

BRAGANTIA

Boletim Científico do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo

Vol. 25

Campinas, junho de 1966

N.º 3

ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR NO ESTADO DE SÃO PAULO (1)

Dr. ADMAR CERVELLINI e Dr. ENÉAS SALATI, *engenheiros-agrônomo*s, *Cadeira de Física e Meteorologia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", e HERNANI GODOY, engenheiro-agrônomo, Seção de Climatologia Agrícola, Instituto Agronômico*

SINOPSE

Os autores analisam a distribuição da energia solar no Estado de São Paulo, área limitada pelas latitudes de 20°S a 25°S. É apresentada uma equação média para determinação da radiação na superfície, partindo de dados de insolação para as condições da referida área. Utilizou-se o método clássico da correlação entre dados de actinógrafo e heliógrafo.

1 — INTRODUÇÃO

A idéia da utilização dos dados de insolação para cálculos de radiação na superfície do globo, nasceu de Angström (1), seguindo-se a êle, entre outros pesquisadores, Kimball e Hand (4), Black e colaboradores (2) e Macris (5). As equações propostas tiveram em comum o processo de seu estabelecimento, isto é, cálculo de regressão linear, utilizando dados registrados por radiômetros e heliógrafos. A maior parte destas equações são indicadas para áreas bastante grandes, abrangendo variações de latitudes de algumas dezenas de graus.

Pelo presente trabalho é apresentada uma equação, estabelecida pelo método clássico de correlação entre dados de actinógrafo e heliógrafo de algumas cidades do Estado de São Paulo, sendo sua aplicabilidade restrita à área limitada pelas latitudes extremas do Estado, isto é, 20°S a 25°S.

Embora o número de dados disponíveis no momento seja bastante reduzido e existente somente para poucas localidades, determinamos a equação como válida para o planalto paulista. A validade da equação não foi, porém, testada para cidades do litoral, cujo

(1) Trabalho apresentado à XVII Reunião da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, realizada em Belo Horizonte, Minas Gerais, de 4 a 11 de julho de 1965. Recebido para publicação a 7 de outubro de 1965.

regime de insolação é bastante diverso, por não se dispor de registros de actinógrafos para essas cidades. Acredita-se, todavia, que, *a priori*, aquela equação possa ser utilizada também para essas regiões, uma vez que para seu estabelecimento levou-se em consideração unicamente a nebulosidade.

2 — CÁLCULO TEÓRICO DA RADIAÇÃO SOLAR

A radiação solar, Q_o , que atinge a área horizontal unitária no tópo da atmosfera no tempo t , foi estimada pela integração da expressão (Smithsonian Meteorological Tables — 1951):

$$\frac{dQ_o}{dt} = \frac{J_o}{R^2} (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos h) \quad (1)$$

onde,

$J_o = 1,94 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ (Constante Solar).

$R =$ raio vetor da Terra (distância do centro da Terra ao centro do sol, expressa em termos do comprimento do semi-eixo maior da órbita terrestre).

$\delta =$ declinação do sol.

$\varphi =$ latitude do observador.

$h =$ ângulo horário do sol.

A energia que chega, em média, durante um dia de determinado mês foi calculada integrando-se a equação acima, fazendo h variar do nascer ao pôr do sol e tomando φ , δ e R como constantes.

A equação final utilizada foi a seguinte:

$$I_o = \frac{60 J_o}{R^2} \sin \delta \sin \varphi (t_2 - t_1) + \frac{24}{\pi} \cos \delta \cos \varphi \sin \frac{\pi}{12} t_m \quad (2)$$

sendo,

t_1 e t_2 as horas de nascimento e ocaso do sol, respectivamente, e

$$t_m = \frac{t_2 - t_1}{2}$$

Considerando que o Estado de São Paulo abrange latitudes entre 20°S e 25°S, foram calculados os valores de Q_o para a latitude

média 22°30'S para se obter uma estimativa do valor teórico diário mensal. Os dados obtidos encontram-se no quadro 1, pelos quais se podem verificar as variações de Q_0 entre aquelas latitudes.

QUADRO 1. — Radiação solar, por centímetro quadrado e por minuto, que atinge a superfície horizontal no tópo da atmosfera no dia 15 de cada mês

Mês	$\varphi = -20^\circ$	$\varphi = -22^\circ30'$	$\varphi = -25^\circ$
Janeiro	994	1004	1013
Fevereiro	952	953	952
Março	870	859	846
Abril	748	726	701
Maió	635	606	576
Junho	571	539	507
Julho	586	555	523
Agosto	672	646	618
Setembro	792	774	755
Outubro	897	891	883
Novembro	968	973	977
Dezembro	996	1008	1018

3 — MATERIAL E MÉTODO

Os dados utilizados para os cálculos de regressão foram fornecidos pela Seção de Climatologia Agrícola, do Instituto Agrônômico de Campinas, sendo, os valores de insolação, obtidos com um heliógrafo, e os de radiação solar, com um actinógrafo Fuess.

Procurou-se estabelecer uma equação de regressão pelo método dos quadrados mínimos, que possibilitasse o cálculo da média diária da energia solar para cada mês (Q) em função da insolação n . O método geral é aquêlê mesmo utilizado por Angström (1), Kimball e Hand (4), Black e colaboradores (2) e Macris (5).

Os dados foram analisados procurando-se estimar os valores de a e b da seguinte expressão:

$$\frac{Q}{Q_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (3)$$

sendo,

Q = radiação que chega, em média, num dia de determinado mês, por cm^2 , numa superfície horizontal na superfície do solo.

Q_0 = radiação total do dia 15 de cada mês, tomado como representativo do mês, à latitude de 22°30' no tópo da atmosfera.

n = insolação diária média mensal.

N = número de horas de insolação possível, para o dia 15 de cada mês, tomado como representativo do mês.

A análise da regressão foi feita pelo método dos quadrados mínimos, e a significância foi testada com um teste F segundo Pimentel Gomes (3).

4 — RESULTADOS E CONCLUSÕES

Foram obtidas, pelo método indicado, as seguintes equações de regressão:

Campinas (médias de 8 anos):

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,23 + 0,56 \frac{n}{N} \quad (4)$$

Pindamonhangaba (médias de 9 anos):

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,028 + 0,51 \frac{n}{N} \quad (5)$$

Ribeirão Preto (médias de 5 anos):

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,13 + 0,73 \frac{n}{N} \quad (6)$$

Piracicaba (médias de 3 anos):

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,18 + 0,62 \frac{n}{N} \quad (7)$$

Monte Alegre do Sul (médias de 3 anos):

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,19 + 0,61 \frac{n}{N} \quad (8)$$

Mococa (médias de 2 anos):

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,40 + 0,41 \frac{N}{n} \quad (9)$$

QUADRO 2. — Valores de n/N (médias de 10 anos) para diversas cidades do Estado de São Paulo

Q	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Campinas	0,51	0,47	0,55	0,62	0,66	0,66	0,71	0,72	0,49	0,48	0,57	0,53
Tietê	0,56	0,47	0,59	0,59	0,58	0,63	0,66	0,65	0,54	0,54	0,57	0,54
Piracicaba	0,50	0,47	0,52	0,55	0,55	0,55	0,64	0,64	0,50	0,47	0,55	0,50
Bauru	0,54	0,50	0,58	0,66	0,67	0,71	0,74	0,71	0,58	0,53	0,61	0,56
Colina	0,53	0,51	0,63	0,66	0,74	0,77	0,81	0,77	0,62	0,57	0,62	0,56
São Paulo	0,44	0,37	0,42	0,47	0,48	0,52	0,55	0,57	0,36	0,36	0,42	0,43
Aracatuba	0,52	0,50	0,55	0,63	0,65	0,62	0,70	0,70	0,46	0,46	0,60	0,58
Ribeirão Preto	0,47	0,46	0,60	0,63	0,66	0,70	0,71	0,70	0,61	0,55	0,58	0,51
Jacarézingo	0,53	0,51	0,55	0,58	0,60	0,60	0,67	0,63	0,49	0,50	0,59	0,54
Barretos	0,48	0,47	0,55	0,62	0,69	0,69	0,78	0,71	0,48	0,48	0,57	0,52
Monte Alegre do Sul	0,48	0,45	0,53	0,60	0,62	0,66	0,68	0,70	0,55	0,49	0,57	0,52
Pindamonhangaba	0,48	0,42	0,49	0,54	0,54	0,63	0,63	0,59	0,48	0,46	0,46	0,44
Campos do Jordão	0,31	0,28	0,38	0,48	0,56	0,59	0,62	0,55	0,43	0,34	0,31	0,32
Iguape	0,46	0,39	0,46	0,45	0,44	0,39	0,41	0,35	0,23	0,28	0,38	0,46
Cananéia	0,39	0,33	0,33	0,36	0,40	0,38	0,40	0,31	0,24	0,27	0,39	0,39
Santos	0,42	0,38	0,45	0,47	0,46	0,48	0,48	0,47	0,28	0,29	0,38	0,41

QUADRO 3. — Valores médios de Q, em cal/cm²/dia, para diversas cidades do Estado de São Paulo

Q	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Campinas	533	484	476	430	373	332	358	420	402	458	550	546
Tietê	561	484	495	418	346	323	342	395	424	488	550	552
Piracicaba	527	484	460	402	336	299	336	391	406	453	539	529
Bauru	550	500	490	447	377	348	367	417	442	483	572	563
Colina	554	506	514	447	401	366	390	439	459	503	577	563
São Paulo	493	480	411	369	311	289	307	365	344	396	466	489
Araçatuba	538	500	476	434	370	320	355	413	388	447	566	576
Ribeirão Preto	510	478	500	435	373	344	358	413	455	494	556	535
Jacarézinho	554	506	476	414	353	314	345	387	402	468	560	552
Barretos	516	484	476	430	384	341	347	417	398	458	550	540
Monte Alegre do Sul	516	474	466	422	359	332	348	413	429	462	550	540
Pindamonhangaba	516	456	446	398	332	323	332	372	398	447	488	495
Campos do Jordão	419	381	393	373	339	310	329	358	398	387	406	425
Iguape (*)	504	440	431	361	297	249	264	284	287	356	445	506
Cananéia (*)	464	408	368	323	284	246	260	269	292	351	449	466
Santos (*)	481	435	427	369	304	277	285	328	310	361	445	478

(*) Cidades que não foram utilizadas para o cálculo da média.

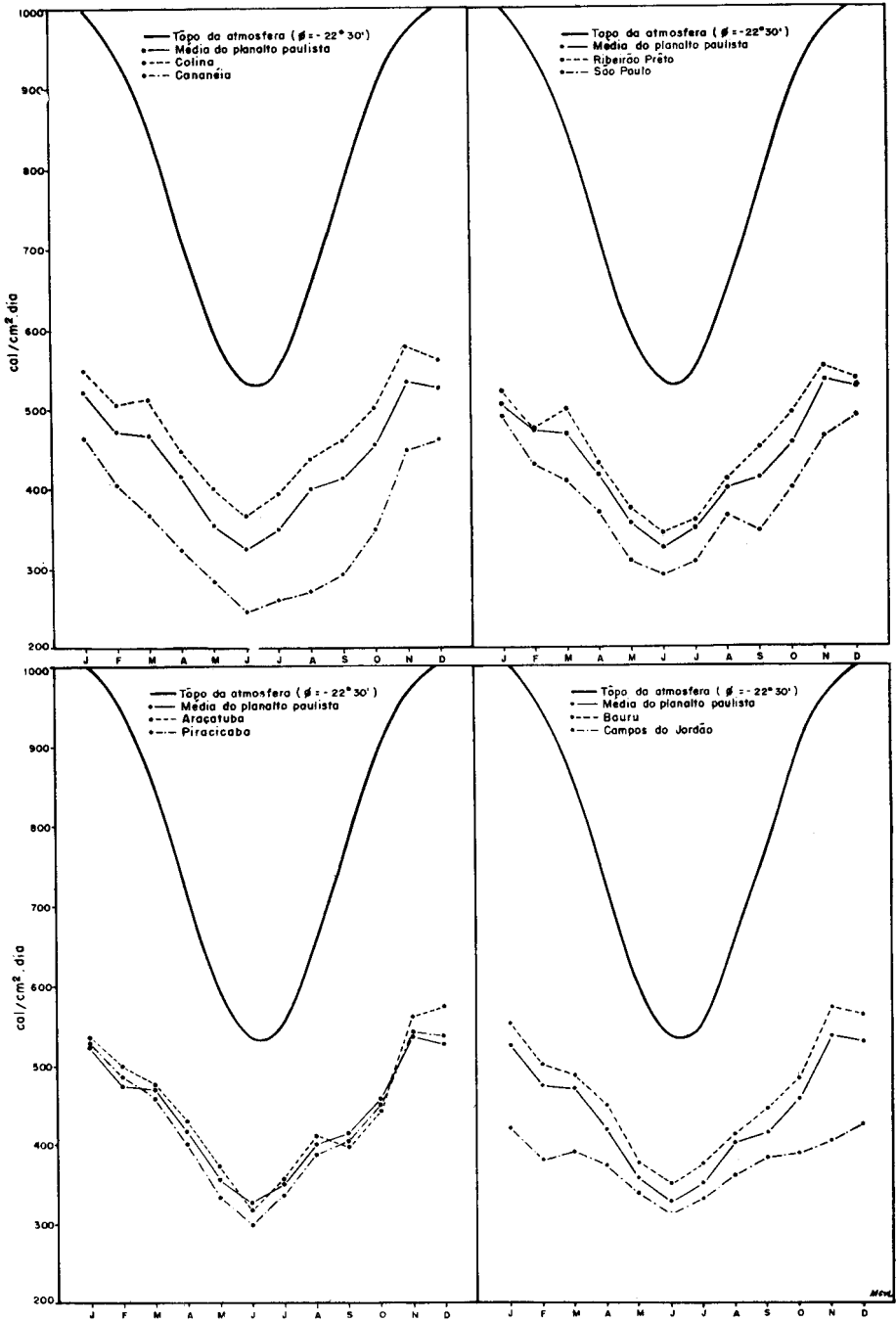


FIGURA 1. — Curvas anuais da radiação solar no tôpo da atmosfera à latitude de 22°30'S e calculadas a partir da insolação à superfície em diferentes localidades do planalto paulista.

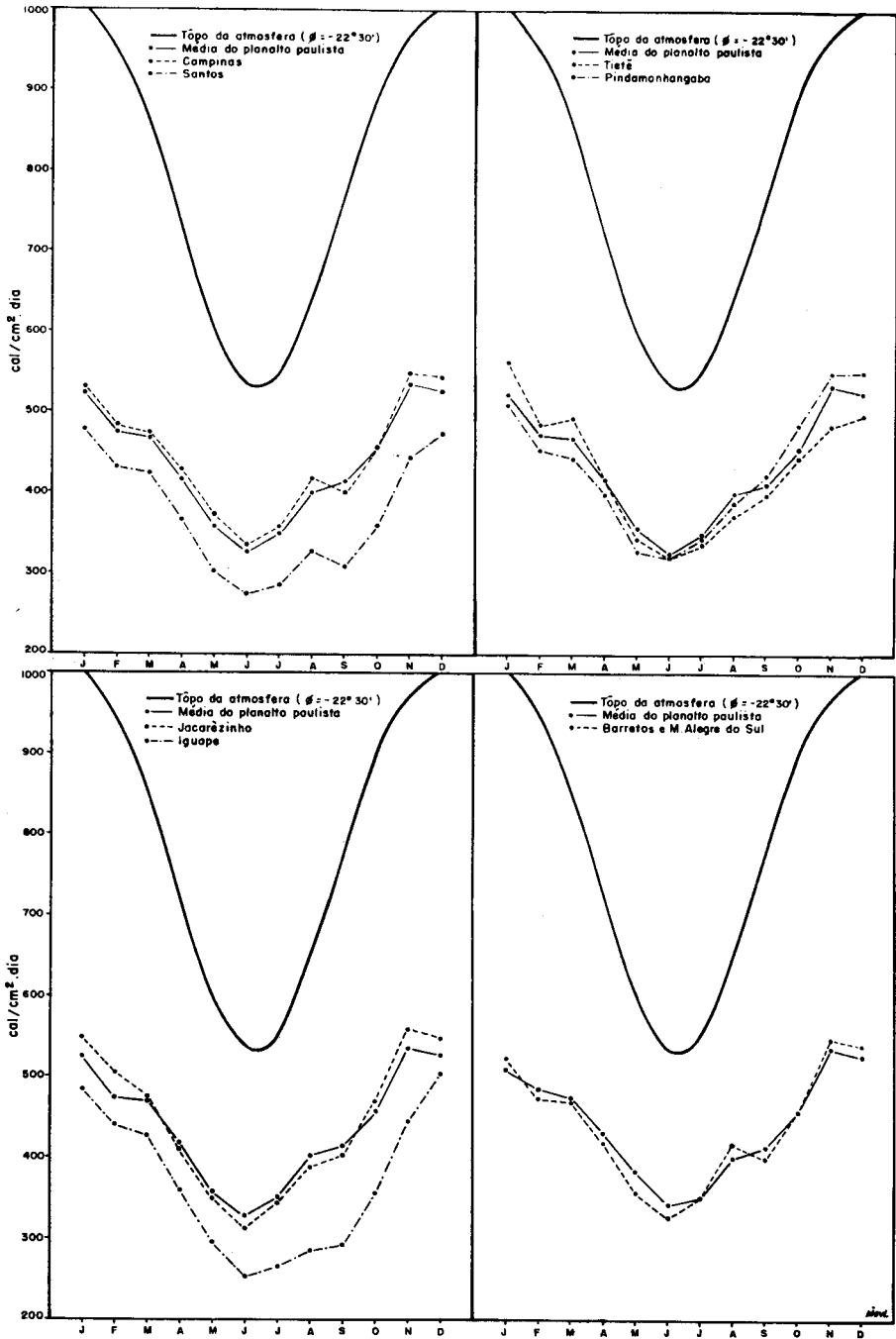


FIGURA 2. — Curvas anuais da radiação solar no tópo da atmosfera à latitude de $22^{\circ}30'S$ e calculadas a partir da insolação à superfície em diferentes localidades do planalto paulista.

Procurando verificar se as equações acima poderiam ser reunidas numa só equação média, foram comparados, pelo teste de Tukey (3), os coeficientes a e b das equações de regressão para as cidades de Mococa e Ribeirão Preto, que apresentavam maior discordância. Os valores obtidos, corrigindo-se os graus de liberdade segundo Satterthwaite (6), demonstraram que as equações poderiam ser reunidas, obtendo-se, assim, a seguinte equação média para o Estado de São Paulo:

$$\frac{Q}{Q_0} = 0,24 + 0,58 \frac{n}{N} \quad (10)$$

Nas figuras 1 e 2 estão representados os valores para as diversas cidades comparados com a média.

Os dados obtidos de Q para as diversas cidades do Estado de São Paulo encontram-se no quadro 2, sendo calculados com os valores médios de 10 anos de n/N das respectivas localidades (quadro 3).

AN ESTIMATIVE ON THE DISTRIBUTION OF SOLAR ENERGY IN THE STATE OF SÃO PAULO

SUMMARY

The authors analyse the distribution of solar energy in the State of São Paulo, an area which is limited within 20° and 25° south.

An average equation is presented for the determination of radiation on the surface, starting from insolation data for the conditions of the mentioned area. For this purpose the classic method was utilized of correlation between data from actinograph and heliograph.

LITERATURA CITADA

1. ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. Journal of Royal Met. Soc. 50:121-126. 1924.
2. BLACK, J. N., BONYTHON, C. W. & PRESCOTT, J. A. Solar radiation and the duration of sunshine. Quarterly J. Royal Met. Soc. 86(344): 231-235. 1954.
3. GOMES, F. PIMENTEL. Curso de Estatística Experimental. Publicação do Instituto de Genética da ESALQ-USP. 1954.
4. KIMBALL, H. H. & HAND, I. V. Biological effects of radiation. New York, Ed. B. M. Duggar — McGraw-Hill Book Co.. 1936.
5. MACRIS, G. J. Solar energy and sunshine hours at Athens, Greece, Monthly Weather Review, 87:29-32. 1959.
6. SATTERTHWAIT, F. E. An approximate distribution of estimates of variance components. Biom. Bull. 2:110-114. 1946.