

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL DIÁRIA EM LONDRINA À PARTIR DA INSOLAÇÃO¹

JOSÉ GOMES² e JESUS MARDEN DOS SANTOS³

RESUMO - Foi estabelecida uma equação linear de regressão entre os totais diários de radiação solar global e a insolação para Londrina, PR. (23°23'S) da forma:

$$K \downarrow = Q_0 a + b \frac{n}{N}$$

onde,

$K \downarrow$ = radiação solar global diária recebida em uma superfície ao nível do solo (cal/cm². dia).

Q_0 = radiação solar global diária recebida em uma superfície na ausência de atmosfera (cal/cm². dia).

n = insolação observada diária (h/dia).

N = insolação máxima diária (h/dia).

Os parâmetros a e b determinados estatisticamente foram 0,31 e 0,45, respectivamente.

Termos para indexação: radiação solar, radiação, energia solar.

INTRODUÇÃO

Os modelos de estimativas têm sido desenvolvidos pela necessidade de se aproveitar séries longas de observação da insolação para estudos de previsão da radiação solar, da evapotranspiração, assim como estudos da interação entre os elementos de clima e a radiação solar.

As estimativas da radiação solar global diária, além de servir a esses fins, tem sua importância calculada nos estudos de fontes de energia para as máquinas bioconversoras, aquecedores, destiladores, secadores ou qualquer outra máquina capaz de aproveitar a energia solar (gerada pelo sol).

Os trabalhos de estimativas da radiação solar global, a partir dos valores observados de insolação, têm demonstrado que o objetivo principal é auxiliar a montagem de séries ou estimar dados "perdidos" em séries já montadas. Com estes objetivos, BLACK et al. (1954) trabalharam os dados de 32 estações meteorológicas que se encontravam localizadas entre as latitudes de 6°3'S até 64°8'N. Em cada estação foram montados 384 pares referentes

a totais mensais da radiação e insolação, sendo o método estatístico de cálculo o de correlação linear simples. Os coeficientes da regressão linear para cada estação variaram em função da latitude, sendo os valores de a da equação $y = a + bx$ inversamente proporcionais à latitude e b quase independentes, com variação aleatória. BLACK et al. (1954) discutem a variação de a como uma função da nebulosidade que se mostrou bastante acentuada nas altas latitudes, afetando o coeficiente linear da reta.

Por sua vez SMITH (1959), procurando suprir falta de séries de dados de radiação solar global no oeste da Índia, desenvolveu uma equação para estimativa de totais diários de radiação solar global à partir da insolação. O autor encontrou alta correlação e como trabalhou na latitude de 10°38'N, alerta para a dependência que têm os coeficientes da equação em relação à latitude, citando autores que, com metodologia semelhante, encontraram coeficientes bastante diferentes. Outros exemplos podem ser citados: SELIRIO et al. (1971) e DURAND (1974), que desenvolveram equações para estimativas de totais diários da radiação solar global, sendo os coeficientes encontrados válidos estritamente para a região estudada.

Para considerar a interferência do fator nebulosidade, característica estacional, alguns autores como CERVellini et al. (1966) e TUBELIS et al. (1976) desenvolveram equações para totais men-

¹ Aceito para publicação em 15 de agosto de 1978.

² Eng.º Agr.º, M.Sc., Instituto Agronômico do Paraná - IAPAR, Caixa Postal 1331 - 86.100 - Londrina, PR.

³ Eng.º Agr.º, Doutor, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Caixa Postal 96, 13.400 - Piracicaba, SP.

sais e diários, com coeficientes específicos abrangendo cada mês do ano.

O que foi desenvolvido neste trabalho é uma equação para totais diários, procurando esclarecer sobre seus problemas de ajuste em função da duração do dia, visto que o local em estudo está em região tropical, onde a insolação varia por dependência quase exclusiva da nebulosidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Estudou-se a correlação entre insolação diária e total diário de radiação solar global numa série contínua de 42 pares. Os valores de insolação (n) foram obtidos pela cotação de fitas de heliógrafo, modelo Campbell-Stokes (Fuess), em hora/dia, instalado na Estação Agrometeorológica da Fundação Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), Londrina ($23^{\circ} 23' S$). Os valores de radiação ($K \downarrow$) foram obtidos pela integração horária de curvas diárias registradas num actinógrafo bimetálico, modelo Robitsch (Fuess), rotação semanal, instalado na mesma estação, sendo esta a primeira série de valores registrados neste aparelho.

A seqüência adotada para os estudos de correlação foi a seguinte: 1. Cálculo da razão de insolação, definida por n/N onde N representa a duração do período diurno - valores obtidos por interpolação nas tabelas de SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES (1951); 2. Cálculo da razão de radiação, definida por $K \downarrow / Q_0$ representa a radiação diária em ausência da atmosfera - valores obtidos por interpolação nas tabelas de SALATI et al. (1967).

No teste, que seguiu o método preconizado na literatura, correlacionou-se a razão de radiação ($K \downarrow / Q_0$) com a razão de insolação (n/N). Foi feito um teste de ajuste para os valores estimados a partir da regressão obtida aos reais (observados).

RESULTADOS

Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 1 e Tabela 1

Os valores estudados apresentaram alto coeficiente de correlação, o que confirma a tendência

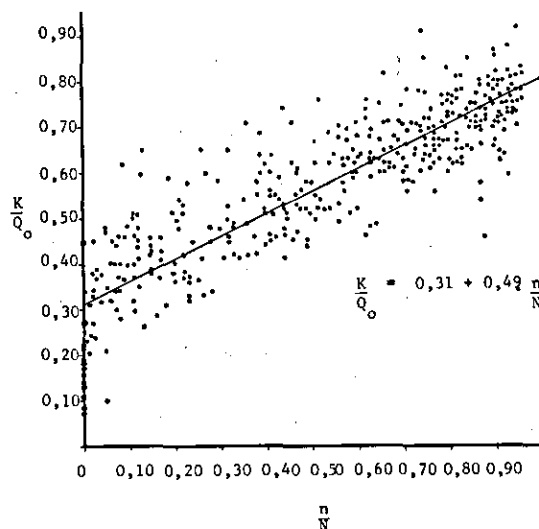


FIG. 1. Relações entre radiação solar diária e percentagem de brilho solar possível em Londrina - PR.

dos valores obtidos por outros pesquisadores apresentados na Tabela 2.

O valor de a esclarece que, em Londrina, apenas 31% da radiação que atinge o topo da atmosfera chega ao solo, em média, em dias totalmente nublados.

Os testes de ajuste mostraram que a equação é aceitável, uma vez que os desvios foram inferiores a 10%, quando a insolação (n) observada era superior a seis horas, entre 10 e 20% para n e uma a seis horas e próximo a 50% para valores inferiores a uma hora. Estas variações estão associadas aos erros de cotação de diagramas referentes a dias nublados e alertam para a estimativa de valores extremos.

CONCLUSÕES

Baseando-se nos valores apresentados e discutidos, podemos concluir que a equação $K \downarrow = Q_0 (0,31 + 0,49 n/N)$ pode ser usada para estimativa de totais diários de radiação, com restrições para valores muito baixos de insolação, em região compreendida por um círculo de 150 km de raio, conforme os critérios de representatividade da Estação na qual foram coletados os dados.

TABELA 1. Valores da razão de insolação e razão de radiação para Londrina.

$\frac{n}{N}$	$\frac{K\downarrow}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{K\downarrow}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{K\downarrow}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{K\downarrow}{Q_0}$
0,297	0,575	0,939	0,744	0,803	0,759	0,205	0,382
0,810	0,754	0,928	0,591	0,666	0,606	0,363	0,422
0,959	0,760	0,944	0,747	0,196	0,399	0,133	0,256
0,083	0,457	0,925	0,751	0,000	0,130	0,228	0,360
0,149	0,436	0,924	0,713	0,000	0,266	0,620	0,717
0,233	0,332	0,630	0,684	0,050	0,347	0,909	0,633
0,205	0,536	0,601	0,518	0,389	0,639	0,916	0,643
0,168	0,414	0,765	0,646	0,152	0,421	0,773	0,615
0,663	0,649	0,918	0,718	0,118	0,481	0,647	0,601
0,869	0,743	0,907	0,716	0,058	0,401	0,171	0,366
0,887	0,745	0,896	0,711	0,008	0,227	0,443	0,516
0,906	0,726	0,904	0,672	0,150	0,385	0,667	0,627
0,925	0,749	0,904	0,752	0,391	0,597	0,596	0,595
0,926	0,726	0,903	0,655	0,824	0,756	0,712	0,685
0,936	0,747	0,767	0,673	0,782	0,630	0,911	0,793
0,943	0,814	0,270	0,596	0,764	0,722	0,947	0,338
0,943	0,773	0,324	0,505	0,315	0,534	0,949	0,923
0,943	0,737	0,746	0,660	0,787	0,745	0,952	0,807
0,925	0,741	0,745	0,644	0,115	0,442	0,000	0,216
0,757	0,699	0,501	0,579	0,725	0,642	0,145	0,384
0,943	0,726	0,000	0,189	0,633	0,592	0,773	0,697
0,934	0,734	0,831	0,629	0,106	0,499	0,940	0,809
0,130	0,652	0,000	0,131	0,000	0,125	0,954	0,728
0,065	0,446	0,000	0,085	0,678	0,679	0,945	0,768
0,000	0,187	0,106	0,321	0,939	0,786	0,928	0,742
0,429	0,585	0,906	0,785	0,595	0,634	0,873	0,692
0,000	0,142	0,931	0,780	0,698	0,600	0,766	0,657
0,616	0,740	0,876	0,744	0,739	0,784	0,410	0,449
0,093	0,623	0,838	0,662	0,908	0,773	0,772	0,559
0,922	0,719	0,860	0,494	0,469	0,466	0,446	0,497
0,409	0,556	0,579	0,699	0,016	0,327	0,113	0,514
0,195	0,505	0,882	0,727	0,920	0,765	0,407	0,552
0,111	0,401	0,871	0,709	0,691	0,665	0,338	0,422
0,825	0,653	0,870	0,715	0,000	0,222	0,398	0,510
0,788	0,707	0,869	0,701	0,377	0,547	0,120	0,455
0,500	0,576	0,850	0,714	0,857	0,747	0,899	0,822
0,964	0,782	0,320	0,459	0,917	0,743	0,958	0,745
0,963	0,825	0,821	0,602	0,923	0,803	0,928	0,770
0,962	0,817	0,820	0,665	0,922	0,798	0,829	0,648
0,922	0,747	0,775	0,662	0,896	0,705	0,022	0,378
0,940	0,700	0,795	0,753	0,427	0,584	0,350	0,536
0,462	0,622	0,745	0,705	0,711	0,613	0,259	0,411
0,417	0,514	0,904	0,777	0,403	0,524	0,519	0,532
0,342	0,411	0,786	0,776	0,761	0,637	0,048	0,099
0,074	0,443	0,878	0,460	0,436	0,484	0,048	0,213
0,067	0,298	0,878	0,764	0,714	0,560	0,000	0,162
0,781	0,625	0,887	0,794	0,522	0,564	0,565	0,585
0,698	0,581	0,915	0,804	0,713	0,580	0,492	0,524
0,474	0,608	0,925	0,833	0,746	0,629	0,586	0,594
0,444	0,533	0,898	0,798	0,762	0,664	0,850	0,705

TABELA 1. Continuação

$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$
0,844	0,658	0,748	0,724	0,804	0,631	0,657	0,649
0,362	0,484	0,832	0,781	0,561	0,529	0,000	0,182
0,014	0,244	0,861	0,768	0,689	0,644	0,828	0,719
0,228	0,571	0,889	0,811	0,112	0,296	0,707	0,660
0,642	0,625	0,682	0,612	0,625	0,585	0,436	0,413
0,472	0,561	0,084	0,275	0,000	0,190	0,831	0,811
0,870	0,538	0,626	0,625	0,261	0,370	0,276	0,335
0,590	0,600	0,803	0,720	0,624	0,462	0,000	0,106
0,634	0,479	0,579	0,628	0,903	0,860	0,181	0,312
0,066	0,403	0,869	0,781	0,910	0,772	0,637	0,490
0,000	0,216	0,887	0,759	0,919	0,758	0,887	0,782
0,811	0,621	0,485	0,578	0,890	0,797	0,901	0,778
0,833	0,617	0,504	0,509	0,899	0,788	0,830	0,765
0,921	0,747	0,841	0,742	0,899	0,779	0,789	0,757
0,383	0,461	0,867	0,701	0,825	0,747	0,773	0,745
0,383	0,575	0,857	0,720	0,565	0,487	0,062	0,318
0,029	0,395	0,757	0,615	0,000	0,069	0,785	0,671
0,412	0,600	0,648	0,630	0,471	0,607	0,000	0,165
0,088	0,371	0,368	0,415	0,961	0,869	0,460	0,461
0,125	0,410	0,215	0,512	0,931	0,824	0,438	0,458
0,331	0,478	0,116	0,346	0,930	0,796	0,601	0,618
0,051	0,456	0,509	0,549	0,909	0,822	0,467	0,528
0,877	0,720	0,768	0,682	0,899	0,765	0,229	0,373
0,937	0,781	0,857	0,706	0,888	0,774	0,510	0,619
0,509	0,672	0,882	0,720	0,164	0,292	0,487	0,450
0,000	0,168	0,863	0,700	0,776	0,666	0,081	0,343
0,000	0,185	0,871	0,729	0,774	0,654	0,583	0,509
0,111	0,370	0,797	0,734	0,282	0,476	0,494	0,445
0,334	0,494	0,840	0,716	0,818	0,682	0,671	0,653
0,167	0,358	0,723	0,580	0,825	0,659	0,396	0,435
0,819	0,811	0,792	0,704	0,833	0,637	0,745	0,745
0,931	0,868	0,800	0,669	0,868	0,718	0,863	0,701
0,878	0,815	0,606	0,718	0,769	0,692	0,069	0,341
0,856	0,724	0,561	0,703	0,731	0,715	0,892	0,731
0,442	0,554	0,091	0,377	0,593	0,650	0,420	0,467
0,309	0,410	0,045	0,383	0,333	0,489	0,922	0,691
0,169	0,434	0,259	0,334	0,808	0,759	0,607	0,643
0,427	0,537	0,595	0,677	0,703	0,752	0,917	0,744
0,412	0,458	0,811	0,768	0,859	0,753	0,919	0,743
0,221	0,380	0,229	0,322	0,566	0,634	0,168	0,460
0,000	0,344	0,092	0,464	0,451	0,507	0,868	0,568
0,737	0,598	0,629	0,740	0,403	0,616	0,905	0,710
0,796	0,672	0,053	0,479	0,585	0,674	0,756	0,623
0,508	0,502	0,238	0,453	0,115	0,510	0,633	0,625
0,626	0,640	0,901	0,870	0,745	0,914	0,786	0,676
0,147	0,465	0,765	0,743	0,099	0,482	0,698	0,634
0,332	0,416	0,874	0,786	0,224	0,422	0,914	0,646
0,436	0,465	0,906	0,766	0,658	0,708	0,853	0,654
0,177	0,451	0,846	0,799	0,425	0,625	0,792	0,642
0,385	0,691	0,458	0,710	0,727	0,653	0,198	0,356

TABELA 1. Continuação

$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$	$\frac{n}{N}$	$\frac{Kl}{Q_0}$
0,022	0,239	0,007	0,203	0,820	0,813	0,000	0,106
0,408	0,644	0,148	0,428	0,831	0,788	0,425	0,552
0,096	0,409	0,273	0,450	0,823	0,787	0,027	0,369
0,230	0,317	0,721	0,710	0,807	0,751	0,517	0,543
0,022	0,265	0,125	0,463	0,836	0,851	0,800	0,596
0,193	0,591	0,007	0,171	0,762	0,703	0,300	0,478
0,223	0,534	0,622	0,758	0,628	0,692	0,828	0,681
0,543	0,688	0,568	0,634	0,836	0,715	0,528	0,520
0,841	0,787	0,648	0,751	0,536	0,624	0,210	0,501
0,820	0,658	0,767	0,758	0,536	0,525	0,027	0,461
0,694	0,609	0,475	0,520	0,836	0,773	0,468	0,595
0,747	0,852	0,809	0,819	0,837	0,708	0,653	0,668
0,553	0,644	0,786	0,774	0,000	0,159	0,875	0,693
0,741	0,692	0,693	0,645	0,000	0,142	0,857	0,799
0,479	0,563	0,517	0,763	0,051	0,352	0,738	0,705
0,075	0,368	0,438	0,744	0,000	0,205	0,110	0,303
0,315	0,653	0,071	0,400	0,715	0,776	0,046	0,319
0,857	0,812	0,664	0,819	0,224	0,373	0,564	0,684
0,752	0,785	0,874	0,774	0,320	0,448	0,936	0,764
0,256	0,652	0,579	0,603	0,719	0,737	0,938	0,751
0,671	0,709	0,362	0,713	0,860	0,719	0,947	0,774
0,045	0,293	0,750	0,663	0,836	0,766	0,947	0,749
0,015	0,311	0,703	0,754	0,828	0,768	0,213	0,479

TABELA 2. Relação e identificação de trabalhos realizados por pesquisadores de agrometeorologia.

AUTORES	LOCAIS	ESTIMATIVA	a	b	R	r
GOMES E SANTOS	Londrina, Brasil	Diária	0,31	0,49	0,88	0,77
SELIRIO et al	Guelph, Canadá	Diária	0,57	0,23	0,96	0,92
BAIER e ROBERTSON	Edmonton e Ottawa, Canadá	Diária	0,62	0,25	0,96	0,92
SMITH	Trinidad, Oeste Índia	Diária	0,27	0,49	0,91	0,83
DURAND	Versailles, França	Diária	0,24	0,45	0,85	0,72

REFERÊNCIAS

- BLACK, J.N.; BONYTHON, C.W. & PRESCOTT, J.A. Solar radiation and the duration of sunshine. *Quart. J. Roy Met. Soc.*, 80(344):231-5, 1954.
- CERVELINI, A.; SALATI, E. & GODOY, H. Estimativa da distribuição da energia solar no Estado de São Paulo Bragantia, Campinas, 25:31-9, 1966.
- DURAND, R. Estimation du rayonnement global a partir de la durée d'insolation. *Ann. Agron.*, 25(6):779-95, 1974.
- SALATI, E.; CERVELLINI, A.; NOVA, N.A.V.; OMETTO, J.C.; SANTOS, J.M. & GODOY, C.R.M. Estimativa da radiação solar que atinge uma área horizontal unitária admitindo-se ausência da atmosfera. *B. téc. Serv. Meteorol.*, (6):1-60, 1967.

- SELIRIO, I.S.; BROWN, D.M. & KING, K.M. Estimation of net and solar radiation. *Can. J. Plant Sci.*, 51:35-9, 1971.
- SMITH, G.W. Solar radiation and the duration of sunshine Trinidad, West Indies. *Quart. J. Roy Met. Soc.*, 85(366):421-3, 1959.
- SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES, Washington. 6. ed., 1951.
- TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L.; FOLONI, L.L.; FISHER, V.A. & FRANCISCHINI, W. Estimativa da radiação solar global diária em Botucatu, SP, a partir da insolação diária. *Botucatu Cient. Ser. A.*, 26:53-60, 1976.

ABSTRACT - ESTIMATION OF GLOBAL SOLAR RADIATION FOR LONDRINA

Relationships between daily global solar radiation ($K \downarrow$) and solar radiation at the top of the atmosphere (Q_0), and duration of bright sunshine and daylength (n/N) were determined by regression analysis at Londrina, Paraná, Brazil. The data used were recorded at the Londrina, IAPAR-Climatological station. Results showed that during every season, $\frac{n}{N}$ alone can be used to estimate $\frac{K \downarrow}{Q_0}$ satisfactorily. The relationship derived for estimating $K \downarrow$ from duration of bright sunshine (n), $K \downarrow = Q_0 (0,31 + 0,49 \frac{n}{N})$, showed good agreement with findings of previous workers.

Index terms: solar radiation, radiation, solar energy, solar radiation - Londrina - PR - Brazil.