

X. CLIMATOLOGIA

OCORRÊNCIA MENSAL DE RAJADAS MÁXIMAS DIÁRIAS DE VENTO EM CAMPINAS (SP) ⁽¹⁾

MARCELO BENTO PAES DE CAMARGO ⁽²⁾, ALTINO ALDO ORTOLANI ⁽²⁾
e HERMANO VAZ DE ARRUDA ⁽³⁾

RESUMO

Verificou-se o ajuste dos dados mensais de frequência de rajadas máximas diárias de vento, referentes a uma série de vinte anos para Campinas (SP), aos modelos probabilísticos de distribuição "gama" e "normal". As frequências observadas e as estimadas pela distribuição normal apresentaram melhor ajuste que aquelas pela distribuição gama para todos os meses. A partir da distribuição normal, quantificaram-se as probabilidades mensais de ocorrência de rajadas máximas diárias. Setembro a novembro apresentaram maiores probabilidades de rajadas acima de 20, 30 e 40 km/h, e maio e junho, as menores. Para velocidades de 10 e 50 km/h, não se observou sazonalidade pronunciada.

Termos de indexação: probabilidade, rajadas diárias de vento, distribuição normal, distribuição gama.

ABSTRACT

MONTHLY OCCURRENCE OF MAXIMUM DAILY WIND VELOCITY FOR CAMPINAS, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

The gamma and normal distribution models were tested to estimate the probabilities of maximum daily wind velocity occurrence, by month, concerning 20 years of data for Campinas. The normal distribution model showed the best agreement between observed and estimated probabilities for all months. Results allowed to identify and quantify months with different levels of probability. September through November presented the highest values, May and June presented the lowest values of probability, specially concerning velocities of 20, 30, and 40 km/h. It was not observed pronounced variation among the months for velocities of 10 and 50 km/h.

Index terms: probability, daily wind velocity, normal distribution, gamma distribution.

⁽¹⁾ Trabalho recebido para publicação em 17 de setembro de 1993 e aceito em 3 de janeiro de 1994.

⁽²⁾ Seção de Climatologia Agrícola, Instituto Agrônomo (IAC), Caixa Postal 28, 13001-970 Campinas (SP). Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Pesquisador Científico aposentado, IAC.

1. INTRODUÇÃO

Estimativas de ocorrência de rajadas máximas de vento são importantes para muitos ramos da atividade humana, como em cálculos de estrutura em obras de engenharia e na racionalização da agricultura. Neste caso, a avaliação pode ser feita mediante escalas contendo probabilidades de ocorrência de rajadas máximas de vento, as quais podem ser relacionadas à resistência da espécie vegetal e do cultivar, ao manejo de cultivo, ao uso de quebra-ventos etc. Segundo Le Chapellier (1981), é possível prever com bastante acerto a frequência das rajadas e seus efeitos, a partir de dados históricos da região.

Para estimativa das probabilidades, alguns trabalhos utilizaram modelo empírico, com base na frequência relativa. Soares & Dias (1986), analisando a ocorrência de velocidade média de vento em diferentes horas para a cidade de São Paulo, verificaram que janeiro, dezembro e novembro apresentaram as maiores velocidades, principalmente entre as 10 e as 16 horas. Pinto (1973) desenvolveu nomogramas que permitiram estimar os períodos de recorrência de rajadas máximas anuais para períodos futuros, em algumas localidades paulistas. Vendramini (1986) estudou a distribuição probabilística de velocidades médias do vento, para avaliação do potencial energético na região de Ataliba Leonel (SP). Para os três anos estudados, encontraram variações consideráveis de ano para ano. Variações significativas das velocidades médias e das instantâneas máximas de vento, em função da época do ano e dos fatores latitude e altitude no Estado de São Paulo, foram também encontradas por Ortolani (1986).

O problema de utilizar modelo empírico, segundo Soares & Dias (1986), é que o tamanho da amostra pode ser insuficiente para a obtenção de valores estáveis de probabilidade. A utilização de modelos probabilísticos adequados, como "normal", "gama" e "extremos", permite resultados mais precisos e mais consistentes, mesmo em séries históricas curtas (Thom, 1966).

Os objetivos deste trabalho foram: (a) verificar o ajustamento dos dados mensais de frequência de rajadas máximas diárias de vento aos modelos probabilísticos de distribuição "gama" e "normal"; (b) determinar, para a região de Campinas (SP), as probabilidades mensais de rajadas máximas diárias de vento, utilizando o modelo probabilístico que apresentar o melhor ajustamento.

2. MATERIAL E MÉTODO

Foram utilizados anemogramas diários do período 1966-85 (vinte anos) do posto agrometeorológico de Campinas (SP), localizado no Centro Experimental do Instituto Agrônomico, a 22°53'S de latitude, 47°03'W de longitude e 674 m de altitude.

O anemógrafo utilizado foi o Berlin-Fuess-Steglitz, modelo 82a, com registro contínuo da velocidade do vento na altura padronizada de 10 m da superfície. Os diagramas diários foram cotados pelo processo usual, anotando-se a velocidade máxima da rajada ocorrida no dia, independente da direção. Analisou-se, assim, a velocidade máxima, não como grandeza vetorial e, sim, escalar.

Considerando-se os vinte anos estudados e dependendo do mês em questão, cada amostra mensal foi constituída por 564, 600 ou 620 observações diárias de rajada máxima de vento, nas quais foram registradas distribuições de frequência desses valores. Para sua obtenção, testaram-se os modelos de probabilidade "gama" e "normal".

A função de densidade de probabilidade utilizada para a distribuição normal é definida, segundo Abramowitz & Stegun (1972), por:

$$f(x) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi}\sigma)} \exp \left[-0,5 \left(x - \frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \right]$$

onde:

σ : desvio padrão da distribuição, referente às rajadas máximas diárias de cada mês; μ : média das

rajadas máximas diárias, de cada mês, e x , a rajada máxima diária a ser considerada ($-x$).

A função de distribuição das probabilidades acumuladas $F(x)$ é dada por:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx.$$

A probabilidade de que a rajada máxima diária seja maior ou igual a uma velocidade x é dada por:

$$P(X \geq x) = 1 - F(x)$$

Utilizaram-se para os cálculos as probabilidades tabeladas para a curva normal padrão, com média 0 e variância 1. Para isso, recorreu-se à transformação de variáveis:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Z tem distribuição $N(0;1)$. Quaisquer que sejam os valores de μ e σ , as probabilidades podem ser calculadas com o emprego de tabelas da normal padrão:

$$P(X \geq x) = P - F(Z \geq z) = 1 - F(z)$$

A função de densidade da distribuição gama é expressa, segundo Arruda & Pinto (1980), por:

$$f(x) = \frac{x^{\gamma-1} \exp\left[-\frac{x}{\beta}\right]}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)}$$

onde:

γ e β : parâmetros da equação e x : rajada máxima diária a ser considerada ($x > 0$).

A probabilidade (P) de que a rajada máxima diária (V) seja maior ou igual a uma velocidade v , é dada por:

$$P(V \geq v) = \frac{1}{\beta^{\gamma} \Gamma(\gamma)} \int_v^{\infty} x^{(\gamma-1)} \exp\left[-\frac{x}{\beta}\right] dx$$

Os parâmetros γ e β da distribuição gama foram estimados pelo processo de maxiverossimilhança (Thom, 1968):

$$\gamma = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4}{3} A}}{4 A}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\gamma}$$

$$A = \ln \bar{x} - \frac{\sum \ln \bar{x}}{N}$$

As probabilidades foram calculadas a partir das tabelas de Pearson (1965), as quais fornecem valores de $F(x)$ para diferentes valores de γ e β .

Para a verificação do ajuste mensal entre as freqüências acumuladas observadas e as estimadas pelos dois modelos, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,05$), segundo Sokal & Rohlf (1969).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Primeiramente, foi feita uma análise da variância dos dados segundo o modelo completamente casualizado, com 12 meses e 20 repetições (anos) - Quadro 1. Verificou-se, pelo teste F, serem altamente significativas as diferenças entre as médias dos meses das rajadas máximas diárias.

Quadro 1. Análise da variância, segundo o modelo completamente casualizado, para $K = 12$ meses e $n = 20$ repetições (anos), dos dados referentes às rajadas máximas diárias de vento

Fontes de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Entre meses	11	2.658,53	241,68	2,07**
Dentro dos meses	228	26.682,84	117,03	—
Total	239	29.341,37	—	—

Para os cálculos das probabilidades de ocorrência de rajadas de vento maiores ou iguais a determinados valores (10 até 50 km/h), nos diferentes meses, pela distribuição normal, eram necessários, além das médias, os respectivos desvios padrões, conforme descrito, através do valor da

variável reduzida Z. Foi utilizado o teste de Bartlett, segundo Snedecor & Cochran (1956), para verificar a homogeneidade das variâncias obtidas em cada mês. Esse teste apresentou um valor de $\chi^2 = 0,24$, para 11 graus de liberdade, não significativo, que leva a admitir a homogeneidade das variâncias. Assim, foi utilizada para os cálculos de Z uma variância comum, de 117,03.

Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov - Quadro 2 - constatou-se um bom ajuste entre as freqüências acumuladas observadas e as estimadas pela "distribuição normal" para todos os meses. Já a "distribuição gama" mostrou diferenças significativas nos ajustes para abril, maio e outubro, indicando bom ajuste para os demais meses do ano.

A figura 1 mostra as freqüências relativas acumuladas, observadas e estimadas, a partir da "distribuição normal" de rajadas máximas diárias para maio e outubro, na qual se pode observar um ajuste muito bom para ambos os meses. O melhor ajuste das rajadas máximas ao modelo normal mostra que essa variável tem distribuição simétrica em relação à média.

Quadro 2. Valores mensais das maiores diferenças encontradas de freqüência relativa acumulada, observada e teórica, de rajadas máximas de vento, a partir das distribuições normal (DN) e gama (DG)

Mês	DN	DG
Janeiro	0,014	0,030
Fevereiro	0,051	0,026
Março	0,026	0,026
Abril	0,024	0,062*
Maio	0,043	0,059*
Junho	0,028	0,042
Julho	0,054	0,025
Agosto	0,023	0,041
Setembro	0,023	0,036
Outubro	0,024	0,056*
Novembro	0,019	0,047
Dezembro	0,028	0,029

* Significativo a 5% - Teste de Kolmogorov-Smirnov.

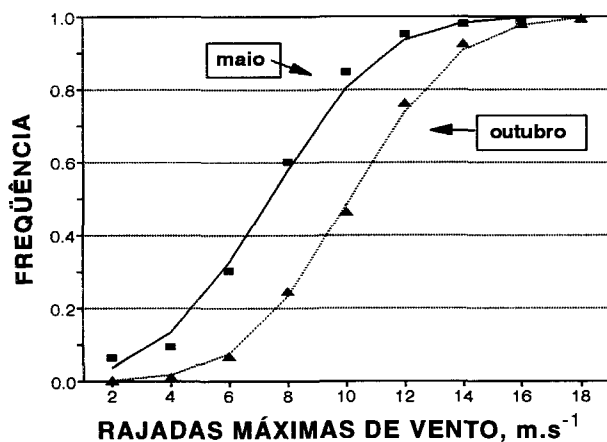


Figura 1. Freqüências relativas acumuladas, observadas e estimadas, pelo modelo "distribuição normal" de rajadas máximas diárias de vento para maio e outubro.

Tendo em vista o melhor ajuste à distribuição normal, esta foi adotada para os cálculos das probabilidades mensais de rajadas máximas diárias de vento. Uma vez calculados os parâmetros da distribuição, média e desvio padrão, referentes às rajadas máximas diárias de cada mês, foi possível estimar as probabilidades de rajadas máximas diárias nos diferentes meses do ano, a partir de diversos níveis, utilizando a expressão:

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sqrt{117,03}}$$

onde:

x: valor considerado para cálculo da probabilidade de $P(X \geq x)$ e \bar{x} : média dos meses.

O quadro 3 apresenta as probabilidades de ocorrência mensal de rajadas máximas diárias de vento acima de 10, 20, 30, 40 e 50 km/h. A tendência estacional dos níveis de probabilidade dessas máximas diárias é coincidente à observada para os valores médios de rajadas máximas mensais, com máximos de setembro-novembro e mínimos em maio-junho. Essa tendência estacional é semelhante aos resultados de Ortolani (1986), considerando a velocidade média mensal de vento.

Quadro 3. Probabilidades de ocorrência mensal de rajadas máximas diárias de vento, acima de 10, 20, 30, 40 e 50 km/h, calculadas a partir da distribuição normal, e valores médios mensais de rajadas máximas, desvio padrão (S^2) e coeficiente de variação (CV)

Meses	Velocidades					Média	S^2	CV
	>10	>20	>30	>40	>50			
	km/h							%
Jan.	98,5	89,6	63,3	28,1	6,7	33,7	117,8	32,2
Fev.	97,9	87,1	58,7	24,5	5,6	32,4	121,4	33,9
M ^{ço}	98,1	87,1	57,1	22,1	4,3	31,9	111,1	33,1
Abril	96,6	81,9	49,2	17,4	3,1	29,8	117,9	36,4
Mai	93,2	71,6	36,3	10,2	1,4	26,2	118,4	41,5
Jun.	93,8	72,9	37,8	10,7	1,5	26,6	116,2	40,5
Jul.	96,2	80,2	47,2	16,1	2,7	29,2	117,1	37,0
Ag.	98,1	87,1	57,9	23,0	4,7	32,1	114,5	33,3
Set.	98,6	91,0	68,8	35,9	11,3	35,7	138,1	32,9
Out.	99,4	93,9	72,2	35,6	9,2	36,1	108,4	28,8
Nov.	99,5	94,5	72,9	35,6	8,9	36,2	103,4	28,1
Dez.	98,7	90,8	65,9	30,9	7,9	34,5	120,1	31,7

As diferenças dos níveis probabilísticos sazonais são mais acentuadas para velocidades fixas de 20, 30 e 40 km/h, com valores máximos no trimestre setembro-novembro e mínimos durante maio-junho. As probabilidades de rajadas diárias superiores a 30 km/h para setembro, outubro e novembro ficaram em torno de 70%, enquanto, para maio e junho, foram inferiores a 40%. Para velocidades de 10 e de 50 km/h, não se observou uma sazonalidade pronunciada. Para 10 km/h, situou-se entre 93 e 99% e para 50 km/h, entre 2 e 11% de probabilidade.

4. CONCLUSÕES

1. Os dados de rajadas máximas diárias de vento apresentaram melhor ajustamento à distribuição normal que à distribuição gama, podendo, pois, ser utilizada para estabelecimento das probabilidades de ocorrência de rajadas máximas diárias para qualquer mês do ano.

2. Setembro a novembro apresentaram as maiores probabilidades de ocorrência de rajadas máximas diárias, acima de 20, 30 e 40 km/h, e maio a junho, as menores. Para velocidades acima de 10 e de 50 km/h, não se observou sazonalidade pronunciada. Para 10 km/h, situou-se entre 93 e 99% e para 50 km/h, entre 2 e 11% de probabilidade.

3. A variação entre as médias mensais determinou os níveis de probabilidade citados, desde que os desvios padrões em cada mês foram estatisticamente iguais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMOWITZ, M. & STEGUN, I.A. *Handbook of mathematical functions*. 9.ed. New York, Dover, 1972. 1046p.

- ARRUDA, H.V. & PINTO, H.S. A simplified gamma probability model for analysis of the frequency distribution of rainfall in the region of Campinas, SP, Brazil. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, **22**:101-108, 1980.
- LE CHAPPELLIER, P. *Le vent, les éoliennes et l'habitat*. Paris, Eyrolles, 1981. 99p.
- ORTOLANI, A.A. Agroclimatologia e o cultivo da seringueira. In: *SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA DA SERINGUEIRA NO ESTADO DE SÃO PAULO*, 1., Piracicaba, 1986. *Trabalhos apresentados*. Campinas, Fundação Cargill, 1986. p.11-32.
- PEARSON, E.S. *Tables of the incomplete gamma function*. Cambridge, University of London, University College, 1965. 165p.
- PINTO, H.S. *Determinações dos intervalos de recorrência de rajadas máximas do vento no Estado de São Paulo*. Botucatu, 1973. 64p. Tese (Doutorado) - UNESP, 1973.
- SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical methods: applied to experiments in agriculture and biology*. 5.ed. Ames, Iowa State College Press, 1956. 534p.
- SOARES, J.R. & DIAS, M.A.F.S. Probabilidade de ocorrência de alguns eventos meteorológicos extremos na cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, **2**(1):67-75, 1986.
- SOKAL, R.R. & ROHLF, F.J. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. San Francisco, W.H. Freeman, 1969. 776p.
- THOM, H.C.S. *Some methods of climatological analysis*. Geneva, World Meteorological Organization, 1966. 53p. (WMO, 199; TP, 103; Technical note, 81)
- VENDRAMINI, E.Z. *Distribuição probabilística de velocidades do vento para avaliação do potencial energético eólico*. Botucatu, 1986. 110p. Tese (Doutorado) - FCA, UNESP, 1986