



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO
CAMPUS GUANAMBI

GUAPEÍ VASCONCELOS VERAS

**PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA
DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA (E_{T_0}) AJUSTADOS PELO MODELO DE
PENMAM-MONTEITH PADRÃO FAO**

GUANAMBI
BAHIA - BRASIL
2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO
CAMPUS GUANAMBI

GUAPEÍ VASCONCELOS VERAS

**PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA DETERMINAÇÃO
DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0) AJUSTADOS PELO
MODELO DE PENMAM-MONTEITH PADRÃO FAO**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional.

GUANAMBI
BAHIA - BRASIL
2023

Catálogo: Roberta Pinheiro Ferraz – CRB-5/1596,
IF Baiano, Campus Guanambi

V476p Veras, Guapeí Vasconcelos

Parametrização de modelos empíricos para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) ajustados pelo modelo de Penman-Monteith padrão FAO. / Guapeí Vasconcelos Veras.– Guanambi, Ba., 2023.

22f.: il.

Dissertação (Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, Campus Guanambi.

Orientador: José Alberto Alves de Souza.

Coorientador: Marcelo Rocha dos Santos.

1. Recursos hídricos. 2. Evapotranspiração. 2. Parâmetro agrometeorológico . I. Título.

CDU: 556.18



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO

Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido

TERMO DE APROVAÇÃO NO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PARAMETRIZAÇÃO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA DETERMINAÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (E_{T0}) AJUSTADOS PELO MODELO DE PENMAM-MONTEITH PADRÃO FAO

Por

Guapeí Vasconcelos Veras

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado às 09:00 do dia 26 de julho de 2023 como requisito para a conclusão do curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - *Campus* Guanambi. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores/pesquisadores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o Trabalho APROVADO.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Alberto Alves de Souza - Presidente; Prof. Dr. Marcelo Rocha dos Santos - Titular;

Prof. Dr. Carlos Elizio Cotrim - Titular; Prof. Dr. Cristiano Tagliaferre – Titular

Documento assinado eletronicamente por:

- **Jose Alberto Alves de Souza, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/09/2023 11:48:30.
- **Marcelo Rocha dos Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/09/2023 11:13:53.
- **Cristiano Tagliaferre, Cristiano Tagliaferre - 234505 - Docente de ensino superior na área de didática - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia-Uesb (13069489000108)**, em 11/09/2023 10:32:27.
- **Carlos Elizio Cotrim, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 11/09/2023 10:28:18.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 26/07/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifbailano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 466485
Verificador: 781e2cfa1
Código de
Autenticação:



SUMÁRIO

RESUMO.....	07
ABSTRACT.....	.08
INTRODUÇÃO09
MATERIAS E MÉTODOS	11
RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
CONCLUSÕES21
REFERÊNCIAS BLIOGRÁFICAS	22

RESUMO

VERAS, G. V, M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, Guanambi, julho de 2023. **Parametrização de modelos empíricos para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) ajustados pelo modelo de Penman-Monteith padrão FAO.** Orientador: Prof. Dr. José Alberto Alves de Souza. Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rocha dos Santos

A determinação da demanda evapotranspirométrica local é importante para sustentabilidade no uso dos recursos hídricos na agricultura. Objetivou-se, com este trabalho, propor e avaliar a eficiência de três modelos empíricos para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o). Propõem-se a utilização das seguintes do clima: Modelo 1: temperatura máxima e mínima; umidade relativa do ar; e velocidade do vento; Modelo 2: apenas temperatura máxima e velocidade do vento; e Modelo 3: uma correção do modelo 2, com a radiação solar no topo da atmosfera. Os modelos foram testados em dois municípios, Guanambi, BA e Januária, MG. Para parametrização, foram utilizados séries históricas de dados climáticos obtidos através de estação meteorológica e, com estes dados, foi calculada a ET_o pelo método de Penman-Monteith e pelos modelos propostos, sendo que os dados de ET_o obtidos pelos modelos empíricos foram comparados com a ET_o de Penman-Monteith. Os modelos avaliados são eficientes e promissores para uso na estimativa da evapotranspiração de referência; os modelos M1 e M3 se destacaram na estimativa da evapotranspiração de referência, pois apresentaram o menor erro médio na estimativa; é possível determinar a ET_o usando apenas dados de temperatura máxima e velocidade do vento, conforme o modelo 2.

Palavras-chave: demanda evapotranspirométrica; necessidade hídrica das culturas; recursos hídricos.

ABSTRACT

VERAS, G. V, M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, Guanambi, July, 2023. **Parameterization of empirical models to determine reference evapotranspiration (ET_o) adjusted by the FAO standard Penman-Monteith model.** Adviser: Prof. Dr. José Alberto Alves de Souza. Co-Adviser: Prof. Dr. Marcelo Rocha dos Santos

Determining local evapotranspirometric demand is important for sustainability in the use of water resources in agriculture. The objective of this work was to propose and evaluate the efficiency of three empirical models for determining reference evapotranspiration (ET_o). It is proposed, with model 1, the use of the climate variables maximum and minimum temperature, relative humidity and wind speed; for model 2, only maximum temperature and wind speed and, for model 3, a correction of model 2 with solar radiation at the top of the atmosphere. The models were tested in two municipalities, Guanambi, BA and Januária, MG. For parameterization, historical series of climate data were used, obtained through a meteorological station and, with these data, ET_o was calculated using the Penman-Monteith method and the proposed models, and the ET_o data obtained by empirical models were compared with the Penman-Monteith ET_o. The models evaluated are efficient and promising for use in estimating reference evapotranspiration; models M1 and M3 stood out in estimating reference evapotranspiration, as they presented the lowest average error in the estimate; it is possible to determine ET_o using only maximum temperature and wind speed data, according to model 2.

Keywords: evapotranspirometric demand; crop water needs; water resources.

INTRODUÇÃO

Com a demanda crescente por água doce, tanto pela agricultura quanto para outros fins, aliada a sua potencial escassez, é necessário que os diversos seguimentos façam uso racional desse recurso (PAIVA; SOUZA, 2016). Sendo assim, como forma de contribuição, e para dar uma resposta à sociedade, os irrigantes devem adotar estratégias para aumentar a eficiência do uso da água na agricultura irrigada.

Normalmente, o produtor que não adota técnicas para o manejo da irrigação tende a superestimar a demanda hídrica da cultura. A justificativa para o consumo de água em excesso está relacionada ao estresse hídrico que a cultura possa sofrer, o que poderia comprometer a produtividade. O descontrole da irrigação gera um aumento do custo de produção pelo desperdício de energia e água (FEITOSA et al., 2014).

A agricultura irrigada desponta como uma atividade altamente dependente da energia elétrica. Como consequência, esse insumo representa um forte componente nos custos totais, que podem chegar a 35% do custo da produção, reduzindo a margem de lucro do produtor (FEITOSA et al., 2014). Ao realizar o manejo da irrigação, pelo tempo de irrigação correto, haverá redução do consumo de energia e racionalidade no uso da água.

Além do aumento do custo provocado pelo maior consumo de energia, a irrigação sem critério provoca danos ambientais. Quando água e fertilizantes são aplicados em excesso, sobretudo em sistemas de cultivo não protegido, os recursos hídricos, sejam superficiais ou subterrâneos, são os principais destinos a serem atingidos (VASCONCELOS et al., 2013) causando, muitas vezes, a eutrofização dos corpos hídricos.

Outro problema decorrente da falta de manejo na irrigação é a menor eficiência na utilização dos fertilizantes, especialmente do nitrogênio e do potássio, que apresentam maior mobilidade no solo. Segundo Albuquerque et al. (2011), a aplicação de uma lâmina de irrigação igual a 120% da evapotranspiração da cultura (ET_c) pode provocar perdas de 50% do K₂O aplicado na lavoura. Outros autores, como Mendes et al. (2015), relatam perdas de NO₃ por lixiviação de até 66%, quando aplicada lâmina de irrigação igual a 150% da ET_o, e maior incidência de doenças, devido ao excesso de umidade nas folhas (CAFÉ FILHO et al., 2018).

Para o manejo de irrigação em fazendas, informações de solo e/ou clima são usadas como referência. Os métodos baseados em variáveis climáticas requerem seu monitoramento para determinar a evapotranspiração de referência - ETo (TELES et al., 2018). A estimativa precisa da ETo é crucial para determinar as necessidades de água das culturas (AHMADI & JAVANBAKHT, 2024). Assim, a evapotranspiração da cultura e a programação da irrigação são obtidos usando informações adicionais sobre os sistemas de plantio, cultura e irrigação (SANTOS et al., 2023).

A ETo é um indicador climático de demanda de água para a atmosfera e, portanto, um dos principais componentes do balanço de água no solo. A Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (Food and Agriculture Organization – FAO) recomenda, como padrão, o uso do método da estimativa da ETo por meio da equação proposta por Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), por apresentar valores mais próximos aos resultados obtidos com uso do lisímetro, que é o método padrão. Uma desvantagem da utilização do método de Penman-Monteith é a grande quantidade de variáveis climatológicas necessárias como entrada para o modelo, nem sempre disponíveis para os produtores.

A fim de facilitar o cálculo da ETo, muitos pesquisadores no mundo se empenharam em desenvolver equações empíricas, em que os resultados se aproximem dos valores fornecidos pelo método de Penman-Monteith, fazendo uso de variáveis climáticas com maior disponibilidade de registro ou com maior facilidade de aquisição, em função das coordenadas locais (ROCHA et al., 2015).

O método de Hargreaves & Samani utiliza como dados de entrada somente a temperatura do ar e a Radiação solar no topo da atmosfera (R_a). A R_a é calculada em função da Latitude do local e do dia do ano, podendo assim ser facilmente utilizada pelos produtores para o manejo da irrigação. No entanto, para alcançar uma boa estimativa, é necessária a obtenção de um coeficiente regional para a correção dos valores obtidos de ETo (NOIA et al., 2014).

Os modelos propostos neste trabalho visam somar no repertório de possibilidades para a obtenção ETo a partir de dados climáticos de fácil aquisição e modelo simplificado. Desta maneira, estamos oferecendo alternativas para que a agricultura irrigada continue sua expansão de maneira sustentável, minimizando assim os impactos ambientais da utilização do recurso água.

Assim, objetivou-se, com este trabalho, propor e avaliar a eficiência de três modelos empíricos para determinação da evapotranspiração de referência (ETo).

MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no Setor de Agricultura do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi. Foram utilizados dados climatológicos de dois municípios: Guanambi, BA e Januária, MG.

Em Guanambi, através de uma estação meteorológica Davis Vantage Pro2 sem Fio, instalada no Setor de Agricultura do *Campus* Guanambi, foram coletados os seguintes dados climatológicos: temperaturas máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); umidade relativa do ar (%); velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); precipitação (mm); radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); e ETo pelo método de Penman-Monteith (mm dia^{-1}); no período de agosto de 2011 a maio de 2016, cujos dados são apresentados na Figura 1.

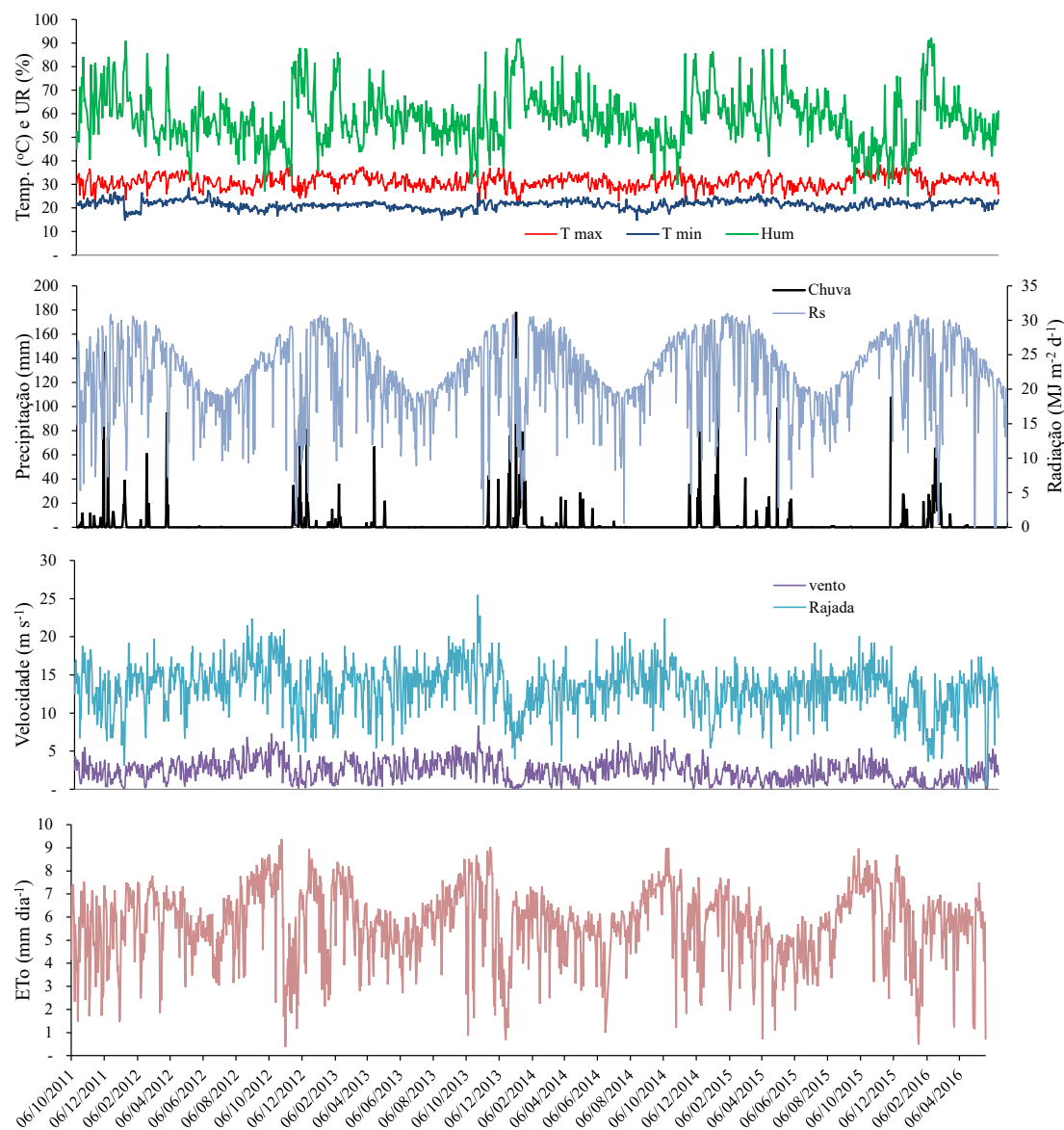


Figura 1. Temperaturas máxima (Tmax) e mínima (Tmin), umidade relativa do ar

(Hum), precipitação (chuva), Radiação solar (Rs), velocidade do vento (vento), rajada e evapotranspiração de referência (ETo) no Perímetro Irrigado de Ceraíma, Guanambi, Bahia, no período de agosto de 2011 a maio de 2016.

O estudo teve como base, a parametrização de modelos empíricos para determinação da ETo ajustados pelo modelo de Penman-Monteith padrão FAO (ALLEN et al., 1998).

Através dos dados de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e ETo obtida pelo modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) de uma série de cinco anos, possibilitou-se a parametrização de três modelos empíricos (M1, M2 e M3) para determinação da ETo. Os modelos consideram como dados de entrada a temperatura máxima e mínima, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar no topo da atmosfera (Ra). Os modelos M1, M2 e M3 são apresentados pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$ETo = \frac{a}{(Tmax - Tmin)^b} \times \frac{Vv}{UR} + c \times Tmax + d \quad (1)$$

$$ETo = a + b \times Tmax + c \times Vv \quad (2)$$

$$ETo = (a + b \times Tmax + c \times Vv) \times (d \times Ra + e) \quad (3)$$

em que,

‘a’, ‘b’, ‘c’, ‘d’ e ‘e’ são coeficientes de ajuste;

Tmax é a temperatura máxima (°C);

Tmin é a temperatura mínima (°C);

Vv é a velocidade do vento (m s⁻¹);

UR é a umidade relativa do ar (%); e

Ra é a radiação solar extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹).

A proposição do modelo 1 deveu-se à alta correlação entre evapotranspiração de referência com a umidade do ar, a temperatura máxima e a velocidade do vento (Tabela 1).

Tabela 1. Matriz de correlação entre as variáveis temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento (Vv) e evapotranspiração de referência (ETo), Guanambi, BA. Agosto de 2011 a maio de 2016.

	Tmax	Tmin	UR	Vv	ETo
Tmax	1				
Tmin	0,172	1			
UR	-0,680	0,129	1		
Vv	-0,016	-0,216	-0,413	1	
ETo	0,621	-0,035	-0,764	0,611	1

A escolha do modelo 2 (Eq. 2) se deu devido a elevada dependência da ETo com a temperatura máxima e com a velocidade do vento (Tabela 1) na região de Guanambi, Bahia e, por ser o vento uma das mais importantes variáveis do clima nesta região, onde, em praticamente toda época do ano, a velocidade média do vento é maior que 2,5 m s⁻¹ (Figura 1).

No modelo 3 (Eq. 3), acrescentou-se a variável Ra, com finalidade de corrigir a falta do dado de radiação solar global (Rs), uma vez que esta é um importante dado climático na determinação da ETo.

Para obtenção dos coeficientes de ajuste dos modelos, usou-se a função ‘Solver’ do Excel, empregando o Método dos Mínimos Quadrados.

Com os modelos parametrizados, procedeu-se, por dois anos e meio (janeiro de 2017 a maio de 2019), a coleta de dados das variáveis do clima e a realização dos cálculos da ETo pelo modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) e pelos modelos propostos. Atribuindo os dados de ETo calculados pelo modelo de Penman-Monteith como padrão, realizou-se avaliação de desempenho dos demais modelos. Como indicadores de avaliação, foi calculado o índice de concordância de Willmott (d) (WILLMOTT et al., 1985) (Eq. 4), o erro médio absoluto (EMA) (Eq. 5), a eficiência (EF) dos três modelos, conforme Zacharias et al (1996) (Eq. 6) e o índice de desempenho (c) (CAMARGO; SENTELHAS, 1997) (Eq. 7).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - E_i| \quad (5)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$c = d \times r \quad (7)$$

em que,

O_i é o valor da ETo obtido pelo modelo não padrão;

E_i é o valor estimado pelo modelo padrão;

\bar{O} é a média dos valores obtidos pelo método padrão; e

r é o coeficiente de correlação de Pearson.

Para garantir a aderência às demais condições climáticas, foram coletados dados meteorológicos na estação convencional do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, código 83386, instalada no *Campus* Januária do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais, Latitude - 15,45 e Longitude - 44,37, no município de Januária, estado de Minas Gerais. Foram utilizados todos os dados disponíveis no período de 22 de fevereiro de 1990 a 31 de dezembro de 2003, totalizando 4.796 dias de dados, conforme mostrado na Figura 2. Foram utilizados dados de períodos diferentes, pois não havia dados disponíveis para os mesmos períodos para ambas as regiões.

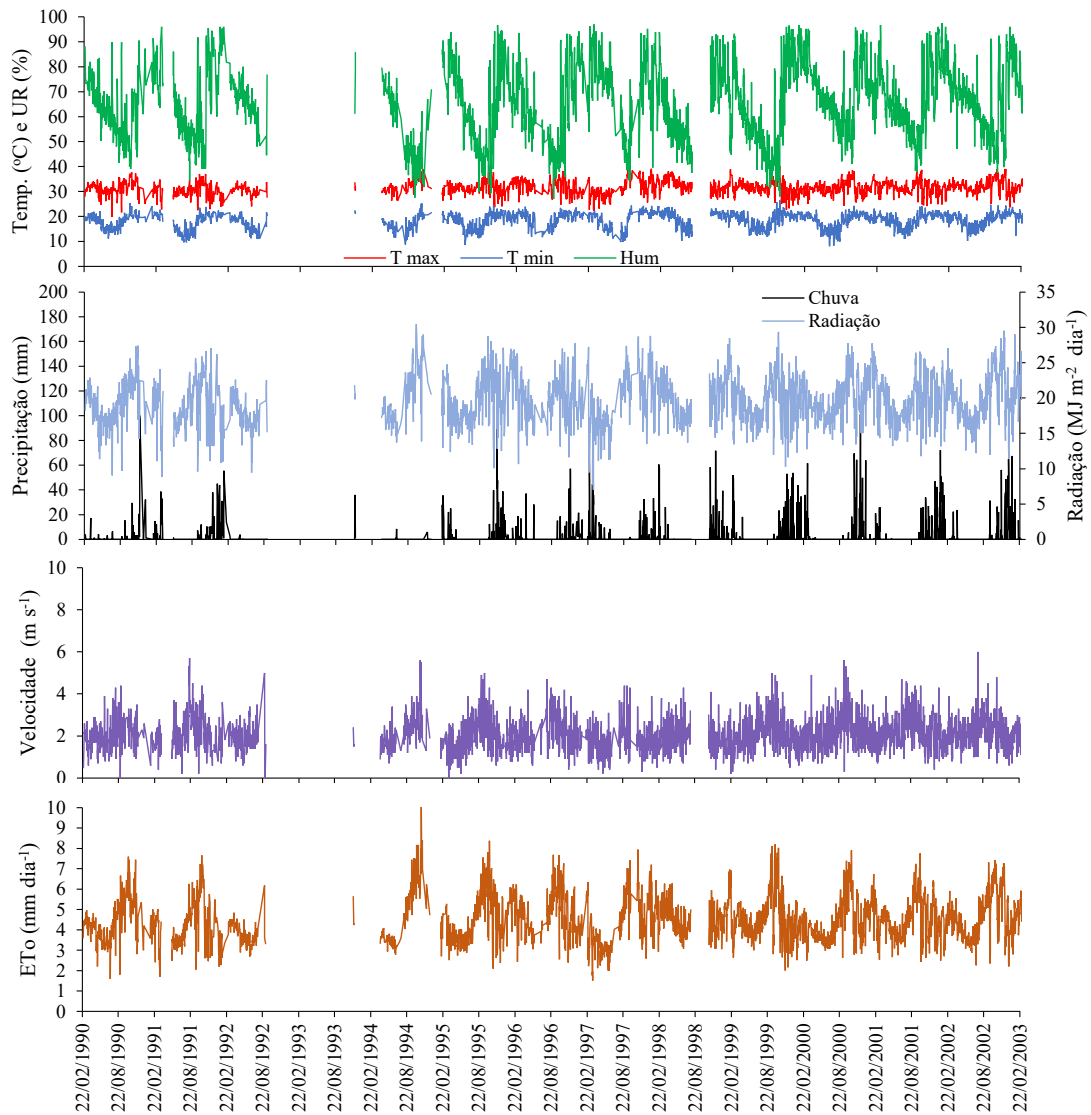


Figura 2. Temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin), umidade relativa do ar (Hum), chuva, Radiação solar (Rs), vento e evapotranspiração de referência no município de Januária, Minas Gerais. Fevereiro de 1990 a dezembro de 2003.

Por ser a estação de Januária um equipamento convencional, não dispõe de dados sobre radiação solar (Rs), assim, foi utilizado o modelo proposto por Hargreaves e Samani (1985) para a obtenção dessa variável, conforme equação 8.

$$Rs = kRs \times \sqrt{(Tmax - Tmin)} \times Ra \quad (8)$$

em que,

kRs é um coeficiente de ajuste, variando entre $0,16 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0,5}$, para localidades situadas no interior, distantes do oceano; e $0,19 \text{ } ^\circ\text{C}^{-0,5}$, para localidades litorâneas ou próximas a grandes corpos de água.

Os coeficientes de ajuste ‘a’, ‘b’, ‘c’, ‘d’ e ‘e’ para a região de Januária MG, foram ajustados através da função ‘Solver’ do Excel, uma vez que os coeficientes calculados para Ceraíma não tiveram um bom desempenho na condição climática de Januária, com uso do modelo 1. Assim, optou-se por parametrizar todos os modelos.

Posteriormente, já com os coeficientes regionais ajustados, procedeu-se a determinação da ETo através dos modelos propostos, para o período de 01 de janeiro de 2004 a 31 de dezembro de 2006. Os mesmos indicadores de avaliação utilizados em Guanambi também foram utilizados para Januária, todos utilizando o modelo Penman-Monteith como padrão.

Camargo e Sentelhas propuseram uma classificação para avaliação do índice c, que vai de péssimo para valores abaixo de 0,40, a ótimo para valores acima de 0,85, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Critério de desempenho dos métodos de estimativa de evapotranspiração, pelo índice “c”

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	Mau
≤ 0,4	Péssimo

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evapotranspiração de referência – ETo para o Distrito de Ceraíma

Os modelos parametrizados para o Distrito de Ceraíma, Guanambi, BA são apresentados pelas Equações 9, 10 e 11, correspondentes aos modelos M1, M2 e M3, respectivamente.

$$ETo = \frac{43,1803}{(Tmax - Tmin)^{0,0928}} \times \frac{Vv}{UR} + 0,2892 \times Tmax - 4,8858 - R^2 - 0,79 \quad (9)$$

$$ETo = -6,26761 + 0,331252 \times Tmax + 0,670227 \times Vv \quad - \quad R^2 = 0,77 \quad (10)$$

$$ETo = (-21,9627 + 1,21748 \times Tmax + 2,8944 \times Vv) \times (0,00289 \times Ra + 0,14452) \quad - \\ R^2 = 0,81 \quad (11)$$

Para o distrito de Ceraíma, os valores de ETo calculados pelo método de Penman-Monteith e pelos modelos propostos se agruparam bem em torno da linha de tendência, utilizando-se uma equação linear. Como observado na Figura 3, os coeficientes de determinação (r^2) foram iguais a 0,82, 0,80 e 0,81, para os modelos M1, M2 e M3, respectivamente.

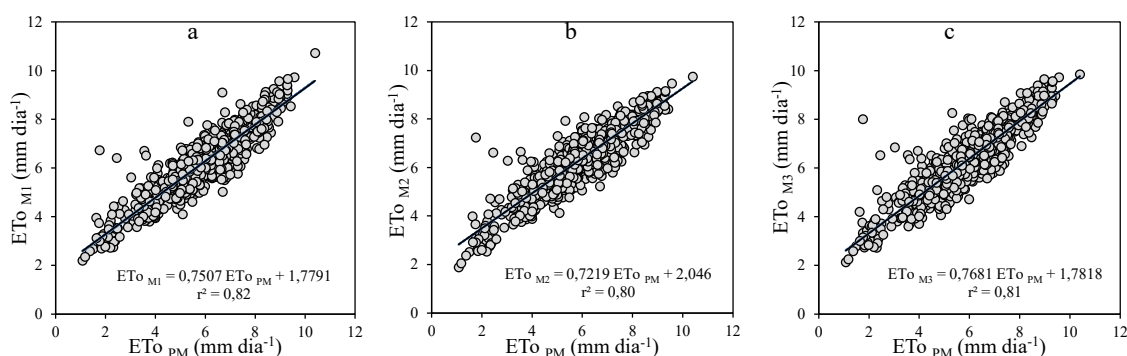


Figura 3. Gráfico de dispersão mostrando a relação entre os valores de ETo obtidos através do modelo de Penman-Monteith e os modelos propostos M1 (a), M2 (b) e M3 (c)], para distrito de Ceraíma, no período de janeiro de 2017 a maio de 2019.

Quando se observa os modelos (M1, M2 e M3), comparando-os individualmente ao modelo de Penman-Monteith, verifica-se uma correlação superior a 90% entre os dados, com coeficientes de correlação (r) iguais a 0,91, 0,90 e 0,90 para os modelos M1, M2 e M3, respectivamente, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Valores do índice de concordância de Willmott (d), o erro médio absoluto (EMA), eficiência (EF), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de desempenho (c), para os três modelos, no distrito de Ceraíma

Modelos	d	EMA (mm dia ⁻¹)	EF	r^2	r	c
M1	0,93	0,60	0,78	0,823	0,91	0,85
M2	0,99	0,66	0,74	0,803	0,90	0,90
M3	1,00	0,61	0,75	0,815	0,90	0,90

O erro médio absoluto (EMA), que expressa, em valores absolutos, quanto cada amostra analisada se diferencia da amostra padrão, em média, foi baixo. O valor do EMA para o modelo M1 foi de apenas 0,60 mm dia⁻¹, ao passo que para os modelos M2 e M3 foram iguais a 0,66 e 0,61 mm dia⁻¹, respectivamente, (Tabela 3). A eficiência dos métodos, de acordo com o modelo proposto por Zacharias et al. (1996), foi boa para os três modelos, sendo todas acima de 0,70, como pode ser observado na Tabela 3.

O índice d, que indica a exatidão comparada dos valores das estimativas, podendo variar de 0 a 1, que indicam nenhuma concordância e concordância perfeita, respectivamente, mostrou uma concordância elevada para os três modelos, com uma concordância perfeita para o modelo M3. O modelo M2 também expressou um índice d elevado, com valor igual a 0,99, ao passo que o M1 teve valor igual a 0,93 (Tabela 3).

Por fim, o índice de confiança c, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), que combina as medidas de correlação e concordância, para produzir um índice único, que indique o quanto as estimativas de evapotranspiração estão próximas, apresentaram valores acima de 0,8 para todos os modelos.

Os três modelos apresentaram um desempenho promissor, com classificação “muito bom” para o modelo M1, no limite máximo da faixa, e “ótimo” para os modelos M2 e M3. Esses resultados corroboram aqueles obtidos por Ahmadi et al. (2024), que testou algoritmos e equações na estimativa da evapotranspiração, destacando os métodos que utilizam radiação solar e temperatura como variáveis do modelo, bem como aqueles obtidos por Islam & Alam (2021), quando analisaram o desempenho de 15 modelos.

A Figura 3 mostra que os três modelos superestimaram ligeiramente a ETo para valores mais baixos de ETo, o que já foi observado em outros estudos. Em pesquisa realizada por Rocha et al. (2015), em Garanhuns, PE, foi constatado que o método de Hargreaves & Samani superestimou a ETo em relação ao método padrão descrito no boletim FAO 56, porém, em dias de umidade relativa do ar acima de 95%, os valores estimados se aproximaram do método padrão. Tagliaferre et al. (2012), no experimento conduzido no município de Guanambi, BA, testando métodos de determinação de ETo, constataram que o método de Hargreaves-Samani subestimou a ETo quando comparada a obtida pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, em todos os intervalos de tempo analisados, sendo considerado o pior método dentre os estudados na pesquisa. Neste último caso, a subestimação pode estar relacionada à ocorrência de ventos moderados a

fortes, predominantes na região de Guanambi, pois a equação de Hargreaves-Samani (1985) não leva em consideração a velocidade do vento.

Evapotranspiração de referência – ETo para o Município de Januária, MG

Os modelos parametrizados, para o município de Januária, MG, são apresentados pelas Equações 12, 13 e 14, correspondentes aos modelos M1, M2 e M3, respectivamente. Ao analisar os coeficientes de ajustes dos modelos, para o município de Januária, e ao compará-los com os coeficientes de ajustes dos modelos para Guanambi, notam-se aproximação nos valores destes coeficientes, o que indica coerência na aplicabilidade dos modelos propostos, principalmente, para os modelos 2 e 3.

$$ETo = \frac{134,7838}{(Tmax - Tmin)^{0,55455}} \times \frac{Vv}{UR} + 0,29022 \times Tmax - 5,8141 \quad - R^2 = 0,84 \quad (12)$$

$$ETo = -6,21866 + 0,29614 \times Tmax + 0,645953 \times Vv \quad - R^2 = 0,78 \quad (13)$$

$$ETo = (-21,6681 + 1,08712 \times Tmax + 2,64046 \times Vv) \times (0,003772 \times Ra + 0,11639) - R^2 = 0,89 \quad (14)$$

Para o município de Januária, os valores de ETo calculados pelo método de Penman-Monteith e pelos modelos propostos se agruparam bem em torno da linha de tendência, utilizando-se uma equação linear. Como observado na Figura 4, os coeficientes de determinação (r^2) foram iguais a 0,87, 0,82 e 0,90, para os modelos M1, M2 e M3, respectivamente.

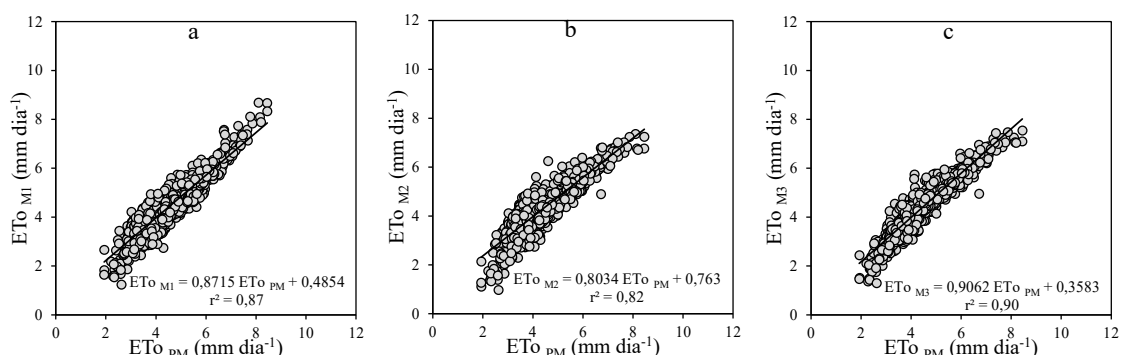


Figura 4. Gráfico de dispersão mostrando a relação entre os valores de ETo obtidos através do modelo padrão de Penman-Monteith e os modelos propostos M1, M2 e M3, para o município de Januária, MG, no período de janeiro de 2004 a dezembro de 2006.

Quando se observa os modelos (M1, M2 e M3), comparando-os individualmente ao de Penman-Monteith, observa-se uma correlação superior a 80% entre os dados, com coeficientes de correlação (r) iguais a 0,94, 0,91 e 0,95, para os modelos M1, M2 e M3, respectivamente, conforme Tabela 4.

Tabela 4. Valores do índice de concordância de Willmott (d), o erro médio absoluto (EMA), eficiência (EF), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de correlação de Pearson (r) e o índice de desempenho (c) para os três modelos no município de Januária.

Modelos	d	EMA (mm dia ⁻¹)	EF	r^2	r	c
M1	0,96	0,28	0,87	0,877	0,94	0,90
M2	0,95	0,33	0,82	0,828	0,91	0,80
M3	0,97	0,22	0,90	0,904	0,95	0,87

O erro médio absoluto (EMA) foi baixo. O valor do EMA para o modelo M1 foi de apenas 0,28 mm dia⁻¹, ao passo que para os modelos M2 e M3 foram iguais a 0,33 e 0,22 mm dia⁻¹(Tabela 4). A Eficiência dos métodos, de acordo com o modelo proposto por Zacharias et al. (1996), foi boa para os três modelos, sendo todas acima de 0,80, como demonstrado na Tabela 4.

O índice d mostrou uma concordância elevada para os três modelos, com uma concordância igual a 0,96 para o modelo M1. O modelo M2 foi o que expressou menor concordância, igual a 0,95, ao passo que o M3 teve valor igual a 0,97 (Tabela 4).

Por fim, o índice de confiança c, proposto por Camargo e Sentelhas (1997), apresentou valores acima de 0,8 para todos os modelos. Os três modelos apresentaram um desempenho promissor, com classificação “Ótimo” para o modelo M1, “Muito bom” para o modelo M2 e “Ótimo” para o modelo M3. Os resultados encontrados são semelhantes aos obtidos por Sharafi et al. (2023), que obtiveram desempenho satisfatório para modelos que utilizam apenas a temperatura do ar, porém, o uso da umidade relativa do ar no modelo melhorou os resultados em alguns locais. Esses resultados também são semelhantes aos obtidos para o local anterior, apesar de serem climaticamente diferentes.

Morais et al. (2015), avaliando o desempenho do método Penman Monteith com ausência de dados, e de métodos alternativos para a estimativa da ETo no Submédio

Vale do São Francisco, relataram que o método PM-FAO56 possui boas estimativas dos valores de ETo quando a ausência de dados se limita às variáveis de umidade relativa do ar, e, ou, da velocidade do vento, com raiz quadrada do quadrado do erro médio inferior a $0,65 \text{ mm dia}^{-1}$, quando não há os dados dessas duas variáveis ao mesmo tempo, mas, quando há ausência dos valores de saldo de radiação, se elevam os erros de cálculo da ETo, bem como o aumento do número de variáveis meteorológicas ausentes no cálculo da ETo diminui a precisão e exatidão da sua estimativa e os métodos alternativos de Hargreaves e Samani, Jensen e Haise e Makkink originais não se mostraram satisfatórios na ETo no Vale do Submédio São Francisco.

Araújo et al. (2011), verificando as correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a ETo, no Espírito Santo, verificaram que a radiação global e a temperatura média do ar foram as variáveis de maior influência sobre a estimativa da ETo, sendo a radiação global a variável de maior efeito direto. As variáveis velocidade do vento e umidade relativa do ar não foram capazes de explicar variações na evapotranspiração de forma isolada.

Tagliaferre et al. (2010), avaliando o desempenho de algumas equações empíricas usadas para estimar a ETo em relação ao método padrão Penman-Monteith FAO – 56, para as condições climáticas do município de Eunápolis, BA, afirmam que o método Hargreaves-Samani superestimou a ETo em 23%, caracterizando-o como o pior método para estimá-la, e que o método da Radiação e o de Blaney-Criddle apresentaram desempenho satisfatório para estimativa da ETo para as condições climáticas da região estudada.

Em geral, nos trabalhos semelhantes, os métodos que necessitam de poucas variáveis climáticas, como Hargreaves e Samani, apresentam baixa precisão e exatidão para estimativa da ETo, bem como o método de Penman Monteith, quando há ausência de dados mais difíceis de se obter, como saldo de radiação. No presente trabalho, mesmo os modelos que utilizam apenas a temperatura máxima e a velocidade do vento se mostraram eficientes para determinação da ETo.

CONCLUSÕES

Os modelos avaliados são eficientes e promissores para uso na estimativa da evapotranspiração de referência.

Os modelos M1 e M3 se destacaram na estimativa da evapotranspiração de referência, pois apresentaram o menor erro médio na estimativa.

É possível determinar a ETo usando apenas dados de temperatura máxima e velocidade do vento, conforme o modelo M2.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, A.; KAZEMBI, M. H.; DACCACHE, A.; SNYDER, R. L. SolarET: A generalizable machine learning approach to estimate reference evapotranspiration from solar radiation. **Agricultural Water Management**, 295 (108779), (2024).

ALBUQUERQUE, F. S.; SILVA, E. F. F.; SOUZA, A. E. R.; ROLIM, M. M. Lixiviação de potássio em um cultivo de pimentão sob lâminas de irrigação e doses de potássio. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p.135-144, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 310p. (Irrigation and drainage Paper, 56).

ARAÚJO, G. L.; REIS, E. F.; MOREIRA, G. R. Correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 5, n. 2, p. 96-104, 2011.

CAFÉ FILHO, A. C.; LOPES, C. A.; ROSSATO, M. Management of Plant Disease Epidemics with Irrigation Practices. *In*: ONDRAŠEK, G. **Irrigation in Agroecosystems**. Editora Intech Open, 2018.

CAMARGO, A. P.; 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.

FEITOSA, E. O. ALBIERO, D.; PRACIANO, A. C.; MACEDO, D. X. S.; CHIODEROLI, C. A. Simulação do aproveitamento da energia eólica para irrigação no distrito de irrigado BAIXO-ACARAÚ – CE. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 65-79, 2014.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n. 2, p. 96-99, 1985.

- ISLAM, S.; ALAM, A.K.M. R. Performance evaluation of FAO Penman-Monteith and best alternative models for estimating reference evapotranspiration in Bangladesh. **Heliyon** 7 (e07487), 2021.
- MENDES, W. C.; ALVES JÚNIOR, J.; CUNHA, P. C. R.; SILVA, A. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Lixiviação de nitrato em função de lâminas de irrigação em solos argiloso e arenoso. **Revista Irriga**, p. 47-56, 2015.
- MORAIS, J. E. F.; SILVA, T. G. F.; SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; DINIZ, W. J. S.; SOUZA, C. A. A. Avaliação do método de Penman Monteith FAO 56 com dados faltosos e de métodos alternativos na estimativa da evapotranspiração de referência no Submédio Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 8, n. 6, p. 1644-1660, 2015.
- NOIA, C. P. Z.; PEREIRA, S. B.; ROSA, D. R. Q.; ALMEIDA, R. A. Evapotranspiração de referência estimada pelos métodos Penman–Monteith-FAO (56) e Hargreaves & Samani para o município de Dourados, MS. **Revista Agrarian**, v.7, n. 24, p.300-308, 2014.
- PAIVA, C. M. & SOUZA, A. S. P. Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência para Fins de Manejo da Irrigação. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 39. n.1, p. 42-51, 2016.
- ROCHA, I. P.; LIMA, N. S.; CHAGAS, R. M.; ALMEIDA, G. L. P. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Garanhuns, PE. **Revista GEAMA**, v. 1, n. 2, 2015.
- SANTOS, G. R. LEÃO, E. U.; GONÇALVES, C. G.; CARDON, C. H. Manejo da adubação potássica e da irrigação no progresso de doenças fúngicas e produtividade da melancia. **Revista Horticultura Brasileira**, v. 31, n. 1, 2013.
- SHARAFI, S.; GHALENI, M.M.; SCHOLZ, M. Comparison of predictions of daily evapotranspiration based on climate variables using different data mining and empirical methods in various climates of Iran. **Heliyon** 9 (e13245), 2023.
- TAGLIAFERRE, C.; SANTOS NETO, I. J.; COTRIM, C. E.; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. C. Desempenho do irrigâmetro e de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Guanambi-BA. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 20, n.6, p.544-553, 2012.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R. A. J.; ROCHA, F. A.; SANTOS, L. C.; SILVA, C. S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis - BA. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

TELES, E.C. P. V. A.; LEITE, D. C.; ARRAES, F. D. D.; ALVES, J. E. A.; NASCIMENTO, R. C. Desenvolvimento orgânico da alface cv. Veneranda em diferentes canteiros e manejo de irrigação. **PUBVET**, v.12, n.10, p.1-6, 2018.

VASCONCELOS, N. S.; DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, J. F. LIMA, C. J. G. S. Qualidade das águas subterrâneas de área irrigada da comunidade de Pau Branco em Mossoró (RN). **Revista Holos**, v.1, p.47-63, 2013.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparisons of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5. p. 8995-9005, 1985.

ZACHARIAS, S., HEATWOLE, C. D., & COAKLEY, C. W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.39, n.1, p.47-54, 1996. <https://doi.org/doi: 10.13031/2013.27479>