato Dentro-MG | 83589 | -19,02 ° | -43,43 ° | 652,00 | 17.432 |
| Caparaó - MG | 83639 | -20,51 ° | -41,90 ° | 843,18 | 11.397 |
| Capinópolis - MG | 83514 | -18,71 ° | -49,55 ° | 620,60 | 14.174 |
| Caratinga - MG | 83592 | -19,73 ° | -42,13 ° | 609,65 | 16.091 |
| Carbonita - MG | 83485 | -17,53 ° | -43,00 ° | 736,38 | 11.352 |
| Coronel Pacheco - MG | 83037 | -21,55 ° | -43,26 ° | 435,00 | 14.088 |
| Diamantina - MG | 83538 | -18,23 ° | -43,64 ° | 1.296,12 | 14.738 |
| Formosa - GO | 83379 | -15,54 ° | -47,33 ° | 935,19 | 17.006 |
| Frutal - MG | 83574 | -20,03 ° | -48,93 ° | 543,67 | 14.532 |
| Guaratinga - BA | 83446 | -16,73 ° | -39,54 ° | 194,67 | 11.078 |
| Itamarandiba - MG | 83488 | -17,85 ° | -42,85 ° | 914,00 | 16.188 |
| Ituiutaba - MG | 83521 | -18,95 ° | -49,52 ° | 560,00 | 10.224 |
| Juiz de Fora - MG | 83692 | -21,76 ° | -43,36 ° | 939,96 | 18.184 |
| Lambari - MG | 83032 | -21,94 ° | -45,31 ° | 878,45 | 10.271 |
| Lavras - MG | 83687 | -21,75 ° | -45,00 ° | 918,84 | 17.574 |
| Machado - MG | 83683 | -21,68 ° | -45,94 ° | 873,35 | 12.305 |
| Paranaíba - MS | 83565 | -19,75 ° | -51,18 ° | 331,25 | 13.503 |
| Patos de Minas - MG | 83531 | -18,51 ° | -46,43 ° | 940,28 | 17.626 |
| Pedra Azul - MG | 83393 | -16,00 ° | -41,28 ° | 648,91 | 13.844 |
| Poços de Caldas - MG | 83681 | -21,91 ° | -46,38 ° | 1.150,00 | 16.893 |
| Salinas - MG | 83441 | -16,15 ° | -42,28 ° | 471,32 | 13.818 |
| São Lourenço - MG | 83736 | -22,10 ° | -45,01 ° | 953,20 | 18.462 |
| São Mateus - ES | 83550 | -18,70 ° | -39,85 ° | 25,04 | 14.827 |
| São S. do Paraíso - MG | 83631 | -20,91 ° | -47,11 ° | 820,00 | 11.041 |
| Uberaba - MG | 83577 | -19,73 ° | -47,95 ° | 737,00 | 17.241 |
| Viçosa - MG | 83642 | -20,76 ° | -42,86 ° | 712,20 | 16.272 |
| Vitória - ES | 83648 | -20,31 ° | -40,31 ° | 36,20 | 18.092 |

Foram realizadas pesquisa de dados diários no período entre 1961 a 2015, de temperatura máxima (T_{\max} , °C), mínima (T_{\min} , °C) e média (T_{med} , °C), em que a média foi o

valor médio entre a temperatura máxima e a mínima, horas de brilho solar diário (n , h), velocidade do vento média diária a dez metros de altura (U_z , $m\ s^{-1}$) e umidade relativa do ar média diária (UR, %). Contudo, nem todas estações tinham a totalidade de dados pesquisados, tendo se utilizado a quantidade máxima disponível para cada estação convencional.

3.2 Tratamento dos dados

Os dados foram tabulados em planilha eletrônica (Microsoft Office Excel®). Foram feitas análises de consistência, sendo eliminadas as linhas nas quais faltaram no mínimo um dado dos elementos climáticos necessários para realização do cálculo da ET_0 pelo método FAO Penman-Monteith, bem como em que se observou dados inconsistentes. A eliminação de linhas faltosas deu-se pelo software TempFalhas, desenvolvido em Lazarus. Na análise de consistência aplicou-se os critérios: a umidade relativa ar deveria estar entre 0 e 100%; a quantidade de horas de brilho solar diário (n) não poderia ultrapassar a quantidade máxima de brilho solar diário (N); e a diferença entre a temperatura mínima e a temperatura máxima deveria ser maior que 0.

Na análise de consistência, verificou-se que a estação referente ao município de Carbonita - MG não possuía nenhum dia com dados utilizáveis nos cálculos de evapotranspiração de referência. O resumo de eliminação de inconsistência nos dados está presente na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo da eliminação de dados inconsistentes nas estações meteorológicas

| Estações | DI | DF | % de exclusão | Nº de exclusões por parâmetro | | | | |
|-------------------|--------|--------|---------------|-------------------------------|-------|--------|-------|--------|
| | | | | Tmax | Tmin | n | UR | VV |
| Aimorés | 14.143 | 13.661 | 3,4 | 127 | 154 | 41 | 324 | 245 |
| Araçuaí | 18.158 | 11.269 | 37,9 | 509 | 339 | 6.312 | 42 | 3 |
| Araxá | 15.854 | 14.189 | 10,5 | 730 | 148 | 735 | 231 | 182 |
| Barbacena | 18.062 | 16.202 | 10,3 | 1.453 | 40 | 279 | 84 | 144 |
| C. do Mato Dentro | 17.432 | 15.777 | 9,5 | 285 | 52 | 638 | 698 | 243 |
| Caparaó | 11.397 | 10.535 | 7,6 | 265 | 41 | 196 | 511 | 223 |
| Capinópolis | 14.174 | 12.853 | 9,3 | 510 | 618 | 151 | 110 | 71 |
| Caratinga | 16.091 | 14.987 | 6,9 | 271 | 363 | 465 | 421 | 150 |
| Carbonita | 11.352 | 0 | 100,0 | 71 | 12 | 11.343 | 2 | 11.349 |
| Cel. Pacheco | 14.088 | 13.741 | 2,5 | 124 | 5 | 185 | 40 | 37 |
| Diamantina | 14.738 | 11.777 | 20,1 | 1.496 | 883 | 909 | 964 | 163 |
| Formosa | 17.006 | 13.332 | 21,6 | 1.109 | 1.264 | 2.092 | 9 | 8 |
| Frutal | 14.532 | 4.009 | 72,4 | 924 | 275 | 9.658 | 588 | 60 |
| Guaratinga | 11.078 | 6.571 | 40,7 | 545 | 257 | 532 | 241 | 3.989 |
| Itamarandiba | 16.188 | 9.267 | 42,8 | 69 | 9 | 6.778 | 136 | 117 |
| Ituiutaba | 10.224 | 6.969 | 31,8 | 854 | 436 | 2.628 | 856 | 1.228 |
| Juiz de Fora | 18.184 | 16.780 | 7,7 | 398 | 243 | 476 | 605 | 76 |
| Lambari | 10.271 | 3.517 | 65,8 | 313 | 1.885 | 4.251 | 3.749 | 6.744 |
| Lavras | 17.574 | 17.059 | 2,9 | 109 | 12 | 65 | 166 | 288 |
| Machado | 12.305 | 12.036 | 2,2 | 48 | 23 | 82 | 88 | 105 |
| Paranaíba | 13.503 | 10.968 | 18,8 | 1.177 | 1.031 | 101 | 1.057 | 0 |
| P. de Minas | 17.626 | 17.015 | 3,5 | 23 | 36 | 484 | 99 | 72 |
| Pedra Azul | 13.844 | 12.135 | 12,3 | 1.164 | 86 | 312 | 371 | 320 |
| P. de Caldas | 16.893 | 10.064 | 40,4 | 52 | 381 | 5.016 | 2.398 | 1.474 |
| Salinas | 13.818 | 12.663 | 8,4 | 20 | 83 | 517 | 435 | 398 |
| São Lourenço | 18.462 | 16.449 | 10,9 | 544 | 24 | 759 | 864 | 51 |
| São Mateus | 14.827 | 6.456 | 56,5 | 163 | 217 | 768 | 2.520 | 7.870 |
| São S. do Paraíso | 11.041 | 7.993 | 27,6 | 233 | 343 | 2.970 | 373 | 336 |
| Uberaba | 17.241 | 16.409 | 4,8 | 264 | 233 | 318 | 374 | 157 |
| Viçosa | 16.272 | 15.287 | 6,1 | 52 | 74 | 248 | 108 | 645 |
| Vitória | 18.092 | 12.228 | 32,4 | 2.212 | 2.132 | 584 | 2.959 | 4.350 |

DI: Quantidade inicial de dados; DF: Quantidade de dados após análises de consistência; Tmax: Temperatura máxima do ar; Tmin: Temperatura mínima do ar; n: Número de horas de brilho solar; UR: Umidade relativa do ar; VV: Velocidade do vento.

3.3 Estimativa de evapotranspiração de referência (ET₀)

3.3.1 Método padrão FAO Penman-Monteith (FAO-PM)

Após tabulação e verificação dos dados, foram realizados os cálculos da ET₀ diária pelo método FAO-PM, conforme Equação 1 (ALLEN et al., 1998). Os parâmetros referentes à equação são relacionados a seguir (Equações 24 a 40), conforme (ALLEN et al., 1998).

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P \quad 23$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 Z_P}{293} \right) \quad 24$$

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})}{2} \quad 25$$

$$e^{\circ}(T) = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \quad 26$$

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad 27$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27T}{T + 237,3} \right) \right]}{(T + 237,2)^2} \quad 28$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad 29$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad 30$$

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad 31$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad 32$$

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad 33$$

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad 34$$

$$d_r = 1 + 0,33 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad 35$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad 36$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \left(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad 37$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad 38$$

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z - 5,42)} \quad 39$$

Em que:

u_z = Velocidade do vento medida acima da superfície do solo ($m s^{-1}$);

P = Pressão atmosférica (kPa);

z = Altitude da estação (m);

Z_P = Altitude (m);

R_{ns} = Saldo de radiação de ondas curtas ($MJ m^{-2} d^{-1}$);

R_{nl} = Saldo de radiação de ondas longas ($MJ m^{-2} d^{-1}$);

R_s = Radiação Solar ($MJ m^{-2} dia^{-1}$);

α = Albedo da cultura de referência (0,23);

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} MJ K^{-4} m^{-2} dia^{-1}$);

R_{so} = Radiação solar a céu claro ($MJ m^{-2} d^{-1}$);

G_{sc} = Constante solar ($MJ m^{-2} min^{-1}$);

d_r = Distância relativa entre a Terra e o Sol;

ω_s = Ângulo horário de nascer ou pôr do sol (rad);

δ = Declinação solar (rad);

φ = Latitude (rad);

a_s e b_s = Coeficientes da equação de Angstrom-Prescott (0,25 e 0,50 respectivamente);

J = Dia juliano entre 1 (1 de janeiro) a 365 (31 de dezembro) ou 366, se ano bissexto.

3.3.2 Método Hargreaves-Samani (HS)

Posteriormente, foi realizado o cálculo pelo método de Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1985), que é um método alternativo para o cálculo da ET_0 , muito utilizado quando se dispõe apenas de dados de temperatura máxima e temperatura mínima do ar. Foram realizados os cálculos de ET_0 utilizando-se os valores originais dos coeficientes A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} (Equação 2), sendo posteriormente aplicada a calibração destes coeficientes através da minimização do erro absoluto médio.

3.3.3 Método Proposto (MP)

Subsequentemente, houve a realização do cálculo da ET_0 por um novo método proposto (Equação 3), já empregado por Oliveira (2016) para séries históricas de estações meteorológicas situadas na porção mineira da bacia hidrográfica do Rio São Francisco no Estado de Minas Gerais.

3.4 Calibração do método Hargreaves-Samani e Método Proposto

Com a finalização dos procedimentos para o cálculo da ET_0 pelo método Hargreaves-Samani original, fez-se a calibração dos coeficientes dos métodos HS e MP. A calibração foi realizada objetivando modificar os coeficientes A_{HS} e C_{HS} e o expoente B_{HS} do método HS e os coeficientes A_{MP} , B_{MP} , C_{MP} , D_{MP} e E_{MP} do novo MP, para minimização do erro absoluto médio - EAM (WILLMOTT et al., 2012). Este processo foi realizado por meio do uso da ferramenta Solver da planilha eletrônica Microsoft Office Excel[®] 2016, configurando-a para aplicação do método de solução GRG não linear e convergência de 0,000001; no tópico “Derivativos” aplicou-se o marcador em “Encaminhar” e no tópico de “Multi-inicialização” foi marcada a opção “Limites Necessários em Variáveis”.

3.5 Estatísticas descritivas de testes dos modelos

Para analisar o desempenho dos métodos alternativos testados em comparações com o método padrão FAO Penman-Monteith, foram utilizadas diferentes estatísticas e indicadores, entre estes os propostos por Camargo e Sentelhas (1997), Willmott e Matsuura (2005) e Willmott et al. (2012).

Os métodos foram avaliados pelo erro absoluto médio (EAM), pela raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), a raiz quadrada do erro quadrático médio sistemático (REQMs), a raiz quadrada do erro quadrático médio não sistemático (REQMns), as proporções do erro quadrático médio sistemático e não sistemático, pelo índice de concordância de Willmott (d), pelo índice de confiança (C) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), cujos critérios de classificação são listados na Tabela 3, pelo coeficiente de correlação de Pearson (r), coeficiente determinação (R²), pela eficiência do modelo (EF), conforme Equações 41 a 47, além das médias, os desvios padrão (sd), o coeficiente de variação (cv) e os máximos e mínimos.

$$EAM = N_o^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad 40$$

$$REQM = EQM^{0,5} = \left[N_o^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad 41$$

$$REQMs = EQMs^{0,5} = \left[N_o^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad 42$$

$$REQMns = EQMns^{0,5} = \left[N_o^{-1} \sum_{i=1}^N (\hat{P}_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad 43$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad 44$$

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - O)^2} \right] \quad 45$$

$$C = r \times d \quad 46$$

Em que:

EQM = erro quadrático médio, mm² d⁻²;

EQMs = erro quadrático médio sistemático, mm² d⁻²;

EQMns = erro quadrático médio não sistemático, $\text{mm}^2 \text{d}^{-2}$;

\hat{P}_i = é o estimador de P_i com base no modelo de regressão linear, mm d^{-1} ;

N_o = número de observações;

P_i = valores estimados da ET (mm d^{-1});

O_i = valores de ET_0 calculados pelo método PM FAO 56 (mm d^{-1});

O = média dos valores de ET_0 obtida pelo método padrão, (mm.d^{-1});

r = coeficiente de correlação de Pearson;

d = índice de concordância de Willmott.

Tabela 3 - Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da ET_0 pelo índice “C” proposto por Camargo e Sentelhas (1997)

| Valor de “C” | Desempenho |
|--------------|------------|
| > 0,85 | Ótimo |
| 0,76 a 0,85 | Muito Bom |
| 0,66 a 0,75 | Bom |
| 0,61 a 0,65 | Mediano |
| 0,51 a 0,60 | Sofrível |
| 0,41 a 0,50 | Ruim |
| ≤ 0,40 | Péssimo |

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

3.6 Regressão linear

Realizou-se o procedimento de cálculo da regressão linear aplicando as funções “INTECEPÇÃO” para definição do valor do coeficiente linear (b_r), função “INCLINAÇÃO” para definir o coeficiente angular (a_r) e a função “RQUAD” para definição do coeficiente de determinação R^2 da planilha eletrônica Microsoft Office Excel® 2016. O modelo de regressão linear é descrito pela Equação 48

$$ET_0 = a_r ET_{0\text{ PM}} + b_r \quad 47$$

3.7 Análise de distribuição de probabilidade

Para comparação dos ajustes das distribuições de valores de ET_0 obtidos pelos métodos Hargreaves-Samani original e calibrado e Método Proposto em relação a distribuição obtida por meio do método padrão FAO Penman-Monteith, foi empregado o teste não paramétrico de Mann-Whitney (WILCOXON, 1945), ao nível de 5% de probabilidade através do software R

(v. 3.4.0) (R Core Team, 2016). Este teste visa a verificar se as distribuições das populações são idênticas, sem assumir que elas sigam a distribuição normal.

Foram também elaborados gráficos de distribuição de probabilidade com o software Microsoft Office Excel[®] 2016 com o objetivo de auxiliar na análise visual das distribuições.

3.8 Análise de tendência de ET_0

Foram avaliadas tendências de evapotranspiração de referência calculadas pelo método FAO Penman-Monteith nas estações de Araçuaí (Vale do Jequitinhonha), Caratinga (próximo ao Leste de Minas), Patos de Minas (Triângulo Mineiro), São Lourenço (sul do estado) e Vitória-ES (região litorânea). A escolha das estações foi realizada com o critério de que todas possuam datas próximas de início de disponibilidade de dados e caracterizarem diferentes regiões na área de estudo. Os dados de ET_0 foram divididos por bimestre, sendo:

- 1º bimestre (janeiro e fevereiro);
- 2º bimestre (março e abril);
- 3º bimestre (maio e junho);
- 4º bimestre (julho e agosto);
- 5º bimestre (setembro e outubro);
- 6º bimestre (novembro e dezembro).

Para analisar a tendência da ET_0 , foi utilizado o teste estatístico Mann-Kendall. O teste foi aplicado considerando o nível de significância de 5%. Foram calculadas a estatística S, variância de S [Var(S)], denominador (D), o coeficiente de correlação de Kendall (τ) e o p-valor do teste.

Para realização do teste, os dados de ET_0 foram preparados em planilha eletrônica MS Excel[®] 2016 com uso do ambiente de desenvolvimento Visual Basic para desenvolvimento de uma macro preparada visando à separação dos dados em médias e em bimestres para cada ano em que se desenvolveu o estudo. Após o preparo dos dados, foi utilizado o software R (v. 3.4.0) (R Core Team, 2016) para aplicação do teste de Mann Kendall, com o pacote Kendall, disponível no repositório de pacotes do software.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração do método Hargreaves-Samani e Método Proposto

Os coeficientes das equações de Hargreaves-Samani calibrado e do Método Proposto estão listados na Tabela 4 e Tabela 5. Para fins de precisão na apresentação dos resultados, os coeficientes e expoentes do método Hargreaves-Samani calibrado foram arredondados em 6, 3 e 4 casas decimais para A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} , respectivamente; para o Método Proposto foram arredondados em 6 casas decimais para todos os coeficientes. Com o procedimento de arredondamento, a variação no erro absoluto médio (EAM) foi inferior a 10^{-5} mm d⁻¹.

Tabela 4 - Coeficientes A_{HS} , B_{HS} e expoente C_{HS} , da equação de Hargreaves Samani calibrado localmente para cada estação convencional

| Estações | Coeficientes | | |
|-------------------|--------------|----------|----------|
| | A_{HS} | B_{HS} | C_{HS} |
| Aimorés | 0,002381 | -4,844 | 0,6938 |
| Araçuaí | 0,003050 | -2,048 | 0,5306 |
| Araxá | 0,001318 | 8,476 | 0,7836 |
| Barbacena | 0,001443 | 10,771 | 0,6639 |
| C. do Mato Dentro | 0,002493 | 2,725 | 0,5316 |
| Caparaó | 0,002871 | -0,338 | 0,5607 |
| Capinópolis | 0,001558 | 8,591 | 0,6860 |
| Caratinga | 0,002676 | -2,590 | 0,6449 |
| Cel. Pacheco | 0,002371 | -1,150 | 0,6135 |
| Diamantina | 0,001101 | 20,608 | 0,7364 |
| Formosa | 0,001516 | 12,949 | 0,6646 |
| Frutal | 0,002083 | 6,000 | 0,5892 |
| Guaratinga | 0,002295 | 0,089 | 0,6787 |
| Itamarandiba | 0,001972 | 10,616 | 0,5398 |
| Ituiutaba | 0,002297 | 1,657 | 0,5779 |
| Juiz de Fora | 0,001647 | 10,842 | 0,6442 |
| Lambari | 0,001283 | 4,519 | 0,6760 |
| Lavras | 0,001286 | 10,970 | 0,7358 |
| Machado | 0,001909 | 4,913 | 0,6070 |
| Paranaíba | 0,002683 | -0,699 | 0,5776 |
| P. de Minas | 0,001000 | 18,636 | 0,7575 |
| Pedra Azul | 0,002959 | 1,671 | 0,5396 |
| P. de Caldas | 0,002430 | 5,131 | 0,5197 |
| Salinas | 0,002423 | -1,557 | 0,6335 |
| São Lourenço | 0,002296 | 1,152 | 0,5986 |
| São Mateus | 0,003282 | -6,546 | 0,6451 |
| São S. do Paraíso | 0,002077 | 7,586 | 0,5590 |
| Uberaba | 0,001707 | 5,357 | 0,6875 |
| Viçosa | 0,002325 | 1,232 | 0,6154 |
| Vitória | 0,004116 | -2,534 | 0,5511 |

Tabela 5 - Coeficientes A_{MP} , B_{MP} , C_{MP} , D_{MP} e E_{MP} do Método Proposto calibrado localmente para cada estação convencional

| Estações | Coeficientes | | | | |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|----------|----------|
| | A_{MP} | B_{MP} | C_{MP} | D_{MP} | E_{MP} |
| Aimorés | 0,001163 | -0,000064 | -2,677941 | 0,057457 | 2,432574 |
| Araçuaí | 0,000838 | -0,000062 | -2,408044 | 0,04904 | 2,987566 |
| Araxá | 0,000935 | -0,000089 | -3,363896 | 0,046952 | 3,519001 |
| Barbacena | 0,001 | -0,000056 | -2,447916 | 0,033057 | 3,155007 |
| C. do Mato Dentro | 0,000837 | -0,000021 | -1,743834 | 0,037337 | 2,927549 |
| Caparaó | 0,000892 | -0,000027 | -1,875859 | 0,050593 | 2,719342 |
| Capinópolis | 0,000921 | -0,000112 | -3,71363 | 0,047824 | 3,615388 |
| Caratinga | 0,001106 | -0,000045 | -2,231497 | 0,058567 | 2,414097 |
| Cel. Pacheco | 0,001239 | -0,000019 | -1,696852 | 0,044582 | 2,164268 |
| Diamantina | 0,00069 | -0,000141 | -3,717841 | 0,039875 | 4,474882 |
| Formosa | 0,000744 | -0,000149 | -3,841521 | 0,043265 | 4,259608 |
| Frutal | 0,000946 | -0,0001 | -3,084723 | 0,042207 | 3,402767 |
| Guaratinga | 0,001314 | -0,000079 | -2,488216 | 0,045826 | 2,694635 |
| Itamarandiba | 0,000823 | -0,000056 | -2,196894 | 0,024777 | 3,567307 |
| Ituiutaba | 0,000616 | -0,000066 | -3,057873 | 0,049521 | 3,729945 |
| Juiz de Fora | 0,001048 | -0,000093 | -2,581779 | 0,031906 | 3,347468 |
| Lambari | 0,001064 | 0,000004 | -1,370662 | 0,030071 | 2,245665 |
| Lavras | 0,001148 | -0,00006 | -2,791125 | 0,037883 | 3,075116 |
| Machado | 0,000921 | -0,000051 | -2,336182 | 0,040775 | 2,976226 |
| Paranaíba | 0,00082 | -0,000115 | -3,412543 | 0,061931 | 3,257013 |
| P. de Minas | 0,002008 | -0,000068 | -2,355955 | 0,023742 | 2,57359 |
| Pedra Azul | 0,00067 | -0,000123 | -3,224657 | 0,054946 | 3,898238 |
| P. de Caldas | 0,001027 | -0,000033 | -1,721197 | 0,02871 | 2,893956 |
| Salinas | 0,001202 | -0,000022 | -1,936631 | 0,044653 | 2,366196 |
| São Lourenço | 0,000882 | -0,000027 | -2,127842 | 0,049072 | 2,757288 |
| São Mateus | 0,00127 | -0,000137 | -2,886563 | 0,064424 | 2,47882 |
| São S. do Paraíso | 0,001062 | -0,00006 | -2,358875 | 0,033185 | 3,059147 |
| Uberaba | 0,000695 | -0,000091 | -3,817426 | 0,052157 | 3,962464 |
| Viçosa | 0,000918 | -0,000031 | -2,054849 | 0,046971 | 2,811409 |
| Vitória | 0,001058 | -0,000359 | -3,462278 | 0,060349 | 3,602808 |

Observa-se que em nenhuma das estações meteorológicas convencionais e para nenhum método houve coeficiente igual a zero (Tabela 4 e Tabela 5). Contudo, na Tabela 4 verifica-se que para as estações nos municípios de Aimorés, Araçuaí, Caparaó, Caratinga, Coronel Pacheco, Paranaíba-MS, Salinas, São Mateus-ES e Vitória-ES obteve-se o coeficiente B_{HS} negativo no método Hargreaves-Samani calibrado. Os valores do coeficiente A_{HS} variaram de 0,001 a 0,004116; os coeficientes B_{HS} e C_{HS} variaram de -6,546 a 20,608 e de 0,5197 a 0,7836, respectivamente.

Feng et al. (2017), estudando a calibração do modelo de Hargreaves-Samani para a estimativa de ET_0 para a bacia de Sichuan no sudoeste da China através da Teoria Bayesiana, utilizando 19 estações meteorológicas entre 1961 a 2014, encontraram valores dos coeficientes variando de 0,213 a 0,218, 16,19 a 16,58, e 0,40 a 0,46 para A_{HS} , B_{HS} e C_{HS} , respectivamente. Borges e Mendiondo (2007) verificaram a precisão de vários métodos, entre eles, Hargreaves-Samani, para a bacia do rio Jacupiranga - SP, e indicaram que o método Hargreaves-Samani pode ser aplicado tanto na sua forma original como na modificada através de calibrações locais.

Já para o Método Proposto, os coeficientes B_{MP} e C_{MP} se destacaram por apresentarem todos os seus valores negativos, salvo o coeficiente B_{MP} da estação de Lambari ($B_{MP} = 0,000004$). Valores positivos foram constatados para os coeficientes A_{MP} , D_{MP} e E_{MP} (Tabela 5). As variações dos coeficientes A_{MP} , B_{MP} , C_{MP} , D_{MP} e E_{MP} foram de, respectivamente, 0,000616 a 0,002008, -0,000359 a 0,000004, -3,841521 e -1,370662, 0,023741 a 0,064424 e 2,164268 a 4,474882. Os maiores coeficientes foram encontrados para Patos de Minas ($A_{MP} = 0,002008$), Lambari ($B_{MP} = 0,000004$ e $C_{MP} = -1,370662$), São Mateus-ES ($D_{MP} = 0,064424$) e Diamantina ($E_{MP} = 4,474882$). Os menores coeficientes foram observados em Ituiutaba ($A_{MP} = 0,000616$), Vitória-ES ($B_{MP} = -0,000359$), Formosa-GO ($C_{MP} = -3,841521$), Patos de Minas ($D_{MP} = 0,023742$) e Coronel Pacheco ($E_{MP} = 2,164268$).

Oliveira (2016) estudando o Método Proposto para a bacia do rio São Francisco verificou valores próximos de zero para o coeficiente B_{MP} . Os valores máximos foram encontrados para as estações de Arinos ($A_{MP} = 0,086037$), João Pinheiro (0,000129; 2,929596 e 0,033381 para B_{MP} , C_{MP} e D_{MP} , respectivamente) e Pompéu ($E_{MP} = 1,825659$), já os valores mínimos foram observados em João Pinheiro (0,000788 e -2,532777 para A_{MP} e E_{MP} , respectivamente, e em Pompéu (-0,000047; -1,757979 e -0,043671 para B_{MP} , C_{MP} e D_{MP} , respectivamente).

4.2 Análise da estatística descritiva

Na Tabela 6 e Tabela 7 observam-se os valores de ET_0 máximo, mínimo e médio, e respectivos valores de desvio padrão e os coeficientes de variação para cada estação meteorológica convencional para o método padrão FAO Penman-Monteith (FAO-PM), para o método original de Hargreaves-Samani (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e para o Método Proposto (MP).

Tabela 6 - Estatística descritiva com valores máximo (Máx) e mínimo (Mín), média (Méd), desvio padrão (sd), em mm d⁻¹, e coeficientes de variação (cv) em %, dos métodos FAO Penman-Monteith (FAO-PM) e Hargreaves-Samani original (HS)

| Estações | FAO-PM | | | | | HS | | | | |
|-------------------|--------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|
| | Máx | Mín | Méd | sd | cv | Máx | Mín | Méd | sd | cv |
| Aimorés | 7,86 | 1,13 | 3,84 | 1,32 | 34,25 | 8,35 | 1,45 | 4,77 | 1,187 | 24,89 |
| Araçuaí | 7,74 | 1,15 | 3,79 | 1,19 | 31,45 | 8,37 | 1,42 | 4,85 | 1,171 | 24,15 |
| Araxá | 7,92 | 0,82 | 3,62 | 1,14 | 31,44 | 7,00 | 0,98 | 4,14 | 1,019 | 24,62 |
| Barbacena | 6,27 | 0,71 | 2,94 | 1,09 | 37,05 | 6,91 | 0,71 | 3,87 | 1,129 | 29,18 |
| C. do Mato Dentro | 7,16 | 1,08 | 3,33 | 1,13 | 33,85 | 8,12 | 1,03 | 4,49 | 1,197 | 26,66 |
| Caparaó | 7,13 | 1,04 | 3,23 | 1,17 | 36,25 | 7,49 | 1,11 | 4,18 | 1,123 | 26,86 |
| Capinópolis | 9,45 | 0,87 | 4,05 | 1,20 | 29,56 | 8,01 | 1,26 | 4,76 | 1,074 | 22,55 |
| Caratinga | 8,02 | 1,05 | 3,42 | 1,23 | 35,89 | 7,68 | 1,30 | 4,19 | 1,059 | 25,28 |
| Cel. Pacheco | 6,87 | 0,94 | 3,18 | 1,18 | 37,05 | 8,07 | 1,11 | 4,38 | 1,201 | 27,41 |
| Diamantina | 7,11 | 1,05 | 3,28 | 1,08 | 32,91 | 6,76 | 1,21 | 3,71 | 0,957 | 25,77 |
| Formosa | 7,62 | 1,29 | 3,75 | 1,02 | 27,07 | 7,90 | 1,36 | 4,32 | 0,890 | 20,58 |
| Frutal | 7,86 | 1,04 | 3,90 | 1,16 | 29,79 | 7,84 | 1,04 | 4,75 | 1,139 | 23,97 |
| Guaratinga | 7,35 | 1,22 | 3,69 | 1,27 | 34,51 | 7,31 | 1,38 | 4,25 | 1,136 | 26,71 |
| Itamarandiba | 6,12 | 1,05 | 3,18 | 1,03 | 32,27 | 7,13 | 1,18 | 4,09 | 1,098 | 26,85 |
| Ituiutaba | 8,38 | 1,18 | 3,81 | 1,09 | 28,59 | 8,09 | 1,06 | 4,96 | 1,091 | 22,00 |
| Juiz de Fora | 7,94 | 0,61 | 3,09 | 1,25 | 40,29 | 7,24 | 0,51 | 3,73 | 1,204 | 32,31 |
| Lambari | 5,99 | 0,93 | 2,81 | 1,02 | 36,39 | 8,23 | 1,46 | 4,82 | 1,283 | 26,63 |
| Lavras | 7,20 | 0,90 | 3,53 | 1,21 | 34,30 | 7,35 | 1,15 | 4,23 | 1,154 | 27,24 |
| Machado | 7,24 | 0,89 | 3,13 | 1,07 | 34,06 | 7,76 | 0,97 | 4,28 | 1,143 | 26,70 |
| Paranaíba | 7,87 | 0,92 | 3,84 | 1,22 | 31,79 | 8,01 | 1,23 | 4,75 | 1,119 | 23,55 |
| P. de Minas | 8,36 | 1,14 | 3,72 | 1,11 | 29,84 | 8,09 | 1,29 | 4,37 | 0,983 | 22,48 |
| Pedra Azul | 8,12 | 1,25 | 3,69 | 1,21 | 32,87 | 7,53 | 1,55 | 4,31 | 1,107 | 25,68 |
| P. de Caldas | 5,83 | 0,88 | 2,95 | 0,98 | 33,30 | 7,03 | 0,89 | 4,01 | 1,052 | 26,25 |
| Salinas | 8,10 | 1,32 | 3,86 | 1,28 | 33,22 | 8,05 | 1,43 | 4,78 | 1,163 | 24,33 |
| São Lourenço | 6,78 | 0,91 | 3,23 | 1,16 | 35,95 | 8,20 | 1,07 | 4,40 | 1,199 | 27,27 |
| São Mateus | 7,07 | 1,14 | 3,50 | 1,21 | 34,45 | 7,22 | 1,53 | 4,20 | 0,959 | 22,84 |
| São S. do Paraíso | 6,76 | 1,00 | 3,46 | 1,10 | 31,71 | 7,55 | 1,03 | 4,44 | 1,109 | 24,98 |
| Uberaba | 9,58 | 0,83 | 3,93 | 1,22 | 31,03 | 8,18 | 0,96 | 4,63 | 1,069 | 23,06 |
| Viçosa | 6,97 | 0,97 | 3,17 | 1,17 | 37,03 | 7,83 | 0,84 | 4,09 | 1,152 | 28,15 |
| Vitória | 8,55 | 1,08 | 3,87 | 1,43 | 36,85 | 7,56 | 1,10 | 3,70 | 1,085 | 29,32 |

Pode-se observar que para o método FAO-PM os limites superiores e inferiores dos valores de ET₀ máxima e mínima foram de 9,58 mm d⁻¹ em Uberaba e 5,83 mm d⁻¹ em Poços de Caldas, 1,32 mm d⁻¹ em Salinas e 0,61 mm d⁻¹ em Juiz de Fora. Para o método Hargreaves-Samani (HS), os limites superiores e inferiores de ET₀ máxima e mínima foram de 8,37 mm d⁻¹ em Araçuaí e 6,76 mm d⁻¹ em Diamantina, 1,55 mm d⁻¹ em Pedra Azul e 0,51 mm d⁻¹ em Juiz de Fora. Com relação aos valores de média, os extremos foram de 4,05 mm d⁻¹ em Capinópolis e 2,81 mm d⁻¹ em Lambari, para o método FAO-PM, e 4,96 mm d⁻¹ em Ituiutaba e 3,70 mm d⁻¹ em Vitória-ES para o método HS.

Destaca-se o viés de superestimação da ET₀ pelo método Hargreaves-Samani em 29 das 30 estações estudadas, sendo a exceção verificada para a estação de Vitória-ES. Este resultado pode ser explicado pela localização costeira da capital capixaba, em região sujeita a altos valores de velocidade do vento (valor médio de 3,36 ms⁻¹).

Alguns autores encontraram superestimações de ET_0 por HS em ambientes úmidos e subestimação em condições de muito vento, em comparação com o método padrão FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998; DROOGERS e ALLEN, 2002).

Na Tabela 6 evidencia-se que o método FAO-PM possui maior dispersão em relação à média quando comparado com o método HS. Os respectivos valores de CV são 40,29% em Juiz de Fora e 27,07% em Formosa-GO para o método FAO-PM, e 32,31% em Juiz de Fora e 20,58% em Formosa-GO para o método HS.

Na Tabela 7 pode-se observar que os valores limites da ET_0 máxima foi de 9,13 mm d⁻¹ para Vitória-ES e 5,44 mm d⁻¹ para Poços de Caldas, e para ET_0 mínima foi de 1,15 mm d⁻¹ para Pedra Azul e 0,23 mm d⁻¹ para Juiz de Fora, para o método Hargreaves-Samani calibrado (HSc). Para o Método Proposto (MP), os extremos de ET_0 máximo foram de 7,71 mm d⁻¹ para Aimorés e 5,35 mm d⁻¹ para Poços de Caldas e os valores extremos de ET_0 mínima foi de 0,94 mm d⁻¹ para Pedra Azul e 0,27 mm d⁻¹ para Barbacena.

Tabela 7 - Estatística descritiva com valores máximo (Máx) e mínimo (Min), média (Méd), desvio padrão (sd), em mm d^{-1} , e coeficientes de variação (cv) em %, dos métodos Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e Método Proposto (MP)

| Estações | HSc | | | | | MP | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|
| | Máx | Min | Méd | sd | cv | Máx | Min | Méd | sd | cv |
| Aimorés | 8,49 | 0,67 | 3,85 | 1,24 | 32,26 | 7,71 | 0,54 | 3,86 | 1,25 | 32,37 |
| Araçuaí | 7,12 | 0,91 | 3,78 | 1,07 | 28,34 | 6,88 | 0,80 | 3,79 | 1,08 | 28,59 |
| Araxá | 7,13 | 0,46 | 3,57 | 1,05 | 29,44 | 6,45 | 0,34 | 3,57 | 1,04 | 29,14 |
| Barbacena | 5,77 | 0,35 | 2,92 | 0,96 | 32,99 | 5,53 | 0,27 | 2,93 | 0,97 | 33,18 |
| C. do Mato Dentro | 6,57 | 0,66 | 3,28 | 0,99 | 30,31 | 6,49 | 0,74 | 3,28 | 0,99 | 30,32 |
| Caparaó | 6,73 | 0,67 | 3,20 | 1,05 | 32,90 | 6,52 | 0,64 | 3,21 | 1,06 | 32,94 |
| Capinópolis | 7,62 | 0,72 | 4,02 | 1,04 | 25,92 | 6,91 | 0,41 | 4,02 | 1,05 | 25,92 |
| Caratinga | 7,55 | 0,71 | 3,40 | 1,10 | 32,32 | 7,15 | 0,62 | 3,40 | 1,11 | 32,51 |
| Cel. Pacheco | 6,86 | 0,53 | 3,17 | 1,08 | 34,00 | 6,73 | 0,49 | 3,18 | 1,09 | 34,18 |
| Diamantina | 7,00 | 0,60 | 3,26 | 0,95 | 29,18 | 5,76 | 0,64 | 3,27 | 0,95 | 29,17 |
| Formosa | 7,59 | 0,87 | 3,71 | 0,88 | 23,65 | 6,10 | 0,64 | 3,71 | 0,87 | 23,65 |
| Frutal | 6,99 | 0,66 | 3,91 | 1,05 | 26,71 | 6,73 | 0,46 | 3,90 | 1,07 | 27,28 |
| Guaratinga | 7,47 | 0,86 | 3,72 | 1,23 | 33,14 | 7,12 | 0,81 | 3,73 | 1,24 | 33,36 |
| Itamarandiba | 5,73 | 0,81 | 3,14 | 0,90 | 28,71 | 5,46 | 0,72 | 3,15 | 0,91 | 28,78 |
| Ituiutaba | 6,78 | 0,61 | 3,78 | 0,96 | 25,46 | 6,37 | 0,51 | 3,77 | 0,95 | 25,33 |
| Juiz de Fora | 6,57 | 0,23 | 3,03 | 1,11 | 36,59 | 6,13 | 0,36 | 3,04 | 1,11 | 36,57 |
| Lambari | 5,54 | 0,61 | 2,85 | 0,90 | 31,50 | 5,59 | 0,65 | 2,85 | 0,89 | 31,36 |
| Lavras | 6,88 | 0,62 | 3,51 | 1,10 | 31,26 | 6,41 | 0,48 | 3,51 | 1,10 | 31,45 |
| Machado | 6,31 | 0,50 | 3,11 | 0,95 | 30,66 | 5,81 | 0,40 | 3,10 | 0,96 | 30,84 |
| Paranaíba | 7,36 | 0,58 | 3,83 | 1,08 | 28,09 | 7,03 | 0,42 | 3,83 | 1,10 | 28,69 |
| P. de Minas | 7,83 | 0,72 | 3,64 | 0,93 | 25,62 | 6,19 | 0,54 | 3,65 | 0,93 | 25,56 |
| Pedra Azul | 7,08 | 1,15 | 3,70 | 1,09 | 29,35 | 6,54 | 0,94 | 3,71 | 1,10 | 29,66 |
| P. de Caldas | 5,44 | 0,54 | 2,92 | 0,86 | 29,47 | 5,35 | 0,48 | 2,94 | 0,86 | 29,34 |
| Salinas | 7,54 | 0,82 | 3,82 | 1,16 | 30,38 | 7,39 | 0,89 | 3,82 | 1,16 | 30,31 |
| São Lourenço | 6,98 | 0,55 | 3,21 | 1,06 | 33,02 | 6,75 | 0,47 | 3,22 | 1,07 | 33,16 |
| São Mateus | 7,59 | 0,89 | 3,57 | 1,04 | 29,25 | 7,15 | 0,73 | 3,57 | 1,05 | 29,34 |
| São S. do Paraíso | 6,25 | 0,67 | 3,45 | 0,94 | 27,31 | 5,92 | 0,52 | 3,46 | 0,95 | 27,61 |
| Uberaba | 8,04 | 0,41 | 3,86 | 1,04 | 26,95 | 6,87 | 0,44 | 3,85 | 1,03 | 26,79 |
| Viçosa | 6,94 | 0,41 | 3,15 | 1,07 | 34,05 | 6,47 | 0,39 | 3,16 | 1,07 | 33,94 |
| Vitória | 9,13 | 0,86 | 3,89 | 1,34 | 34,51 | 7,42 | 0,66 | 3,90 | 1,36 | 34,86 |

Os extremos das médias de ET_0 não se alteraram entre os métodos HSc e MP (4,02 mm d^{-1} para Capinópolis e 2,85 mm d^{-1} para Lambari). Quando comparado com o método padrão FAO-PM, houve uma redução do valor médio de ET_0 na estação de Capinópolis de 0,03 mm d^{-1} . Para a estação de Lambari, ocorreu um acréscimo de 0,04 mm d^{-1} na média de ET_0 .

À vista disso, verifica-se que tanto a calibração local do método Hargreaves-Samani, quanto a aplicação do Método Proposto, aproximaram as médias de ET_0 ao método padrão FAO Penman-Monteith para todas as estações estudadas. As estações pertencentes aos municípios de Aimorés, Frutal, Guaratinga-BA, Lambari, Pedra Azul, São Mateus-ES e Vitória-ES obtiveram médias de ET_0 levemente acima dos valores calculados pelo método FAO-PM. Já para o restante das estações foram obtidos valores médios abaixo do calculado pelo método padrão.

As estatísticas e indicadores relativos à análise de desempenho dos métodos alternativos são apresentados da Tabela 8 à Tabela 12. Após análise do erro absoluto médio (EAM) presente na Tabela 8, verificou-se que para todas as estações convencionais estudadas, o Método Proposto (MP) foi superior aos outros dois métodos.

A variação do EAM para os métodos HS e HSc foi de 2,01 mm d⁻¹ (Lambari) a 0,59 mm d⁻¹ (Diamantina) e 0,65 mm d⁻¹ (Vitória-ES) a 0,34 mm d⁻¹ (São Lourenço), respectivamente.

Tabela 8 - Erro absoluto médio (EAM, mm d⁻¹), raiz do erro quadrático médio (REQM, mm d⁻¹), raiz do erro quadrático médio sistemático (REQMs, mm d⁻¹) e não-sistemático (REQMns, mm d⁻¹) para os métodos de estimativa de ET₀ Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP)

| Estações | EAM | | | REQM | | | REQMs | | | REQMns | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|--------|------|------|
| | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP |
| Aimorés | 0,95 | 0,42 | 0,41 | 1,10 | 0,54 | 0,53 | 0,96 | 0,18 | 0,17 | 0,53 | 0,51 | 0,50 |
| Araçuaí | 1,07 | 0,43 | 0,42 | 1,21 | 0,56 | 0,55 | 1,07 | 0,25 | 0,23 | 0,56 | 0,51 | 0,50 |
| Araxá | 0,73 | 0,54 | 0,53 | 0,91 | 0,69 | 0,68 | 0,63 | 0,30 | 0,30 | 0,65 | 0,62 | 0,61 |
| Barbacena | 0,95 | 0,41 | 0,40 | 1,09 | 0,53 | 0,52 | 0,94 | 0,25 | 0,24 | 0,56 | 0,47 | 0,47 |
| C. do Mato Dentro | 1,18 | 0,41 | 0,41 | 1,30 | 0,55 | 0,55 | 1,16 | 0,27 | 0,26 | 0,59 | 0,49 | 0,48 |
| Caparaó | 0,99 | 0,44 | 0,43 | 1,13 | 0,59 | 0,58 | 0,97 | 0,26 | 0,25 | 0,58 | 0,53 | 0,53 |
| Capinópolis | 0,86 | 0,59 | 0,56 | 1,07 | 0,75 | 0,74 | 0,81 | 0,38 | 0,37 | 0,70 | 0,65 | 0,64 |
| Caratinga | 0,83 | 0,44 | 0,43 | 0,97 | 0,58 | 0,57 | 0,82 | 0,26 | 0,25 | 0,51 | 0,51 | 0,51 |
| Cel. Pacheco | 1,21 | 0,41 | 0,40 | 1,33 | 0,54 | 0,53 | 1,21 | 0,22 | 0,21 | 0,57 | 0,49 | 0,49 |
| Diamantina | 0,59 | 0,45 | 0,44 | 0,75 | 0,58 | 0,57 | 0,52 | 0,27 | 0,27 | 0,53 | 0,51 | 0,50 |
| Formosa | 0,73 | 0,51 | 0,49 | 0,90 | 0,66 | 0,64 | 0,67 | 0,35 | 0,33 | 0,59 | 0,57 | 0,54 |
| Frutal | 0,89 | 0,47 | 0,45 | 1,06 | 0,60 | 0,59 | 0,87 | 0,27 | 0,24 | 0,60 | 0,54 | 0,54 |
| Guaratinga | 0,66 | 0,46 | 0,46 | 0,85 | 0,61 | 0,61 | 0,63 | 0,19 | 0,18 | 0,56 | 0,58 | 0,58 |
| Itamarandiba | 0,93 | 0,41 | 0,40 | 1,07 | 0,52 | 0,51 | 0,91 | 0,25 | 0,24 | 0,56 | 0,46 | 0,45 |
| Ituiutaba | 1,18 | 0,46 | 0,44 | 1,32 | 0,61 | 0,60 | 1,17 | 0,29 | 0,29 | 0,62 | 0,53 | 0,52 |
| Juiz de Fora | 0,80 | 0,55 | 0,53 | 0,98 | 0,71 | 0,70 | 0,69 | 0,34 | 0,32 | 0,70 | 0,63 | 0,62 |
| Lambari | 2,01 | 0,43 | 0,43 | 2,13 | 0,58 | 0,58 | 2,01 | 0,28 | 0,29 | 0,73 | 0,51 | 0,50 |
| Lavras | 0,78 | 0,47 | 0,46 | 0,95 | 0,59 | 0,58 | 0,74 | 0,26 | 0,24 | 0,60 | 0,54 | 0,53 |
| Machado | 1,16 | 0,36 | 0,35 | 1,26 | 0,48 | 0,47 | 1,15 | 0,22 | 0,21 | 0,52 | 0,43 | 0,42 |
| Paranaíba | 0,95 | 0,48 | 0,46 | 1,11 | 0,62 | 0,60 | 0,95 | 0,29 | 0,26 | 0,58 | 0,54 | 0,54 |
| P. de Minas | 0,81 | 0,52 | 0,51 | 0,98 | 0,68 | 0,67 | 0,74 | 0,38 | 0,37 | 0,63 | 0,57 | 0,55 |
| Pedra Azul | 0,72 | 0,49 | 0,47 | 0,89 | 0,62 | 0,61 | 0,67 | 0,28 | 0,26 | 0,58 | 0,56 | 0,55 |
| P. de Caldas | 1,07 | 0,37 | 0,36 | 1,18 | 0,49 | 0,48 | 1,06 | 0,24 | 0,23 | 0,53 | 0,43 | 0,42 |
| Salinas | 0,98 | 0,49 | 0,48 | 1,13 | 0,63 | 0,63 | 0,96 | 0,27 | 0,28 | 0,59 | 0,57 | 0,57 |
| São Lourenço | 1,17 | 0,34 | 0,33 | 1,26 | 0,45 | 0,44 | 1,17 | 0,19 | 0,18 | 0,47 | 0,41 | 0,41 |
| São Mateus | 0,83 | 0,59 | 0,58 | 1,06 | 0,79 | 0,78 | 0,85 | 0,41 | 0,40 | 0,63 | 0,67 | 0,66 |
| São S. do Paraíso | 1,00 | 0,45 | 0,44 | 1,16 | 0,59 | 0,58 | 0,99 | 0,30 | 0,29 | 0,60 | 0,51 | 0,50 |
| Uberaba | 0,87 | 0,56 | 0,54 | 1,04 | 0,73 | 0,72 | 0,80 | 0,39 | 0,39 | 0,66 | 0,62 | 0,60 |
| Viçosa | 0,94 | 0,39 | 0,38 | 1,07 | 0,51 | 0,51 | 0,94 | 0,21 | 0,21 | 0,51 | 0,47 | 0,46 |
| Vitória | 0,70 | 0,65 | 0,64 | 0,88 | 0,85 | 0,84 | 0,58 | 0,33 | 0,31 | 0,65 | 0,78 | 0,78 |

Desta forma, fica evidente a grande redução no valor de EAM após a calibração local do método Hargreaves-Samani. Para metade das estações estudadas obteve-se mais de 50% de redução nos valores do erro absoluto médio. Para a estação de Lambari obteve-se o maior

percentual de redução (78,51%), passando de 2,01 a 0,43 mm d⁻¹. Por outro lado, para a estação de Vitória-ES se obteve o menor percentual de redução do EAM, com apenas 7,45% (0,70 a 0,65 mm d⁻¹).

Quando busca-se um padrão de comportamento do desempenho dos métodos, verifica-se que o método Hargreaves-Samani original proporcionou os piores desempenhos concentrados nas estações pertencentes ao sul do estado de Minas Gerais. Este fato pode ser explicado pelas maiores altitudes e amplitudes nas temperaturas locais. Fato que não ocorreu após a calibração do método HS e aplicação do Método Proposto.

Sá Júnior et al (2012), em estudo de aplicação da classificação climática de Köppen para o estado de Minas Gerais, classificaram o sul do estado como predominantemente Cwa, ou seja, clima temperado húmido com inverno seco e verão quente. Este estudo explica o pior desempenho de estações presentes nessa região.

Em estudo aplicado à bacia de Sichuan no sudoeste da China, Feng et al. (2017), avaliando os modelos de estimativa de ET₀, verificaram que o método HS calibrado localmente apresentou os melhores desempenhos com o EAM de 0,433 mm d⁻¹, correspondendo a uma redução de 54,8% relativamente ao método HS original aplicado a esta região. Zhao et al. (2015) ajustaram a equação Hargreaves-Samani em base mensal, por meio de regressão linear para as regiões Norte, Nordeste e Noroeste da China, e obtiveram redução no EAM de 9,3, 9,6 e 10,8 mm mês⁻¹, respectivamente. Martí et al. (2015), modelando ET₀ em duas estações na Espanha entre 2007 a 2012, observaram melhoras de até 0,072 mm d⁻¹ no EAM após a calibração do método HS.

Borges Júnior et al. (2017) avaliaram o método HS e HS calibrado em diferentes escalas temporais para o município de Sete Lagoas-MG, tendo verificado que em qualquer base temporal, a calibração da equação reduziu expressivamente os valores de EAM, tornando o método mais exato. Em estudo realizado em Uberaba-MG, avaliaram diferentes métodos de estimativa de ET₀ e compararam com o método FAO-PM, tendo observado que o método HS na sua forma original alcançou um valor de EAM de 0,96 mm d⁻¹, considerado alto pelos autores.

Sob análise da Tabela 8, verificou-se que o Método Proposto (MP) calibrado regionalmente para cada estação meteorológica convencional obteve desempenho similar ao obtido com o método HSc. A variação do erro absoluto médio para o MP foi de 0,64 a 0,33 mm d⁻¹ para as estações de Vitória-ES e São Lourenço, respectivamente. Quando comparado com

HSc, obteve-se com o MP redução máxima de 0,03 mm d⁻¹; para algumas estações, não houve redução nos valores de EAM.

Na Tabela 8, observa-se que os extremos de REQM são 2,13 (Lambari) e 0,75 mm d⁻¹ (Diamantina) para o método Hargreaves-Samani e 0,85 (Vitória-ES) e 0,45 mm d⁻¹ (São Lourenço) para o método Hargreaves-Samani calibrado. A calibração do método HS reduziu os valores de REQM em mais de 50% nas estações de Aimorés, Araçuaí, Barbacena, Conceição do Mato Dentro, Poços de Caldas, Coronel Pacheco, Itamarandiba, Ituiutaba, Lambari, Machado, São Lourenço e Viçosa, sendo a estação de Lambari com a maior porcentagem de redução (72,85%). Por outro lado, a menor porcentagem de redução do REQM ocorreu na estação de Vitória-ES (3,28%). Quando a análise ocorre no Método Proposto (MP), verifica-se que o REQM variou de 0,84 a 0,44 mm d⁻¹ para as estações de Vitória-ES e São Lourenço, respectivamente. Como observado para o EAM, a redução referente ao REQM foi máxima de 0,03 mm d⁻¹ para as estações estudadas, quando se compara MP com HSc.

Berti et al. (2014) trabalharam com o método Hargreaves-Samani no noroeste da Itália calibrando apenas o coeficiente A_{HS} com o objetivo de verificar sua importância na equação, verificaram que os valores de REQM reduziram em média cerca de 30% quando relacionado com o método HS original. Gavilán et al. (2006), estudando calibrações regionais da equação de Hargreaves-Samani para estimativa de ET_0 em um ambiente semiárido, verificaram que quando compararam HS com o método FAO-PM, a REQM variou de 0,46 a 1,65 mm d⁻¹, com um valor médio de 0,80 mm d⁻¹.

Visando representar as principais tendências ou padrões nos valores observados, ou seja, nos valores estimados com o método FAO Penman-Monteith, a REQM_s deve ser próxima a zero, enquanto a REQM_ns deve ser próxima a REQM, com respeito a um “bom” modelo, conforme Willmott et al. (2012). Observa-se na Tabela 8 que houve as aproximações supracitadas, principalmente quando ocorreu a calibração das equações. Este fato demonstra que os valores das equações estimadas se aproximaram dos valores calculados pelo método FAO-PM.

Os coeficientes de correlação (r) estão registrados na Tabela 9 e exprimem a intensidade da associação linear existente entre as variáveis estudadas, sendo que quanto mais próximo de 1, mais perfeita será essa associação. Os valores encontrados para os métodos Hargreaves-Samani (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e Método Proposto (MP) variaram entre 0,92 a 0,75 (São Lourenço e Formosa-GO), 0,92 a 0,76 (São Lourenço e São Mateus-ES) e 0,92 a 0,77 (São Lourenço e São Mateus-ES), respectivamente.

Tabela 9 - Coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d), Eficiência do método (EF) e índice de confiança (C) para os métodos de estimativa de ET₀ Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP)

| Estações | r | | | d | | | EF | | | C | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP |
| Aimorés | 0,90 | 0,91 | 0,91 | 0,83 | 0,95 | 0,96 | 0,30 | 0,83 | 0,84 | 0,75 | 0,87 | 0,87 |
| Araçuaí | 0,88 | 0,88 | 0,89 | 0,79 | 0,94 | 0,94 | -0,03 | 0,78 | 0,79 | 0,69 | 0,82 | 0,83 |
| Araxá | 0,77 | 0,80 | 0,81 | 0,82 | 0,89 | 0,89 | 0,36 | 0,63 | 0,64 | 0,63 | 0,72 | 0,72 |
| Barbacena | 0,87 | 0,87 | 0,88 | 0,80 | 0,93 | 0,93 | -0,01 | 0,76 | 0,77 | 0,69 | 0,81 | 0,82 |
| C.do Mato Dentro | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,75 | 0,93 | 0,93 | -0,34 | 0,76 | 0,76 | 0,66 | 0,81 | 0,81 |
| Caparaó | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 0,80 | 0,93 | 0,93 | 0,07 | 0,75 | 0,75 | 0,68 | 0,80 | 0,81 |
| Capinópolis | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,79 | 0,88 | 0,88 | 0,21 | 0,61 | 0,62 | 0,60 | 0,69 | 0,70 |
| Caratinga | 0,88 | 0,88 | 0,89 | 0,84 | 0,94 | 0,94 | 0,38 | 0,78 | 0,79 | 0,74 | 0,83 | 0,83 |
| Cel. Pacheco | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,76 | 0,94 | 0,94 | -0,28 | 0,79 | 0,80 | 0,67 | 0,84 | 0,84 |
| Diamantina | 0,83 | 0,85 | 0,85 | 0,87 | 0,91 | 0,92 | 0,52 | 0,71 | 0,72 | 0,72 | 0,77 | 0,78 |
| Formosa | 0,75 | 0,76 | 0,78 | 0,79 | 0,87 | 0,88 | 0,22 | 0,57 | 0,61 | 0,59 | 0,66 | 0,69 |
| Frutal | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,81 | 0,92 | 0,93 | 0,17 | 0,73 | 0,75 | 0,69 | 0,79 | 0,80 |
| Guaratinga | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 0,88 | 0,94 | 0,94 | 0,56 | 0,77 | 0,77 | 0,76 | 0,83 | 0,83 |
| Itamarandiba | 0,86 | 0,86 | 0,87 | 0,79 | 0,92 | 0,93 | -0,09 | 0,74 | 0,75 | 0,68 | 0,80 | 0,80 |
| Ituiutaba | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,73 | 0,91 | 0,91 | -0,47 | 0,69 | 0,70 | 0,60 | 0,76 | 0,76 |
| Juiz de Fora | 0,81 | 0,83 | 0,83 | 0,84 | 0,90 | 0,91 | 0,38 | 0,67 | 0,69 | 0,69 | 0,75 | 0,75 |
| Lambari | 0,82 | 0,83 | 0,83 | 0,56 | 0,90 | 0,90 | -3,34 | 0,68 | 0,68 | 0,46 | 0,75 | 0,75 |
| Lavras | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 0,85 | 0,93 | 0,93 | 0,39 | 0,76 | 0,77 | 0,73 | 0,81 | 0,82 |
| Machado | 0,89 | 0,89 | 0,90 | 0,75 | 0,94 | 0,94 | -0,40 | 0,80 | 0,81 | 0,67 | 0,84 | 0,85 |
| Paranaíba | 0,86 | 0,86 | 0,87 | 0,81 | 0,92 | 0,93 | 0,17 | 0,74 | 0,76 | 0,69 | 0,80 | 0,81 |
| P. de Minas | 0,76 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,88 | 0,89 | 0,22 | 0,63 | 0,64 | 0,61 | 0,70 | 0,71 |
| Pedra Azul | 0,85 | 0,86 | 0,86 | 0,86 | 0,92 | 0,93 | 0,46 | 0,74 | 0,75 | 0,73 | 0,79 | 0,80 |
| P. de Caldas | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 0,74 | 0,93 | 0,93 | -0,44 | 0,75 | 0,76 | 0,64 | 0,80 | 0,81 |
| Salinas | 0,86 | 0,87 | 0,87 | 0,82 | 0,93 | 0,93 | 0,23 | 0,76 | 0,76 | 0,70 | 0,81 | 0,81 |
| São Lourenço | 0,92 | 0,92 | 0,92 | 0,78 | 0,96 | 0,96 | -0,17 | 0,85 | 0,85 | 0,72 | 0,88 | 0,89 |
| São Mateus | 0,75 | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,87 | 0,87 | 0,22 | 0,57 | 0,59 | 0,59 | 0,66 | 0,68 |
| São S. do Paraíso | 0,84 | 0,84 | 0,85 | 0,77 | 0,91 | 0,92 | -0,11 | 0,71 | 0,72 | 0,65 | 0,77 | 0,78 |
| Uberaba | 0,78 | 0,80 | 0,81 | 0,81 | 0,89 | 0,89 | 0,27 | 0,64 | 0,65 | 0,63 | 0,71 | 0,72 |
| Viçosa | 0,90 | 0,90 | 0,90 | 0,82 | 0,95 | 0,95 | 0,17 | 0,81 | 0,81 | 0,74 | 0,85 | 0,85 |
| Vitória | 0,80 | 0,81 | 0,82 | 0,87 | 0,90 | 0,90 | 0,62 | 0,65 | 0,66 | 0,70 | 0,73 | 0,74 |

Observou-se um ligeiro aumento no valor do r com a aplicação do método Hargreaves-Samani calibrado em relação ao método original e do Método Proposto com relação ao método Hargreaves-Samani calibrado, para a metade das estações. Já para outras (Aimorés, Conceição do Mato Dentro, Poços de Caldas, Caparaó, Coronel Pacheco, Diamantina, Frutal, Guaratinga-BA, Juiz de Fora, Lambari, Patos de Minas, Pedra Azul, Salinas, São Lourenço e Viçosa) não foram observadas melhoras na comparação do método HSc com o método MP.

No índice de concordância (d), observa-se um considerável aumento com a calibração do método Hargreaves-Samani. Os valores estão entre 0,88 (Guaratinga-BA) a 0,56 (Lambari) para o método HS e 0,96 (São Lourenço) a 0,87 (Formosa-GO) para o método HSc. Destacam-se os incrementos acima de 15% obtidos em d para as estações de Araçuaí, Conceição do Mato Dentro, Poços de Caldas, Coronel Pacheco, Ituiutaba, Lambari, Machado, São Lourenço e São Sebastião do Paraíso, sendo que para a estação de Lambari obteve-se incremento de 37,85% no

índice. Com relação ao Método Proposto (MP), os valores extremos do índice se igualam ao método HSc, com um leve aumento para as estações no geral (máximo de 1,35%).

Em estudos para a bacia do rio Jacupiranga, Borges e Mendiando (2007) observaram um coeficiente de correlação de 0,997 para os métodos Hargreaves-Samani original e calibrado; verificou-se também o índice de concordância de Willmott, em que o método HS original obteve um valor de 0,992, após calibração o valor subiu para 0,999, demonstrando que a calibração regional tornou a equação de Hargreaves-Samani confiável na região de estudo.

Avaliando a eficiência dos métodos (EF), observa-se expressivo aumento para o método HSc quando comparado com o método HS. A partir disto, 11 das 30 estações estudadas obtiveram um incremento maior que 100% em sua eficiência após calibração, destacando-se a estação de Lambari (592,03%). Por outro lado, para a estação da capital capixaba se obteve um incremento de apenas 3,75% em sua eficiência. Quanto ao MP, também verificou-se melhora na EF, com variação entre 0,11% a 5,83% quando compara-se com o método HSc.

Todorovic et al. (2013) avaliaram a estimativa de ET_0 em regiões adjacentes ao Mediterrâneo com quantidade limitada de dados, variando do clima úmido ao hiperárido, constatando que valores de eficiência do método HS entre 0,77 e 0,89.

Ainda na Tabela 9 e Tabela 10 apresentam-se, respectivamente, valores e classificação para o índice de confiança (C). A calibração local do método Hargreaves-Samani provocou um incremento no desempenho em praticamente todas as estações estudadas. Para as estações de Guaratinga-BA, Juiz de Fora e Vitória-ES não se constatou diferença quanto à classificação. Contudo, para algumas estações obteve-se acréscimos significativas com a calibração. Para as estações de Poços de Caldas e São Sebastião do Paraíso, a classificação foi alterada de “Mediano” para “Muito Bom”; para Capinópolis, Formosa-GO e São Mateus-ES passou-se de “Sofrível” para “Bom”; para Ituiutaba passou-se de “Sofrível” para “Muito Bom”. Destaca-se a alteração para Lambari, de “Ruim” para “Bom”. É válido ressaltar que o índice C foi desenvolvido para decêndios (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), ou seja, para avaliação dos dados em escalas de tempo menores, como no presente trabalho, os critérios utilizados tendem a ser mais rigorosos.

Avaliando métodos de estimativa de ET_0 em Cassilândia, Cunha et al. (2017) verificaram que para o método Hargreaves-Samani original se obteve um valor estatístico do índice de confiança (C) igual a 0,496, obtendo uma classificação de “Mau”. Já Oliveira et al. (2015) observaram que para a região de Rio Paranaíba-MG, o método HS original obteve um

valor de C de 0,512, sendo classificado como “Sofrível”. No entanto, após calibração o valor passou para 0,746, sendo classificado como “Bom”.

Tabela 10 - Classificação segundo índice C para os métodos de estimativa de ET₀ Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP)

| Estações | Classificação Índice C | | |
|-------------------|------------------------|-----------|-----------|
| | HS | HSc | MP |
| Aimorés | Bom | Ótimo | Ótimo |
| Araçuaí | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Araxá | Mediano | Bom | Bom |
| Barbacena | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| C. do Mato Dentro | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Caparaó | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Capinópolis | Sofrível | Bom | Bom |
| Caratinga | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Cel. Pacheco | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Diamantina | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Formosa | Sofrível | Bom | Bom |
| Frutal | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Guaratinga | Muito Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Itamarandiba | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Ituiutaba | Sofrível | Muito Bom | Muito Bom |
| Juiz de Fora | Bom | Bom | Bom |
| Lambari | Ruim | Bom | Bom |
| Lavras | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Machado | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Paranaíba | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| P. de Minas | Mediano | Bom | Bom |
| Pedra Azul | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| P. de Caldas | Mediano | Muito Bom | Muito Bom |
| Salinas | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| São Lourenço | Bom | Ótimo | Ótimo |
| São Mateus | Sofrível | Bom | Bom |
| São S. do Paraíso | Mediano | Muito Bom | Muito Bom |
| Uberaba | Mediano | Bom | Bom |
| Viçosa | Bom | Muito Bom | Muito Bom |
| Vitória | Bom | Bom | Bom |

Classificação segundo índice C (Camargo e Sentelhas, 1997).

Os valores de EQM estão apresentados na Tabela 11 e Tabela 12. Esta estatística é utilizada para avaliar a diferença entre um estimador (por regressão linear) e o verdadeiro valor da quantidade estimada, ou seja, verificar o tamanho da diferença dos métodos testados com o método padrão. Quanto mais o valor de EQM se aproxima de zero, mais preciso é o método testado.

Tabela 11 - Erro quadrático médio (EQM, $\text{mm}^2 \text{d}^{-2}$), Erro quadrático médio sistemático (EQMs, $\text{mm}^2 \text{d}^{-2}$) e não-sistemático (EQMns, $\text{mm}^2 \text{d}^{-2}$) para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Proposto (MP)

| Estações | EQM | | | EQMs | | | EQMns | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP |
| Aimorés | 1,20 | 0,29 | 0,28 | 0,93 | 0,03 | 0,03 | 0,28 | 0,26 | 0,25 |
| Araçuaí | 1,46 | 0,32 | 0,30 | 1,14 | 0,06 | 0,05 | 0,32 | 0,26 | 0,25 |
| Araxá | 0,83 | 0,48 | 0,47 | 0,40 | 0,09 | 0,09 | 0,43 | 0,39 | 0,38 |
| Barbacena | 1,20 | 0,28 | 0,27 | 0,88 | 0,06 | 0,06 | 0,32 | 0,22 | 0,22 |
| C. do Mato Dentro | 1,70 | 0,31 | 0,30 | 1,35 | 0,07 | 0,07 | 0,35 | 0,24 | 0,23 |
| Caparaó | 1,28 | 0,34 | 0,34 | 0,94 | 0,07 | 0,06 | 0,33 | 0,28 | 0,28 |
| Capinópolis | 1,14 | 0,56 | 0,54 | 0,65 | 0,14 | 0,14 | 0,49 | 0,42 | 0,41 |
| Caratinga | 0,94 | 0,33 | 0,32 | 0,68 | 0,07 | 0,06 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| Cel. Pacheco | 1,78 | 0,29 | 0,28 | 1,46 | 0,05 | 0,04 | 0,33 | 0,24 | 0,24 |
| Diamantina | 0,56 | 0,33 | 0,32 | 0,27 | 0,08 | 0,07 | 0,29 | 0,26 | 0,25 |
| Formosa | 0,80 | 0,44 | 0,40 | 0,45 | 0,12 | 0,11 | 0,35 | 0,32 | 0,29 |
| Frutal | 1,12 | 0,36 | 0,34 | 0,76 | 0,07 | 0,06 | 0,36 | 0,29 | 0,29 |
| Guaratinga | 0,72 | 0,37 | 0,37 | 0,40 | 0,04 | 0,03 | 0,32 | 0,33 | 0,34 |
| Itamarandiba | 1,14 | 0,27 | 0,26 | 0,83 | 0,06 | 0,06 | 0,31 | 0,21 | 0,20 |
| Ituiutaba | 1,74 | 0,37 | 0,35 | 1,36 | 0,08 | 0,08 | 0,38 | 0,28 | 0,27 |
| Juiz de Fora | 0,96 | 0,51 | 0,49 | 0,47 | 0,11 | 0,11 | 0,49 | 0,39 | 0,38 |
| Lambari | 4,55 | 0,34 | 0,33 | 4,02 | 0,08 | 0,08 | 0,53 | 0,26 | 0,25 |
| Lavras | 0,90 | 0,35 | 0,34 | 0,54 | 0,07 | 0,06 | 0,36 | 0,29 | 0,28 |
| Machado | 1,59 | 0,23 | 0,22 | 1,33 | 0,05 | 0,04 | 0,27 | 0,18 | 0,18 |
| Paranaíba | 1,24 | 0,38 | 0,35 | 0,90 | 0,09 | 0,07 | 0,33 | 0,30 | 0,29 |
| P. de Minas | 0,96 | 0,46 | 0,44 | 0,55 | 0,14 | 0,14 | 0,40 | 0,32 | 0,31 |
| Pedra Azul | 0,79 | 0,39 | 0,37 | 0,45 | 0,08 | 0,07 | 0,33 | 0,31 | 0,30 |
| P. de Caldas | 1,40 | 0,24 | 0,23 | 1,12 | 0,06 | 0,05 | 0,28 | 0,18 | 0,18 |
| Salinas | 1,27 | 0,40 | 0,40 | 0,92 | 0,08 | 0,08 | 0,35 | 0,32 | 0,32 |
| São Lourenço | 1,58 | 0,21 | 0,20 | 1,36 | 0,03 | 0,03 | 0,22 | 0,17 | 0,17 |
| São Mateus | 1,13 | 0,63 | 0,60 | 0,73 | 0,17 | 0,16 | 0,40 | 0,46 | 0,44 |
| São S. do Paraíso | 1,33 | 0,35 | 0,34 | 0,98 | 0,09 | 0,08 | 0,36 | 0,26 | 0,25 |
| Uberaba | 1,09 | 0,54 | 0,52 | 0,65 | 0,15 | 0,15 | 0,44 | 0,39 | 0,36 |
| Viçosa | 1,14 | 0,26 | 0,26 | 0,88 | 0,04 | 0,04 | 0,26 | 0,22 | 0,22 |
| Vitória | 0,77 | 0,72 | 0,70 | 0,34 | 0,11 | 0,10 | 0,42 | 0,61 | 0,60 |

Com a calibração, a redução do EQM ficou acima de $0,05 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ para todas as estações estudadas, com destaque para Araçuaí, Conceição do Mato Dentro, Poços de Caldas, Coronel Pacheco, Ituiutaba, Lambari, Machado e São Lourenço, com redução acima de $1,0 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$. Para a estação de Lambari novamente verificou-se a maior redução ($4,21 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$). O Método Proposto (MP), quando comparado ao método HSc, demonstrou uma leve redução no EQM, variando de 8,30% (Formosa-GO) a 0,37% (Guaratinga-BA).

A porção sistemática do erro quadrático médio (EQMs) variou de 4,02 em Lambari a $0,27 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ em Diamantina para o método Hargreaves-Samani, $0,17 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ em São Mateus-ES a $0,03 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ em Aimorés, $0,16 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ em São Mateus-ES a $0,03 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ em Aimorés para os métodos Hargreaves-Samani calibrado e o Método Proposto, respectivamente. Já para a porção não sistemática do erro quadrático médio (EQMns), obteve-se extremos de $0,53 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ (Lambari) a $0,22 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ (São Lourenço), $0,61 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ (Vitória-ES) a $0,17 \text{ mm}^2 \text{d}^{-2}$ (São

Lourenço) e $0,60 \text{ mm}^2 \text{ d}^{-2}$ (Vitória-ES) a $0,17 \text{ mm}^2 \text{ d}^{-2}$ (São Lourenço) para os métodos Hargreaves-Samani, Hargreaves-Samani calibrado e Método Proposto, respectivamente.

Tabela 12 - Proporção sistemática (EQMs/EQM, %) e não sistemática (EQMns/EQM, %) do erro quadrático médio para os métodos de estimativa de ET_0 Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e do Método Proposto (MP)

| Estações | EQMs/EQM | | | EQMns/EQM | | |
|-------------------|----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| | HS | HSc | MP | HS | HSc | MP |
| Aimorés | 76,86 | 11,28 | 10,63 | 23,14 | 88,72 | 89,37 |
| Araçuaí | 78,24 | 19,27 | 17,71 | 21,76 | 80,73 | 82,29 |
| Araxá | 48,33 | 18,42 | 19,28 | 51,69 | 81,58 | 80,72 |
| Barbacena | 73,35 | 21,88 | 20,69 | 26,65 | 78,12 | 79,31 |
| C. do Mato Dentro | 79,36 | 23,01 | 23,07 | 20,64 | 76,99 | 76,93 |
| Caparaó | 73,82 | 19,70 | 19,03 | 26,18 | 80,30 | 80,97 |
| Capinópolis | 57,15 | 25,65 | 24,86 | 42,85 | 74,35 | 75,14 |
| Caratinga | 72,33 | 20,23 | 19,04 | 27,67 | 79,77 | 80,96 |
| Cel. Pacheco | 81,71 | 16,44 | 15,39 | 18,29 | 83,56 | 84,61 |
| Diamantina | 48,60 | 22,60 | 22,17 | 51,40 | 77,40 | 77,83 |
| Formosa | 56,18 | 27,19 | 27,14 | 43,82 | 72,81 | 72,86 |
| Frutal | 67,79 | 19,72 | 16,94 | 32,21 | 80,28 | 83,06 |
| Guaratinga | 55,69 | 9,50 | 8,53 | 44,31 | 90,50 | 91,47 |
| Itamarandiba | 72,81 | 23,16 | 22,20 | 27,19 | 76,84 | 77,80 |
| Ituiutaba | 78,16 | 22,82 | 23,73 | 21,84 | 77,18 | 76,27 |
| Juiz de Fora | 48,91 | 22,45 | 21,61 | 51,09 | 77,55 | 78,39 |
| Lambari | 88,44 | 23,89 | 24,55 | 11,56 | 76,11 | 75,45 |
| Lavras | 60,20 | 18,71 | 17,55 | 39,80 | 81,29 | 82,45 |
| Machado | 83,21 | 20,38 | 19,84 | 16,79 | 79,62 | 80,16 |
| Paranaíba | 73,04 | 22,30 | 19,09 | 26,96 | 77,70 | 80,91 |
| P. de Minas | 57,86 | 30,69 | 30,53 | 42,14 | 69,31 | 69,47 |
| Pedra Azul | 57,59 | 20,25 | 18,48 | 42,41 | 79,75 | 81,52 |
| P. de Caldas | 80,03 | 23,57 | 23,21 | 19,97 | 76,43 | 76,79 |
| Salinas | 72,48 | 18,85 | 19,18 | 27,52 | 81,15 | 80,82 |
| São Lourenço | 86,22 | 16,75 | 15,74 | 13,78 | 83,25 | 84,26 |
| São Mateus | 64,40 | 27,42 | 26,70 | 35,60 | 72,58 | 73,30 |
| São S. do Paraíso | 73,14 | 26,23 | 24,52 | 26,86 | 73,77 | 75,48 |
| Uberaba | 59,38 | 28,24 | 29,23 | 40,62 | 71,76 | 70,77 |
| Viçosa | 77,10 | 16,30 | 16,55 | 22,90 | 83,70 | 83,45 |
| Vitória | 44,60 | 15,41 | 13,89 | 55,40 | 84,59 | 86,11 |

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das proporções sistemáticas e não sistemáticas do erro quadrático médio. Verificou-se uma forte alteração nas proporções após a calibração do método Hargreaves-Samani. A estação de São Lourenço se destacou obtendo-se 69,46 pontos percentuais de redução da proporção sistemática, enquanto para a estação de Diamantina se obteve o menor valor de redução, com apenas 26 pontos percentuais. Em relação ao Método Proposto, verificou-se uma pequena diferença quando comparado com o método HSc; para as estações de Araxá, Conceição do Mato Dentro, Ituiutaba, Lambari, Salinas, Uberaba e Viçosa foram obtidos acréscimos de até 1% na proporção sistemática do EQM. Já para as demais estações, verificou-se decréscimos de no máximo 3,22%.

A porção sistemática representa a soma dos erros que se acumulam sistematicamente, provenientes das estimativas das variáveis de entrada das equações de estimativa da ET_0 e até mesmos de características referentes a essas equações. Sendo assim, são erros que podem ser mitigados com a calibração. Essa redução do erro foi observada quando o método Hargreaves-Samani sofreu calibração local e, também, quando foi aplicado o Método Proposto.

4.3 Análise de regressão

Os coeficientes angular, linear e o R^2 das análises de regressão para cada método estudado são apresentados na Tabela 13 e os gráficos de regressão linear referentes aos métodos Hargreaves-Samani original, Hargreaves-Samani calibrado e Método Proposto, todos relacionados com o método padrão FAO Penman-Monteith para cada estação estudada, estão dispostos entre a Figura 2 e a Figura 31.

Tabela 13 - Coeficientes angular a_r , linear b_r e de determinação R^2 das análises de regressão linear dos métodos de Hargreaves-Samani (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e do Método Proposto (MP) relacionados com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM)

| Estações | HS | | | HSc | | | MP | | |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | a_r | b_r | R^2 | a_r | b_r | R^2 | a_r | b_r | R^2 |
| Aimorés | 0,8083 | 1,6643 | 0,8022 | 0,8623 | 0,5421 | 0,8322 | 0,8683 | 0,5228 | 0,8367 |
| Araçuaí | 0,8609 | 1,5839 | 0,7680 | 0,7931 | 0,7754 | 0,7779 | 0,8052 | 0,7342 | 0,7862 |
| Araxá | 0,6870 | 1,6555 | 0,5873 | 0,7424 | 0,8832 | 0,6459 | 0,7394 | 0,8971 | 0,6526 |
| Barbacena | 0,8978 | 1,2306 | 0,7500 | 0,7728 | 0,6489 | 0,7632 | 0,7821 | 0,6270 | 0,7700 |
| C. do Mato | | | | | | | | | |
| Dentro | 0,9223 | 1,4177 | 0,7546 | 0,7690 | 0,7172 | 0,7611 | 0,7704 | 0,7108 | 0,7641 |
| Caparaó | 0,8216 | 1,5245 | 0,7350 | 0,7793 | 0,6838 | 0,7513 | 0,7832 | 0,6799 | 0,7529 |
| Capinópolis | 0,6814 | 2,0009 | 0,5770 | 0,6828 | 1,2584 | 0,6140 | 0,6937 | 1,2130 | 0,6279 |
| Caratinga | 0,7565 | 1,6007 | 0,7686 | 0,7901 | 0,6939 | 0,7808 | 0,7983 | 0,6705 | 0,7855 |
| Cel. Pacheco | 0,8967 | 1,5288 | 0,7739 | 0,8155 | 0,5793 | 0,7934 | 0,8227 | 0,5613 | 0,7966 |
| Diamantina | 0,7356 | 1,3019 | 0,6876 | 0,7456 | 0,8180 | 0,7142 | 0,7521 | 0,8043 | 0,7238 |
| Formosa | 0,6533 | 1,8722 | 0,5558 | 0,6610 | 1,2350 | 0,5840 | 0,6760 | 1,1769 | 0,6154 |
| Frutal | 0,8331 | 1,4990 | 0,7231 | 0,7708 | 0,9046 | 0,7349 | 0,7922 | 0,8125 | 0,7477 |
| Guaratinga | 0,7747 | 1,3948 | 0,7538 | 0,8548 | 0,5654 | 0,7800 | 0,8647 | 0,5406 | 0,7828 |
| Itamarandiba | 0,9219 | 1,1574 | 0,7421 | 0,7586 | 0,7308 | 0,7443 | 0,7661 | 0,7152 | 0,7511 |
| Ituiutaba | 0,8271 | 1,8089 | 0,6808 | 0,7358 | 0,9745 | 0,6939 | 0,7357 | 0,9682 | 0,7033 |
| Juiz de Fora | 0,7847 | 1,2986 | 0,6601 | 0,7346 | 0,7588 | 0,6816 | 0,7430 | 0,7453 | 0,6923 |
| Lambari | 1,0342 | 1,9093 | 0,6804 | 0,7263 | 0,8105 | 0,6840 | 0,7233 | 0,8156 | 0,6861 |
| Lavras | 0,8137 | 1,3594 | 0,7302 | 0,7888 | 0,7193 | 0,7604 | 0,7994 | 0,6854 | 0,7702 |
| Machado | 0,9559 | 1,2884 | 0,7955 | 0,7984 | 0,6076 | 0,7987 | 0,8055 | 0,5799 | 0,8062 |
| Paranaíba | 0,7857 | 1,7364 | 0,7336 | 0,7608 | 0,9123 | 0,7439 | 0,7867 | 0,8123 | 0,7623 |
| P. de Minas | 0,6763 | 1,8559 | 0,5834 | 0,6687 | 1,1550 | 0,6330 | 0,6753 | 1,1360 | 0,6464 |
| Pedra Azul | 0,7777 | 1,4379 | 0,7271 | 0,7686 | 0,8647 | 0,7366 | 0,7838 | 0,8137 | 0,7480 |
| P. de Caldas | 0,9255 | 1,2740 | 0,7482 | 0,7607 | 0,6767 | 0,7542 | 0,7660 | 0,6768 | 0,7633 |
| Salinas | 0,7807 | 1,7635 | 0,7422 | 0,7886 | 0,7762 | 0,7598 | 0,7877 | 0,7794 | 0,7616 |
| S. Lourenco | 0,9510 | 1,3248 | 0,8483 | 0,8406 | 0,4969 | 0,8473 | 0,8486 | 0,4754 | 0,8537 |
| São Mateus | 0,5977 | 2,1080 | 0,5641 | 0,6606 | 1,2566 | 0,5819 | 0,6735 | 1,2174 | 0,5994 |
| São S. do | | | | | | | | | |
| Paraíso | 0,8499 | 1,4938 | 0,7084 | 0,7241 | 0,9472 | 0,7099 | 0,7384 | 0,9004 | 0,7212 |
| Uberaba | 0,6870 | 1,9360 | 0,6136 | 0,6844 | 1,1732 | 0,6425 | 0,6872 | 1,1554 | 0,6579 |
| Viçosa | 0,8812 | 1,3026 | 0,8037 | 0,8239 | 0,5446 | 0,8093 | 0,8236 | 0,5494 | 0,8119 |
| Vitória | 0,6080 | 1,3455 | 0,6391 | 0,7675 | 0,9224 | 0,6638 | 0,7825 | 0,8694 | 0,6744 |

Figura 2 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Aimorés

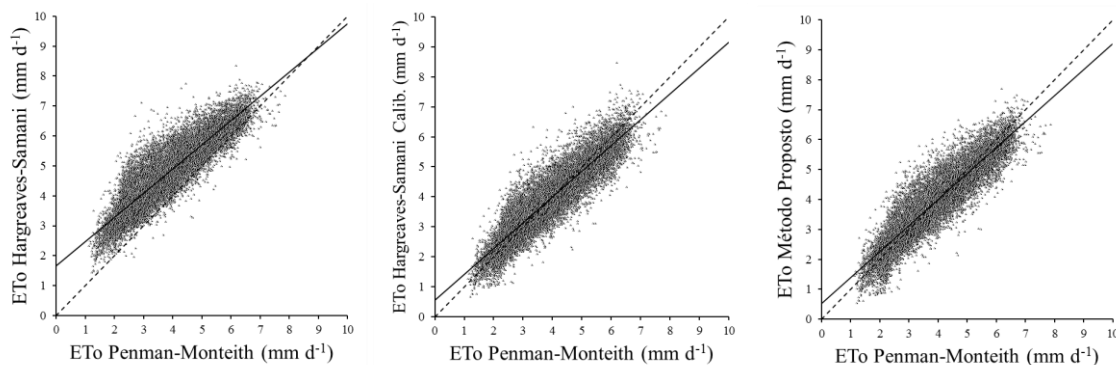


Figura 3 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Araçuaí

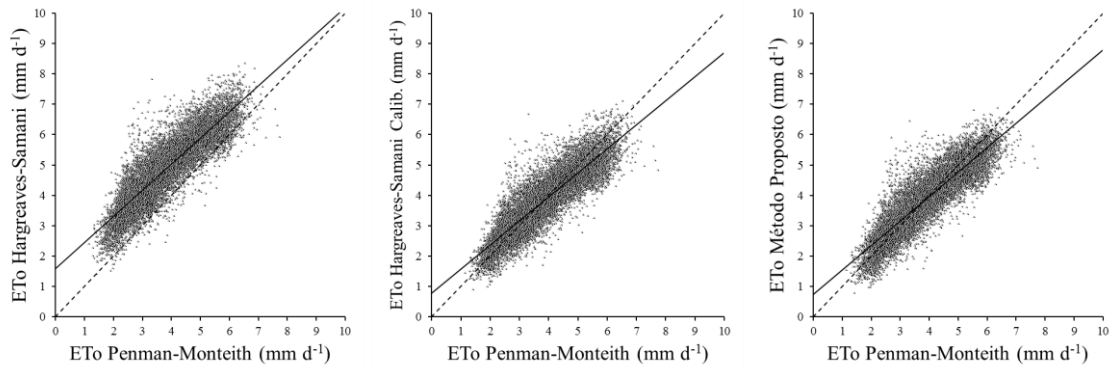


Figura 4 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Araxá

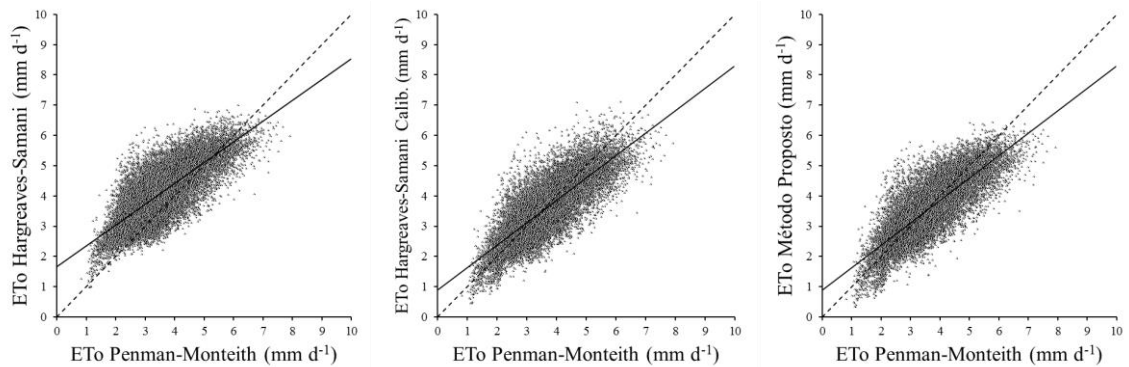


Figura 5 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Barbacena

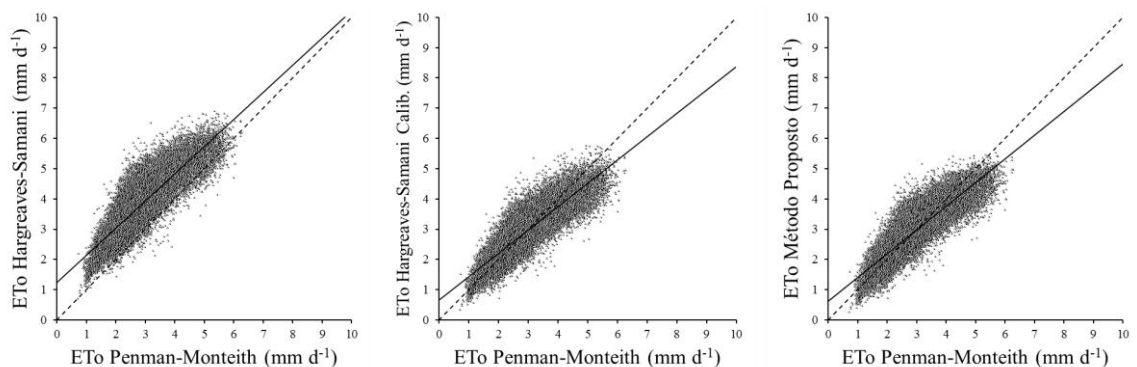


Figura 6 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Conceição do Mato Dentro

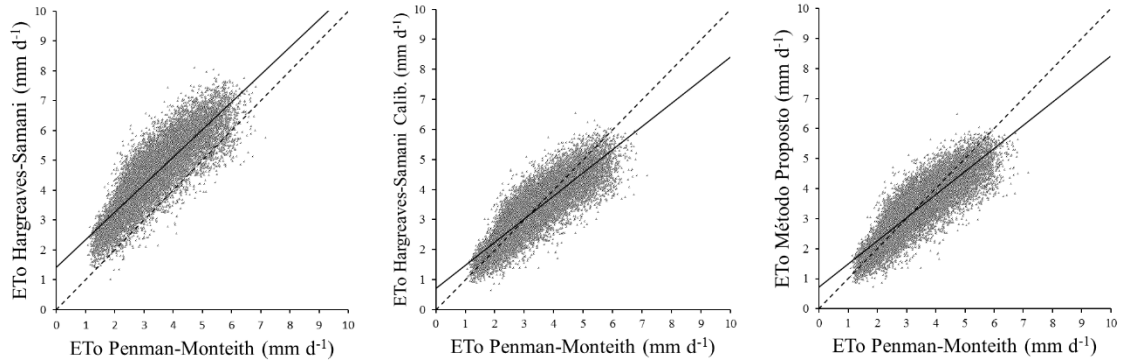


Figura 7 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Poços de Caldas

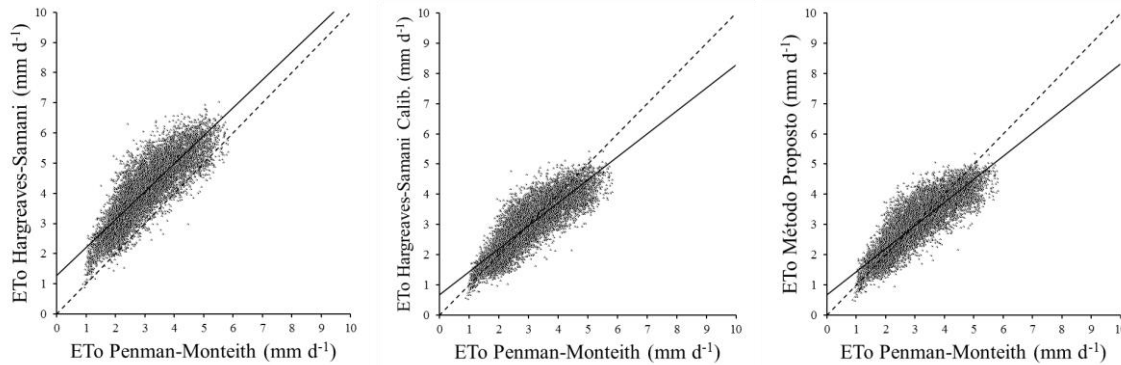


Figura 8 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Caparaó

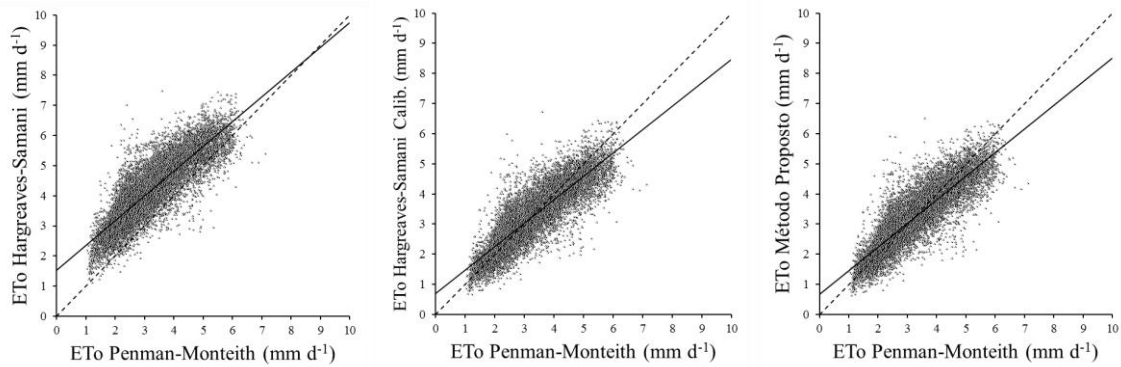


Figura 9 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Capinópolis

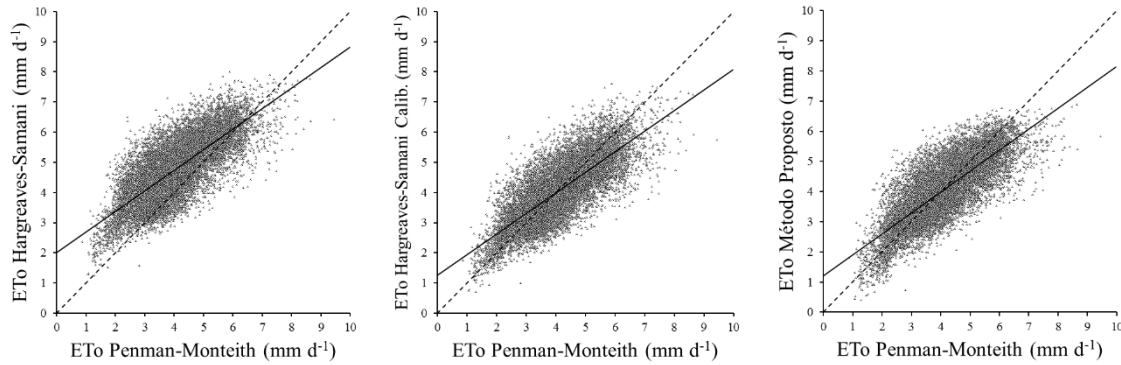


Figura 10 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Caratinga

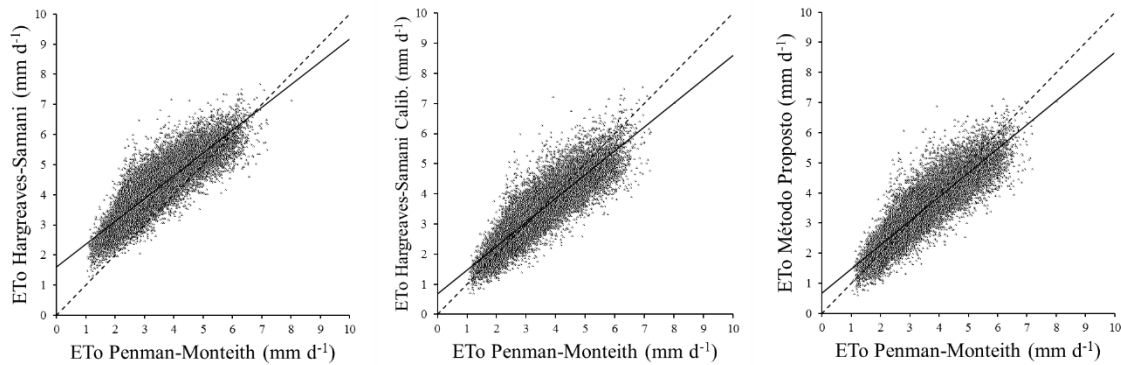


Figura 11 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Coronel Pacheco

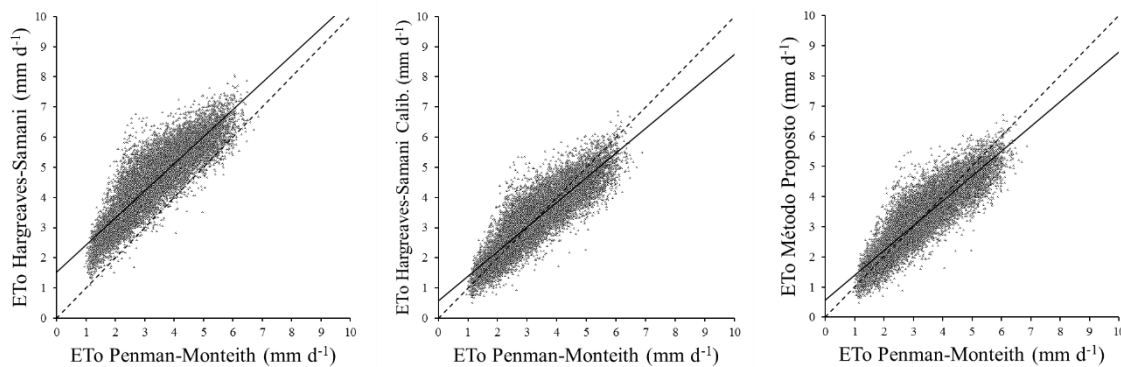


Figura 12 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Diamantina

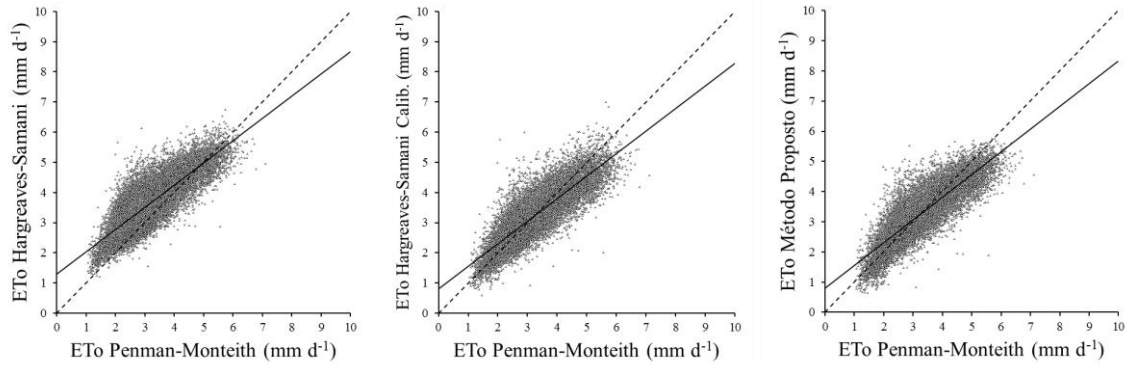


Figura 13 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Formosa-GO

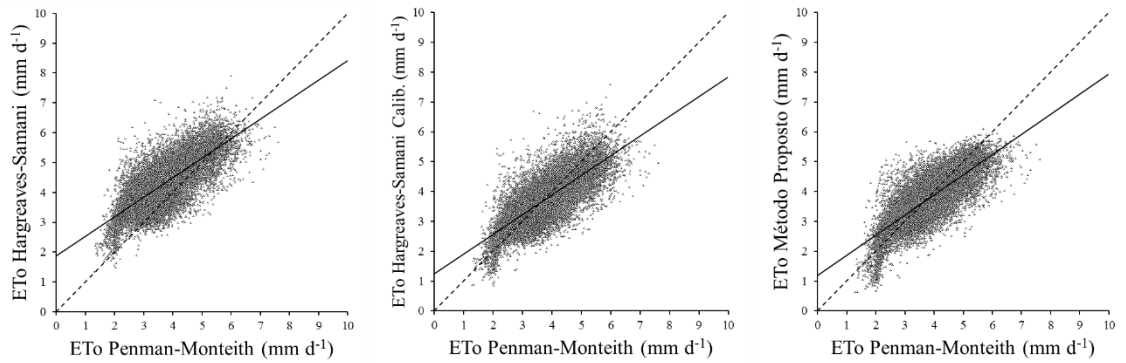


Figura 14 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Frutal

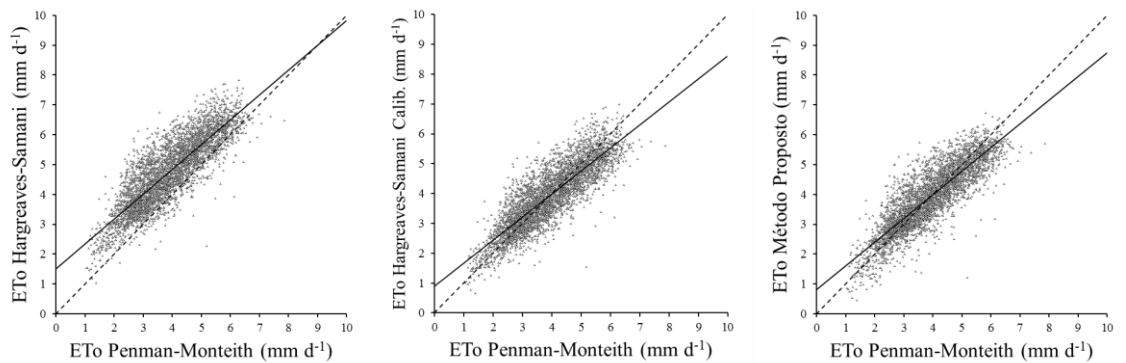


Figura 15 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Guaratinga-BA

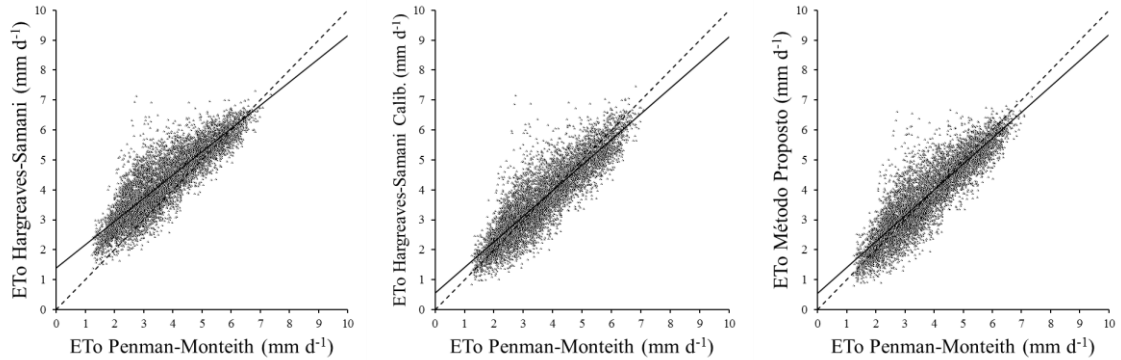


Figura 16 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Itamarandiba

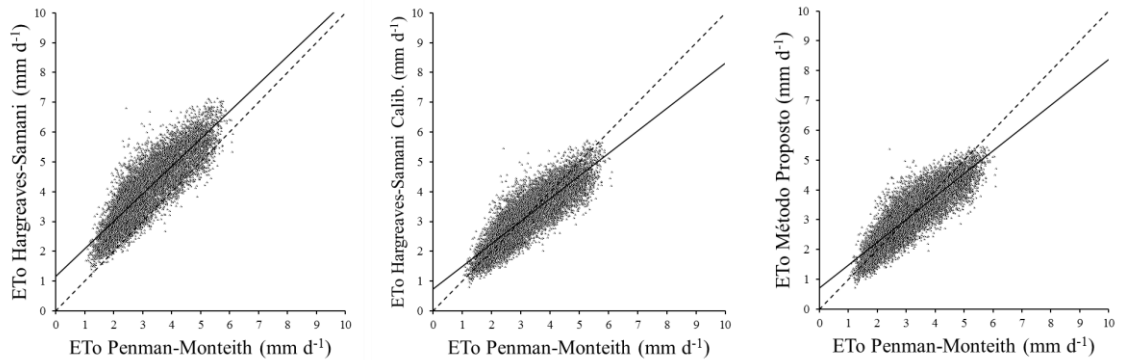


Figura 17 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Ituiutaba

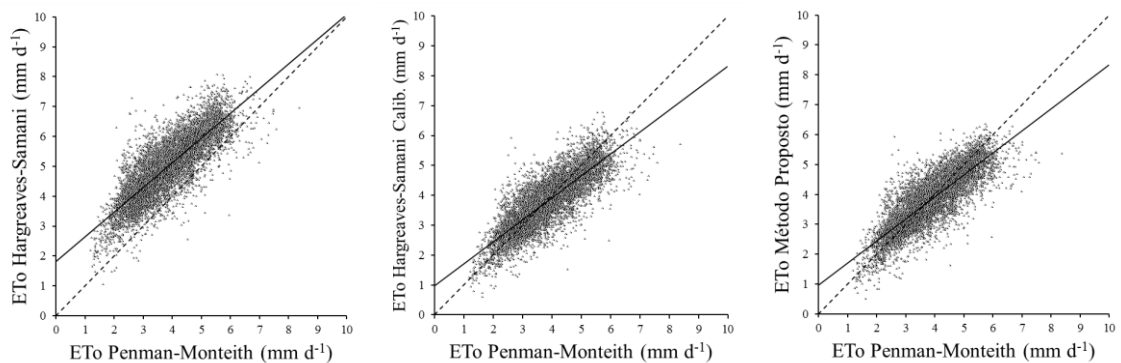


Figura 18 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Juiz de Fora

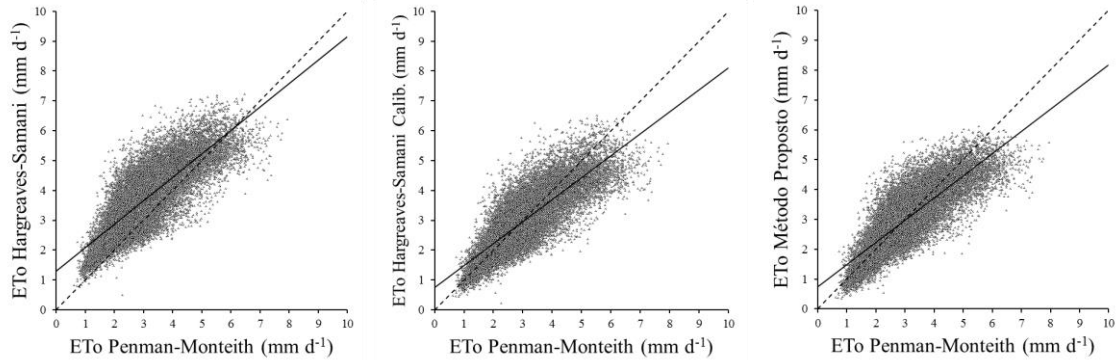


Figura 19 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Lambari

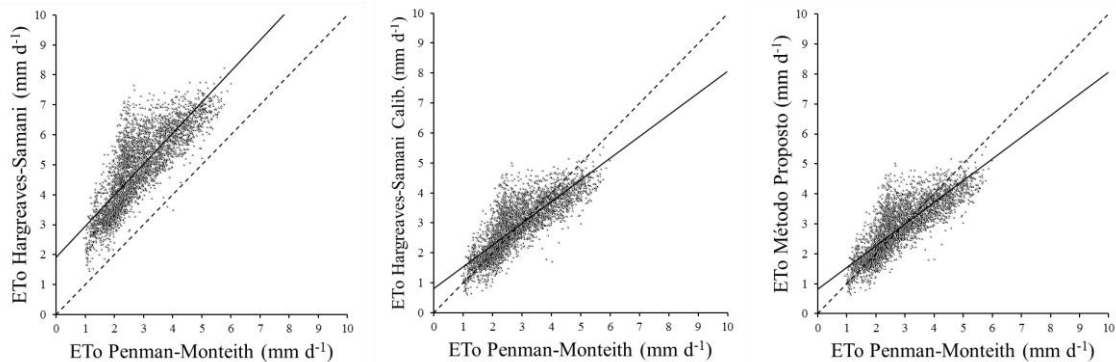


Figura 20 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Lavras

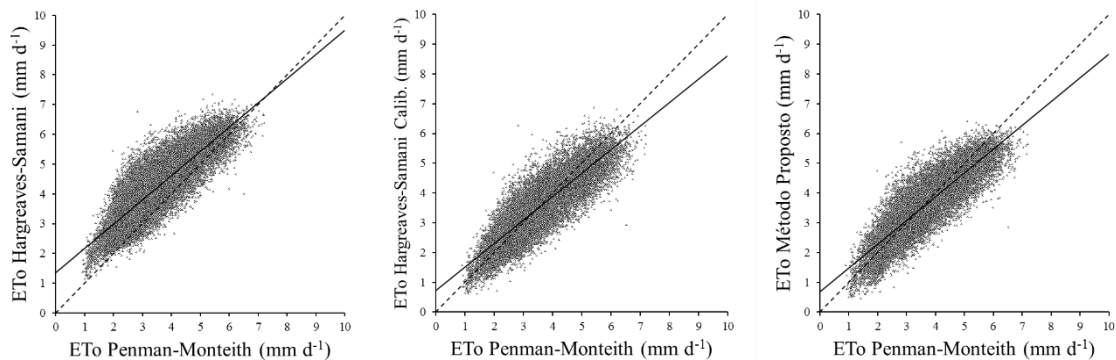


Figura 21 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Machado

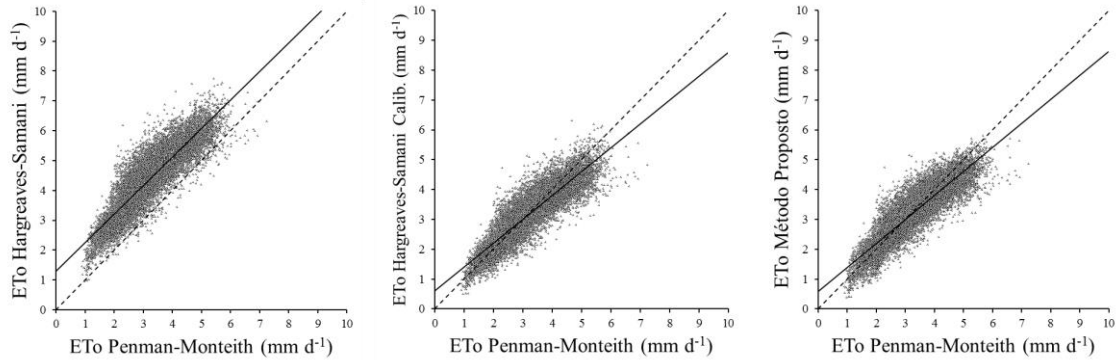


Figura 22 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Paranaíba-MS

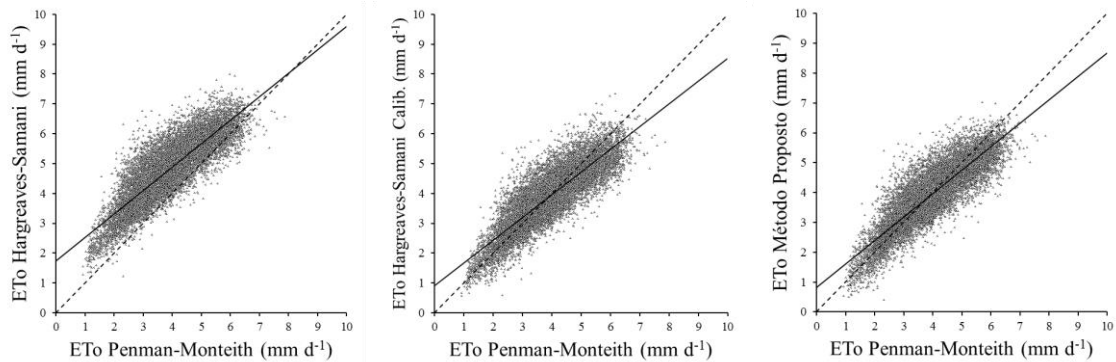


Figura 23 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Patos de Minas

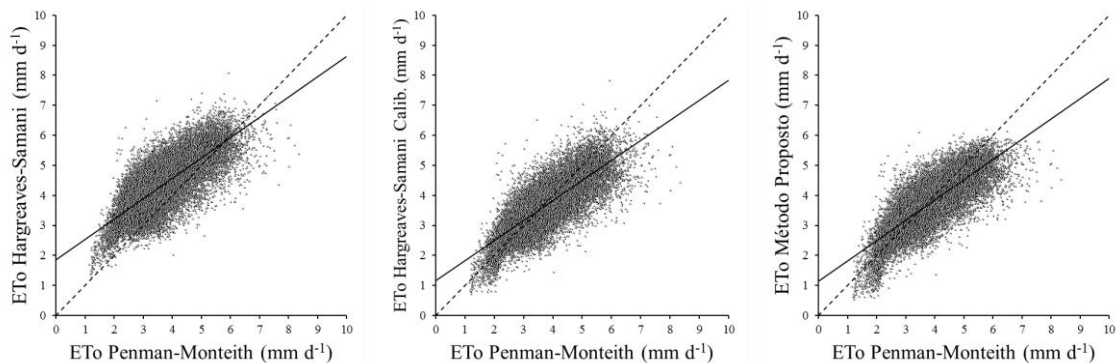


Figura 24 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Pedra Azul

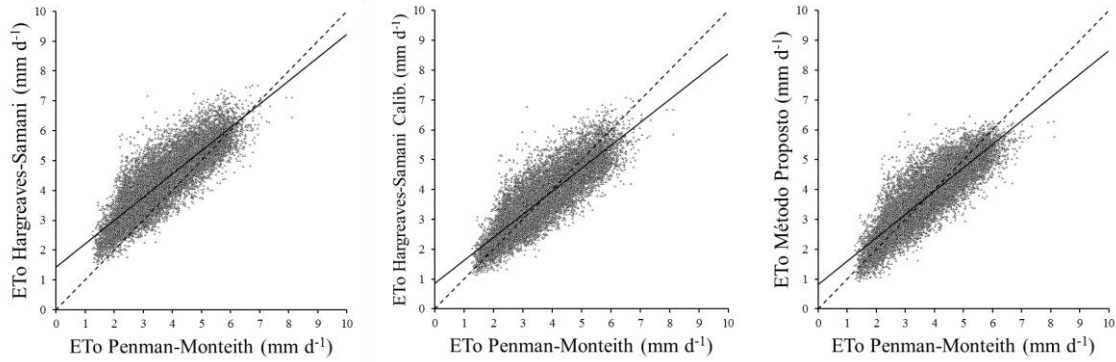


Figura 25 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Salinas

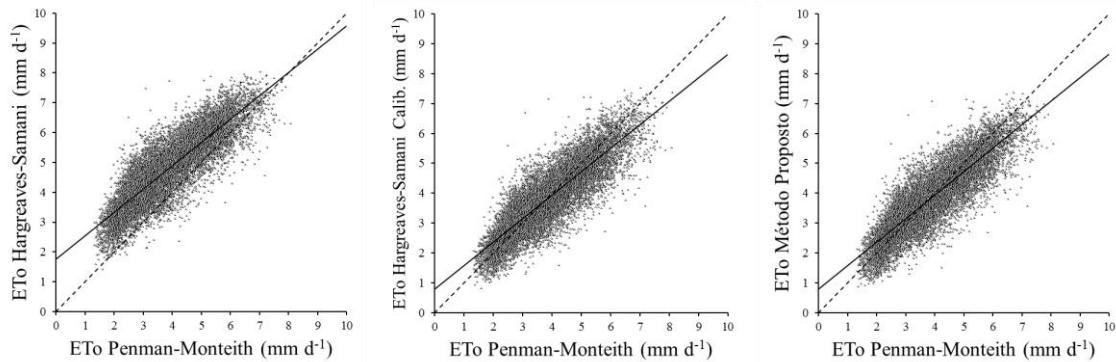


Figura 26 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de São Lourenço

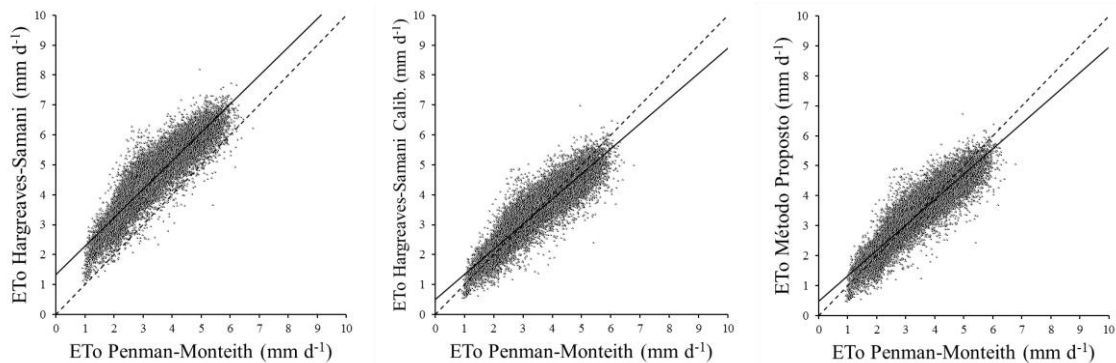


Figura 27 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de São Mateus-ES

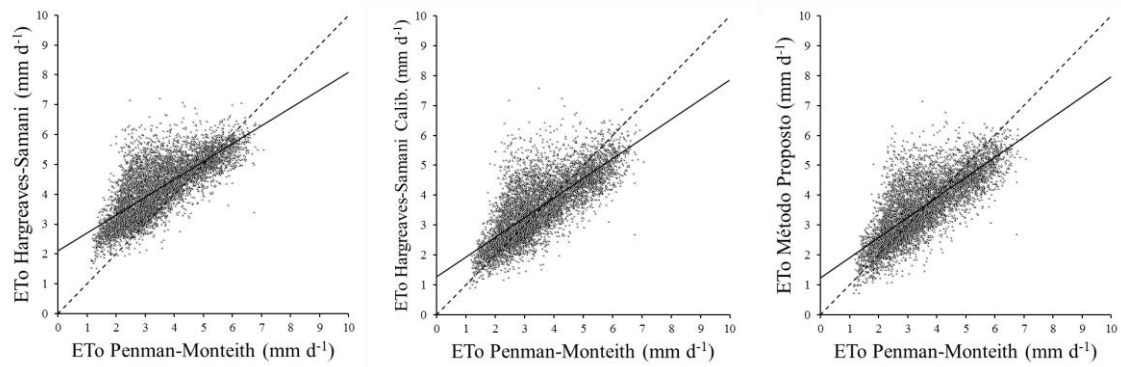


Figura 28 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de São Sebastião do Paraíso

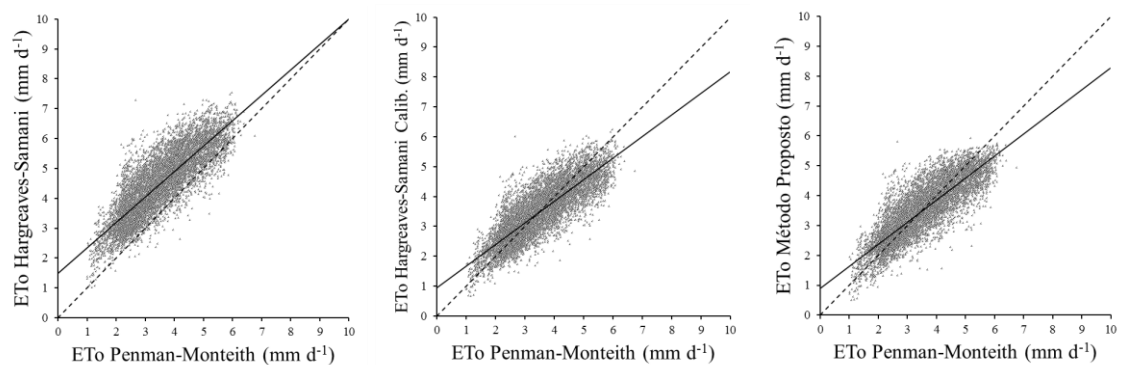


Figura 29 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Uberaba

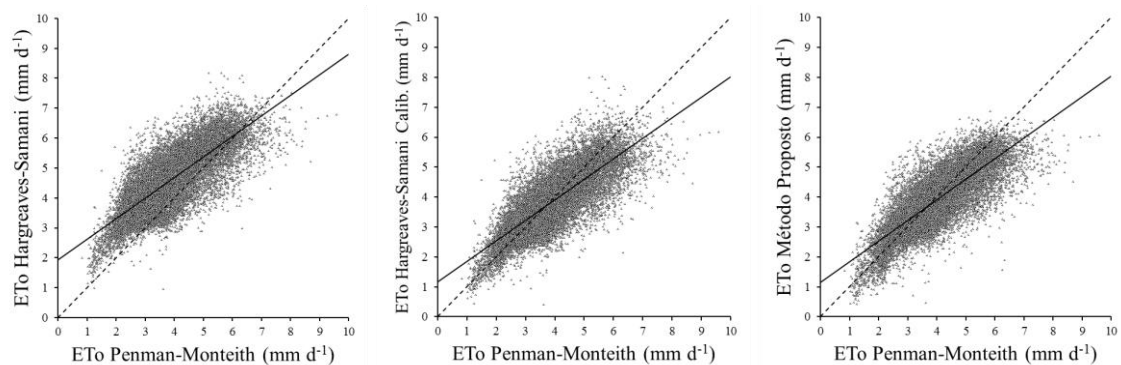


Figura 30 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Viçosa

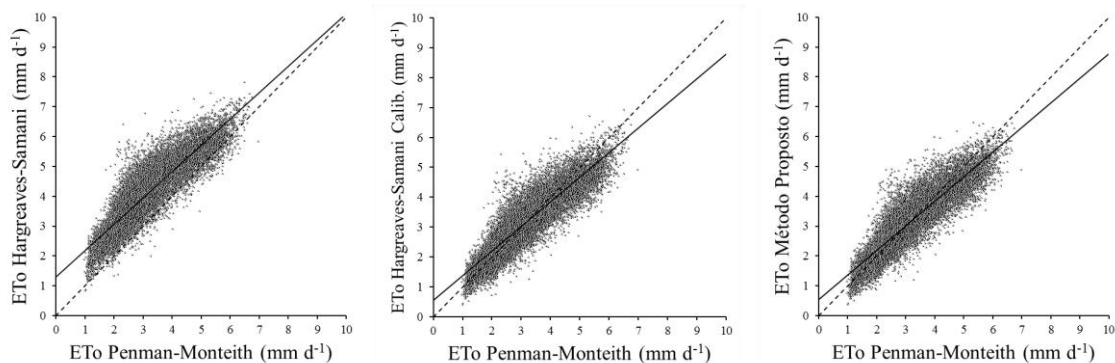
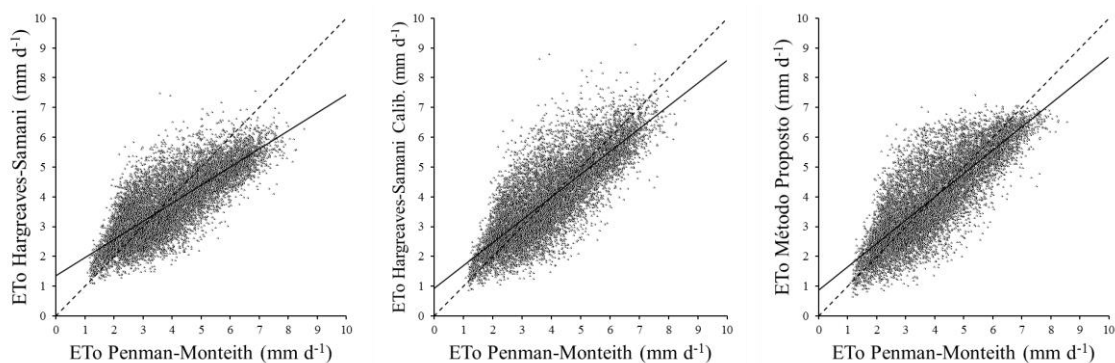


Figura 31 - Análise de Regressão Linear relacionando os métodos Hargreaves Samani (HS) original e calibrado e o Método Proposto (MP) com o método padrão FAO Penman-Monteith para a estação de Vitória-ES



Na Tabela 13 encontram-se os valores do coeficiente angular a_r , após a calibração do método Hargreaves-Samani e aplicação do Método Proposto. Observou-se que os coeficientes se distanciaram de 1 para a maioria das estações. Sendo que, nas estações de Aimorés, Araxá, Capinópolis, Caratinga, Diamantina, Formosa-GO, Guaratinga-BA, Salinas, São Mateus-ES e Vitória-ES foram verificadas as maiores alterações no coeficiente. Já o coeficiente linear b_r , após a calibração local do método Hargreaves-Samani, demonstrou uma grande redução em seu valor para todas as estações estudadas, sendo que uma redução acima de 0,5 ocorreu para 27 das 30 estações estudadas, com destaque para Caratinga (redução de 0,91), Coronel Pacheco (0,95), Salinas (0,99), Lambari (1,10) e Aimorés (1,12). O Método Proposto proporcionou leve redução nos valores do coeficiente. Para as estações de Araxá, Lambari, Salinas e Viçosa obteve-se leve acréscimo no coeficiente quando comparados com o método HSc.

Em avaliação e calibração da ET_0 no Qatar, Issaka et al. (2017) realizaram análises de regressão para vários métodos de estimativa de ET_0 , tendo obtido para o método Hargreaves-

Samani valores dos coeficientes angular a_r , linear b_r e de determinação R^2 de 0,8657, -0,2942 e 0,9159, respectivamente. Borges e Mendiondo (2007), em estudo comparativo de equações de estimativa de ET_0 para bacia do Rio Jacupiranga, verificaram valores de coeficiente angular (1,042), linear (-0,365) e R^2 (0,994) para equação HS. Já para o método HS com o coeficiente A_{HS} modificado, os autores observaram o coeficiente angular de 0,989, linear 0,035 e R^2 0,995.

Alencar et al. (2011b) verificaram valores de a_r igual a 1,725, b_r igual a 0,662 e R^2 igual a 0,601 para estação de Espinosa; a_r igual a 1,395, b_r igual a 0,799 e R^2 igual a 0,744 para estação de Montes Claros e a_r igual a 1,466, b_r igual a 0,860 e R^2 igual a 0,799 para estação de Salinas, todas na localidade norte de Minas Gerais.

Quando se compara o coeficiente de determinação (R^2), observa-se que ocorreu uma variação de 0,56 (Formosa-GO) a 0,85 (São Lourenço) para o método Hargreaves-Samani, de 0,58 (São Mateus-ES) a 0,85 (São Lourenço) para o método Hargreaves-Samani calibrado e de 0,60 (São Mateus-ES) a 0,85 (São Lourenço) para o Método Proposto. Constatou-se que apenas para a estação de São Lourenço houve uma redução (0,001) no valor do coeficiente. Sendo a calibração realizada considerando-se um parâmetro de exatidão, ou seja, pela minimização do EAM, esperava-se melhoras menos expressivas no R^2 e no r , que são parâmetros de precisão, o que foi constatado.

Oliveira (2016) estudando a aplicação do método HS e MP para bacia do rio São Francisco no estado de Minas Gerais, verificou que após calibração do método HS e aplicação do MP, os valores de a_r , b_r e R^2 se alteraram, enfatizando que a calibração e aplicação do novo método resultou em maior aproximação da ET_0 ao método padrão.

4.4 Análise de distribuição de probabilidade

Na Figura 32 à Figura 61 são apresentados gráficos das distribuições de probabilidades da ET_0 em base diária para os métodos FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e Método Proposto (MP).

Figura 32 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Aimorés.

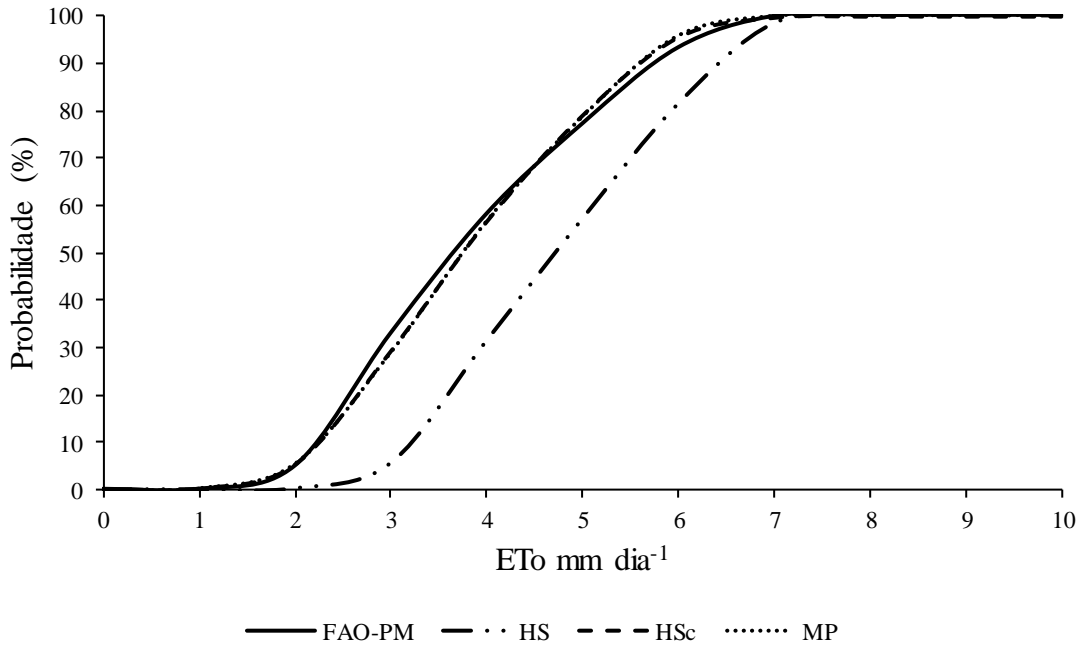


Figura 33 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Araçuaí.

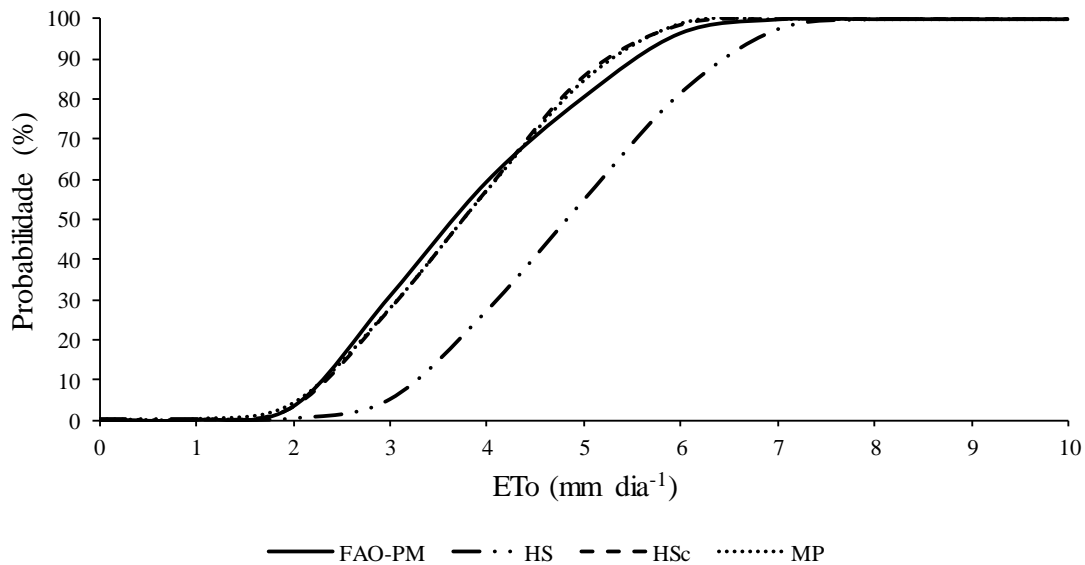


Figura 34 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Araxá.

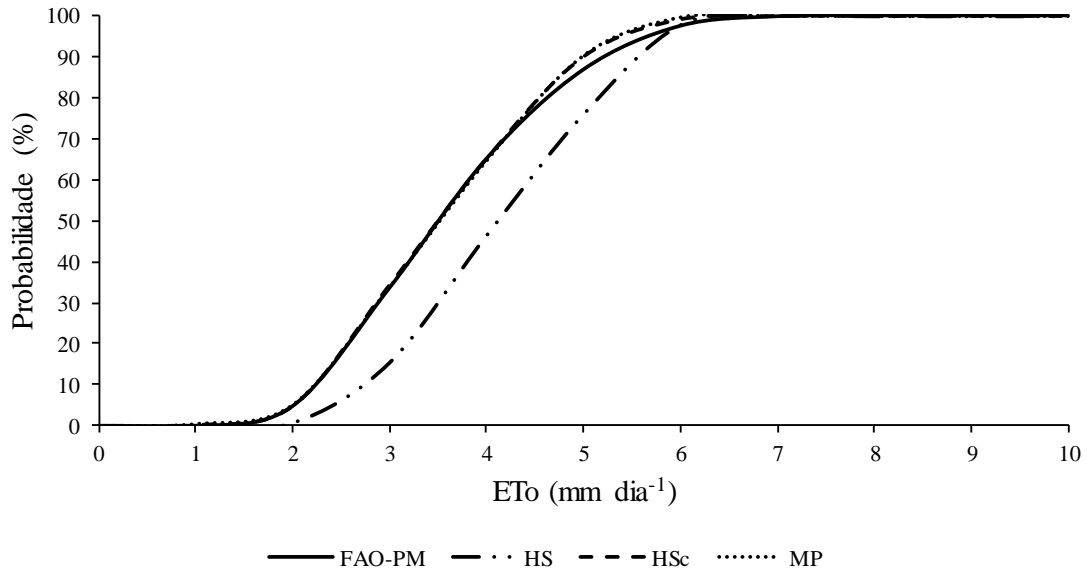


Figura 35 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Barbacena.

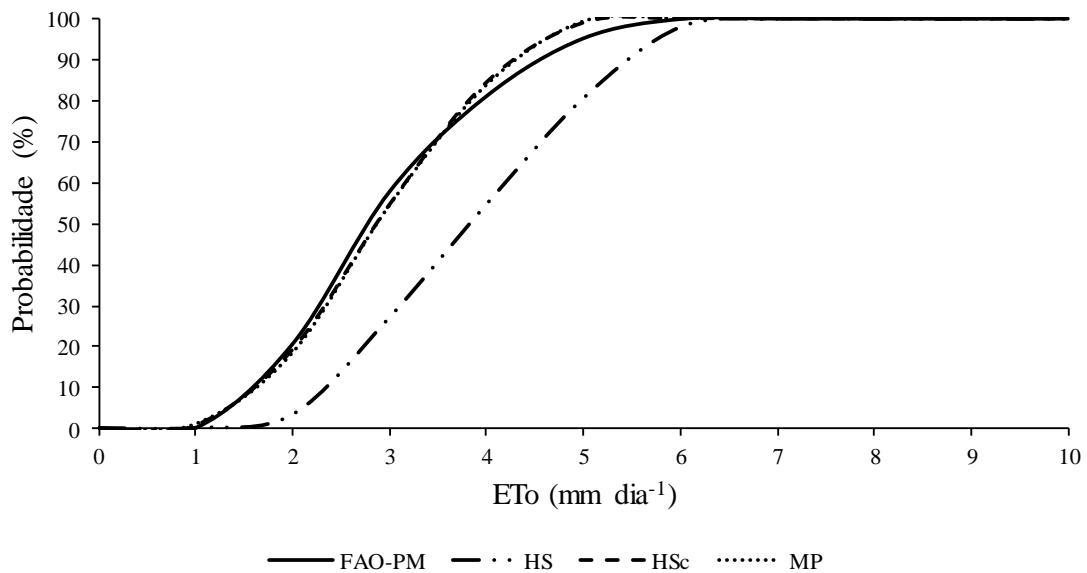


Figura 36 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Poços de Caldas.

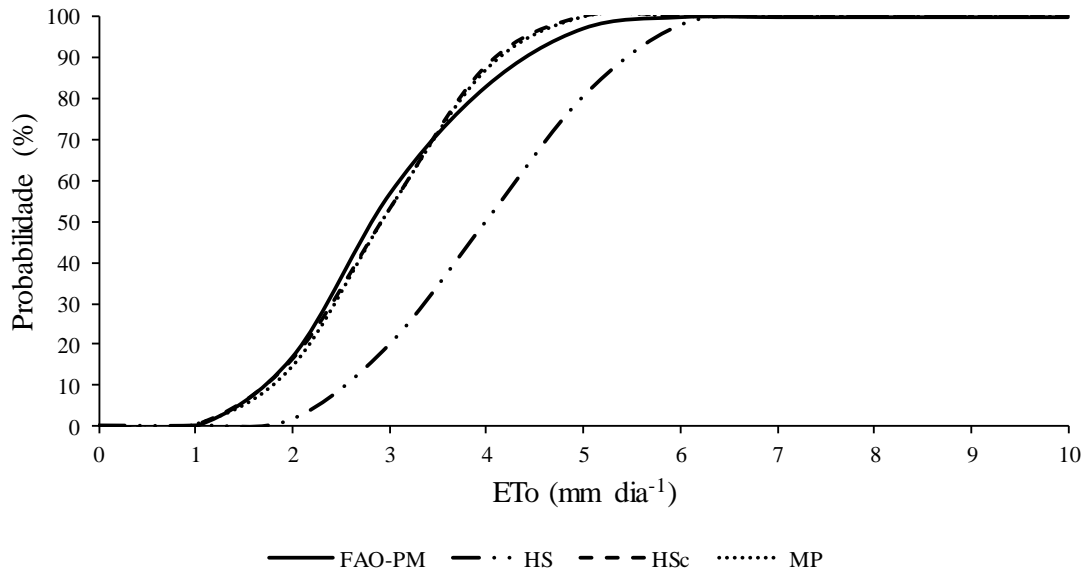


Figura 37 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Caparaó.

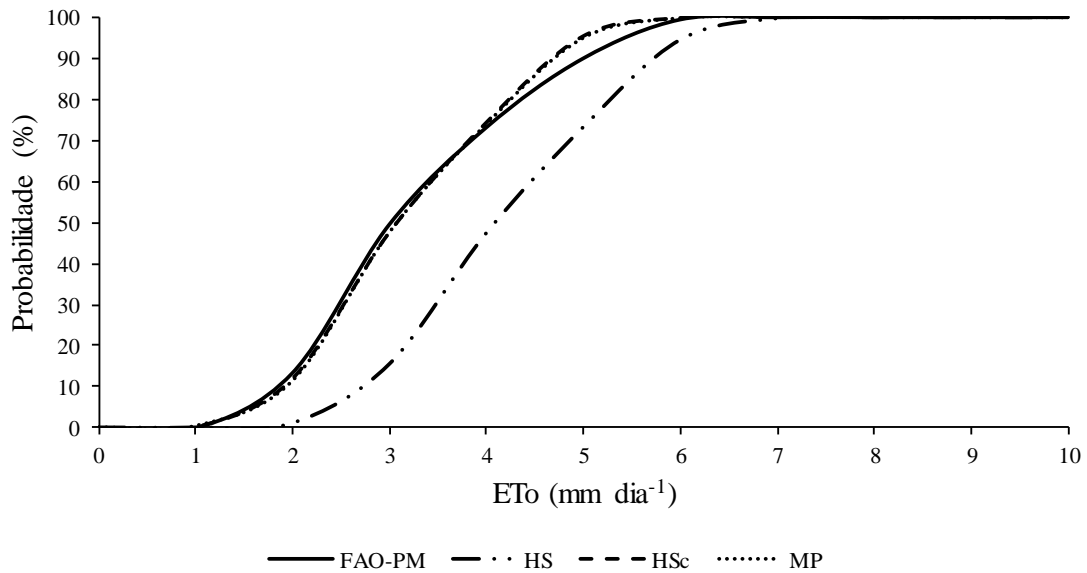


Figura 38 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Capinópolis.

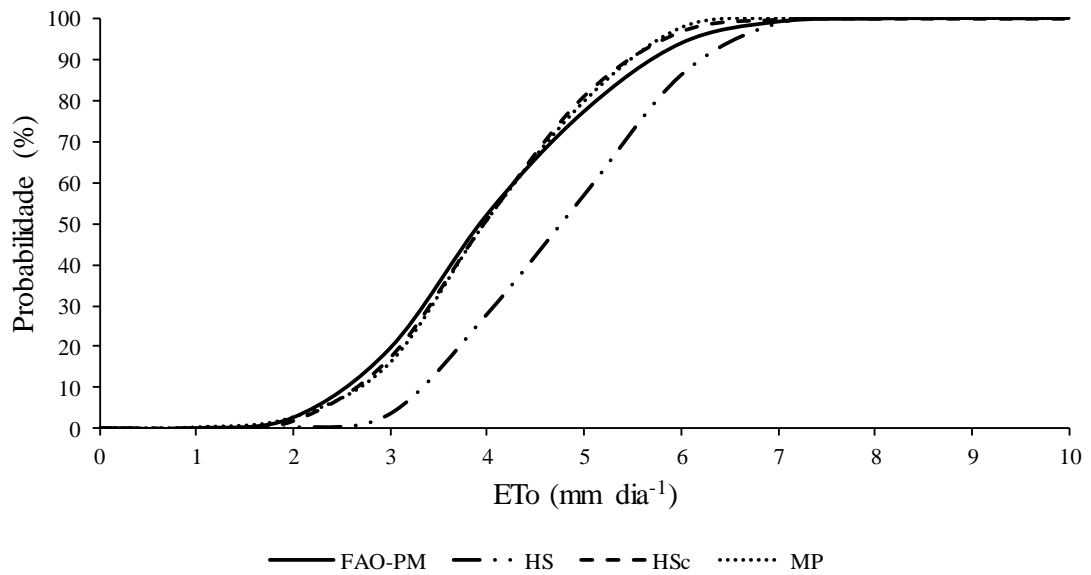


Figura 39 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Caratinga.

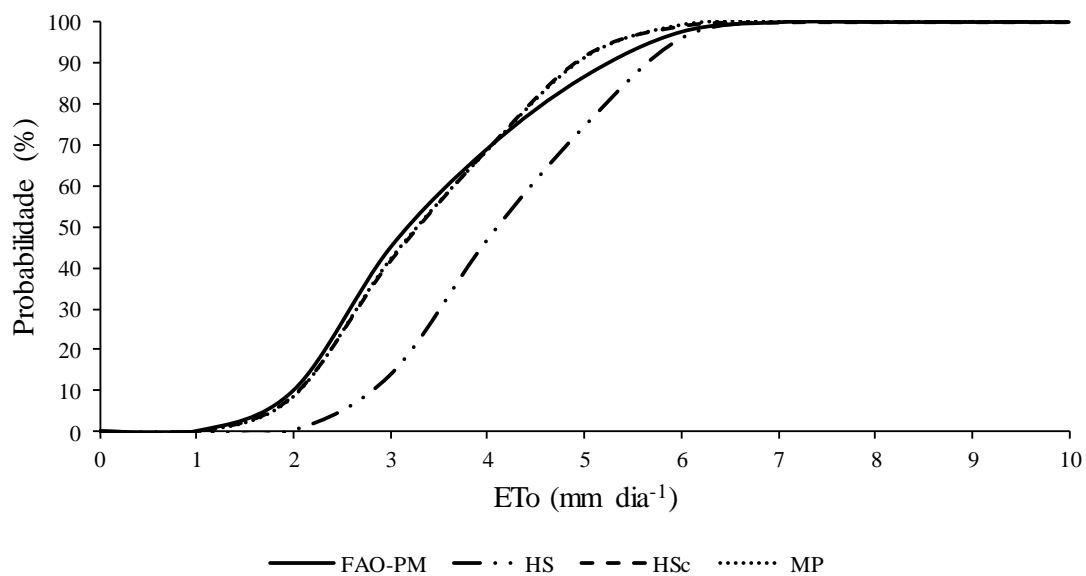


Figura 40- Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Conceição do Mato Dentro.

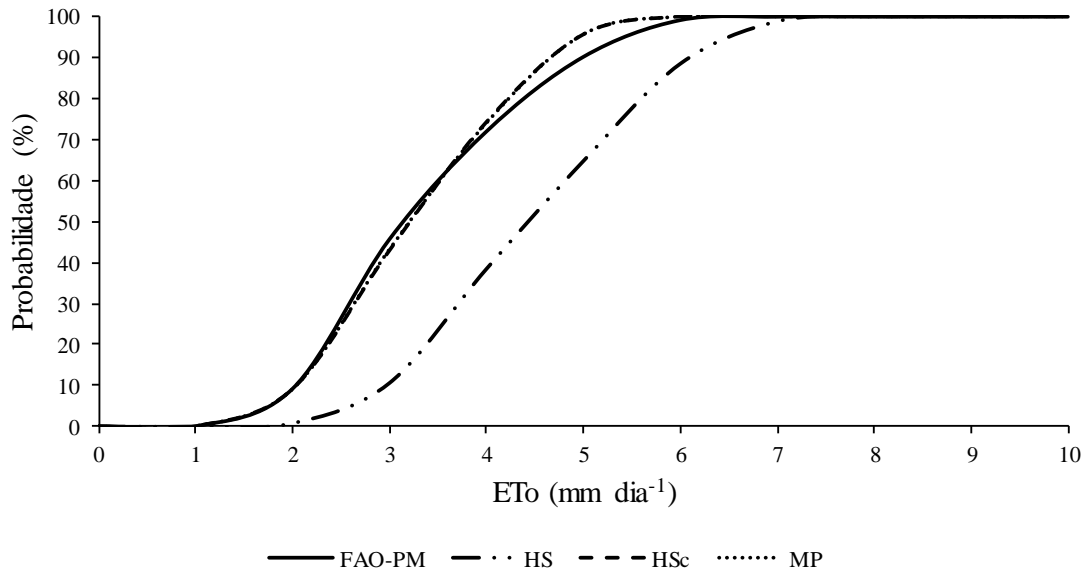


Figura 41 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Coronel Pacheco.

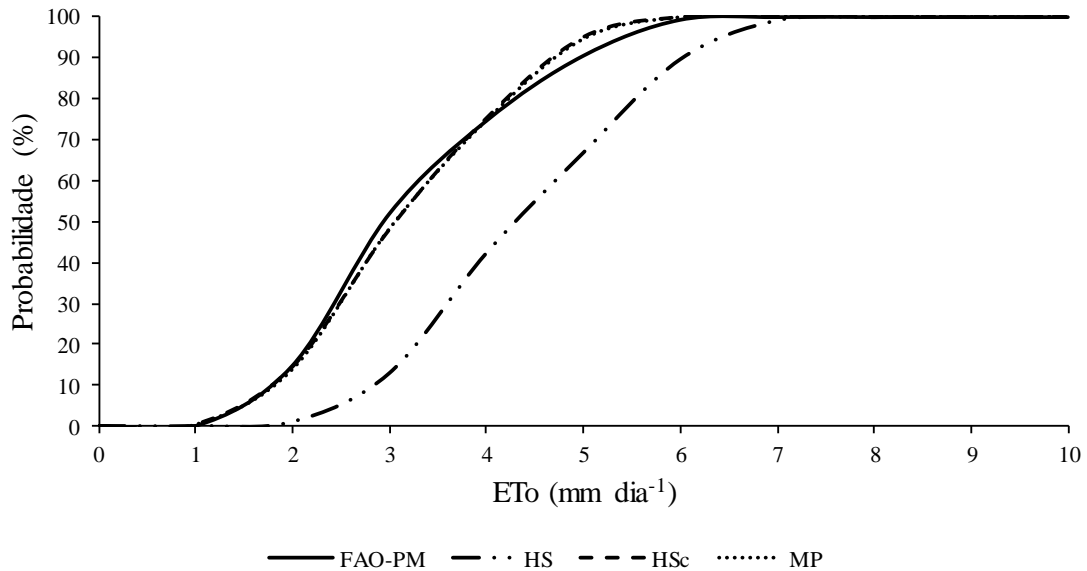


Figura 42 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Diamantina.

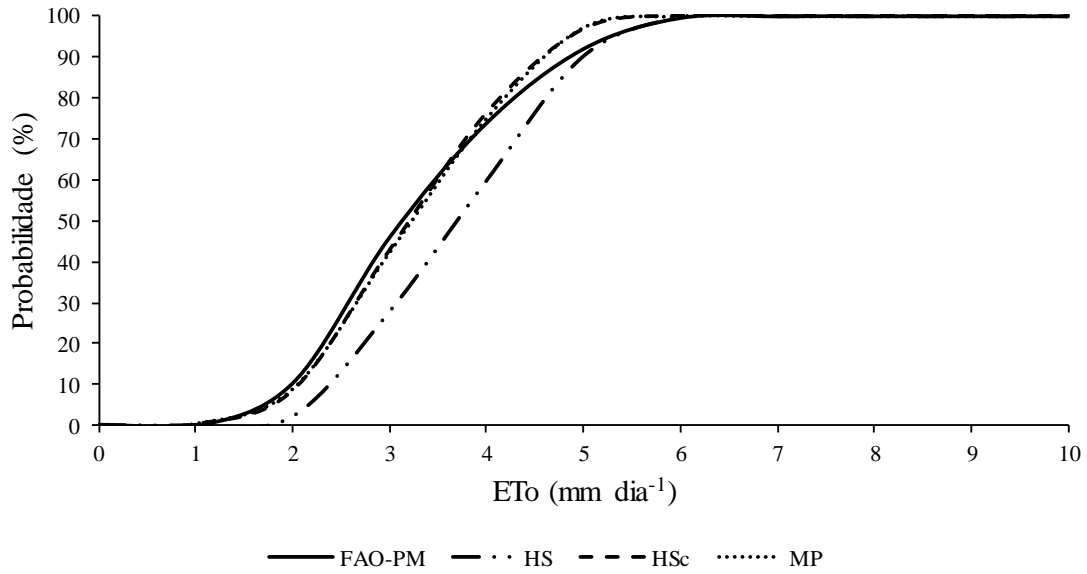


Figura 43 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Formosa-GO.

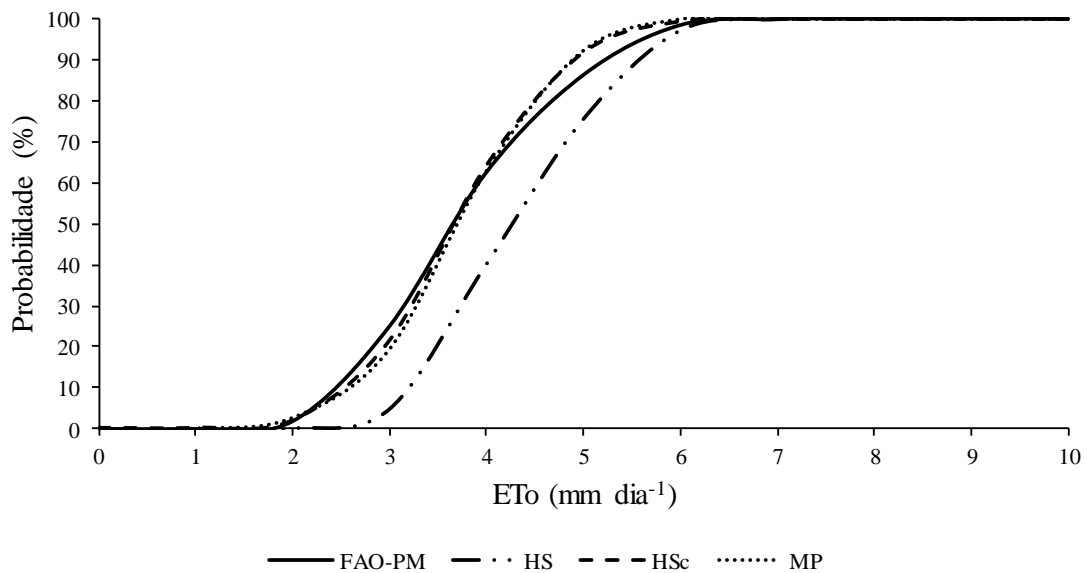


Figura 44 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Frutal.

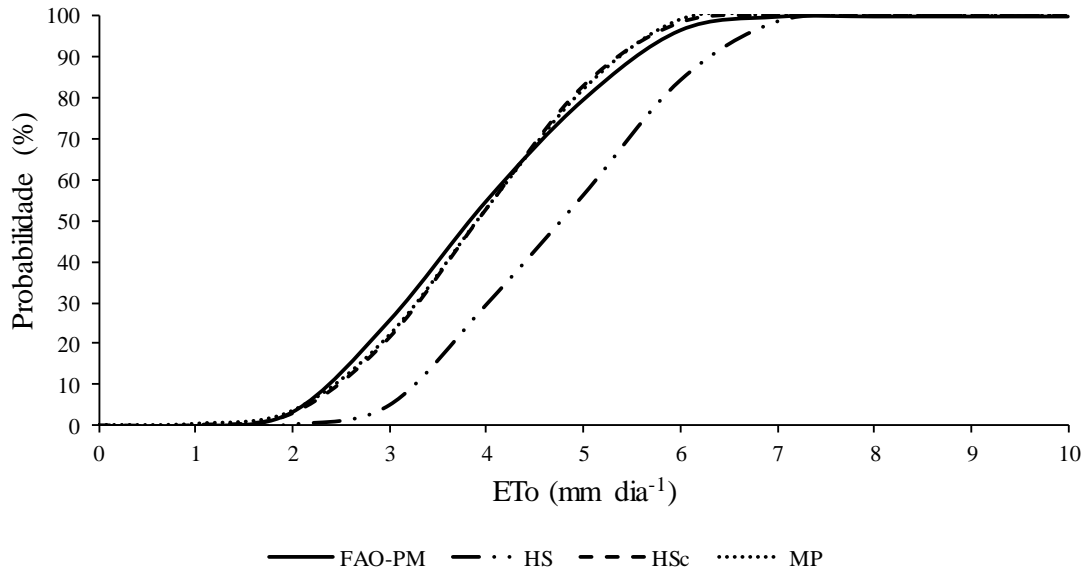


Figura 45 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Guaratinga-BA.

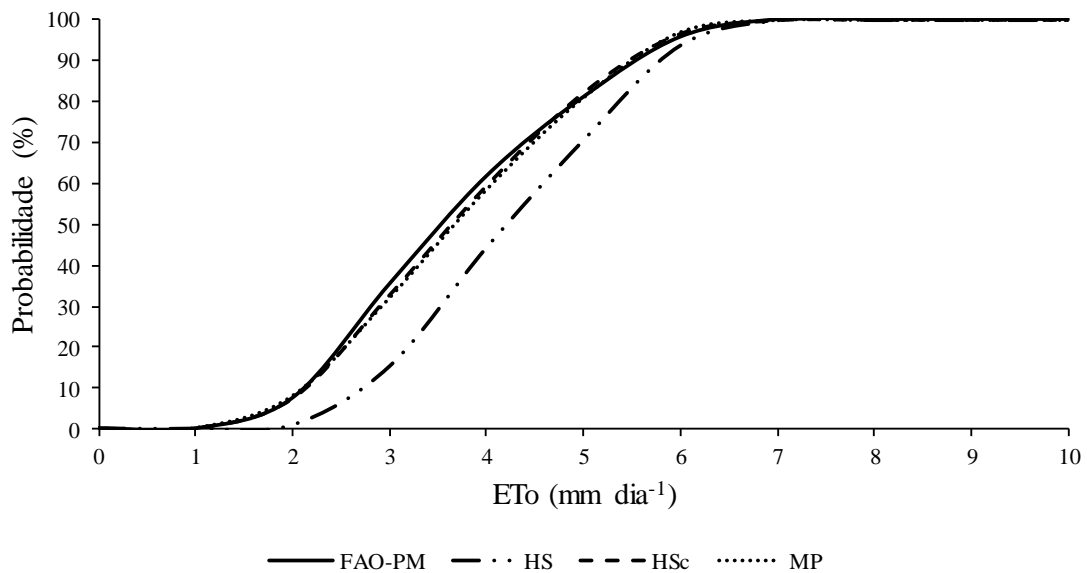


Figura 46 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Itamarandiba.

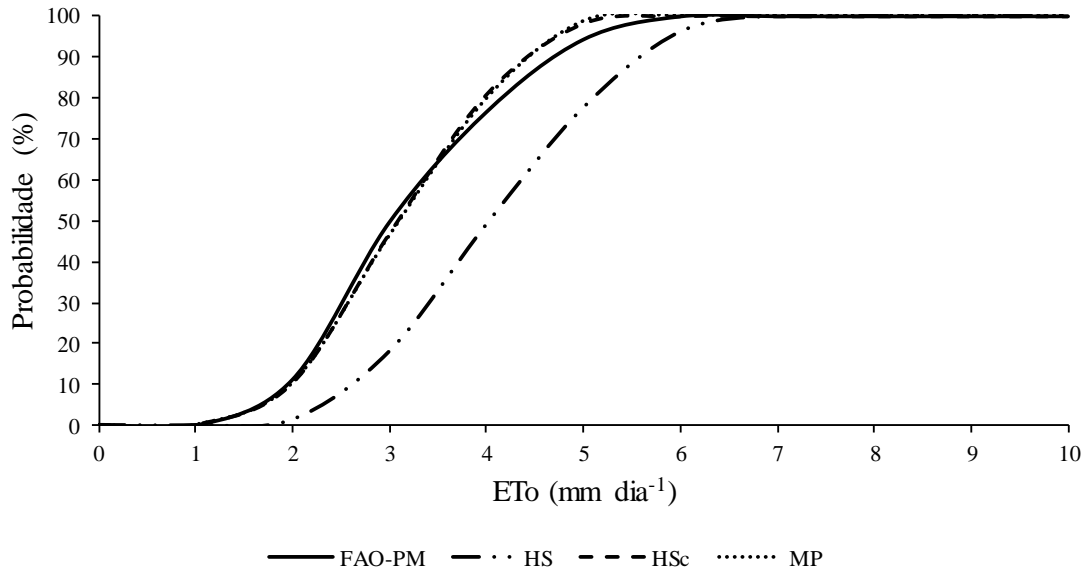


Figura 47 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Ituiutaba.

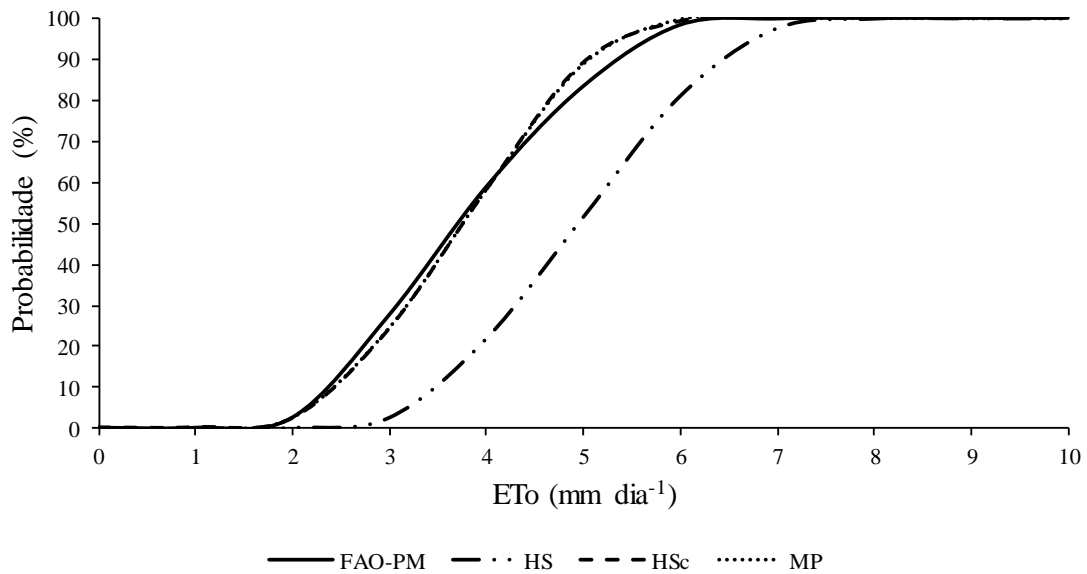


Figura 48 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Juiz de Fora.

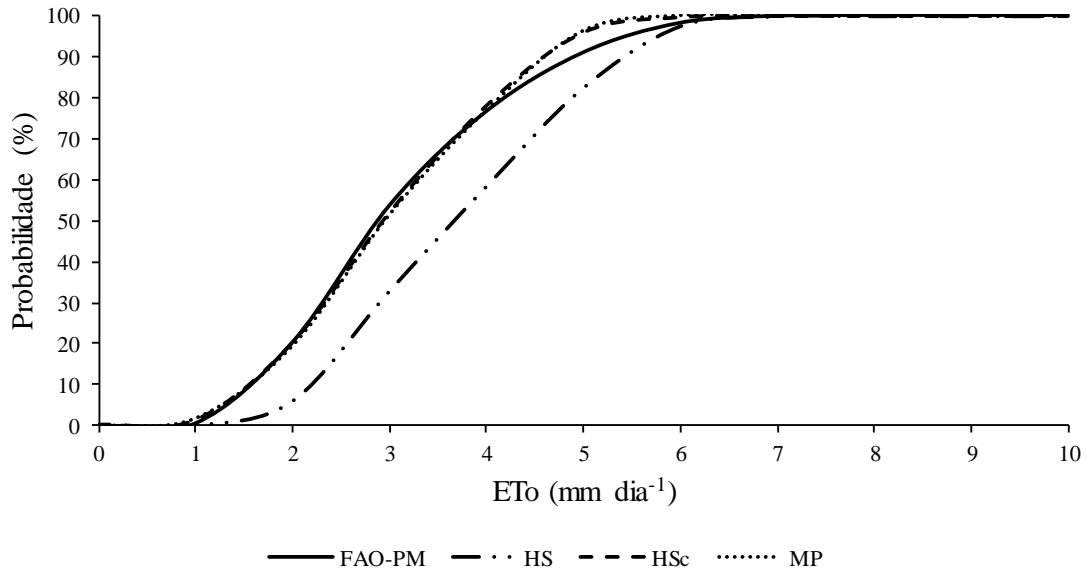


Figura 49 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Lambari.

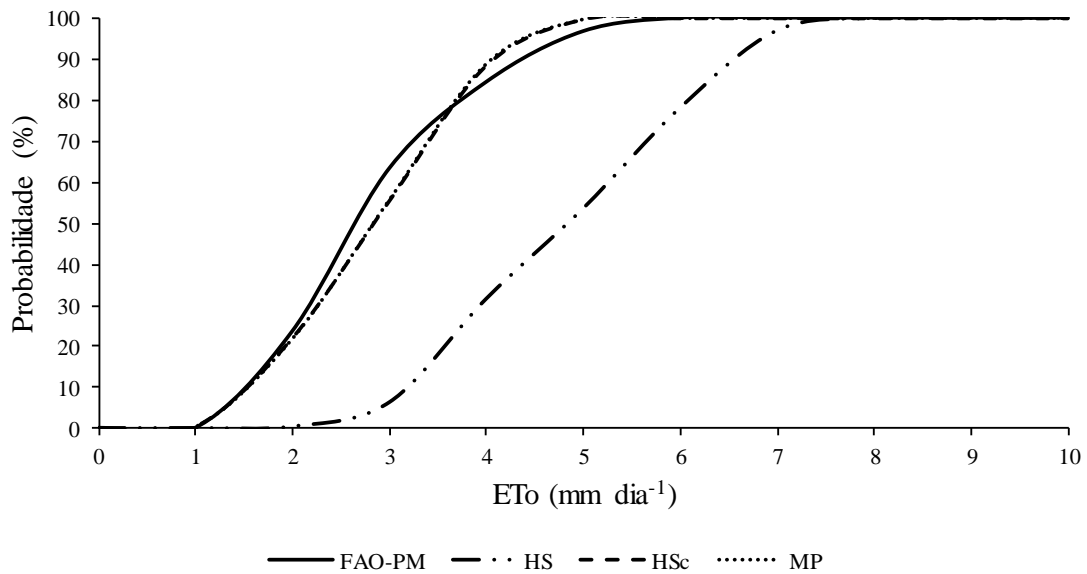


Figura 50 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Lavras.

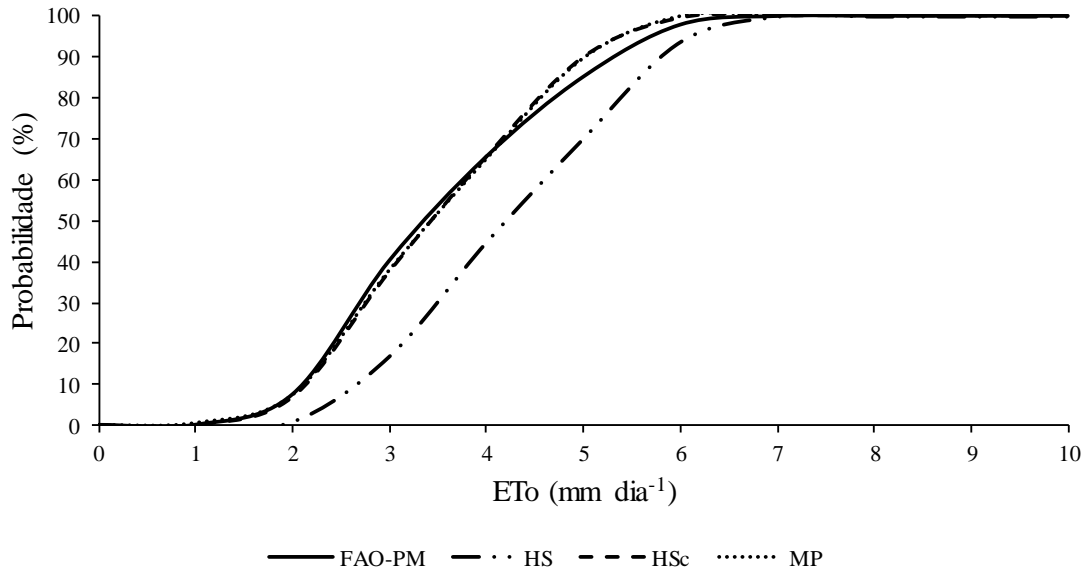


Figura 51 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Machado.

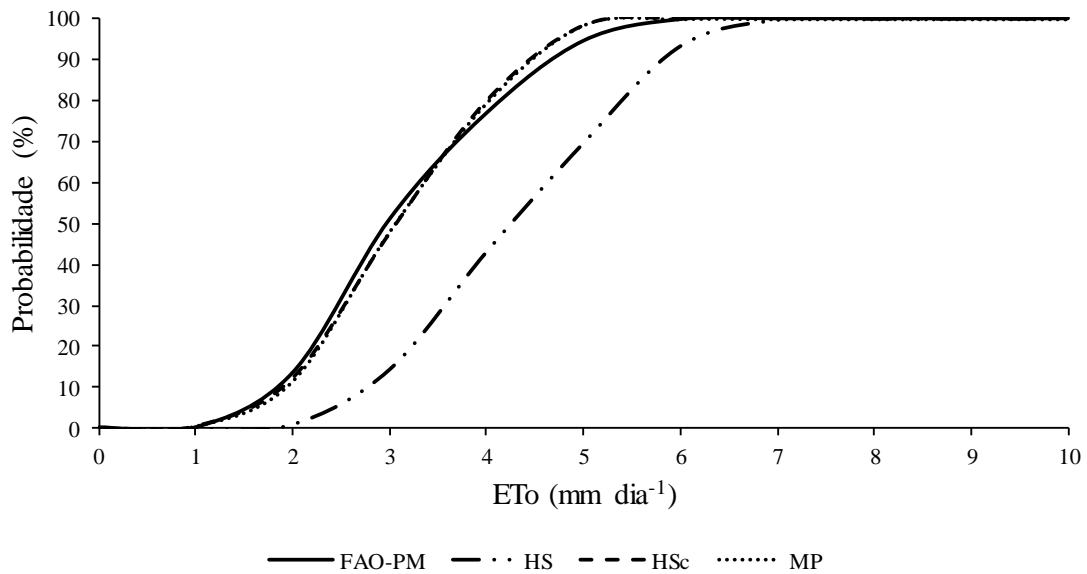


Figura 52 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Paranaíba-MS.

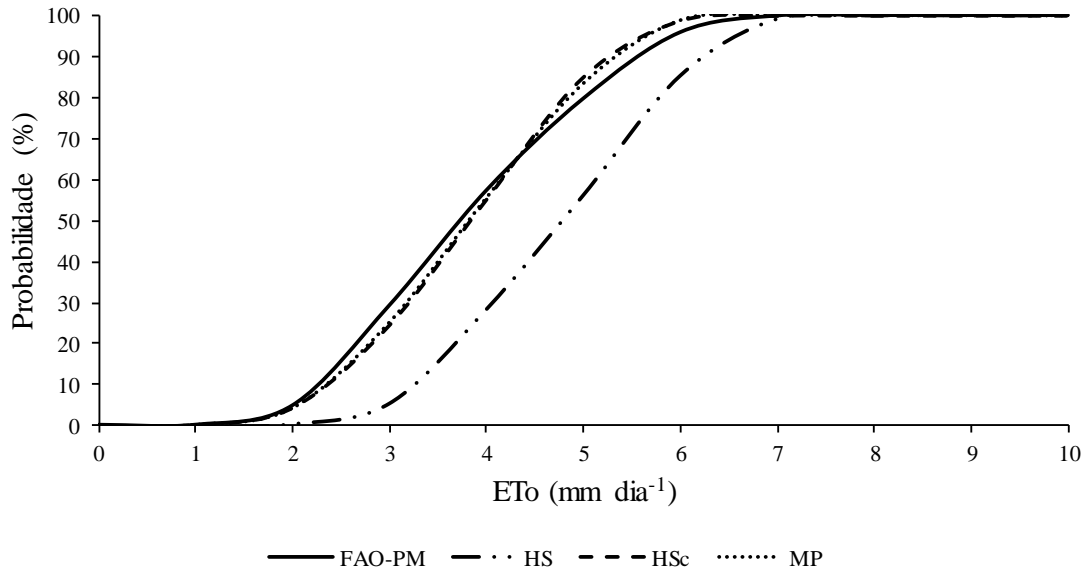


Figura 53 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Patos de Minas.

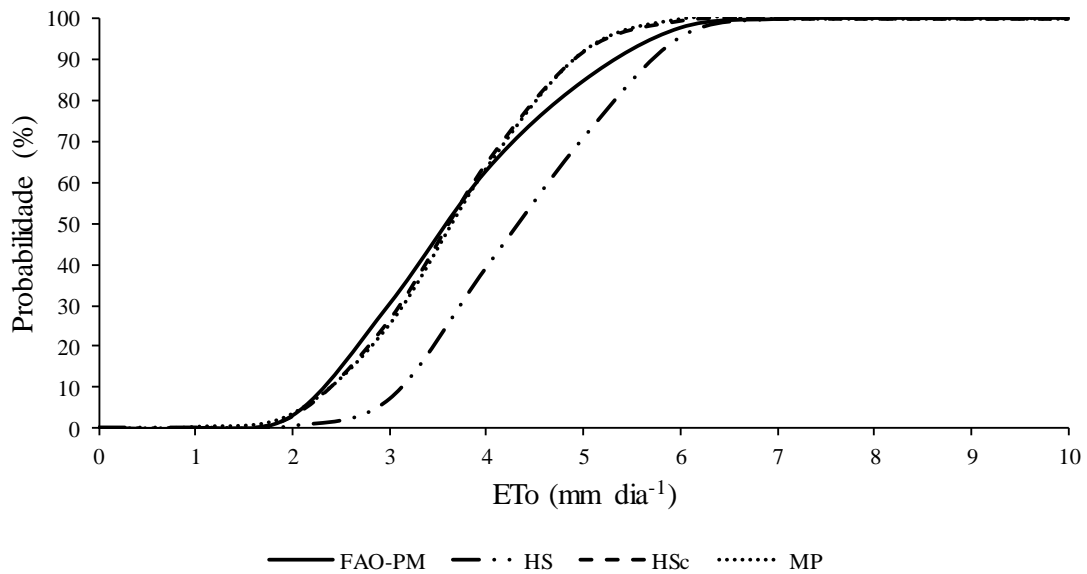


Figura 54 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Pedra Azul.

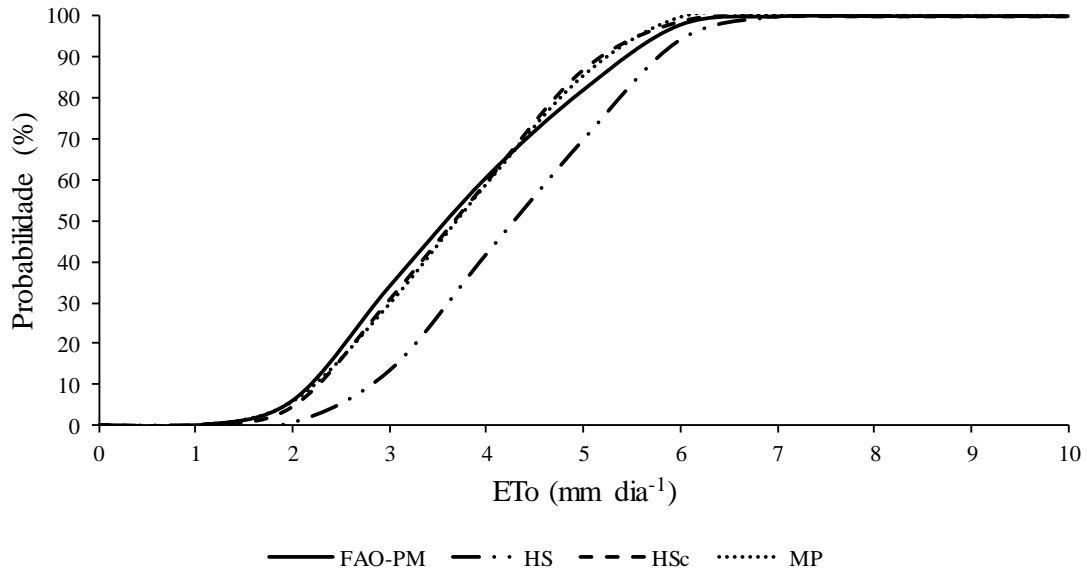


Figura 55 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Salinas.

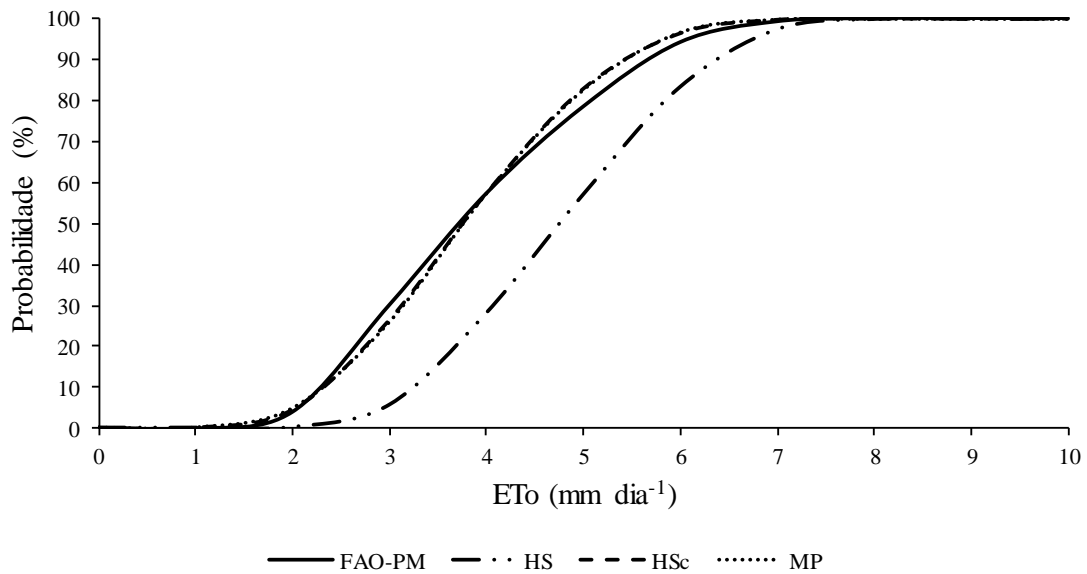


Figura 56 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de São Lourenço.

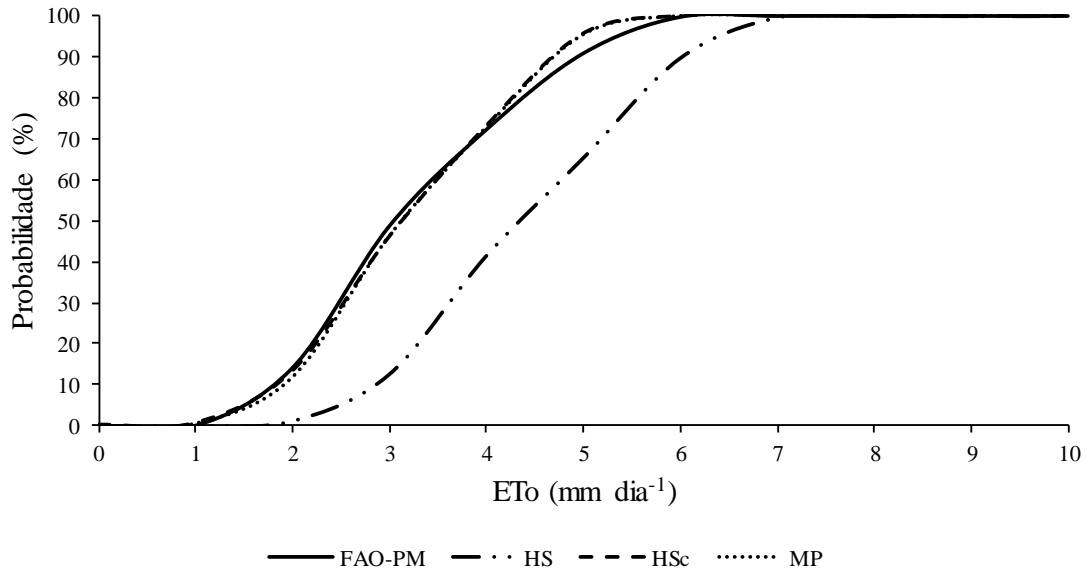


Figura 57 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de São Mateus-ES.

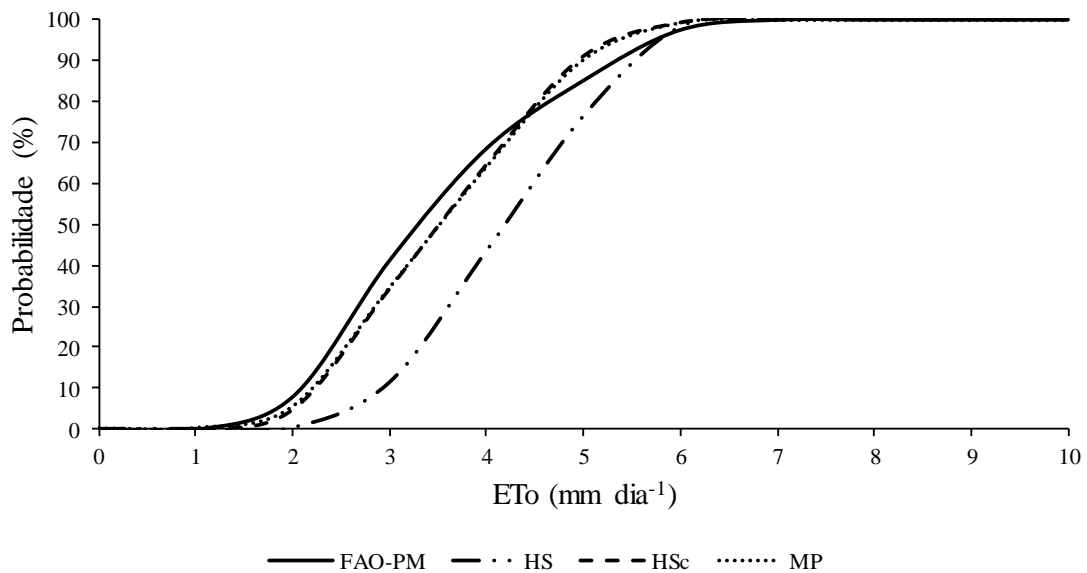


Figura 58 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de São Sebastião do Paraíso.

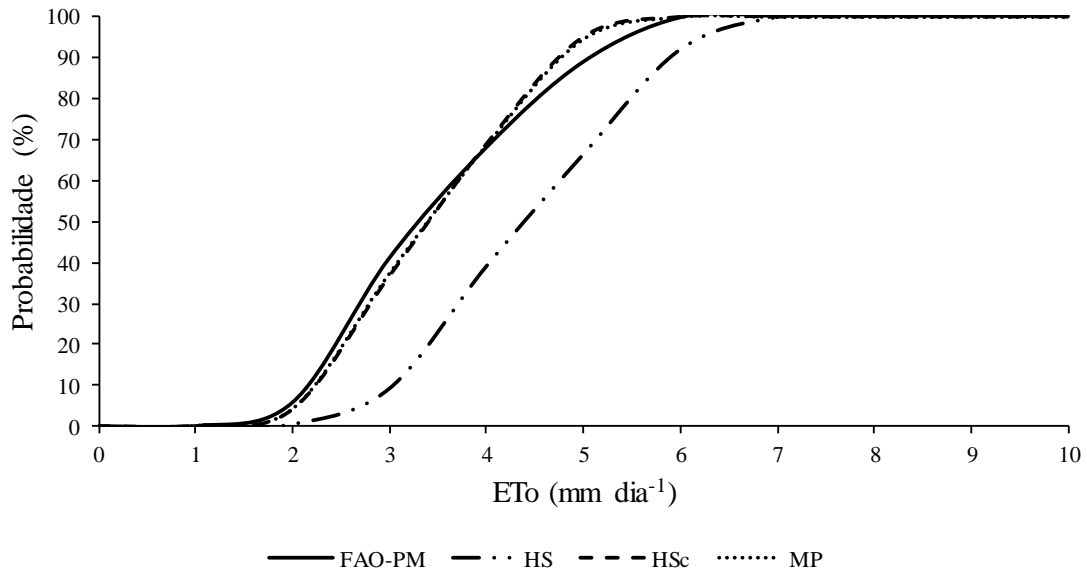


Figura 59 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Uberaba.

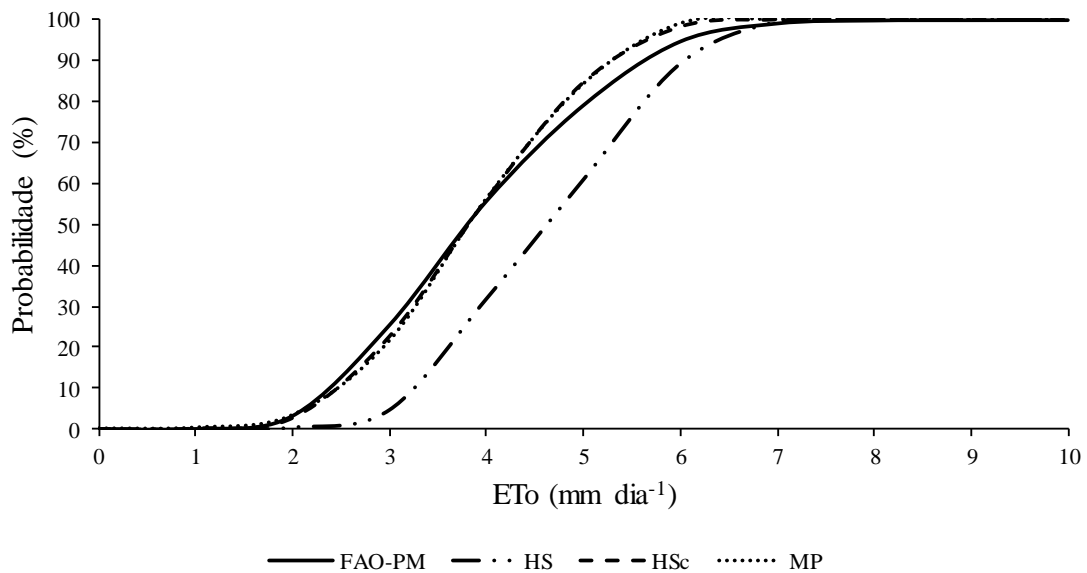


Figura 60 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Viçosa.

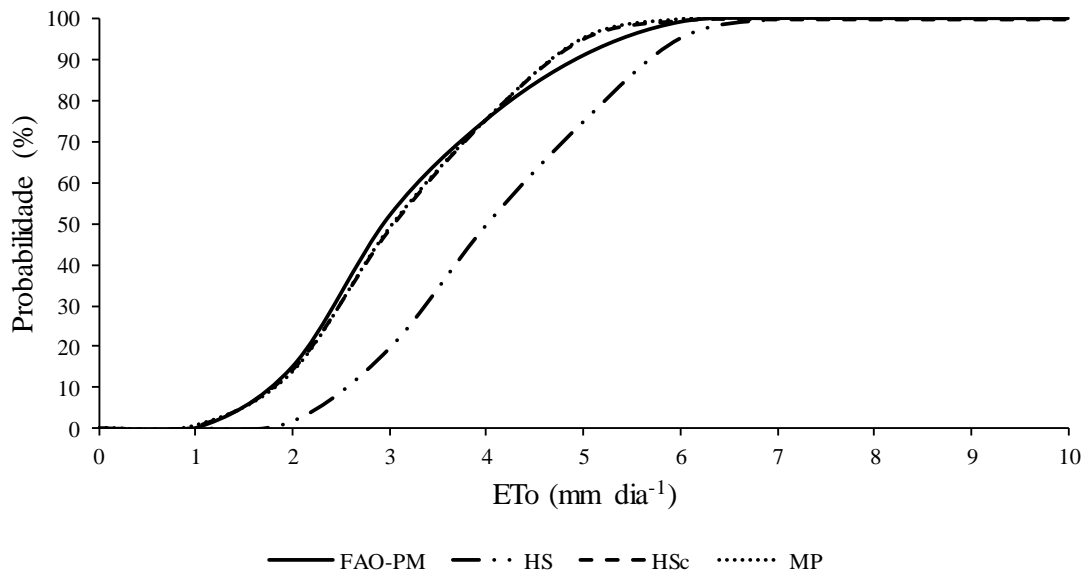
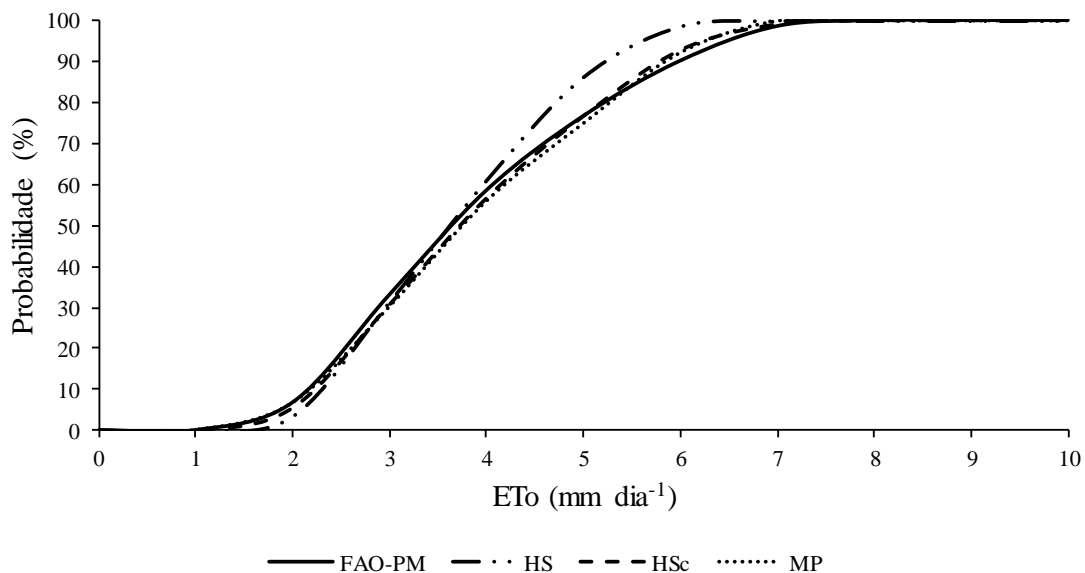


Figura 61 - Distribuições de probabilidade acumulada dos valores de evapotranspiração de referência obtidos com o método FAO Penman-Monteith (FAO-PM), Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e pelo Método Proposto (MP), para a estação de Vitória-ES.



A partir das figuras apresentadas, observa-se que as distribuições de probabilidade acumulada para os métodos Hargreaves-Samani calibrado e Método Proposto apresentam-se sempre sobrepostas, concentrando-se ligeiramente a direita da distribuição do método padrão FAO Penman-Monteith até os percentis 50% para Uberaba; 60% para Capinópolis, Conceição do Mato Dentro (bem próximo do método padrão até 60%), Formosa-GO, Frutal, Itamarandiba,

Ituiutaba, Patos de Minas e Salinas; 70% para Aimorés, Araçuaí, Araxá, Barbacena, Poços de Caldas, Caparaó (bem próximo do método padrão até 70%), Caratinga, Coronel Pacheco, Diamantina, Juiz de Fora (bem próximo do método padrão até 70%), Lavras, Machado, Paranaíba-MS, Pedra Azul, São Lourenço e São Sebastião do Paraíso; e 80% para Guaratinga-BA, Lambari, São Mateus-ES, Viçosa e Vitória-ES. Após esses percentis, as distribuições de probabilidade acumulada dos métodos avaliados posicionam-se ligeiramente à esquerda da distribuição obtida com o método padrão.

As distribuições de probabilidade acumulada para o método Hargreaves-Samani (HS) apresentam-se nitidamente à direita em 29 das 30 estações estudadas, indicando clara tendência em superestimar os valores de ET_0 . Allen et al. (1998) já afirmavam que o método Hargreaves-Samani em sua forma natural possui forte tendência de superestimação dos valores de ET_0 . Diversos estudos (DROOGERS e ALLEN, 2002; TRAJKOVIC, 2007; RAZIEI e PEREIRA, 2013; HEYDARI e HEYDARI, 2014) corroboram esta constatação. Entretanto, observa-se que na estação de Vitória-ES, a distribuição se mantém próxima a padrão até o percentil de 60%, não apresentando assim, a tendência de superestimar a ET_0 . O fato de não ocorrer a superestimativa de ET_0 na capital capixaba, pode estar relacionado com maiores valores de velocidade do vento encontradas na região, já que a estação se localiza bem próximo ao mar. Allen et al. (1998) descrevem a equação de HS com características de subestimativa em locais onde a velocidade do vento possa ser maior do que 3 m s^{-1} . Desta forma, a estação de Vitória corrobora com os pressupostos de Allen et al. (1998).

A Tabela 14 mostra os valores de p obtidos pelo teste de Mann-Whitney para as 30 estações convencionais estudadas.

Tabela 14 - Valor de p do teste de Mann-Whitney referente à comparação do método FAO Penman-Monteith com os métodos Hargreaves-Samani original (HS), Hargreaves-Samani calibrado (HSc) e Método Proposto (MP).

| Estações | Valores de p | | |
|-------------------|--------------|---------|---------|
| | HS | HSc | MP |
| Aimorés | (-) | 0,5510 | 0,3533 |
| Araçuaí | (-) | 0,0548 | 0,1420 |
| Araxá | (-) | (-) | (-) |
| Barbacena | (-) | 0,0135* | 0,0226* |
| C. do Mato Dentro | (-) | (-) | (-) |
| Caparaó | (-) | 0,0002* | 0,0219* |
| Capinópolis | (-) | 0,0003* | (-) |
| Caratinga | (-) | 0,0009* | 0,0019* |
| Cel. Pacheco | (-) | 0,0643 | 0,1429 |
| Diamantina | (-) | 0,0019* | 0,0233* |
| Formosa | (-) | (-) | (-) |
| Frutal | (-) | 0,6604 | 0,5620 |
| Guaratinga | (-) | 0,6872 | 0,1105 |
| Itamarandiba | (-) | (-) | (-) |
| Ituiutaba | (-) | 0,0021* | 0,0002* |
| Juiz de Fora | (-) | (-) | (-) |
| Lambari | (-) | 0,0313* | 0,0565 |
| Lavras | (-) | (-) | (-) |
| Machado | (-) | 0,0174* | (-) |
| Paranaíba | (-) | 0,2228 | 0,0353* |
| P. de Minas | (-) | (-) | (-) |
| Pedra Azul | (-) | 0,9470 | 0,8282 |
| P. de Caldas | (-) | 0,0226* | 0,2622 |
| Salinas | (-) | (-) | (-) |
| S. Lourenço | (-) | 0,0796 | 0,4074 |
| São Mateus | (-) | 0,0034* | 0,0003* |
| São S. do Paraíso | (-) | 0,6076 | 0,4661 |
| Uberaba | (-) | (-) | (-) |
| Viçosa | (-) | 0,0079* | 0,0404* |
| Vitória | (-) | 0,3019 | 0,5406 |

*Significativo pelo teste Mann-Whitney ao nível de 5% de probabilidade. (-): valor-p inferior a 0,0001.

Verificou-se que a aplicação do teste Mann-Whitney ao nível de 5% de significância, permitiu observar a rejeição da hipótese de ajuste entre as distribuições referentes aos métodos HS e FAO PM para todas as estações do estudo (valor de $p < 0,0001$). No entanto, quando houve a calibração do método Hargreaves-Samani, ocorreu o ajuste entre as distribuições de valores diários de ET_0 para as estações de Aimorés, Araçuaí, Coronel Pacheco, Frutal, Guaratinga-BA, Paranaíba-MS, Pedra Azul, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Vitória-ES, o que se verifica entre a Figura 32 e a Figura 61.

Já com relação ao Método Proposto, houve o ajuste entre as distribuições de valores diários de ET_0 para as estações de Aimorés, Araçuaí, Coronel Pacheco, Frutal, Guaratinga-BA, Lambari, Pedra Azul, Poços de Caldas, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Vitória-ES pelo teste Mann-Whitney ao nível de 5% de probabilidade.

4.5 Análise de distribuição dos desvios

Na Tabela 15 estão dispostos os desvios de cada método testado relacionado com o método padrão FAO-PM. Foram quantificados os desvios posicionados entre -1 mm a 1 mm referentes ao método FAO Penman-Monteith.

Tabela 15 - Desvios entre -1 mm e 1 mm dos métodos Hargreaves-Samani original (HS) e calibrado (HSc) e Método Propostos (MP) relacionados com o método FAO Penman-Monteith.

| Estações | Desvios entre -1 mm e 1 mm (%) | | |
|-------------------|--------------------------------|-------|-------|
| | HS | HSc | MP |
| Aimorés | 59,17 | 92,99 | 93,10 |
| Araçuaí | 46,52 | 92,37 | 92,97 |
| Araxá | 72,19 | 85,81 | 86,35 |
| Barbacena | 58,46 | 93,33 | 93,69 |
| C. do Mato Dentro | 37,09 | 92,11 | 92,24 |
| Caparaó | 52,73 | 91,43 | 91,54 |
| Capinópolis | 64,07 | 82,65 | 83,37 |
| Caratinga | 66,56 | 91,42 | 91,70 |
| Cel. Pacheco | 37,71 | 93,08 | 93,20 |
| Diamantina | 82,09 | 91,67 | 92,02 |
| Formosa | 72,65 | 87,79 | 88,85 |
| Frutal | 63,04 | 90,25 | 90,87 |
| Guaratinga | 77,74 | 90,76 | 90,69 |
| Itamarandiba | 57,15 | 94,24 | 94,35 |
| Ituiutaba | 38,84 | 90,32 | 90,63 |
| Juiz de Fora | 67,83 | 85,22 | 85,65 |
| Lambari | 3,35 | 90,93 | 90,93 |
| Lavras | 70,08 | 90,49 | 91,37 |
| Machado | 39,54 | 95,57 | 95,65 |
| Paranaíba | 57,94 | 89,57 | 90,45 |
| P. de Minas | 66,93 | 87,38 | 87,75 |
| Pedra Azul | 73,84 | 89,21 | 89,82 |
| P. de Caldas | 45,47 | 94,57 | 94,86 |
| Salinas | 53,70 | 89,02 | 89,16 |
| S. Lourenco | 33,82 | 96,05 | 96,35 |
| São Mateus | 67,29 | 82,39 | 82,82 |
| São S. do Paraíso | 54,92 | 90,51 | 90,98 |
| Uberaba | 62,84 | 84,90 | 85,92 |
| Viçosa | 58,82 | 93,98 | 94,05 |
| Vitória | 73,69 | 78,39 | 79,11 |

Com análise da Tabela 15 verificou-se que houve um aumento nas porcentagens dos desvios quando houve a calibração do método HS e aplicação do MP. Destacam-se a estações de Conceição do Mato Dentro, Poços de Caldas, Coronel Pacheco, Lambari, Machado e São Lourenço, todas com incrementos acima de 100% quando o HS foi calibrado e o MP aplicado. Os menores percentuais de aumento ficaram com as estações de Diamantina (19%) e Vitória-ES (6%), muito provavelmente pela condição de vento no município litorâneo, criando uma menor superestimativa da ET_0 pelo método HS original.

Pode-se observar um certo padrão nos resultados quando o método Hargreaves-Samani foi aplicado. Estações presentes em maiores altitudes (Barbacena, Poços de Caldas, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso) promoveram um pior desempenho desse método. A estação com pior desempenho foi a do município de Lambari, que está situada a 879 m de altitude, para a mesma estação foram constatados grandes amplitudes de temperatura e uma velocidade do vento média acima de 3 m s^{-1} .

Essa avaliação demonstra que o método Hargreaves-Samani original possui desvios de magnitude maiores que 1 mm em relação ao método FAO-PM, corroborando com diversos estudos que comprovam a superestimativa da ET_0 quando calculada por este método. Quando o método HS foi calibrado, observa-se que a maioria dos desvios ocorrem próximos a 1 mm para mais ou para menos em relação ao método padrão, o mesmo ocorre quando o Método Proposto foi aplicado.

Borges Júnior et al. (2017), avaliando o método HS e HS calibrado em diferentes escalas temporais para o município de Sete Lagoas-MG, verificaram que após calibração ocorreram elevadas concentrações de desvios entre -1 e 1 mm referentes ao método padrão, sendo 64,0%, 90,8%, 91,1%, 91,4% e 91,7%, respectivamente, para o método Hargreaves-Samani original e com calibração anual, semestral, trimestral e mensal.

4.6 Análises de tendência de ET_0

Os resultados das análises de tendência de ET_0 para as estações meteorológicas de Araçuaí, Caratinga, Patos de Minas, São Lourenço e Vitória - ES estão demonstrados na Tabela 16 à Tabela 20.

A Tabela 16 mostra os resultados das variáveis do teste Mann-Kendall para a estação de Araçuaí presente no Vale do Jequitinhonha. Houve tendência positiva para todos os bimestres avaliados, mas ocorreu apenas uma tendência significativa ($p < 0,05$), observada no quinto bimestre, correspondente às médias de ET_0 referentes aos meses de setembro e outubro. O menor valor observado ocorreu no 1º bimestre ($S = 4$) com um p-valor de 0,96741.

Tabela 16 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Araçuaí.

| | S | Var (S) | D | τ | p-valor |
|-------------|----------|----------------|----------|--------------------------|----------------|
| 1º bimestre | 4 | 5390 | 629,9999 | 0,00635 | 0,96741 |
| 2º bimestre | 11 | 4958,333 | 595 | 0,0185 | 0,88707 |
| 3º bimestre | 47 | 4550,333 | 561 | 0,0838 | 0,49529 |
| 4º bimestre | 68 | 3802,667 | 496 | 0,137 | 0,27726 |
| 5º bimestre | 192* | 4165,333 | 528 | 0,364 | 0,003082 |
| 6º bimestre | 144 | 5390 | 629,9999 | 0,229 | 0,05144 |

*Significativo pelo teste Mann-Kendall ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 17 estão contidos os resultados referentes à estação de Caratinga, próxima ao leste do estado de Minas Gerais. Observa-se tendências positivas para todos os bimestres. Apenas para os 2º e 3º bimestres não constatou-se tendências significativas.

Tabela 17 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Caratinga.

| | S | Var (S) | D | τ | p-valor |
|-------------|----------|----------------|----------|--------------------------|----------------|
| 1º bimestre | 251* | 11891 | 1081 | 0,232 | 0,02187 |
| 2º bimestre | 33 | 11155 | 1035 | 0,0319 | 0,7619 |
| 3º bimestre | 35 | 11155 | 1035 | 0,0338 | 0,4752 |
| 4º bimestre | 318* | 9775,333 | 946 | 0,336 | 0,0013449 |
| 5º bimestre | 331* | 8514,333 | 861,0001 | 0,384 | 0,00034845 |
| 6º bimestre | 288* | 10450 | 990 | 0,291 | 0,0049924 |

*Significativo pelo teste Mann-Kendall ao nível de 5% de probabilidade.

Na estação de Patos de Minas (Tabela 18) presente no Triângulo Mineiro, verificou-se tendências positivas (1º, 5º e 6º bimestres) e tendências negativas (2º, 3º e 4º bimestres). Apenas verificou-se significância no segundo bimestre (p-valor = 0,022891), em que houve uma tendência negativa ($S = -273$), demonstrando que houve redução da ET_0 entre os anos de 1961 a 2015.

Tabela 18 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Patos de Minas.

| | S | Var (S) | D | τ | p-valor |
|-------------|----------|----------------|----------|--------------------------|----------------|
| 1º bimestre | 99 | 14291,67 | 1225 | 0,0808 | 0,41236 |
| 2º bimestre | -273* | 14291,67 | 1225 | -0,223 | 0,022891 |
| 3º bimestre | -195 | 14291,67 | 1225 | -0,159 | 0,10464 |
| 4º bimestre | -104 | 12658,67 | 1128 | -0,0922 | 0,35995 |
| 5º bimestre | 169 | 14291,67 | 1225 | 0,138 | 0,15993 |
| 6º bimestre | 49 | 14291,67 | 1225 | 0,04 | 0,68804 |

*Significativo pelo teste Mann-Kendall ao nível de 5% de probabilidade.

Para estação de São Lourenço (Tabela 19) presente na região Sul de Minas Gerais, foram constatadas tendências positivas em todos os bimestres estudados ($S > 0$), mas apenas no 4º e 5º bimestre verificou-se significância nos resultados.

Tabela 19 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de São Lourenço.

| | S | Var (S) | D | τ | p-valor |
|-------------|----------|----------------|----------|--------------------------|----------------|
| 1º bimestre | 74 | 13458,67 | 1176 | 0,0629 | 0,52919 |
| 2º bimestre | 63 | 11891 | 1081 | 0,0583 | 0,56965 |
| 3º bimestre | 163 | 11891 | 1081 | 0,151 | 0,13738 |
| 4º bimestre | 323* | 11891 | 1081 | 0,299 | 0,0031482 |
| 5º bimestre | 412* | 12658,67 | 1128 | 0,365 | 0,00025916 |
| 6º bimestre | 91 | 11891 | 1081 | 0,0842 | 0,40918 |

*Significativo pelo teste Mann-Kendall ao nível de 5% de probabilidade.

Na Tabela 20 verificam-se os valores do teste Mann-Kendall para a estação de Vitória - ES, presente na região litorânea da área de estudo. Observou-se apenas um valor de S negativo, ocorrido no 2º bimestre de estudo ($S = -9$; p-valor = 0,92291). Contudo, no 5º bimestre ocorreu significância (p-valor = 0,03523) relacionada à tendência positiva ($S = 162$), demonstrando a tendência de a ET_0 ter aumentado neste período (5º bimestre) do estudo entre 1961 a 2015.

Tabela 20 - Resultado da análise de tendência de ET_0 para a estação de Vitória - ES.

| | S | Var (S) | D | τ | p-valor |
|-------------|----------|----------------|----------|--------------------------|----------------|
| 1º bimestre | 23 | 6327 | 703 | 0,0327 | 0,7821 |
| 2º bimestre | -9 | 6833,667 | 741 | -0,0121 | 0,92291 |
| 3º bimestre | 79 | 6833,667 | 741 | 0,107 | 0,3454 |
| 4º bimestre | 50 | 5846 | 666 | 0,0751 | 0,52161 |
| 5º bimestre | 162* | 5846 | 666 | 0,243 | 0,03523 |
| 6º bimestre | 17 | 6327 | 703 | 0,0242 | 0,84058 |

*Significativo pelo teste Mann-Kendall ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com Allen et al. (1998), ET_0 é uma variável climática e expressa o poder evaporativo da atmosfera em um local e época do ano específicos. Assim, o poder evaporativo do ar na atmosfera torna-se consequência de uma variabilidade climática que ocorre com o passar dos anos.

Como a ET_0 depende de variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, alterações destas variáveis com o passar dos anos pode influenciar a evapotranspiração de referência. Variações nas quantidades de chuva durante o ano provavelmente podem influenciar nos diferentes valores de ET_0 com o avançar dos anos.

Alencar et al. (2014), avaliando a variação dos elementos climáticos e a ET_0 para Catalão em Goiás entre 1961 a 2011, apontaram que a tendência de aumento da ET_0 está fortemente relacionada com as variáveis que compõem o cálculo da evapotranspiração de referência. Os autores verificaram que os meses de setembro, outubro e dezembro apresentaram tendência de aumento da ET_0 , relacionada com o aumento da temperatura máxima e mínima do local de estudo.

Espadafor et al. (2011) estudando tendências de ET_0 no sul da Espanha, apontam que o incremento da ET_0 está relacionado com o aumento da temperatura do ar e da radiação solar combinado com um decréscimo da umidade relativa do ar. Quando foi verificada uma queda na temperatura do ar e não houve tendência na umidade relativa do ar, não foi observada nenhuma tendência na ET_0 para uma das estações do estudo (estação Morón). Esse fato demonstra a importância das variáveis meteorológicas presentes no cálculo da ET_0 .

Contudo, muitos estudos comprovam a tendência de redução da ET_0 ao redor do mundo, atribuídas à diminuição do número de horas de brilho solar ou radiação solar na Rússia e nos EUA (GOLUBEV et al., 2001).

Chattopadhyay e Hulme (1997) atribuíram o decréscimo na ET_0 na Índia a um acréscimo na umidade relativa do ar. Gao et al. (2006) e Xu et al. (2006) atribuíram o decréscimo na ET_0 a uma combinação de mudanças na radiação solar e velocidade do vento. O decréscimo da ET_0 foi atribuído à velocidade do vento na Austrália (RAYNER, 2007; RODERICK et al., 2007), China (SHAN et al., 2015), e Canadá (BURN e HESCH, 2007).

Não existe um consenso entre os cientistas quanto à variável meteorológica que causa redução na ET_0 , o que era esperado porque o impacto individual das variáveis meteorológicas, especialmente o impacto de suas interações na ET_0 , podem se alterar substancialmente de uma região para outra, e mesmo em uma mesma região, podem mudar temporariamente e espacialmente.

Trabalhos futuros podem ser realizados para análise de tendência das diferentes variáveis meteorológicas (temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento) envolvidas com o cálculo da evapotranspiração de referência, buscando-se contribuir para o entendimento das causas de tendências constatadas na ET_0 . Destaca-se também a necessidade de um estudo com análise de tendência de precipitação, que mesmo não envolvido com a estimativa de ET_0 , poderia ser correlacionado com esse parâmetro meteorológico.

5 CONCLUSÃO

Constatou-se que a calibração do método Hargreaves-Samani proporcionou melhoria em todas as estações estudadas quando comparado com o método padrão FAO Penman-Monteith, considerando-se a redução do EAM.

Em relação ao Método Proposto (MP), obteve-se desempenho similar ao observado para o método Hargreaves-Samani calibrado (HSc), para todas as estações estudadas, havendo ligeiro decréscimo nos valores de EAM e REQM e ligeiro incremento para o coeficiente de correlação de Pearson (r), índice de concordância de Willmott (d) e Eficiência dos modelos (EF), quando comparados com o método HSc.

Constatou-se o ajuste entre as distribuições de valores diários de ET_0 obtidas com os métodos Hargreaves-Samani calibrado e o padrão FAO Penman-Monteith, para as estações meteorológicas convencionais de Aimorés, Araçuaí, Coronel Pacheco, Frutal, Guaratinga-BA, Paranaíba-MS, Pedra Azul, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Vitória-ES.

Verificou-se também o ajuste entre as distribuições de valores diários de ET_0 obtidas com os métodos Proposto e FAO Penman-Monteith para as estações meteorológicas de Aimorés, Araçuaí, Coronel Pacheco, Frutal, Guaratinga-BA, Lambari, Pedra Azul, Poços de Caldas, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso e Vitória-ES.

Verificou-se tendências significativas de acréscimo na ET_0 para o 5º bimestre na estação de Araçuaí, 1º, 4º, 5º e 6º bimestre para a estação de Caratinga, 4º e 5º bimestre para São Lourenço e 5º bimestre para Vitória - ES. Apenas a estação de Patos de Minas obteve-se tendência de redução significativa da ET_0 para o 2º bimestre de estudo.

6 REFERÊNCIAS

- ALENCAR, L. P. DE; DELGADO, R. C.; ALMEIDA, T. S.; WANDERLEY, H. S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 2, p. 337-343, 2011a.
- ALENCAR, L. P. DE; MANTOVANI, E. C.; BUFON, V. B.; 1956, G. C.; SILVA, T. G. F. DA. Variação temporal dos elementos climáticos e da ETo em Catalão, Goiás, no período de 1961-2011. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 8, p. 826–832, 2014.
- ALENCAR, L. P. DE; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C.; MARTINEZ, M. A. Tendências crescentes nos elementos do clima e suas implicações na evapotranspiração da cultura do milho em Viçosa - MG. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 631–642, 2011c.
- ALENCAR, L. P. DE; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 5, p. 437–449, 2011b.
- ALENCAR, L. P. DE; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C.; VIEIRA, G. H. S. Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade de Uberaba- MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 7, n. 1, p. 159–166, 2012.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO**, p. 300, 1998.
- 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.
- BERENGENA, J.; GAVILÁN, P. Reference Evapotranspiration Estimation in a Highly Advective Semiarid Environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 2, p. 147-163, 2005.
- 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.
- BLAIN, G. C.; PICOLI, M. C. A.; LULU, J. Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 807–815, 2009.
- BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington D.C.: U.S. Soil Conservation Service,

1950.

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; OLIVEIRA, A. L. M.; ANDRADE, C. L. T. DE; PINHEIRO, M. A. B. Equação de Hargreaves-Samani calibrada em diferentes bases temporais para Sete Lagoas, MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 25, n. 1, p. 38–49, 2017.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013**. Brasília: ANA, 2013, 432 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2015**. Brasília: ANA, 2015, 88 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - 2014: relatório síntese / Agência Nacional de Águas**. Brasília: ANA, 2016.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

BURN, D. H.; HESCH, N. M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. **Journal of Hydrology**, v. 336, p. 61–73, 2007.

CAMARGO, A. P. DE. **Balço hídrico no Estado de São Paulo 3. ed.** Instituto Agrônomo de Campinas. Campinas - SP: 1971. 24 p.

CAMARGO, A. P. DE; CAMARGO, M. B. P. **Teste de uma equação simples da evapo(transpi)ração potencial baseada na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar**. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. **Anais...**Campinas - SP: 1983.

CAMARGO, A. P. DE; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e super-úmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CAMARGO, A. P. DE; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. **Prescrição de rega por modelo climatológico**. Fundação Cargill, 1990.

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.

CORDEIRO, A. P. A. **Tendências climáticas das variáveis meteorológicas originais, estimadas e das derivadas do balanço hídrico seriado do Rio Grande do Sul.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

CUNHA, F. F. DA; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. DE; SOUZA, E. J. DE. Performance of Estimative Models for Reference Evapotranspiration in the City of Cassilândia, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 173-184, 2017.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO**, v. 24, p. 144, 1977.

DROOGERS, P.; ALLEN, R. G. Estimating reference evapotranspiration under. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 16, p. 33-45, 2002.

ESPADAFOR, M.; LORITE, I. J.; GAVILÁN, P.; BERENGENA, J. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 6, p. 1045–1061, 2011.

FENG, Y.; JIA, Y.; CUI, N.; ZHAO, L.; LI, C.; GONG, D. Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration estimation in Sichuan basin of southwest China. **Agricultural Water Management**, v. 181, p. 1-9, 2017.

FERRAZ, R. C. Estimativa de evapotranspiração de referência utilizando redes neurais artificiais para o estado do Rio Grande do Sul. **Revista Tecnológica**, v. 23, n. 1, p. 25-31, 2014.

GAO, G.; CHEN, D.; REN, G.; CHEN, Y.; LIAO, Y. Spatial and temporal variations and controlling factors of potential evapotranspiration in China: 1956-2000. **Journal of Geographical Sciences**, v. 16, n. 1, p. 3–12, 2006.

GAO, Z.; HE, J.; DONG, K.; LI, X. Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 232, p. 106–117, 2017.

GAVILÁN, P.; LORITE, I. J.; TORNERO, S.; BERENGENA, J. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference et in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 3, p. 257-281, 2006.

GOLUBEV, V. S.; LAWRIK, J. H.; GROISMAN, P. Y.; SPERANSKAYA, N. A.; ZHURAVIN, S. A.; MENNE, M. J.; PETERSON, T. C.; MALONE, R. W. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment. **Geophysical Research Letters**, v. 28, p. 2665–2668, 2001.

HAMON, W. R. Estimating Potential Evapotranspiration. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 87, n. 1, p. 107-120, 1961.

HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, n. 1, p. 53-63, 2003.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **American Society of Agricultural Engineering**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HEYDARI, M. M.; HEYDARI, M. Calibration of Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in semiarid and arid regions. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 60, n. 5, p. 695-713, 2014.

HOBBS, M. T.; RAMÍREZ, J. A.; BROWN, T. C. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary? **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 13, p. 1–5, 2004.

HUO, Z.; DAI, X.; FENG, S.; KANG, S.; HUANG, G. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 24–34, 2013.

IRMAK, S.; KABENGE, I.; SKAGGS, K. E.; MUTIIBWA, D. Trend and magnitude of changes in climate variables and reference evapotranspiration over 116-yr period in the Platte River Basin, central Nebraska-USA. **Journal of Hydrology**, v. 420–421, p. 228–244, 2012.

ISSAKA, A. I.; PAEK, J.; ABDELLA, K.; POLLANEN, M.; HUDA, A. K. S.; KAITIBIE, S.; GOKTEPE, I.; HAQ, M. M.; MOUSTAFA, A. T. Analysis and Calibration of Empirical Relationships for Estimating Evapotranspiration in Qatar: Case Study. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 2, p. 1-7, 2017.

JENSEN, M. E. Consumptive use of water and irrigation water requirements. **American Society of Civil Engineers**, New York. 1973.

JHAJHARIA, D.; DINPASHOH, Y.; KAHYA, E.; SINGH, V. P.; FAKHERI-FARD, A. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 3, p. 421–435, 2012.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. Londres: Charles Griffin, 1975.

KHARRUFA, N. S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. **Beiträge zur Hydrologie**, v. 5.1, n. 1, p. 39-47, 1985.

LACERDA, Z. C.; TURCO, J. E. P. Estimation methods of reference evapotranspiration (ET_o) for Uberlândia-MG. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 27-38, 2015.

LIANG, L.; LI, L.; ZHANG, L.; LI, J.; LI, B. 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.

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.

MACEDO, F. L. DE; SILVA, H. R.; ROMERO, C. W. DA S.; RODRIGUES, R. A. F.;

- MARQUES, A. P. Determinação da evapotranspiração real diária em diferentes usos e ocupação do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 5, p. 1529-1542, 2016.
- MACHADO, R. E.; MATTOS, A. Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, n. 2, p. 193-197, 2000.
- MAKKINK, G. F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 5, p. 290-305, 1957.
- MANN, H. B. Econometrica. **The econometric society**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.
- MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A. Influência dos fenômenos el niño e la niña no clima de Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 1, p. 123–129, 2000.
- MARTÍ, P.; GONZÁLEZ-ALTOZANO, P.; LÓPEZ-URREA, R.; MANCHA, L. A.; SHIRI, J. Modeling reference evapotranspiration with calculated targets. Assessment and implications. **Agricultural Water Management**, v. 149, p. 81-90, 2015.
- 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.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2002
- MELO, G. L. DE; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 5, p. 875-888, 2012.
- MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no Estado do Paraná. **Revista Ceres**, v. 58, n. 5, p. 593–602, 2011.
- MOHAWESH, O. E. Spatio-temporal calibration of Blaney-Criddle equation in arid and semiarid environment. **Water Resources Management**, v. 24, n. 10, p. 2187-2201, 2010.
- MOREIRA, L. C. J.; DURAND, B. J.; TEIXEIRA, A. DOS S.; ANDRADE, E. M. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 6, p. 1148-1159, 2010.
- NUNES, E. L.; AMORIN, R. C. F. DE; SOUZA, W. G. DE; RIBEIRO, A.; SENNA, M. C. A.; LEAL, B. G. Zoneamento agroclimático da cultura do café para a bacia do rio Doce. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 3, p. 297-302, 2007.
- OLIVEIRA, A. L. M. **Calibração da equação de hargreaves-samani e de um novo método para estimativa da evapotranspiração de referência na região mineira da bacia hidrográfica do rio São Francisco.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João del-Rei, 2016.
- OLIVEIRA, V. M. R.; DANTAS, G. D. F.; PALARETTI, L. F.; DALRI, A. B.; DOS SANTOS, M. G.; FILHO, J. A. F. Estimativa de Evapotranspiração de referência na região de Rio Paranaíba-MG. **Irriga**, v. 20, n. 4, p. 790-798, 2015.

ÖNÖZ, B.; BAYAZIT, M. The power of statistical test for trend detection. **Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences**, v. 27, p. 247–251, 2003.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENCA, R. H. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, v. 28, n. 1, p. 1–3, 2009.

PACHECO, A. P.; CERQUEIRA, M. A.; SILVA, B. B.; NICÁCIO, R. M. Análise espaço temporal da evapotranspiração na área de preservação ambiental da Ilha de Santa Rita, Alagoas, Brasil. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 453-460, 2014.

PANDORFI, H.; BEZERRA, A. C.; ATARASSI, R. T.; VIEIRA, F. M. C.; FILHO, J. A. D. B.; GUISELINI, C. Artificial neural networks employment in the prediction of evapotranspiration of greenhouse-grown sweet pepper. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 6, p. 507-512, 2016.

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.

PENMAN, H. L. Estimating evaporation. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 37, n. 1, p. 43, 1956.

PENMAN, H. L. **Natural evaporation from open water, bare soil and grass**. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. **Anais...**1948.

PEREIRA, A. R.; PRUITT, W. O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, v. 66, n. 3, p. 251-257, 2004.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. 1. ed. Piracicaba - SP: FEALQ, 1997.

R Core Team (2016). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RAYNER, D. P. Wind run changes: The dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia. **Journal of Climate**, v. 20, n. 14, p. 3379–3394, 2007.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, v. 121, p. 1-18, 2013.

RODERICK, M. L.; ROTSTAYN, L. D.; FARQUHAR, G. D.; HOBBS, M. T. On the attribution of changing pan evaporation. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 17, p. 1–6, 2007.

RODRIGUES, R. DE Á.; SANTOS, R. S. DOS. Estudo de tendência climática na série temporal de precipitação pluviométrica em Araguari (MG). **Revista Geográfica Acadêmica**,

v. 1, n. 1, p. 20–27, 2007.

SÁ JÚNIOR, A. DE; DE CARVALHO, L. G.; DA SILVA, F. F.; ALVES, M. DE C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 108, n. 1–2, p. 1–7, 2012.

SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 4, p. 265–267, 2000.

SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, n. 1, p. i-xii, 1996.

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1998.

SHAN, N.; SHI, Z.; YANG, X.; GAO, J.; CAI, D. Spatiotemporal trends of reference evapotranspiration and its driving factors in the Beijing-Tianjin Sand Source Control Project Region, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 200, p. 322–333, 2015.

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

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

SOME’E, B. S.; EZANI, A.; TABARI, H. Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. **Atmospheric Research**, v. 113, p. 1–12, 2012.

STEIDLE NETO, A. J.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANDRADE, C. L. T.; LOPES, D. C.; NASCIMENTO, P. T. Reference evapotranspiration estimates based on minimum meteorological variable requirements of historical weather data. **Chilean journal of agricultural research**, v. 75, n. 3, p. 366–374, 2015.

SUTCLIFFE, J. F. **As plantas e a água**. São Paulo: EPU. 1980. 126p.

TANG, B.; TONG, L.; KANG, S.; ZHANG, L. Impacts of climate variability on reference evapotranspiration over 58 years in the Haihe river basin of north China. **Agricultural Water Management**, v. 98, n. 10, p. 1660–1670, 2011.

TEIXEIRA, P. R.; CERQUEIRA, R. DE C. C. M.; SOUSA, W. J. DE; BORBA, J. C. C.; SÁ, M. DE O.; QUERINO, C. A. S.; MEIXNER, F. X.; MOURA, M. A. L. **Estudo comparativo dos componentes do balanço de radiação para um dia de céu claro e outro de céu parcialmente nublado na Amazônia**. Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais...Fortaleza - CE: 2004

TEMESGEN, B.; ECHING, S.; DAVIDOFF, B.; FRAME, K. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 73–84, 2005.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

TODOROVIC, M.; KARIC, B.; PEREIRA, L. S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. **Journal of Hydrology**, v. 481, p. 166–176, 2013.

TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, p. 38–42, 2007.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 1. ed. São Paulo: Nobel, 1980.

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Annals of Agronomy**, v. 12, p. 13–49, 1961.

WILCOXON, F. Individual comparisons of grouped data by ranking methods. **Biometrics Bulletin**, v. 1, n. 6, p. 80-83, 1945.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, n. 1, p. 79-82, 2005.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 2012.

XU, C. YU; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, D.; SINGH, V. P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. **Journal of Hydrology**, v. 327, p. 81–93, 2006.

YEVJEVICH, V. **Probability and statistics in water resources publications**. Fort Collins: Water Resources Publications, 1972.

ZHAO, S.; YANG, Y.; ZHANG, F.; SUI, X.; YAO, Y.; ZHAO, N.; ZHAO, Q.; LI, C. Rapid evaluation of reference evapotranspiration in Northern China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 2, p. 647–657, 2015.