

# VALIDAÇÃO DOS MODELOS CIRCUNSOLAR, ISOTRÓPICO E ANISOTRÓPICO NA ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO DIFUSA HORÁRIA EM SUPERFÍCIE INCLINADA

Alexandre DAL PAI<sup>1</sup>, João Francisco ESCOBEDO<sup>2</sup>, Fábio Chakkour NUNES<sup>3</sup>

## Introdução

O estudo da radiação solar em superfícies inclinadas é de fundamental importância no mapeamento das quantidades energéticas disponíveis para sistemas de modelagem agrários, tais como adaptação de espécies vegetais, secagem de grãos, produção de biomassa e conversão energética. A complexidade da distribuição da radiação solar em terrenos irregulares causada pelas variações de inclinações em relação à incidência solar permite que estimativas da radiação solar para diferentes inclinações e orientações de superfície possam ser úteis em muitas aplicações de interesse agrônomo e ecológico.

A maioria das estações meteorológicas mede, de rotina, a radiação solar em superfície horizontal, o que inviabiliza seu uso em muitas aplicações que requerem informações para superfície inclinada (Iqbal, 1983). Nesse sentido, vários modelos estatísticos foram propostos para estimar a quantidade de radiação incidente na superfície inclinada em função de observações realizadas na superfície horizontal. Liu e Jordan (1961) propõem um modelo de estimativa baseado nas condições de isotropia da radiação, permitindo que as componentes difusa e direta no plano horizontal sejam correlacionadas com a radiação total no plano inclinado através de simples relações geométricas. Entretanto, tem sido mostrado que a radiação solar é anisotrópica em muitas situações devido a sua grande variabilidade e complexidade, e a afirmativa que a distribuição da radiação é isotrópica pode introduzir erros significativos no cálculo das estimativas em superfície inclinada (Kondratyev e Manolova, 1960). Hay e McKay (1985) propõem um modelo de estimativa para cobertura de céu aberto que leva em consideração os efeitos da anisotropia na estimativa da radiação difusa, mostrando bons resultados para cobertura de céu aberto e apresentando limitações para coberturas de céu parcialmente nublado e nublado.

O objetivo do trabalho é testar a validade dos modelos Circunsolar, Isotrópico (Liu e Jordan, 1961) e Anisotrópico (Hay e McKay, 1985) de estimativa da irradiação difusa horária em superfície inclinada para as estações primavera, verão, outono e inverno, cada uma apresentando condições diferenciadas de cobertura.

## Material e métodos

Os dados de irradiância global e difusa na superfície horizontal e difusa na superfície inclinada

utilizados nesse estudo foram medidos no Laboratório de Radiometria Solar (latitude 22,85° S, longitude 48,45° O, altitude 786 m), FCA/UNESP/Botucatu no período de março de 1998 a dezembro de 1999.

As irradiâncias global e difusa na superfície horizontal foram medidas por piranômetros Eppley modelo PSP, enquanto que a irradiância difusa na superfície inclinada por um piranômetro Eppley modelo STAR. As irradiâncias difusa foram medidas pelo método do anel de sombreamento e corrigidas por fatores isotrópicos de Melo e Escobedo (1994). Para a irradiância difusa inclinada, o sensor foi inclinado na mesma latitude local em relação a horizontal e orientado para o Equador.

A validação dos modelos Circunsolar, Isotrópico e Anisotrópico na estimativa da irradiação difusa inclinada horária foi realizada através dos indicadores estatísticos MBE e RMSE (Stone, 1993).

$$MBE = 100 \frac{\left( \sum_i^N (y_i - x_i) / N \right)}{\bar{X}}$$
$$RMSE = 100 \frac{\left( \sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2}}{\bar{X}}$$

onde  $y_i$  são os valores estimados,  $x_i$  os valores medidos,  $N$  o número de observações e  $\bar{X}$  é o valor médio medido. O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um indicativo que provê informação no desempenho de um modelo a longo prazo. Um valor positivo indica uma superestimação, enquanto que um valor negativo indica subestimação. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo. A raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo à curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. A desvantagem é que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude.

## Resultados e discussão

Os modelos Circunsolar, Isotrópico e Anisotrópico, utilizados na estimativa das irradiações difusa horária em superfície inclinada, foram testados numa base de dados para estações primavera, verão, outono e inverno. A tabela 1 mostra a validação através dos indicadores estatísticos MBE e RMSE obtidos da comparação entre a irradiação difusa inclinada estimada

<sup>1</sup> Doutorando do Curso Energia na Agricultura – FCA/UNESP/Botucatu. E-mail: [dalpai@fca.unesp.br](mailto:dalpai@fca.unesp.br)

<sup>2</sup> Dr. Prof. Departamento de Recursos Naturais, Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu. E-mail: [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br)

<sup>3</sup> Aluno do Curso de Graduação em Eng. Florestal da UNESP/Botucatu, Bolsista FAPESP

**Tabela 1.** Indicativos estatísticos MBE e RMSE obtidos da comparação entre a irradiação difusa inclinada horária medida e estimada pelos modelos Circunsolar, Isotrópico e Anisotrópico nas estações Primavera, Verão, Outono e Inverno.

Modelos	Primavera		Verão		Outono		Inverno	
	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE
Circunsolar	-12,34	16,92	-13,92	18,62	-17,92	35,22	-13,63	25,84
Isotrópico	-5,78	8,93	-6,24	9,45	-12,23	16,94	-12,25	16,72
Anisotrópico	-7,56	11,40	-7,61	11,12	-3,81	8,57	-3,74	7,42

pelos modelos Circunsolar, Isotrópico e Anisotrópico e a medida nas estações primavera, verão, outono e inverno.

O modelo Isotrópico apresentou melhores resultados para as estações primavera e verão, com os menores valores de MBE de  $-5,78\%$  e  $-6,24\%$  e RMSE de  $8,93\%$  e  $9,45\%$  respectivamente. Para as estações outono e inverno, o melhor ajuste foi verificado para o modelo Anisotrópico, com MBE de  $-3,81\%$  e  $-3,74\%$  e RMSE de  $8,57\%$  e  $7,42\%$ , respectivamente. O modelo Circunsolar apresentou o pior desempenho, com espalhamento em torno de  $17\%$  para primavera e verão e maiores que  $25\%$  para outono e inverno e subestimativas maiores que  $12\%$  para todas as estações do ano.

Esses resultados se devem aos diferentes valores de transmissividade atmosférica  $K_t$  (razão entre as irradiações global e extraterrestre) obtidos para cada uma das estações do ano. A figura 1 mostra os níveis de transmissividade atmosférica  $K_t$  horária para as estações primavera, verão, outono e inverno.

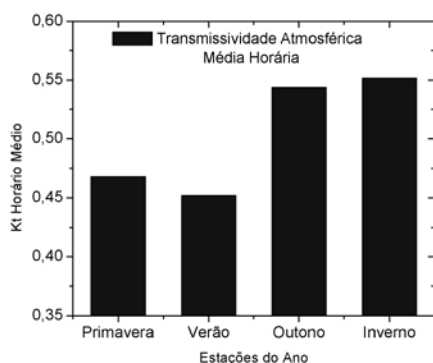


Figura 1. Transmissividade atmosférica  $K_t$  média horária para cada estação do ano.

Os diferentes valores da transmissividade atmosférica entre as estações são causados pelos níveis diferenciados de nebulosidade de cada período. A alta nebulosidade, característica das estações primavera e verão, eleva significativamente a atenuação da radiação solar, resultando em uma transmissividade atmosférica menor. Nessas condições, o aumento da nebulosidade favorece o fenômeno da isotropia da radiação, justificando a melhor adaptação do modelo Isotrópico para este período. Nas estações outono e inverno, período de baixa nebulosidade, os níveis de transmissividade atmosférica são maiores, ou seja, a ausência de nuvens favorece o aumento da radiação que chega na superfície e consequentemente aumenta-se o efeito da anisotropia, justificando os melhores resultados do modelo Anisotrópico para estes períodos.

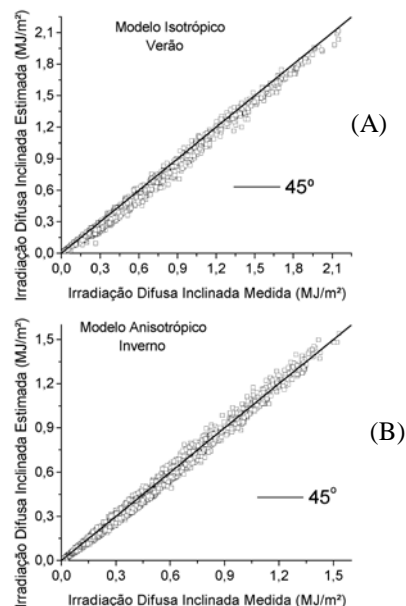


Figura 2. Validação dos modelos de estimativa da irradiação difusa inclinada. A) Modelo Isotrópico. B) Modelo Anisotrópico

## Conclusão

Os modelos de estimativa da irradiação difusa inclinada horária mostraram-se dependentes do tipo de cobertura de céu. Para as estações primavera e verão, período de alta nebulosidade e baixa transmissividade atmosférica, o modelo Isotrópico mostrou melhores resultados na estimativa da irradiação difusa inclinada horária. Nas estações outono e inverno, período de baixa nebulosidade e alta transmissividade atmosférica, o modelo Anisotrópico adaptou-se melhor ao tipo de cobertura, com estimativas mais precisas da irradiação difusa inclinada horária.

## Referências bibliográficas

- HAY, J. E.; McKAY, D. C. Estimating solar irradiance on inclined surfaces. A review and assessment of methodologies. **International Journal of Solar Energy**, v. 3, p. 203-240, 1985.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- KONDRATYEV, K. J.; MANOLOVA, M. P. The radiation balance of slopes. **Solar Energy**, v.4, n.1, p.14-19, 1960.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. Daily insolation on surfaces tilted toward the equator. **ASHRAE Journal**, v. 3, n. 10, p. 53-59, 1961.
- MELO, J. M. D., ESCOBEDO, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGIAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY, v. 1, 1994, p.47-52.
- STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v.51, n.4, p.289-291, 1993.