

ASPECTOS ESPACIAIS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM O FOCO NO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

**JEFFERSON VIEIRA JOSÉ¹; LUCAS DA COSTA SANTOS²; DANIEL SOARES
ALVES³; PABLO RICARDO NITSCHÉ⁴; MARCOS VINICIUS FOLEGATTI⁵ E
WAGNER WOLFF⁶**

¹Centro multidisciplinar, UFAC, Campus Floresta, Rua Estrada da Canela Fina, KM 12 Gleba Formoso - São Francisco, CEP: 69895-000, Cruzeiro do Sul - AC, Brasil, e-mail: jfvieira@hotmail.com.br

²Departamento de Agronomia, UFVJM, Campus JK - Rodovia MGT 367, Km 583, nº5000 - Bairro Alto da Jacuba, CEP: 39100-000 - Diamantina - MG, Brasil, e-mail: lucas.santos@ufvjm.edu.br

³Departamento de Agrometeorologia. Instituição: Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR. Endereço: Rodovia Celso Garcia Cid, km375, Bairro Ernani Moura Lima II, CEP: 86047-90, Londrina - PR, Brasil, e-mail: danielsoares@iapar.br

⁴Departamento de Agrometeorologia. Instituição: Instituto Agrônômico do Paraná - IAPAR. Endereço: Rodovia Celso Garcia Cid, km375, Bairro Ernani Moura Lima II, CEP: 86047-90, Londrina - PR, Brasil, e-mail: pablo@iapar.br

⁵Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP, ESALQ, Avenida Pádua Dias, 11, Bairro Agronomia, CEP: 13418-900, Piracicaba - SP, Brasil, e-mail: mvfolega@usp.br

⁶Departamento de Engenharia de Biossistemas, USP, ESALQ, Avenida Pádua Dias, 11, Bairro: Agronomia, CEP: 13418-900, Piracicaba - SP, Brasil, e-mail: wwolf@usp.br

1 RESUMO

Aspectos espaciais do consumo hídrico das culturas, com o foco no dimensionamento de sistemas de irrigação, é imprescindível para a racionalização do uso da água. Este trabalho objetivou analisar a distribuição de frequência da evapotranspiração de referência acumulada (ET_{oac}) no estado do Paraná por meio da espacialização dos parâmetros da distribuição de probabilidade, visando o dimensionamento de sistemas de irrigação. Dados diários de elementos meteorológicos (temperatura máxima, mínima e média; umidade relativa média; radiação solar global; insolação; velocidade do vento), entre os anos de 1980 a 2010, de 33 estações meteorológicas no estado do Paraná, foram utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith. A ET_o foi acumulada em períodos consecutivos de 5, 10, 20 e 30 dias e os seus valores máximos anuais foram avaliados e ajustados a nove distribuições de probabilidade (Log-normal, Weibull, Gamma, Cauchy, Normal, Logística, Birnbaum-Saunders, Gumbel e Gumbel-II). A distribuição de probabilidade de Gumbel II, verificada pelo Critério de Informação de Akaike, foi escolhida na geração de valores de ET_{oac} , nos diferentes níveis de probabilidade, por meio de mapas da distribuição dos parâmetros α e β para representar o estado do Paraná.

Keywords: Eventos extremos; geoestatística; Penman-Monteith; Paraná

**JOSÉ, J. J.; SANTOS, L. C.; ALVES, S. S.; NITSCHÉ, P. R.; FOLEGATTI, M. V.;
WOLFF, W.**

**SPATIAL ASPECTS OF EVAPOTRANSPIRATION WITH FOCUS ON THE DESIGN
OF IRRIGATION SYSTEMS**

2 ABSTRACT

Spatial aspects of crop water consumption with focus on the design of irrigation systems is essential for rationalization of water use. This work aimed to analyze the frequency distribution of cumulative reference evapotranspiration (ET_{0ac}) in the State of Paraná by means of spatialization of parameters of the probability distribution, aiming at the design of irrigation systems. Daily data of meteorological elements (maximum, minimum and average temperature, mean relative humidity, global solar radiation, insolation and wind speed) between the years of 1980 and 2010 of 33 meteorological stations in the State of Paraná were used to estimate evapotranspiration of (ET_0) by the Penman-Monteith method. The ET_0 was accumulated in consecutive periods of 5, 10, 20 and 30 days and its annual maximum values were evaluated and adjusted to nine probability distributions (Log-normal, Weibull, Gamma, Cauchy, Normal, Logistics, Birnbaum-Saunders, Gumbel and Gumbel-II), the probability distribution of Gumbel II, verified by the Akaike Information Criterion, was chosen in the generation of ET_{0ac} values, at the different levels of probability, by means of maps of distribution of the parameters α and β to represent the State of Paraná.

Keywords: Extreme events, Gumbel, Geostatistics, Penman-Monteith, Parana

3 INTRODUÇÃO

No contexto das mudanças climáticas, recentemente tem-se observado alterações no regime pluviométrico em diferentes escalas (GONZÁLEZ-HIDALGO et al., 2011). Particularmente para o Brasil, há evidências de redução na disponibilidade hídrica em função de tendências decrescentes na oferta de chuvas, como por exemplo na região nordeste (LIRA et al., 2006; SILVA et al., 2010) e região sul (MINUZZI; CARAMORI, 2011), o que por sua vez tem promovido aumentos dos preços da energia, haja vista que o país tem como principal matriz energética a hidroeletricidade (COSTA et al., 2017). Diante disso, torna-se imprescindível a identificação e adoção de metodologias, ferramentas e ações que aperfeiçoem o uso de água e energia, em função dos variados benefícios ambientais e econômicos resultantes dessa prática.

Dentre os setores da economia, a agricultura irrigada é a que mais depende de recursos hídricos, utilizando cerca de 70% da água doce disponível no mundo FAO

(2007). No Brasil o setor de irrigação é responsável por 49,8% da água captada, em relação água retirada que não retorna diretamente aos corpos hídricos, o setor de irrigação utiliza 66,1% (ANA, 2019).

Para Ghimire et al. (2016), a racionalização do uso da água deve integrar todas as etapas envolvidas no projeto de sistema de irrigação, as quais incluem o dimensionamento, instalação, operacionalização e manejo dos sistemas. De acordo com os autores, esses aspectos devem ser considerados, principalmente, em virtude dos elevados custos empregados nesse tipo de empreendimento.

No dimensionamento dos sistemas de irrigação é definida a capacidade das estruturas de adução e condução de água, e estas variam em função das exigências de água no projeto que, por sua vez, é função da necessidade hídrica das culturas e do risco de déficit hídrico (SAAD et al., 2015). Para a determinação desses dois indicadores, normalmente é empregada a evapotranspiração de referência (ET_0), que quando tem o seu uso associado a técnicas probabilísticas torna ainda mais robusto o

dimensionamento dos sistemas de irrigação e drenagem (SILVA et al., 2015).

Segundo Khanjani e Busch (1982), a maioria das variáveis que afetam a taxa de evapotranspiração é de natureza estocástica, alterando-se tanto no tempo quanto no espaço. Quando essas variáveis independentes apresentam algum tipo de alteração, a variável dependente será alterada em conformidade. Portanto, a evapotranspiração tem uma natureza também estocástica e muda de forma aleatória diariamente, o que dificulta a identificação do melhor valor a ser adotado no projeto de irrigação.

No dimensionamento dos sistemas de irrigação, tem sido prática habitual dos projetistas a utilização de valores extremos de ETo para o período de maior demanda das culturas, o que normalmente implica em superestimativas do projeto, particularmente quando se considera a contribuição eventual das chuvas. Como alternativa a essa prática, foi sugerida por Jensen et al. (1974) a adoção de níveis de probabilidade de ocorrência, os quais devem ser escolhidos com base em critérios econômicos. Ainda de acordo com esses autores, os níveis mais elevados (80-90%) só devem ser adotados para as culturas irrigadas que possuam elevado valor econômico; por outro lado, para Saad e Scaloppi (1988), níveis variando entre 50 e 75% seriam suficientes para o atendimento satisfatório da demanda hídrica das culturas, especificamente para as condições da região centro-sul do Brasil.

Dentre as várias funções de distribuição de probabilidade existentes, as mais utilizadas nos estudos de frequência de ETo para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação, tem sido a Normal, Lognormal, Beta e Gama (SAAD; SCALOPPI, 1998; SILVA et al., 1998; SAAD et al., 2002; ASSIS, et al., 2014; SILVA et al., 2015). No entanto, todos esses estudos foram realizados em escala local, não havendo relatos de pesquisas no

Brasil com escalas maiores como, por exemplo, a nível estadual. De acordo com Yuan et al. (2012), esse tipo de abordagem requer a comparação de vários modelos de distribuição, haja vista a influência da variabilidade espaço-temporal no desempenho destes. Portanto, acreditamos que é necessário avaliar a aplicabilidade de diferentes modelos de distribuição para a variável ETo, com o intuito de obter informações robustas para o dimensionamento econômico de sistemas de irrigação.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho comparar nove modelos probabilísticos (Log-normal, Weibull, Gamma, Cauchy, Normal, Logística, Birnbaum-Saunders, Gumbel e Gumbel-II) em 33 localidades do estado do Paraná, de modo a identificar aquele que melhor se ajusta à evapotranspiração de referência acumulada por meio da espacialização dos parâmetros da distribuição de probabilidade, visando o dimensionamento de sistemas de irrigação.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo e conjunto de dados

O estado do Paraná está localizado na longitude 51°O e 24°S de latitude, em extensão, possui aproximadamente 199.307 km². A altitude do estado varia de 100 a 900 m, sendo: 40,4% de 600 a 900 m; 37,2% entre 300 e 600 m; 10,2% entre 100 e 300 m; 12,2% acima dos 900 m.

Segundo a classificação de Köppen e Geiger (1928), predominam na região três climas: 1) O clima Cfa, subtropical caracterizado com chuvas bem distribuídas durante o ano e verões quentes, ocorre nas regiões norte, noroeste, oeste e sudoeste do estado. 2) O clima Cfb, temperado com verão ameno, ocorre na região central e mais elevada do estado. 3) O clima Af, tropical superúmido sem estação seca e

isento de geadas, caracteriza todo o litoral paranaense (PEDRON; KLOSOWSKI, 2008).

O conjunto de dados utilizados neste estudo é proveniente de 33 estações meteorológicas convencionais distribuídas por todas as mesorregiões do estado do Paraná, conforme apresentado na Figura 1. Os dados foram disponibilizados pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e compreendem o período de 01 de janeiro de 1980 a 31 de dezembro de 2010.

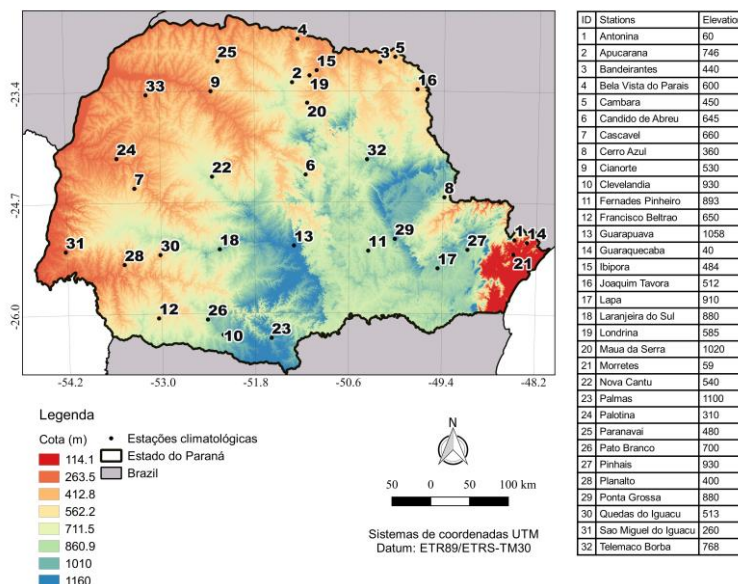
Por se tratar de série relativamente longa, é natural que haja falhas de registro, as quais alcançaram até 10% de dados faltantes entre todas as estações estudadas. Essas falhas foram preenchidas a partir do banco de dados desenvolvido por Xavier et al. (2015), o qual é formado pela interpolação de dados diários observados de diversas fontes e disponibilizados em espaçamento com alta resolução ($0,25^\circ \times$

$0,25^\circ$) que abarca todas as variáveis meteorológicas avaliadas nesta pesquisa.

Os elementos meteorológicos utilizados foram os seguintes: temperatura (máxima, mínima e média), umidade relativa média, radiação solar global, insolação e velocidade do vento. Para estimativa da evapotranspiração de referência, foi utilizado o método de Penman-Monteith, o qual é preconizado pela FAO e foi publicado em seu boletim de número 56 (ALLEN et al., 1998). Para realização dos cálculos de ET_o , utilizou-se o software REF-ET.

Os valores de ET_o foram acumulados em períodos consecutivos de 5 (ET_{o5}), 10 (ET_{o10}), 20 (ET_{o20}) e 30 (ET_{o30}) dias. A evapotranspiração de referência acumulada (ET_{oac}) máxima de cada ano e para todos períodos acumulados formaram séries das respectivas estações.

Figura 1. Modelo digital do terreno e localização das estações climatológicas no estado do Paraná, Brasil. (Lat. – Latitude; Long. – Longitude e Alt – Altitude).



4.2 Função de distribuição de probabilidade

A partir das séries de ET_{oac} , das respectivas estações, os dados foram ajustados a nove distribuições de

probabilidade, como segue: 1) Log-normal, 2) Weibull, 3) Gamma, 4) Cauchy, 5) Normal, 6) Logística, 7) Birnbaum-Saunders, 8) Gumbel-II e 9) Gumbel. Para ajustar os parâmetros das distribuições, foi utilizado o método da máxima

verossimilhança (Maximum Likelihood – ML). Esse método consiste em obter, a partir de uma amostra, o estimador “mais verossímil” dos parâmetros do modelo probabilístico.

Uma vez utilizada a ML para ajuste dos parâmetros das distribuições, o Critério de Informação de Akaike (AIC) foi utilizado para escolher a distribuição que melhor ajustou-se aos dados, mediante o menor valor de AIC. Portanto, a distribuição que melhor se ajustou à maioria dos dados das ET_{Oac} foi escolhida para representar toda a região de estudo e, assim, foram obtidos os parâmetros da mesma e estimadas as ET_{Oac} para os níveis de probabilidade de 50, 70, 80, 90 e 95%, correspondendo ao tempo de retorno (T) de 2, 3, 5, 10 e 20 anos, respectivamente.

4.3 Geoestatística

Mediante os parâmetros da distribuição que teve o melhor ajuste à maioria dos dados das ET_{Oac} , procedeu-se a análise geoestatística destes, com objetivo de regionalizar a ET_{Oac} para a área de estudo.

Inicialmente, uma análise exploratória das variáveis a serem interpoladas (parâmetros da distribuição de melhor ajuste ao maior número de estações) foi feita, visando verificar o atendimento a algumas pressuposições admitidas pela modelagem geoestatística, dentre elas: 1) normalidade, 2) não-tendenciosidade espacial, e; 3) remoção de “outliers”.

Os parâmetros da função de distribuição escolhida foram analisados sob a abordagem de modelos geoestatísticos (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2007). Buscou-se, desta forma, ajustar os parâmetros do modelo (Eq. 1) pelo método da máxima verossimilhança.

$$Y(X_i) = \beta + S(X_i) + \epsilon_i \quad (1)$$

Em que $Y(X_i)$ é a ET_{Oac} na linha i da matriz de coordenadas X ; β é a média geral de uma área específica; $S(X_i)$ é um processo gaussiano com função de um modelo matemático com parâmetro de variância σ^2 e parâmetro de alcance ϕ ; ϵ_i é o ruído aleatório normalmente distribuído com média zero e variância τ^2 .

Foram testados diferentes modelos de tendência, definidos por relações lineares e quadráticas entre as covariáveis X , Y e cota nas localizações das estações climatológicas.

Portanto, foi escolhido o melhor modelo de retirada de tendência espacial e, assim, foram testados seis modelos de funções de covariância candidatas, sendo elas: 1) exponencial; 2) gaussiano; 3) esférico; 4) circular e 5) matern com parâmetro de suavidade igual a 1,5 e 2,5. Após a escolha do modelo e estimativa de seus parâmetros, a krigagem ordinária foi utilizada para interpolar as variáveis estudadas.

4.4 Análise dos dados

A importação e a manipulação dos dados para a elaboração das séries de evapotranspiração de referência acumulada (pacotes hydroTSM – “Hydrologic Time Series Management” e Zoo), bem como o ajuste de modelos de distribuição (pacote fitdistrplus – “Parametric Distribution to Non-Censored or Censored Data”), o teste de aderência (pacote ADGofTest), a análise geoestatística (pacotes geoR, MASS, rgdal e raster), análise de tendências das séries (pacote Kendall) e os gráficos (pacotes RcolorBrewer, mapprotools e SDMTtools) foram realizados por meio do software livre R Statistical 3.4.2[®] (R CORE TEAM, 2017).

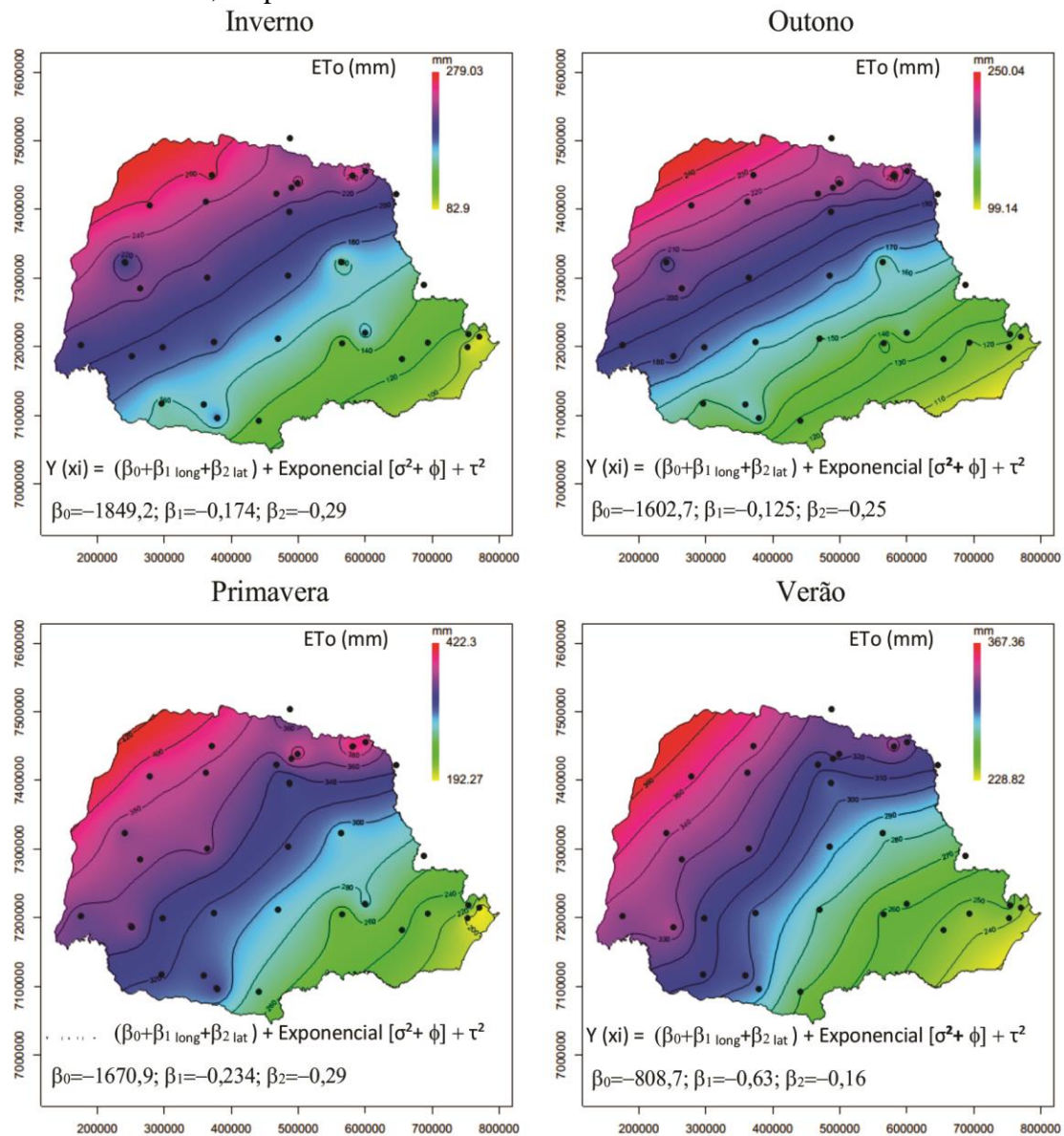
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição espacial da evapotranspiração de referência média sazonal está apresentada na Figura 2. Na Figura 3, o estado do Paraná foi dividido em três áreas ao longo da longitude (leste-oeste), as três áreas correspondem com a diminuição da altitude e os três principais planaltos do estado.

A distribuição espacial da ETo foi semelhante nas quatro estações do ano

(inverno, outono, primavera e verão), exceto em alguns pontos isolados. Nota-se, claramente, o gradiente de sudeste-noroeste, os maiores valores são encontrados na região Noroeste e os menores valores na parte sudeste (região litorânea). Como pode ser visto na Figura 3, a baixa velocidade média do vento, aferida a 2 m de altura, e a alta umidade relativa do ar podem comprovar os menores valores de ETo na região leste.

Figura 2. Distribuição espacial média da evapotranspiração de referência sazonal para o estado do Paraná, no período de 1980 a 2010.

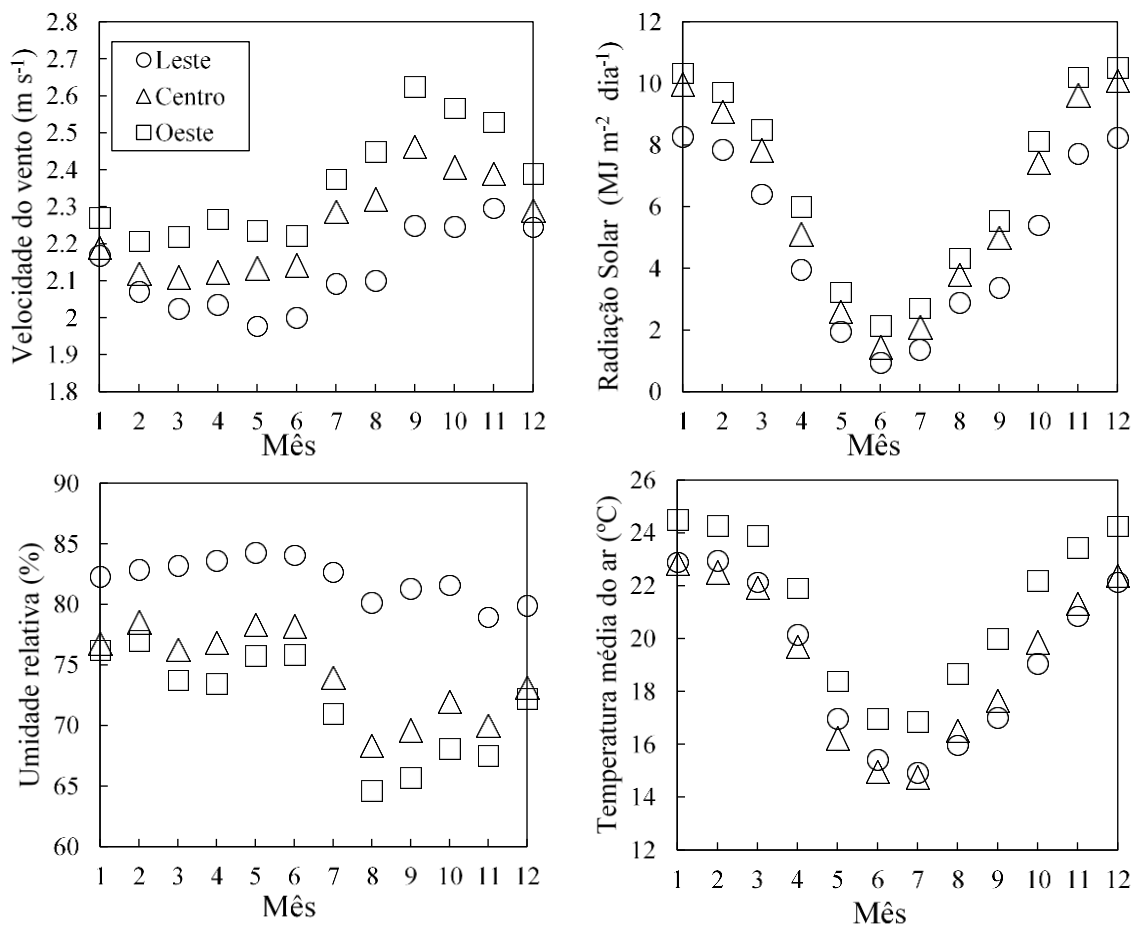


Na parte central do estado, os valores de ETo encontrados foram intermediários entre as regiões leste e oeste. Novamente, os valores da velocidade do vento e da umidade relativa do ar foram fundamentais para validação desse resultado, haja vista que as demais variáveis

radiação e temperatura média do ar apresentam semelhanças em seus valores.

Os maiores valores de ETo foram obtidos na região oeste. Tais resultados foram acompanhados dos maiores valores para velocidade do vento e temperatura média do ar e menor umidade relativa do ar.

Figura 3. Média das variações mensais dos elementos meteorológicos nas regiões leste, central e oeste do estado do Paraná no período de 1980 a 2010.



Estes mapas de distribuição espacial de ETo fornecem informações valiosas para o planejamento e gestão dos recursos hídricos, uma vez que a distribuição espacial sazonal da ETo é uma força motriz importante no ciclo hidrológico (XU et al., 2006). Entretanto, as flutuações sazonais nos valores da ETo mensal devem ser consideradas cuidadosamente. Na Figura 4 os coeficientes de variação calculados para as médias sazonais foram altos. A

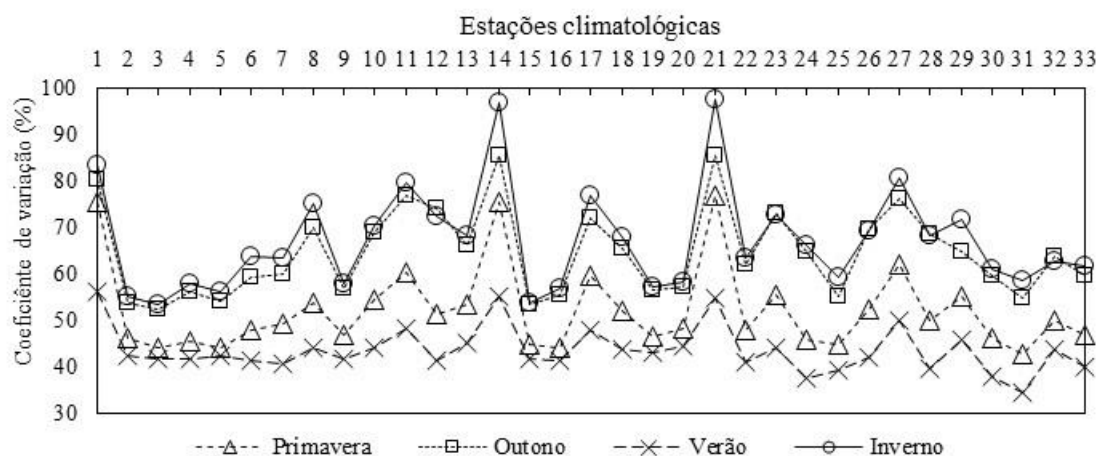
variabilidade nos valores de ETo mensal indicam que valores médios não são os mais adequados como indicadores da ETo. A exemplo disso, em estudos de ETo acumuladas em diferentes intervalos (1, 5, 10, 15 e 30 dias) no município de Urussanga (SC), Back (2007) observou que a medida que são menores os intervalos de dias acumulados de ETo, maior é a dispersão dos valores em torno da média e maior é o valor médio máximo diário da

ET_o. Conforme a Figura 4, o intervalo de 30 dias, o coeficiente de variação ficou entre 23,9 e 49,7%.

A alta variabilidade dos elementos meteorológicos durante o período de máxima exigência hídrica das culturas

ocasiona considerável dispersão dos valores estimados da ET_o, sugerindo uma análise da distribuição de frequência dos valores estimados para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação (SAAD; SCALOPPI, 1988; BACK, 2011; FIETZ et al., 2005).

Figura 4. Coeficiente de variação da evapotranspiração de referência sazonal para o estado do Paraná, no período de 1980 a 2010.



Na Tabela 3 são apresentadas as melhores distribuições de probabilidade para cada estação, ressaltando que as nove distribuições de probabilidade não foram aceitas em todas as estações e períodos acumulados de ET_o segundo o teste de aderência de Anderson-Darling ($p < 0,05$). Dos 132 testes de aderência aplicados, somente 23 não foram aceitos. As distribuições que obtiveram os melhores ajustes à maioria das séries de ET_o foram a Rayleigh generalizada (estações 13, 11, 10 e 7, respectivamente nos períodos acumulados de ET_{o5}, ET_{o10}, ET_{o20} e ET_{o30}), a Gumbel (estações 5, 6, 8 e 4, respectivamente nos períodos acumulados de ET_{o5}, ET_{o10}, ET_{o20} e ET_{o30}) e a Birnbaum-Saunders (estações 8, 2 e 6, respectivamente nos períodos acumulados de ET_{o5}, ET_{o10}, ET_{o20} e ET_{o30}). A distribuição de Gumbel apresentou o melhor ajuste em 23 séries de dados, mas em apenas três foi considerada adequada

pelo teste de aderência. A distribuição normal obteve os melhores ajustes em apenas três séries de dados, contrariando trabalhos que indicam essa distribuição para o estudo de frequência da ET_o (ARRAES et al., 2009; BLAIN; BRUNINI 2007; SILVA et al., 1998; SAAD, 1990; SAAD; SCALOPPI, 1988).

Buscou-se apenas uma função de distribuição de probabilidade (FDP) para representar todo o estado do Paraná. Segundo o teste AIC, a FDP que se ajustou adequadamente aos valores de ET_o acumulada por meio do teste de aderência nas 33 estações foi a Gumbel II, considerada adequada nos quatro períodos acumulados de ET_o (Tabela 4). Dentre os modelos de tendência espacial testados, os que apresentaram maior ganho de predição estão na Tabela 5, assim como as estimativas dos parâmetros de covariância (τ^2 , σ^2 e ϕ).

Tabela 5. Avaliação dos melhores modelos espaciais e a função de covariância exponencial para os parâmetros da distribuição de Gumbel II para evapotranspiração de referência acumulada em 5, 10, 20 e 30 dias

Y(xi)	Parâmetros							
	Tendência espacial $\beta(\text{xi})$					Covariância S(xi)		Erro
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	σ^2	ϕ	τ^2
ET _{O5} - Evapotranspiração de referências acumulada de 5 dias máxima anual								
par1	-73,2	-0,01	0,01			3,49	15,02	0,00
par2	-43,1	-0,00	0,01			10,26	28,27	1,45
ET _{O10} - Evapotranspiração de referências acumulada de 10 dias máxima anual								
par1	-150	-0,02	0,03			11,31	18,79	0,00
par2	13,68	9,55	5,81	4,41	-0,5	5,19	26,75	0,00
ET _{O20} - Evapotranspiração de referências acumulada de 20 dias máxima anual								
par1	-284	-0,04	0,05			36,09	20,47	0,00
par2	12,79	4,89	5,94	4,09	0,2	1,86	34,55	1,15
ET _{O30} - Evapotranspiração de referências acumulada de 30 dias máxima anual								
par1	-432	-0,07	0,08			74,73	21,42	0,00
par2	12,30	5,61	3,85	2,47	-2	1,66	53,29	0,93

Y(xi) – valor observado na posição x; $\beta(\text{xi})$ – média geral de uma área específica; S(xi) – fator aleatório espacialmente correlacionado; AIC – Critério de Informação de Akaike; τ^2 – erro; σ^2 – variância; ϕ – alcance; β_n – componente de tendência espacial; par1 – α ; par2 – β

O modelo exponencial que leva em consideração as tendências (Tabela 5) da latitude e da longitude pode ser usado para estimativas da variável α , para os períodos acumulados de ET_{O5}, ET_{O10}, ET_{O20} e ET_{O30} e para estimativa da variável β , somente no período acumulado da ET_{O5}. Nos demais períodos acumulados, a variável β foi ajustada com tendência espacial e relações quadráticas entre a covariável latitude e a

altitude (Tabela 5). Essa correlação espacial com altitude foi verificada em Cuba por Solano et al. (2003); os autores verificaram, por meio de mapas de ETo, que os gradientes de variação da ETo apresentam valores cada vez menores com o aumento da altitude. Essa mesma tendência foi observada em Botucatu e Piracicaba, no Brasil e Güira de Melena, em Cuba (PEREIRA et al., 2016).

Tabela 3. Valor médio observado e os parâmetros do modelo de distribuição mais adequado na determinação da probabilidade de ocorrência da evapotranspiração de referência acumulada máxima anual no estado do Paraná, Brasil

Id	ET ₀₅				ET ₁₀			
	Md	Modelo	Par1	Par2	Md	Modelo	Par1	Par2
1	5,62	Geray*	9,95	1720	4,86	Gamma*	114,30	2,35
2	5,88	Gumb ^{NS}	1,79	28,36	5,20	Lnorm*	3,95	0,08
3	6,92	GumbII*	33,22	17,21	6,22	GumbII*	59,54	15,06
4	5,53	Gumb ^{NS}	1,37	26,83	4,96	GumbII*	48,25	21,78
5	6,60	GumbII*	31,73	15,77	5,96	Gumb ^{NS}	4,26	57,12
6	5,57	Geray*	10,44	711,03	4,96	Bisa*	49,43	0,09
7	6,50	Geray*	12,13	768,31	5,74	Geray*	22,99	308,21
8	5,18	Geray*	9,81	632,57	4,56	Geray*	19,34	156,02
9	6,32	Gumb ^{NS}	1,34	30,82	5,71	Geray*	19,56	3000,88
10	5,95	Gumb ^{NS}	1,43	28,95	5,28	Logis*	52,63	2,21
11	5,05	Bisa*	25,19	0,08	4,32	Gumb ^{NS}	3,34	41,25
12	5,71	Geray*	8,97	15052	5,19	Logis*	51,76	1,97
13	5,26	Cauch*	26,22	0,76	4,66	Gumb ^{NS}	3,34	44,71
14	4,78	Geray*	9,31	425,99	4,05	Logis*	40,48	2,07
15	6,53	Geray*	11,97	1009,32	5,85	Gumb ^{NS}	4,93	55,70
16	5,97	GumbII*	29,04	22,64	5,38	Gumb ^{NS}	2,71	52,29
17	4,99	Bisa*	24,90	0,07	4,33	Geray*	15,60	1302,89
18	5,47	Logi*	27,32	0,73	4,92	Geray*	16,48	4483,26
19	6,39	Bisa*	31,90	0,06	5,77	Geray*	21,98	575,72
20	5,58	Geray*	11,00	370	4,92	Lnorm*	3,89	0,09
21	4,87	Geray*	9,68	329	4,18	Geray*	16,11	500,95
22	6,32	Bisa*	31,51	0,08	5,67	Gumb ^{NS}	4,40	54,17
23	5,03	Cauch*	24,76	0,55	4,47	Geray*	16,23	1168,76
24	5,99	GumbII*	28,95	19,06	5,54	GumbII*	53,41	17,99
25	6,60	Bisa*	32,94	0,07	5,89	Geray*	20,57	2114,75
26	5,71	Logis*	28,44	0,92	5,12	Logis*	51,06	1,95
27	4,72	Geray*	8,39	1657	4,04	GumbII*	38,60	14,61
28	6,34	Logis*	31,63	1,17	5,77	Logis*	57,67	2,50
29	5,54	Bisa*	27,54	0,10	4,73	Gumb ^{NS}	3,92	45,01
30	5,62	Bisa*	27,92	0,12	5,05	Bisa*	50,13	0,12
31	5,83	Norm*	29,16	3,77	5,27	Geray*	25,09	49,43
32	5,10	Bisa*	25,46	0,06	4,60	Geray*	16,70	1152,56
33	6,59	Geray*	11,26	3131	5,89	Gumb ^{NS}	3,52	56,86

Tabela 3. Valor médio observado e os parâmetros do modelo de distribuição mais adequado na determinação da probabilidade de ocorrência da evapotranspiração de referência acumulada máxima anual no estado do Paraná, Brasil (continuação).

Id	ET ₂₀				ET ₃₀			
	Md	Modelo	Par1	Par2	Md	Modelo	Par1	Par2
1	4,17	Geray*	32,89	369,81	3,85	Gamma*	127,23	1,10
2	4,68	Gamma*	138,71	1,48	4,43	Bisa ^{NS}	132,30	0,08
3	5,53	Gumb ^{NS}	8,56	105,62	5,23	Gumb*	12,34	149,73
4	4,45	Geray*	28,36	11101,87	4,22	Geray ^{NS}	41,70	5785,44
5	5,37	Gumb ^{NS}	8,65	102,40	5,05	Geray ^{NS}	57,89	561,89
6	4,43	GumbII*	84,61	13,82	4,18	Gumb*	9,85	119,53
7	5,14	Geray*	40,45	380,16	4,87	Gumb*	11,35	139,52
8	4,08	Bisa*	81,20	0,11	3,84	Bisa*	114,42	0,11
9	5,16	Logis*	102,86	4,49	4,90	Geray*	53,33	1195,37
10	4,69	Bisa*	93,56	0,08	4,43	Logis ^{NS}	132,76	5,90
11	3,79	GumbII*	72,51	14,49	3,54	Gumb*	7,69	101,87
12	4,71	Norm*	94,25	7,15	4,44	Gamma*	149,72	1,12
13	4,18	Geray*	32,38	471,63	3,93	Geray*	47,94	258,39
14	3,51	Lnorm*	4,25	0,11	3,24	Norm*	97,14	10,33
15	5,31	Geray*	44,39	185,75	4,99	Bisa*	149,05	0,09
16	4,85	Bisa*	96,65	0,07	4,62	Bisa*	138,03	0,08
17	3,79	Gumb ^{NS}	4,99	72,85	3,54	Geray*	39,09	943,70
18	4,44	Logis*	88,87	4,44	4,18	Norm*	125,52	11,34
19	5,18	Geray*	39,35	603,27	4,87	Geray*	54,48	796,21
20	4,41	Bisa*	87,89	0,09	4,14	Gamma*	114,00	0,92
21	3,60	Bisa*	71,71	0,10	3,32	Norm*	99,66	9,52
22	5,10	Geray*	41,53	246,23	4,81	Geray*	59,89	196,08
23	3,99	Geray*	27,26	3141,53	3,76	Logis*	112,36	4,76
24	5,02	Gumb ^{NS}	6,73	96,54	4,76	GumbII*	137,16	15,40
25	5,31	Logis*	105,56	4,31	5,05	Logis*	151,14	6,63
26	4,64	Logis*	92,95	3,65	4,38	Logis*	131,38	5,80
27	3,54	Geray*	27,96	353,62	3,28	Bisa*	98,04	0,08
28	5,23	Lnorm*	4,65	0,09	4,93	Lnorm*	4,99	0,09
29	4,16	Gumb ^{NS}	7,30	78,93	3,93	GumbII*	111,35	11,43
30	4,58	Bisa*	90,83	0,12	4,31	Lnorm*	4,85	0,12
31	4,76	GumbII*	88,72	9,41	4,50	Gumb ^{NS}	14,58	126,46
32	4,14	Gumb ^{NS}	5,69	79,39	3,88	GumbII*	111,10	13,68
33	5,36	Geray*	37,63	1987,04	5,08	Gumb*	9,46	147,03

Tabela 4. Parâmetros do modelo de distribuição de Gumbel II na determinação da probabilidade de ocorrência da evapotranspiração de referências acumulada no estado do Paraná, Brasil

Id	ET ₀₅		ET ₀₁₀		ET ₀₂₀		ET ₀₃₀	
	α	β	α	β	α	β	α	β
1	27,0	14,8	46,1	10,6	79,4	12,1	110,1	11,5
2	28,3	16,1	49,9	13,5	89,4	11,8	127,0	12,6
3	33,2	17,2	59,5	15,1	105,3	12,6	149,2	12,4
4	26,8	19,9	48,2	21,8	86,3	19,0	122,4	17,7
5	31,7	15,8	56,9	13,5	102,0	12,1	144,8	13,0
6	26,6	13,6	47,3	12,0	84,6	13,8	119,1	12,5
7	31,1	13,8	54,6	11,4	97,9	12,0	139,1	12,4
8	24,8	13,0	43,0	10,3	76,9	9,8	108,2	9,4
9	30,8	23,2	55,1	16,2	98,9	12,9	141,2	14,3
10	28,9	20,5	50,7	12,7	90,2	14,5	127,2	11,9
11	24,3	14,1	41,1	12,5	72,5	14,5	101,6	13,5
12	27,7	19,3	50,0	13,5	90,3	12,5	127,4	12,2
13	25,3	13,9	44,6	13,5	79,8	12,6	112,1	11,1
14	22,8	12,4	38,5	10,0	66,2	9,8	91,4	9,1
15	31,3	13,7	55,5	11,4	100,6	10,4	142,4	11,3
16	29,0	22,6	52,2	19,4	93,2	15,2	132,6	12,8
17	24,0	15,0	41,6	14,7	72,7	14,9	101,7	14,1
18	26,6	18,7	47,6	16,7	84,3	9,9	119,1	9,7
19	30,9	17,0	55,1	13,2	99,0	13,0	140,0	13,7
20	26,6	12,1	46,9	11,8	84,0	11,7	117,8	10,9
21	23,1	11,8	39,9	12,5	68,1	9,9	94,5	10,9
22	30,3	13,5	54,0	12,6	96,7	11,5	136,4	11,0
23	24,3	16,2	42,9	14,3	77,0	16,3	108,0	12,1
24	28,9	19,1	53,4	18,0	96,3	14,6	137,2	15,4
25	31,8	15,2	56,7	15,5	102,1	14,1	145,2	12,7
26	27,7	17,6	49,3	14,0	89,2	12,8	125,8	11,6
27	22,7	15,1	38,6	14,6	67,3	12,2	94,2	13,1
28	30,5	13,2	55,1	10,0	99,6	11,2	140,6	11,3
29	26,2	10,4	44,8	11,7	78,6	11,1	111,4	11,4
30	26,3	8,8	47,2	8,7	85,4	8,9	120,8	8,6
31	27,0	7,5	48,9	8,1	88,7	9,4	125,6	9,0
32	24,7	16,1	44,1	14,5	79,2	14,3	111,1	13,7
33	31,8	16,3	56,7	16,4	103,2	15,5	146,7	15,7

Id – Identificação da estação; ET₀ – Método de Penman-Monteith preconizado pela FAO-56; ET₀₅ – 5 dias; ET₀₁₀ – 10 dias; ET₀₂₀ – 20 dias; ET₀₃₀ – 30 dias acumulados

Por meio da função de distribuição acumulada de Gumbel II foram gerados os valores de ET₀ para os níveis de probabilidade de 50, 70, 80, 90 e 95%, correspondendo ao tempo de retorno de 2, 3, 5, 10 e 20 anos, respectivamente (Figura 6 a 9). Pode-se observar, novamente, a

tendência de redução da ET₀ com o aumento do período acumulado.

Os valores de ET_{0ac} podem ser interpretados da seguinte forma; na Figura 6e, como exemplo, para a região noroeste do estado do Paraná, em um período acumulado de ET₀ de 5 dias e a

probabilidade de ocorrência de 95% (período de retorno de 20 anos), o valor de ET_0 corresponde a $7,89 \text{ mm dia}^{-1}$ ($39,45 \text{ mm}$). Portanto, existe 95% de probabilidade de que o valor de ET_0 para um período de 5 dias não ultrapasse $7,89 \text{ mm dia}^{-1}$ ou, ainda, para o mesmo período, em apenas um de cada vinte anos o valor de ET_0 será igual ou superior a $7,89 \text{ mm dia}^{-1}$.

Portanto, os valores de ET_0 , multiplicados pelos respectivos coeficientes de cultura, poderão determinar o consumo

hídrico das culturas agrícolas e ser utilizado de forma complementar aos projetos de irrigação e outras estruturas envolvidas no uso dos recursos hídricos destinados à redução de riscos produtivos causados pela seca e às variabilidades climáticas ocorridas no estado do Paraná, reduzindo custos e melhorando a capacidade produtiva da região, fornecendo maiores subsídios para os agricultores e produtores, de maneira geral.

Figura 4. Mapas dos parâmetros (Par 1 – α ; Par 2 – β) da distribuição de probabilidade de Gumbel II na determinação da evapotranspiração acumulada em 5 e 10 dias no estado do Paraná, Brasil (1980-2010).

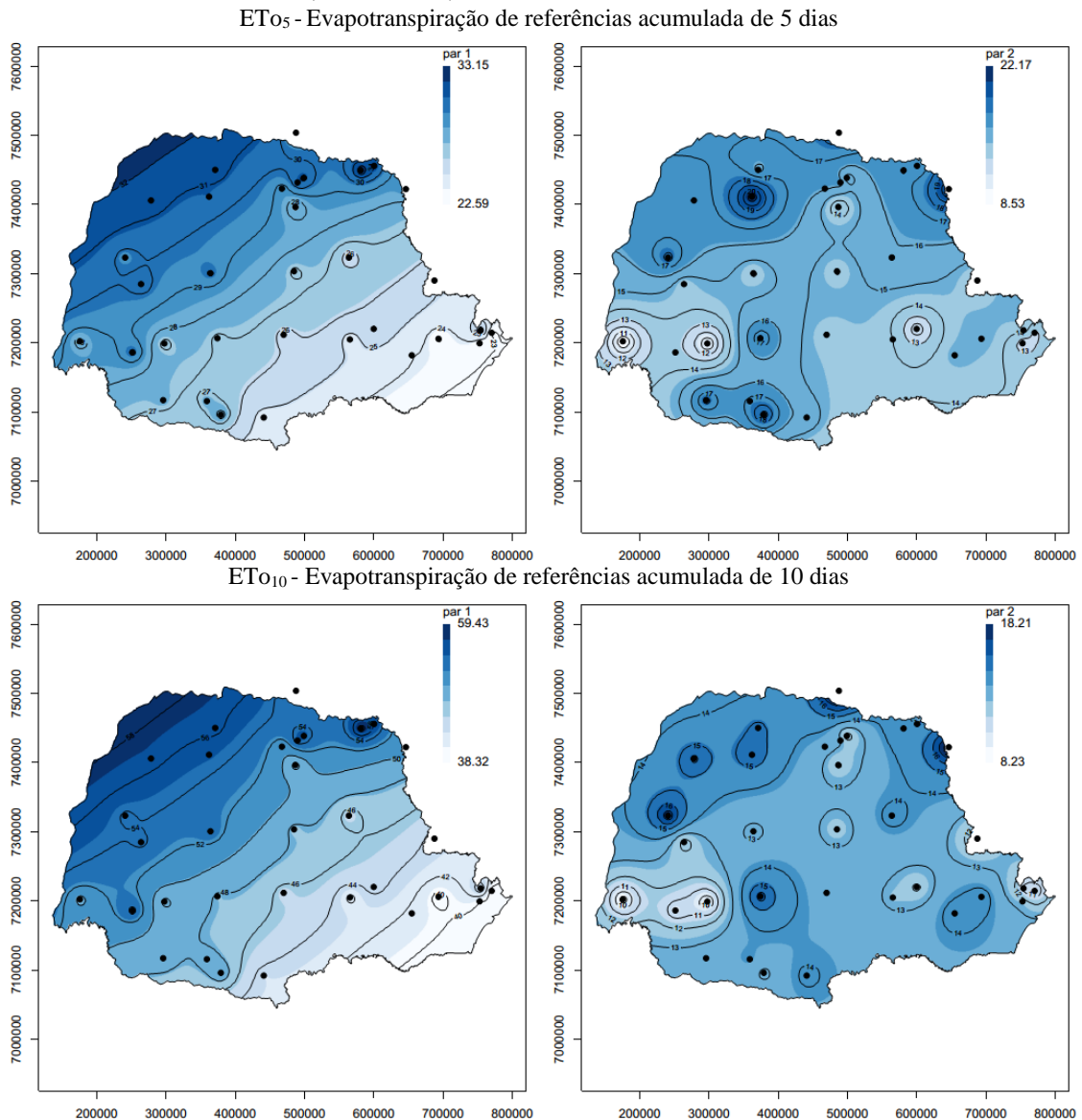


Figura 5. Mapas dos parâmetros (Par 1 – α ; Par 2 – β) da distribuição de probabilidade de Gumbel II na determinação da evapotranspiração acumulada em 20 e 30 dias no estado do Paraná, Brasil (1980-2010).

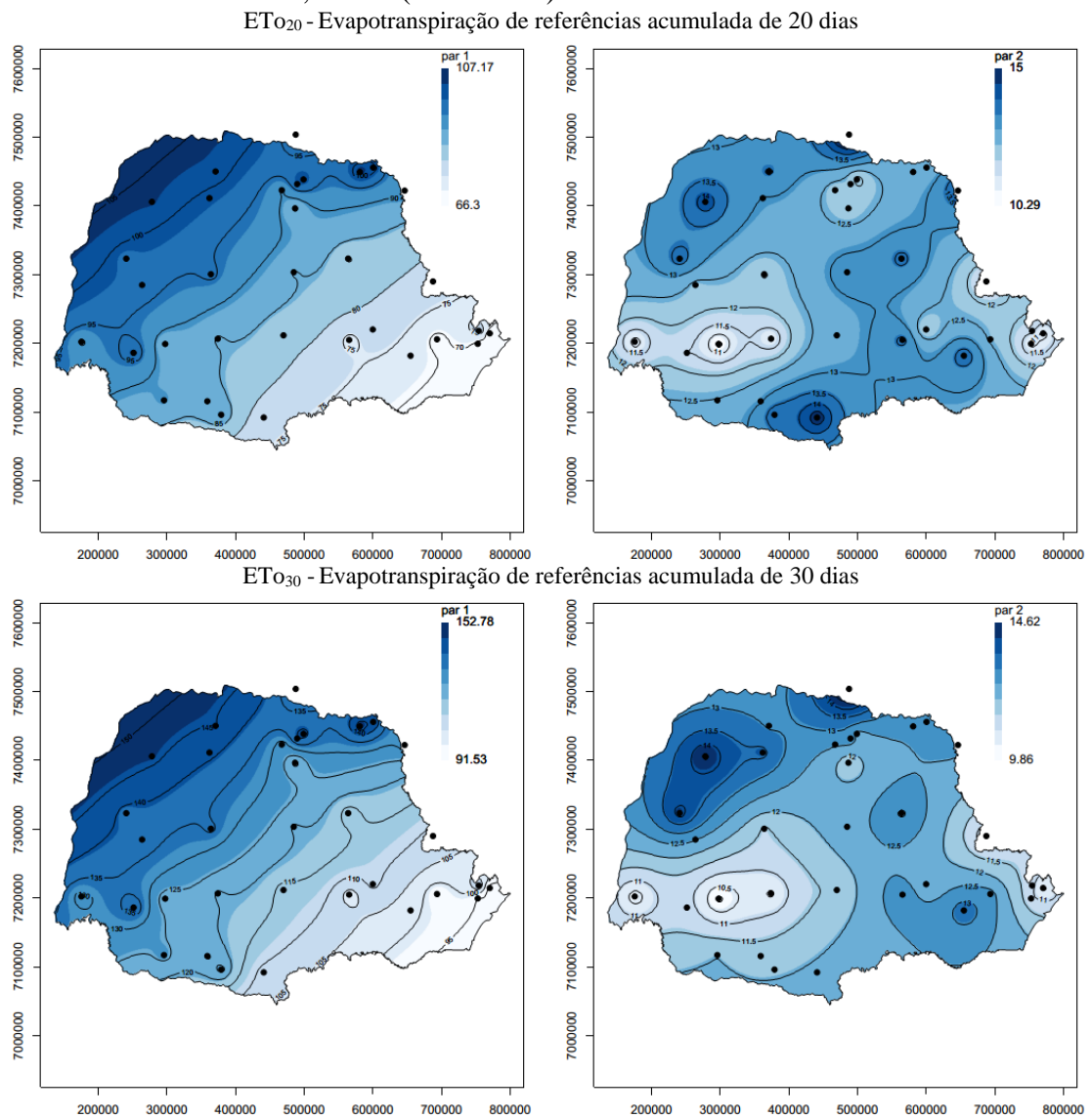


Figura 6. Mapas de evapotranspiração de referência acumulada de 5 dias associados ao tempo de retorno de 2 (a), 3 (b), 5 (c), 10 (d) e 20 (e) anos no estado do Paraná, Brasil.

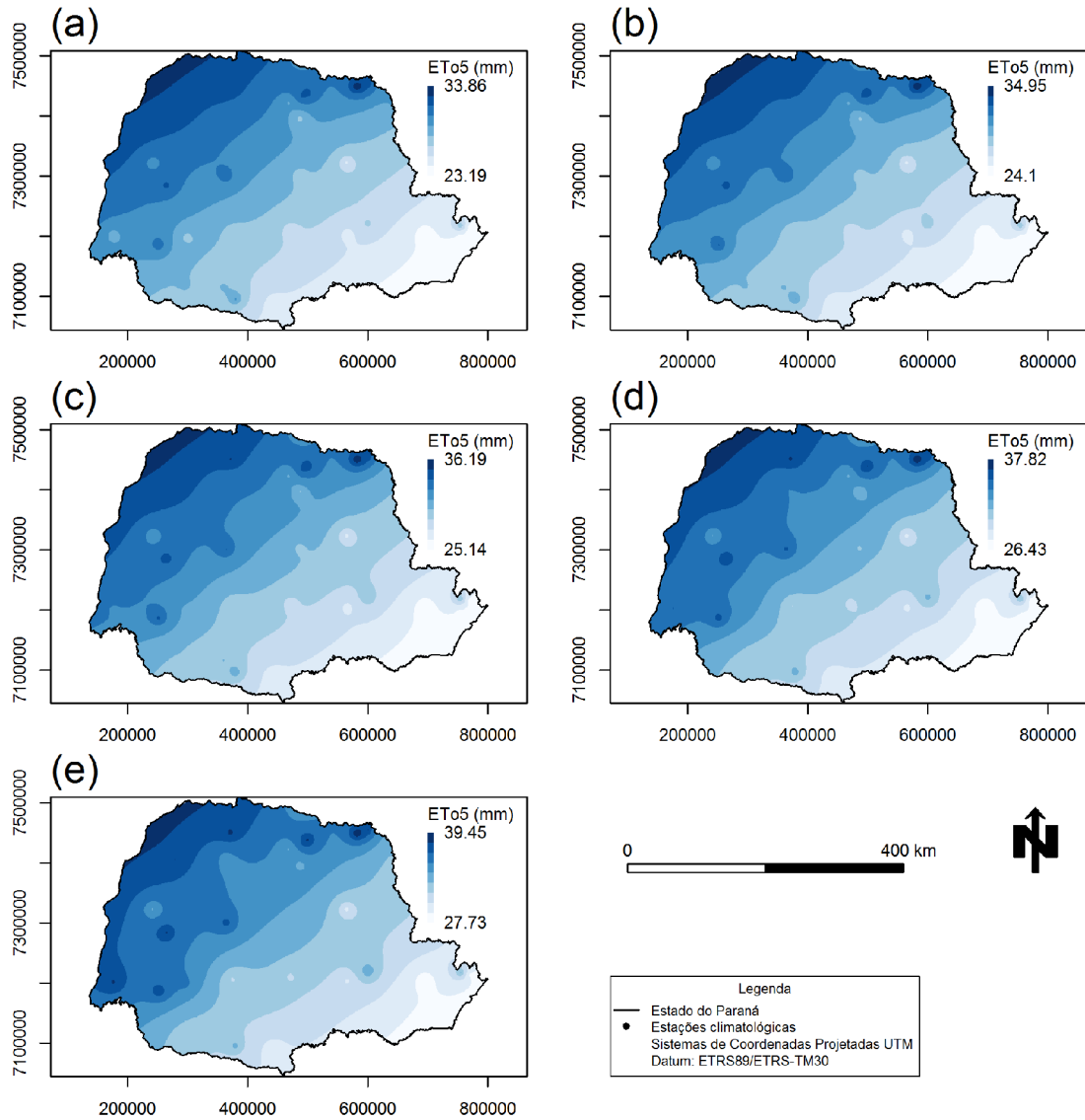


Figura 7. Mapas de evapotranspiração de referência acumulada de 10 dias associados ao tempo de retorno de 2 (a), 3 (b), 5 (c), 10 (d) e 20 (e) anos no estado do Paraná, Brasil.

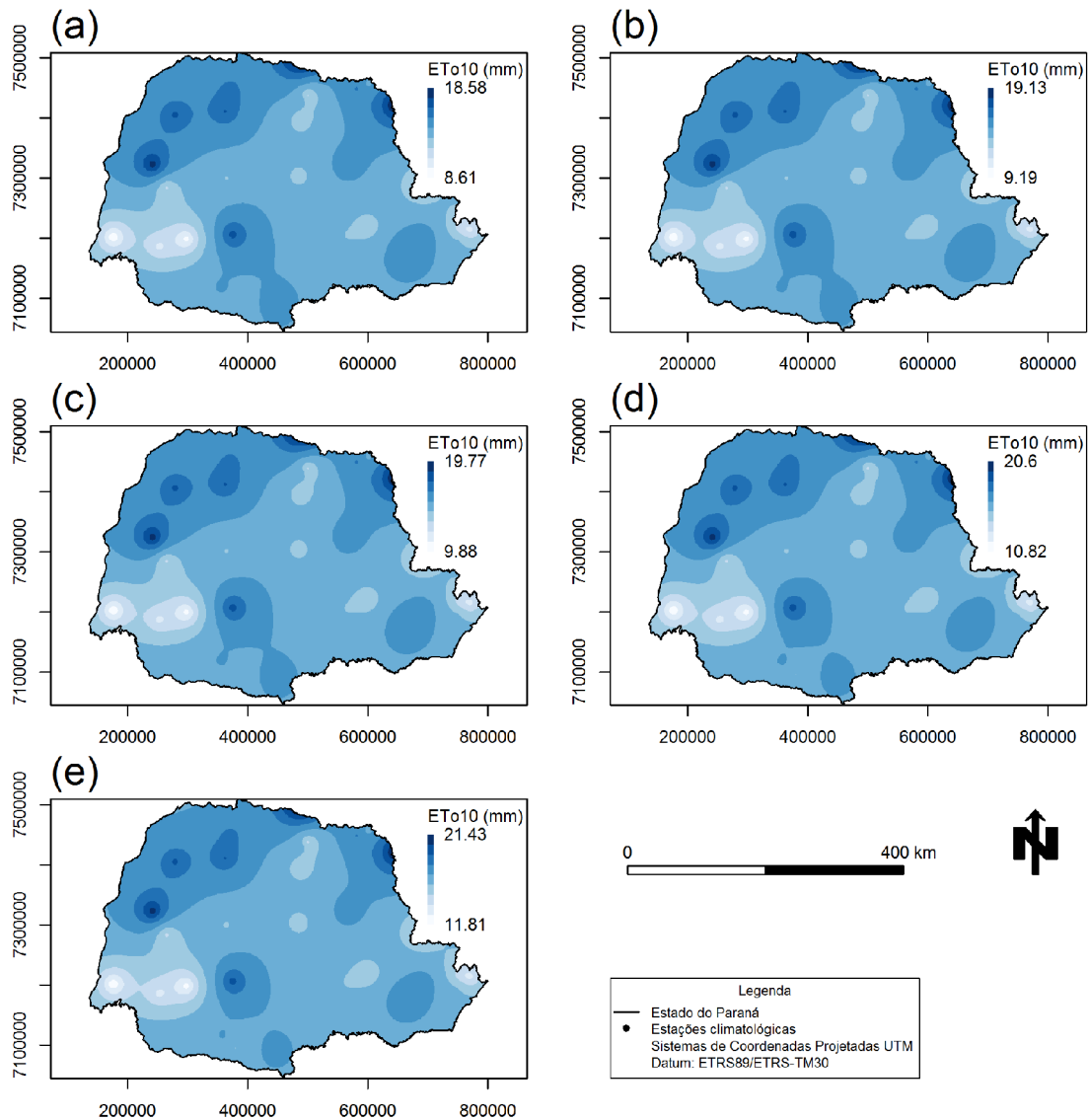


Figura 8. Mapas de evapotranspiração de referência acumulada de 20 dias associados ao tempo de retorno de 2 (a), 3 (b), 5 (c), 10 (d) e 20 (e) anos no estado do Paraná, Brasil.

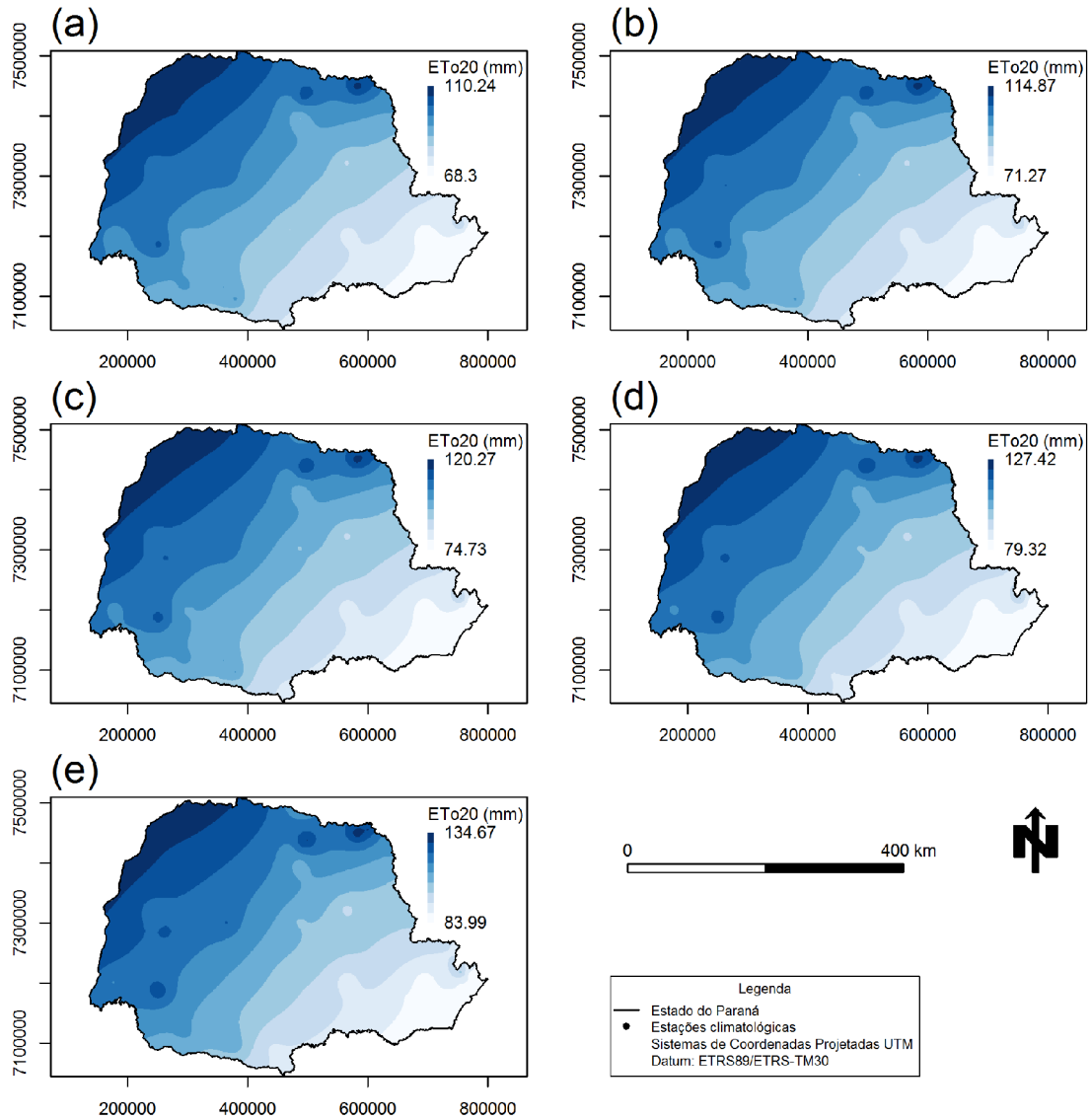
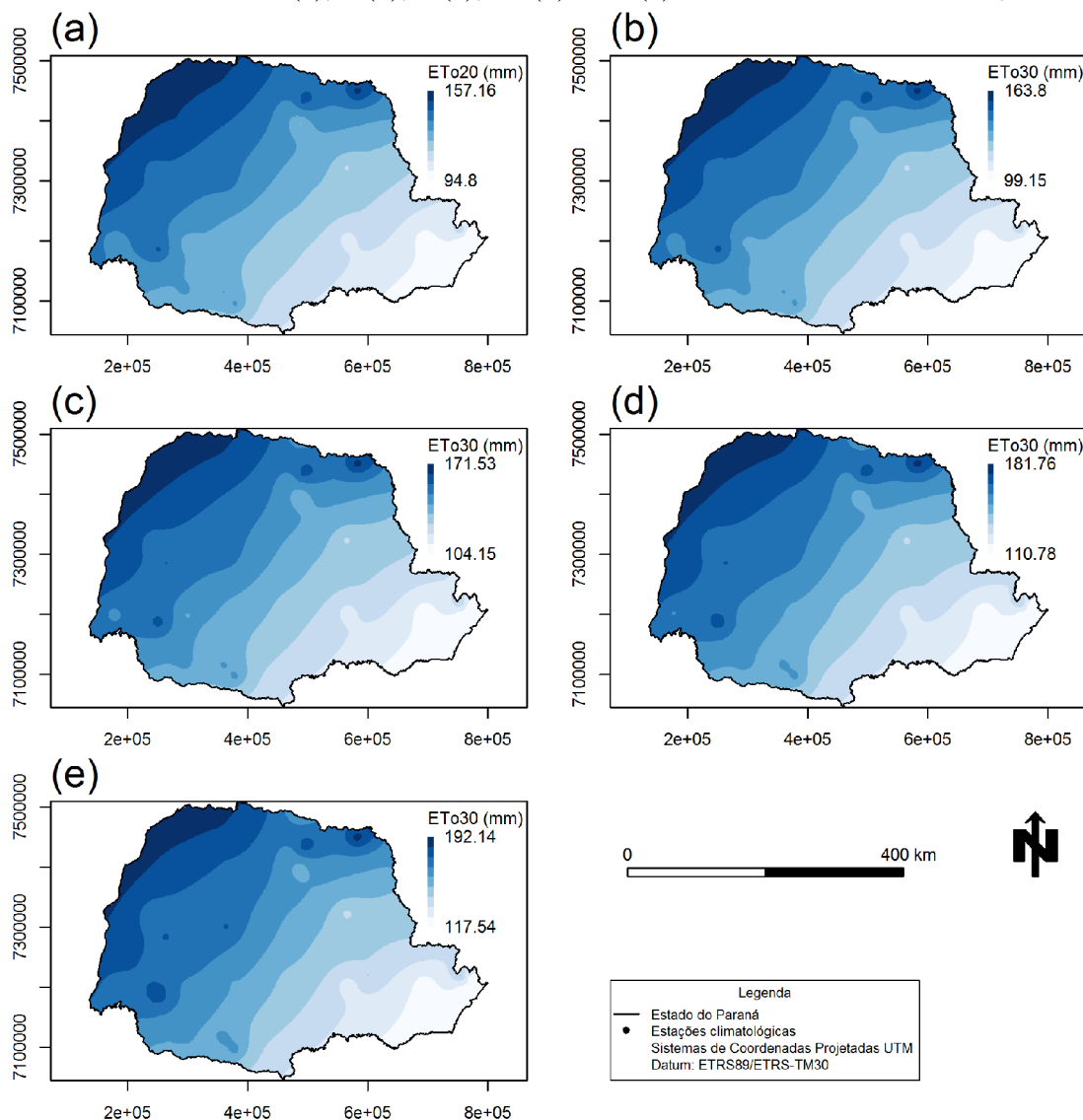


Figura 9. Mapas de evapotranspiração de referência acumulada de 30 dias associados ao tempo de retorno de 2 (a), 3 (b), 5 (c), 10 (d) e 20 (e) anos no estado do Paraná, Brasil.



6 CONCLUSÃO

A distribuição de probabilidade de Gumbel II foi escolhida na geração de valores de ETo_{ac} , nos diferentes níveis de probabilidade, por meio de mapas da

distribuição dos parâmetros α e β da distribuição para representar o estado do Paraná. As regiões norte e noroeste do estado do Paraná apresentam a maior demanda hídrica.

7 REFERÊNCIAS

ARRAES, F. D. D.; LOPES, F. B.; SOUZA, F.; OLIVEIRA, J. B. de. Estimating the water balance for the climatic conditions of Iguatu (Ceará – Brazil) using stochastic model. **Revista**

Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 3, n.2, p.78–87, 2009.

<https://doi.org/10.7127/RBAI.V3N200020>

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 297p. (Irrigation and drainage paper, 56)

ASSIS, J. P. de; SOUSA, R. P. DE; NETO, F. B.; LINHARES, P. C. F. Tabelas de probabilidades da evapotranspiração de referência para a região de Mossoró, RN, Brasil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 58–67, 2014.

BACK, A. J. Time distribution of heavy rainfall events in Urussanga, Santa Catarina State, Brazil. **Acta Science Agronomy**, v. 33, n. 4, p. 583-588, 2011.

<http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i4.6664>

BRASIL, Agência Nacional de Águas. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil 2019**. Brasília, DF, 2019. Disponível em: < <https://www.ana.gov.br/ usos-da-agua/irrigacao>>

BLAIN, G. C.; BRUNINI, O. Caracterização do regime de evapotranspiração real, em escala decenal, no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, p. 75–82, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000100008>

COSTA, J. O.; COELHO, R. D.; ALMEIDA, A. N.; FARIAS, A. J.; MONTEIRO, R. O. C. Energia elétrica e irrigação no Brasil: impacto das bandeiras tarifárias. ITEM. Irrigação e Tecnologia Moderna, p. 52 - 55, 20 jun. 2017.

DIGGLE, P. J.; RIBEIRO JR, P. J. Model based geostatistics. New York: Springer, 2007. 230 p.

FAO. 2007. Agriculture and water scarcity: a programmatic approach to water use efficiency and agricultural productivity. Twentieth Session, Committee on Agriculture, COAG/2007/7. Rome.

FIETZ, C. R.; SILVA, F. C.; URCHEI, M. A. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Dourados, MS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.13, n.2, p.225-250, 2005

GHIMIRE, M.; STOECKER, A.; BOYER, T. A.; BHAVSAR, H. VITALE, J. An integration of GIS and simulation model for a cost benefit analysis of irrigation development.

Sustainable Agriculture Research, v.5, n.4, p.58-70, 2016.

<http://dx.doi.org/10.5539/sar.v5n4%25p>

GONZÁLEZ-HIDALGO, J. C.; BRUNETTI, M.; LUIS, M. A new tool for monthly precipitation analysis in Spain: MOPREDAS database (monthly precipitations trends December 1945-November 2005). **International Journal of Climatology**, v.31, p.715-731, 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.2115>

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

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, 2015.

KHALIL, A. A.; ESSA, Y. H.; ABDEL-WAHAB, M. M. Evapotranspiration mapping over Egypt using MODIS/Terra satellite data. **International Journal of Advanced Research**, v.15, n.12, p.512-522, 2015.

KHANJANI, M. J.; BUSCH, J. R. Optimal irrigation water use from probability and cost-benefit analyses. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.4, p.961-965, 1082. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.33647>.

LIRA, V. M.; OLIVEIRA, F. G.; DANTAS, R. G.; SOUZA, W. M. Alterações da precipitação em municípios do estado de Pernambuco. **Engenharia Ambiental**, v.3, n.1, p.52-61, 2006.

MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. **International Journal Climatology**, v.28, n.7, p.893-904, 2008. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1584>

MINUZZI, R. B.; CARAMORI, P. H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no estado do Paraná. **Revista Ceres**, v.58, n.5, p.593-602, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2011000500009>

PEDRON, I. T.; KLOSOWSKI, E. S. Distribuição de frequência de chuvas diárias no estado do Paraná. **Scientia Agraria Paranaensis**, v.7, n.1-2, p.55-63. 2008.

PINTO, H. S. Adaptação do Setor Agrícola Brasileiro. In: Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável - FBDS. (Org.). **Mudanças Climáticas e Eventos Extremos no Brasil**, Rio de Janeiro: Da Gema Comunicação, v. 1, p. 34-51. 2009.

R CORE TEAM (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

SAAD, J. C. C.; BISCARO, G. A.; DELMANTO JUNIOR, O. Estudo da distribuição da evapotranspiração de referência visando o dimensionamento de sistemas de irrigação. **Irriga**, v.7, n.1, p.10-17, 2002.

SAAD, J. C. C.; SCALOPPI, E. J. Frequência de distribuição de evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8, 1988, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. v.2, p.1037-52.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing

data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v.97, n.5, p.635-644, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>

SILVA, F. C.; FIETZ, C. R.; FOLEGATTI, M. V.; PEREIRA, F. A. C. Distribuição e frequência da evapotranspiração de referência de Cruz das Almas, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.284-286, 1998.
><https://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v2n3p284-286><

SILVA, A. O.; CORREIA, J. S.; BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. C. Evapotranspiração de referência para o dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.9, n.1, p.30-38, 2015.

SILVA, R. M.; SILVA, L. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. Análises da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v.22, n.2, p.357-372, 2010.

SOLANO, O.; MENÉNDEZ, C.; VÁZQUEZ, R.; MENÉNDEZ, J. A. Estudio de la evapotranspiración de referência en Cuba. **Revista Cubana de Meteorología**, Instituto de Meteorología. v.10, n. 1, p. 33-38, 2003.

SOUZA, J. L. M.; JERSZURKI, D.; GOMES, E. S. Precipitação e evapotranspiração de referência prováveis na região de Ponta Grossa – PR. **Irriga**, v.19, n.2, p.279-291, 2014.
<http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n2p279>

PEREIRA, F. F. S.; PAI, E. D.; MONTENEGRO, R. J. V.; SÁNCHEZ ROMÁN, R. M.; GONZÁLEZ, A. M. G. O.; ESCOBEDO, J. F. Estudo comparativo da evapotranspiração de referência entre localidades no estado de São Paulo e na província de Habana. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p.395-408, maio - junho, 2016.

YUAN, W.; LIU, S.; LIANG, S.; TAN, Z.; LIU, H.; YOUNG, C. Estimation of evapotranspiration and water balance with uncertainty over the Yukon River Basin. **Water Resources Management**, v.26, p.2147-2157, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-012-0007-3>

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v.36, n.6, p.2644-2659, 2015.

XU, C. Y.; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, D.; SINGH, V. P. Analysis of Spatial Distribution and Temporal Trend of Reference Evapotranspiration and Pan Evaporation in Changjiang (Yangtze River) Catchment. **Journal of Hydrology**, v. 327, n. 1–2, p. 81–93, 2006.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.029>