

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL PROVÁVEL EM DIVINÓPOLIS, MG, BRASIL

Nayara Costa¹

Michael Silveira Thebaldi²

Karina Vilela Rodrigues²

RESUMO

A evapotranspiração (ET) é um variável fundamental na estimativa da exigência hídrica de uma determinada região, principalmente quando se trata de planejamento ou desenvolvimento de sistemas que envolvam o manejo da água, sendo a ET provável a lâmina que pode ser igualada ou superada a determinado nível de probabilidade. Assim, objetivou-se neste estudo estimar a ET potencial (ETp) mensal provável do município de Divinópolis, MG, a partir da verificação de distribuições estatísticas não-paramétricas que melhor representassem as séries históricas de ETp mensal do município. Para isso, foram analisados os dados diários coletados da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia, para uma série de 13 anos (2003 a 2015). Foram ajustadas, às séries observadas as distribuições de frequência Gumbel para Máximos, Fréchet, Gama, Log-Normal 2P e Beta, sendo as aderências destes modelos testadas pelos métodos de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, ambos a 5% de probabilidade. A ETp mensal provável foi calculada para as frequências de excedência de 90%, 75%, 50%, 25% e 10%. A distribuição Beta foi a que melhor aderiu à maioria das séries de evapotranspiração mensal, e a distribuição Log-Normal a 2 Parâmetros obteve a pior aderência. A ETp mensal provável máxima para Divinópolis é 153,92 mm, associada a uma probabilidade de 10% de ocorrência referente ao mês de dezembro, enquanto a menor, é 101,32 mm, com probabilidade de 90% de ocorrência no mês de junho.

Palavras-chave: Balanço Hídrico; Gerenciamento de Recursos Hídricos; Hidrologia Estatística.

ABSTRACT

Probable potential evapotranspiration estimation in Divinópolis, MG, Brazil. Evapotranspiration (ET) is a fundamental variable to estimate the water requirement of a given region, especially when it comes to planning or developing systems that involve water management, with the probable ET being the depth of this that can be matched or overcome at a certain level of probability. Thus, the objective of this study was to estimate the monthly probable potential evapotranspiration (ETp) of the city of Divinópolis, MG, from the verification of non-parametric statistical distributions that best represents the historical series of monthly ETp for the city. For this, the daily data collected from a conventional meteorological station of the Instituto Nacional de Meteorologia were analyzed, for a series of 13 years (2003 to 2015). The Gumbel for Maximum, Fréchet, Gama, Log-Normal 2P and Beta frequency distributions were adjusted to the observed series, and the fittings of these models were tested by the Kolmogorov-Smirnov and Chi-Square methods, both at 5% probability. The probable monthly ETp was calculated for frequencies of 90%, 75%,

¹ Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro Universitário de Formiga - UNIFOR-MG, Formiga, MG, Brasil.

² Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, MG, Brasil. E-mail para correspondência: karina.vilela02@gmail.com

50%, 25% and 10%. The Beta distribution was the one that best fitted to most series of monthly potential evapotranspiration, and the worst fit was obtained with the Log-Normal distribution with 2 Parameters. The maximum probable monthly ET_p for Divinópolis is 153.92 mm, associated with a 10% probability of occurrence for the month of December, while the lowest is 101.32 mm, with a 90% probability of occurrence in the month of June.

Keywords: Water Balance; Statistical Hydrology; Water Resources Management.

INTRODUÇÃO

O balanço hídrico (BH) é a somatório da quantidade de água que entra e sai de uma certa porção do solo. Para obter sua estimativa em uma área vegetada, deve-se conhecer algumas informações relativas ao clima, à cultura, capacidade de armazenamento de água e principalmente a precipitação e/ou irrigação - entrada de água; e à evapotranspiração - saída de água (Reichardt, 1990; Otsuki, 2015).

Considera-se a evapotranspiração (ET) um dos elementos de grande influência sobre as condições ambientais, principalmente quando se trata de planejamento ou desenvolvimento de sistemas que envolvam o manejo da água. A quantificação correta da ET é de suma importância para alcançar a economia hídrica na agricultura, podendo conduzir à uma irrigação mais próxima do ideal e sem desperdícios, já que, este é um dos setores de maior consumo de água no planeta (Mendonça e Dantas, 2010). São vários os fatores que influenciam e/ou interferem na ocorrência da evapotranspiração, havendo diversos métodos para medi-la ou estimá-la.

O conceito de evapotranspiração potencial (ET_p) foi introduzida por Thornthwaite (1948) e utilizada, inicialmente, para a classificação de climas, e mais tarde, foi popularizada nas áreas da agricultura e de recursos hídricos para o cálculo da evapotranspiração real (ET_r). Com a evolução do conhecimento científico nesta área do conhecimento (Carvalho et al., 2011), definiu-se a evapotranspiração de referência (ET₀), que é definida como a soma das perdas por evaporação e transpiração vegetal que ocorre em uma superfície coberta com grama, em que esta promove a cobertura total do solo e não sofre deficiência hídrica (Fernandes et al., 2011). A ET_p é considerada como a máxima capacidade de água a ser perdida, em uma dada condição climática, por uma superfície totalmente coberta, porém sem a definição de uma vegetação específica (Thornthwaite, 1948; Lhomme, 1997).

Na década de 1990, esforços da Food and Agriculture Organization (FAO) focaram no estabelecimento de uma nova definição para a cultura de referência e na definição de método para estimar a ET para esta (Pereira et al., 1997). Mesmo com o estabelecimento da padronização proposta pela FAO, é comum o uso dos termos ET_p e ET₀: para estudos climatológicos, o termo ET_p é o mais utilizado, pois, geralmente, está associado ao potencial hídrico de uma localidade, enquanto a ET₀ é adequada para a elaboração de projetos e estabelecimento do manejo de irrigação, já que é necessária uma referência para cálculo da evapotranspiração da cultura (Carvalho et al., 2011).

A evapotranspiração provável retrata o valor mínimo de lâmina esperada em um dado período do ano, para um determinado nível de probabilidade (Gurski, 2018), sendo recomendada no dimensionamento de projetos agrícolas, visto que, os valores médios podem resultar em erros (Doorenbos e Pruitt, 1997; Silva et al., 2015). A ET provável é estimada a partir de uma função de densidade de probabilidade (FDP), a qual descreve a possibilidade do valor que uma variável pode assumir ao longo de uma amostra de valores

(Denski e Back, 2015), logo, determina o quanto a lâmina de ET pode ser superada ou igualada a um determinado nível de probabilidade (Souza, 2001).

Existe uma grande variedade de FDP's, portanto, estas devem ser selecionadas de acordo com seu melhor ajuste às séries históricas, facilidade na estimativa de seus parâmetros e também à sua flexibilidade computacional (Souza et al., 2014). Sendo, de acordo com Pruitt et al. (1972), as distribuições Normal, Gama, Beta e Gumbel apresentaram melhores ajustes na estimativa de evapotranspiração, no entanto, Silva et al. (2015) consideram que, no dimensionamento de sistemas de irrigação, deveriam ser utilizadas as distribuições Gama e Normal.

A ETp é uma importante variável para estudos ambientais e balanço hídrico. Sua análise permite estimar o déficit ou superavit hídrico em uma determinada região, o que auxilia na gestão de recursos hídricos. Assim, tornam-se necessários estudos que objetivam estimar a sua quantidade e frequência de ocorrência a um determinado nível de probabilidade, os quais podem ser realizados a partir da coleta de dados de séries históricas e posterior interpretação, por meio de distribuições estatísticas de frequências de excedência. Deste modo, a determinação do melhor modelo que represente estes dados, contribui para uma maior abrangência do conhecimento das propriedades de clima da região, ao disponibilizar informações significativas para o uso adequado da água, planejamento agrícola e programação eficiente para implantação de recursos e operações, minimizando desperdícios e custos (Ávila et al., 2009; Silva et al., 2018; Castiglio et al., 2021).

Visto que, dados hidrológicos são necessários no planejamento e gestão de recursos hídricos e que, no Brasil a disponibilidade de dados em muitas regiões ainda é deficiente, objetivou-se nesta pesquisa analisar a evapotranspiração potencial provável mensal do município de Divinópolis – MG e, a partir da definição de distribuições estatísticas, identificar a que melhor representa as séries históricas de evapotranspiração mensal.

MATERIAL E MÉTODOS

O município de Divinópolis está localizado no Oeste do estado de Minas Gerais, com latitude 20°10'23" Sul, longitude 44°52'28" Oeste e altitude 788,35 metros. Seu território possui área de 708,115 km² e uma população estimada de 213.016 habitantes, conforme o último o censo demográfico publicado no ano de 2010 (IBGE, 2016). Os biomas que constituem a região são Cerrado e Mata Atlântica. Conforme a classificação de Köppen e Geiger (1939) o clima é Aw, o qual é quente e semiúmido com temperatura média de 21,5 °C e média anual de precipitação de 1313 mm, sendo no inverno menor que no verão (Alvares et al., 2013).

Os dados utilizados de evapotranspiração potencial foram obtidos por meio de uma série de 13 anos (2003 a 2015), porém, não foram utilizados os dados dos anos de 2005 e 2015, para o mês de janeiro, de 2006 para fevereiro, março e abril, de 2012 para junho, de 2005 para novembro, e de 2005 e 2014 para dezembro. Estes dados não foram utilizados por falta de registro da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), código 83685, localizada em Divinópolis, MG. Segundo informações divulgadas pelo INMET, os valores de ETp foram estimados pelo método Penman-Monteith, parametrizado por Allen et al. (1998).

A partir dos dados brutos, foram determinadas séries de evapotranspiração potencial totais mensais, além de calculadas as médias mensais. As frequências observadas das evapotranspirações potenciais de referência foram calculadas pela fórmula de Weibull (Equação 1).

$$f_{\text{obs}} = \frac{i}{N + 1} \quad (1)$$

Onde, f_{obs} é a frequência observada de excedência; i é a posição que o dado ocupa dentro da série histórica; N é o tamanho da série histórica.

Os dados de evapotranspiração potencial mensal foram alocados de forma decrescente, com objetivo de adquirir a frequência de não-excedência.

Para analisar a distribuição de frequência das estimativas da evapotranspiração potencial mensal foram avaliadas as distribuições Beta, Gama, Log-Normal a 2 Parâmetros, Fréchet e Gumbel para máximos.

A distribuição acumulada Beta incompleta $F(x')$, representada pela equação 2, dispõe da probabilidade de que a evapotranspiração potencial não exceda, em um dado período, um valor x' , sendo representada pela equação (Falls, 1973):

$$F(x') = \frac{\Gamma(p + q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} \cdot \int_0^{x'} x'^{p-1} \cdot (1 - x')^{q-1} \cdot dx' \quad (2)$$

$$x' = \frac{x - a}{b - a} \quad (3)$$

Onde, x' é a variável de evapotranspiração potencial transformada pela equação 3, de tal forma que $0 < x' < 1$; x é um valor qualquer da variável em estudo (evapotranspiração), compreendido no intervalo (a, b) ; a é o menor valor da série de dados de evapotranspiração; b é o maior valor da série de dados; p e q são os parâmetros da distribuição Beta, sendo $p > 0$ e $q > 0$; Γ é a Função Gama. A equação 2 proporciona a probabilidade de acontecimentos de uma evapotranspiração potencial menor ou igual a um valor x' . Pode-se utilizar a técnica de interpolação para se obter o inverso, ou seja, partindo-se de um valor de probabilidade, para se encontrar o valor correspondente de evapotranspiração de referência. Os parâmetros p e q da distribuição Beta podem ser estimados utilizando-se o método dos Momentos (Pearson, 1934):

$$p = \frac{\mu_1 \cdot (\mu_1 - \mu_2)}{\mu_2 - \mu_1^2} \quad (4)$$

$$q = \frac{(1 - \mu_1) \cdot (\mu_1 - \mu_2)}{\mu_2 - \mu_1^2} \quad (5)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^j \frac{x'_i}{j} \quad (6)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=1}^j \frac{x'^2_i}{j} \quad (7)$$

Onde, μ_1 é o momento de ordem 1 para a variável x' ; μ_2 é o momento de ordem 2 para a variável x' ; x'_i é a evapotranspiração transformada pela equação 3; j é o número total de dados que compõem a série

analisada de valores de evapotranspiração. A distribuição Log-Normal 2 parâmetros é descrita pela Função Densidade de Probabilidade (FDP), como apresentado na equação 8.

$$f(x) = \frac{1}{X \cdot \sigma_n \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-0.5 \left(\frac{\ln(x) - \mu_n}{\sigma_n} \right)^2} \quad (8)$$

Em que μ_n e σ_n são os parâmetros da distribuição, obedecendo à média e ao desvio padrão dos logaritmos dos dados. A equação base para estudos hidrológicos, utilizando a distribuição log-Normal 2 parâmetros, é uma adaptação da equação geral de ven Te Chow (Haan, 1977), conforme a equação 9.

$$X_{TR} = e^{\mu_n + \sigma_n \cdot K_{TR}} \quad (9)$$

O X_{TR} é o valor da variável hidrológica associada a um tempo de retorno e K_{TR} é a variável reduzida da distribuição Normal.

Já a função cumulativa de probabilidade da distribuição Gama é dada pela equação 10, enquanto os parâmetros da distribuição Gama são dados pelas equações 11 e 12.

$$FCP = \frac{1}{\beta^v \cdot \Gamma(v)} \int_0^x u^{(v-1)} e^{-\frac{u}{\beta}} du \quad (10)$$

$$\beta = \frac{S^2}{\bar{X}} \quad (11)$$

$$v = \frac{(\bar{X})^2}{S^2} \quad (12)$$

A equação 13 apresenta a FDP da distribuição Gumbel para máximos.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \times e^{\left[\frac{(x-\mu)}{\alpha} - e^{\frac{(x-\mu)}{\alpha}} \right]} \quad (13)$$

Em que α e μ são os parâmetros da distribuição. Já a função cumulativa de probabilidade é dada pela equação 14.

$$P(x \geq x_i) = 1 - e^{-e^{-\alpha(x-\mu)}} \quad (14)$$

Os parâmetros α e μ dados pelo método dos momentos são apresentados nas equações 15 e 16, e calculados a partir da média (\bar{X}) e desvio padrão (S) amostrais.

$$\alpha = \frac{1,2826}{S} \quad (15)$$

$$\mu = \bar{X} - 0,451 \times S \quad (16)$$

Para estimativa de uma variável hidrológica X_{TR} em função do tempo de retorno (TR), utiliza-se a equação 17.

$$X_{TR} = \frac{-\text{LN} \left[-\text{LN} \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right]}{\alpha} + \mu \quad (17)$$

A função de Fréchet é tida como distribuição de extremos do tipo II para máximos, devido ser estruturada em exponencial simples, havendo somente para $x > 0$. Ela é aplicada, principalmente, para estudo de frequência das precipitações máximas. A FDP e FCP são representadas pelas respectivas equações 18 e 19.

$$FDP = f(x) = \frac{\theta}{\lambda} \times \left(\frac{\lambda}{x}\right)^{\theta+1} \times \exp\left[-\frac{\lambda^\theta}{x}\right] \quad (18)$$

$$P(X \geq x_i) = 1 - \exp\left[-\frac{\lambda^\theta}{x}\right] \text{ para } x > 0; \theta \text{ e } \lambda > 0 \quad (19)$$

Já seus momentos estatísticos podem ser estimados com o uso das equações 20, 21 e 22.

$$E(x) = \bar{X} = \lambda \times \Gamma\left(1 - \frac{1}{\theta}\right) \text{ para } \theta > 0 \quad (20)$$

$$\text{Var}(x) = s^2 = \lambda^2 \times \left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{\theta}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{\theta}\right)\right] \text{ para } \theta > 2 \quad (21)$$

$$CV = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 - \frac{2}{\theta}\right)}{\Gamma^2\left(1 - \frac{1}{\theta}\right)} - 1} \text{ para } \theta > 2 \quad (22)$$

A fim de testar a aderência dos dados observados aos modelos estimados, foram aplicados os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, ambos a 5% de significância. A escolha da distribuição estatística que melhor representa a série histórica de evapotranspiração potencial mensal total, para cada um dos meses foi feita com base nos testes de aderência sendo a distribuição escolhida aquela significativa a 5% de probabilidade para os testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado e que possuísse menor valor de Qui-Quadrado calculado.

Nos casos em que o teste de Qui-Quadrado não fosse significativo para nenhuma distribuição aplicada à série histórica de evapotranspiração potencial mensal total, tomou-se como critério de escolha aquela que fosse significativa pelo teste de Kolmogorov-Smirnov e apresentasse valor de Qui-Quadrado calculado mais próximo do Qui-Quadrado tabelado para 5% de probabilidade estatística.

Quando não foi verificada significância para qualquer distribuição para o teste de Kolmogorov-Smirnov, foi admitido como distribuição estatística que melhor representaria a série, aquela significativa ao teste de Qui-Quadrado, e que possuísse menor valor de Qui-Quadrado calculado. Para séries históricas em que nenhuma distribuição apresentasse aderência significativa à 5% de probabilidade em ambos os testes, foi feita seleção com base na distribuição com menor Qui-Quadrado calculado, mesmo que não houvesse confiança na representação da série pela distribuição (Borges e Thebaldi, 2016).

As evapotranspirações potenciais prováveis mensais foram calculadas a partir de frequências de excedência de 90%, 75%, 50%, 25% e 10%, equivalentes aos tempos de retorno de 1,05 anos; 1,11 anos; 1,25 anos; 1,33 anos; 1,43 anos; 1,67 anos; 2,00 anos; 2,50 anos; 3,33 anos; 5,00 anos; 6,67 anos; 10,00 anos e 20,00 anos. Além disso, por meio de análises de regressão, relacionou-se as ETp médias mensais do período estudado com as respectivas ETp prováveis com probabilidade de excedência de 10%, 25%, 50%, 75% e

90%, definindo os valores médios como a variável dependente. As significâncias dos ajustes realizados foram determinadas com o uso do Teste t a 5% de probabilidade estatística.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores alcançados dos parâmetros de ajuste das funções avaliadas com os dados da série histórica de evapotranspiração potencial mensal da cidade de Divinópolis, MG, são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Valores obtidos dos parâmetros de ajuste das funções avaliadas com os dados da série histórica de evapotranspiração potencial mensal da cidade de Divinópolis, MG.

	Gumbel para máximos	Fréchet	Gama	Log-Normal 2P	Beta
Janeiro	μ : 146,031	λ : 146,0236	β : 0,054773	μ : 4,992365	α : 0,483532
	α : 0,451538	θ : 67,25529	v : 2689,461	σ : 0,019277	β : 0,594465
Fevereiro	μ : 130,1937	λ : 130,184	β : 0,074199	μ : 4,879506	α : 0,827176
	α : 0,410453	θ : 54,75838	v : 1773,601	σ : 0,023883	β : 0,73901
Março	μ : 134,736	λ : 134,732	β : 0,028432	μ : 4,909758	α : 0,962899
	α : 0,653173	θ : 89,31901	v : 4770,01	σ : 0,014413	β : 1,424119
Abril	μ : 120,4703	λ : 120,4661	β : 0,030988	μ : 4,798503	α : 1,595407
	α : 0,661432	θ : 80,9972	v : 3915,766	σ : 0,016056	β : 1,311082
Maio	μ : 113,1654	λ : 113,1624	β : 0,021819	μ : 4,73501	α : 0,864152
	α : 0,813694	θ : 93,39451	v : 5219,082	σ : 0,013853	β : 0,770816
Junho	μ : 104,7326	λ : 104,7238	β : 0,067387	μ : 4,662531	α : 0,87695
	α : 0,480048	θ : 51,59763	v : 1572,046	σ : 0,025371	β : 0,61186
Julho	μ : 109,4416	λ : 109,4348	β : 0,050431	μ : 4,704842	α : 0,881156
	α : 0,543319	θ : 60,77996	v : 2191,2	σ : 0,021204	β : 1,14053
Agosto	μ : 116,6039	λ : 116,5972	β : 0,049308	μ : 4,767843	α : 1,033897
	α : 0,532436	θ : 63,40171	v : 2386,796	σ : 0,020455	β : 1,208716
Setembro	μ : 124,2424	λ : 124,2318	β : 0,079329	μ : 4,833312	α : 0,913897
	α : 0,40623	θ : 51,79187	v : 1584,082	σ : 0,025248	β : 0,789086
Outubro	μ : 137,3454	λ : 137,3275	β : 0,14097	μ : 4,936451	α : 1,063997
	α : 0,289395	θ : 41,07237	v : 988,4397	σ : 0,03173	β : 1,288479
Novembro	μ : 138,4722	λ : 138,4597	β : 0,096015	μ : 4,942208	α : 0,98648
	α : 0,349677	θ : 49,74215	v : 1459,383	σ : 0,026021	β : 1,17824
Dezembro	μ : 146,6762	λ : 146,6645	β : 0,088704	μ : 4,99022	α : 0,6193
	α : 0,353619	θ : 53,18795	v : 1671,939	σ : 0,024426	β : 0,771636

Os valores obtidos das estatísticas dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, na avaliação do ajuste dos modelos estatísticos não paramétricos avaliados às séries históricas de evapotranspiração potencial mensal do município de Divinópolis, MG, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Valores obtidos das estatísticas dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado na avaliação do ajuste das funções à série histórica de evapotranspiração potencial mensal da cidade de Divinópolis, MG.

Mês	Distribuição	ΔF tabelado	ΔF Calculado Máximo	λ^2 tabelado	λ^2 calculado
Janeiro	Gumbel para máximos	0,3948	0,1676*	3,841	1,378*
	Fréchet		0,1719*		1,396*
	Gama		0,1281*		2,433*
	Log-Normal 2P		0,1286*		2,404*
	Beta		0,1222*		0,143*
Fevereiro	Gumbel para máximos	0,3086	0,2265*	3,841	3,072*
	Fréchet		0,2314*		3,463*
	Gama		0,1655*		1,790*
	Log-Normal 2P		0,1658*		1,850*
	Beta		0,1215*		0,564*
Março	Gumbel para máximos	0,3806	0,1034*	5,991	0,303*
	Fréchet		0,1015*		0,315*
	Gama		0,1573*		0,843*
	Log-Normal 2P		0,1572*		0,831*
	Beta		0,1034*		0,727*
Abril	Gumbel para máximos	0,3806	0,2347*	3,841	3,195*
	Fréchet		0,2379*		3,273*
	Gama		0,1678*		1,626*
	Log-Normal 2P		0,1687*		1,651*
	Beta		0,1546*		1,481*
Maio	Gumbel para máximos	0,3664	0,1102*	3,841	0,522*
	Fréchet		0,1127*		0,554*
	Gama		0,0685*		0,023*
	Log-Normal 2P		0,0680*		0,025*
	Beta		0,1226*		8,271x10 ⁻⁰⁵ *
Junho	Gumbel para máximos	0,3806	0,2071*	5,991	3,763*
	Fréchet		0,2123*		4,006*
	Gama		0,1397*		1,556*
	Log-Normal 2P		0,1409*		1,572*
	Beta		0,0898*		0,148*
Julho	Gumbel para máximos	0,3664	0,1198*	3,841	0,181*
	Fréchet		0,1199*		0,218*
	Gama		0,1446*		0,063*
	Log-Normal 2P		0,1456*		0,055*
	Beta		0,1463*		0,038*

Mês	Distribuição	ΔF tabelado	ΔF Calculado Máximo	λ^2 tabelado	λ^2 calculado
Agosto	Gumbel para máximos		0,1176*		0,040*
	Fréchet		0,1216*		0,056*
	Gama	0,3664	0,0683*	3,841	0,204*
	Log-Normal 2P		0,0690*		0,194*
	Beta		0,0714*		0,186*
Setembro	Gumbel para máximos		0,1888*		0,400*
	Fréchet		0,1932*		0,449*
	Gama	0,3806	0,1424*	3,841	0,017*
	Log-Normal 2P		0,1422*		0,019*
	Beta		0,0987*		0,005*
Outubro	Gumbel para máximos		0,1091*		2,617*
	Fréchet		0,1157*		3,018*
	Gama	0,3664	0,0945*	5,991	1,099*
	Log-Normal 2P		0,0937*		1,121*
	Beta		0,0762*		0,334*
Novembro	Gumbel para máximos		0,0820*		0,031*
	Fréchet		0,0824*		0,019*
	Gama	0,3806	0,1045*	3,841	0,558*
	Log-Normal 2P		0,1032*		0,534*
	Beta		0,1006*		0,526*
Dezembro	Gumbel para máximos		0,1273*		1,528*
	Fréchet		0,1324*		1,669*
	Gama	0,3948	0,1017*	5,991	0,939*
	Log-Normal 2P		0,1018*		0,939*
	Beta		0,0833*		0,027*

*: Significativo a 5% de probabilidade estatística.

Ao analisar a tabela 2 é possível observar que os valores obtidos das estatísticas dos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, na avaliação do ajuste das funções à série histórica de evapotranspiração potencial mensal da cidade de Divinópolis, MG, tiveram na distribuição Beta a melhor representação das séries históricas de evapotranspiração potencial total para os meses de janeiro, fevereiro, abril, maio, junho, julho, setembro, outubro e dezembro, enquanto para os meses de março e agosto, a que melhor representa é a de Gumbel para máximos, e para o mês de novembro a distribuição de Fréchet. Todas as distribuições testadas foram significativas ao representar o comportamento da ETp mensal total no período avaliado, podendo então serem utilizadas em detrimento à precisão esperada na estimativa.

Souza et al. (2014), ao realizarem estudo da evapotranspiração de referência provável em Ponta Grossa, PR, obtiveram que, para séries de evapotranspiração média decenal, as distribuições que melhor

se ajustaram aos dados analisados foram as distribuições de probabilidade Normal e Gama, o mesmo ocorreu nos estudos de Jerszurki et al. (2015) e Gurski (2018), também no estado do Paraná, e de Coelho et al. (2019), no estado do Piauí; e para a avaliação de uma série de dados em intervalos quinzenais no estudo de Silva et al. (2015), realizado com dados relativos ao município de Petrolina, PE.

Arraes et al. (2009), ao estimarem o balanço hídrico para as condições climáticas de Iguatu, CE, utilizando modelos estocásticos, determinaram que a distribuição Gama apresentou bom ajuste aos dados de evapotranspiração de referência, podendo ser usada para estimativas da demanda evapotranspirativa provável mensal em diferentes níveis de probabilidade, porém, estes autores não avaliaram outras distribuições.

O bom desempenho da distribuição Gama obtida por estes autores, corrobora com o determinado neste estudo, já que por esta aderiu significativamente às frequências observadas de evapotranspiração nas séries históricas de todos os meses em Divinópolis, MG, sendo esta a distribuição que melhor aderiu na maioria dos meses, exceto em comparação à função Beta. Abumanssur (2006), ao estimar a evapotranspiração potencial mensal no estado do Paraná, certificou que os modelos Gama, Log-Normal e GEV mostraram ajustes satisfatórios.

Denski e Back (2015) avaliaram os ajustes das distribuições Beta, Normal, Log-Normal MV, Log-Normal MM, Gama MV e Gama MM para a ET_0 decendial da região de Urussanga, SC, encontrando ajustes satisfatórios para todas as distribuições. No entanto, com a distribuição Beta obteve-se melhor aderência entre as demais, assim como determinado no presente estudo.

O fato de a função Gama não ter obtido os melhores ajustes em relação às demais avaliadas pode ser atribuído à análise de dados ter sido em um intervalo mensal e não decendial como nos estudos citados anteriormente. É importante salientar que, neste estudo, além da distribuição Beta ter obtido o melhor ajustamento para a ET potencial provável mensal em Divinópolis, MG, não foi detectada variação temporal neste comportamento, ou seja, ela se ajustou bem aos dados observados em todas as estações do ano.

Dessa forma, é possível verificar que não existe uma unanimidade quanto a distribuição que melhor se ajusta às séries históricas de evapotranspiração, não havendo uma FDP própria para um determinado período ou região, visto que, em seu cálculo existem inúmeras variáveis envolvidas, tais como o tamanho da série de dados, a amplitude de valores e a ocorrência de falhas nos dados. Logo, a melhor forma de trabalhar é utilizando o maior número de FDP's nas análises (Souza et al., 2013; Jerszurki et al., 2015). Outra variável que pode influenciar é o nível de probabilidade adotado, que nada mais é que o nível de risco da atividade, conforme o grau de certeza e erro da estimativa (Gurski, 2018).

Na figura 1 é apresentada a análise de regressão e coeficiente de determinação (R^2) entre os valores de evapotranspiração potencial provável e evapotranspiração potencial média mensal ($ET_{P\text{ média}}$) para o município de Divinópolis, MG, com frequências de excedência de 90%, 75%, 50%, 25% e 10%.

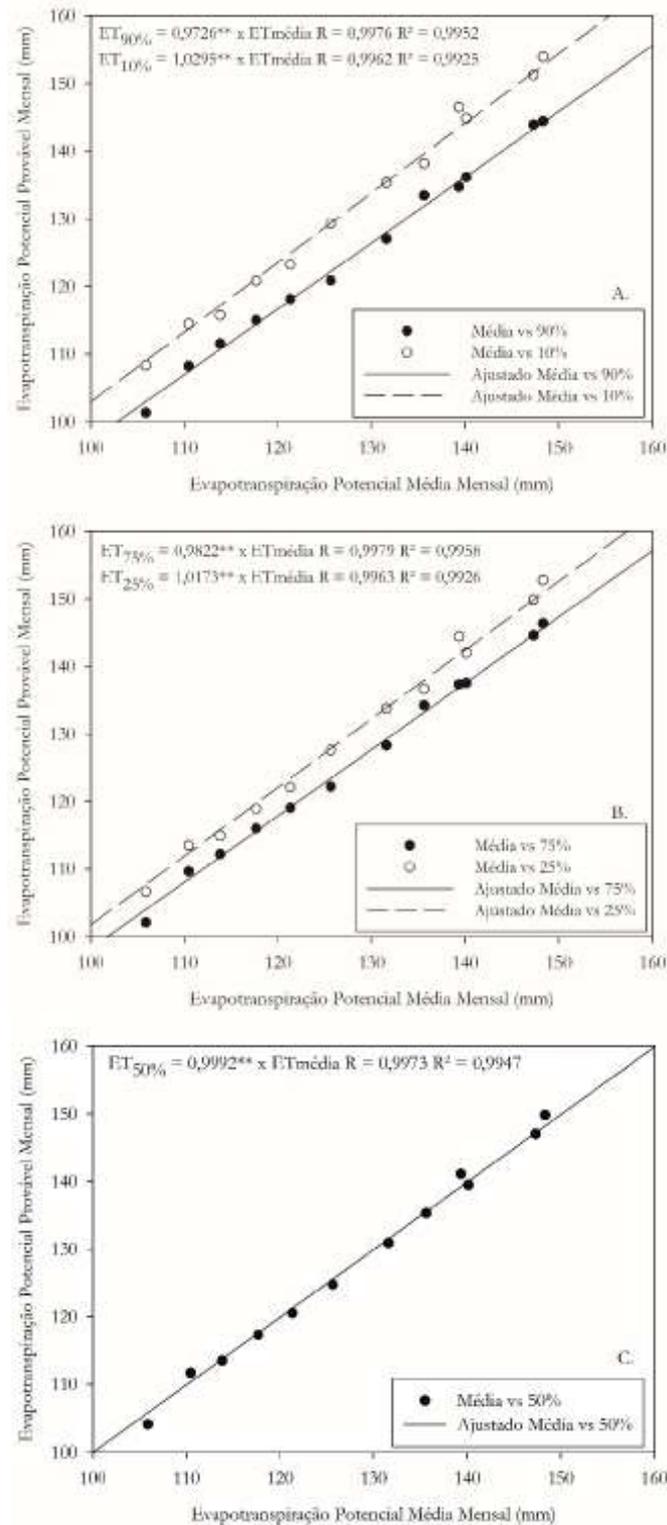


Figura 1. Análise de regressão e coeficiente de determinação (R^2) entre os valores de evapotranspiração potencial provável e evapotranspiração potencial média mensal para o município de Divinópolis, MG, com frequências de excedência de: (a) 90% e 10%; (b) 75% e 25%; (c) 50%.

O uso da $ET_{p\text{ média}}$ na estimativa de ET potencial provável mensal é considerado viável, com base na análise de regressão apresentada na figura 1. Nesta, tem-se que todas as funções obtiveram bons ajustes com coeficientes de regressão linear significativos e R^2 acima de 99%. Naturalmente, a $ET_{50\%}$ a que mais

se aproximou a ET média, porém, sendo inferior a esta, enquanto, a $ET_{75\%}$ e $ET_{90\%}$ representam valores inferiores à média e a $ET_{25\%}$ e $ET_{10\%}$ são valores superiores à média.

Não foi verificada dependência temporal da relação entre $ET_{p\text{ média}}$ e a $ET_{50\%}$, já que nos meses de fevereiro, abril, junho, setembro e novembro ela foi até 2% menor e nos meses de julho, outubro e dezembro ela foi até 2% maior, podendo-se inferir não haver relação com a estação do ano. Gurski (2018) também obteve valores satisfatórios na ET_0 decendial na probabilidade de 50% em seu estudo feito no Paraná, também nem sempre iguais à ET média, como observado neste estudo - o autor atribuiu a diferença nos valores ao ajuste às FDP's, indicando que a qualidade do ajustamento a uma FDP possibilita a obtenção de valores prováveis mais confiáveis.

Obteve-se, então, a evapotranspiração potencial provável no município de Divinópolis, MG, utilizando apenas a distribuição considerada como a que melhor representa a série histórica de evapotranspiração potencial mensal total para cada mês, considerando frequências de excedência de 90%, 75%, 50%, 25% e 10%, conforme mostra a figura 2.

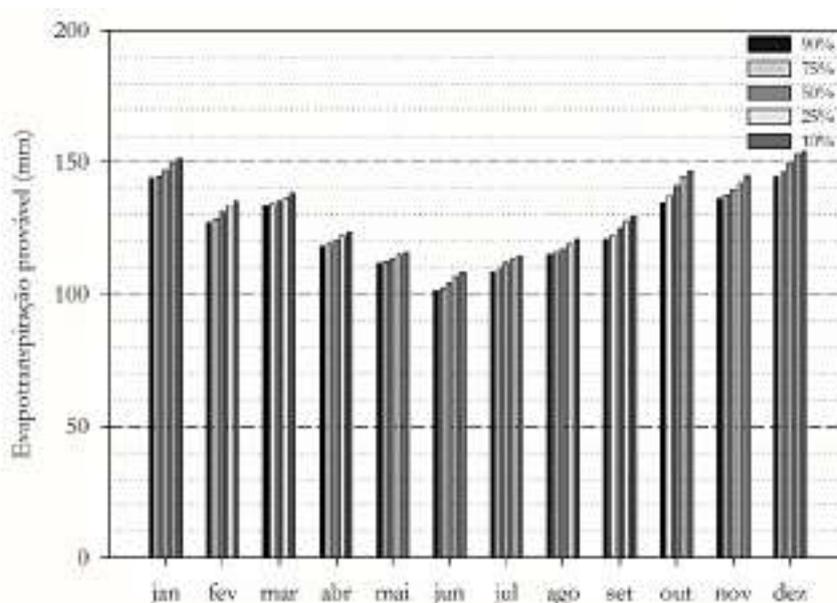


Figura 2. Evapotranspiração provável mensal para o município de Divinópolis, MG, com frequências de excedência 90%, 75%, 50%, 25% e 10%, respectivamente.

Para uma frequência de excedência de 90%, a maior evapotranspiração provável mensal foi de 144,42 mm, sendo o menor de 101,32 mm, para 75% de probabilidade, a máxima de evapotranspiração provável mensal foi 146,36 mm e a mínima de 102,09 mm, para 50% o valor máximo de evapotranspiração provável foi de 149,82 mm e a mínima de 104,09 mm, para 25% foi de 152,75 mm e 106,68 mm, para evapotranspirações máxima e mínima respectivamente e para a probabilidade de 10% obteve-se uma máxima de 153,92 mm e mínima de 108,33 mm. Todos os valores de evapotranspiração provável para estas frequências de excedências foram obtidas para dezembro e junho, sendo máximas e mínimas, respectivamente. Como esperado para a região, no período mais seco e frio (abril a setembro) as Etp prováveis são menores, sendo junho o mês com a menor lâmina, e no período mais chuvoso e quente (outubro a março) as Etp foram mais altas, sendo dezembro o mês com a maior lâmina evapotranspirativa.

Sabe-se que quanto menor a amplitude entre os resultados menor a significância do erro da estimativa. Ainda na figura 2, observa-se que a amplitude dos valores de ET_p prováveis entre as probabilidades não é muito grande. As diferenças entre as $ET_{10\%}$ e $ET_{90\%}$ para a distribuição Beta foram menores que 6,5%, exceto para o mês de outubro que alcançou uma diferença de 8%, para a distribuição Gumbel para máximos foram menores que 5% e para a distribuição Fréchet igual a 6%. Observando esses dados, é possível inferir que houve um melhor ajuste para distribuição de Gumbel para máximos, proporcionando nos meses de março e agosto valores prováveis mais confiáveis (Gurski, 2018).

CONCLUSÃO

Todas as distribuições de probabilidades testadas apresentaram aderência significativa pelos testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov e Qui-Quadrado, para o município de Divinópolis, MG, sendo o modelo estatístico que melhor se aderiu as séries históricas de evapotranspiração potencial na maioria dos meses, foi a distribuição não-paramétrica Beta, enquanto que a distribuição que obteve pior aderência às frequências observadas dos valores de evapotranspiração total mensal foi a Log-Normal a 2 Parâmetros.

A evapotranspiração potencial provável mensal máxima para Divinópolis é 153,92 mm, associada a uma probabilidade de 10% de ocorrência referente ao mês de dezembro, enquanto a menor, é 101,32 mm, com probabilidade de 90% de ocorrência no mês de junho. Além disso, a evapotranspiração potencial média mensal pode ser utilizada de forma satisfatória para estimar evapotranspirações potenciais com diferentes níveis de probabilidade de ocorrência.

REFERÊNCIAS

- ABUMANSUR, C. 2006. **Estimativa de Evapotranspiração Mensal no Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 91p.
- ALLEN, R. G. et al. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and drainage paper**, 56. Roma: FAO, 326p.
- ALVARES, C. A. et al. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6): 711-728.
- ARRAES, F. D. D. et al. 2009. Estimativa do balanço hídrico para as condições climáticas Iguatu, Ceará, usando modelo estocástico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 3(2): 78-87.
- ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R. 2009. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13: 906-915.
- BORGES, G. M. R.; THEBALDI, M. S. 2016. Estimativa da precipitação máxima diária anual e equação de chuvas intensas para o município de Formiga, MG, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, 11(4): 891-902.
- CARVALHO, L. G. de. et al. 2011. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 41(3): 456-465.
- CASTIGLIO, V. S.; CAMPAGNOLO, K; KOBAYAMA, M. 2021. Análise da evapotranspiração potencial no município de Cambará do Sul/RS. **Revista Geonorte**, 12(39): 26-43.
- COELHO, J. V. et al. 2019. Precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência prováveis no estado do Piauí. In: **XIV CONGRESSO CONVIBRA**, 2019.
- DENSKI, A. P. N.; BACK, A. J. 2015. Aderência de distribuições de probabilidade de evapotranspiração de referência decendial. **Revista Brasileira de Climatologia**, 17: 27-40.

- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. 1997. **Crop water requirements**. Roma: FAO, 212p.
- FALLS, L. W. 1973. The Beta distribution: a statistical model for world cloud cover Alabama. **NASA Technical Memorandum**, 64714: 1-6.
- FERNANDES, A. L. T.; JÚNIOR, E. F. F.; TAKAY, B. Y. 2011. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 15(3): 270-276.
- GURSKI, B. C. 2018. **Componentes hídricas prováveis e zoneamento de risco agroclimático para o estado do Paraná**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná, 128p.
- HAAN, C. T. 1977. **Statistical methods in hydrology**. Ames: Iowa State University, 378p.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. Divinópolis – dados gerais do município. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=312230&search=||info%EFicos:-dados-gerais-do-munic%EDpio>>. Acesso em: 9 out. 2016.
- JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P. 2015. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, 33(2): 118-129.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. 1939. **Handbuch der klimatologie**, Berlin: G. Borntraeger, 44p.
- LHOMME, J. P. 1997. Towards a rational definition of potential evaporation. **Hydrology and Earth System Sciences**, 1(2): 257–264.
- MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. 2010. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14(2): 196-202.
- OTSUKI, R. G. 2015. **Estimativa de séries anuais de evapotranspiração real e vazão em bacias sem monitoramento fluviométrico com base nas hipóteses de Budyko**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, 137p.
- PEARSON, K. 1934. **Tables of the incomplete Beta function**. Cambridge: University Press, 494p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. 1997. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 183p.
- PRUITT, W. O.; OETTINGEN, S. V.; MORGAN, D. L. 1972. Central California evapotranspiration frequencies. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, 98: 177-184.
- REICHARDT, K. 1990. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 188p.
- SILVA, A. O. da. et al. 2015. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, 9(1): 30-38.
- SILVA, F. D. S. et al. 2018. Tendências observadas da evapotranspiração potencial no estado de Alagoas (1961-2016). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 11(1): 2036-2049.
- SOUZA, J. L. M. 2001. **Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 253p.
- SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; DAMAZIO, E. C. 2013. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 48(7): 693-702.
- SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, S. 2014. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa-PR. **Revista Irriga**, 19(2): 279-291.
- THORNTHWAITE, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, 38(1): 55-94.

Submetido em: 21.10.2020

Aceito em: 09.11.2021