

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA PROVÁVEIS NO ESTADO DO PARANÁ

GURSKI, B.C.¹; SOUZA J.L.M.²; BARROCA, M.V.³; XAVIER, A.C.⁴; JERSZURKI D.⁵

¹Doutorado em Ciência do Solo, UFPR; ²Professor, DSEA/SCA/UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ³Mestrado em Ciência do Solo, UFPR; ⁴Professor UFES; ⁵Ben Gurion University of the Negev, Israel

RESUMO

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade (*fdp*'s; Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) ajustadas aos valores decendiais observados de evapotranspiração de referência (*ET_o*) e precipitação pluvial (*P*) em diversas localidades no Estado do Paraná, bem como calcular os valores da *ET_o* e *P* com 25% (*ET_{o25%}*) e 75% (*P_{75%}*) de probabilidade, respectivamente, de serem igualados ou superados com a *fdp* de melhor ajuste. A série de dados climáticos utilizada (1980 a 2013 – 34 anos) foi proveniente da Agência Nacional de Águas e Instituto Nacional de Meteorologia. Os dados climáticos foram espacializados com os melhores interpoladores em um *grid* regular de 0,25° x 0,25°, gerando 280 pontos para análise. A *ET_o* foi calculada diariamente com o método de Penman-Monteith. Os dados diários de *ET_o* e *P* foram somados e agrupados em dez dias (decêndios) totalizando 37 decêndios por ano. Para a verificação do ajustamento das *fdp*'s às séries de *ET_o* e *P* de cada localidade foram realizadas distribuições de frequência e aplicados testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade. Os resultados dos valores decendiais prováveis de *ET_{o25%}* e *P_{75%}* foram organizados conforme as estações do ano (verão, outono, inverno, primavera), e com a média dos decêndios do período foram gerados mapas utilizando o método de interpolação *krigagem* ordinária. As funções densidade de probabilidade Gama e Exponencial ajustaram-se melhor às séries de valores decendiais de *P*, enquanto Gama e Normal ajustaram-se melhor as séries de valores decendiais de *ET_o*. Houve crescimento nos valores decendiais médios da *P_{75%}* do inverno para outono, e da *ET_{o25%}* da primavera para o verão. A *P_{75%}* foi maior no litoral e sudeste, independente da estação do ano. O verão apresentou variabilidade, mas de modo geral os valores foram altos em todas as estações do ano. A variabilidade da *ET_{o25%}* foi bem definida e houve crescimento do litoral para o noroeste, independente da estação do ano.

Palavras-chave: componentes hídricas; função densidade de probabilidade; ajuste estatístico

INTRODUÇÃO

O estudo da tendência e distribuição da evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação pluvial (P) em uma região é importante para o entendimento e determinação de períodos críticos, sendo relevante no planejamento e manejo racional da produção agrícola para a condição de deficiência ou excedente hídrico (RIBEIRO et al., 2007; JERSZURKI et al., 2015a; JERSZURKI et al., 2015b). Diversos autores também recomendam a utilização da ET_0 e P prováveis no dimensionamento de projetos agrícolas, uma vez que o uso de valores médios pode resultar em super ou subdimensionamentos (OLIVEIRA e CARVALHO, 2003; SAMPAIO et al., 2006; SOCCOL et al., 2010; SOUZA et al., 2013). Estudos probabilísticos da distribuição da ET_0 e P demonstram que suas ocorrências consistem em fenômenos aleatórios, influenciados pela localização geográfica de uma região, o que contribui diretamente nas atividades econômicas, em especial na agricultura (SOUZA et al., 2013).

A ET_0 e P prováveis de uma localidade podem ser estimados a partir de séries históricas, quando a função densidade de probabilidade (f_{dp}) e os seus parâmetros se ajustarem aos dados observados do evento em determinado período (FRIZZONE et al., 2005). A ET_0 ou P prováveis referem-se à altura mínima de evapotranspiração ou chuva esperada em dado período do ano, para um determinado nível de probabilidade (SOUZA et al., 2013).

Várias distribuições de probabilidade têm sido utilizadas para estudar a ET_0 e P , apresentando variabilidade quanto à adequação às séries históricas (RIBEIRO et al., 2007). Para o ajuste da ET_0 as distribuições Normal, Gama, Beta e Gumbel são as mais usadas (PRUITT et al., 1972). A f_{dp} gama é normalmente ajustada ao total de chuva em períodos mensais ou menores (LIMA et al., 2008). Porém, Souza et al. (2013), Jerszurki et al., (2015a) e Jerszurki et al. (2015b) verificaram que outros tipos de f_{dp} 's são necessárias, principalmente quando a série histórica de dados diários de chuva (extensa ou curta) apresenta poucos registros com precipitação superior a 1 mm no período (pêntada, decêndio, quinzena ou mês), como ocorre em períodos secos e em veranicos.

Com a escolha da distribuição de probabilidade mais adequada, devem ser determinados os níveis de probabilidade a serem utilizados. Baseando-se na ET_0 , para que haja minimização dos riscos e custos na elaboração de projetos agrícolas, recomenda-se a escolha de valores com 25% de probabilidade de serem igualados ou superados (período de retorno de 4 anos) (DOORENBOS e PRUITT, 1977; SAAD e SCALOPPI, 1988). Para a P a recomendação é que não se deve trabalhar com probabilidades inferiores a 75% ou 80%. O nível de 75% representa a quantidade mínima de precipitação que se espera ocorrer em três de cada quatro anos. Jensen (1974) comenta que os níveis mais elevados de probabilidade (80% a 90%) são selecionados para culturas de grande valor econômico e condições reduzidas de água disponível no solo. Doorenbos e Pruitt (1977) consideram que na maioria das regiões irrigadas, os níveis de probabilidade ficam entre 75% e 80%. De acordo com Saad e Scaloppi (1988), nas condições de irrigação suplementar, dificilmente justifica-se, economicamente, adotar valores superiores a 90%, sendo normalmente utilizados níveis entre 50 a 75%.

Teve-se por objetivo no presente trabalho determinar os parâmetros estatísticos de cinco funções densidade de probabilidade (f_{dp} ; Exponencial, Gama, Normal, Triangular e Uniforme) ajustadas aos valores decendiais observados de evapotranspiração de referência (ET_0) e precipitação pluvial (P) em diversas localidades no Estado do Paraná, bem como calcular os valores da ET_0 e P com 25% e 75% de probabilidade, respectivamente, de serem igualados ou superados com a f_{dp} de melhor ajuste.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA), no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Paraná. A área de estudo compreendeu todo o Estado do Paraná, que está localizado na região Sul do Brasil, tendo área de 199307,92 km². Conforme classificação de Köppen, no Estado do Paraná predominam os tipos climáticos Cfa e Cfb. O clima subtropical Cfa tem boa distribuição de chuvas, temperatura média anual de 19°C e pluviosidade média anual de 1500 mm. O clima subtropical Cfb tem boa distribuição de chuvas durante o ano e verões amenos. A temperatura média anual é de 17°C e a pluviosidade superior a 1200 mm anuais (ALVARES et al., 2013).

Os dados meteorológicos diários utilizados foram disponibilizados pelo "Instituto Nacional de Meteorologia" (INMET) e "Agência Nacional de Águas" (ANA), sendo medidos em 211 postos pluviométricos, estações meteorológicas convencionais ou automáticas, no período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de Dezembro de 2013 (34 anos). Os dados climáticos utilizados nas análises foram:

- Evapotranspiração de referência (ET_o), calculada diariamente com o método de Penman-Monteith adaptado (ASCE-EWRI, 2005), os dados necessários foram fornecidos pelo INMET, sendo: temperatura máxima (°C), temperatura mínima (°C), umidade relativa (%), velocidade do vento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$), precipitação (mm), brilho solar diário (horas) de estações meteorológicas convencionais, e radiação solar diária ($MJ\ m^{-2}$) a partir de estações automáticas; e,
- Precipitação pluviométrica (P ; fornecida pela ANA).

Várias abordagens foram desenvolvidas para interpolar os dados de ET_o e P das estações. Os métodos foram: ponderação da distância inversa; *krigagem* ordinária; *spline*; interpolação natural; média aritmética. O melhor interpolador foi obtido por meio de validação cruzada e os dados meteorológicos foram espacializados em um *grid* regular de 0,25° x 0,25° (XAVIER et al., 2015), totalizando 280 localidades no Estado do Paraná (FIGURA 1).

Como resultado obteve-se os dados meteorológicos diários (34 anos) para o *grid* regular contendo 280 localidades. Os dados diários de ET_o e P foram somados e agrupados em período de dez dias (decêndios), totalizando 37 decêndios por ano. O trigésimo sétimo decêndio de cada ano foi composto pelos cinco ou seis (ano bissexto) últimos dias do ano.

Os procedimentos e cálculos necessários no presente trabalho foram organizados e realizados com o auxílio de planilha eletrônica, contendo rotinas desenvolvidas especialmente para essa finalidade. Os procedimentos estão descritos a seguir:

- Os dados diários de ET_o e P foram tabulados e agrupados em períodos de dez dias (decêndios), tendo-se separado os decêndios sem ocorrência de precipitação (P_o) dos com precipitação diferente de zero. Para evitar inconsistências na estimativa dos parâmetros das *fdp*'s utilizadas, os decêndios com valores de ET_o ou P inferior a 1 mm foram considerados iguais a zero. Foram estabelecidas 20720 distribuições de frequência com os dados das séries de ET_o e P em todo o Estado do Paraná (2 componentes, 280 localidades e 37 decêndios) (BUSSAB e MORETTIN, 2010).
- Calcularam-se, então, os parâmetros estatísticos das cinco *fdp*'s testadas (gama, normal, exponencial, triangular e uniforme) com as séries de valores decendiais observados de ET_o e P (20646 análises para obter os parâmetros de cada *fdp*). Os parâmetros determinados foram:

alfa e beta, para a distribuição gama; média e desvio-padrão, para a normal; maior valor, menor valor e moda, para a triangular; média, para a exponencial; e maior e menor valor, para a uniforme (FRIZZONE et al., 2005; BUSSAB e MORETTIN, 2010). A aderência dos valores decendiais de precipitação estimados às cinco *fdp*'s foi verificada com o teste de Kolmogorov-Smirnov, a 5% de probabilidade, sendo realizados 103600 testes (ASSIS, 1996; BUSSAB e MORETTIN, 2010).

– Após a escolha da *fdp* que melhor se ajustou aos valores decendiais de *ETo* e *P* observados, determinou-se a *P* decendial provável, a 75% de probabilidade ($P_{75\%}$), e a *ETo* provável, a 25% de probabilidade ($ETo_{25\%}$), para as 280 localidades estudadas, ao longo dos 37 decêndios dos anos. A $P_{75\%}$ refere-se ao valor de precipitação que tenha 75% de probabilidade de ser igualado ou superado, em cada decêndio do ano: $P_{75\%} = P(P_{75\%} \in P \mid P_i \geq P_{75\%}) = 75\%$. Enquanto a $ETo_{25\%}$ refere-se ao valor de evapotranspiração que tenha 25% de probabilidade de ser igualado ou superado, em cada decêndio do ano: $ETo_{25\%} = P(ETo_{25\%} \in ETo \mid ETo_i \geq ETo_{25\%}) = 25\%$.

– Como algumas das *fdp*'s analisadas não admitem valores nulos, adotou-se o conceito de distribuição mista, sobretudo para os valores de *P* (ASSIS, 1996): $F(p) = P_o + (1 - P_o) \cdot D(p)$, em que $F(p)$ é a função cumulativa de probabilidade da distribuição mista (%); P_o é a probabilidade de ocorrência de decêndios sem precipitação (%) ou com valores menores que 1 mm; e $D(p)$ é a probabilidade estimada com a distribuição cumulativa teórica de melhor ajuste, cujos parâmetros foram determinados na ausência de decêndios sem precipitação (%).

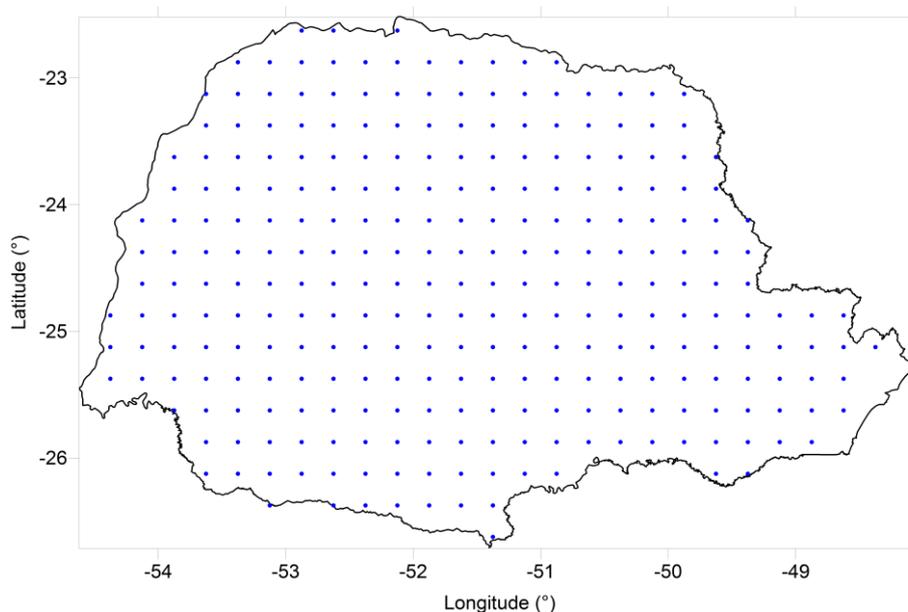


FIGURA 1 – *Grid* regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, contendo os 280 pontos no Estado do Paraná, em que foram analisados os valores diários de *ETo* e *P* agrupados em decêndios.

Com os valores decendiais prováveis calculados foram gerados mapas de *ETo* e *P* prováveis para todo o Estado do Paraná, a partir da média dos valores nas estações do verão, outono, inverno e primavera. Os mapas foram gerados a partir da interpolação dos dados prováveis obtidos de *ETo* e *P*, com o programa *Surfer* 8.0. O método empregado para a interpolação dos dados foi a *krigagem* ordinária, utilizando um *grid* de 1000 por 637 linhas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve crescimento nos valores (mm decêndio^{-1}) da precipitação decendial média provável a 75% ($P_{75\%}$) e evapotranspiração de referência decendial média provável a 25% ($ET_{025\%}$) do inverno para outono, primavera e verão, respectivamente (FIGURAS 2 e 3).

O Paraná é considerado uma região onde a precipitação é alta. Conforme classificação climática a precipitação média anual é superior a 1200 mm. Os resultados obtidos indicaram que a $P_{75\%}$ foi maior no litoral e sudeste do Estado, independente da estação do ano, provavelmente por serem regiões possuindo menores altitudes no relevo do Estado e ficarem próximas a uma região serrana. A $P_{75\%}$ no verão apresentou grande variabilidade, mas de modo geral os valores foram altos.

A $P_{75\%}$ corresponde à probabilidade de uma determinada precipitação pluvial ocorrer uma vez a cada 1,33 anos, em média. Por meio deste parâmetro, verificou-se que apenas uma localidade (nordeste) no inverno (FIGURA 2c) possui risco de baixa precipitação.

A variabilidade da $ET_{025\%}$ no Paraná foi bem definida, independente da estação do ano. Houve crescimento da $ET_{025\%}$ do litoral para o noroeste. Indo do sudeste para noroeste a temperatura tende a aumentar, mas sobretudo aumenta a amplitude térmica, fazendo com que haja maior déficit de pressão de vapor, aumentando a ET_0 (ALLEN et al., 1998; JERSZURKI, 2016).

Os menores valores de $ET_{025\%}$ ocorreram no litoral e na região de Curitiba, visto que nestas localidades a umidade relativa é alta ao longo de todo o ano, o que proporciona menor déficit na pressão de vapor. Nesta situação quem mais influencia a ET_0 é a radiação solar e o vento.

Na TABELA 1 encontram-se as frequências das funções densidade de probabilidade mais indicadas para estimar a precipitação decendial média provável a 75% ($P_{75\%}$) e evapotranspiração de referência decendial média provável a 25% ($ET_{025\%}$), para o Estado do Paraná, entre os 10323 testes de aderência realizados para cada variável. As distribuições Gama e Exponencial geralmente aderiram melhor às séries decendiais de precipitação (P), enquanto Gama e Normal foram melhores para as séries decendiais de evapotranspiração de referência ($ET_{025\%}$). Resultados semelhantes foram encontrados por Sampaio et al. (2006) que analisaram a $P_{75\%}$ mensal para o Paraná, bem como Souza et al. (2013), para valores decendiais prováveis de P para várias regiões brasileiras.

TABELA 1. Frequência das funções densidade de probabilidade mais indicadas para estimar a precipitação decendial média provável a 75% ($P_{75\%}$) e evapotranspiração de referência decendial média provável a 25% ($ET_{025\%}$), para o Estado do Paraná.

N*	----- $P_{75\%}$ -----					----- $ET_{025\%}$ -----				
	G	T	E	U	N	G	T	E	U	
1215	6169	303	2565	71	4439	5029	622	0	233	

*N – Normal; G – Gama; T – Triangular; E – Exponencial; U – Uniforme

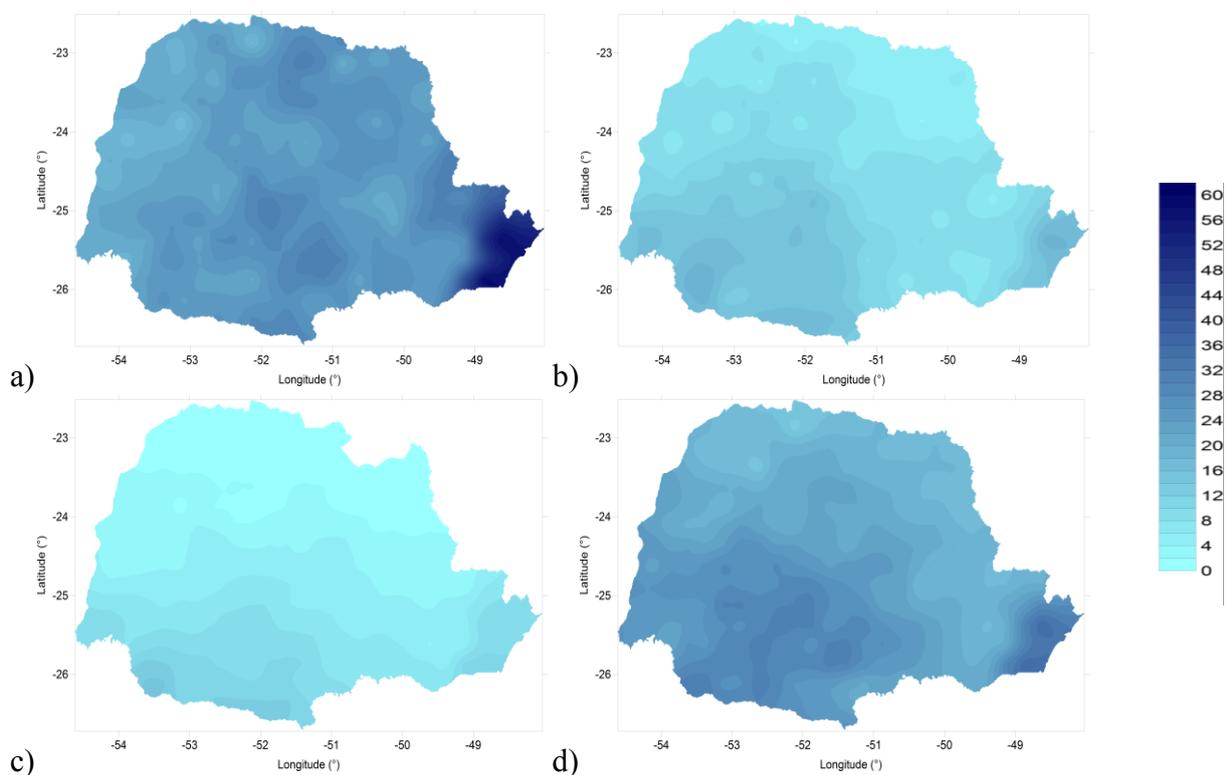


FIGURA 2 – Precipitação decenal média provável a 75% ($P_{75\%}$; mm decêndio⁻¹) no Estado do Paraná, nas estações: (a) verão; (b) outono; (c) inverno; e, (d) primavera.

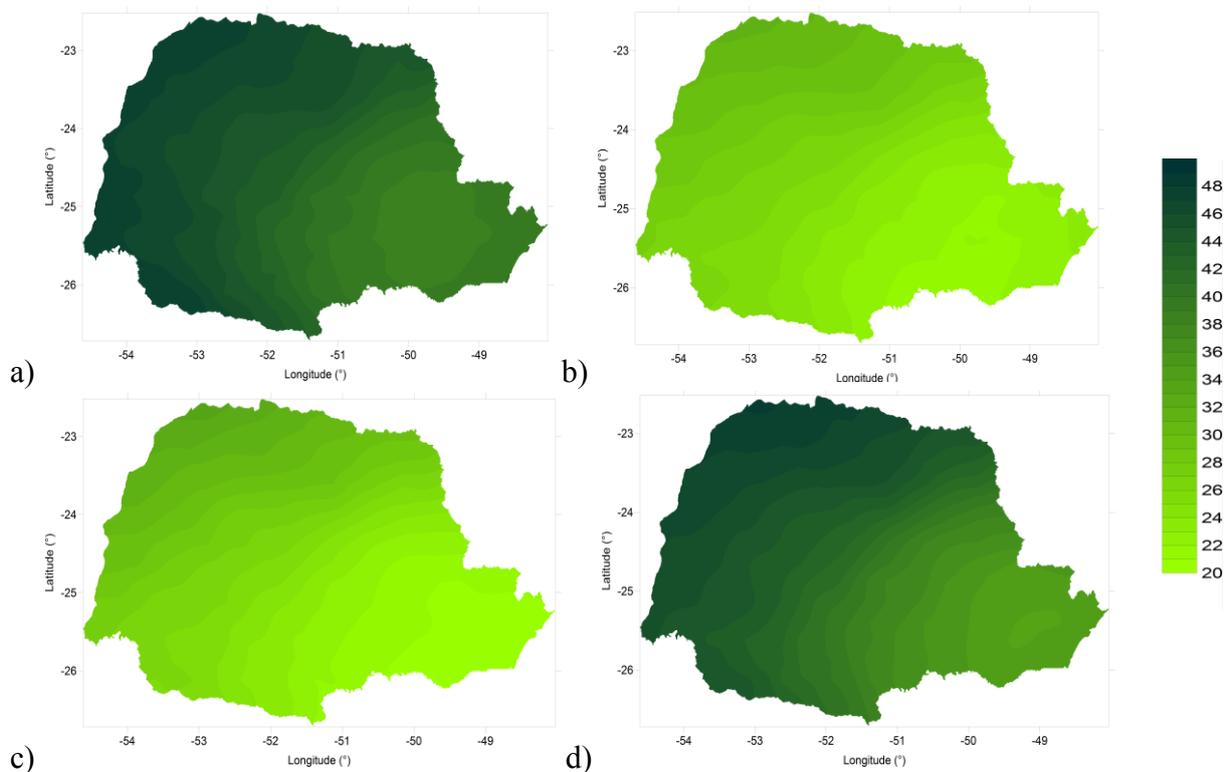


FIGURA 3 – Evapotranspiração de referência decenal média provável a 25% ($ET_{025\%}$; mm decêndio⁻¹) no Estado do Paraná, nas estações: a) verão; b) outono; c) inverno e; d) primavera.

CONCLUSÕES

As funções densidade de probabilidade Gama e Exponencial ajustaram-se melhor às séries de valores decendiais de P , enquanto Gama e Normal ajustaram-se melhor as séries de valores decendiais de ET_0 .

Houve crescimento nos valores decendiais médios da $P_{75\%}$ do inverno para outono, e da $ET_{025\%}$ da primavera para o verão.

A $P_{75\%}$ foi maior no litoral e sudeste, independente da estação do ano. O verão apresentou variabilidade, mas de modo geral os valores foram altos em todas as estações do ano.

A variabilidade da $ET_{025\%}$ foi bem definida e houve crescimento do litoral para o noroeste, independente da estação do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. 1.ed. Rome: FAO, 1998.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.J.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.2, p. 711-728, 2013.

ASSIS, F.N.; ARRUDA, H.V.; PEREIRA, A.R. **Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática**. Pelotas: Ed. da UFPel, 1996. 161p.

BUSSAB, W. de O.; MORETTIN, P.A. **Estatística básica**. 6.ed. São Paulo: Saraiva, 2010. 540p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. FAO – Irrigation and Drainage Paper, 24, Roma, 1977. 144p.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M.; ZOCOLER, J. L. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 627p.

JENSEN, M. E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1974. 215p.

JERSZURKI, D. **Dinâmica da água no continuum solo-planta-atmosfera: tópicos em evapotranspiração de referência e disponibilidade de água às plantas**. Tese de Doutorado. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2016. 151p.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P. Probabilidade e variação temporal da evapotranspiração de referência na região de Telêmaco Borba – PR. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 33, n. 2, p. 118-129, 2015a.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; EVANGELISTA, A. W. P. Distribuição de probabilidade e movimento temporal da precipitação na região de Telêmaco Borba, Paraná. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 110-116, 2015b.

LIMA, J.S. de S.; SILVA, S. de A.; OLIVEIRA, R.B. de; CECÍLIO, R.A.; XAVIER, A.C. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre – ES. **Revista Ciência Agronômica**, v.39, p.327-332, 2008.

OLIVEIRA, L. F. C.; CARVALHO, D. F. Regionalization of the supplementary irrigation depth and planting time of a brean crop in the State of Goiás, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 106–110, 2003.

PRUITT, W.O.; OETTINGEN, S.V. & MORGAN, D.L. Central California evapotranspiration frequencies. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 98, p. 177–184, 1972.

RIBEIRO, B. T.; AVANZI, J. C.; MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, M. L. N. Comparação de distribuições de probabilidade e estimativa da precipitação provável para a região de Barbacena, MG. **Ciência Agrotecnologia**, v. 31, p. 1297–1302, 2007.

SAAD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. Análise dos principais métodos climatológicos para estimativa da evapotranspiração. In: ANAIS DO VIII CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. Florianópolis: ABID, v. 2, p. 1037–1052, 1988.

SAMPAIO, S. C.; LONGO, A. J.; QUEIROZ, M. M. F. de; GOMES, B. M.; VILLAS BOAS, M. A.; SUSZEK, M. Estimativa e distribuição da precipitação mensal provável no Estado do Paraná. **Acta Scientiarum Human and Social Sciences**, v.28, p.267-272, 2006.

SEDIYAMA, G.C.; MELO, J. S. P.; ALVES, A. R.; COELHO, D. T. Determinação dos Parâmetro da Distribuição Gama, em função das Alturas Médias Mensais de Precipitação dos Dias Chuvosos. **Revista Ceres**, v. 43 n. 247, p. 254-266, 1996.

SOCCOL, O. J.; CARDOSO, C. O.; MIQUELLUTI, D. J. Análise da precipitação mensal provável para o município de Lages, SC. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 569–574, 2010.

SOUZA, J.L.M.; JERSZURKI, D.; DAMAZIO, E.C. Relações funcionais entre precipitação provável e média em regiões e climas brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 7, p. 693-702, 2013.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 1, p. 2644-2659, 2016.