

# Modelagem dos níveis máximos de radiação solar global de Piracicaba-SP

Carlos José dos Reis <sup>1 3</sup>

Luiz Alberto Beijo <sup>2</sup>

## 1 Introdução

A ocorrência de eventos climáticos extremos, que ocasionam impactos ambientais, sociais e econômicos, tem chamado à atenção da sociedade e da comunidade científica, principalmente pela gravidade dos consequentes danos. O estudo da ocorrência de níveis máximos ou mínimos de variáveis hidrometeorológicas como precipitação pluvial, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar, entre outras, é um instrumento importante na tomada de decisões em atividades como a saúde pública e a agropecuária.

A radiação solar global, definida como toda radiação eletromagnética proveniente do Sol que atinge o planeta, é importante na maioria dos processos biológicos e fisiológicos dos vegetais, sendo responsável direto na disposição da energia para os processos solo-planta-atmosfera (QUERINO et al., 2006). Dessa forma, o conhecimento do comportamento da radiação solar global é relevante para a compreensão da disponibilidade de energia em diversos processos naturais. Uma maneira de se estudar o comportamento dessa variável climática é utilizando-se distribuições de probabilidade.

A metodologia de análise estatística de uma variável climática consiste no estudo de seus valores já observados ao longo do tempo. Esses registros históricos podem ser ajustados a uma distribuição de probabilidade, que será utilizada para calcular as probabilidades ou níveis de retorno de alguns eventos de interesse. A validade dos resultados é baseado, em particular, nos pressupostos clássicos de independência e estacionariedade das observações. Estes pressupostos são condições essenciais para que uma distribuição possa ser ajustada a um conjunto de dados (KHALIQ et al., 2006).

No entanto, no contexto das alterações climáticas é possível que estes pressupostos não mais sejam satisfeitos e os resultados obtidos pela análise estatística tradicional (estacionária) tornam-se duvidosos. Nessa circunstância, é importante a utilização de métodos que incorporem a dependência e não estacionariedade dos valores extremos das variáveis hidrometeorológicas. Dessa forma, a análise não estacionária surge como uma alternativa em relação a análise estacionária convencional, haja visto que nesse tipo de análise os parâmetros da distribuição, e

---

<sup>1</sup>ICEX - UNIFAL-MG. e-mail: [carlosjreis17@yahoo.com.br](mailto:carlosjreis17@yahoo.com.br)

<sup>3</sup>Agradecimentos a FAPEMIG pelo apoio financeiro.

<sup>2</sup>ICEX - UNIFAL-MG.

talvez a própria distribuição, variarem com o tempo, e conseqüentemente as estimativas da probabilidade de excedência (KHALIQ et al., 2006; SILVA; ANJOS e LIMA, 2011).

Diante da necessidade do conhecimento dos níveis máximos de radiação solar global para, por exemplo, o planejamento de ações em atividades agropecuárias na região de Piracicaba-SP, objetivou-se neste trabalho modelar os níveis máximos de radiação solar global nos meses de outubro, novembro e dezembro nesse município. Para modelar as séries históricas utilizou-se a distribuição Generalizada de Valores Extremos (*GEV*), considerando possíveis tendências dos dados.

## 2 Material e métodos

Os dados de radiação solar global, em cal/cm.d, foram obtidas a partir dos registros históricos da Estação Convencional do Posto Agrometeorológico da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP). As observações correspondem às medições do período de 1984 a 2013. O clima de Piracicaba, conforme a classificação de Köppen é do tipo Cwa: tropical de altitude, com chuvas de verão e seca no inverno, sendo os meses de junho, julho e agosto mais secos. A temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a do mês mais frio não é inferior a 16°C (GHIBERTO; MORAES, 2011).

Foram extraídas os níveis máximos de radiação solar global dos meses de outubro, novembro e dezembro em cada ano do estudo, constituindo assim as séries mensais. Cada amostra possui 30 observações, satisfazendo dessa maneira as recomendações da *World Meteorological Organization (WMO)*, que preconiza que o número mínimo de anos de dados climáticos para análise seja de 30 anos (BADDOUR et al., 2007).

A independência e a aleatoriedade das séries de dados foi verificada aplicando-se respectivamente os testes de Durbin Watson e Runs test. O nível de significância de 5% foi adotado em ambos os testes. A distribuição *GEV* foi ajustada aos dados, sendo as estimativas dos seus parâmetros obtidas pelo método de máxima verossimilhança. A qualidade dos ajustes foi verificada pela análise dos gráficos Quantil-Quantil (QQ-plot) e Probabilidade-Probabilidade (PP-plot).

Conhecidas as estimativas dos parâmetros, de acordo com Naghettini e Pinto (2007), os níveis de retorno em um tempo médio  $T$  (em anos), podem ser calculados pela distribuição *GEV* por:

$$z(T) = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left\{ 1 - \left[ -\ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^{-\xi} \right\} \quad (1)$$

Nos casos em que a pressuposição de independência dos dados não é satisfeita e o conjunto de dados apresenta uma tendência temporal linear, a distribuição *GEV* pode ser utilizada para modelar esse conjunto de dados com tendência, pela substituição de seu parâmetro de posição estacionário (constante ao longo do tempo) pelo parâmetro de posição não estacionário, que é

dado por:

$$\mu(t) = \mu_0 + \mu_1 t \quad (2)$$

em que  $\mu(t)$  é o parâmetro de posição que está em função da covariável tempo ( $t$ ).

Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R Development Core Team (2012). O pacote *evd* foi utilizado para o estudo da série de dados, por possuir funções específicas na análise de valores extremos.

### 3 Resultados e discussão

Pela análise dos resultados dos testes de Durbin Watson e Runs test (TABELA 1), observou-se respectivamente nos meses de outubro, novembro e dezembro que os dados apresentaram dependência e ausência de aleatoriedade ( $p < 0,05$ ). Para incorporar a possível tendência dos dados foi necessário a substituição do parâmetro de posição estacionário da distribuição *GEV* pelo parâmetro de posição não estacionário.

Tabela 1: Resultados dos testes de independência, de aleatoriedade, e do diagnóstico de desempenho das distribuições Generalizada de Valores Extremos estacionária e não estacionária (*GEV*, *GEV<sub>T</sub>*), em relação aos dados de radiação solar global de Piracicaba-SP.

Mês	Independência	Aleatoriedade	Deviance	
	Durbin Watson	Runs test	<i>GEV<sub>T</sub></i>	<i>GEV</i>
Outubro	0,0091	0,0258	318,30*	322,25
Novembro	0,0055	0,0096	312,30*	319,46
Dezembro	0,0064	<0,0001	322,49*	326,96

\* Estatisticamente diferente da *deviance* do modelo *GEV*, ao nível de 5% de significância

Os resultados do diagnóstico de desempenho das distribuições Generalizada de Valores Extremos estacionária (*GEV*) e não estacionária (*GEV<sub>T</sub>*) indicam que a distribuição *GEV<sub>T</sub>* apresentou melhor desempenho nos três meses, por ter apresentado menor *deviance* (TABELA 1).

As estimativas do parâmetro  $\hat{\mu}_1$  indicaram um aumento no parâmetro de posição de 0,92, 1,01 e 0,97 nos meses de outubro, novembro e dezembro, respectivamente, em cada ano (TABELA 2). Em termos práticos, esses resultados indicam um aumento nos níveis máximos de radiação solar global nesses meses em Piracicaba-SP, ao longo dos anos do estudo.

Tabela 2: Estimativas dos parâmetros  $\mu_0$ ,  $\mu_1$ ,  $\sigma$  e  $\xi$ , obtidas pelo método da máxima verossimilhança.

Mês	Estimativas			
	$\hat{\mu}_0$	$\hat{\mu}_1$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\xi}$
Outubro	598,53	91,86	51,88	-0,38
Novembro	651,34	101,25	51,53	-0,58
Dezembro	648,96	97,38	59,95	-0,52

Pela análise dos gráficos QQ-plot e PP-plot verificou-se que a distribuição não estacionária  $GEV_T$  ajustou-se aos dados. Uma vez que a distribuição  $GEV_T$  ajustou-se aos dados, essa distribuição pode ser utilizada para a obtenção dos níveis de retorno máximos de radiação solar global em Piracicaba-SP. Na Tabela 3 são apresentadas os níveis máximos de radiação solar global esperados para os tempos de retorno de 5, 10, 15, 20, 25 e 30 anos.

Tabela 3: Níveis de retorno máximos de radiação solar global para os meses de outubro, novembro e dezembro em Piracicaba-SP, obtidos via distribuição não estacionária  $GEV_T$ .

Mês	Tempos de retorno (em anos)					
	5	10	15	20	25	30
Outubro	657,69	676,70	685,25	690,45	694,08	696,80
Novembro	702,89	715,97	721,19	724,14	726,10	727,51
Dezembro	711,36	728,40	735,45	739,53	742,28	744,28

Escolhendo o mês de outubro e o tempo de retorno de 15 anos, uma interpretação das informações da Tabela 3 pode ser feita do seguinte modo: espera-se que o nível de retorno de 685,25 cal/cm.d seja igualado ou excedido em pelo menos um dia do mês de outubro em Piracicaba-SP, em um tempo médio de 15 anos.

Em todos os tempos de retorno verificou-se que os maiores valores de radiação solar global máxima são esperados para o mês de dezembro (TABELA 3). Cargnelutti Filho et al. (2004) observaram em 22 municípios do Estado do Rio Grande do Sul que os maiores valores de radiação solar global média aconteceram nos meses de janeiro e dezembro, havendo uma diminuição nos meses de junho e julho. Segundo os autores, esse fato ocorreu em razão do solstício de verão que acontece na segunda quinzena de dezembro, com redução gradativa da radiação solar e o aumento da declinação solar até o solstício de inverno, na segunda quinzena de junho.

## 4 Conclusões

As séries de valores máximos de radiação solar global dos meses de outubro, novembro e dezembro apresentaram dependência e ausência de aleatoriedade entre suas observações. A distribuição não estacionária  $GEV_T$  foi mais adequada para modelar os dados, indicando uma tendência positiva nos meses estudados, ou seja, um aumento dos níveis máximos de radiação solar global nesses meses em Piracicaba-SP ao longo dos anos do estudo.

## Referências

- [1] BADDOUR, O.; KONTONGOMDE, H.; TREWIN, B. The role of climatological normals in a changing climate. Geneva: World Meteorological Organization, 2007. Disponível em: < <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/WCDMPNo61.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2012.
- [2] CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J. K. Ajustes de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.39, n.12, p.1157-1166, dez. 2004.
- [3] ESALQ/USP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. **Base de Dados Meteorológicos**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/posto.html>>. Acesso em: 20 jan. 2014.
- [4] GHIBERTO, P. J.; MORAES, S. O. Comparação de métodos de determinação da Condutividade hidráulica em um latossolo Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1177-1188, 2011.
- [5] KHALIQ, M. N.; OUARDA, T. B. M. J.; ONDO, J. C.; GACHON, P.; BOBÉE, B. (2006). Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 534-552, 2006.
- [6] NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia Estatística**. Belo horizonte: CRPM, 2007. 552p.
- [7] QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.21, n.3a, p.42-49, 2006.
- [8] SILVA, C. S. B.; ANJOS, S. L.; LIMA, C. H. R. 2011. Análise e Modelagem Estatística Não-Estacionária de Cheias Sazonais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. **Anais...** Maceió, 2011, p.1-13.