

## MODELO DE LINKE PARA A ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DIRETA NA INCIDÊNCIA

Eduardo Nardini Gomes – [engomes@fca.unesp.br](mailto:engomes@fca.unesp.br)

João Francisco Escobedo – [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br)

Departamento de Recursos Naturais/Ciência Ambiental – FCA/UNESP/Botucatu/SP/Brasil

Amauri Pereira de Oliveira – [apdolive@usp.br](mailto:apdolive@usp.br)

Jacyra Soares – [jacyra@usp.br](mailto:jacyra@usp.br)

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

### 1.1 Radiação Solar

**RESUMO.** O trabalho descreve o modelo de estimativa paramétrico por meio do fator de turbidez de Linke (TL). As radiações direta na incidência e global são do período de 1996 a 2003. O fator de turbidez de Linke variou mensalmente de 3,1 ( $\pm 0,7$ ) em maio a 3,9 ( $\pm 0,7$ ) em setembro, com média anual igual a 3,5. Na validação do modelo de estimativa mensal ocorreu sub/superestimativa (MBE), espalhamento (RMSE) e ajustamento (d), respectivamente, na ordem de: janeiro: -4,38%; 13,87%; 0,83; fevereiro: -1,0%; 14,18%; 0,86; março: -5,26%; 13,44%; 0,86; abril: 1,32%; 9,91%; 0,93; maio: -2,67%; 12,15%; 0,91; junho: 2,00%; 8,98%; 0,94; julho: -5,20%; 14,52%; 0,87; agosto: 2,53%; 9,93%; 0,92; setembro: -1,75%; 15,20%; 0,79; outubro: 11,39%; 14,66%; 0,77; novembro: -4,35%; 15,57%; 0,84; e dezembro: -5,84%; 12,88%; 0,86. Com base no desempenho dos três indicativos, os melhores resultados foram obtidos no período de céu aberto.

**Palavras-chave:** radiação solar, radiação direta, turbidez atmosférica, Linke.

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação solar direta na incidência possui aplicações nas áreas de conversão térmica e elétrica, na agronomia e engenharia florestal, onde a radiação fotossinteticamente ativa direta, juntamente com a difusa, são responsáveis por desencadear o fluxo de elétrons na fotossíntese, e nas demais áreas relacionadas com a biologia, ecologia, etc.

O conhecimento da radiação solar direta na incidência (0,285 a 4,0 $\mu$ m) se dá por meio de séries temporais, e de modelos de estimativa (estatístico ou paramétrico). Os modelos de estimativa são uma alternativa de grande importância, pois podem ser utilizados em projetos de simulação da radiação solar em outros locais de características climáticas similares.

Nos modelos de estimativa estatísticos, a radiação ou a variável meteorológica (normalmente a radiação global ou número de horas de brilho solar) é medida rotineiramente em redes meteorológicas, distribuídas nos países que fazem previsão de tempo. Nos modelos paramétricos necessita-se de informações mais detalhadas a respeito de diversos parâmetros atmosféricos, de menor disponibilidade na rede solarimétrica mundial, como por exemplo, a concentração de ozônio, aerossóis, gases, etc.

Um dos modelos paramétricos mais conhecidos para a estimativa da radiação solar direta na incidência é o modelo de Linke, o qual utiliza o fator de turbidez de Linke (TL), a espessura ótica de Rayleigh e a massa ótica. Esse modelo, uma vez calibrado ou parametrizado para o local, permite a estimativa por meio de informações meteorológicas e geográficas mínimas, sem necessidade de utilizar dados de radiação solar como parâmetro do modelo.

A literatura mostra que o TL depende das condições atmosféricas relacionadas à concentração de aerossóis e vapor de água. Portanto, a geração do modelo de Linke (equação de estimativa) depende inicialmente da obtenção do TL local, também conhecido como calibração do modelo.

Com as medidas de  $I_{sc}$  (é a constante solar no topo da atmosfera) e  $I_b$  (radiação direta na incidência), o cálculo da espessura ótica de Rayleigh, e da massa ótica, determina-se TL antecipadamente. Assim, o trabalho apresentou como objetivo a determinação do fator de turbidez de Linke (TL) para Botucatu e propor equações de estimativa para radiação direta na incidência usando o modelo paramétrico de Linke.

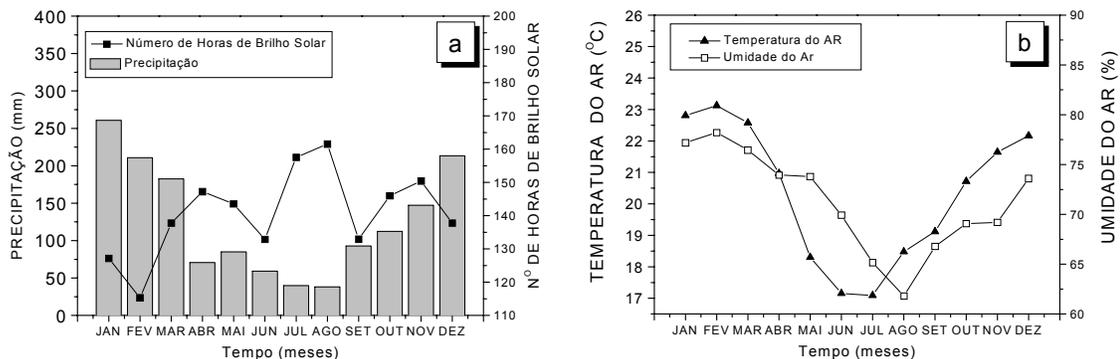
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1- Clima e Instrumentação

A Estação de Radiometria Solar, mostrada na Fig. 1, está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°O e altitude 786m), e monitora continuamente a radiação solar: global e direta na incidência, desde 1995.



**Figura 1** - Pireliômetro Eppley – Detector da radiação solar direta na incidência.



**Figura 2** - (a) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios anuais (35 anos); (b) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais (35 anos).

O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) possui 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) 10,6 horas em junho. Os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 161,56h e 115,28h respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. Os meses de fevereiro e julho são os mais quentes e frios do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2°C e 17,1°C. Fevereiro e agosto são

os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente. A Fig. 2 mostra dados das séries normais de precipitação, número de horas de brilho solar, temperatura e umidade local.

A base de dados das radiações solares direta na incidência e global compreende os anos de 1996 a 2003. A irradiância global ( $I_g$ ) é monitorada por um piranômetro Eppley PSP e a irradiância direta na incidência ( $I_b$ ) por um pireliômetro Eppley NIP acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. As características operacionais referentes ao fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão apresentados na Tab. 1:

**Tabela 1.** Características operacionais referentes ao fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta.

| <b>Radiação</b>               | <b>Direta</b>                         | <b>Global</b>                            |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Sensor - Marca</b>         | Pireliômetro - Eppley                 | Piranômetro - Eppley                     |
| <b>Fator de Calibração</b>    | 7,59 $\mu$ V/Wm <sup>-2</sup>         | 7,45 $\mu$ V/Wm <sup>-2</sup>            |
| <b>Range Espectral</b>        | 295-2800nm                            | 295-2800nm                               |
| <b>Tempo de resposta</b>      | 1s                                    | 1s                                       |
| <b>Linearidade</b>            | ±0,5%<br>(0 a 1400 W/m <sup>2</sup> ) | ±0,5%<br>(de 0 a 2800 W/m <sup>2</sup> ) |
| <b>Co-seno</b>                | --                                    | ±1% (0<Z<70°)<br>±3% (70°≤Z<80°)         |
| <b>Resposta à temperatura</b> | ±1% de -20°C a 40°C                   | ±1% de -20°C a 40°C                      |

Para aquisição dos dados utilizou-se um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias de 300 leituras ou 5 minutos.

## 2.2 Determinação do Fator de Turbidez de Linke (TL)

No modelo de Linke, o fator de turbidez ( $TL$ ) foi determinado a partir da expressão proposta por Li & Lam (2002):

$$TL = \ln(I_{SC} E_0 / I_b) / (\delta_R m_a) \tag{1}$$

onde:  $I_{SC}$  é a constante solar no topo da atmosfera, igual a 1367 W/m<sup>2</sup>;  $E_0$  é a excentricidade da Terra,  $m_a$  é massa ótica a pressão real,  $\delta_R$  é a espessura ótica de Rayleigh, e  $I_b$  é a irradiância direta na incidência.

O fator de turbidez (TL) representa o número de atmosferas secas e limpas (ASL) que são necessárias para produzir na radiação extraterrestre uma atenuação equivalente à atenuação de uma atmosfera real (Pedrós et al., 1999, e Hussain et al., 2000), ou seja, é um indicador da atenuação da radiação solar pelos constituintes atmosféricos: moléculas de ar, vapor de água, poeira e aerossóis. Deste modo, é considerado um importante parâmetro de predição da disponibilidade da radiação solar em dias sem nuvens.

A massa ótica à pressão real ( $m_a$ ) foi calculada pela expressão:  $m_a = m_r (p / p_0)$ , onde  $m$  é massa ótica relativa:

$$m = [\cos Z + 0,15(93,885 - Z)^{-1,253}]^{-1} \quad (2)$$

onde  $Z$  é o ângulo zenital em graus.

A relação  $p/p_0$  é a razão entre a pressão local à pressão padrão (ao nível do mar), e foi calculada em função da altitude ( $h$ ) em metros (Iqbal, 1983) pela expressão:

$$p/p_0 = \exp(-0,0001184 h) \quad (3)$$

A espessura ótica de Rayleigh ( $\delta_R$ ) foi calculada de acordo com Louche et al.(1986) e Kasten (1996) por meio da massa ótica relativa:

$$\delta_{RP} = (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4)^{-1} \quad (4)$$

Na seleção da irradiância direta adotou-se o critério de corte para céu aberto proposto por Karayel (1984), onde a irradiância direta na incidência é maior que  $200\text{W/m}^2$ , e a razão entre a irradiância difusa pela global é menor que  $1/3$ .

### 2.3 Indicativos Estatísticos

Os indicativos estatísticos  $MBE$  (Mean Bias Error),  $RMSE$  (Root Mean Square Error), e “ $d$ ” de Willmott utilizados na avaliação da performance das equações de estimativa foram:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P'_i| + |O'_i|)^2}$$

Onde:  $P_i$  representa os valores estimados,  $O_i$  os valores medidos,  $N$  o número de observações,  $|P'_i|$  o valor absoluto da diferença  $P_i - \bar{O}_i$ , onde  $\bar{O}_i$  representa a média de  $O_i$ , e  $|O'_i|$  representa o valor absoluto da diferença  $O_i - \bar{O}_i$ .

O indicativo  $MBE$  representa a média dos desvios e provê informações quanto à performance do modelo. O sinal negativo de  $MBE$  indicam subestimativa do modelo testado, e vice-versa. Segundo Stone (1993), quanto menor o valor absoluto de  $MBE$ , melhor é a performance do modelo testado. A desvantagem desse método é que uma superestimativa cancela uma subestimativa.

O  $RMSE$  é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa o valor real do erro produzido pelo modelo. As desvantagens do  $RMSE$  são que alguns erros de grande proporção na soma podem causar acréscimos significativos nos valores de  $RMSE$ , além de não diferenciar superestimativa de subestimativa. Em geral, quanto menor o valor obtido para  $RMSE$ , melhor a performance do modelo.

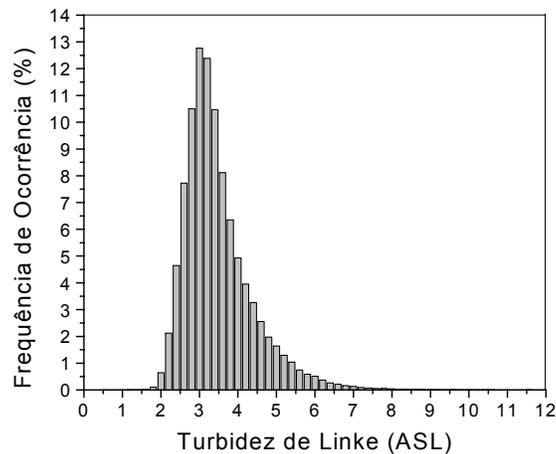
O índice de ajustamento “ $d$ ”, variando de 0 a 1, representa o total desajustamento ou ajustamento, respectivamente, entre a estimativa e a medida (Willmott 1981). A vantagem do indicativo “ $d$ ” é que descreve as variações proporcionais de duas variáveis, fazendo distinção entre

tipo e magnitude de possíveis covariâncias, diferentemente do índice de correlação ( $R$ ) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que não fazem essa distinção.

A utilização conjunta dos indicativos estatísticos  $MBE$ ,  $RMSE$  e índice de ajustamento “ $d$ ”, é a alternativa adequada para validação de modelos estatísticos, pois permite análise simultânea do desvio da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação às medidas. Alados et al. (2000) utilizaram o índice “ $d$ ” conjuntamente com o  $RMSE$  no teste de validação de seus modelos de radiação solar.

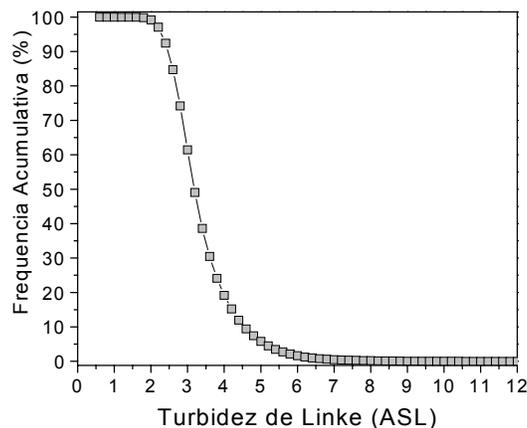
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para caracterizar a turbidez atmosférica de Botucatu, a Fig. 3 mostra a frequência de ocorrência percentual do fator de turbidez de Linke em atmosferas secas e limpas (ASL). O pico da distribuição ocorreu em 3ASL, representando cerca de 12,8% das observações. Menos de 1% das observações ocorreu quando TL foi superior a 5,5, e aproximadamente 99% das ocorrências de TL encontram-se no intervalo entre 2,0 e 6,0.



**Figura 3** - Frequência de Ocorrência do Fator de Turbidez de Linke.

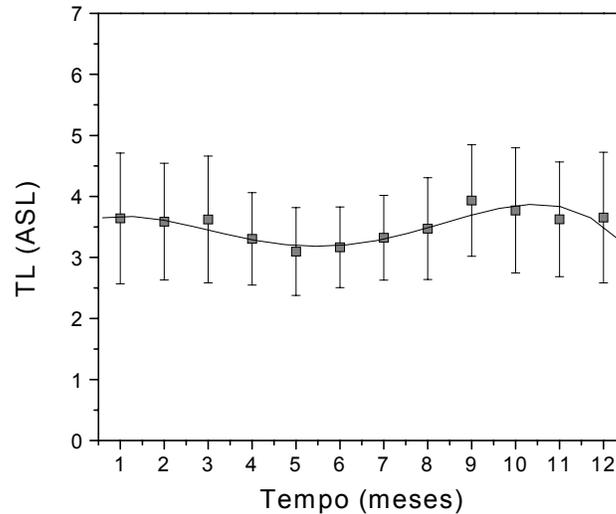
A frequência acumulativa de distribuição do fator de turbidez está apresentada na Fig. 4, e é um indicativo da porcentagem de observações instantâneas de dias de céu sem nuvens em que um dado nível de turbidez é atingido. Cerca de 90% das observações ocorreu abaixo de 2,5. O valor  $TL=3,2$  é o divisor da curva de frequência, pois 50% das observações encontram-se abaixo e acima desse valor.



**Figura 4** - Frequência Acumulativa de Distribuição do Fator de Turbidez de Linke.

Esses valores são diferentes daqueles observados por Li & Lam (2002) em Hong Kong, onde 50% das observações de TL encontram-se entre 4,3 e 5,3ASL, indicando que a cobertura atmosférica é de turbida a clara. A cobertura da atmosfera de Botucatu mostra ser bem mais limpa que a de Hong Kong.

A Fig. 5 mostra a evolução anual da média mensal de TL e o respectivo desvio. O valor de TL varia de mês a mês, com uma periodicidade característica, onde o maior valor de TL ocorre na primavera e verão (maior nebulosidade), e o menor no outono e inverno (menor nebulosidade). A Tab. 2 mostra os valores médios mensais de TL e respectivos desvios para os meses de janeiro a dezembro.



**Figura 5** - Fator de Turbidez de Linke médio mensal em função do tempo em meses.

Os meses de abril a agosto são os que apresentaram os menores valores de TL, devido à maior estabilidade atmosférica. Os demais meses apresentaram cobertura de céu mais instável, com maior ocorrência de entrada e saída de nuvens, resultando em maior turbidez, e conseqüentemente maiores desvios. Os valores médios mensais de TL são de  $3,1 \pm 0,7$  em maio a  $3,9 \pm 0,7$  em setembro, e na média geral TL foi igual a 3,5.

Esse resultado é aproximadamente igual ao obtido por Pedrós et al. (1999) em Valência, Espanha (TL entre 2,9 a 4,7); Hussain et al (2000) em 3 regiões Bangladesh (TL entre 3,46ASL a 4,83ASL, com média de 4,0ASL); e menor que os obtidos por Shaltout et al., (2001) em EL-Menia, região poluída do Egito (TL entre 2,01 e 5,86ASL); Li & Lam, (2002) em Hong Kong, (TL entre 3,7 a 5,26ASL) e Diabaté et al., (2003) na África (TL=3,5ASL).

Segundo Becker (2001), valores de TL entre 4 e 6ASL indicam que a região é úmida, valores acima de 6ASL, poluída e TL entre 1,8 a 2,7 áreas montanhosas.

A equação polinomial de quarta ordem que melhor se ajustou à variação de TL em função do tempo, em meses, é dada por:

$$TL = 3,52846 + 0,30153T - 0,18083T^2 + 0,02749T^3 - 0,00121T^4 \quad (5)$$

O desenvolvimento dessa equação busca uma facilitação no cálculo do Modelo de Linke, pois visa a determinação de TL em função de um parâmetro simples (o tempo em meses) em vez de utilizar parâmetros mais complexos da metodologia de Linke. A equação apresenta um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,8122, indicando que cerca de 81,2% da variação de TL é explicada pelo tempo (em meses).

A estimativa da radiação direta na incidência, calculada mensalmente (valores médios mensais de TL) pela expressão de Li & Lam (2002):  $I_b = 1367E_0 \exp(-TL \delta_R m_a)$  está apresentada na Tab. 2:

**Tabela 2.** Valores médios mensais de TL e respectivos desvios.

| Mês       | TL   | Desvios |
|-----------|------|---------|
| Janeiro   | 3,64 | 1,07    |
| Fevereiro | 3,59 | 0,96    |
| Março     | 3,62 | 1,04    |
| Abril     | 3,31 | 0,76    |
| Mai       | 3,10 | 0,72    |
| Junho     | 3,17 | 0,66    |
| Julho     | 3,32 | 0,69    |
| Agosto    | 3,47 | 0,83    |
| Setembro  | 3,93 | 0,91    |
| Outubro   | 3,77 | 1,03    |
| Novembro  | 3,63 | 0,94    |
| Dezembro  | 3,65 | 1,07    |

A comparação entre a estimativa e a medida instantânea da radiação direta na incidência para os meses é apresentada na Tab. 3:

**Tabela 3.** Resultados da Validação do Modelo de Linke nos meses do ano de 2002

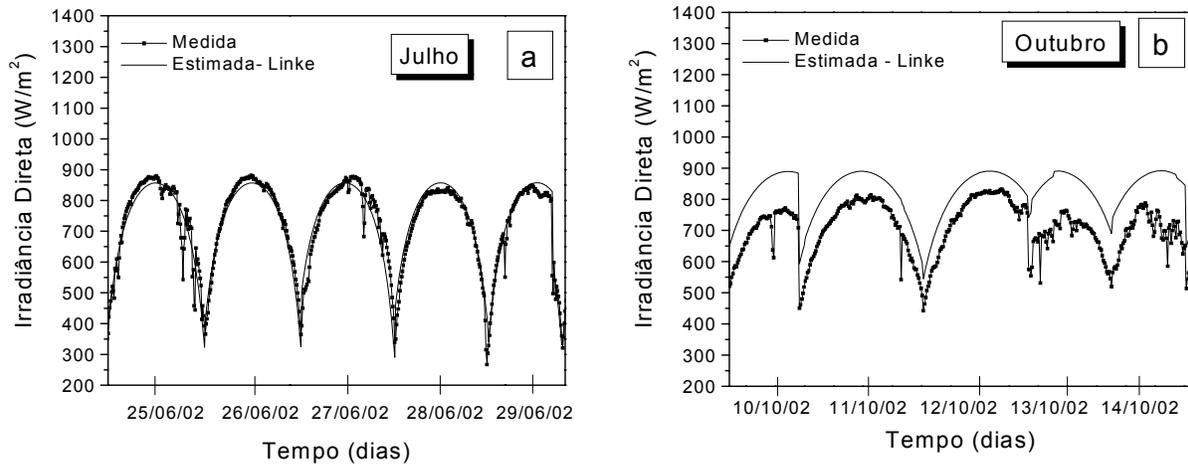
| Mês       | MBE(%) | RMSE(%) | "d"  |
|-----------|--------|---------|------|
| Janeiro   | -4,38  | 13,87   | 0,83 |
| Fevereiro | -1,00  | 14,18   | 0,86 |
| Março     | -5,26  | 13,44   | 0,86 |
| Abril     | 1,32   | 9,91    | 0,93 |
| Mai       | -2,67  | 12,15   | 0,91 |
| Junho     | 2,00   | 8,98    | 0,94 |
| Julho     | -5,20  | 14,52   | 0,87 |
| Agosto    | 2,53   | 9,93    | 0,92 |
| Setembro  | -1,75  | 15,20   | 0,79 |
| Outubro   | 11,39  | 14,66   | 0,77 |
| Novembro  | -4,35  | 15,57   | 0,84 |
| Dezembro  | -5,84  | 12,88   | 0,86 |

Em geral, o modelo de Linke subestimou as medidas nos meses de janeiro (4,38%), fevereiro (1,0%), março (5,26%), maio (2,67%), julho (5,20%), setembro (1,75%), novembro (4,35%) e dezembro (5,84%), e superestimou as medidas nos meses de abril (1,32%), junho (2,0%), agosto (2,53%) e outubro (11,39%).

Segundo RMSE, o espalhamento variou entre 8,98% (junho) e 15,57% (novembro). Os meses de abril (9,91%), junho (8,98%) e agosto (9,93%) apresentaram os menores espalhamentos e os meses de setembro (15,20%), outubro (14,66%) e novembro (15,57%) apresentaram os maiores espalhamentos.

O índice de ajustamento (“*d*”) foi considerado satisfatório a bom, pois foi superior a 0,83 na maioria dos meses, com exceção dos meses de setembro (0,79) e outubro (0,77), nos quais o índice foi inferior. Em geral, (*d*) variou entre 0,77 (outubro) e 0,94 (junho), com melhores resultados para os meses de abril a agosto.

A Fig. 6 mostra a comparação entre a radiação direta medida (base de dados de 2002) e estimada (modelo de Linke) em função do tempo em horas, para os dias 25/06/2002 a 29/06/2002 (Fig. 6a); e 10/10/2002 a 14/10/2002 (Fig. 6b). O modelo de Linke apresenta os melhores resultados na Fig. 6(a) e os piores resultados na Fig. 6(b).



**Figura 6** - Radiação Direta Medida e Estimada para os meses de (a) Julho (dias 25/06/02 a 29/0602); (b) Outubro (dias 10/10/02 a 14/10/02).

A Tab. 4 mostra os indicativos *MBE*, *RMSE* e “*d*” da comparação entre a irradiância medida e estimada para os dias 25 a 29 de julho de 2002 (fig. 6a), e de 10 a 14 de outubro de 2002 (Fig. 6b), respectivamente. A melhor estimativa do modelo de Linke forneceu os indicativos estatísticos, *MBE* inferior a 4,0%, *RMSE* inferior a 7,5% e ajustamento acima de 0,98. Para os resultados menos favoráveis, de 10 a 15 de outubro, os indicativos estatísticos foram: *MBE* de 10,0% até 23,0%, *RMSE* de 14,0% a 23,5%, e o ajustamento de 0,85 a 0,43

**Tabela 4.** Indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e *d* para os dias de 25/06/2002 a 29/06/2002

| Data     | <i>MBE</i> (%) | <i>RMSE</i> (%) | “ <i>d</i> ” |
|----------|----------------|-----------------|--------------|
| 25/06/02 | -0,86          | 6,50            | 0,97         |
| 26/06/02 | -1,91          | 3,39            | 0,99         |
| 27/06/02 | -0,95          | 7,26            | 0,96         |
| 28/06/02 | 3,68           | 5,19            | 0,98         |
| 29/06/02 | 1,76           | 5,91            | 0,98         |
| 10/10/02 | 18,67          | 19,03           | 0,56         |
| 11/10/02 | 14,44          | 14,82           | 0,77         |
| 12/10/02 | 10,32          | 10,56           | 0,85         |
| 13/10/02 | 22,69          | 23,11           | 0,43         |
| 14/10/02 | 22,39          | 23,21           | 0,38         |

Em geral, o modelo estimou a radiação direta diária dentro dos limites desse intervalo de variação, onde o melhor desempenho é estabelecido para os indicativos de junho e o pior para os indicativos de outubro.

#### **4 CONCLUSÕES**

Dos resultados discutidos das equações de estimativa mensal de LINKE pode-se concluir que o fator de turbidez (TL) varia mensalmente, onde os maiores TL ocorrem nos meses mais nebulosos (verão e primavera), e os menores nos meses de céu claro (outono e inverno). Os TL médios mensais foram de  $3,1 \pm 0,7$  em maio e  $3,9 \pm 0,7$  em setembro, com média TL igual a 3,5ASL.

Na validação mês a mês, o modelo de Linke, constituído de 12 equações mensais, subestimou ou superestimou as medidas com bom nível de espalhamento e ajustamento. Com base no desempenho dos três indicativos *MBE*, *RMSE* e “*d*” de Willmott, o modelo apresentou melhores resultados nos meses de céu aberto.

**Agradecimento:** Os Autores agradecem o CNPq e a FAPESP pelo apoio financeiro.

#### **REFERÊNCIAS**

- ALADOS – ARBOLEDAS, L., OLMO, F.J., ALADOS, I., PÉREZ, M. Parametric models to estimate photosynthetically active radiation in Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.101, p.187-201, 2000.
- ALADOS, I., OLMO, F. J., FOYO-MORENO, I., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Estimation of photosynthetically active radiation under cloudy conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.102, p.39-50, 2000.
- BECKER, S. Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel. **International Journal of Climatology**, v.21, p1561-76, 2001.
- DIABATÉ, L. REMUND, J. WALD, L. Linke turbidity factors for several sites in Africa. **Solar Energy**, v.75, p.111-119, 2003.
- HUSSAIN, M. KHATUN, S., RASUL, M.G. Determination of atmospheric turbidity in Bangladesh. **Renewable Energy**, v.20, p. 325-32, 2000.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390p.
- KARAYEL, M., NAVVAB, M. NE'EMAN, E., SELKOWITZ, S. Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations. **Energy and Buildings**, v. 6, n.3, p. 283-91, 1984.
- KASTEN, F. The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness. **Solar Energy**, v.56, n.3, p.239-44, 1996.
- LI, D.H.W., LAM, J.C. A study of atmospheric turbidity for Hong Kong. **Renewable Energy**, v.25, p. 1-13, 2002.
- LINKE, F. Die Sonnenstrahlung und ihre Schwächung in der Atmosphäre. *Handbuch Geophysic*, 8, 1942.
- LOUCHE, A. PERI, G., IQBAL, M. An analysis of Linke turbidity factor. **Solar Energy**, v.37, n.6, p.393-6, 1986.
- PEDRÓS, R., UTRILLAS, M. P., MARTÍNEZ-LOZANO, J. A., TENA, F. Values of broad band turbidity coefficients in a Mediterranean coastal site. **Solar Energy**, v.66, n.1, p.11-20, 1999.
- SHALTOUT, M.A.M, HASSAN, A.H., FATHY, A.M. Study of the solar radiation over Menia. **Renewable Energy**, v.23, p.621-639, 2001.
- STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v.51, n.4, p.289-91, 1993.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**. v.2, p.184-94, 1981.

## LINKE'S MODEL FOR ESTIMATIVE OF BEAM RADIATION

**ABSTRACT:** *This work describes a parametric model based on the Linke's Turbidity Factor (TL). Direct and global radiation database is from 1996 to 2003. The results showed that the Linke's Turbidity factor varied monthly from 3.1 ( $\pm 0.7$ ) in May to 3.9( $\pm 0.7$ ) in September, with annual average equal to 3.5. In the validation, every month showed MBE, RMSE and  $d$  respectively as it follows: January: -4.38%; 13.87%; 0.83; February: -1.0%; 14.18%; 0.86; March: -5.26%; 13.44%; 0.86; April: 1.32%; 9.91%; 0.93; May: -2.67%; 12.15%; 0.91; June: 2.00%; 8.98%; 0.94; July: -5.20%; 14.52%; 0.87; August: 2.53%; 9.93%; 0.92; September: -1.75%; 15.20%; 0.79; October: 11.39%; 14.66%; 0.77; November: -4.35%; 15.57%; 0.84; and December: -5.84%; 12.88%; 0.86. Based on the statistical indicators, best results were found for clear sky.*

**Keywords:** solar radiation, direct radiation, beam, turbidity, Linke.