

MARIA JOSÉ HATEM DE SOUZA

**IRRADIÂNCIA SOLAR DIRETA: DESENVOLVIMENTO E
AVALIAÇÃO DE MODELOS, E SUA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E
TEMPORAL PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
"Magister Scientiae".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
JANEIRO - 1996

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

S729f
1996

Souza, Maria José Hatem de, 1967-

Irradiância solar direta : desenvolvimento e avaliação de modelos, e sua distribuição espacial e temporal para o Estado de Minas Gerais / Maria José Hatem de Souza. - Viçosa : UFV, 1996.

128p. : il.

Orientador: Adil Rainier Alves.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

1. Energia solar - Tecnologia. 2. Potencial de energia solar. 3. Radiação solar - Modelos - Avaliação. 4. Energia solar - Aplicações. 5. Radiação solar - Medição. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 18.ed. 621.47

CDD. 19.ed. 621.47

MARIA JOSÉ HATEM DE SOUZA

**IRRADIÂNCIA SOLAR DIRETA: DESENVOLVIMENTO E
AVALIAÇÃO DE MODELOS, E SUA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E
TEMPORAL PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS**

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das
Exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para Obtenção do Título de
"Magister Scientiae".

APROVADA: 8 de novembro de 1995



Prof. Gutemberg Pereira Dias
(Conselheiro)



Prof. Evandro Ferreira Passos
(Conselheiro)



Prof. José Maria Nogueira da Costa



Prof. Luiz Cláudio Costa



Prof. Adil Rainier Alves
(Orientador)

*Ao meu filho Jonas,
a meu esposo Arnaldo
e
a meus pais Geraldo e Rosa.*

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelo fornecimento de dados de insolação de várias estações Climatológicas, que não constavam nas normais Climatológicas.

Ao Professor Adil Rainier Alves, pelas valiosas sugestões, pela grande dedicação, pelo auxílio durante toda a elaboração deste trabalho.

Aos Professores Evandro Ferreira Passos e Gutemberg Pereira Dias, pela colaboração e pelas sugestões durante a calibração do actinógrafo.

Ao Professor José Eduardo Prates, pelo auxílio na utilização do programa para o traçado das isolinhas.

Ao Senhor José Galinari Sobrinho, pela grande contribuição na montagem e na instalação de suportes para calibração e instalação de equipamentos.

Ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), pelo empréstimo de equipamentos.

À Professora Elizabete Marques Duarte Pereira e à Universidade Federal de Minas Gerais, pela calibração do piranômetro Eppley, utilizado

como padrão secundário na calibração do actinógrafo e na aferição do piranômetro fotovoltaico.

Ao Senhor José de Freitas Coelho, pela contribuição durante a preparação dos dados meteorológicos, utilizados neste trabalho.

À colega Francisca Zenaide de Lima, pela coleta dos dados de irradiância, empregados neste trabalho.

Ao senhor Luiz Gouveia da Silva, pela correção de português.

Ao Franz Lopes da Silva, pelos cuidados na editoração da tese.

Ao meu esposo Arnaldo José Moura Lhamas, pelo grande apoio e pelo auxílio durante a elaboração.

BIOGRAFIA

Maria José Hatem de Souza, filha de Geraldo José de Souza e de Rosa Hatem de Souza, nasceu em Belo Horizonte, Minas Gerais, no dia 10 de junho de 1967.

Em junho de 1991, graduou-se em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

Em 1992, iniciou o Mestrado em Meteorologia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

De outubro de 1993 a dezembro de 1994, exerceu a função de monitora, nível II, da disciplina ENG 210 Meteorologia e Climatologia Agrícola.

No dia 8 de novembro de 1995, defendeu tese, requisito indispensável para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	ix
EXTRATO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Considerações básicas	4
2.1.1. A constante solar	4
2.1.2. Irradiância solar no topo da atmosfera	4
2.1.3. Massa ótica de um constituinte atmosférico	7
2.1.4. Atenuação da radiação solar pela atmosfera	8
2.1.5. Medição da radiação solar	12
2.2. Estimativa da irradiância solar	15
2.2.1. Estimativa da irradiância solar para dias de céu descoberto.....	16
2.2.1.1. Modelo A	17
2.2.1.1.1. Irradiância solar direta	17
2.2.1.1.2. Irradiância solar difusa	22
2.2.1.1.3. Irradiância solar global	23
2.2.2. Estimativa da irradiância solar para dias com nebulosidade	24

	Página
2.2.2.1. Correlação entre irradiância solar e insolação	24
2.2.2.2. Estimação da irradiância solar difusa e direta a partir da irradiância global	28
2.2.2.2.1. Modelo de Orgill e Hollans	29
2.2.2.2.2. Modelo de Erbs et alii	29
2.2.2.2.3. Modelo de Spencer	30
2.2.2.2.4. Modelo de Boes et alii	30
2.2.2.2.5. Modelo de Skartveit e Olseth	31
2.2.2.2.6. Modelo de Maxwell	31
3. MATERIAIS	33
4. MÉTODOS UTILIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS	35
4.1. Avaliação de metodologias para determinar a irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal, a partir dos registros do actinógrafo	35
4.2. Estimação da irradiância solar global diária a partir da insolação	38
4.3. Estimação da irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal, a partir do índice de transparência atmosférica	43
4.4. Estimação da irradiância solar direta a partir da insolação	48
4.4.1. Avaliação de uma metodologia para a estimação da irradiância solar direta média mensal sobre uma superfície horizontal, para dias com nebulosidade, utilizando modelos para céu descoberto	48
4.4.1.1. Determinação do parâmetro de turbidez de Ångström- β	49
4.4.1.2. Estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, para dias com nebulosidade	51
4.4.2. Avaliação de modelos para a estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação	56

	Página
4.4.3. Avaliação de modelos para a estimação da irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação	67
4.4.4. Modelo para a estimação da irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Viçosa-MG	72
4.5. Variação da irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal e da insolação horária, média mensal, em Viçosa-MG	73
4.6. Variação da irradiância solar direta diária, média mensal, sobre uma superfície horizontal em Viçosa-MG	89
4.7. Estudo da distribuição espacial e temporal da irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal, para o Estado de Minas gerais	91
5. RESUMO E CONCLUSÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
APÊNDICES	121
APÊNDICE A - TRANSMITÂNCIAS ATMOSFÉRICAS ESPECTRAIS E IRRADIÂNCIA ESPECTRAL DIFUSA	122
APÊNDICE B - MODELO DE INTEGRAÇÃO ESPECTRAL	125
APÊNDICE C - CALIBRAÇÃO DO ACTINÓGRAFO - SIAP-BOLOGNA	126
APÊNDICE D - AFERIÇÃO DO PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO (ELE), UTILIZANDO UM PIRANÔMETRO EPPLEY COMO PADRÃO	128

LISTA DE SÍMBOLOS

- a** - Coeficiente empírico da equação de Ångström-Prèscott, adimensional.
- a'** - Parâmetro dependente da latitude, equação de Spencer, adimensional.
- a₁'** - Coeficiente empírico da equação de Bennett, adimensional.
- a₁** - Fração da radiação recebida em um dia completamente coberto por nuvens, em relação a um completamente "limpo", adimensional.
- a₂** - Coeficiente empírico da equação de Jain, adimensional.
- a₃** - Coeficiente empírico da equação de Jain, adimensional.
- b** - Coeficiente empírico da equação de Ångström-Prèscott, adimensional.
- b''** - Largura do anel sombreador, cm.
- b'** - Parâmetro dependente da latitude, equação de Spencer, adimensional.
- b₀** - Índice de transparência atmosférica, adimensional.
- b₁'** - Coeficiente empírico da equação de Bennett, adimensional.
- b₂** - Coeficiente empírico da equação de Jain, adimensional.
- b₃** - Coeficiente empírico da equação de Jain, adimensional.
- c** - Coeficiente empírico da equação de Page, adimensional.
- c'** - Parâmetro dependente da latitude, equação de Spencer, adimensional.
- c₁'** - Coeficiente empírico da equação de Bennett, adimensional.
- d** - Coeficiente empírico da equação de Page, adimensional.
- d'** - Parâmetro dependente da latitude, equação de Spencer, adimensional.
- E₀** - fator de correção associado a excentricidade da órbita terrestre, adimensional.
- E_t** - Equação do tempo solar, minutos.
- e_s** - Pressão de saturação do vapor de água, mbar (hPa).

- F_c - Fração do espalhamento total na direção de incidência da radiação, adimensional
- h - Altitude, m
- H' - Ângulo horário do Sol correspondente ao instante do pôr-do-Sol
- \bar{H} - Irradiância solar global diária, MJ.m⁻².dia⁻¹
- \bar{H}_b - Irradiância solar direta diária, sobre uma superfície horizontal, MJ.m⁻².dia⁻¹
- \bar{H}_d - Irradiância solar difusa diária, MJ.m⁻².dia⁻¹
- \bar{H}_o - Irradiância solar diária no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal, MJ.m⁻².dia⁻¹.
- \bar{H} - Irradiância solar global diária, média mensal, MJ.m⁻².dia⁻¹.
- \bar{H}_b - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, MJ.m⁻².dia⁻¹.
- \bar{H}_d - Irradiância solar difusa diária, média mensal, MJ.m⁻².dia⁻¹.
- \bar{H}_n - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície normal aos raios solares, MJ.m⁻².dia⁻¹.
- \bar{H}_o - Irradiância solar diária, média mensal sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera, MJ.m⁻².dia⁻¹.
- \bar{H}_o' - Irradiância solar global diária, média mensal, recebida em uma superfície horizontal, ao nível do solo, em um dia completamente "limpo" (sem nuvens), MJ.m⁻².dia⁻¹.
- H_s - Hora solar, horas.
- I - Irradiância solar global horária, kJ.m⁻².h⁻¹.
- I_b - Irradiância solar direta horária, sobre uma superfície horizontal, kJ.m⁻².h⁻¹.
- I_d - Irradiância solar difusa horária, kJ.m⁻².h⁻¹.
- I_n - Irradiância solar direta horária, sobre uma superfície normal aos raios solares, kJ.m⁻².h⁻¹.
- I_o - Irradiância solar horária, sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera, kJ.m⁻².h⁻¹.
- I_{on} - Irradiância solar horária no topo da atmosfera, sobre uma superfície normal aos raios solares, kJ.m⁻².h⁻¹.
- I_o' - Irradiância solar horária, sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera, para um certo intervalo de tempo (Δt), kJ.m⁻².h⁻¹.
- \bar{I} - Irradiância solar global horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, kJ.m⁻².h⁻¹.

- \bar{I}_b - Irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.
- \bar{I}_d - Irradiância solar difusa horária, média mensal, $\text{kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.
- \bar{I}_o - Irradiância solar horária, média mensal, no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$.
- \dot{I} - Irradiância solar global instantânea, W.m^{-2} .
- \dot{I}_b - Irradiância solar direta instantânea, sobre uma superfície horizontal, W.m^{-2} .
- \dot{I}_{cs} - Constante solar, 1367 W.m^{-2} .
- \dot{I}_d - Irradiância solar difusa instantânea, W.m^{-2} .
- \dot{I}_{da} - Irradiância solar difusa à superfície em questão, produzida pelos aerossóis, W.m^{-2} .
- $\dot{I}_{d\lambda}$ - Irradiância espectral difusa, associada ao espalhamento Rayleigh, $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$.
- $\dot{I}_{da\lambda}$ - Irradiância espectral difusa produzida pelos aerossóis, considerando a primeira passagem pela atmosfera, $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$.
- \dot{I}_{dm} - Irradiância solar difusa, à superfície em questão, associada às múltiplas reflexões da radiação no sistema solo-atmosfera, W.m^{-2} .
- $\dot{I}_{dm\lambda}$ - Irradiância espectral difusa associada às múltiplas reflexões da radiação no sistema solo-atmosfera, $\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$.
- \dot{I}_{dr} - Irradiância solar difusa, à superfície em questão, considerando apenas o espalhamento Rayleigh, W.m^{-2} .
- $\dot{I}_{dr\lambda}$ - Irradiância espectral difusa associada ao espalhamento Rayleigh, considerando a primeira passagem pela atmosfera, W.m^{-2} .
- \dot{I}_n - Irradiância solar direta instantânea, sobre uma superfície normal aos raios solares, W.m^{-2} .
- $\dot{I}_{n\lambda}$ - Irradiância espectral direta, sobre uma superfície normal aos raios solares, W.m^{-2} .
- \dot{I}_o - Irradiância solar instantânea no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal, W.m^{-2} .

- $\dot{I}_{0\lambda}$ - Irradiância espectral topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal, $W.m^{-2}$.
- \dot{I}_{00} - Irradiância solar instantânea no topo da atmosfera, sobre uma superfície normal aos raios solares, $W.m^{-2}$.
- $\dot{I}_{00\lambda}$ - Irradiância espectral topo da atmosfera, sobre uma superfície normal aos raios solares, $W.m^{-2}$.
- \dot{I}_{λ} - Irradiância espectral global, $W.m^{-2}$.
- K_t - Índice diário de transparência atmosférica (H / H_0), adimensional.
- K' - Correção do efeito abóbada, causada pelo anel de sombreador, adimensional.
- $k_{g\lambda}$ - Coeficiente de extinção monocromático, associado apenas à absorção pela mistura de gases, adimensional.
- $k_{o\lambda}$ - Coeficiente de extinção monocromático, associado apenas à absorção pelo ozônio, adimensional.
- $k_{wa\lambda}$ - Coeficiente de extinção monocromático associado apenas a absorção pelo vapor de água, adimensional.
- k_{λ} - Coeficiente de extinção monocromático, adimensional.
- l - Massa ótica de ozônio na direção vertical, em CNTP.
- M_t - Índice horário de transparência atmosférica (I / I_0), adimensional.
- m_r - Massa ótica relativa para um referido constituinte atmosférico, adimensional.
- $m_{r,p}$ - Massa ótica relativa do "ar seco", em um dado nível de pressão, adimensional.
- $m_{r,p0}$ - Massa ótica relativa do "ar seco" ao nível do mar (1013,25 hPa), adimensional.
- m'_a - Massa ótica absoluta do ar, adimensional.
- n - Insolação diária, horas.
- n' - Dia juliano, $n' = 1$ em 1^o de janeiro e $n' = 365$ em 31 de dezembro
- n_d - Número de dias do mês.
- \bar{n} - Insolação média mensal, horas.
- \bar{n}_h - Insolação horária, média mensal, horas.
- N - Duração do dia, horas.
- \bar{N} - Duração do dia, média mensal, horas.
- \bar{N}_h - Duração máxima possível de brilho solar, no intervalo de tempo considerado, horas.

- \bar{N}_m - Duração máxima da insolação, média mensal, em horas.
- \bar{n}/\bar{N} - Razão de insolação diária, média mensal, adimensional.
- \bar{n}_h/\bar{N}_h - Razão de insolação horária, média mensal, adimensional.
- p - Pressão atmosférica local, hPa.
- Q_λ - Irradiância espectral difusa após a primeira passagem da radiação pela atmosfera, $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$.
- r - Distância atual entre a Terra e o Sol, km.
- r' - Raio do anel sombreador, cm.
- r_0 - Distância média entre a Terra e o Sol, km.
- t - Tempo, horas.
- T - Temperatura, K ou °C.
- V_{is} - Visibilidade, km.
- w - Quantidade de água precipitável, cm.
- α - Expoente do comprimento de onda (λ), adimensional.
- α' - Ângulo de elevação do Sol.
- α_0 - Absortância atmosférica considerando apenas a absorção pelo ozônio, adimensional.
- α_w - Absortância atmosférica considerando apenas o vapor de água como agente absorvedor, adimensional.
- β - Coeficiente de turbidez de Ångström, adimensional.
- δ - Declinação do Sol.
- θ - Ângulo zenital do Sol.
- ϕ - Latitude local (positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul).
- ϕ_r - Umidade relativa, decimal.
- ρ - Massa específica para um determinado constituinte atmosférico, $kg.m^{-3}$.
- ρ'_a - Albedo da atmosfera, adimensional.
- $\rho'_{a\lambda}$ - Albedo espectral da atmosfera, adimensional.
- ρ_g - Albedo do solo, adimensional.
- $\rho_{g\lambda}$ - Albedo espectral do solo, adimensional.
- τ_0 - Transmitância atmosférica, considerando apenas a absorção e espalhamento da radiação pelos aerossóis, adimensional.
- $\tau_{a\lambda}$ - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção e espalhamento da radiação pelos aerossóis, adimensional.
- $\tau_{g\lambda}$ - Transmitância atmosférica, considerando apenas a absorção pelos gases uniformemente misturados (CO_2, N_2, O_2, \dots), adimensional.

- $\tau_{m\lambda}$ - Transmitância atmosférica espectral, associada a absorção molecular, adimensional.
- τ_o - Transmitância atmosférica, considerando apenas a absorção pelo ozônio, adimensional.
- $\tau_{o\lambda}$ - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas o ozônio como agente absorvedor, adimensional.
- τ_λ - Transmitância atmosférica espectral, adimensional.
- $\tau_{r\lambda}$ - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas o espalhamento Rayleigh, adimensional.
- $\tau_{w\lambda}$ - Transmitância atmosférica, considerando apenas a absorção pelo vapor de água, adimensional.
- $\tau_{w\lambda}$ - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelo vapor de água, adimensional.
- τ_λ - Transmitância monocromática da atmosfera, adimensional.
- ω - Ângulo horário do Sol.
- ω_i - Ângulo horário correspondente ao instante central de tempo considerado.
- ω_o - Albedo de espalhamento simples.
- ω_s - Ângulo horário do Sol correspondente ao instante do pôr-do-Sol.
- ψ_s - Azimute do Sol correspondente ao instante do nascer-do-Sol.
- χ - Fração da irradiância difusa bloqueada pelo anel sombreador, adimensional

EXTRATO

SOUZA, Maria José Hatem de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 1996. *Irradiância solar direta: desenvolvimento e avaliação de modelos, e sua distribuição espacial e temporal para o Estado de Minas Gerais*. Orientador: Prof. Adil Rainier Alves. Conselheiros: Prof. Evandro Ferreira Passos e Prof. Gutemberg Pereira Dias.

Com o propósito de fazer um levantamento do potencial de energia solar direta no Estado de Minas Gerais, avaliaram-se o desempenho de vários modelos e as metodologias para a estimativa da irradiância solar direta, sobre uma superfície horizontal. Dentre as metodologias e os modelos avaliados, o que apresentou o melhor desempenho, para Viçosa - MG, foi o modelo linear de Hussain, que correlaciona a irradiância solar direta com a insolação, com os coeficientes determinados para a localidade de Calcutá, Índia, tanto para a estimativa da irradiância direta horária quanto para a estimativa da direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal. Este modelo foi testado, juntamente com outros, para a localidade de Januária - MG, apresentando bons resultados. Em virtude do bom desempenho, apresentado pelo modelo linear de Hussain, determinou-se, por análise de regressão linear, o valor anual do coeficiente

angular de Hussain, utilizando os dados de radiação direta e de insolação, obtidos em Viçosa. Esta equação foi empregada para estimar a radiação direta diária para Januária, obtendo-se resultados ligeiramente melhores que os obtidos pela equação de Hussain, com os coeficientes de Calcutá. Com o intuito de fazer uma estimativa preliminar do potencial de radiação direta para o Estado de Minas Gerais, utilizaram-se de dados de insolação referentes ao período de 1961 a 1990 de 77 estações do INMET, sendo 49 do Estado de Minas, e as restantes pertencentes aos estados vizinhos, para estimar a radiação direta diária, sobre uma superfície horizontal, a partir da equação desenvolvida para Viçosa. Com base nesta estimativa, foram confeccionados mapas com isolinhas de irradiância solar direta para o Estado de Minas Gerais. Em termos de aproveitamento da energia solar direta, apesar de algumas áreas apresentarem baixos valores, o potencial do Estado é elevado. Considerando os valores de incidência de radiação direta de todas as localidades de Minas, tem-se uma média geral de $9,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, durante o ano, sendo o Norte do Estado a região de maior incidência e o Sul de menor. Outras áreas com valores intermediários, Noroeste e Oeste, também têm potencial apreciável.

ABSTRACT

SOUZA, Maria José Hatem de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, janeiro de 1996. *On the direct solar irradiance: development and evaluation of estimation models, and its temporal and spatial distribution for the State of Minas Gerais.* Adviser: Prof. Adil Rainier Alves. Committee Members: Prof. Evandro Ferreira Passos e Prof. Gutemberg Pereira Dias.

In order to estimate the potential of direct solar radiation for the State of Minas Gerais, Brazil, several empirical models of direct irradiance were first tested. Hussain's linear model (with coefficients obtained for Calcutta - India) was the best one for Viçosa-MG, for estimating mean monthly hourly or daily solar direct irradiances on horizontal surfaces. Also for Januária-MG this model gave very good results. Hussain's equation, with an annual coefficient obtained from linear regression analysis using direct radiation and sunshine data collected in Viçosa, gave results even better when applied to Januária. So, in order to perform a preliminar estimation of the potential of direct solar energy for the State of Minas Geraris, Hussain's equation (with the annual coefficient obtained for Viçosa) was employed, with sunshine data

obtained from 1961 to 1970 in 77 meteorological stations of INMET (49 stations within Minas Gerais and 28 in neighbour States). The results were plotted in charts, where one can see that in terms of using the direct solar radiation for engineering purposes, although with some areas with relatively low irradiances (in the southern portion of the State), the potential of the State of Minas Gerais is high, especially in the northern portion. For the whole State, the mean annual direct solar irradiance on a horizontal surface was of $9.2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$.

I. INTRODUÇÃO

A utilização das fontes convencionais de energia, em resposta à crescente demanda energética dos últimos tempos, tem causado preocupações ao homem moderno. Estas preocupações devem-se à redução das reservas naturais, acrescidas do fato de que a utilização dessas fontes convencionais coloca em constante ameaça o equilíbrio ecológico do planeta, afetando os ecossistemas, como, por exemplo, pela extinção de áreas verdes, pela queima de combustíveis fósseis, pela exploração da energia hidroelétrica, que pode causar um desequilíbrio na vida animal e vegetal dos rios etc.

Por estas razões, o uso de fontes não-convencionais e não-poluidoras de energia tem sido bastante incentivado, principalmente, no que se refere à energia eólica, à maré-motriz, à geotérmica e à solar, entre outras. Destaca-se que a fonte de energia solar, para fins práticos, é inesgotável, podendo ser utilizada em quase todo o mundo.

A energia solar tem sido aproveitada de várias maneiras, tanto indiretamente, por meio do uso da energia eólica, hidráulica, da biomassa etc., como diretamente, através da iluminação natural de ambientes, por meio de coletores solares e espelhos concentradores, para o aquecimento

de água, ou ar para fins diversos, como, por exemplo: produção de combustíveis químicos, fundição de diversos materiais, destilação da água, sistemas de refrigeração e ar condicionados, assim como, o uso em células fotovoltaicas para a geração de energia elétrica (DUFFIE e BECKMAN, 1974; WILLIAMS, 1977; CHARTERS, 1977; SAKURAI, 1977; PALZ, 1981 e SWEEDLER, 1988).

Na agricultura, a energia solar tem sido usada desde tempos imemoriais na secagem de grãos e cereais, na desidratação de frutas e legumes (WILLIAMS, 1977), bem como na sua utilização indireta, através de moinhos de vento, rodas de água etc. (PALZ, 1981). Segundo PYTLINSKI (1978), desde meados de 1970, as células fotovoltaicas têm sido utilizadas para fins de bombeamento de água para irrigação. Nos grandes centros, estas células são normalmente usadas como fonte complementar de energia em residências, o mesmo ocorrendo no meio rural, não atendido por concessionária de energia elétrica (SWEEDLER, 1988).

No Brasil, como em muitos outros países, além do uso mencionado anteriormente, as células fotovoltaicas também se prestam para a alimentação de bóias de sinalização em alto-mar, de estações repetidoras de TV e microondas, de sinalização e de telemetria.

Segundo RUSSO (1978), os sistemas de aproveitamento de energia solar têm características peculiares, apresentando aspectos totalmente distintos dos convencionais. Nos sistemas convencionais, o insumo energético (combustível, água armazenada em represas etc.) pode ser aplicado em quantidade e intensidade definidas, conforme a necessidade de uso, enquanto nos sistemas de aproveitamento da energia solar, o fluxo de energia não é constante, podendo às vezes atingir níveis bastante baixos e até mesmo nulos. Assim, para dimensionar estes sistemas solares, necessita-se do comportamento temporal da radiação solar, com base em longas séries de dados.

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera terrestre, sofre o processo de absorção e espalhamento, causado pelos constituintes atmosféricos. A componente da radiação, que chega diretamente à superfície do solo, é denominada *radiação direta*, e a parcela, que chega ao solo após ser difundida na atmosfera, constitui a *radiação difusa*. A soma dessas duas parcelas corresponde à *radiação global*.

Para fins de aproveitamento da energia solar, por meio de células fotovoltaicas e sistemas concentradores, a componente da radiação solar de maior interesse é a direta. Assim, no que se refere à radiação direta, o conhecimento de suas distribuições temporal e espacial é de suma importância para a determinação do potencial energético solar de uma região.

A maioria das Estações Climatológicas do Brasil não dispõe de dados de radiação direta. O que existe são registros de radiação global (actinogramas) e de insolação (heliogramas), o que tem causado dificuldades aos pesquisadores brasileiros quanto à condução de estudos relativos à radiação direta.

Sendo assim, este trabalho teve como principais objetivos:

- a) avaliar procedimentos para se obter a irradiância solar direta, a partir da irradiância solar global e da insolação;
- b) estudar a distribuição da irradiância solar direta em Viçosa-MG; e
- c) fazer o levantamento do potencial de irradiância solar direta para o Estado de Minas Gerais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. *Considerações básicas*

2.1.1. *A constante solar*

A constante solar (\dot{I}_{es}) é a quantidade de energia solar, recebida por unidade de tempo e por unidade de área em uma superfície normal aos raios solares, a uma distância média entre a Terra e o Sol, na ausência de atmosfera. Seu valor é de $1,367 \text{ W.m}^{-2}$ (LIOU, 1980 e IQBAL, 1983).

2.1.2. *Irradiância solar no topo da atmosfera*

O termo irradiância refere-se à densidade de fluxo de radiação incidente em uma superfície (W.m^{-2}). O valor instantâneo da irradiância solar no topo da atmosfera terrestre, numa superfície normal aos raios solares (\dot{I}_{on}), é determinado pela equação:

$$\dot{I}_{on} = \dot{I}_{es} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad \text{eq. 1}$$

em que r_0 é a distância média da Terra ao Sol e r é a distância atual entre a Terra e o Sol. O quadrado da razão entre r_0 e r corresponde ao fator de correção (E_0), associado à excentricidade da órbita terrestre, que pode ser calculado, conforme PALTRIDGE e PLATT (1976), pela equação de Spencer, isto é:

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1,000110 + 0,034221 \cos X + 0,001280 \operatorname{sen} X + 0,000719 \cos 2X + 0,000077 \operatorname{sen} 2X, \quad \text{eq.2}$$

sendo X expresso em radianos, dado como:

$$X = \frac{2\pi(n' - 1)}{365}, \quad \text{eq. 3}$$

em que n' é o dia juliano ($n' = 1$ em 1^o de janeiro e $n' = 365$ em 31 de dezembro).

A irradiância solar sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera (\dot{I}_0) varia com a latitude e com o tempo, podendo ser calculada como:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0n} \cos \theta, \quad \text{eq.4}$$

sendo $\cos \theta$ o cosseno do ângulo zenital do Sol (θ):

$$\cos \theta = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega, \quad \text{eq.5}$$

em que ϕ é a latitude do local (positiva para o Hemisfério Norte e negativa para o Hemisfério Sul), δ a declinação do Sol, que para fins meteorológicos pode ser calculada pela equação de COOPER (1969), isto é:

$$\delta = 23,45^\circ \operatorname{sen} \left[\frac{360^\circ (284 + n')}{365} \right], \quad \text{eq.6}$$

e ω é o ângulo horário do Sol, calculado como

$$\omega = (H_s - 12) 15^\circ, \quad \text{eq.7}$$

sendo H_s a hora solar.

Para um dado intervalo de tempo, $\Delta t = t_2 - t_1$, a irradiância solar no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal, é obtida como:

$$I_o' = \int_{t_1}^{t_2} I_{cs} E_o \cos \theta dt, \quad \text{eq.8}$$

Para um intervalo de tempo de uma hora, obtém-se, aproximadamente, o valor da irradiância solar horária no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal (I_o), pela seguinte equação:

$$I_o = I_{sc} E_o (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_i), \quad \text{eq.9}$$

sendo ω_i o ângulo horário correspondente ao instante central do intervalo de tempo considerado, que no caso é de uma hora.

A irradiância solar diária no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal (H_o), pode ser obtida, integrando-se a equação 8 do nascer ao pôr-do-Sol, o que resulta:

$$H_o = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} E_o \cos \phi \cos \delta \left[\sin \omega_s - \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \cos \omega_s \right], \quad \text{eq.10}$$

sendo ω_s o ângulo horário (em graus) correspondente ao instante do pôr-do-Sol (IQBAL, 1983):

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta), \quad \text{eq.11}$$

2.1.3. Massa ótica de um constituinte atmosférico

Quando se considera a propagação da radiação na atmosfera, é necessário conhecer a massa ótica dos constituintes atmosféricos, que espalham e que absorvem a radiação (PALTRIDGE e PLATT, 1976).

A massa ótica (ou massa ótica absoluta) de um determinado constituinte atmosférico numa dada direção s , entre os pontos s_1 e s_2 , é

definida como $\int_{s_1}^{s_2} \rho ds$, sendo ds a distância elementar e ρ a massa

específica deste constituinte atmosférico. Quando se considera a massa ótica de um determinado constituinte na direção vertical, tem-se a espessura ótica da camada entre os níveis s_1 e s_2 , para o dado constituinte. A razão entre a massa ótica, numa direção oblíqua, e a massa ótica, na direção vertical, é denominada massa ótica relativa para o referido constituinte atmosférico, isto é,

$$m_r = \frac{\int_{s_1}^{s_2} \rho ds}{\int_{s_1}^{s_2} \rho dz}, \quad \text{eq.12}$$

Quando o "constituinte" atmosférico em questão for o "ar seco", a massa ótica relativa, ao nível do mar, m_{r,p_0} (1.013,25 mbar), pode ser calculada pela equação, proposta por Kasten, ou ainda, pela fórmula de Rodgers. Conforme IQBAL (1983), a equação de Kasten pode ser expressa como:

$$m_{r,p_0} = \left[\cos \theta + 0,15(93,885 - \theta)^{-1,253} \right]^{-1}, \quad \text{eq.13}$$

em que θ é dado em graus. A precisão desta equação é de 0,1% para θ menor que 86° e de 1,25% para θ até $89,5^\circ$. A fórmula de Rodgers, por outro lado, pode ser expressa como:

$$m_{r,p0} = 35 \left(1224 \cos^2 \theta + 1 \right)^{-1/2} \quad \text{eq.14}$$

Para o cálculo da massa ótica relativa do ar seco, isento de aerossóis, em um dado nível de pressão, p , - $m_{r,p}$ -, faz-se uso da seguinte equação corrigida:

$$m_{r,p} = m_{r,p0} (p / 1.013,25), \quad \text{eq.15}$$

sendo p a pressão local em mbar (hPa).

2.1.4. Atenuação da radiação solar pela atmosfera

Como mencionado anteriormente, quando a radiação solar atravessa a atmosfera terrestre, uma parte da energia incidente é absorvida pelos constituintes da atmosfera e outra parte é espalhada. A radiação que é espalhada é denominada *radiação difusa*, e a densidade de fluxo correspondente a essa radiação é denominada *irradiância solar difusa* (i_d). A radiação solar proveniente do disco solar, que atinge a superfície terrestre, é denominada *radiação solar direta*, e a densidade de fluxo correspondente é denominada *irradiância solar direta* (i_b). Quando se trata de uma superfície normal aos raios solares, tem-se a *irradiância solar direta sobre uma superfície normal* (i_n). A *irradiância solar global* (i) sobre determinada superfície é a densidade de fluxo de radiação solar incidente sobre essa superfície, incluindo ambas as componentes direta e difusa, isto é,

$$i = i_b + i_d = i_n \cos \theta_i + i_d, \quad \text{eq.16}$$

sendo θ_i o ângulo de incidência da radiação direta.

A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, é principalmente absorvida pelos constituintes O_2 , O_3 , N_2 , CO_2 , H_2O , O , e N . Além destes gases, outros elementos atuam na absorção da energia solar, como: CH_4 , N_2O , NO , CO , poeiras, fuligens, gotículas de nuvens etc. A absorção na região ultravioleta do espectro solar é devida principalmente ao ozônio (O_3), enquanto na faixa do infravermelho termal, os agentes absorvedores principais são o vapor de água e o dióxido de carbono (CO_2) (LIOU, 1980).

Enquanto o processo de absorção é seletivo, o de espalhamento é função do comprimento de onda, sendo todos os constituintes atmosféricos responsáveis pelo espalhamento da radiação (IQBAL, 1983). Segundo a teoria de Rayleigh, conforme DEIRMENDJIAN e SEKERA (1954), PALTRIDGE e PLATT (1976), LIOU (1980) e IQBAL (1983), para partículas esféricas e de raio r , pequeno se comparado ao comprimento de onda da radiação (λ), ou seja quando $r \leq 0,1\lambda$, o espalhamento causado pelas partículas, que constituem o ar atmosférico, é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda. Quando $r > 0,1\lambda$, a teoria de Rayleigh não se aplica, sendo o espalhamento tratado à luz da teoria mais geral de Mie (LIOU, 1980; IQBAL, 1983 e PALTRIDGE e PLATT, 1976).

Segundo BIRD e HULSTROM (1981), utilizando o modelo SOLTRAN (originado de LOWTRAN), a irradiância solar direta é atenuada pelos constituintes atmosféricos na seguinte ordem: a maior atenuação é devida aos aerossóis, seguida pelo espalhamento Rayleigh e em terceiro lugar vem a absorção pelo vapor de água, seguida das atenuações pelos gases O_3 , O_2 e CO_2 .

Quando um feixe monocromático de radiação, $\dot{I}_{m\lambda}$, atravessa um meio homogêneo, numa distância m , este sofre uma atenuação exponencial, que pode ser avaliada pela lei de Beer-Bouguer-Lambert

(ÅNGSTRÖM, 1961; THEKAEKARA, 1977; LIOU, 1980 e IQBAL, 1983), expressa matematicamente por:

$$\dot{I}'_{n\lambda} = \dot{I}'_{on\lambda} e^{-(k_{\lambda} m_a')}, \quad \text{eq.17}$$

sendo $\dot{I}'_{n\lambda}$ o feixe monocromático de radiação após sofrer a atenuação e $\tau_{\lambda} = e^{-(k_{\lambda} m_a')}$, em que k_{λ} é o coeficiente de extinção monocromático; m_a' é massa ótica absoluta do ar; e τ_{λ} a transmitância atmosférica espectral (ou monocromática).

A transmitância atmosférica espectral depende, principalmente, de três fatores, quais sejam, o espalhamento Rayleigh, o espalhamento e a absorção por partículas líquidas e sólidas, e a absorção seletiva pelos constituintes atmosféricos (ÅNGSTRÖM, 1961).

Segundo PALTRIDGE e PLATT (1976) e IQBAL (1983), considerando todas as atenuações, sofridas pela radiação solar direta, ao atravessar a atmosfera, a transmitância atmosférica espectral pode ser determinada como:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{r\lambda} \cdot \tau_{a\lambda} \cdot \tau_{o\lambda} \cdot \tau_{g\lambda} \cdot \tau_{wa\lambda}, \quad \text{eq.18}$$

em que

$\tau_{r\lambda}$ = transmitância atmosférica espectral, considerando apenas o espalhamento Rayleigh;

$\tau_{a\lambda}$ = transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção e o espalhamento da radiação pelos aerossóis;

$\tau_{o\lambda}$ = transmitância atmosférica espectral, considerando apenas o ozônio como agente de absorção;

$\tau_{g\lambda}$ = transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelos gases uniformemente misturados (CO_2 , N_2 , O_2 ...); e

$\tau_{wa\lambda}$ = transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelo vapor de água.

Essas transmitâncias podem ser calculadas pelas equações, apresentadas no Apêndice A.

A radiação solar difusa, ao nível do solo, é produzida por múltiplos espalhamentos e por múltiplas reflexões da radiação, entre o solo e a atmosfera, que não deve ser confundida com a radiação de ondas longas, emitida pelo Sistema Terra-Atmosfera (IQBAL, 1983). Considerando estes processos, a irradiância espectral difusa sobre uma superfície horizontal, $\dot{i}_{d\lambda}$, é determinada como:

$$\dot{i}_{d\lambda} = \dot{i}_{dr\lambda} + \dot{i}_{da\lambda} + \dot{i}_{dm\lambda}, \quad \text{eq.19}$$

em que

$\dot{i}_{dr\lambda}$ = irradiância espectral difusa, associada ao espalhamento Rayleigh, considerando a primeira passagem pela atmosfera;

$\dot{i}_{da\lambda}$ = irradiância espectral difusa, produzida pelos aerossóis, considerando a primeira passagem pela atmosfera; e

$\dot{i}_{dm\lambda}$ = irradiância espectral difusa, associada às múltiplas reflexões da radiação no sistema solo-atmosfera.

Essas irradiâncias podem ser calculadas, conforme metodologia descrita no Apêndice A.

Finalmente, a irradiância espectral global, \dot{I}_{λ} , pode ser calculada por:

$$\dot{I}_{\lambda} = \dot{I}_{n\lambda} \cos \theta + \dot{i}_{d\lambda}, \quad \text{eq.20}$$

em que $\dot{I}_{n\lambda}$ é a irradiância espectral direta sobre uma superfície normal aos raios solares.

2.1.5. Medição da radiação solar

Detectores de radiação transformam a energia radiante em algum tipo de resposta, que possa ser quantificada por algum sensor, como os elétricos, os térmicos (ou calorimétricos), os termoeletrônicos, os termomecânicos, os químicos, os ótico-acústicos, os fotovoltaicos etc. (WCRP, 1986)

Nos sensores *calorimétricos*, a energia radiante é absorvida pelo sensor; e é medida a diferença de temperatura, ou de entalpia (do líquido ou metal aquecido). Os *termomecânicos* medem a radiação por meio, por exemplo, de placas bimetalicas que sofrem dilatações diferenciadas pela absorção de energia radiante. Os *termoeletrônicos* são constituídos de pares termoeletrônicos, que se constituem de dois fios metálicos, de diferentes materiais, unidos em suas extremidades. Uma força eletromotriz é gerada no circuito, quando há uma diferença de temperatura entre as junções do par. Vários pares termoeletrônicos costumam ser ligados em série, numa geometria adequada, formando termopilhas, com o objetivo de amplificar a força eletromotriz. Nos radiômetros, metade das junções é pintada de preto, junções quentes, que ficam expostas à radiação, e a outra metade de branco, junções frias, que se encontram protegidas da incidência de radiação. Os *fotovoltaicos* baseiam-se no efeito fotoelétrico, em que cargas elétricas são liberadas de certos materiais, pela ação da luz, gerando assim uma corrente elétrica (IQBAL, 1983).

Para medição da irradiância solar global, numa superfície plana horizontal, usam-se piranômetros e actinógrafos. Os piranômetros geralmente apresentam sensores termoeletrônicos, como os piranômetros

Eppley, Kipp-Zonen, Schenk e outros, ou fotovoltaicos (WCRP, 1986), sendo que os últimos apresentam uma pequena desvantagem de medir a irradiância solar global, apenas na faixa de 0,3 a 1,15 μm , aproximadamente (IQBAL, 1983). Esta diferença é de certa forma corrigida na calibração do aparelho. Já os actinógrafos são de princípio termomecânico, o sensor, que é constituído de duas placas, uma preta e outra prateada. Por meio de um sistema de alavancas, é conectado a uma pena, que registra a irradiância global em papel próprio, denominado actinograma, que é fixado em um tambor giratório, que pode ter sua velocidade de rotação controlada para registrar a radiação, durante o período de uma semana ou de um dia (IQBAL, 1983). Os tipos mais comuns no mercado são o Robitzsch, o Siap e o Fuess (VIANELLO e ALVES, 1991). O actinógrafo é utilizado na maioria das estações Climatológicas Principais do Brasil, pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e ao Ministério da Agricultura, Abastecimento e Reforma Agrária (MAARA).

A irradiância solar direta, numa superfície normal aos raios solares, é medida por meio do pireliômetro, cujo princípio de funcionamento é geralmente o termoelétrico, podendo também ser calorimétrico ou fotovoltaico (WOOD, 1974). Neste aparelho, o sensor é protegido da irradiância difusa, sendo posicionado, em geral, na extremidade inferior de um tubo. O aparelho é direcionado e se movimenta em sincronia com o movimento aparente do Sol. Segundo a WCRP, 1986 (World Climate Research Programe), os mais importantes tipos de pireliômetros da classe-padrão (Reference Standard Pyrheliometer) são: o pireliômetro de compensação de Ångström, desenvolvido por Ångström, em 1899, e o pireliômetro de disco de prata, desenvolvido, em 1922, por Abbot, além dos pireliômetros de cavidade auto-calibrados, desenvolvidos nas últimas décadas. Outra forma de medição da irradiância solar direta é

por meio de dois piranômetros, sendo que um mede a irradiância solar global e o outro, a difusa.

A irradiância solar difusa pode ser medida, por meio de um piranômetro sombreado, por meio de um anel ou de um disco, de forma que a radiação solar direta seja obstruída. Quando o objeto sombreador é um anel, deve-se corrigir a irradiância difusa do efeito abóbada, que corresponde corrigir os dados em consequência da obstrução parcial da abóbada celeste pelos elementos sombreadores (ROBINSON e STOCH, 1964 e DRUMMOND, 1964). Segundo estes autores, Drummond em 1956, considerando o campo da radiação difusa isotrópico, desenvolveu a seguinte equação para correção, multiplicativa, do efeito abóbada, causado pelo anel sombreador (K'):

$$K' = \frac{1}{1-\chi}, \quad \text{eq.21}$$

sendo

$$\chi = \frac{2b''}{\pi r'} \cos^3 \delta \left[\left(\frac{\pi}{180} \psi_s \right) \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \psi_s \right], \quad \text{eq.22}$$

em que

χ corresponde à fração da irradiância difusa, bloqueada pelo anel sombreador;

b'' é a largura do anel sombreador;

r' é o raio do anel sombreador; e

ψ_s é azimute do Sol no instante correspondente ao nascer-do-Sol, que pode ser calculado por:

$$\psi_s = \cos^{-1} \frac{-\sin \delta}{\cos \phi}, \quad \text{eq.23}$$

em que

ϕ é a latitude local (negativa no Hemisfério Sul e positiva no Hemisfério Norte); e

δ é a declinação solar (eq.6).

Para campos de radiação difusa anisotrópicos Drummond sugeriu, ainda, as seguintes correções para o cálculo da correção do efeito abóbada:

$$K'' = K' + 0,03 \text{ (céu totalmente coberto de nuvens);}$$

$$K'' = K' + 0,04 \text{ (céu parcialmente coberto); e}$$

$$K'' = K' + 0,07 \text{ (céu descoberto).} \quad \text{eq.24}$$

Os sensores, utilizados para a medição do número de horas de insolação (horas de brilho solar), são do tipo focalizador (Campbell-Stokes e Jordan), fotovoltaicos (Foster) ou termoelétricos (Marvin), sendo que todos estes instrumentos são registradores (WOOD, 1974). Na maioria das redes de Estações Meteorológicas do Brasil, o heliógrafo Campbell-Stokes é o aparelho mais utilizado (FOSTER e SANTOS, 1989).

2.2. Estimação da irradiância solar

A irradiância solar global, bem como suas componentes direta e difusa, tem sido estimada por diferentes modelos, que podem ser divididos em dois grupos: os modelos para dias de céu descoberto, que consideram separadamente as atenuações, sofridas pela radiação, ao atravessar a atmosfera (BRINE e IQBAL, 1981; SUCKLING e HAY, 1976; RIZZI et alii, 1980; BIRD e HULSTROM, 1981 e IQBAL, 1983) e os modelos que consideram a presença de nebulosidade, que relacionam a irradiância solar global, a direta e a difusa com diferentes variáveis, como a irradiância no topo da atmosfera, a insolação, a precipitação, a nebulosidade, o ângulo de elevação solar, o ângulo horário, o albedo da superfície terrestre etc. (LIU e JORDAN, 1960; IQBAL, 1979 a, b e 1983; SKARTVEIT e OLSETH,

1987; WENXIAN, 1988; GOPINATHAN, 1988; PEREZ et alii, 1990 e SOLER, 1990a, 1990b, 1992). As estimações são feitas para a obtenção de valores instantâneos, horários, diários e valores médios mensais.

2.2.1. *Estimação da irradiância solar para dias de céu descoberto*

Uma das formas de se determinar a irradiância solar global (I) para dias de céu descoberto é por meio da integração, ou somatório das irradiâncias espectrais direta (i_d) e difusa (i_d), conforme Apêndice B, ou por meio de aproximações paramétricas. As integrações espectrais consomem muito tempo, enquanto os modelos paramétricos são muito mais simples de serem utilizados.

Vários autores, como LECKNER (1978), DAVE (1978) e BRINE e IQBAL (1981), estudaram o desempenho de modelos espectrais comparando-os com valores espectrais medidos ou estimados, por meio de cálculos teóricos acurados. Os dados de entrada destes modelos são, em geral, a irradiância espectral no topo da atmosfera, o ângulo zenital do Sol, a quantidade de água precipitável, a quantidade e a distribuição de aerossóis, a massa ótica de ozônio e o albedo do solo, dentre outros.

Outros autores utilizam os modelos espectrais para avaliar o desempenho de modelos de aproximações paramétricas. RIZZI et alii (1980), por exemplo, mediante um modelo de integração espectral avaliaram o desempenho de um modelo de aproximação paramétrica, que relaciona a transmitância atmosférica, considerando apenas a absorção pelo vapor de água (τ_w), a transmitância atmosférica, considerando apenas a absorção e o espalhamento da radiação pelos aerossóis (τ_a) e a transmitância atmosférica, considerando apenas o espalhamento Rayleigh (τ_r), por meio de equações exponenciais, com o ângulo zenital do Sol (θ).

Existem inúmeros modelos de aproximações paramétricas. BIRD e HULSTROM (1981) avaliaram o desempenho de vários modelos

paramétricos (O modelo de Atwater e Ball, o de Hoyt, o de Lacis e Hansen, o de Machta, o de Ashrae e o de Majumdar), utilizando cálculos, realizados pelo SOLTRAN (originado do LOWTRAN), e também ajustaram um modelo que denominaram de Bird model.

GUEYMARD (1993) avaliou o desempenho de 11 modelos, desde aproximações paramétricas a modelos de integração espectral, e comparou os valores, estimados com dados observados, em sete cidades de diferentes partes do mundo, e com dados teóricos, concluindo que os modelos de integração espectral são mais acurados, sendo que, dentre os modelos de aproximações paramétricas testados, destacaram-se os modelos A e C, apresentados por IQBAL na estimação da irradiância direta; os modelos A (apresentado por IQBAL, 1983) e EEC (desenvolvidos por vários pesquisadores europeus) na estimação da irradiância difusa; e os modelos A, C (apresentados por IQBAL, 1983), MAC (desenvolvido por pesquisadores da Universidade de McMaster) e PSI (Parameterized Solar Irradiance) na estimação da irradiância global.

Apresentar-se-á o modelo paramétrico A (IQBAL, 1983), que foi utilizado no presente trabalho.

2.2.1.1. *Modelo A*

Vários autores, como PALTRIDGE e PLATT (1976), SUCKLING e HAY (1976) e os seguintes autores citados por IQBAL (1983): Davies et alii (1975), Davies e Hay (1978), Davies (1980) e Mächler (1983), contribuíram para o desenvolvimento do referido modelo.

2.2.1.1.1. *Irradiância solar direta*

A expressão básica para o cálculo da irradiância solar direta, instantânea, sobre uma superfície normal aos raios solares (i_n) foi sugerida por PALTRIDGE e PLATT, 1976, na seguinte forma:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{es} (\tau_o \tau_r - \alpha_w) \tau_a E_o, \quad \text{eq.25}$$

em que \dot{I}_{es} é a constante solar (1.367 W.m^{-2}), E_o é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (equação 2), vistos anteriormente. A absorvância atmosférica, considerando apenas o vapor de água como agente absorvedor, α_w , é calculada como

$$\alpha_w = 1 - \tau_w. \quad \text{eq.26}$$

A transmitância atmosférica, considerando apenas o ozônio como agente absorvedor, τ_o , é calculada como

$$\tau_o = 1 - \alpha_o. \quad \text{eq.27}$$

em que α_o é a absorvância atmosférica, considerando apenas a absorção pelo ozônio, podendo ser obtida pela equação, desenvolvida por LACIS e HANSEN (1974) e sugerida por PALTRIDGE e PLATT (1976), isto é:

$$\alpha_o = \frac{0,02118 U_3}{1 + 0,042 U_3 + 3,23 \times 10^{-4} U_3^2} + \frac{1,082 U_3}{(1 + 138,6 U_3)^{0,805}} + \frac{0,0658 U_3}{1 + (103,6 U_3)^3}. \quad \text{eq.28}$$

O primeiro termo da equação 28 representa a absorvância na parte visível do espectro, enquanto os dois últimos termos contabilizam a absorvância na porção ultravioleta do espectro solar (LACIS e HANSEN, 1974). U_3 é o produto da massa ótica da camada de ozônio na direção vertical, em cm CNTP, l , pela massa ótica relativa do "ar seco" ao nível do mar, $m_{r,po}$ (equação 13), isto é,

$$U_3 = l \cdot m_{r,po}. \quad \text{eq.29}$$

A Tabela 1 apresenta a massa ótica absoluta de ozônio na direção vertical, em cm CNTP (l).

Tabela 1 - Massa ótica de ozônio na direção vertical para diversas latitudes e meses do ano. Valores médios expressos em cm CNTP

LAT	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
90° N	0,33	0,39	0,46	0,42	0,39	0,34	0,32	0,30	0,27	0,26	0,28	0,30
80° N	0,34	0,40	0,46	0,43	0,40	0,36	0,33	0,30	0,28	0,27	0,29	0,31
70° N	0,34	0,40	0,45	0,42	0,40	0,36	0,34	0,31	0,29	0,28	0,29	0,31
60° N	0,30	0,39	0,42	0,40	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30	0,38	0,30	0,31
50° N	0,32	0,36	0,38	0,38	0,37	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,29	0,30
40° N	0,30	0,32	0,33	0,34	0,34	0,33	0,31	0,30	0,28	0,27	0,28	0,29
30° N	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,27
20° N	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25
10° N	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23
0°	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22
10° S	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23
20° S	0,24	0,25	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25
30° S	0,27	0,28	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,31	0,32	0,32	0,29	0,29
40° S	0,30	0,29	0,28	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,38	0,37	0,34	0,32
50° S	0,31	0,30	0,29	0,30	0,32	0,36	0,39	0,40	0,40	0,39	0,37	0,35
60° S	0,32	0,31	0,30	0,30	0,33	0,38	0,41	0,42	0,42	0,40	0,39	0,35
70° S	0,32	0,31	0,31	0,29	0,34	0,39	0,43	0,45	0,43	0,40	0,38	0,34
80° S	0,31	0,31	0,31	0,28	0,35	0,40	0,44	0,46	0,42	0,38	0,36	0,32
90° S	0,31	0,30	0,30	0,27	0,34	0,38	0,43	0,45	0,41	0,37	0,34	0,31

Fonte: ROBINSON, 1966.

A absorptância atmosférica, considerando apenas o vapor de água como agente absorvedor (α_w), é calculada pela equação, sugerida por PALTRIDGE e PLATT (1976) e desenvolvida por LACIS e HANSEN (1974), a partir do estudo conduzido por YAMAMOTO (1962), isto é, [segundo LACIS e HANSEN (1974), esta equação apresenta uma precisão de 1% para $0^{\cdot 2} < U_1 < 10$ cm]

$$\alpha_w = \frac{2,9 U_1}{(1 + 141,5 U_1)^{0,635} + 5,925 U_1}, \quad \text{eq.30}$$

em que U_1 é o produto da quantidade de água precipitável (w), em cm, e a massa ótica relativa do "ar seco" ao nível do mar ($m_{r,pp}$),

$$U_1 = w \cdot m_{r,pp}, \quad \text{eq.31}$$

em que a quantidade de água precipitável pode ser calculada pela equação de LECKNER (1978):

$$w = 0,493 \phi_r \cdot e_s / T, \quad \text{eq.32}$$

em que ϕ_r é a umidade relativa, em decimal, T é a temperatura do ar em Kelvin; e e_s é a pressão de saturação do vapor de água, calculada pela equação:

$$e_s = \exp(26,23 - 5416/T), \quad \text{eq.33}$$

Quando a quantidade de água precipitável é obtida em condições de pressão e temperatura diferentes das condições normais ($p_0 = 1,013,25$ mb e $T = 273$ K), deve-se fazer a seguinte correção:

$$w = 0,493 \phi_r \cdot (e_s / T) \cdot \left(\frac{p}{1013,25}\right)^{3/4} \left(\frac{273}{T}\right)^{1/2}, \quad \text{eq.34}$$

Para o cálculo da transmitância atmosférica, considerando apenas o espalhamento Rayleigh (τ_r), Davies et alii, 1975, citados por IQBAL (1983), sugerem a seguinte equação:

$$\tau_r = 0,972 - 0,08262m_{r,p} + 0,00933m_{r,p}^2 - 0,00095m_{r,p}^3 + 0,000437m_{r,p}^4, \quad \text{eq.35}$$

em que $m_{r,p}$ é a massa ótica relativa do ar seco para um dado nível de pressão (equação 15).

Com relação ao cálculo da transmitância atmosférica, considerando apenas o espalhamento e a absorção da radiação pelos aerossóis (τ_a), IQBAL (1983) cita a seguinte equação proposta por Houghton:

$$\tau_a = K^{m_{r,p}}, \quad \text{eq.36}$$

sendo K uma função da turbidez atmosférica local, determinada a partir de medições da irradiância solar direta, num intervalo espectral de 0,6 a 1,0 μm . Uma melhor aproximação pode ser obtida pela seguinte equação:

$$\tau_a = \left(\sum_{\lambda=0}^{\infty} \dot{I}_{0n\lambda} \exp(-\beta\lambda^{-\alpha} m_{r,p}) \Delta\lambda \right) / \dot{I}_{sc}, \quad \text{eq.37}$$

em que β é o coeficiente de turbidez de Ångström, que representa a quantidade de aerossóis existente em suspensão na atmosfera; e α é o expoente do comprimento de onda (λ), que se relaciona com a distribuição dos aerossóis por tamanho (Ångström, 1929 e 1930, citado por ÅNGSTRÖM, 1964).

Mächler, citado por IQBAL (1983), sugere a seguinte equação para o cálculo da transmitância atmosférica, considerando apenas o espalhamento e a absorção da radiação pelos aerossóis:

$$\tau_a = (0,12445\alpha - 0,0162) + (1,003 - 0,125\alpha) \times \exp[-\beta \cdot m_{r,p}(1,089\alpha + 0,5123)], \quad \beta < 0,5 \quad \text{eq.38}$$

É comum expressar a equação 38, em termos de visibilidade (V_{is}), isto é:

$$\tau_a = \left[0,97 - 1,265(V_{is})^{-0,66} \right]^{m_{r,p}^{0,9}}, \quad 5 < V_{is} < 180 \text{ km}, \quad \text{eq.39}$$

2.2.1.1.2. Irradiância solar difusa

O cálculo da irradiância solar difusa, instantânea, sobre uma superfície horizontal (i), conforme IQBAL (1983), pode ser realizado da seguinte forma:

$$i = i_{dr} + i_{da} + i_{dm}, \quad \text{eq.40}$$

em que

i_{dr} = irradiância solar difusa à superfície em questão, considerando apenas o espalhamento Rayleigh;

i_{da} = irradiância solar difusa à superfície em questão, produzida pelos aerossóis; e

i_{dm} = irradiância solar difusa à superfície em questão, associada às múltiplas reflexões da radiação pelo sistema solo-atmosfera.

A irradiância solar difusa, associada ao espalhamento Rayleigh, pode ser calculada como:

$$i_{dr} = i_{es} \cos \theta \tau_o [0,5(1 - \tau_r)] \tau_a, \quad \text{eq.41}$$

sendo \dot{I}_{es} a constante solar (1.367 W.m^{-2}) e θ é o ângulo zenital do Sol (equação 5). Neste cálculo, admite-se que metade da radiação que sofre o espalhamento Rayleigh atinge o solo, o que em outras palavras significa que o espalhamento ocorre simetricamente na direção de incidência e na direção contrária à de incidência.

A irradiância solar difusa à superfície em questão, produzida pelos aerossóis, pode ser obtida como:

$$\dot{I}_{da} = \dot{I}_{se} \cos \theta (\tau_o \tau_r - \alpha_w) [F_c \omega_o (1 - \tau_a)], \quad \text{eq.42}$$

sendo F_c é a fração do espalhamento total na direção de incidência da radiação e ω_o o albedo de espalhamento simples.

A irradiância solar difusa à superfície em questão, associada as múltiplas reflexões da radiação pelo sistema solo-atmosfera, pode ser calculada por:

$$\dot{I}_{dm} = (\dot{I}_n \cos \theta + \dot{I}_{dr} + \dot{I}_{da}) \rho_g \rho'_a / (1 - \rho_g \rho'_a), \quad \text{eq.43}$$

sendo ρ_g o albedo do solo e ρ'_a o albedo da atmosfera, o qual pode ser estimado por:

$$\rho'_a = 0,0685 + 0,17(1 - \tau_a) \omega_o, \quad \text{eq.44}$$

em que τ_a é a transmitância atmosférica, considerando apenas o espalhamento e a absorção pelos aerossóis, calculada para $m_{r,p} = 1,66 \text{ p/p}_o$.

2.2.1.1.3. Irradiância solar global

A irradiância solar global sobre uma superfície horizontal pode ser estimada, por meio desta equação:

$$\dot{I} = \dot{I}_n \cos \theta + \dot{I}_d = (\dot{I}_n \cos \theta + \dot{I}_{dr} + \dot{I}_{da}) \left(\frac{1}{1 - \rho_g \rho'_a} \right), \quad \text{eq.45}$$

2.2.2. *Estimação da irradiância solar para dias com nebulosidade*

2.2.2.1. *Correlação entre irradiância solar e insolação*

A insolação, ou número de horas de brilho solar, é medida em muitas localidades do mundo e, geralmente, a maioria dispõe de longas séries de dados de insolação.

Existe uma correlação positiva entre a quantidade de energia solar incidente e o número de horas de brilho solar. Em 1924, Ångström, citado por BENINCASA et alii (1993), propôs a seguinte relação:

$$\bar{H}/\bar{H}_0' = a_1 + (1 - a_1) \bar{n}/\bar{N}_m, \quad \text{eq.46}$$

em que

\bar{H} = irradiância solar global diária, média mensal sobre uma superfície horizontal ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

\bar{H}_0' = irradiância solar global diária, média mensal, recebida em uma superfície horizontal, ao nível do solo, em um dia completamente "limpo" (sem nuvens) ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);

\bar{n} = insolação média mensal (horas);

\bar{N}_m = duração máxima da insolação média mensal (horas); e

a_1 = fração da radiação solar, recebida em um dia completamente coberto por nuvens, em relação a outro completamente "limpo".

PRÉSCOTT (1940), propôs uma modificação à metodologia original de Ångström, resultando no seguinte modelo:

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = a + b (\bar{n}/\bar{N}), \quad \text{eq.47}$$

em que \bar{H}_0 é a irradiância solar diária, média mensal sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera (podendo ser calculada pela equação 10);

\bar{N} é a duração do dia, média mensal, podendo ser calculada como $\bar{N} = \frac{1}{n_d} \sum N$, sendo n_d o número de dias do mês e N a duração do dia, isto é,

$$N = \frac{2 H'}{15^\circ}, \quad \text{eq.48}$$

em que H' é o ângulo horário do Sol correspondente ao instante do pôr-do-Sol, o qual pode ser calculado por:

$$H' = \text{arc cos} (- \text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta), \quad \text{eq.49}$$

Vários autores determinaram os coeficientes **a** e **b** do modelo de Ångström-Préscott (equação 47), valores mensais, sazonais e anuais, para diferentes localidades em todo o mundo. Citam-se os seguintes autores: para a Grécia: KATSOULIS e LEONTARIS, 1981; para o Líbano: SFEIR, 1981; para Nova Guiné: YEBOAH-AMANKWAH e AGYEMAN, 1990; para a Índia: SRIVASTAVA et alii, 1993; para o Egito: KAMEL et alii, 1993; para o Brasil: Viçosa-MG - ALVES, 1981; Jaboticabal-SP - BENINCASA, 1993 e Ipanguassu-RN - SARAIVA, 1994. ALVES (1981) cita os trabalhos realizados para várias cidades de SP, Cervellini et alii, 1966; Presidente Prudente - Tarifa, 1972; Botucatu - SP - Tubelis et alii, 1976 e outros.

RIETVELD (1978), examinando os valores dos coeficientes **a** e **b**, apresentados na literatura, chegou à conclusão de que o coeficiente **a** relaciona-se linearmente e **b** hiperbolicamente, com valores de razão de insolação médios (\bar{n}/\bar{N}), e propôs a seguinte equação:

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = 0,18 + 0,62 (\bar{n}/\bar{N}), \quad \text{eq.50}$$

Alguns autores incluíram nas correlações fatores geográficos, como altitude e latitude, GLOVER e McCULLOCH (1958) consideraram o efeito da latitude e apresentaram a seguinte relação para $\phi < 60^\circ$:

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = 0,29 \cos \phi + 0,52 (\bar{n}/\bar{N}), \quad \text{eq.51}$$

O efeito da altitude foi estudado por BENNETT (1965), resultando no seguinte modelo:

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = a_1 + b_1 (\bar{n}/\bar{N}) + c_1 \cdot h, \quad \text{eq.52}$$

em que h é a altitude do local, em metros. Gopinathan (1988), citado por AKINOGLU e ECEVIT (1990), relacionou os coeficientes a e b do modelo de Ångström-Prèscott com a altitude, resultando as equações:

$$a = 0,265 + 0,07 h - 0,135 (\bar{n}/\bar{N}), \quad \text{eq.53}$$

$$b = 0,401 + 0,108 h - 0,325 (\bar{n}/\bar{N}). \quad \text{eq.54}$$

O mesmo autor, em outro trabalho (citado por SOLER, 1990b), correlacionou os coeficientes a e b com a latitude.

Ögelman (1984), citado por AKINOGLU e ECEVIT (1990) e WAHAB (1993), propôs o uso de uma relação quadrática, entre a radiação global e a razão de insolação, isto é:

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = 0,195 + 0,676 (\bar{n}/\bar{N}) - 0,142 (\bar{n}/\bar{N})^2. \quad \text{eq.55}$$

Segundo HINRICHSEN (1994), estudando a relação existente entre os coeficiente a e b com as frações difusa e direta, para Hamburgo (Alemanha), o coeficiente a representa a fração difusa da radiação global e o coeficiente b a fração direta.

Outros autores relacionaram a irradiância solar direta e a difusa com a razão de insolação, IQBAL (1979a) propôs as seguintes equações

polinomiais para o cálculo da irradiância difusa e direta, com base em dados de várias localidades do Canadá:

$$\bar{H}_d / \bar{H}_0 = 0,163 + 0,478 (\bar{n} / \bar{N}) - 0,655 (\bar{n} / \bar{N})^2 \quad \text{eq.56}$$

$$\bar{H}_b / \bar{H}_0 = 0,176 + 1,45 (\bar{n} / \bar{N}) - 1,12 (\bar{n} / \bar{N})^2, \quad \text{eq.57}$$

em que \bar{H}_d é a irradiância solar difusa diária, média mensal e \bar{H}_b é a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal.

JAIN (1990), trabalhando com dados de três localidades diferentes, Macerata (Itália), Salisbury e Bulawayo (Zimbabwe), correlacionou a irradiância solar difusa com a razão de insolação, utilizando a clássica metodologia de Ångström-Prèscott (sendo que esta foi proposta originalmente para estimar a irradiância global), isto é:

$$\bar{H}_d / \bar{H}_0 = a_2 + b_2 (\bar{n} / \bar{N}), \quad \text{eq.58}$$

HUSSAIN (1992), trabalhando com dados de radiação de sete localidades, que representavam três regiões climáticas da Índia, com dados de períodos, que variaram de 100 a 225 meses, correlacionou a irradiância solar direta com a insolação, por meio da mesma metodologia de Ångström-Prèscott (adaptada para estimar a irradiância direta), porém com coeficiente linear nulo, isto é:

$$\bar{H}_b / \bar{H}_0 = b_0 (\bar{n} / \bar{N}), \quad \text{eq.59}$$

em que b_0 é um índice de transparência da atmosfera, determinado para cada mês do ano para cada localidade. HUSSAIN (1992), neste mesmo trabalho, estudou a correlação entre o parâmetro b_0 e o fator de turbidez de Linke.

2.2.2.2. Estimação da irradiância solar difusa e direta a partir da irradiância global

Vários autores estudaram a correlação entre a razão da irradiância solar *difusa diária* sobre uma superfície horizontal e a irradiância *diária* no topo da atmosfera (H_d/H_0) com a razão, entre a irradiância solar *global diária* e a irradiância no topo da atmosfera (H/H_0). LIU e JORDAN (1960) desenvolveram, para Blue Hill, Mass., EUA (latitude 42°13'N), com base em 10 anos de dados, uma correlação entre H_d/H_0 e H/H_0 , que foi reexaminada por vários autores, por não levar em conta a correção do efeito abóbada. BRUNO (1978) apresenta esta correlação da seguinte forma:

$$H_d/H_0 = 0,294 (H/H_0) + 0,1445 \text{ sen } [4,97 (H/H_0)], \quad \text{eq.60}$$

em que o argumento da função seno é dado em radianos, e H/H_0 representa o índice de cobertura diário do céu (K_t).

Page (1961), citado por SOLER (1990b), observou a seguinte correlação linear:

$$\bar{H}_d/\bar{H} = c + d \bar{H}/\bar{H}_0, \quad \text{eq.61}$$

em que \bar{H} , \bar{H}_0 , \bar{H}_d são, respectivamente, a irradiância global, a irradiância no topo da atmosfera e a irradiância difusa, diária média mensal sobre uma superfície horizontal, e c e d coeficientes que variam com o local.

RUTH e CHANT (1976), utilizando dados de vários anos de quatro estações canadenses, chegaram à seguinte correlação polinomial:

$$\begin{aligned} H_d/H &= 0,98 \quad K_t \leq 0,1, \\ H_d/H &= 0,910 + 1,154K_t - 4,936K_t^2 + 2,848K_t^3 \quad 0,1 \leq K_t \leq 0,7. \end{aligned} \quad \text{eq.62}$$

Alguns autores estudaram a interdependência de outros fatores, como a elevação do Sol, a latitude e a nebulosidade e as razões entre:

irradiância global e irradiância no topo da atmosfera; irradiância difusa e irradiância no topo da atmosfera; e irradiância direta e irradiância no topo da atmosfera, tanto para valores diários quanto para horários (SOLER 1990a, 1990b e 1992; SPENCER 1982 e IQBAL ,1979b).

Dentre os modelos que correlacionam a razão entre a irradiância solar difusa horária e a irradiância solar no topo da atmosfera (I_d/I_0) com a razão, entre a irradiância solar global horária e a irradiância solar no topo da atmosfera (I/I_0 ou M_t), citar-se-ão os utilizados neste trabalho.

2.2.2.2.1. Modelo de Orgill e Hollans

ORGILL e HOLLANS (1977) desenvolveram um modelo para Toronto, Canadá, latitude 43°48'N, com dados obtidos num período de quatro anos, e obtiveram as seguintes equações:

$$\begin{aligned} I_d / I &= 1,0 - 0,249 M_t, & 0 \leq M_t \leq 0,35; \\ I_d / I &= 1,577 - 1,84 M_t, & 0,35 \leq M_t \leq 0,75; \\ I_d / I &= 0,177, & M_t > 0,75. \end{aligned} \quad \text{eq.63}$$

2.2.2.2.2. Modelo de Erbs et alii

ERBS et alii (1982) desenvolveram um modelo, utilizando dados de cinco estações dos EUA, localizadas entre as latitudes de 31°N e 42°N. Os dados variaram de um a quatro anos, e as equações obtidas foram as seguintes:

$$\begin{aligned} I_d / I &= 1,0 - 0,09 M_t, & 0 \leq M_t < 0,22; \\ I_d / I &= 0,9511 - 0,1604M_t + 4,388M_t^2 + 16,638M_t^3 + 12,336M_t^4, & 0,22 \leq M_t \leq 0,80; \\ I_d / I &= 0,165, & M_t > 0,80. \end{aligned} \quad \text{eq.64}$$

2.2.2.2.3. Modelo de Spencer

O aumento da latitude resulta numa maior massa ótica relativa média diária (IQBAL, 1983). No sentido de incluir o efeito da latitude, SPENCER (1982), utilizando dados de 12 estações, localizadas entre as latitudes de 20°S e 45°S, com séries, variando de um a cinco anos, obteve as seguintes relações:

$$\begin{aligned} I_d / I &= a' , & 0 \leq M_t < 0,35; \\ I_d / I &= b' - c' M_t , & 0,35 \leq M_t \leq 0,75; \\ I_d / I &= d' , & M_t > 0,75. \end{aligned} \quad \text{eq.65}$$

sendo a' , b' , c' e d' parâmetros dependentes da latitude (ϕ), conforme se segue:

$$\begin{aligned} b' &= 0,940 + 0,0118 |\phi| , \\ c' &= 1,185 + 0,0135 |\phi| , \\ a' &= b' - 0,30 c' , \\ d' &= b' - 0,75 c' . \end{aligned} \quad \text{eq.66}$$

2.2.2.2.4. Modelo de Boes et alii

Boes et alii, citados por IQBAL (1983), com base em um ano de dados de três estações dos EUA, entre as latitudes de 35°N e 42°N, desenvolveram um modelo que fornece diretamente a irradiância solar direta sobre uma superfície normal aos raios solares (I_n), isto é,

$$\begin{aligned} I_n &= 400 , & \alpha' \leq 10 \text{ e } M_t > 0,50 ; \\ I_n &= -520 + 1800 M_t , & 0,30 \leq M_t \leq 0,85 ; \\ I_n &= 1000 , & M_t > 0,85 . \end{aligned} \quad \text{eq.67}$$

sendo α' o ângulo de elevação do Sol.

2.2.2.2.5. Modelo de Skartveit e Olseth

SKARTVEIT e OLSETH (1987), utilizando uma série de 12 anos de dados, obtidos em Aas (59,7°N), Noruega, e cinco anos de dados de Vancouver (49,3°N), Canadá, obtiveram as seguintes relações:

$$\begin{aligned}
 I_d / I &= 1,0, & M_t &\leq 0,2; \\
 I_d / I &= 1 - \left[(1 - d_{s1}) (0,27 \sqrt{K_s}) + 0,73 K_s^2 \right], & 0,2 < M_t < 1,09 K_{s1}; \\
 I_d / I &= 1 - \left[1,09 K_{s1} (1 - K_s') / M_t \right], & M_t &\geq 1,09 K_{s1}.
 \end{aligned}$$

eq.68

em que K_s , K_{s1} e K_s' dependem do ângulo horário do Sol, ω (equação 7), como segue:

$$\begin{aligned}
 K_s &= 0,5 \left(1 + \operatorname{sen} \pi \left(\frac{M_t - 0,20}{K_{s1} - 0,20} - 0,5 \right) \right), \\
 K_{s1} &= 0,87 - 0,56 e^{(-0,06 \omega)}, \\
 K_s' &= 1 - (1 - d_{s1}) (0,27 \sqrt{(K_s'')}) + 0,73 (K_s'')^2), & \text{eq.69} \\
 K_s'' &= 0,5 \left(1 + \operatorname{sen} \pi \left(\frac{1,09 K_{s1} - 0,20}{K_{s1} - 0,20} - 0,5 \right) \right), \\
 d_{s1} &= 0,15 + 0,43 e^{(-0,06 \omega)}.
 \end{aligned}$$

2.2.2.2.6. Modelo de Maxwell

Maxwell, citado por PEREZ et alii (1990), desenvolveu um modelo semi-empírico para estimar a irradiância solar direta sobre uma superfície normal aos raios solares (I_n). Este modelo é o resultado do ajuste de um modelo para céu descoberto a dados experimentais, obtidos em quaisquer outras condições de nebulosidade. Matematicamente pode ser expresso como

$$I_n = I_0 \left\{ K_{nc} \cdot \left[A + B e^{(m_{r,p} C)} \right] \right\}, \quad \text{eq.70}$$

em que K_{nc} é uma função da massa ótica relativa do "ar seco", em um dado nível de pressão; e $m_{r,p}$, e A , B e C são funções do índice M_t , como se segue:

$$K_{nc} = 0,866 - 0,0121 m_{r,p}^2 - 0,000653 m_{r,p}^3 + 0,000014 m_{r,p}^4 ;$$

Para $M_t \leq 0,6$ tem-se:

$$A = 0,512 - 1,560 M_t + 2,286 M_t^2 - 2,222 M_t^3 ,$$

$$B = 0,370 + 0,962 M_t ,$$

$$C = -0,280 + 0,932 M_t - 2,048 M_t^2 , \quad \text{eq.71}$$

Para $M_t > 0,6$ tem-se:

$$A = -5,743 + 21,770 M_t - 27,490 M_t^2 + 11,560 M_t^3 ,$$

$$B = 41,400 - 118,500 M_t + 66,050 M_t^2 + 31,900 M_t^3 ,$$

$$C = -47,010 + 184,200 M_t - 222,000 M_t^2 + 73,810 M_t^3 .$$

3. MATERIAIS

Coletaram-se dados de irradiância solar global e difusa, utilizando dois piranômetros fotovoltaicos, sendo um sombreado por um anel, instalados em uma estação automática de aquisição de dados, ELE, localizada no DEA/UFV, Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa-MG, durante o período de julho de 1993 a novembro de 1994. O desempenho do piranômetro fotovoltaico foi considerado excelente, em comparação com um Eppley, usado como referência (Apêndice D).

A estação foi programada, de forma a coletar dados de um em um minuto, e a cada 30 minutos registravam-se os valores médios de irradiância global e difusa. Os dados foram coletados, utilizando um microcomputador portátil. O relógio da estação era frequentemente ajustado para indicar o tempo solar verdadeiro, utilizando-se a equação do tempo (E_t) e a correção de -8,6 minutos, em virtude da diferença de latitude entre Viçosa e Brasília. Spencer (1971), citado por IQBAL (1983), sugeriu a seguinte equação do tempo, que foi utilizada neste trabalho:

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos X - 0,032077 \operatorname{sen} X - 0,014615 \cos 2X - 0,04089 \operatorname{sen} 2X)(229,18), \quad \text{eq.72}$$

sendo o ângulo X , em radianos, determinado pela equação 3.

O anel de sombreamento para a medição de irradiância solar difusa apresentou as seguintes dimensões: largura de 10,3 cm e raio de 36,3 cm. A correção do efeito abóbada foi feita pelo uso da equação 21.

A irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal foi obtida, por meio da subtração entre a irradiância solar global e a difusa corrigida.

Foram utilizados, também, dados de irradiância solar global, obtidos num actinógrafo Siap-Bologna, instalado na estação Climatológica Principal de Viçosa (convênio INMET/UFV), devidamente calibrado, tendo um piranômetro Eppley como padrão secundário (Apêndice C). Utilizaram-se dados referentes aos períodos de julho a outubro de 1993 e março a junho de 1994.

Os dados de insolação, utilizados neste trabalho, foram obtidos, por meio de um heliógrafo Campbell-Stokes, também pertencente à estação Climatológica Principal de Viçosa (convênio INMET/UFV). Estes dados referiram-se ao período de janeiro de 1968 a novembro de 1994.

Desta mesma estação, utilizaram-se os registros de temperatura do ar, pressão e umidade relativa, referentes ao período de julho de 1993 a novembro de 1994.

4. MÉTODOS UTILIZADOS E RESULTADOS OBTIDOS

4.1. *Avaliação de metodologias para determinar a irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal, a partir dos registros do actinógrafo*

Avaliaram-se neste trabalho duas metodologias para determinar a irradiância solar direta horária, sobre uma superfície horizontal, a partir dos registros do actinógrafo. Selecionaram-se os actinogramas, nos quais as oscilações no registro da radiação solar global, no período de duas horas, eram visíveis, ou seja, o registro do actinógrafo apresentava pontos baixos e altos, resultantes de subidas e descidas consecutivas da pena do aparelho (os pontos baixos podem ser um indicativo da irradiância difusa instantânea). Paralelamente, os registros do heliógrafo foram utilizados no sentido de selecionar os períodos, em que a insolação foi inferior a 20% do total (0,4 hora, em 2 h), os quais foram eliminados.

Determinou-se, usando os actinogramas selecionados, a irradiância solar difusa para intervalos de duas horas (uma vez que os actinogramas são divididos em intervalos de duas horas), por duas metodologias diferentes. Na primeira, a radiação difusa foi estimada, a partir da área sob a curva de radiação difusa, curva esta obtida, ligando-se

os pontos mais baixos do registro do actinógrafo. Pela segunda metodologia, estimou-se a irradiância difusa para intervalos de tempo de duas horas da seguinte forma:

- de 10 às 12 horas e de 12 às 14 horas, considerou-se a irradiância solar difusa, como a área do retângulo, cuja altura correspondia ao valor mínimo registrado no período; e

- de 8 às 10 horas e de 14 às 16 horas, utilizou-se do mesmo procedimento da primeira metodologia.

Uma vez estimada a irradiância solar difusa por estes dois métodos, a irradiância direta foi obtida por diferença, entre a global e a difusa.

Por meio de análise de regressão linear, entre os dados de irradiância solar direta, estimada (actinógrafo) e medida (piranômetros), conforme ilustra a Figura 1, obteve-se, utilizando a primeira metodologia, coeficiente de determinação (r^2) de 0,40 e um erro-padrão de estimativa (EPE) $135,93 \text{ W.m}^{-2}$. Para a segunda metodologia, obteve-se r^2 igual a 0,39 e EPE $136,79 \text{ W.m}^{-2}$.

Analisou-se também o desempenho do actinógrafo para medição da irradiância global em duas horas, obtendo-se r^2 igual a 0,62 e EPE de $142,62 \text{ W.m}^{-2}$ (Figura 2).

Os resultados obtidos indicam que o actinógrafo é um aparelho que não se presta para a determinação acurada da irradiância solar global e muito menos da direta, para curtos intervalos de tempo (duas horas), provavelmente, em razão do alto tempo de resposta, associado ao seu princípio de funcionamento (termomecânico).

Desta forma, descarta-se a hipótese de se poder levantar o potencial de radiação solar direta para o Brasil, em base horária, usando as séries de dados actinométricos do INMET.

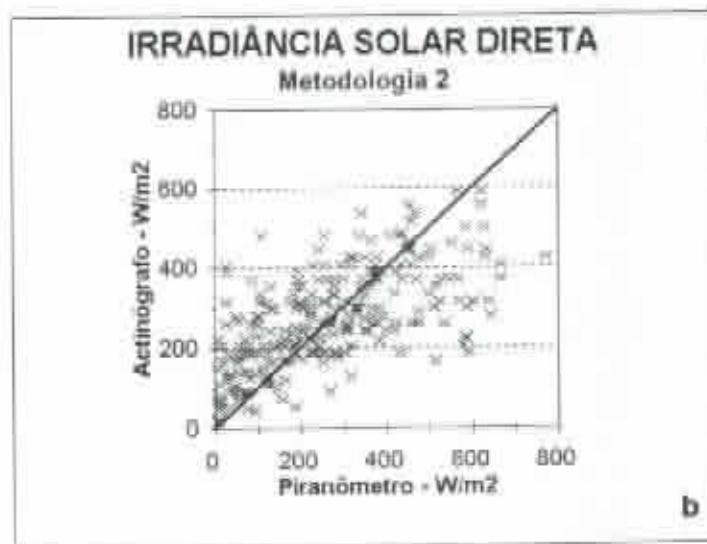
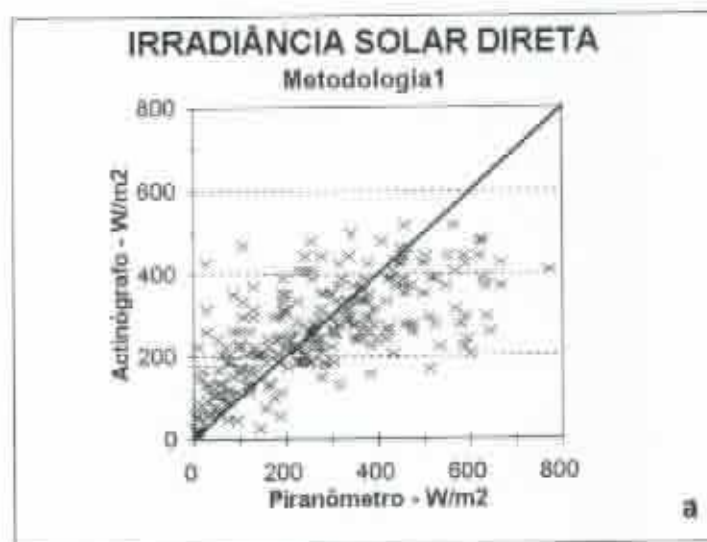


Figura 1 - Irradiância solar direta, média de duas horas, em W/m^2 , determinada a partir dos registros do actinógrafo, de acordo com as metodologias 1 (a) e 2 (b) "versus" irradiância, medida por piranômetros para Viçosa-MG.

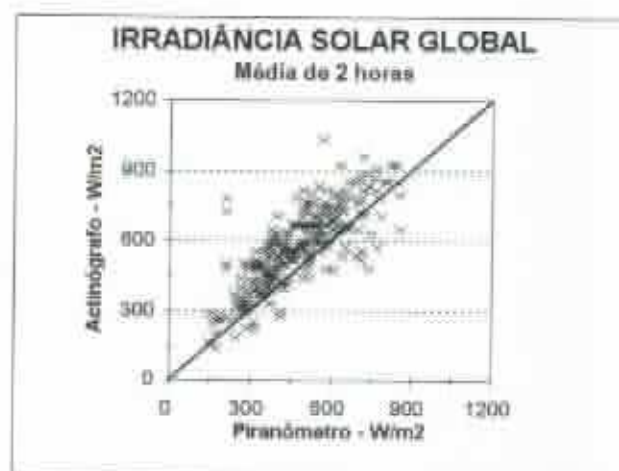


Figura 2 - Irradiância solar global, média de duas horas, em W/m^2 , obtida pelos registros do actinógrafo “versus” irradiância, medida pelo piranômetro para Viçosa-MG.

4.2. *Estimação da irradiância solar global diária a partir da insolação*

Avaliou-se, neste trabalho, o desempenho de modelos clássicos para a estimação da irradiância solar global diária (H), em função de H_0 (irradiância solar diária no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal) e da razão de insolação, n/N , em que n é a insolação diária e N , a duração do dia. Avaliou-se, também, o desempenho do actinógrafo para a medição da irradiância solar global diária.

Os dados de insolação (n) foram obtidos por um heliógrafo Campbell-Stokes, como já mencionado, e os valores de H_0 e N foram calculados, diariamente, pelas Equações 10 e 48, respectivamente.

Os dados actinográficos de irradiância solar global diária foram obtidos, por meio de planimetria dos actinogramas, referentes ao período de julho a outubro de 1993 e de março a junho de 1994. Os dados de irradiância solar global diária, utilizados para avaliar o desempenho do actinógrafo e dos diferentes modelos, relacionados a seguir, foram obtidos, por meio de um piranômetro fotovoltaico, de julho de 1993 a novembro de 1994.

Os modelos, testados para estimar a irradiância solar diária, foram os seguintes:

- a - Modelo de Ångström-Prèscott:** Este modelo (equação 47) foi utilizado com os coeficientes **a** e **b**, determinados por ALVES (1981) para Viçosa-MG, conforme Tabela 2.
- b - Modelo de Bennett:** A Tabela 3 apresenta os coeficientes a_F , b_F e c_F do modelo de Bennett (equação 52).
- c - Modelo de Glover e McCulloch:** Este é o próprio modelo de Ångström-Prèscott, com os coeficientes **a** e **b**, estimados com $a = 0,29$ e $b = 0,52$ (equação 51).
- d - Modelo de Rietveld:** Trata-se do modelo de Ångström-Prèscott, com os coeficientes **a** e **b**, considerados constantes, sendo $a = 0,18$ e $b = 0,62$ (equação 50).

Tabela 2 - Valores mensais dos coeficientes **a** e **b**, do modelo de Ångström-Prèscott, para Viçosa - MG

Meses	a	b
Janeiro	0,233	0,363
Fevereiro	0,256	0,361
Março	0,275	0,321
Abril	0,235	0,373
Maio	0,220	0,396
Junho	0,239	0,346
Julho	0,251	0,359
Agosto	0,220	0,369
Setembro	0,203	0,417
Outubro	0,186	0,448
Novembro	0,202	0,427
Dezembro	0,236	0,334

Fonte: ALVES, 1981.

Tabela 3 - Valores mensais dos coeficientes a_1 , b_1 e c_1 do modelo de Bennett, adaptados para o Hemisfério Sul

Meses	a_1	b_1	c_1
Janeiro	0,225	0,4812	$6,99 \times 10^{-5}$
Fevereiro	0,221	0,5026	$6,36 \times 10^{-5}$
Março	0,221	0,5142	$4,72 \times 10^{-5}$
Abril	0,188	0,5574	$5,02 \times 10^{-5}$
Maió	0,197	0,5423	$4,13 \times 10^{-5}$
Junho	0,235	0,4780	$4,36 \times 10^{-5}$
Julho	0,264	0,4386	$4,26 \times 10^{-5}$
Agosto	0,291	0,3768	$6,20 \times 10^{-5}$
Setembro	0,260	0,4242	$5,67 \times 10^{-5}$
Outubro	0,235	0,4744	$4,82 \times 10^{-5}$
Novembro	0,207	0,4816	$7,41 \times 10^{-5}$
Dezembro	0,237	0,4343	$7,22 \times 10^{-5}$

Fonte: NUNES et alii, 1978.

A Figura 3 apresenta os valores, estimados "versus" valores medidos, para os quatro modelos testados. A Figura 4 ilustra os valores, medidos no actinógrafo "versus" valores medidos no piranômetro.

A Tabela 4 sumaria os resultados obtidos, ao testar os diferentes modelos (481 dados) e o actinógrafo (191 dados), tendo um piranômetro fotovoltaico como referência.

Os resultados mostram que os modelos testados estimaram a irradiância global diária, com um erro-padrão de estimativa da ordem de $2,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, sendo que o coeficiente de determinação variou de 0,88 a 0,90.

É importante notar que o actinógrafo utilizado forneceu resultados bem semelhantes aos dos modelos empíricos testados, embora com r^2 ligeiramente menor e maior erro. Ressalta-se que o referido actinógrafo, um Siap-Bologna, havia sido calibrado recentemente.

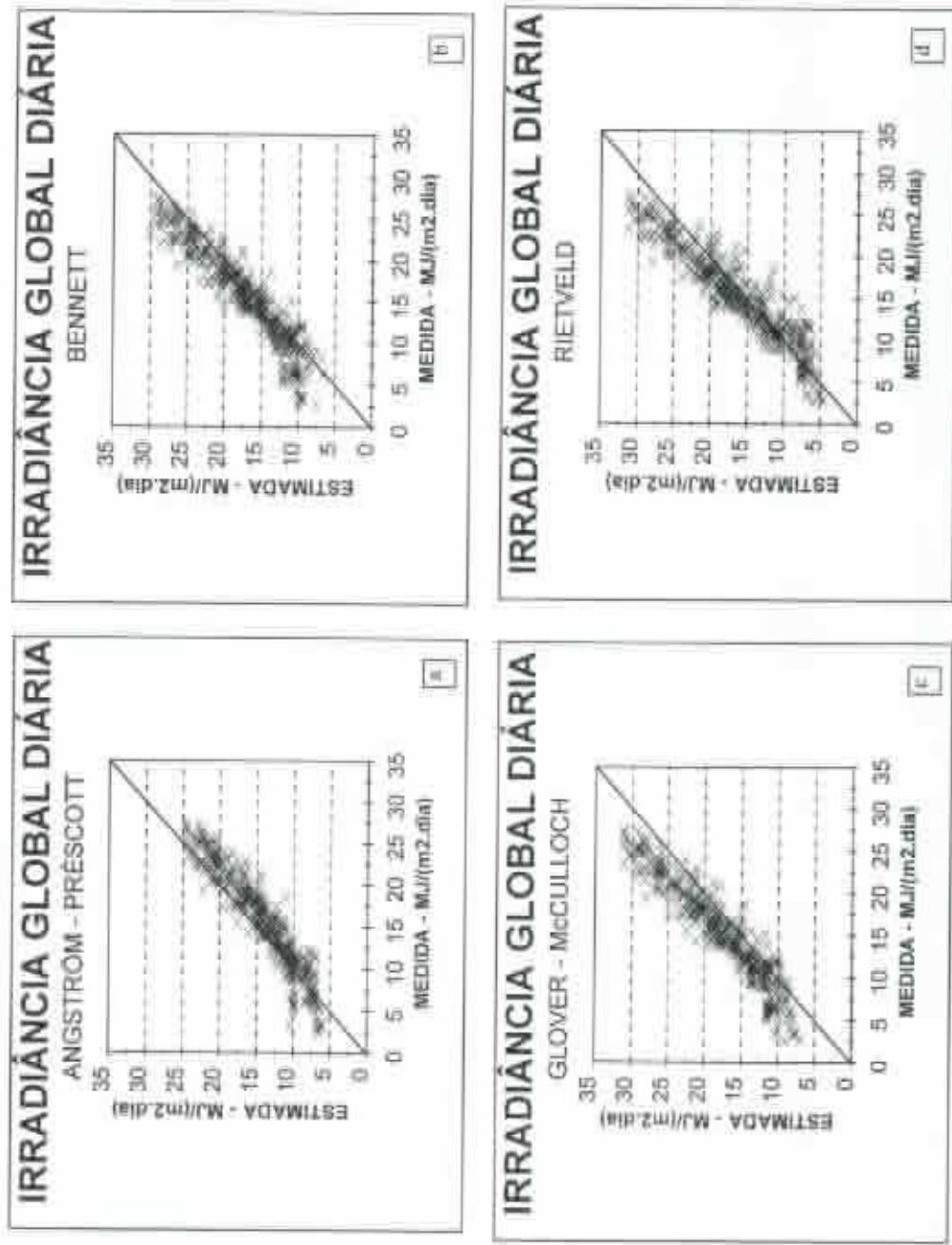


Figura 3 - Irradiância solar global diária, MJ / (m².dia), estimada pelos modelos de Angström-Préscott (a), Bennett (b), Glover-McCulloch (c) e Rietveld (d) "versus" a medida pelo piranômetro para Viçosa-MG.



Figura 4 - Irradiância solar global diária, MJ/(m².dia), medida pelo actinógrafo "versus" irradiância, medida pelo piranômetro para Viçosa-MG.

Tabela 4 - Coeficiente de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE)¹, e erro médio (EM)², obtidos ao testar os diferentes modelos para a estimação da irradiância global diária e o actinógrafo, tendo um piranômetro fotovoltaico como referência

Modelos e Actinógrafo	r^2	EPE MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	EM MJ.m ⁻² .dia ⁻¹
Ångström-Prèscott	0,89	2,38	-1,42
Bennett	0,88	2,46	1,57
Glover e McCulloch	0,90	3,11	2,46
Rietveld	0,89	2,66	1,04
Actinógrafo	0,86	2,74	2,02

$$(1) \text{ EPE} = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{\text{est}})^2}{N}}$$

$$(2) \text{ EM} = \frac{\sum (Y_{\text{est}} - Y)}{N}$$

sendo Y = valor observado, Y_{est} = valor estimado e N = número de observações.

O modelo, que apresentou melhor resultado para Viçosa, foi o modelo de Ångström-Prèscott, com coeficientes mensais **a** e **b** determinados para Viçosa (sendo estes coeficientes obtidos, usando dados de um actinógrafo Fuess, e não o utilizado no presente trabalho). Isto mostra a importância de determinar os coeficientes **a** e **b** para localidades, que possuem longas séries de dados diários de radiação global, mesmo quando se trata de dados actinométricos.

Observa-se que o modelo de Ångström-Prèscott subestimou a irradiância solar global diária ($EM < 0$), enquanto os outros modelos testados e o actinógrafo Siap-Bologna superestimaram a irradiância global ($EM \geq 0$).

Em termos gerais, todos os modelos testados estimaram razoavelmente bem, para fins de engenharia, a irradiância solar global numa superfície horizontal, apresentando resultados inclusive melhores que o rústico actinógrafo Siap-Bologna.

4.3. *Estimação da irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal, a partir do índice de transparência atmosférica*

Avaliou-se o desempenho de diversos modelos, desenvolvidos para diferentes localidades do mundo, para estimação da irradiância solar direta horária, a partir do índice de transparência atmosférica, razão entre a irradiância solar global horária e a irradiância solar horária no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal (I / I_0). Os modelos testados foram: Liu e Jordan (equação 60), Orgill e Hollans (equação 63), Erbs et alii (equação 64), Spencer (equações 65 e 66); Boes et alii (equação 67); Skartveit e Olseth (equações 68 e 69) e Maxwell (equações 70 e 71).

Dentre os modelos testados, os únicos, desenvolvidos para a estimação da irradiância solar direta, foram os de Boes et alii e o de Maxwell, enquanto os outros modelos foram desenvolvidos para a

estimação da irradiância solar difusa, sendo a direta obtida por diferença entre a global e a difusa.

Foram utilizados de dados horários de irradiância solar global e difusa, referentes ao período de julho de 1993 a junho de 1994, a partir dos quais obteve-se, por diferença, a irradiância solar direta, resultando num total de 3.529 valores horários.

Para a estimação da irradiância solar direta, usaram-se as equações 60, 63 e 71. Ressalta-se que a equação 60 foi desenvolvida para dados diários. Portanto, fez-se uso da seguinte versão, citada por SPENCER (1982):

$$I_d/I_o = 0,294 (I/I_o) + 0,1445 \text{ sen} [4,97 (I/I_o)], \quad \text{eq.73}$$

em que I_d é a irradiância solar difusa horária; I_o é a irradiância horária sobre uma superfície horizontal no topo da atmosfera (equação 9); e I é a irradiância solar global horária.

As Figuras 5 e 6 apresentam os valores estimados pelos diferentes modelos, em confronto com os dados, obtidos por meio dos piranômetros, e a Tabela 5 sumaria os resultados do teste, mostrando o coeficiente de determinação (r^2), o erro-padrão de estimativa (EPE) e o erro médio (EM).

Estes resultados mostram que os modelos, utilizados na estimação da irradiância solar direta, empregando dados de irradiância solar global provenientes do piranômetro, em geral, apresentaram resultados satisfatórios, à exceção do modelo de Maxwell. O modelo de Spencer foi o que apresentou o menor coeficiente de determinação ($r^2 = 0,86$) e um dos mais altos erros, enquanto os modelos de Liu e Jordan, Boes et alii e Erbs et alii apresentaram o maior coeficiente de determinação ($r^2 = 0,94$) e os menores erros. Dentre os modelos testados, o modelo de Spencer e o modelo de Liu e Jordan foram os únicos que superestimaram a irradiância solar direta ($EM > 0$).

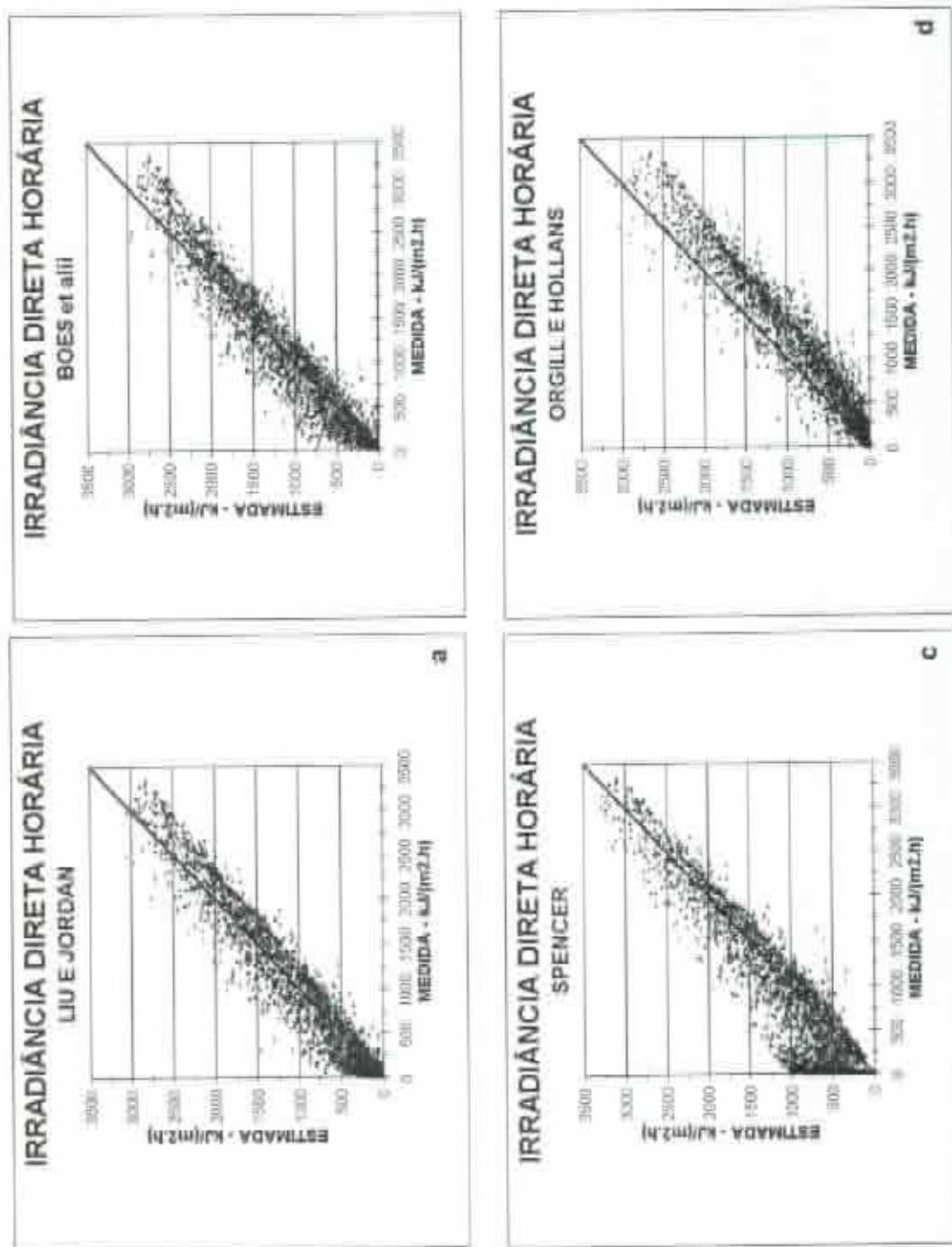


figura 5 - Irradiância solar direta horária, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, estimada pelos modelos de Liu e Jordan (a), Boes et alii (b), Spencer (c) e Orgill e Hollans (d), em confronto com os dados, obtidos por meio de piranômetros fotovoltaicos para Viçosa - MG.

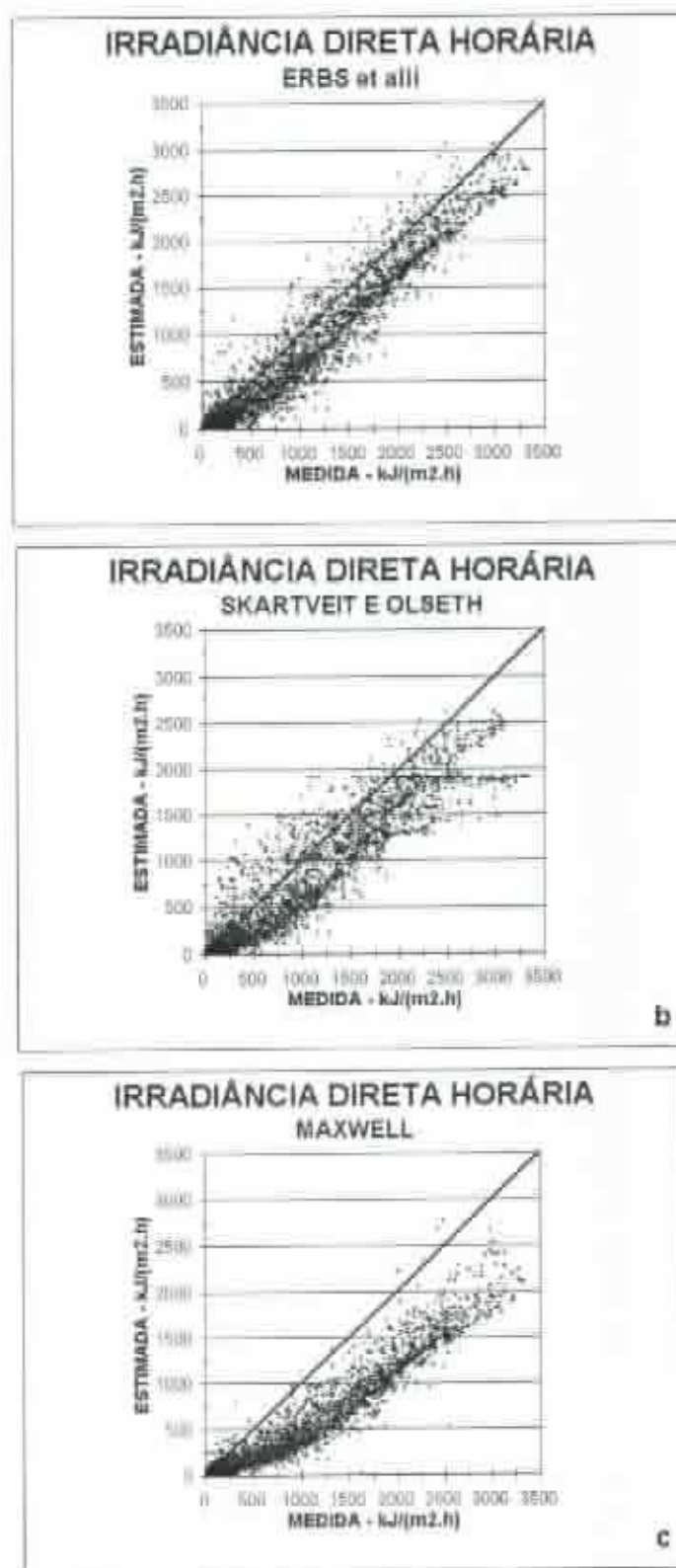


Figura 6 - Irradiância solar direta horária, kJ/(m².h), estimada pelos modelos de Erbs et alii (a), Skartveit e Olseth (b) e Maxwell (c), em confronto com os dados, obtidos por meio de piranômetros fotovoltaicos para Viçosa - MG.

Tabela 5 - Coeficiente de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE) e erro médio (EM), obtidos ao testar os diferentes modelos para a estimação da irradiância solar direta horária em confronto com os dados, obtidos por meio de piranômetros fotovoltaicos

Modelos	r^2	EPE ($\text{kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)	EM ($\text{kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$)
Liu e Jordan	0,94	214,9	2,5
Boes et alii	0,94	214,2	-16,1
Erbs et alii	0,94	276,2	-167,3
Orgill e Hollans	0,93	308,0	-193,8
Spencer	0,86	355,5	164,2
Skartveit e Olseth	0,89	360,6	-201,1
Maxwell	0,91	519,1	-379,5

É importante observar que, apesar de o modelo de Spencer ter sido desenvolvido com dados do Hemisfério sul (Austrália), além do fato de levar em conta o efeito da latitude, este modelo apresentou resultados ruins, quando comparado com os outros modelos testados. Com relação ao modelo de Maxwell, apesar de um coeficiente de determinação alto ($r^2 = 0,91$), apresentou o maior valor para o erro-padrão de estimativa (EPE = $519,1 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) e o maior erro médio (EM = $-379,5 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$). Este foi o modelo que mais subestimou a irradiância solar direta.

O modelo de Liu e Jordan e o modelo de Boes et alii foram os que apresentaram os melhores resultados. Ressalta-se que, dentre os modelos testados, o modelo de Liu e Jordan é o mais simples (apenas uma equação) e o único que foi originalmente proposto para o cálculo da irradiância solar difusa **diária**.

4.4. *Estimação da irradiância solar direta a partir da insolação*

4.4.1. *Avaliação de uma metodologia para a estimação da irradiância solar direta, média mensal sobre uma superfície horizontal, para dias com nebulosidade, utilizando modelos para céu descoberto*

Propôs-se, neste trabalho, uma metodologia para estimar a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir de modelos desenvolvidos para céu descoberto e de dados de insolação diária média mensal. Os modelos para céu descoberto, utilizados nesta metodologia foram os modelos **A**, **B** e **C**, apresentados por IQBAL (1983). A metodologia ora proposta estima a irradiância direta diária, média mensal, para dias com nebulosidade, a partir de dados de insolação horária média mensal e valores horários, estimados de irradiância direta para dias de céu descoberto.

Os modelos **A**, **B** e **C** para céu descoberto assemelham-se, com relação aos procedimentos para o cálculo da radiação solar direta e difusa. Entretanto, as expressões parametrizadas para o cálculo das transmitâncias dos constituintes atmosféricos diferem, segundo seus autores. Os elementos atmosféricos que entram nestas expressões são: pressão, temperatura, umidade relativa, parâmetros de poeira ou visibilidade e massa ótica de ozônio na direção vertical.

Para o cálculo da irradiância direta, utilizaram-se de dados médios mensais de pressão, temperatura e umidade relativa, referentes aos horários 12 e 18 TMG, representando, respectivamente, o período da manhã e o da tarde. Valores médios destes elementos meteorológicos foram usados para o cálculo da quantidade de água precipitável na atmosfera. Os valores mensais de massa ótica de ozônio na direção vertical foram sugeridos por ROBINSON, 1966 (Tabela 1). Foram considerados o 15º dia de cada mês, para o cálculo da declinação do Sol (Equação 6), e valor de ângulo horário referente ao meio do intervalo de uma hora, para

cálculo do ângulo zenital horário (Equação 5). Desta forma, foram calculados os valores horários de irradiância solar direta para dias de céu descoberto, conforme os modelos mencionados.

Não foi possível a utilização de dados de visibilidade, uma vez que o horizonte de observação na Estação Climatológica de Viçosa não ultrapassa 6 km. Assim, optou-se por utilizar outro parâmetro - o parâmetro de turbidez de Ångström, β .

4.4.1.1. *Determinação do parâmetro de turbidez de Ångström- β*

Utilizando dados horários de irradiância direta e insolação, selecionaram-se dias de céu descoberto da seguinte forma: dias em que a insolação fosse máxima e que não houvesse registros de nuvens nos mapas de insolação. Para estes dias, verificava-se se havia variação assimétrica da irradiância direta horária, numa direção normal aos raios, nos períodos da manhã e da tarde. Caso positivo este dia era desprezado. O valor do parâmetro α (expoente do comprimento de onda da radiação) foi considerado igual a 1,3, como de praxe para cálculos desta natureza. Valores horários de pressão, temperatura e umidade relativa, referentes a estes dias selecionados, foram extraídos dos registros do barógrafo, do termógrafo e do higrógrafo. Utilizando estes dados de entrada e o modelo A, apresentado por IQBAL (detalhado no item 2.2.1.1.), determinaram-se os valores mensais do parâmetro de turbidez β . Ressalta-se que esta metodologia foi utilizada como metodologia alternativa, uma vez que não se dispõem de equipamentos para a utilização da metodologia proposta originalmente por ÅNGSTRÖM (1961).

A Figura 7 apresenta os valores obtidos para β , e a precipitação pluvial mensal, durante o período de julho de 1993 a novembro de 1994. Observa-se, nesta figura, coerência entre os valores de β e as épocas de início e final das chuvas. Com o início da estação chuvosa em outubro de

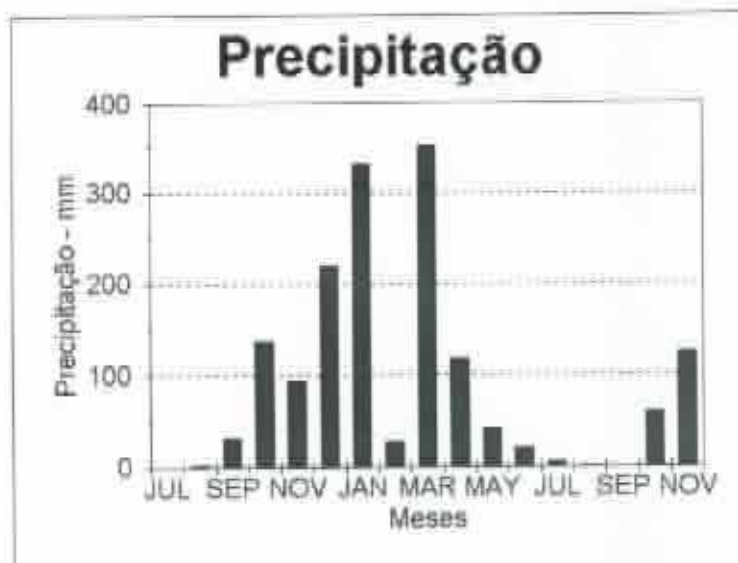
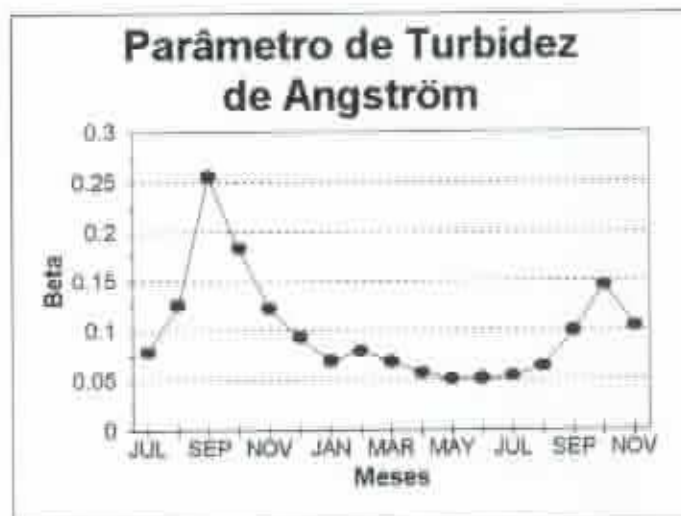


Figura 7 - Parâmetro de turbidez de Angström e precipitação pluvial mensal para Viçosa-MG, de julho de 1993 a novembro de 1994.

1993, verifica-se o decréscimo no valor de β . Em 1994, o comportamento é semelhante com a diminuição do parâmetro β , a partir de novembro. Em fevereiro de 1994, percebem-se um ligeiro aumento no valor de β e uma diminuição significativa na quantidade de precipitação.

O parâmetro β é um indicador da quantidade de poeira em suspensão na atmosfera. Como se sabe, a precipitação pluvial exerce o efeito de remoção dessa poeira da atmosfera, e, assim, no início da estação chuvosa, verifica-se uma diminuição no valor de β , sendo os menores valores de β observados no final da estação chuvosa (maio, junho), quando a atmosfera está mais "limpa". Durante a época mais seca do ano, com baixa umidade relativa do ar e eventuais queimadas, observa-se um aumento no valor de β , sendo que, no final da estação seca (setembro, outubro), o valor de β atinge valores máximos.

Observa-se, na Figura 7, que o valor máximo, determinado para β , em Viçosa, no período experimental, ocorreu em setembro de 1993, em consequência, provavelmente, do elevado número de queimadas, ocorridas na região na estação seca daquele ano, conforme dados fornecidos pelo 8º GPFlo - Viçosa (8º Grupo de Polícia Florestal de Viçosa-MG).

4.4.1.2. *Estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, para dias com nebulosidade*

Utilizando os dados de temperatura, pressão, umidade relativa, parâmetros de poeira e massa ótica de ozônio na direção vertical, como dados de entrada, procedeu-se ao cálculo da irradiância solar direta horária, sobre uma superfície horizontal para dias de céu descoberto. Multiplicando-se o valor, obtido pela insolação horária, e com o somatório dos valores horários, obtiveram-se os valores diários de irradiância solar direta, média mensal sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade. Estes valores foram comparados com dados de irradiância

solar direta, correspondentes ao período de julho de 1993 a novembro de 1994, obtidos experimentalmente, por meio de dois piranômetros, como descrito anteriormente.

A metodologia, apresentada neste trabalho, para a estimação da irradiância solar direta diária, média mensal (sobre uma superfície horizontal), inclui o uso de um *fator de correção*, determinado como o valor médio da *razão (irradiância direta medida) / (irradiância direta estimada)*. Os valores, obtidos para este fator de correção, foram de 0,789 (o modelo A), 0,798 (modelo B) e 0,792 (modelo C).

A Figura 8 mostra os valores, medidos de irradiância solar direta média mensal (incluindo nebulosidade) e os valores estimados, utilizando a metodologia, proposta neste trabalho (*sem se considerar o fator de correção*). A Tabela 6 apresenta coeficiente de determinação (r^2), variando de 0,86 a 0,88, erro-padrão de estimativa (EPE) da ordem de $2,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, e erro percentual médio (EPM) de 27 a 29% para os modelos, empregados nesta metodologia. O modelo **B** foi o que apresentou os melhores resultados, com $r^2 = 0,88$, $\text{EPE} = 2,36 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, $\text{EM} = 2,14$ e $\text{EPM} = 27\%$. No geral, observa-se que esta metodologia superestima a irradiância solar direta ($\text{EM} > 0$), provavelmente, em virtude do fato de o heliógrafo superestimar a insolação.

A Figura 9 mostra os valores, medidos de irradiância solar direta diária, média mensal (incluindo nebulosidade) e os valores estimados, utilizando a metodologia, proposta neste trabalho, *incluindo o fator de correção*. A Tabela 7 apresenta o coeficiente de determinação (r^2), o erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM) e erro percentual médio (EPM), obtidos ao testar a metodologia, proposta para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal (*incluindo o fator de correção*) sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade, utilizando os modelos **A**, **B** e **C** para dias de céu descoberto, apresentados

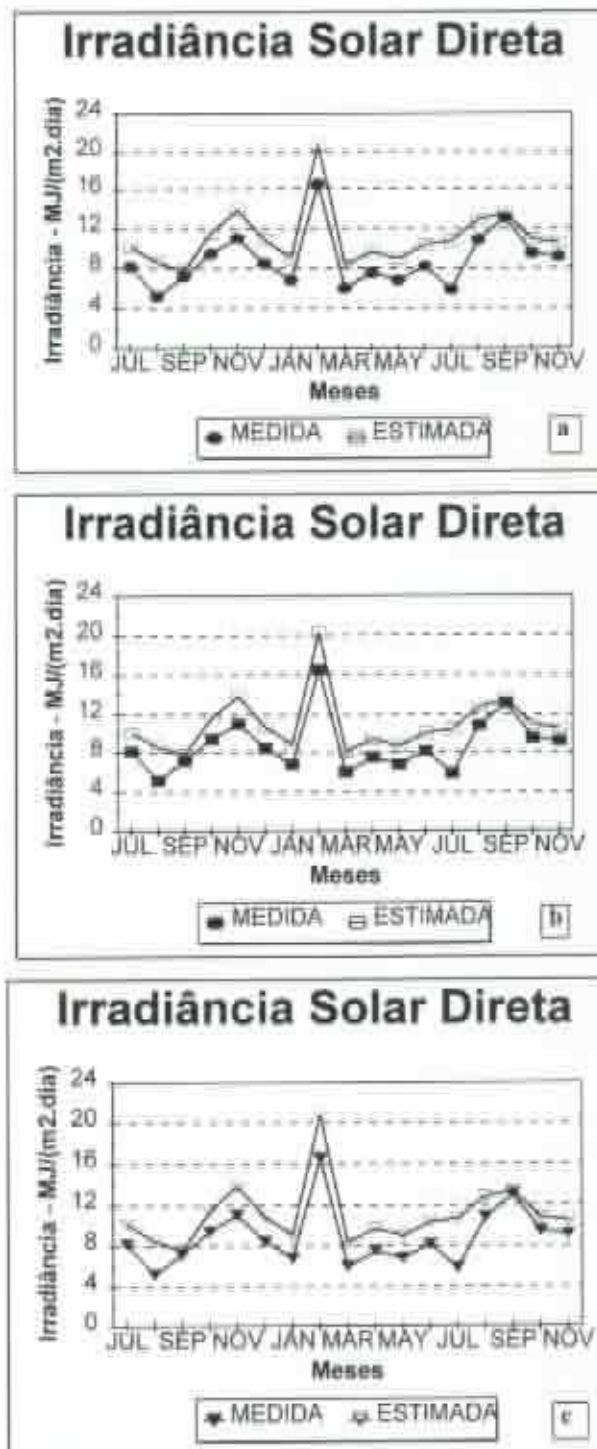


Figura 8 - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade, MJ/(m².dia), estimada pela metodologia proposta para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal (sem se considerar o fator de correção) sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade, utilizando os modelos A, B e C para dias de céu limpo, apresentados por Iqbal, em confronto com os valores medidos para Viçosa - MG.

Tabela 6 - Coeficiente de determinação (r^2), o erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM) e erro percentual médio (EPM)¹, obtidos ao testar a metodologia, proposta para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal (*sem o fator de correção*) sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade, utilizando os modelos A, B e C para dias de céu descoberto, apresentados por Iqbal em confronto com os valores medidos

Metodologia proposta, utilizando os modelos A, B e C	r^2	EPE MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	EM MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	EPM %
A	0,87	2,53	2,28	29
B	0,88	2,36	2,14	27
C	0,86	2,51	2,24	29

$$(1) \text{ EPM} = \frac{\sum \frac{|Y_{\text{est}} - Y|}{Y} \times 100 \%}{N}$$

sendo Y = valor observado, Y_{est} = valor estimado e N = número de observações.

por Iqbal, em confronto com os valores medidos. Observa-se, na Tabela 7, que, ao incluir o fator de correção, os erros diminuíram substancialmente. O EPE foi reduzido para cerca de 1 MJ.m⁻².dia⁻¹; o EPM reduziu de 30% para cerca de 9%; e o EM caiu de 2 para cerca de 0,06 MJ.m⁻².dia⁻¹. O modelo B foi o que apresentou o menor EPE (1,01 MJ.m⁻².dia⁻¹) e o menor EPM (8,8%) e o maior r^2 (0,88).

Apesar do bom embasamento físico desta metodologia, o seu uso apresenta algumas limitações, associadas à relativa complexidade das equações utilizadas e da quantidade de dados necessários para a estimativa da irradiância solar direta para os dias de céu descoberto.

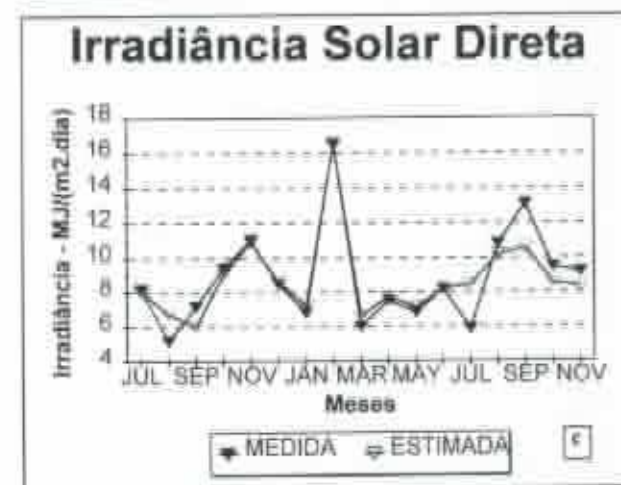
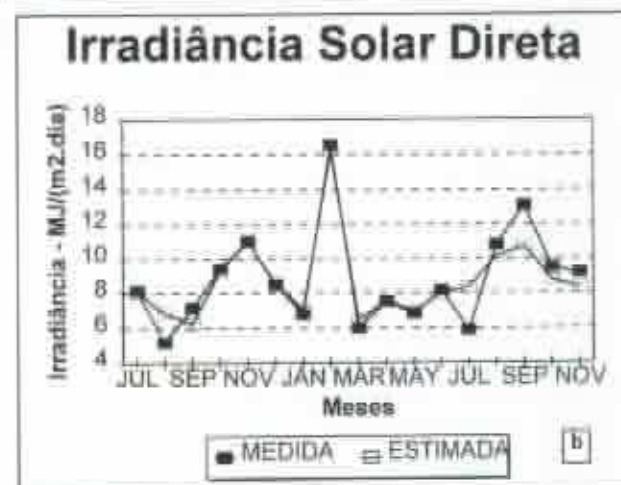
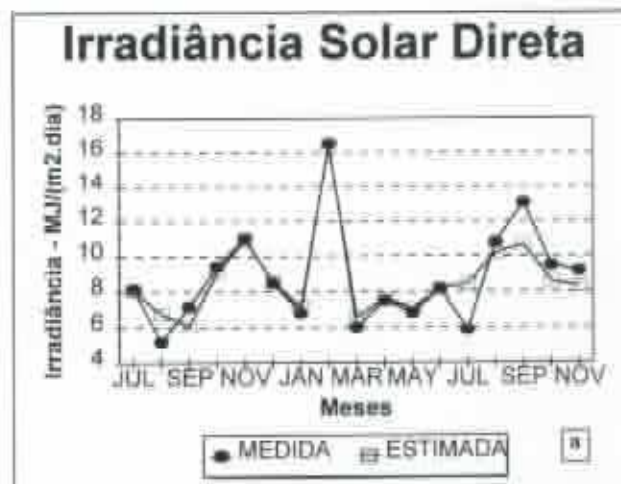


Figura 9 - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade, MJ/(m².dia), estimada pela metodologia proposta para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal (*incluindo o fator de correção*) sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade, utilizando os modelos A, B e C para dias de céu limpo, apresentados por Iqbal, em confronto com os valores medidos para Viçosa - MG.

Tabela 7 - Coeficiente de determinação (r^2), o erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM) e erro percentual médio (EPM), obtidos ao testar a metodologia proposta para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal (*incluindo o fator de correção*) sobre uma superfície horizontal para dias com nebulosidade utilizando os modelos A, B e C para dias de céu descoberto, apresentados por Iqbal, em confronto com os valores medidos

Metodologia proposta (com o fator de correção), utilizando os modelos A, B e C	r^2	EPE MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	EM MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	EPM %
A (fator corr. = 0,789)	0,87	1,05	-0,06	9,4
B (fator corr. = 0,798)	0,88	1,02	-0,07	8,8
C (fator corr. = 0,792)	0,86	1,07	-0,05	9,8

4.4.2. Avaliação de modelos para a estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação

Avaliou-se neste item o desempenho de vários modelos para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal (\bar{n}_h), a partir da razão de insolação diária média mensal (\bar{n}/\bar{N}) e da irradiância solar no topo da atmosfera média mensal (\bar{H}_0). Desenvolveu-se também uma equação, que correlaciona a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, com a razão de insolação e a irradiância solar no topo da atmosfera para Viçosa-MG.

Os modelos avaliados foram os que se seguem:

- modelo quadrático de IQBAL (equação 57);
- modelo linear, passando pela origem, de HUSSAIN (equação 59); e

- modelo linear de JAIN (1990). Este modelo estima a irradiância solar global diária e média mensal (\bar{H}), de acordo com a equação

$$\bar{H}/\bar{H}_0 = a_3 + b_3 (\bar{n}/\bar{N}), \quad \text{eq.74}$$

semelhante à equação, proposta pelo mesmo autor para estimar a irradiância solar difusa média mensal (\bar{H}_d), equação 58, isto é,

$$\bar{H}_d/\bar{H}_0 = a_2 + b_2 (\bar{n}/\bar{N}).$$

Os valores dos coeficientes a_2 , b_2 , a_3 e b_3 , obtidos para três localidades diferentes, Macerata (Itália), Salisbury e Bulawayo (Zimbabwe) são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores anuais dos coeficientes a_2 , b_2 , a_3 e b_3 do modelo linear de Jain, para três diferentes localidades

Coeficientes	Salisbury	Bulawayo	Macerata
a_2	0,374	0,364	0,293
b_2	-0,271	-0,253	-0,135
a_3	0,313	0,307	0,309
b_3	0,474	0,488	0,599

Fonte: JAIN, 1990.

A irradiância solar direta foi obtida por diferença entre as irradiâncias global e difusa, isto é,

$$\bar{H}_b/\bar{H}_0 = \left[(a_3 - a_2) + (b_3 - b_2) \bar{n}/\bar{N} \right], \quad \text{eq.75}$$

em que \bar{H}_b é a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal.

HUSSAIN (1992), utilizando dados de sete localidades, que representam três regiões climáticas da Índia, obteve valores mensais para o coeficiente b_0 da equação 59, isto é,

$$\bar{H}_b/\bar{H}_0 = b_0 (\bar{n}/\bar{N}).$$

A Tabela 9 mostra valores de b_0 para três localidades climaticamente diferentes: Ahmadabad, clima de deserto, árido (BWh); Nagpur, clima de estepes, semi-árido (BSh); e Calcutá, clima de savana, tropical (AW).

Tabela 9 - Valores mensais do coeficiente b_0 do modelo de Hussain para três regiões climáticas da Índia

Meses	Ahmadabad (BWh)	Nagpur (BSh)	Calcutá (AW)
Janeiro	0,56	0,55	0,48
Fevereiro	0,56	0,54	0,49
Março	0,64	0,56	0,52
Abril	0,59	0,56	0,47
Mai	0,56	0,51	0,47
Junho	0,44	0,48	0,48
Julho	0,34	0,38	0,42
Agosto	0,37	0,35	0,46
Setembro	0,52	0,53	0,48
Outubro	0,56	0,57	0,49
Novembro	0,55	0,55	0,48
Dezembro	0,55	0,56	0,51

Fonte: HUSSAIN, 1992.

Os valores de \bar{H} , (irradiância solar diária, média mensal no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal) e \bar{N} (duração do dia, valor médio mensal) foram calculados, utilizando as equações 10 e 48, respectivamente, e para tal isso considerou-se o 15º dia do mês para o cálculo da declinação do Sol (equação 6).

O modelo quadrático de Iqbal, o modelo linear de Jain e o modelo linear, passando pela origem de Hussain foram utilizados para estimar a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal para Viçosa-MG e para Januária-MG (Latitude: 15º 26', Longitude: 44º 22' e Altitude: 476 m), localidades para as quais dispõem-se de medições de radiação direta.

Os dados de irradiância solar direta diária e média mensal sobre uma superfície horizontal para Viçosa, utilizados para fins comparativos com os valores estimados, foram referentes ao período de julho de 1993 a novembro de 1994 e obtidos, por meio de dois pirômetros fotovoltaicos. Já os de Januária foram referentes ao período de abril de 1990 a fevereiro de 1991, obtidos numa estação da CEMIG (NUNES et alii, 1992). Os dados de insolação média mensal para Viçosa foram obtidos na Estação Climatológica de Viçosa (convênio INMET / UFV) e os de Januária foram cedidos pelo INMET.

As Figuras 10 e 11 mostram os valores de irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, estimados pelos modelos, em confronto com os valores obtidos pelos pirômetros para Viçosa-MG. A Tabela 10 sumaria os valores dos coeficientes de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM) e erro percentual médio (EPM), obtidos ao testar os diferentes modelos para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Viçosa-MG.

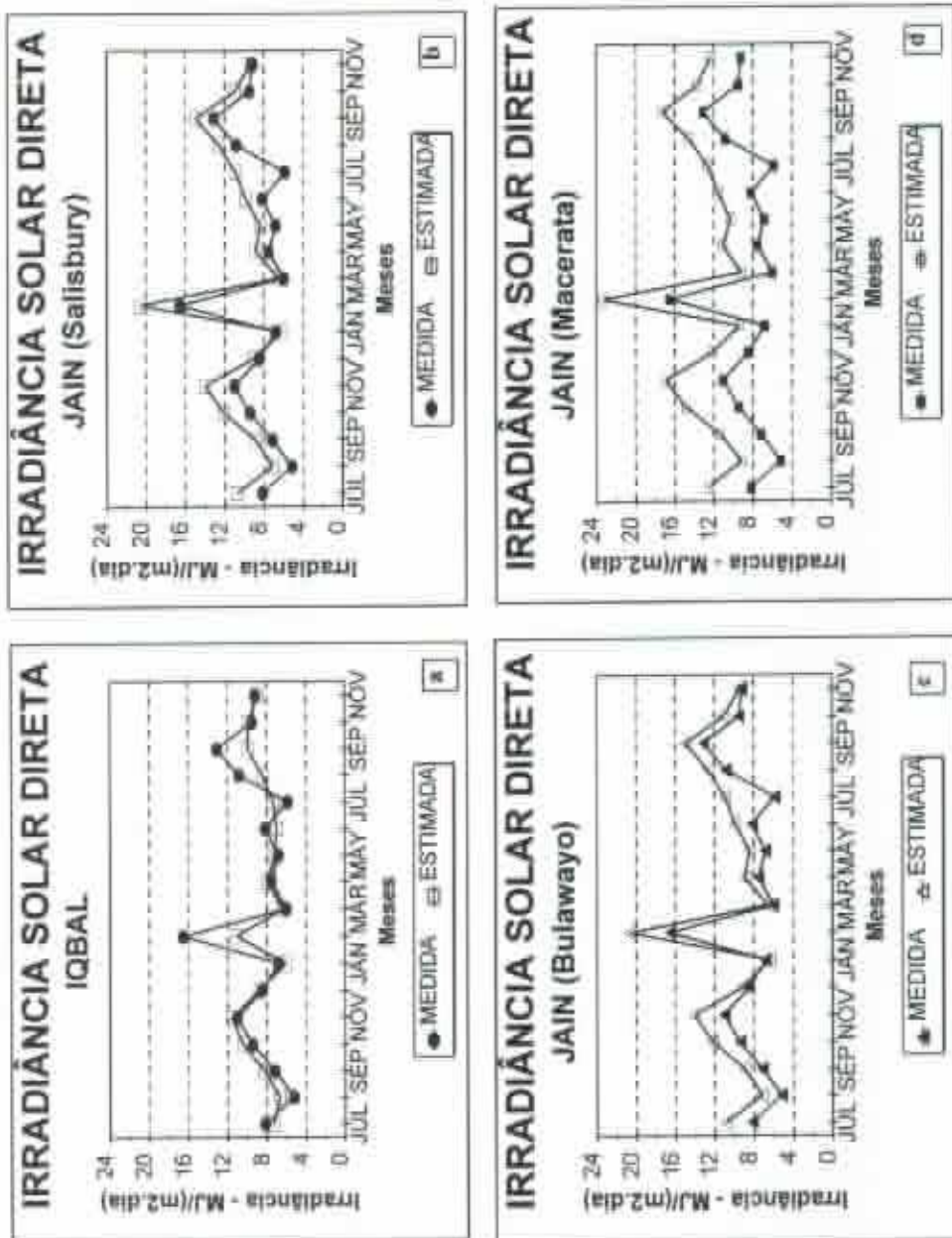


Figura 10 - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, MJ/(m².dia), estimada pelo modelo quadrático de Iqbal (a) e pela equação linear de Jain com os coeficientes, determinados para as localidades de Salisbury (b), Bulawayo (c) e Macerata (d), em confronto com os valores medidos para Viçosa - MG.

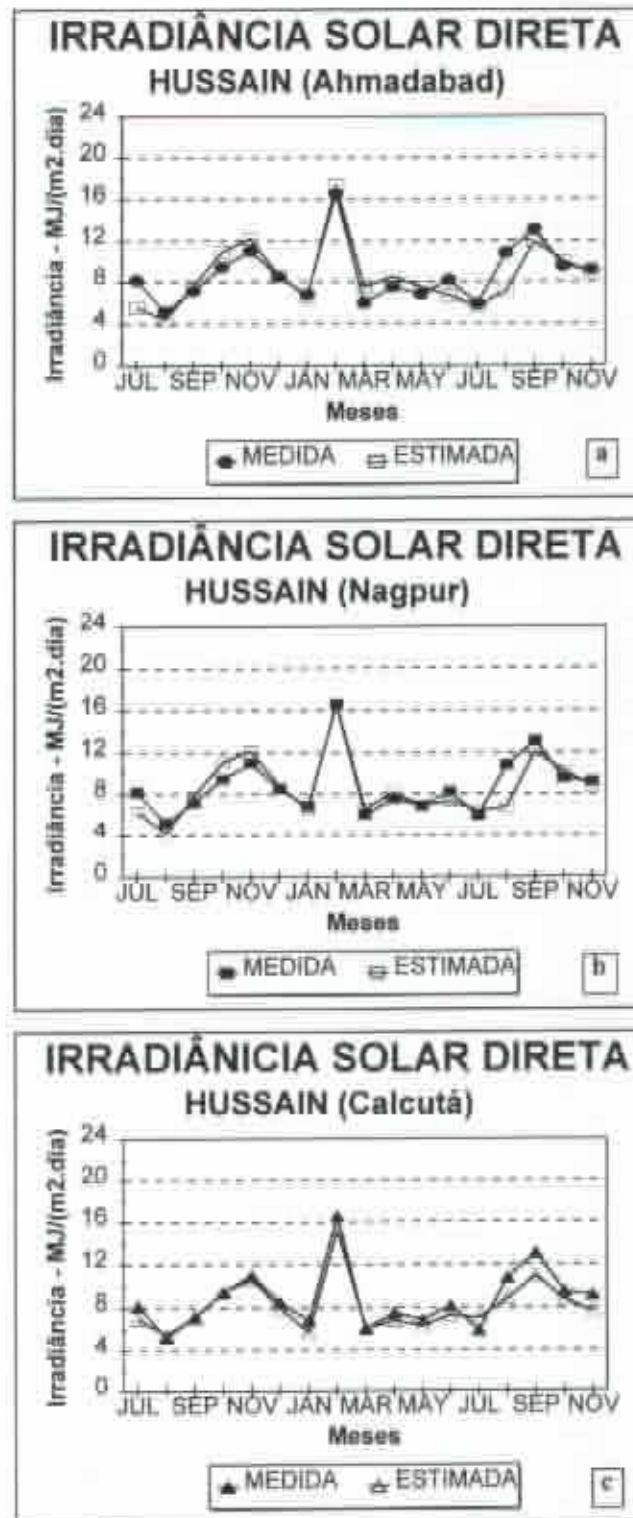


Figura 11 - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, MJ/(m².dia), estimada pela equação linear de Hussain com os coeficientes, determinados para as localidades de Ahmadabad (a), Nagpur (b) e Calcutá (c), em confronto com os valores medidos para Viçosa - MG.

Observa-se, na Tabela 10, que o modelo, que melhores resultados apresentou para Viçosa, foi o modelo de Hussain com coeficientes, determinados para a localidade de Calcutá: $r^2 = 0,93$, $EPE = 1,06 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, $EM = -0,68 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $EPM = 10\%$. Ressalta-se que Calcutá apresenta o mesmo tipo climático da maior parte do Estado de Minas Gerais (AW - clima de savana, tropical), embora este não seja o mesmo de Viçosa (Cwa - clima temperado úmido). Com exceção do modelo quadrático de Iqbal, que apresentou $r^2 = 0,65$, todos os modelos testados apresentaram valores elevados de r^2 ($r^2 \geq 0,80$). O modelo, que apresentou os piores resultados com relação aos erros, foi o de Jain (com coeficientes determinados para a localidade de Macerata): $EPE = 4,43 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, $EM = 4,27 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $EPM = 52\%$, apesar de ter apresentado r^2 alto ($r^2 = 0,91$).

Tabela 10 - Valores dos coeficientes de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM), e erro percentual médio (EPM), obtidos ao testar os diferentes modelos para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Viçosa-MG

Modelos	r^2	EPE	EM	EPM
		$\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$	%
Iqbal	0,65	1,80	-0,40	13
Jain (Macerata)	0,91	4,43	4,27	52
Jain (Salisbury)	0,86	2,28	1,84	23
Jain (Bulawayo)	0,87	2,32	1,91	24
Hussain (Ahmadabad)	0,79	1,39	-0,17	12
Hussain (Nagpur)	0,81	1,31	-0,20	11
Hussain (Calcutá)	0,93	1,06	-0,68	10

Utilizando dados de irradiância solar direta e de insolação, obtidos em Viçosa, durante o período de julho de 1993 a novembro de 1994, desenvolveu-se uma equação anual, que correlaciona a razão entre a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal e a irradiância solar no topo da atmosfera, com a razão de insolação, média mensal. A equação, obtida para Viçosa-MG, com r^2 de 0,82 é a seguinte:

$$\bar{H}_b / \bar{H}_0 = 0,510 (\bar{n} / \bar{N}), \quad \text{eq.76}$$

e a Figura 12 ilustra esta correlação. Observa-se que o coeficiente 0,510 da equação 76 é bem próximo dos encontrados por Hussain (Tabela 9), especialmente para Calcutá.

Testou-se o desempenho da equação de Viçosa-MG (equação 76) para Januária-MG, bem como os modelos de Iqbal, Jain e Hussain. As Figuras 13 e 14 ilustram os valores de irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal estimados, pelos diferentes modelos "versus" os valores medidos para Januária-MG. A Tabela 11 apresenta os valores dos coeficientes de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM) e erro percentual médio (EPM), obtidos ao testar os diferentes modelos para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Januária-MG.

Observa-se, na Tabela 11, que a equação desenvolvida para Viçosa (Equação 76), quando utilizada para estimar a irradiância solar direta para Januária-MG, foi a que apresentou os menores erros, enquanto o r^2 ($r^2 = 0,77$) foi da mesma ordem do mais alto ($r^2 = 0,80$). Estes resultados mostram que a equação, desenvolvida para Viçosa, caracteriza melhor a transparência atmosférica para Januária, em comparação às demais equações, o que pode ser visualizado, claramente, na Figura 14. O modelo linear de Hussain com os coeficientes, determinados para a localidade de Calcutá, também apresentou bons resultados ($r^2 = 0,80$, EPE = $1,63 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, EM = $-1,51 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e EPM = 12%), enquanto o modelo quadrático de Iqbal foi o que apresentou um dos piores resultados.

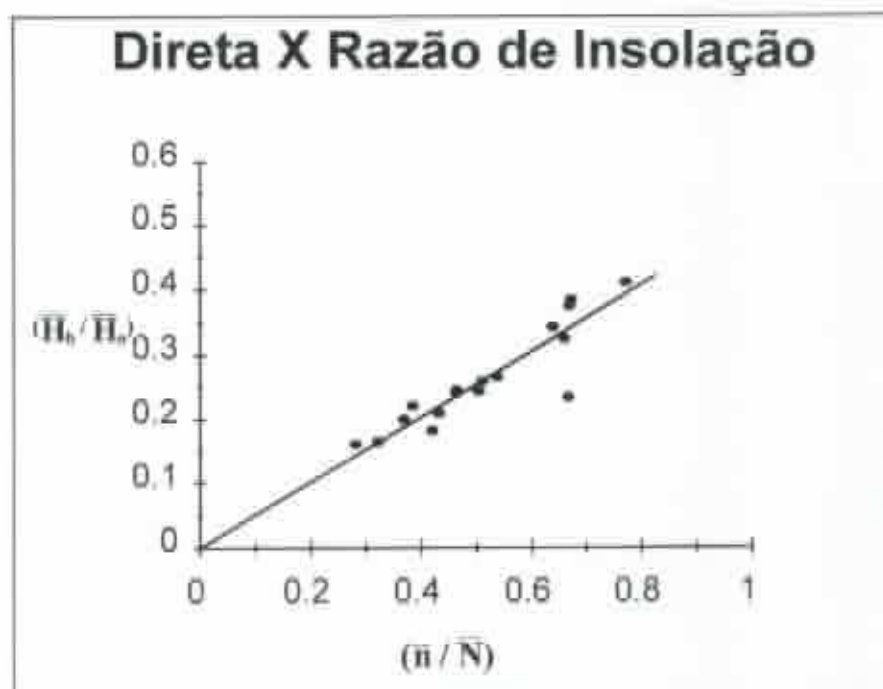


Figura 12 - Razão entre a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal e a irradiância diária no topo da atmosfera (\bar{H}_b/\bar{H}_a), em função da razão de insolação média mensal (\bar{n}/\bar{N}) para Viçosa-MG.

Para ambas as localidades, a equação linear de Jain superestimou a irradiância solar direta, enquanto todas as outras equações subestimaram a irradiância solar direta. Isto, em consequência da natureza das equações utilizadas, pois os coeficientes lineares da equação de Jain ($b_3 - b_2$) são mais elevados que os da equação linear de Hussain (b_0). A equação linear, passando pela origem (Hussain), com os coeficientes de Calcutá, apresentou bons resultados para ambas as localidades, provavelmente, em consequência de Calcutá apresentar o mesmo tipo climático, apresentado pela maior parte do Estado de Minas Gerais. O modelo quadrático de Iqbal e o linear de Jain (com coeficientes de Macerata) foram os que apresentaram os piores resultados para Viçosa e para Januária.

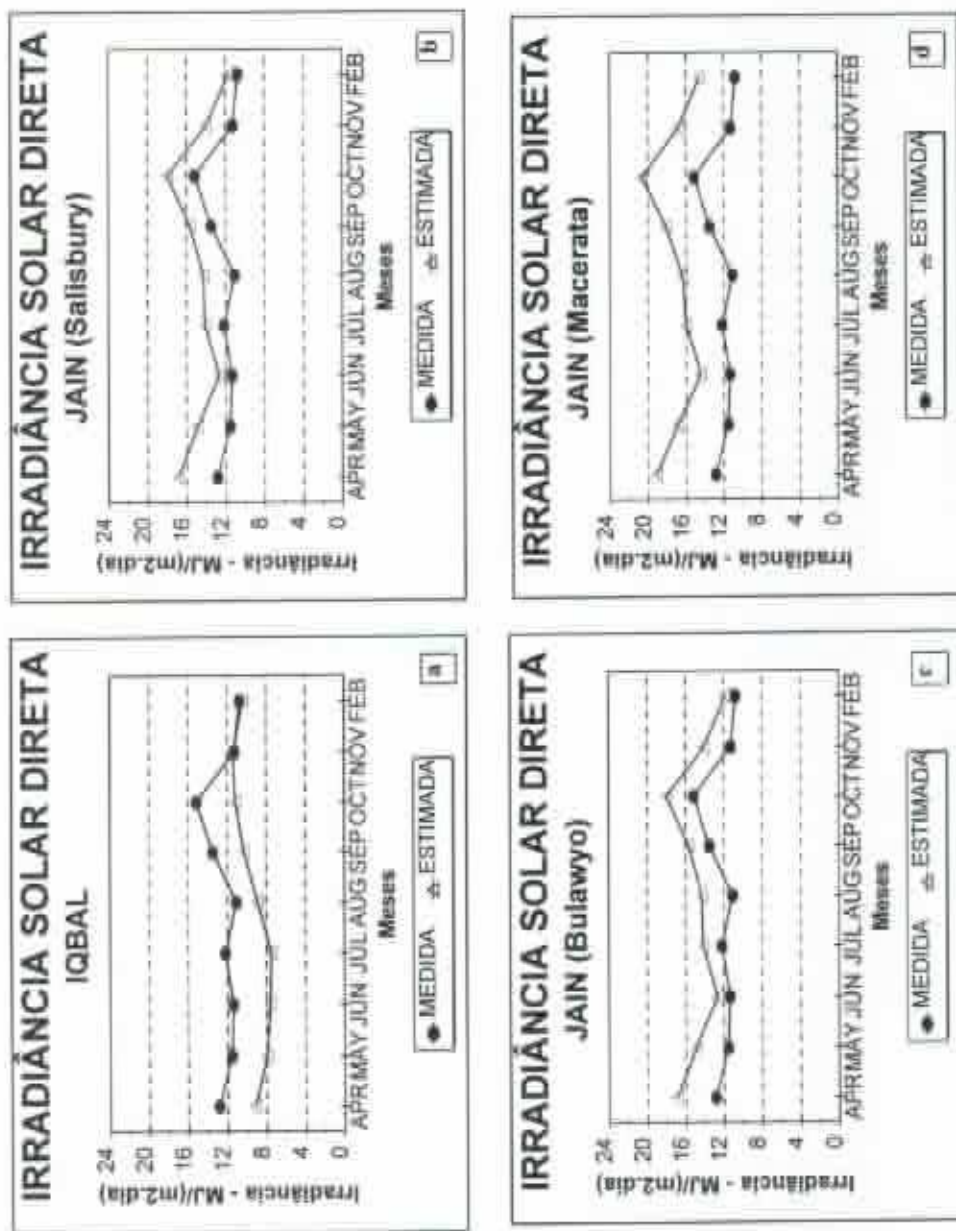


Figura 13 - Irradiância solar direta diária, média mensal, sobre uma superfície horizontal, MJ/(m².dia), estimada pelo modelo quadrático de Iqbal (a) e pela equação linear de Jain com os coeficientes, determinados para as localidades de Salisbury (b), Bulawyo (c) e Macerata (d), em confronto com os valores medidos para January - MG.

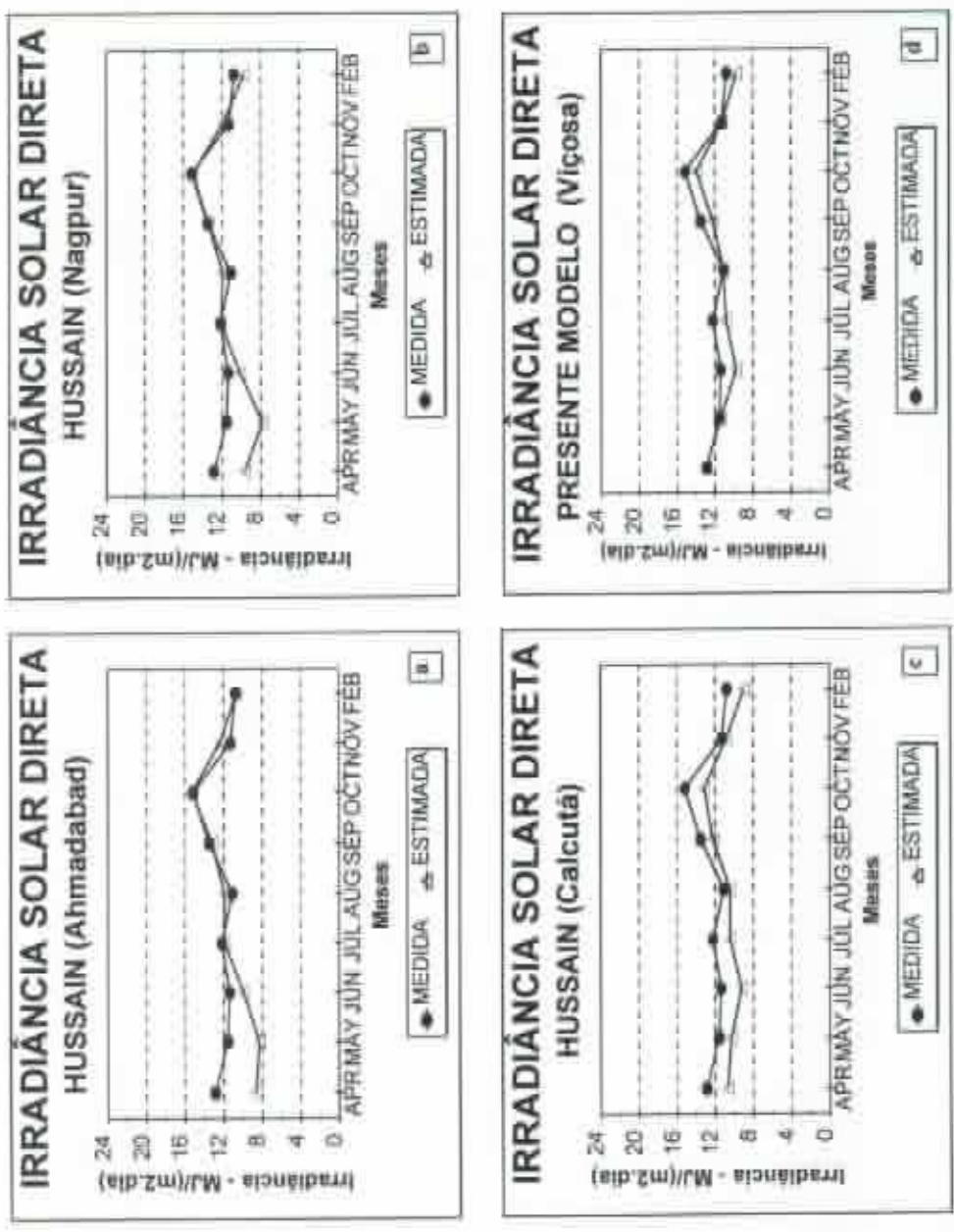


Figura 14 - Irradiância solar direta diária, média mensal, sobre uma superfície horizontal, MJ/(m².dia), estimada pela equação linear de Hussain com os coeficientes, determinados para as localidades de Ahmadabad (a), Nagpur (b) e Calcutá (c) e pela equação determinada para Viçosa (d), em confronto com os valores medidos para Januária - MG.

Tabela 11 - Valores dos coeficientes de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE), erro médio (EM) e erro percentual médio (EPM), obtidos ao testar os diferentes modelos para estimação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Januária-MG

Modelos	r^2	EPE	EM	EPM
		MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	MJ.m ⁻² .dia ⁻¹	%
Iqbal	0,12	3,22	-2,81	23
Jain (Macerata)	0,77	4,93	4,83	40
Jain (Bulawayo)	0,77	2,71	2,55	21
Jain (Salisbury)	0,77	2,67	2,51	21
Hussain (Ahmadabad)	0,34	1,91	-0,84	11
Hussain (Nagpur)	0,46	1,76	-0,89	10
Hussain (Calcutá)	0,80	1,64	-1,52	12
Presente Modelo (Viçosa-MG)	0,77	0,98	-0,73	6

4.4.3. Avaliação de modelos para a estimação da irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação

Avaliou-se o desempenho de vários modelos de estimação da irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal (\bar{i}_h), a partir da razão de insolação horária, média mensal (\bar{n}_h/\bar{N}_h) e da irradiância solar no topo da atmosfera (\bar{i}_a). O modelo quadrático de IQBAL (1979a), equação 57, o modelo linear de JAIN (1990), equação 75 e o modelo linear de HUSSAIN (1992), equação 59, foram considerados em base horária, isto é, substituindo-se \bar{H} por \bar{i} , \bar{H}_a por \bar{i}_a , \bar{n}_h por \bar{i}_h e \bar{N}_h por \bar{i}_h , sendo apresentado como se segue:

- **Modelo quadrático de Iqbal (modificado):**

$$\bar{I}_b / \bar{I}_0 = 0,176 + 1,45 (\bar{n}_h / \bar{N}_h) - 1,12 (\bar{n}_h / \bar{N}_h)^2, \quad \text{eq.77}$$

em que \bar{i}_b é a irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal; \bar{I}_0 é a irradiância solar horária, média mensal no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal; \bar{n}_h é a insolação horária, média mensal; e \bar{N}_h é a duração máxima possível de brilho solar, no intervalo de tempo considerado (que no caso é de uma hora), sendo \bar{n}_h / \bar{N}_h a razão de insolação horária.

- **Modelo linear de Jain (modificado):**

$$\bar{I}_b / \bar{I}_0 = \left[(a_3 - a_2) + (b_3 - b_2) \frac{\bar{n}_h}{\bar{N}_h} \right] \quad \text{eq.78}$$

em que a_3 , b_3 , a_2 e b_2 são coeficientes ajustados para três localidades diferentes, Macerata (Itália), Salisbury e Bulawayo (Zimbabwe) - Tabela 8.

- **Modelo linear de Hussain (modificado):**

$$\bar{I}_b / \bar{I}_0 = b_0 (\bar{n}_h / \bar{N}_h), \quad \text{eq.79}$$

em que b_0 é o índice de transparência atmosférica, apresentado na Tabela 9.

Os dados de irradiância solar direta e insolação horária, média mensal, empregados nesta análise, foram referentes ao período de julho de 1993 a novembro de 1994.

As Figuras 15 e 16 ilustram os valores de irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, estimados pelos

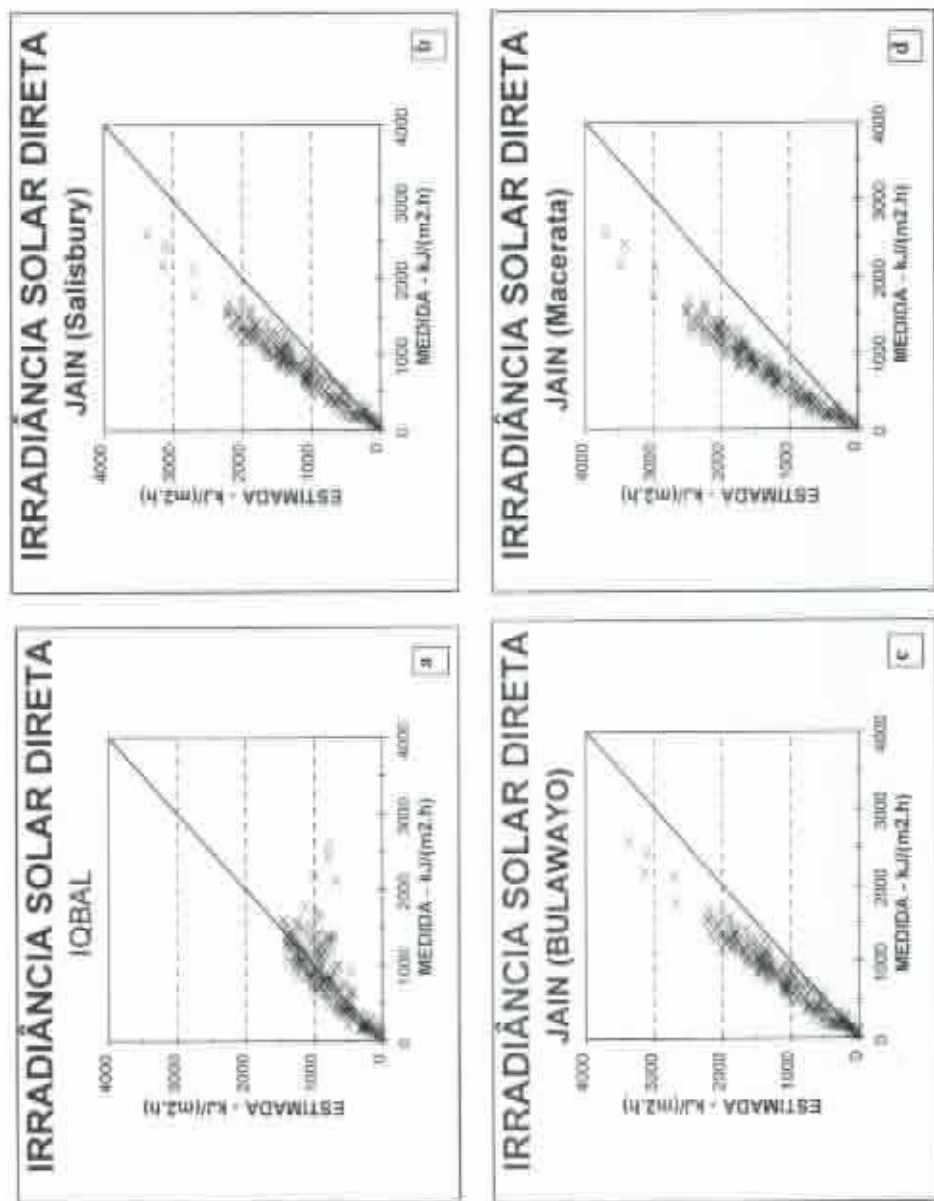


Figura 15 - Irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, estimada pelo modelo quadrático de Iqbal (a) e pela equação linear de Jain com os coeficientes, determinados para as localidades de Salisbury (b), Bulawayo (c) e Macerata (d), em confronto com os valores medidos para Viçosa - MG.

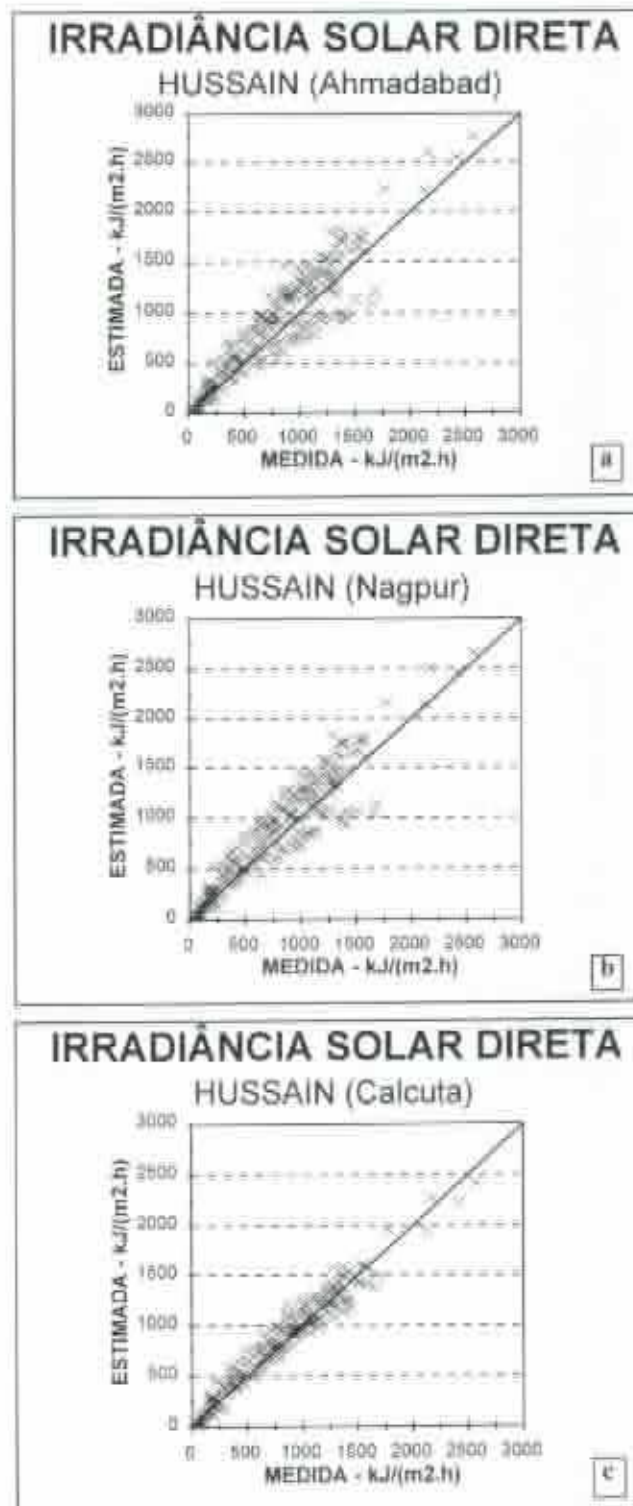


Figura 16 - Irradiância solar direta horária, média mensal, sobre uma superfície horizontal, kJ/(m².h), estimada pela equação linear de Hussain com os coeficientes, determinados para as localidades de Ahmadabad (a), Nagpur (b) e Calcutá (c), em confronto com os valores medidos para Viçosa - MG.

diferentes modelos, em confronto com os valores, obtidos por meio de piranômetros para Viçosa-MG. A Tabela 12 apresenta os valores dos coeficientes de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE) e erro médio (EM), obtidos ao testar os diferentes modelos para estimar a irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação horária, média mensal, para Viçosa-MG.

Observando-se a Tabela 12, verifica-se que o modelo, que apresentou o melhor resultado, foi o de Hussain com os coeficientes de Calcutá, apresentando $r^2 = 0,95$ e os menores erros (EPE = $120,2 \text{ kJ.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ e EM = $43,0 \text{ kJ.m}^{-2}\text{h}^{-1}$). Ressalta-se que este foi o modelo, que apresentou os melhores resultados também para a estimativa da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal para Viçosa-MG. O modelo quadrático de Iqbal foi o que apresentou o menor r^2 ($r^2 = 0,62$) e o modelo de Jain o que apresentou os maiores erros. O modelo quadrático de Iqbal foi único que subestimou a irradiância solar direta, média mensal sobre uma superfície horizontal (EM < 0).

Tabela 12 - Valores dos coeficientes de determinação (r^2), erro-padrão de estimativa (EPE) e erro médio (EM), obtidos ao testar os diferentes modelos para estimativa da irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Viçosa-MG

Modelos	r^2	EPE $\text{kJ.m}^{-2}\text{h}^{-1}$	EM $\text{kJ.m}^{-2}\text{h}^{-1}$
Iqbal (modificado)	0,62	308,0	-37,4
Jain (modificado) - Macerata	0,96	622,4	553,8
Jain (modificado) - Bulawayo	0,95	410,4	342,4
Jain (modificado) - Salisbury	0,95	406,4	337,3
Hussain (modificado) - Ahmadabad	0,85	230,1	96,2
Hussain (modificado) - Nagpur	0,86	216,3	92,3
Hussain (modificado) - Calcutá	0,95	120,2	43,0

4.4.4. Modelo para a estimação da irradiância solar direta horária, média mensal, sobre uma superfície horizontal, a partir da insolação para Viçosa-MG

Em razão do bom desempenho do modelo de Hussain (modificado), e com o intento de estimar a irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, utilizando dados de insolação horária, referentes ao período de 1968 a 1994 para Viçosa-MG, determinou-se, por análise de regressão linear, o valor anual para o coeficiente b_0 da equação 79 para as condições de Viçosa, utilizando os dados de irradiância solar direta horária e de insolação horária, obtidos, durante o período de julho de 1993 a novembro de 1994. Obteve-se a seguinte equação:

$$\bar{I}_h / \bar{I}_0 = 0,442 (\bar{n}_h / \bar{N}_h), \quad \text{eq.80}$$

com $r^2 = 0,84$. A Figura 17 ilustra esta correlação.

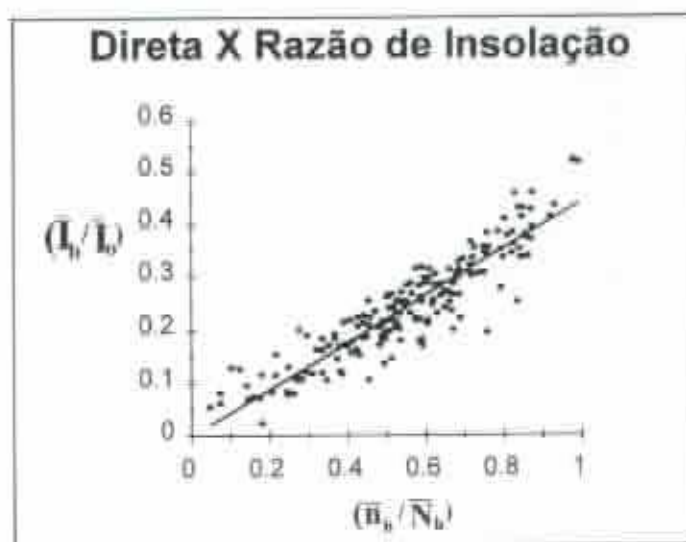


Figura 17 - Razão entre a irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal e a irradiância solar horária no topo da atmosfera (\bar{I}_h / \bar{I}_0), em função da razão de insolação horária média mensal (\bar{n}_h / \bar{N}_h), para Viçosa-MG.

4.5. *Variação da irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal e da insolação horária, média mensal, em Viçosa - MG*

Com base em dados horários de insolação média mensal, referentes ao período de 1968 a 1994, estimou-se a irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, utilizando a equação, desenvolvida neste trabalho para Viçosa (Equação 80).

As Figuras de 18 a 22 mostram a variação da irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, ao longo do dia, para os vários meses do ano, a média anual e a média nas quatro estações. As Figuras de 23 a 27 apresentam o comportamento da insolação horária para os vários meses do ano, a média anual e a média nas quatro estações. Figuras de 28 a 32 apresentam as curvas de percentagem, acumulada de insolação, em função da hora do dia, para os 12 meses do ano, para o ano e para as quatro estações.

Observa-se, na Figura 21, que, em termos médios anuais, a irradiância solar direta horária apresenta um valor máximo de $1.288 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ e este ocorre entre 12 e 13 h. Nota-se, também, que a curva é ligeiramente assimétrica, em relação ao ponto de máximo, e que no período da tarde concentra a maior quantidade de radiação direta. Durante o ano, o total diário é de $8.690 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

O mês de menor incidência de irradiância solar direta é o mês de junho, com um total diário de $7.316 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, e o mês de maior incidência é o mês fevereiro, apresentando um total diário de $11.202 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Apesar de a razão de insolação ser maior no mês de junho, em relação ao mês de fevereiro, a quantidade de radiação incidente no topo da atmosfera é maior em fevereiro, em função da maior elevação solar neste mês. Vale ressaltar que o mês de setembro é o que apresenta o segundo menor valor de irradiância direta, com um total diário de $7.727 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

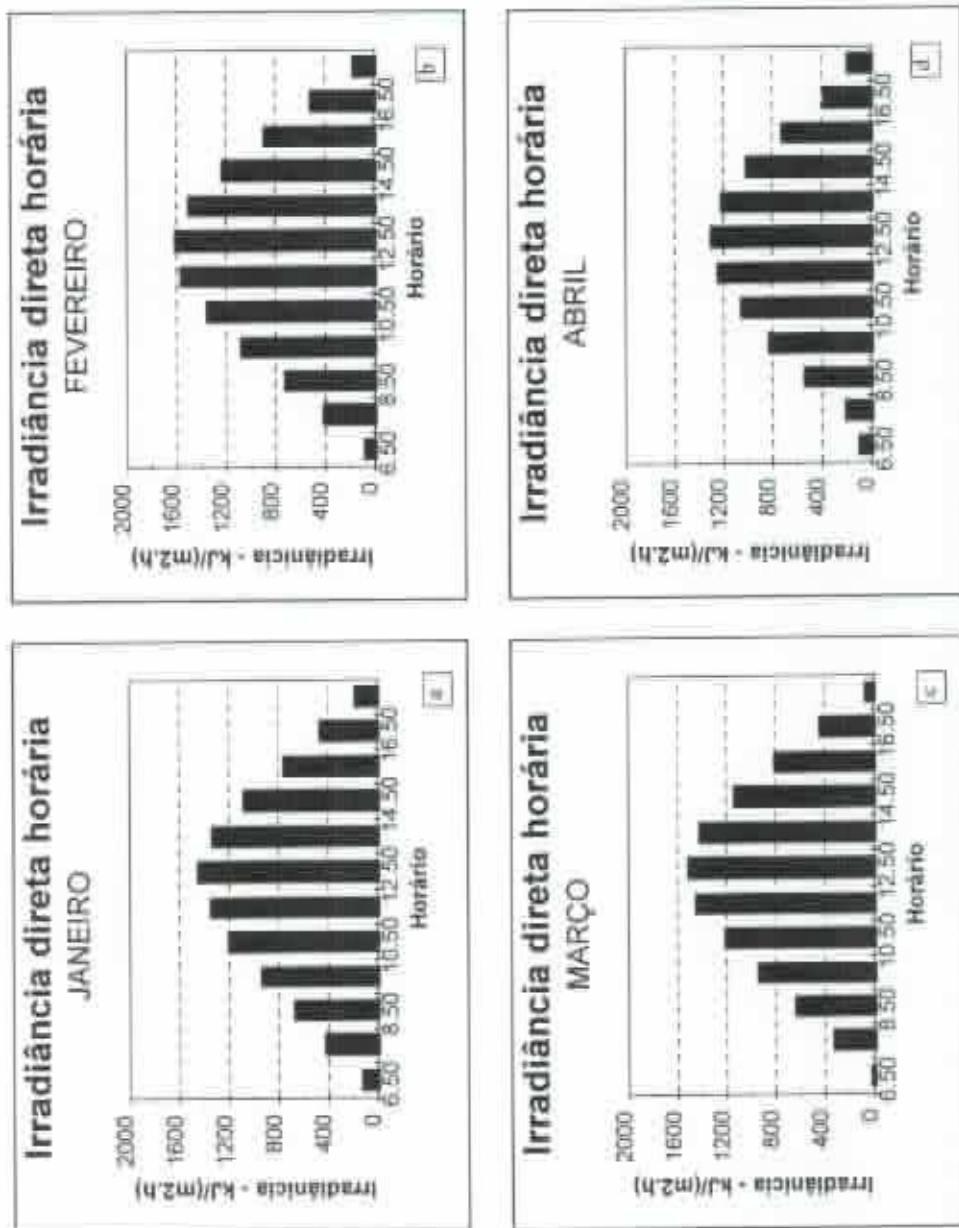


Figura 18 - Irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, $kJ/(m^2.h)$, nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d), em Viçosa-MG.

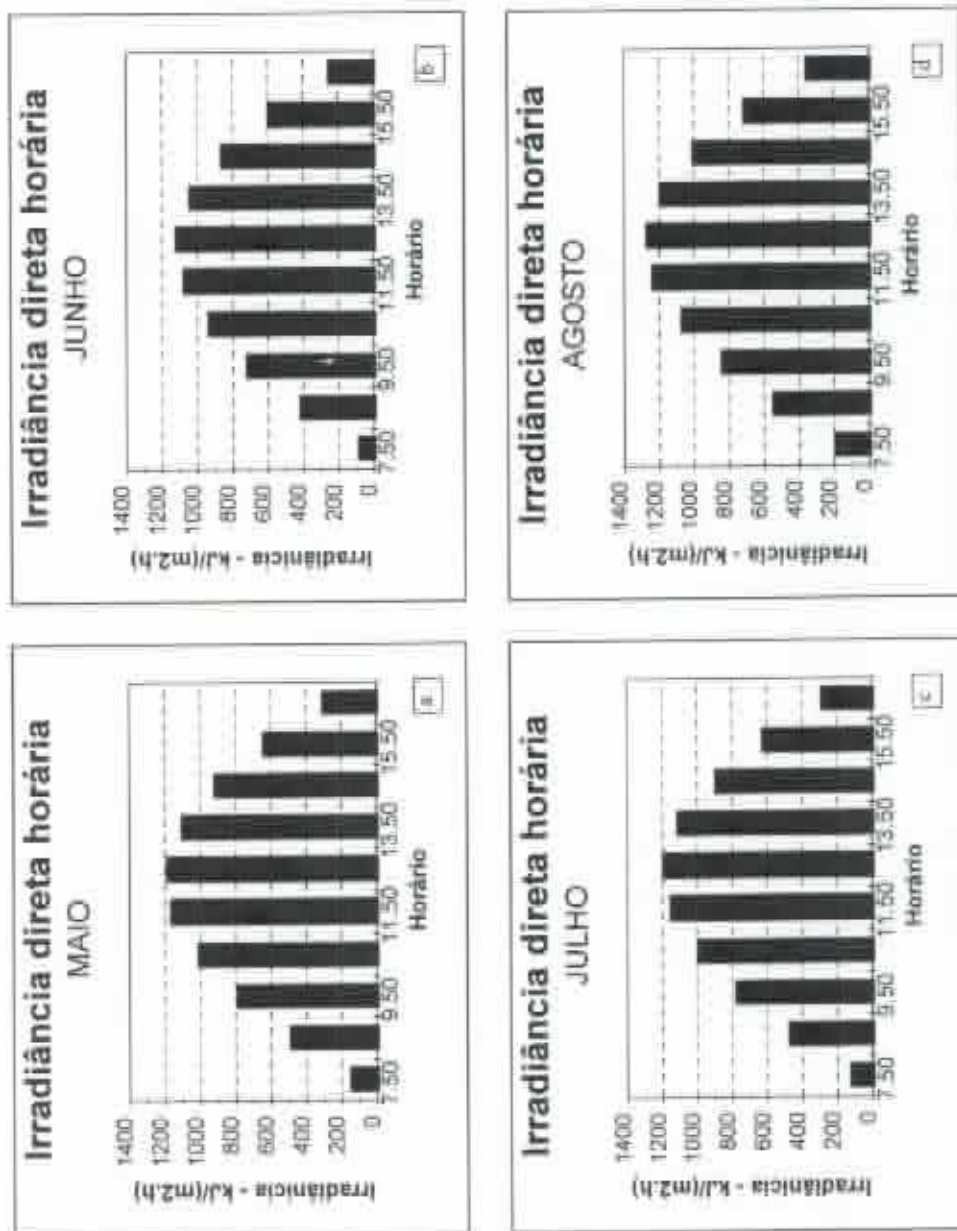


Figura 19 - Irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{h})$, nos meses de maio (a), junho (b), julho (c) e agosto (d), em Viçosa-MG.

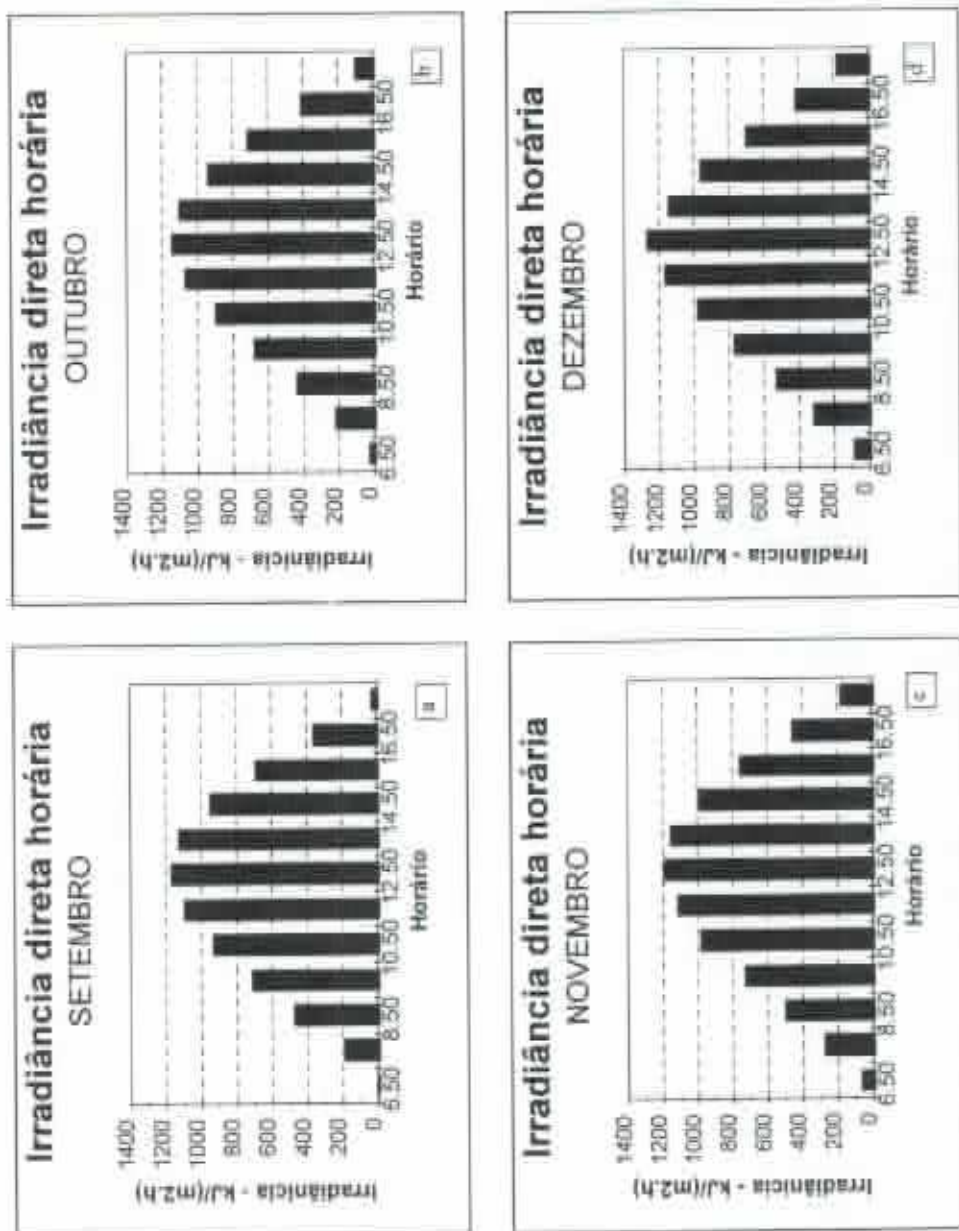


Figura 20 - Irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, nos meses de setembro (a), outubro (b), novembro (c) e dezembro (d), em Viçosa-MG.



Figura 21 - Irradiância solar direta horária, média anual sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{h})$, em Viçosa-MG.

Nos meses de junho e fevereiro, como pode ser verificado nas Figuras 18b e 19b, a irradiância direta horária máxima é de $1.121 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ e $1.616 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, respectivamente, sendo o horário de maior incidência de 12 às 13 horas. Nos outros meses do ano, o comportamento é semelhante, apresentando valores mais altos de radiação entre 12 e 13 h.

A assimetria da curva de distribuição da radiação direta é para a direita, em consequência da distribuição, ao longo do dia da insolação horária, que apresenta os maiores valores durante os intervalos de 12 às 14 horas, como pode ser verificado nas Figuras de 23 a 27. Apesar de a insolação ser ligeiramente menor, durante o período de 12 às 13 horas (quando comparado com o período de 13 às 14 horas), o maior valor da radiação no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal, durante o período de 12 às 13, é suficiente para resultar numa maior quantidade de radiação direta neste período.

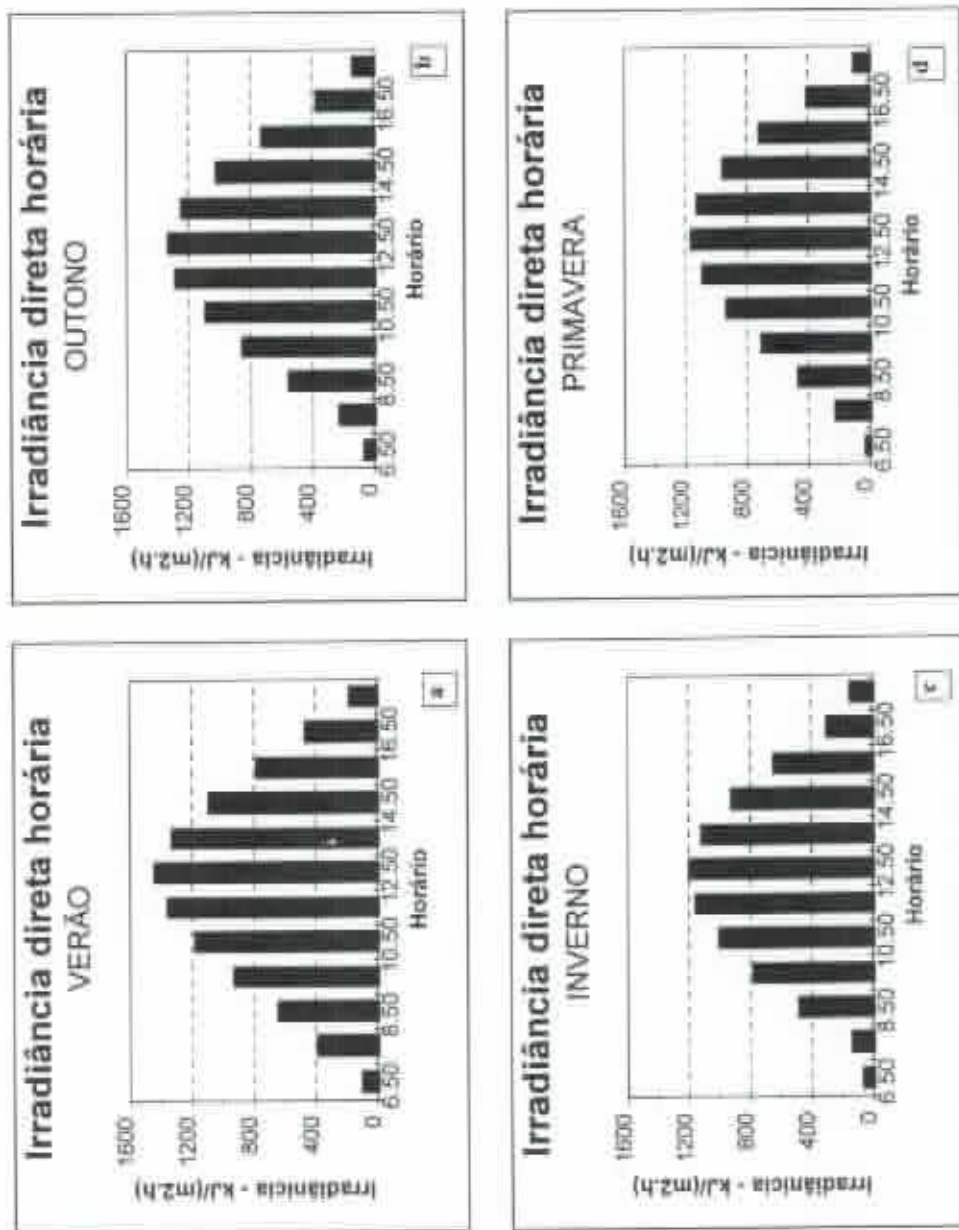


Figura 22 - Irradiância solar direta horária, média mensal sobre uma superfície horizontal, $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, no verão (a), no outono (b), no inverno (c) e na primavera (d), em Viçosa-MG.

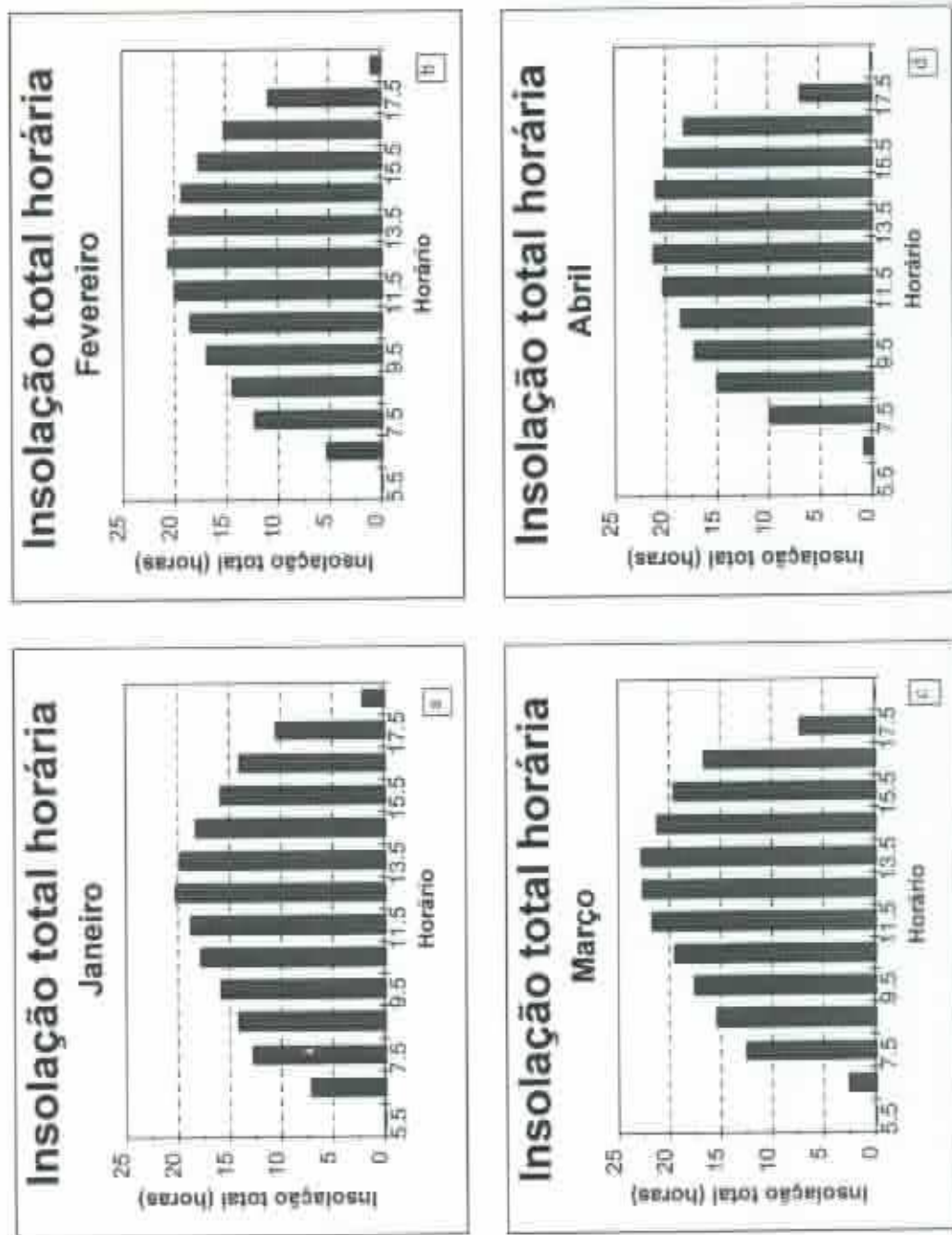


Figura 23 - Insolação total horária, em horas, nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d), em Viçosa-MG.

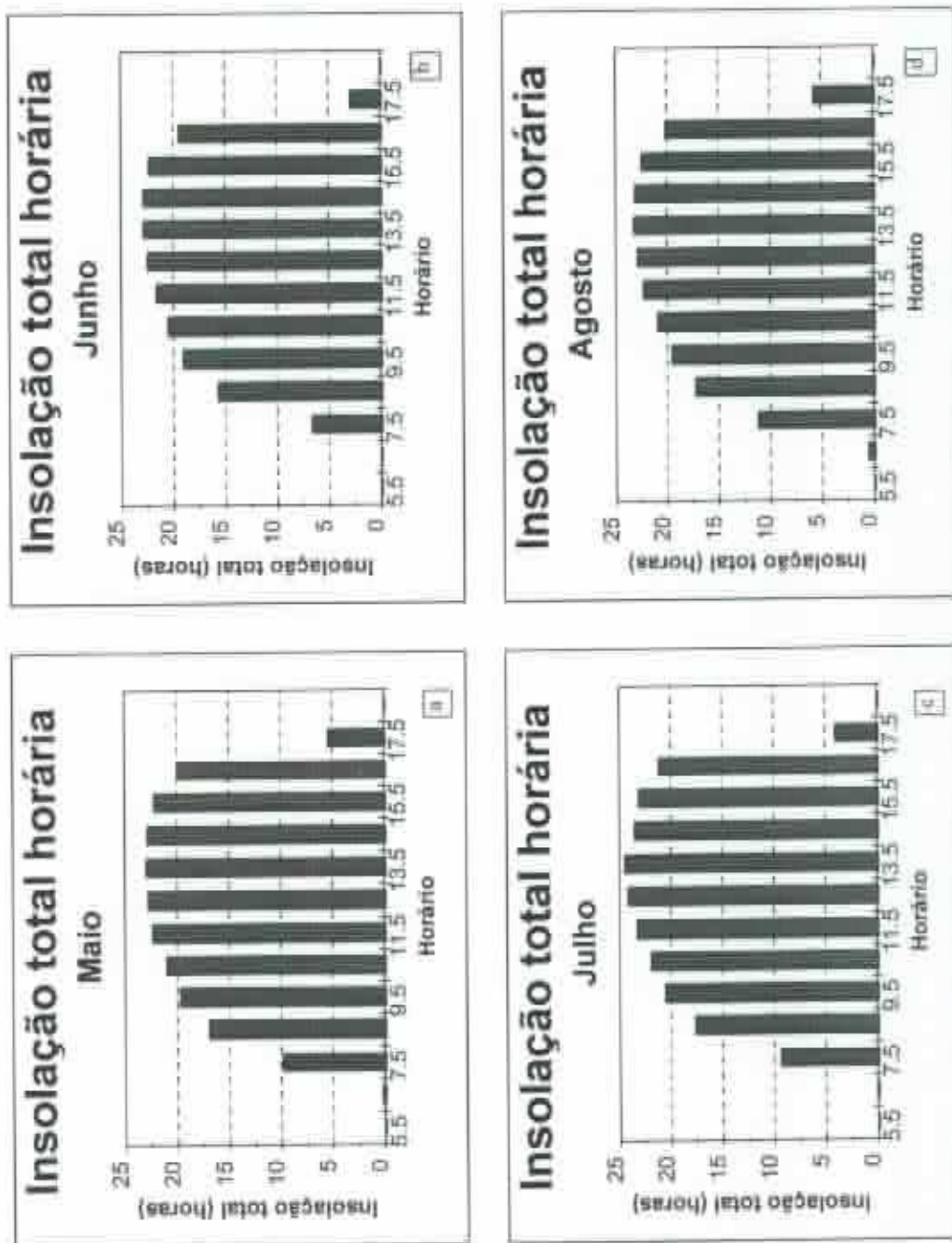


Figura 24 - Insolação total horária, em horas, nos meses de maio (a), junho (b), julho (c) e agosto (d), em Viçosa-MG.

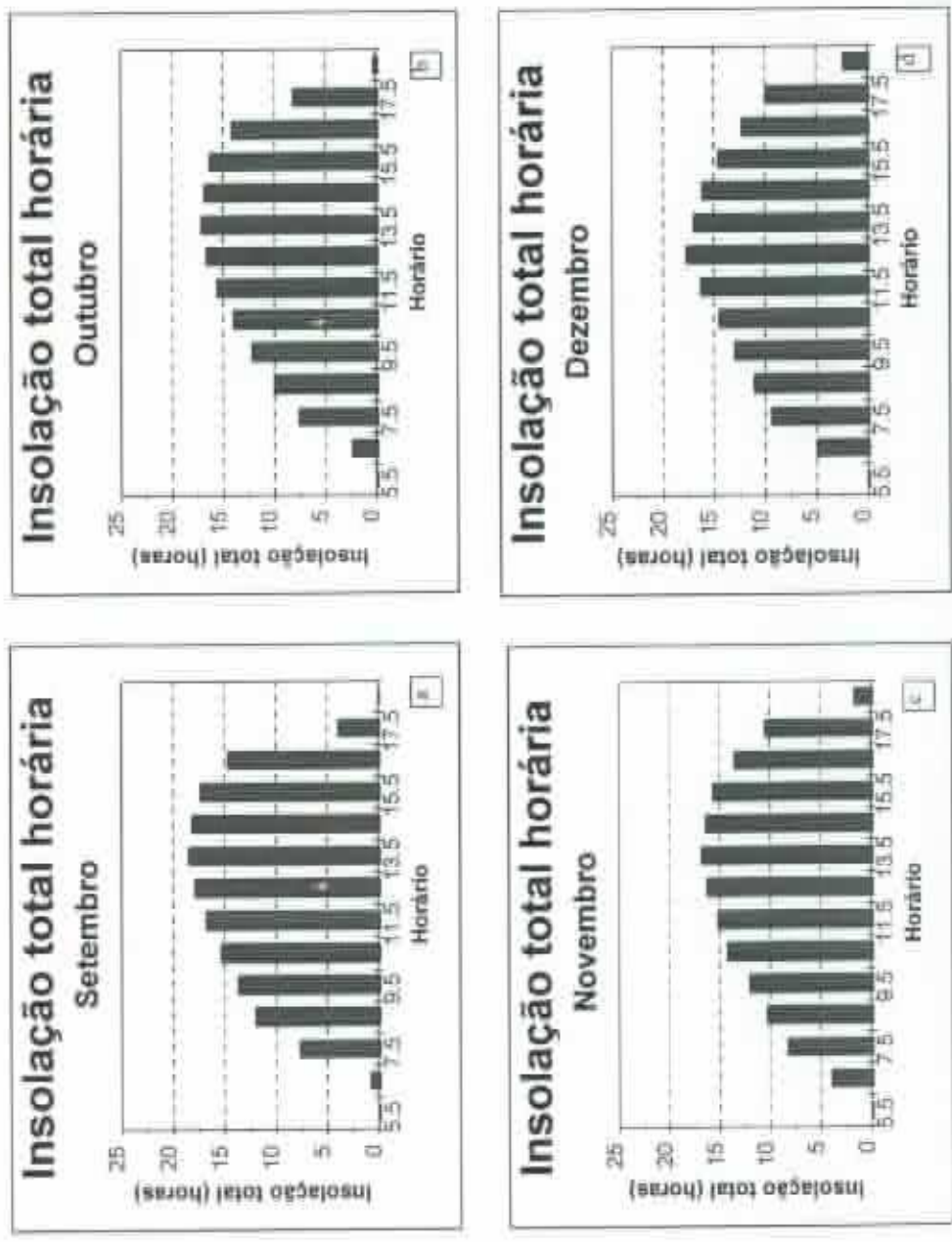


Figura 2.5 - Insolação total horária, em horas, nos meses de setembro (a), outubro (b), novembro (c) e dezembro (d), em Vicosina-MG.



Figura 26 - Insolação total horária, média anual, em horas, em Viçosa-MG.

Com relação à quantidade de radiação direta, estimada nas quatro estações (Figura 22), esta é maior no verão, apresentando um total diário de $9.919 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. A primavera é a estação que apresenta o menor valor de radiação solar direta, $7.962 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. No outono e no inverno, o total diário é de $7.989 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $8.963 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, respectivamente. Apesar de a radiação no topo ser maior na primavera do que no inverno, o número de horas de brilho solar e a razão de insolação são significativamente maiores, no inverno (6,72 horas de insolação diária e 0,61 de razão de insolação no inverno contra 5,08 horas de insolação diária e 0,41 de razão de insolação na primavera). Em agosto a nebulosidade é de 45%, aumentando para 60%, em setembro, 69%, em outubro, e 71%, em novembro. No verão, a incidência de radiação direta é maior, apesar de a razão de insolação ser baixa (0,46), uma vez que a quantidade de radiação incidente no topo da atmosfera é maior, nesta estação, em consequência de maior elevação solar.

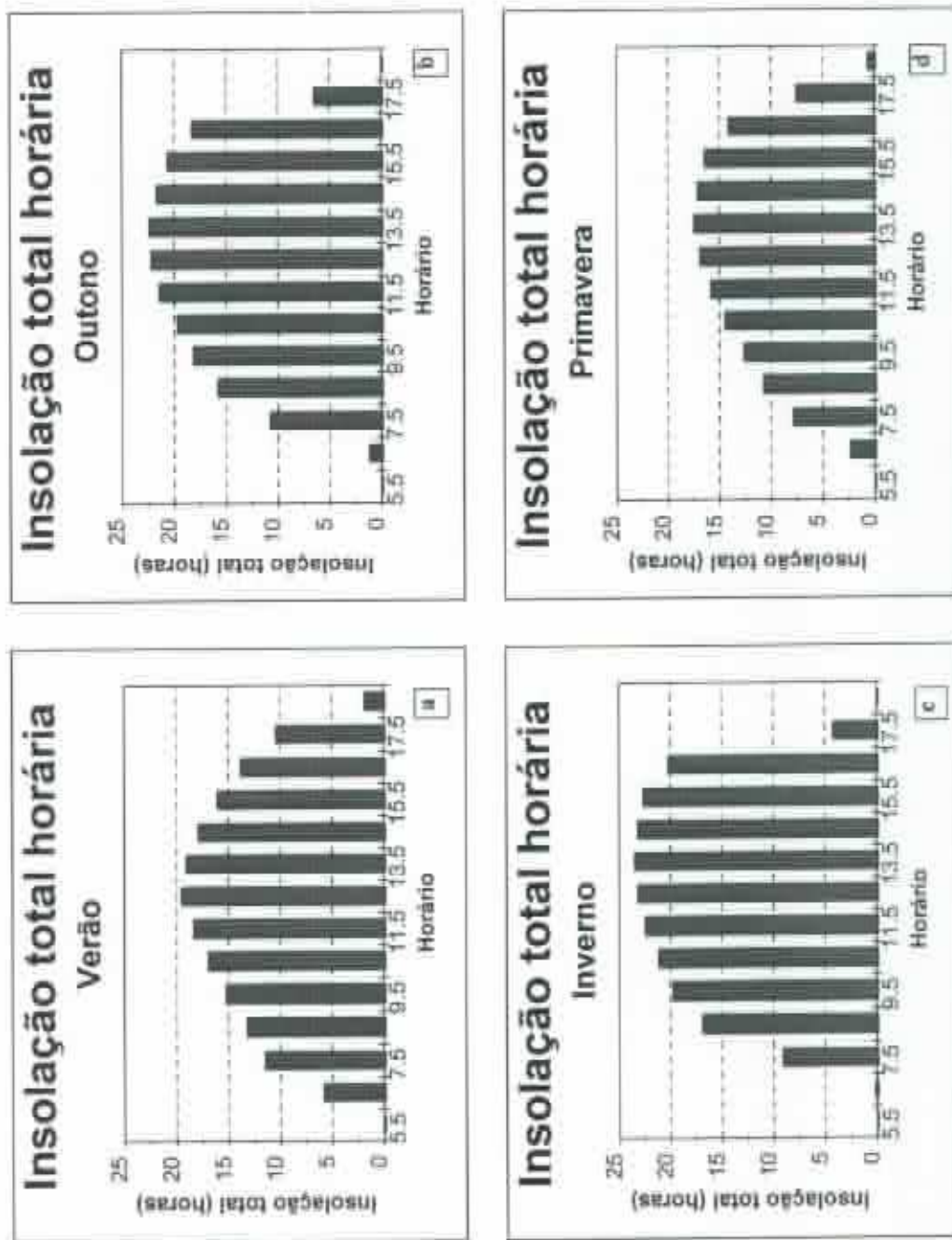


Figura 27 - Insolação total horária, em horas, no verão (a), no outono (b), no inverno (c) e na primavera (d), em Viçosa-MG.

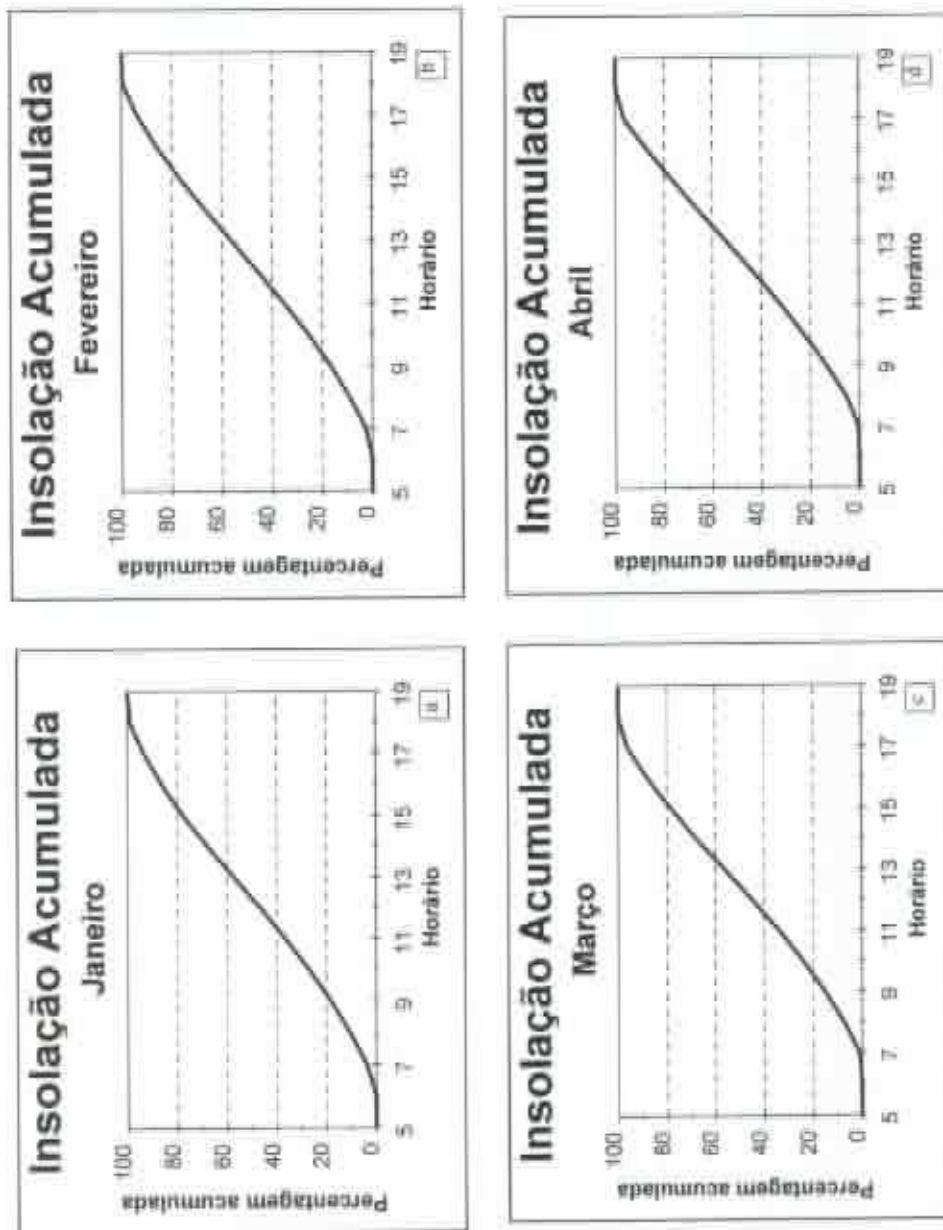


Figura 28 - Curvas de porcentagem acumulada de insolação, em função da hora do dia, nos meses de janeiro (a), fevereiro (b), março (c) e abril (d), em Viçosa-MG.

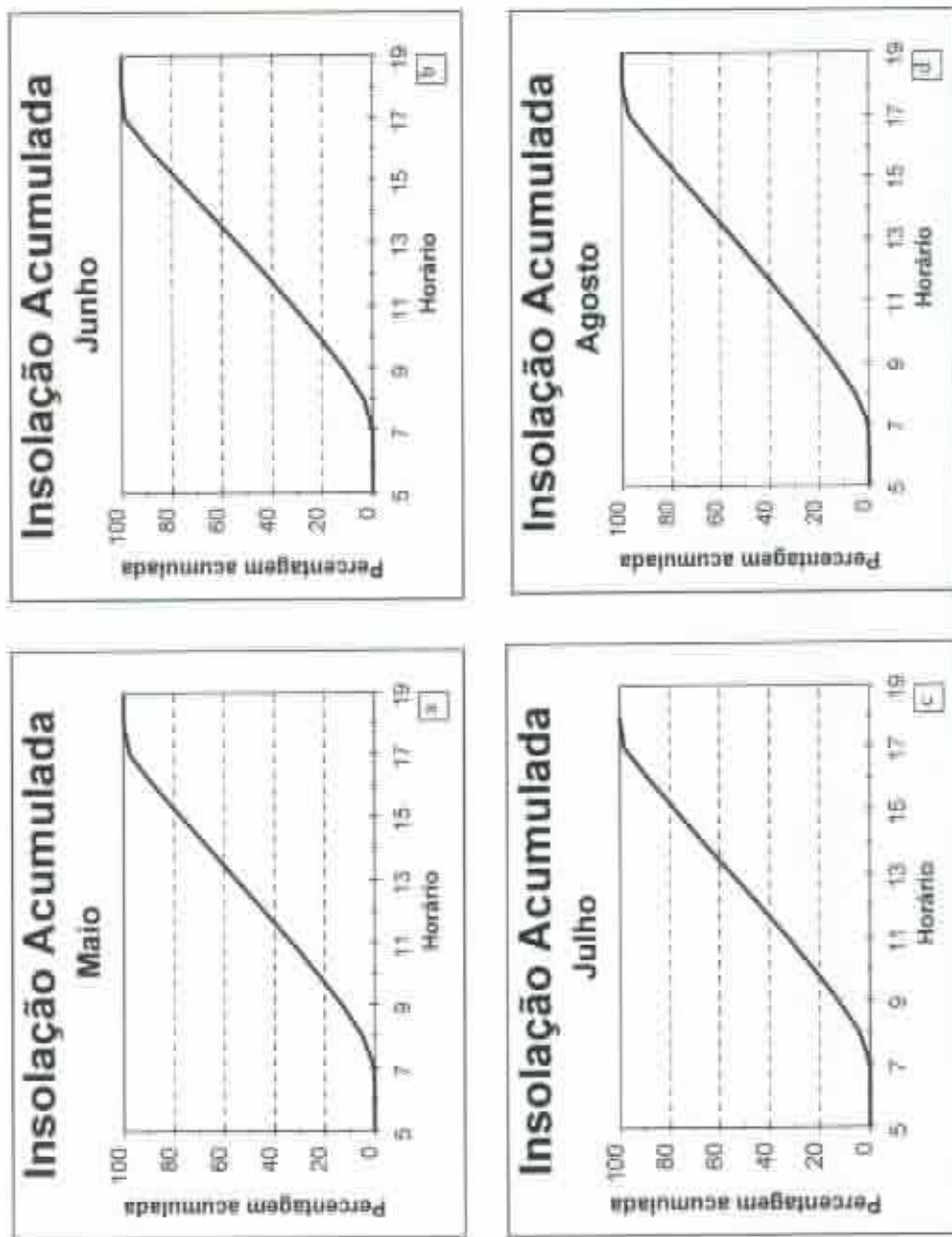


Figura 29 - Curvas de percentagem acumulada de insolação, em função da hora do dia, nos meses de maio (a), junho (b), julho (c) e agosto (d), em Viçosa-MG.

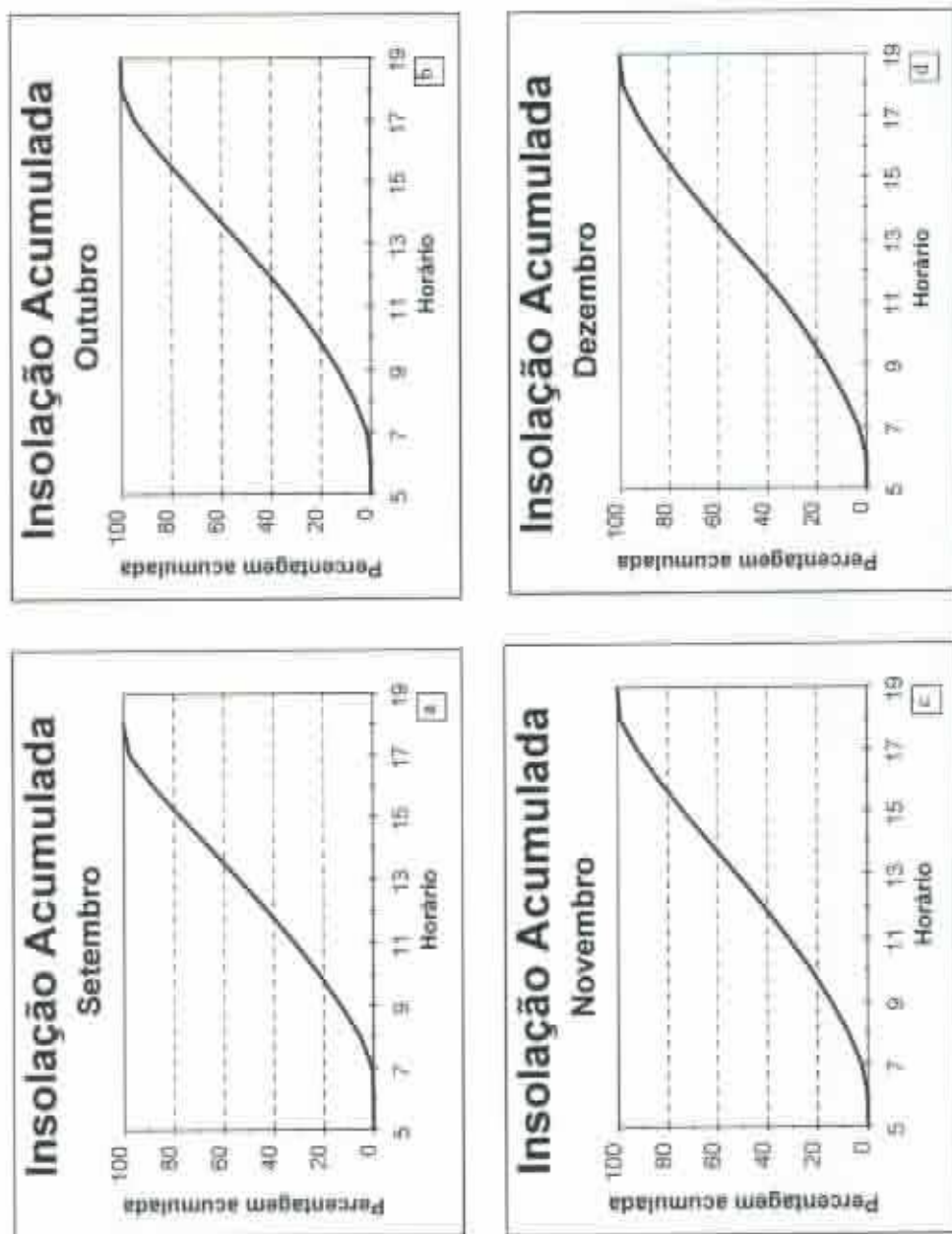


Figura 30 - Curvas de porcentagem acumulada de insolação, em função da hora do dia, nos meses de setembro (a), outubro (b), novembro (c) e dezembro (d), em Viçosa-MG.

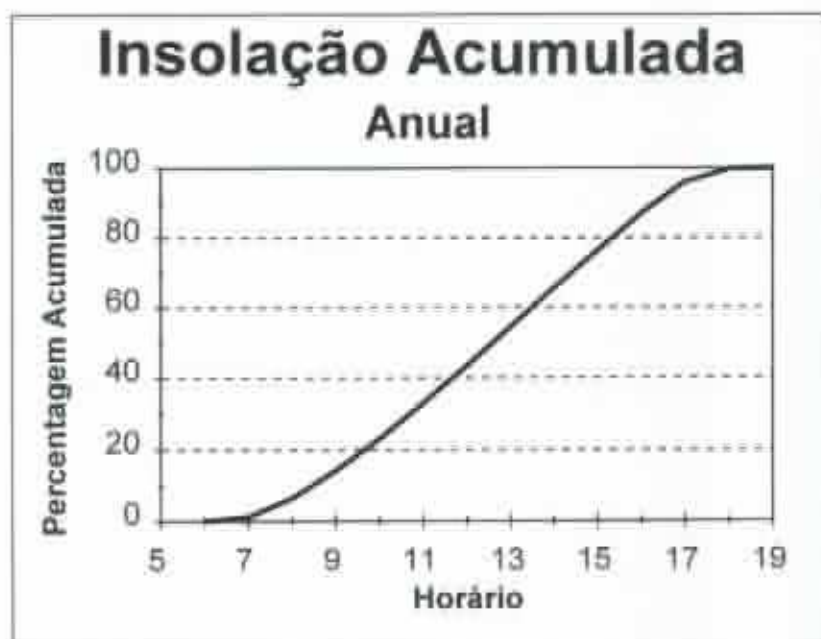


Figura 31 - Curva de porcentagem acumulada de insolação, em função da hora do dia, média anual, em Viçosa-MG.

Observa-se, na Figura 22, que no outono a radiação direta, estimada para Viçosa, é maior que na primavera, embora a irradiância no topo da atmosfera seja praticamente a mesma. Isto ocorre, porque a cobertura do céu é maior na primavera do que no outono.

Com relação à distribuição horária da radiação direta nas quatro estações, esta varia de $1.168 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ na primavera a $1.447 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, no verão, como pode ser observado na Figura 22.

Observa-se, nas Figuras de 28 a 32, que a menor concentração de insolação ocorre durante o período da manhã, variando de 40,8% no mês de outubro, a 46,2%, em janeiro, apresentando um valor médio anual de 43,5%. Nas quatro estações, a concentração de insolação no período da manhã é de 41,5%, na primavera, 43,3%, no inverno, 45,1%, no verão, e 43,8%, no outono, mostrando, desta forma, que a primavera é a estação que apresenta maior quantidade de nuvens, no período da manhã, resultando na estação que apresenta as manhãs menos ensolaradas.

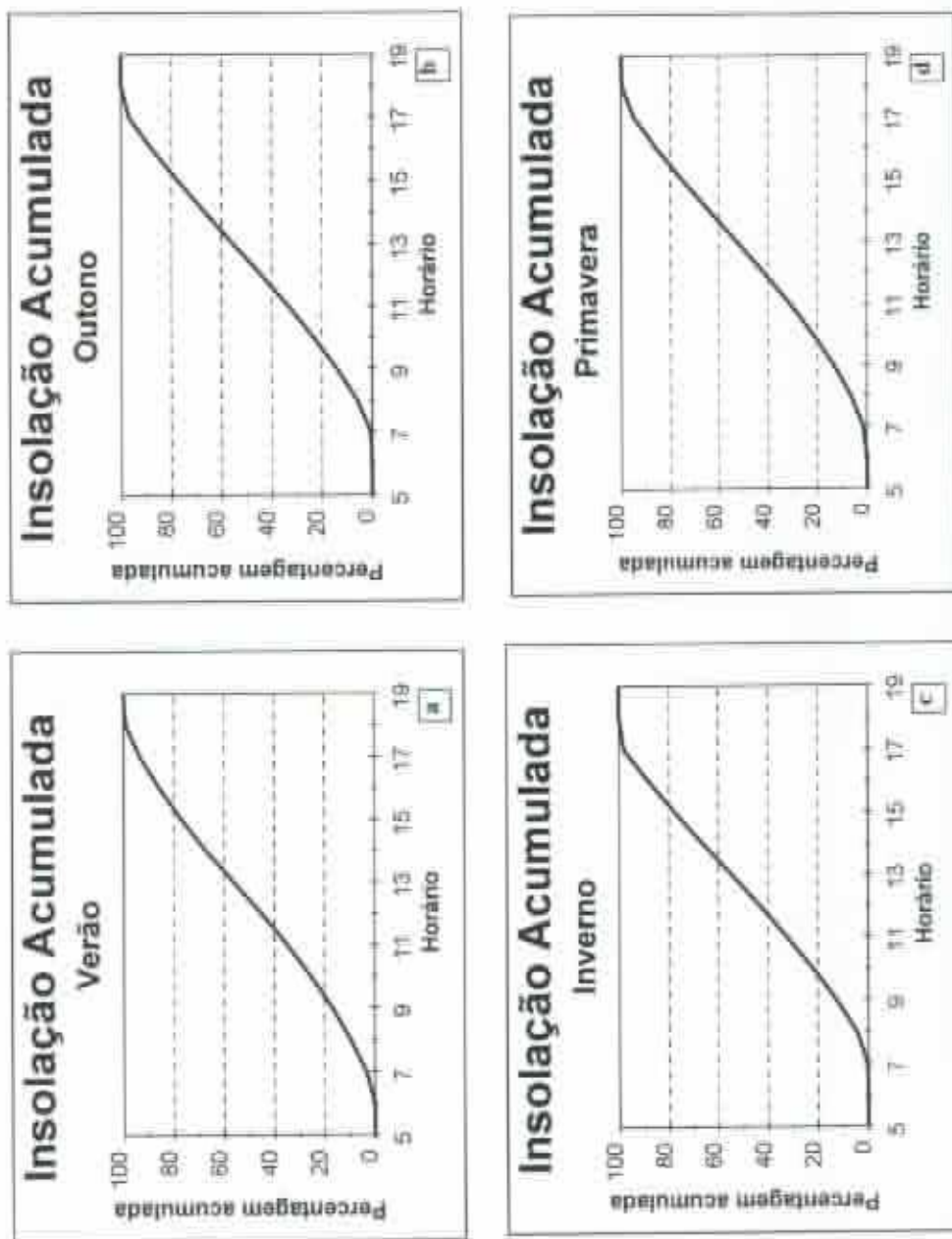


Figura 32 - Curvas de percentagem acumulada de insolação, em função da hora do dia, no verão (a), no outono (b), no inverno (c) e na primavera (d), em Viçosa-MG.

Verifica-se, na Figura 26, que, em termos médios anuais, valores máximos de insolação ocorrem entre 13 e 14 h. Somente nos meses de dezembro, janeiro, e fevereiro os valores máximos de insolação ocorrem entre 12 e 13 h, Figuras de 23 a 25.

4.6. *Variação da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal em Viçosa - MG*

Utilizou-se da equação desenvolvida, neste trabalho, para Viçosa-MG (Equação 76), para estimar a irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, utilizando de dados de insolação referentes ao período de 1961 a 1990 (BRASIL, 1992). A Figura 33 ilustra a variação, ao longo do ano da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal, em Viçosa - MG.

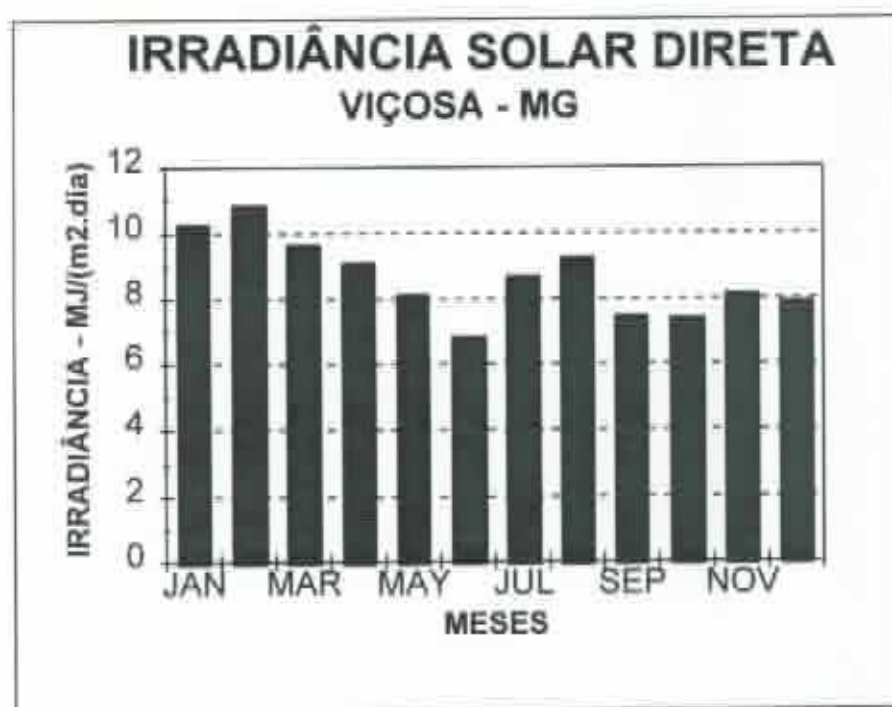


Figura 33 - Irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal MJ/(m².dia), em Viçosa - MG.

A Figura 34 mostra a variação, ao longo do ano da insolação e da irradiância solar no topo da atmosfera, para Viçosa-MG.

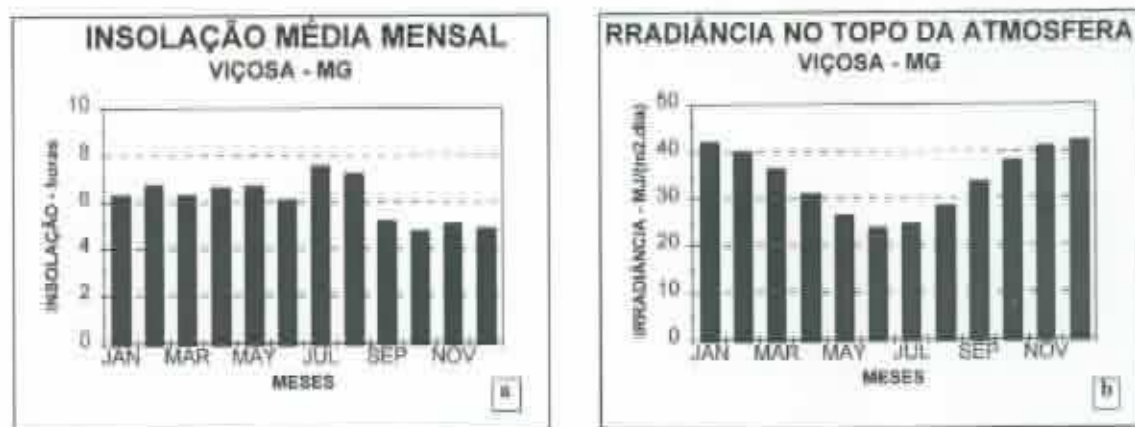


Figura 34 - Cursos anuais da insolação (a) e da irradiância solar no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal (b), para Viçosa-MG.

Observa-se, na Figura 33, que os maiores valores de irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal, em Viçosa-MG, ocorrem nos meses de janeiro, fevereiro e março, com máximo em fevereiro. Considerando estes três meses, fevereiro é o que apresenta maior insolação, apesar de não ser o mês de maior irradiância no topo da atmosfera (Figura 34a e 34b). O menor valor de irradiância solar direta ocorre no mês de junho, em consequência de uma baixa insolação (Figura 34a) e de um baixo valor de irradiância solar no topo da atmosfera. Neste mês, a irradiância no topo é a mais baixa do ano (Figura 34b).

Verifica-se, na Figura 33, que de fevereiro a junho ocorre um decréscimo na irradiância direta (neste período de irradiância no topo da atmosfera também diminui, Figura 34b). A partir do mês de junho, ocorre um aumento na irradiância direta até o mês de agosto. De agosto a

setembro, acontece uma diminuição, e a partir de setembro, a irradiância direta aumenta até o mês de fevereiro, sendo que, durante este período, de setembro a dezembro, a irradiância no topo da atmosfera cresce (Figura 34b). O aumento, verificado na irradiância solar direta, de julho a agosto, justifica-se pelo fato de o acréscimo na irradiância no topo da atmosfera ser maior que a redução da insolação. De agosto para setembro, embora a irradiância no topo da atmosfera aumente, verifica-se uma redução na irradiância direta, associada ao decréscimo substancial na insolação. De setembro para outubro, por outro lado, a irradiância direta manteve-se praticamente inalterada, uma vez que o aumento da irradiância no topo da atmosfera foi, praticamente, compensado pela redução da insolação. Análises similares podem ser feitas para os outros meses.

A título de ilustração, apresentam-se, na Figura 35, os cursos anuais de nebulosidade, precipitação e duração do dia (15^o dia do mês). Inúmeras considerações podem ser feitas, analisando-se as figuras apresentadas. Por exemplo, verifica-se, na Figura 34a, que a insolação, nos meses de fevereiro e maio, é praticamente a mesma, enquanto a nebulosidade, em maio, é menor (Figura 35a). Isto pode ser justificado pelo fato de a duração do dia ser também menor, em maio, (Figura 35c).

4.7. Estudo da distribuição espacial e temporal da irradiância solar direta sobre uma superfície horizontal, para o Estado de Minas Gerais

Em virtude da carência de dados de radiação direta em nosso País, propôs-se, nesta seção, uma estimativa preliminar do potencial de radiação direta para o Estado de Minas Gerais, fazendo-se uso da equação, desenvolvida para Viçosa (equação 76, modelo linear de Hussain, com o coeficiente determinado para Viçosa). Ressalta-se que esta equação, quando aplicada para outra localidade do Estado de Minas Gerais, foi a que apresentou os menores erros de estimativa e um relativamente alto coeficiente de determinação, conforme descrito anteriormente.

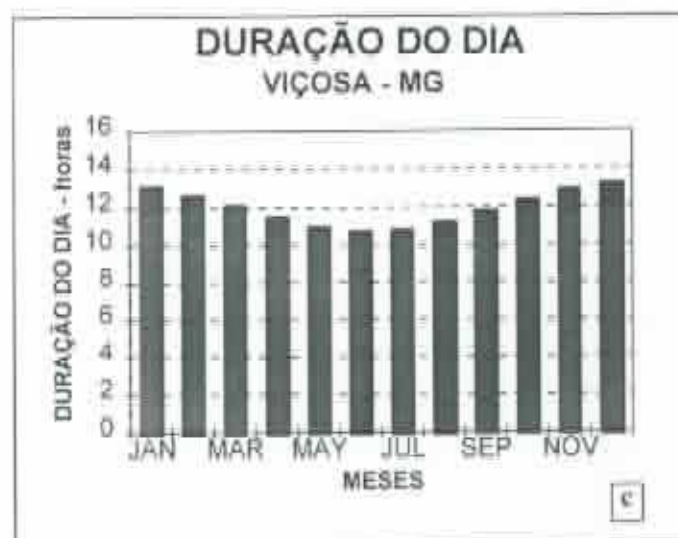
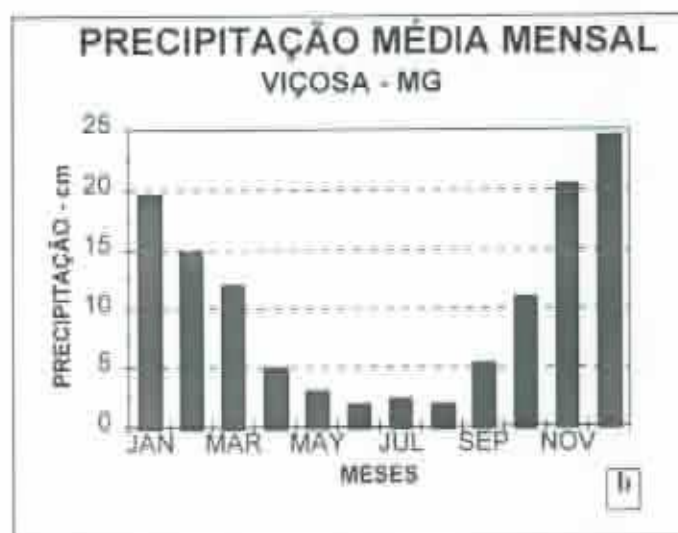
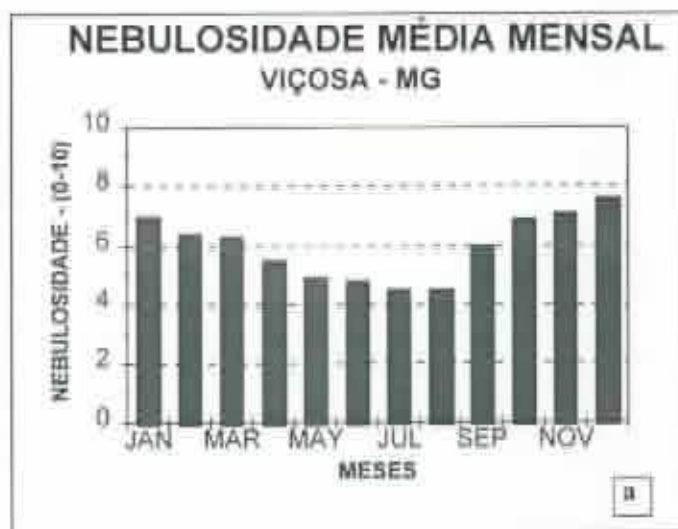


Figura 35 - Cursos anuais de nebulosidade (a), precipitação (b) e duração do 15º dia do mês (c), para Viçosa-MG.

Utilizaram-se de dados de insolação referentes ao período de 1961 a 1990, de 77 estações do INMET, sendo 49 do Estado de Minas e as restantes pertencentes aos estados vizinhos. A maior parte dos dados foi extraída das Normais Climatológicas (1992), sendo o restante obtido diretamente no INMET. Ressalta-se que várias localidades não possuem o período completo dos dados.

A Tabela 13 mostra as localidades utilizadas e suas coordenadas geográficas e a Figura 36 ilustra geograficamente estas localidades.

Tabela 13 - Localidades usadas para o traçado de isolinhas de irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal no Estado de Minas Gerais, e suas respectivas coordenadas geográficas. Os números, associados às localidades, são usados como referências no mapa da Figura 18.

Nº	Cidade	Latitude graus	Longitude graus	Altitude m
1	AIMORÉS	-19,48º	-41,07º	83,74
2	ANGRA DOS REIS	-23,02º	-44,32º	2,80
3	ARAÇUAÍ	-16,87º	-42,07º	285,38
4	ARAXÁ	-19,57º	-46,93º	1.004,67
5	BAMBUÍ	-20,00º	-45,98º	662,27
6	BARBACENA	-21,25º	-43,77º	1.127,00
7	BELO HORIZONTE	-19,93º	-43,93º	852,28
8	BRASÍLIA	-15,78º	-47,93º	1.161,12
9	C. ITAPEMIRIM	-20,85º	-41,10º	78,59
10	C. MATO DENTRO	-19,03º	-43,43º	652,80
11	CAETITÉ	-14,05º	-42,62º	881,40
12	CAMBUQUIRA	-21,85º	-45,30º	944,00
13	CAMPOS DO JORDÃO	-22,73º	-45,58º	1.579,61
14	CAPARAÓ	-20,52º	-41,87º	844,18
15	CAPINÓPOLIS	-18,68º	-49,57º	621,54
16	CARATINGA	-19,80º	-42,15º	611,21
17	CARAVELAS	-17,73º	-39,25º	4,42
18	CARINHANHA	-14,17º	-43,92º	440,23

Continua...

Tabela 13, Cont.

Nº	Cidade	Latitude graus	Longitude graus	Altitude m
19	CATAGUASES	-21,38º	-42,68º	168,60
20	CATALÃO	-18,18º	-47,95º	842,07
21	CATANDUVA	-21,13º	-48,97º	536,00
22	CEL. PACHECO	-21,58º	-43,25º	435,80
23	CURVELO	-18,77º	-44,43º	616,16
24	DIAMANTINA	-18,25º	-43,60º	1.296,92
25	ESPINOSA	-14,92º	-42,85º	571,22
26	FORMOSA	-15,53º	-47,33º	912,80
27	FRANCA	-20,55º	-47,43º	1.027,00
28	GOIÂNIA	-16,67º	-49,25º	743,13
29	GOV. VALADARES	-18,85º	-41,93º	278,45
30	GUARATINGA	-16,73º	-39,73º	324,86
31	IBIRITÉ	-20,02º	-44,05º	814,54
32	IPAMERI	-17,72º	-48,17º	772,39
33	ITAMARANDIBA	-17,85º	-42,85º	1.097,80
34	ITAPERUNA	-21,20º	-41,88º	119,82
35	JANAÛBA	-15,78º	-43,30º	516,00
36	JANUÁRIA	-15,43º	-44,37º	473,71
37	JOÃO MONLEVADE	-19,83º	-43,12º	859,84
38	JOÃO PINHEIRO	-17,70º	-46,17º	761,36
39	JUIZ DE FORA	-21,77º	-43,35º	941,17
40	LAVRAS	-21,23º	-45,00º	920,00
41	LINHARES	-19,40º	-40,07º	29,2
42	MACHADO	-21,67º	-45,92º	874,5
43	MARIA DA FÉ	-22,30º	-45,38º	1.276,33
44	MOCAMBINHO	-15,05º	-44,02º	452,0
45	MONTE AZUL	-15,08º	-42,75º	604,73
46	MONTES CLAROS	-16,72º	-43,87º	647,18
47	NOVA FRIBURGO	-22,28º	-42,53º	845,60
48	OLIVEIRA	-20,68º	-44,82º	966,50
49	OURO FINO	-22,28º	-46,37º	925,71
50	OURO PRETO	-20,38º	-43,50º	1.147,44
51	PARACATU	-17,22º	-46,87º	712,30
52	PATOS DE MINAS	-18,60º	-46,52º	944,16
53	PEDRA AZUL	-16,00º	-41,28º	649,91
54	PIRAÍ	-22,63º	-43,90º	366,65
55	PIRAPORA	-17,33º	-44,95º	505,24
56	PIRENÓPOLIS	-15,85º	-48,97º	740,80
57	POÇOS DE CALDAS	-21,78º	-46,57º	1.185,74

Continua...

Tabela 13, Cont.

N°	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude
		graus	graus	m
58	POMPEU	-19,22°	-45,00°	691,71
59	POSSE	-14,10°	-46,37°	826,03
60	RIO DE JANEIRO	-22,92°	-43,17°	3,10
61	RIO VERDE	-17,80°	-50,92°	745,54
62	SALINAS	-16,17°	-42,30°	471,32
63	SÃO CARLOS	-22,02°	-47,88°	856,80
64	SÃO JOÃO DEL REI	-21,30°	-44,27°	991,00
65	SÃO LOURENÇO	-22,10°	-45,02°	901,32
66	SÃO MATEUS	-18,70°	-39,85°	25,84
67	SÃO PAULO	-23,50°	-46,62°	798,29
68	SÃO SEBAST. DO PARAÍSO	-20,90°	-46,98°	820,00
69	SÃO SIMÃO	-21,48°	-47,55°	618,20
70	SETE LAGOAS	-19,47°	-44,25°	735,95
71	TEÓFILO OTONI	-17,85°	-41,52°	357,38
72	UBERABA	-19,75°	-47,92°	743,90
73	UBERLÂNDIA	-18,92°	-48,28°	872,00
74	UNAI	-16,37°	-46,88°	460,00
75	VASSOURAS	-22,33°	-43,67°	438,06
76	VIÇOSA	-20,75°	-42,85°	692,73
77	VITÓRIA DA CONQUISTA	-14,83°	-40,88°	839,72

Os valores de H_s (irradiância solar diária média mensal no topo da atmosfera, sobre uma superfície horizontal) e N (duração do dia, valor médio mensal) foram calculados, utilizando as equações 10 e 48, respectivamente, para o 15^o dia do mês.

A partir das estimativas de irradiância solar direta, foram confeccionados mapas com isolinhas de irradiância solar direta para o Estado de Minas Gerais. As Figuras de 37 a 45 ilustram a distribuição espacial da irradiância solar direta diária, média mensal sobre uma superfície horizontal (H_h) para o Estado durante o ano, nos diferentes meses e estações.

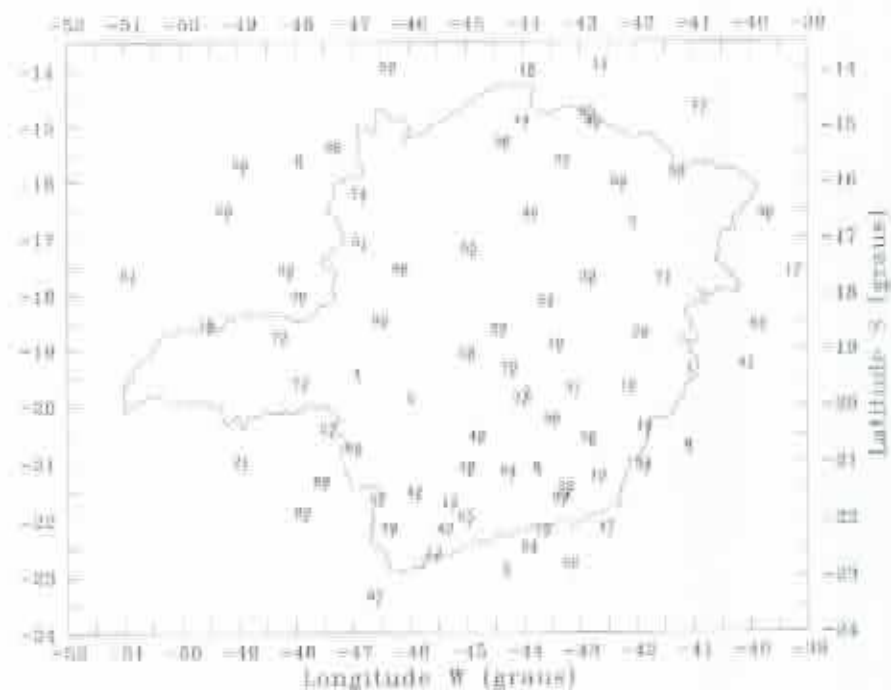


Figura 36 - Representação geográfica das localidades, utilizadas no traçado das isolinhas de irradiação solar direta diária e média mensal sobre uma superfície horizontal, para o Estado de Minas Gerais.

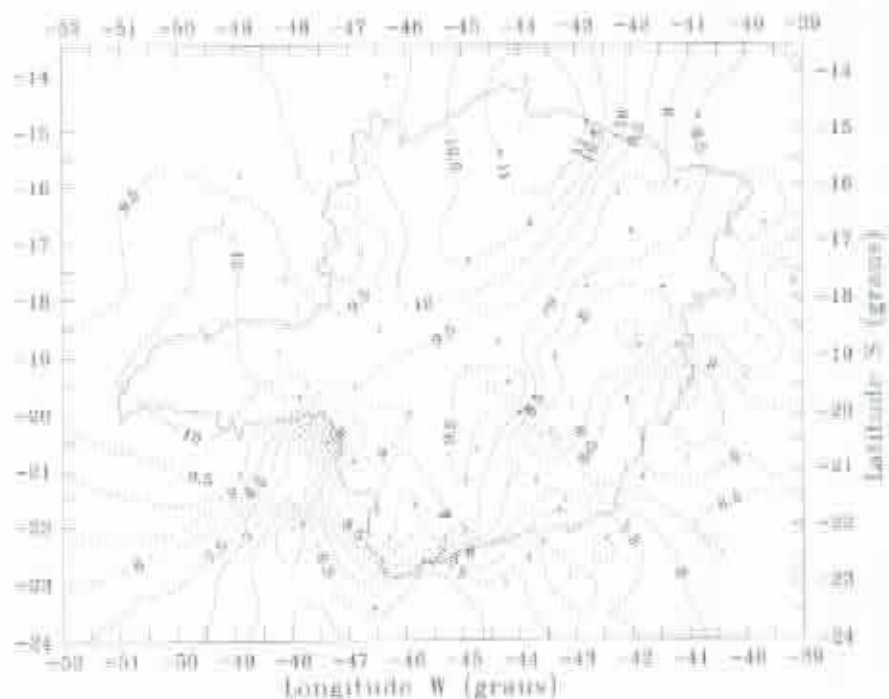


Figura 37 - Distribuição da irradiação solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, média anual.

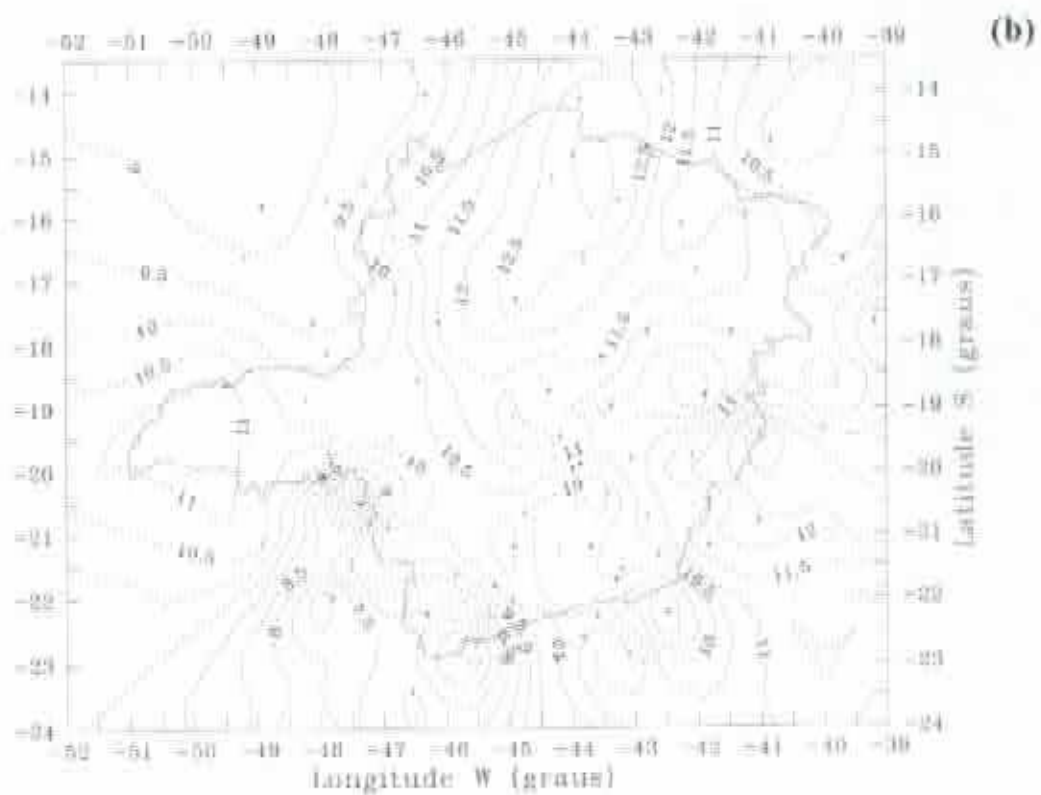
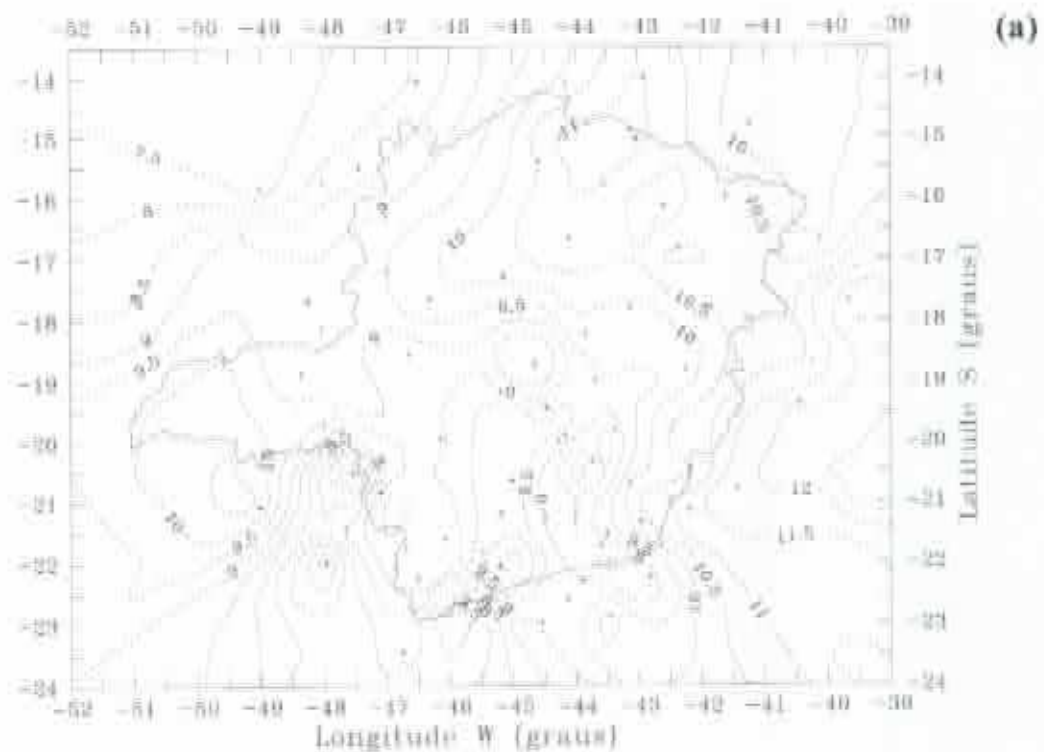


Figura 38 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, nos meses de janeiro (a) e fevereiro (b).

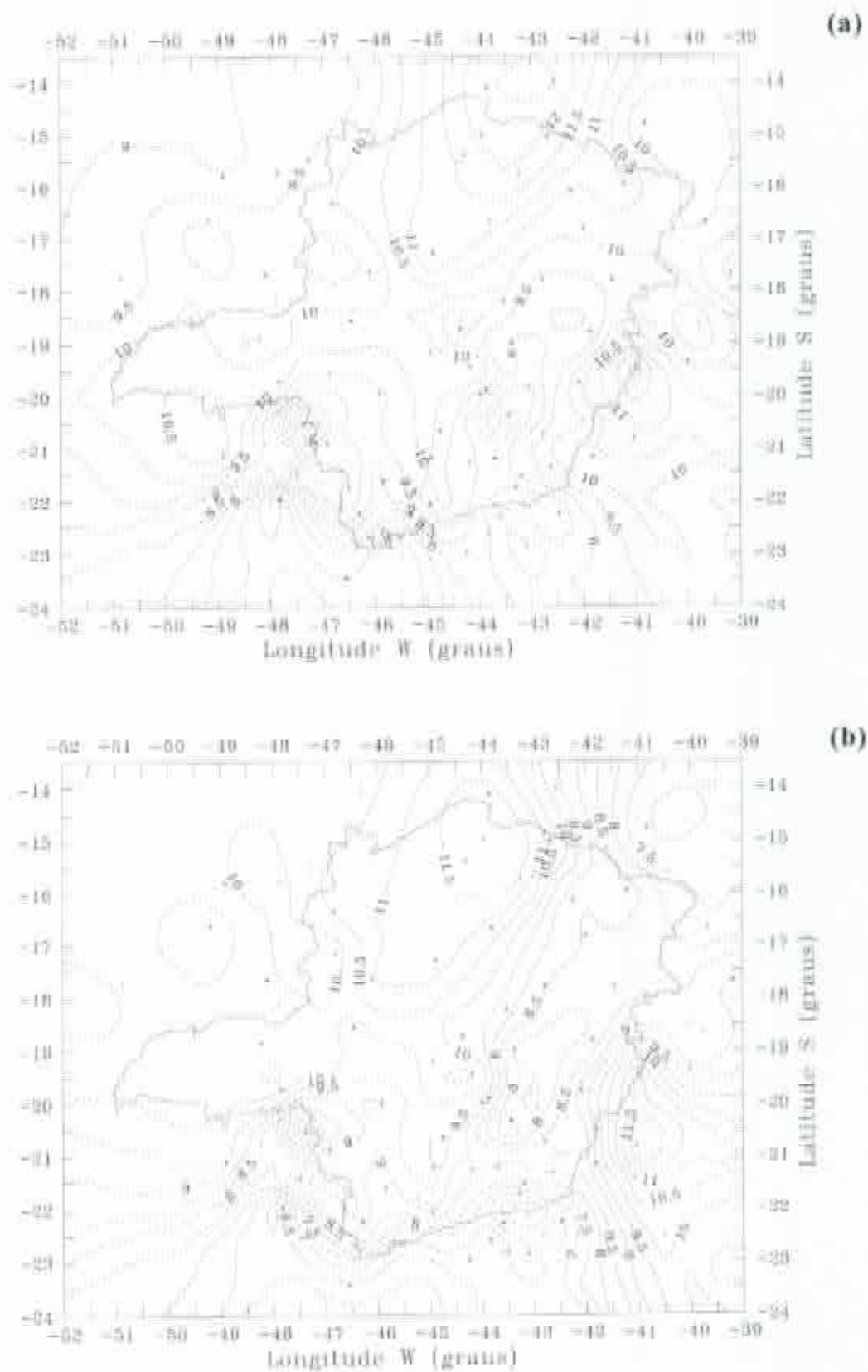


Figura 39 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, nos meses de março (a) e abril (b).

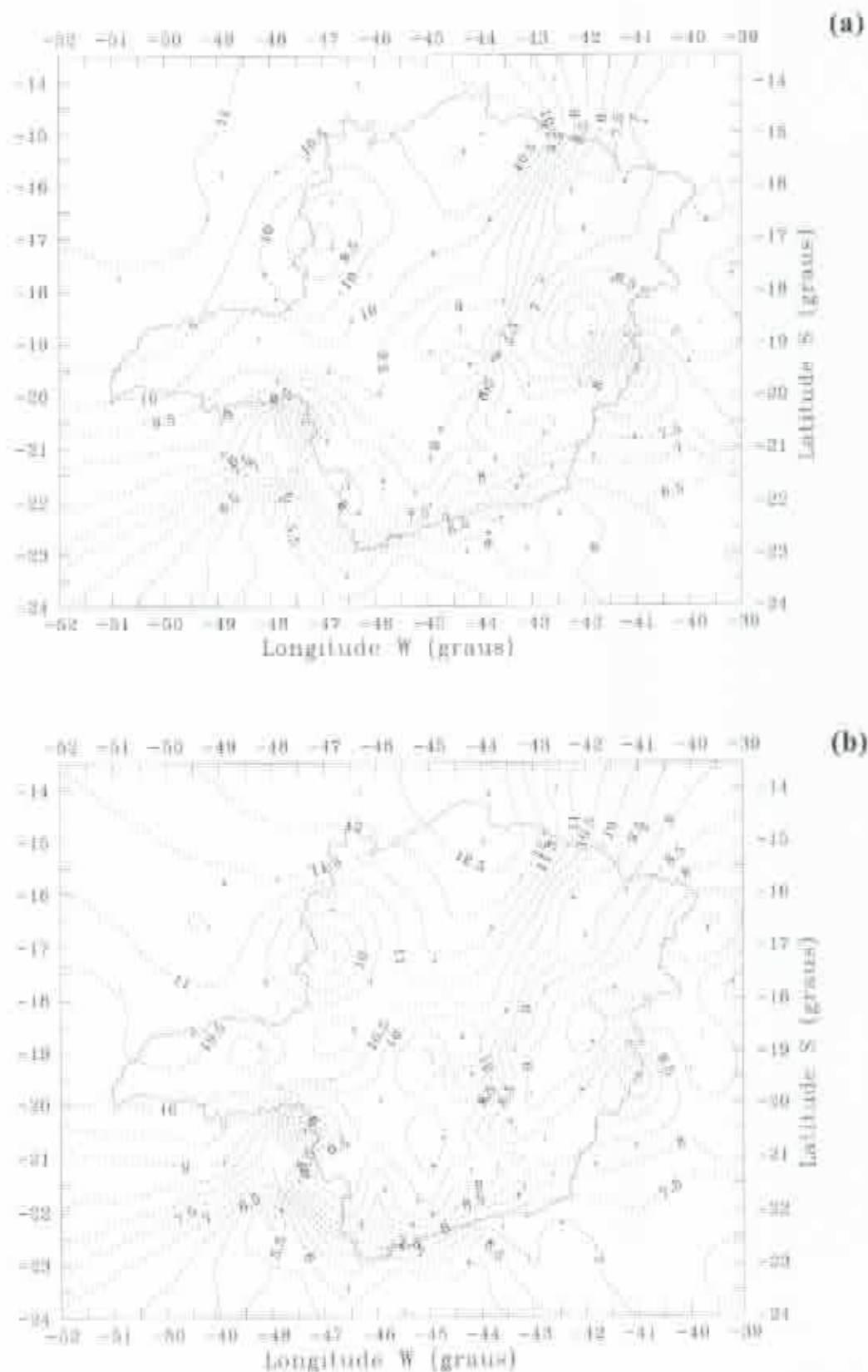


Figura 41 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, nos meses de julho (a) e agosto (b).

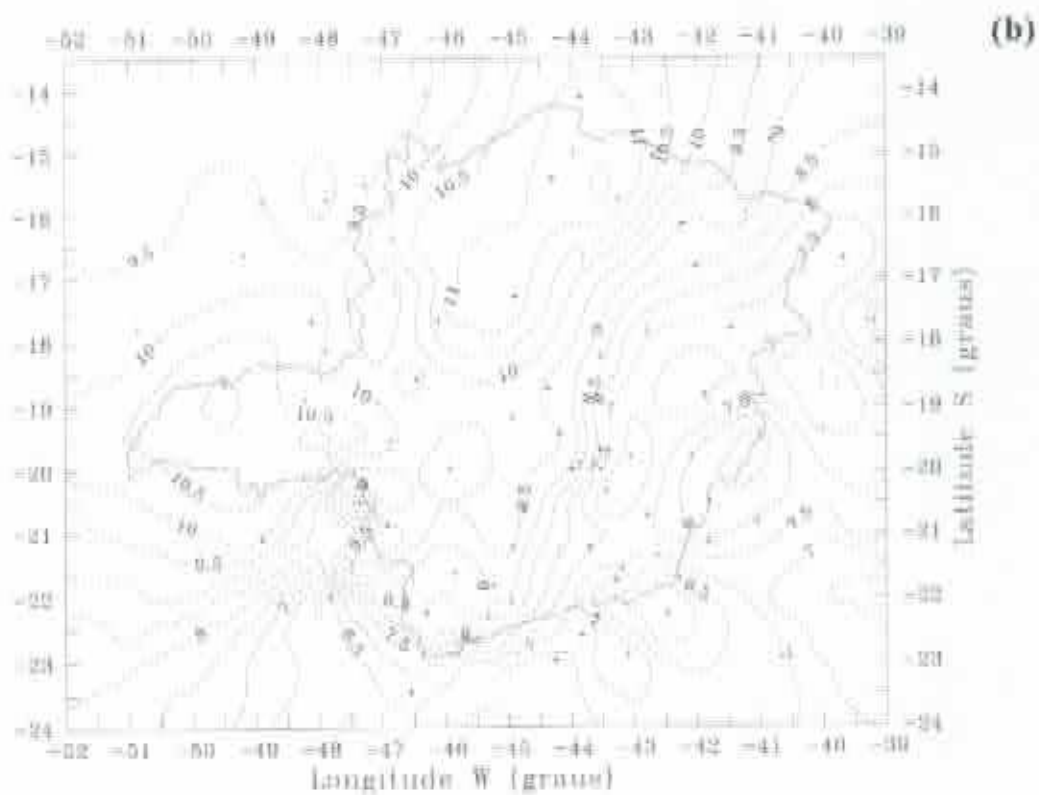
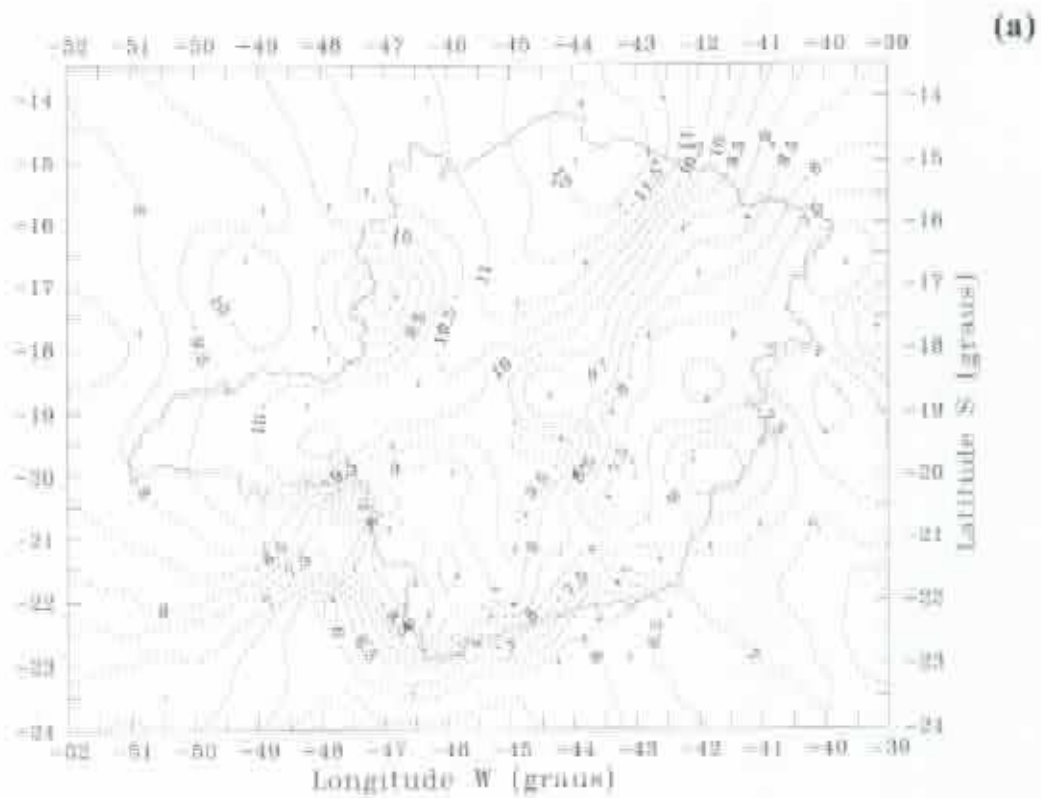


Figura 42 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, nos meses de setembro (a) e outubro (b).

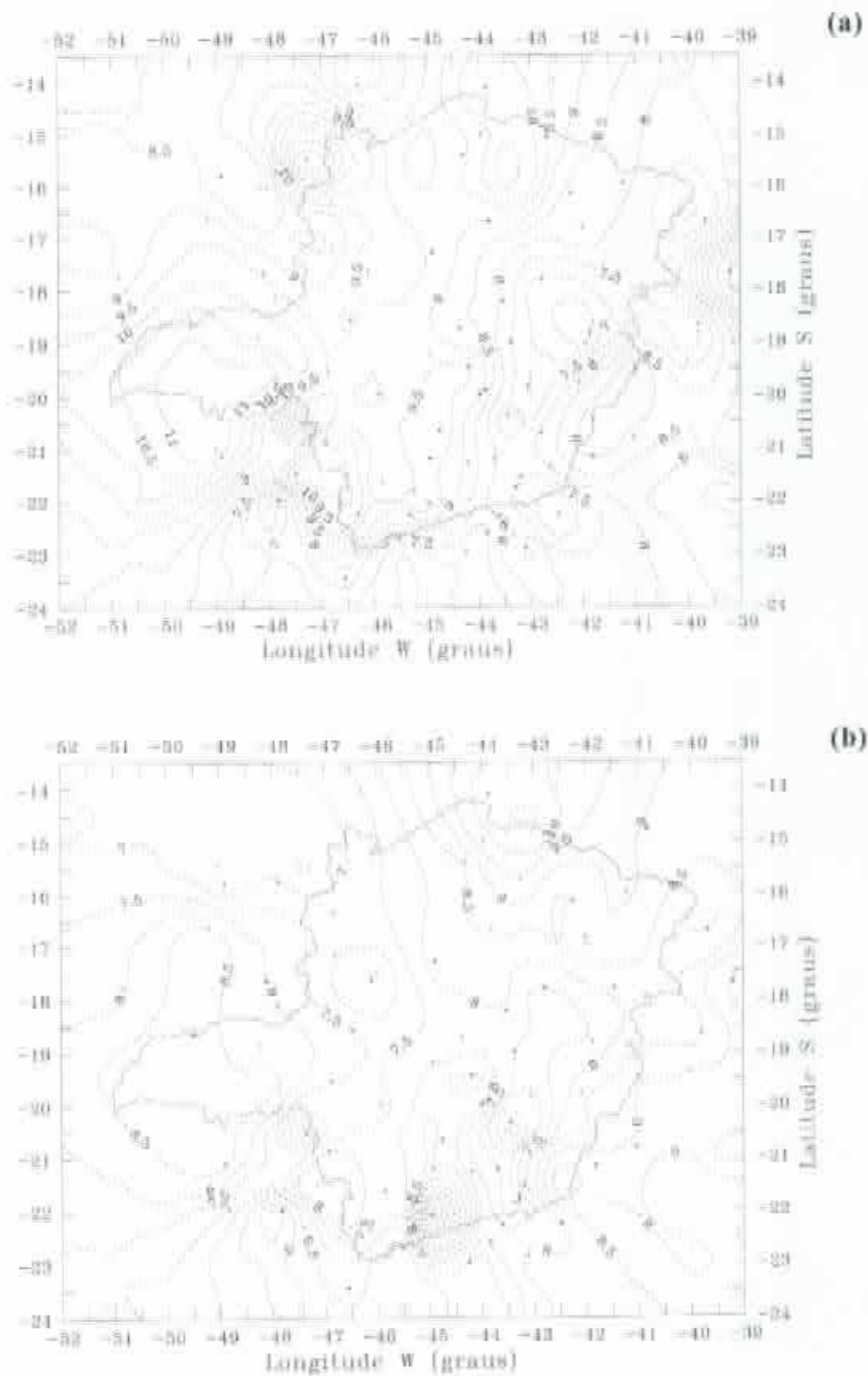


Figura 43 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, nos meses de novembro (a) e dezembro (b).

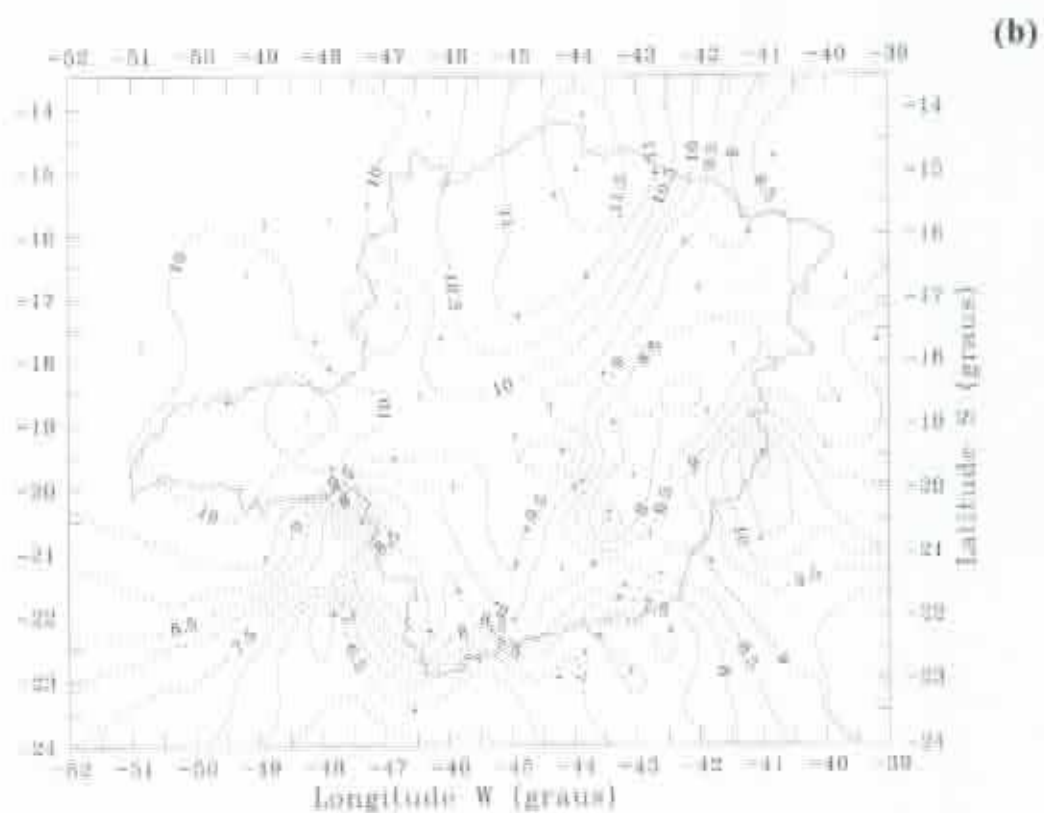
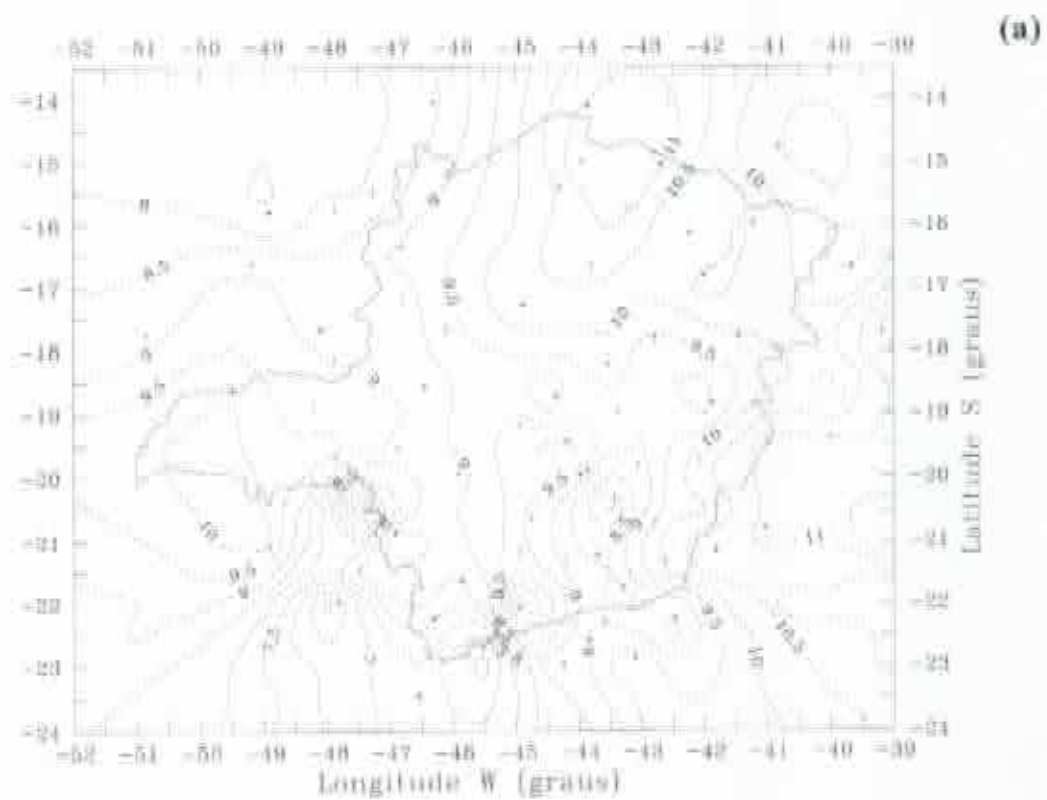


Figura 44 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, no verão (a) e outono (b).

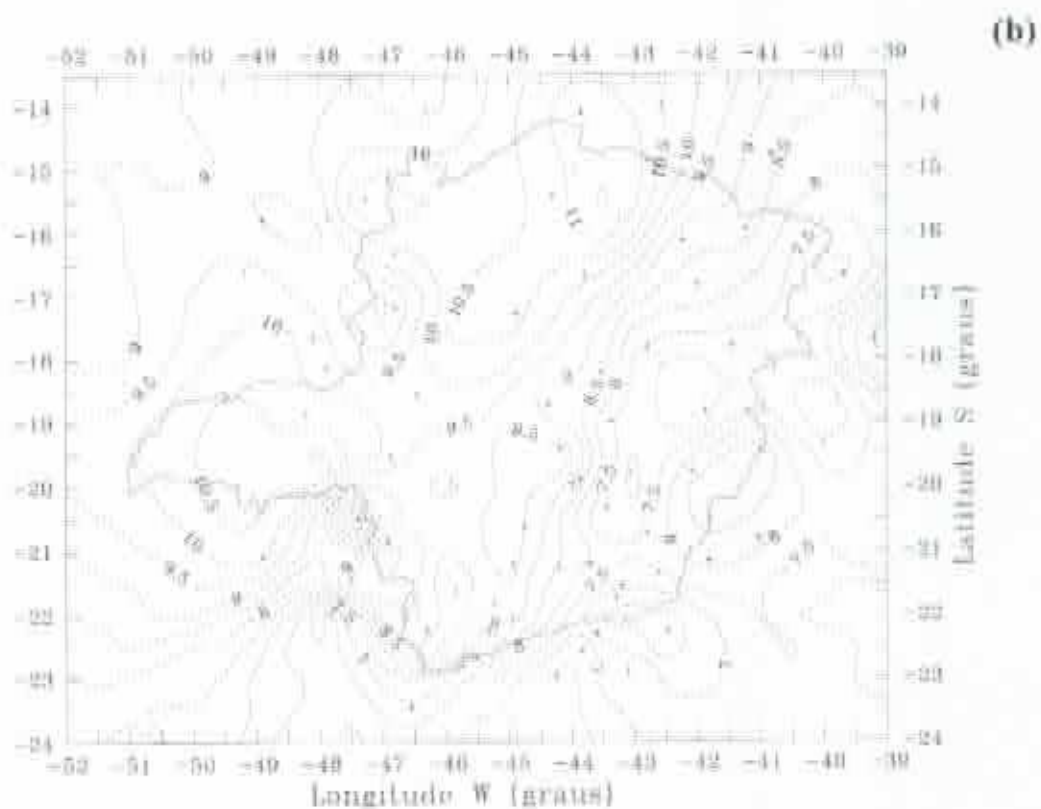
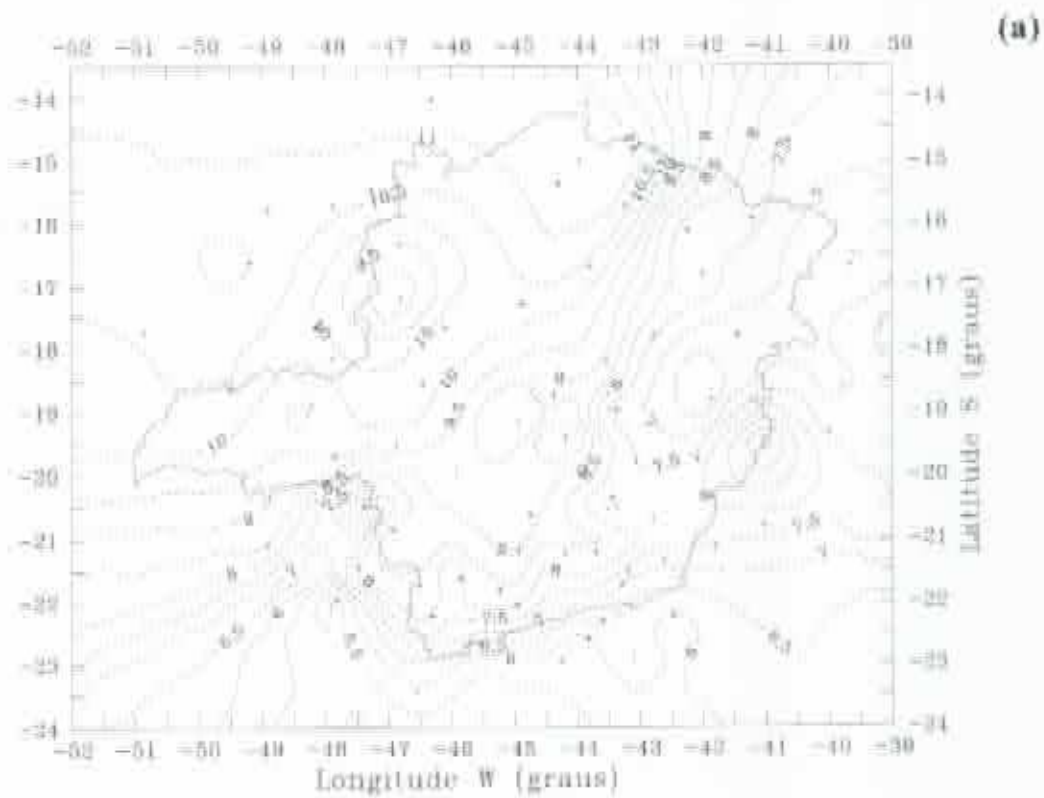


Figura 45 - Distribuição da irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Minas Gerais, no inverno (a) e primavera (b).

A irradiância solar direta média anual no Estado de Minas Gerais variou de um valor máximo em Janaúba ($11,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para um mínimo em Juiz de Fora ($6,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), sendo a região Norte do Estado a que recebe maior quantidade de radiação direta durante o ano, e a região Sul a que recebe menor quantidade. As regiões Noroeste e Oeste também apresentam valores elevados de radiação direta, como pode ser observado na Figura 37. Ressalta-se que na região próxima a Aimorés (Leste do Estado), encontram-se valores elevados de radiação direta. O valor médio de radiação direta para o Estado (calculado como a média aritmética simples entre os valores das 49 estações do Estado) foi de $9,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

De acordo com as estimativas feitas, fevereiro é o mês de maior incidência de radiação direta no Estado. Dentre as 49 estações (pertencentes ao Estado de Minas Gerais), 40 apresentam durante o mês de fevereiro o maior valor de radiação direta, durante o ano, sendo o valor médio para o mês igual a $10,8 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. O mês de junho é o que apresenta valores mais baixos de radiação direta, com uma média de $8,1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, sendo que 44 estações (dentre as 49 pertencentes ao Estado) apresentam neste mês os valores mais baixos do ano. Apesar de a razão de insolação ser maior, no mês de junho, em relação ao mês de fevereiro, a quantidade de radiação incidente no topo da atmosfera é maior em fevereiro, em função de maior elevação solar neste mês.

No mês de junho (Figura 40b), observam-se maiores valores de irradiância solar direta na região Norte, seguida das regiões Noroeste e Oeste do Estado, sendo o valor máximo em Mocambinho, $10,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, e o mínimo em Juiz de Fora, $5,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Em fevereiro, como mostra a Figura 38b, a irradiância solar direta varia de um valor máximo de $13,6 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Aimorés (região Leste do Estado) para um mínimo de $8,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, em Ouro Fino (Sul do Estado), apresentando altos valores nas regiões Norte, Nordeste e Leste do Estado.

Em geral, tanto anualmente quanto nos meses de junho e fevereiro, verifica-se que os valores mais baixos de irradiância solar direta encontram-se na região Sul do Estado e na região próxima a Juiz de Fora e Ouro Preto. Nos demais meses do ano, o comportamento é semelhante, com valores mais elevados, nas regiões Norte, Noroeste e Nordeste do Estado, e menores, na região Sul.

Sazonalmente, o Estado de Minas Gerais apresenta os seguintes valores médios de radiação direta: no verão, $9,6 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; no outono, $9,3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; no inverno, $8,8 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$; e na primavera, $9,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Observa-se que a quantidade de radiação direta na primavera é ligeiramente inferior à do outono, isto em consequência de um menor número de horas de brilho solar na primavera.

Nota-se uma particularidade para a localidade nº 27, Franca-SP, que apresentou valores estimados de radiação direta bem inferiores aos estimados para localidades circunvizinhas, durante quase todo o ano, o que ocorreu, em razão dos baixos valores de insolação, registrados em Franca. O oposto ocorreu para São Lourenço (localidade nº 65) em vários meses do ano. O valor máximo de radiação direta para o Estado ocorreu em dezembro ($13,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), para São Lourenço. Esta localidade registra 260,1 horas de insolação, no mês de dezembro, o valor mais alto registrado no Estado.

A região Leste do Estado apresenta valores bem distintos de radiação direta, durante quase todo o ano. Governador Valadares apresenta um dos valores mais baixos de radiação direta, $7,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (média anual), enquanto Aimorés apresenta um dos mais altos do Estado ($10,43 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). Governador Valadares registra o segundo menor valor anual de insolação do Estado, 1.802,2 horas (perdendo apenas, para Juiz de Fora, 1.677,3 horas), enquanto, em Aimorés, a insolação anual é de

2.476,6 horas (sendo que a distância entre estas duas localidades é de, aproximadamente, 120 km).

Em termos de aproveitamento da energia solar direta, apesar de algumas áreas apresentarem baixos valores, o potencial do Estado é elevado. Considerando os valores de incidência de radiação direta de todas as localidades de Minas, tem-se uma média geral de $9,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, durante o ano, sendo o Norte do Estado a região de maior incidência. Outras áreas com valores intermediários, Noroeste e Oeste, também têm potencial apreciável.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Avaliaram-se, para Viçosa-MG, várias metodologias e o desempenho de vários modelos para estimação da irradiância solar global e direta sobre uma superfície horizontal, em base **horária** e **diária**. Para avaliar essas metodologias e modelos empregados, compararam-se valores estimados de radiação com os medidos, por meio de dois piranômetros. Um medindo a radiação global e o outro, a difusa, sendo a radiação direta, obtida por diferença, durante o período de julho de 1993 a novembro de 1994. Desenvolveram-se equações anuais para estimar a irradiância solar direta, sobre uma superfície horizontal, em base horária e diária, a partir da insolação. Utilizando-se destas equações, foram estimadas para os 12 meses do ano, para as quatro estações e para o ano, a irradiância solar direta **horária**, média mensal para Viçosa, e a irradiância solar direta **diária**, média mensal para o Estado de Minas Gerais.

Propôs-se uma metodologia para estimar a irradiância solar direta **horária**, sobre uma superfície horizontal, utilizando os registros do actinógrafo. Avaliou-se o desempenho do actinógrafo para medir a irradiância solar global **horária** e **diária**, testando-se juntamente o desempenho de vários modelos clássicos - Ångström-Prèscott, Bennett,

Glover-McCulloch e Rietveld, para estimação da irradiância solar global **diária**, em função da razão de insolação. O actinógrafo não se mostrou satisfatório quanto à determinação da irradiância solar direta e global, para certos períodos (aproximadamente duas horas). Com relação à determinação da irradiância global **diária**, os modelos de Ångström-Prèscott, Bennett, Glover-McCulloch e Rietveld forneceram resultados melhores que os obtidos por um actinógrafo Siap-Bologna (recém-calibrado), resultados estes comparados aos valores obtidos, tendo um piranômetro fotovoltaico como referência.

Os modelos, testados para estimar a irradiância solar direta **horária**, sobre uma superfície horizontal, a partir do índice de cobertura do céu, foram os propostos por Liu e Jordan, Orgill e Hollans, Erbs et alii, Spencer, Boes et alii, Skartveit e Olseth e Maxwell. Os modelos que apresentaram os melhores resultados foram os de Liu e Jordan ($r^2 = 0,94$, $EPE = 215 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ e $EM = 2,5 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$) e o de Boes et alii ($r^2 = 0,94$, $EPE = 214 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ e $EM = -16,1 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$). Ressalta-se que o modelo de Liu e Jordan foi o único, dentre os modelos testados, desenvolvido para a estimação da irradiância direta **diária**.

Desenvolveu-se, neste trabalho, uma metodologia para a estimação da irradiância solar direta **diária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, para dias com nebulosidade, utilizando modelos para dias com céu descoberto e dados de insolação médios mensais. Para isto foram utilizados dados de temperatura, pressão, umidade relativa, massa ótica de ozônio e os parâmetros de turbidez, α e β , de Ångström. O parâmetro α foi considerado igual a 1,3, enquanto o parâmetro β foi determinado, mensalmente, para Viçosa. Usaram-se os modelos A, B e C, apresentados por Iqbal para estimar a irradiância solar direta para dias com céu descoberto, sendo que o modelo B foi o que apresentou melhor desempenho, quando utilizado na metodologia, proposta para a estimação

da irradiância direta ($r^2 = 0,88$, $EPE = 1,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, $EPM = 9\%$ e $EM = -0,1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). A irradiância solar direta **diária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, foi estimada com boa precisão pela metodologia, proposta para Viçosa-MG. Apesar do bom embasamento físico desta metodologia, o seu uso apresenta algumas limitações, associadas à relativa complexidade das equações utilizadas e da quantidade de dados necessários para a estimativa da irradiância solar direta para os dias de céu descoberto.

Na avaliação do desempenho de modelos para estimar a irradiância solar direta **diária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir do número de horas de insolação, utilizaram-se dos seguintes modelos: modelo quadrático de Iqbal, modelo linear de Jain e modelo linear de Hussain. Para avaliar o desempenho destes modelos, utilizaram-se, além dos dados de irradiância solar direta para Viçosa, dados de Januária-MG. Dentre os modelos testados, o que apresentou melhores resultados para ambas as localidades foi o de Hussain, com os coeficientes determinados para a localidade de Calcutá (Índia). Para os dados de Viçosa foram obtidos $r^2 = 0,93$, $EPE = 1,1 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, $EPM = 10\%$ e $EM = 0,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, e para os de Januária foram obtidos $r^2 = 0,80$, $EPE = 1,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $EPM = 12\%$ e $EM = -1,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Em virtude do bom desempenho, apresentado pelo modelo linear de Hussain, determinou-se, por análise de regressão linear, o valor anual do coeficiente de Hussain, utilizando os dados diários de radiação direta e de insolação, obtidos em Viçosa. Esta equação foi empregada para estimar a irradiância solar direta **diária** para Januária, obtendo-se os seguintes resultados: $r^2 = 0,77$, $EPE = 0,98 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, $EPM = 6\%$ e $EM = -0,73$. Estes resultados mostram que a equação, obtida para Viçosa, caracteriza melhor a transparência atmosférica para Januária que os demais modelos testados.

Os seguintes modelos foram usados para estimar a irradiância solar direta **horária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir do número de horas de insolação: modelo quadrático de Iqbal (modificado), modelo linear de Jain (modificado) e modelo linear de Hussain (modificado). O que apresentou melhor resultado, quando comparado com valores medidos, foi o de Hussain, com os coeficientes determinados para a localidade de Calcutá ($r^2 = 0,95$, $EPE = 120,2 \text{ kJ.m}^{-2}\text{h}^{-1}$ e $EM = 43,0 \text{ kJ.m}^{-2}\text{h}^{-1}$). Em razão do bom desempenho do modelo de Hussain e com o intuito de estimar a irradiância solar direta horária, média mensal, utilizando uma longa série de dados horários de insolação, para Viçosa-MG, determinou-se, por análise de regressão, o valor anual do coeficiente angular do modelo de Hussain, utilizando dados horários de radiação direta e de insolação, obtidos em Viçosa.

Esta equação, obtida para Viçosa, foi então utilizada para estimar a irradiância solar direta **horária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, utilizando-se de dados de insolação de Viçosa, referentes ao período de 1968 a 1994. Observou-se, pelas estimativas, que a maior concentração de irradiância solar direta ocorre no período da tarde, em virtude do fato de ser maior o número de horas de insolação no período da tarde. Cerca de 60% da insolação total anual ocorre no período da tarde, em Viçosa-MG.

A equação **diária**, desenvolvida para Viçosa, foi usada para estimar a irradiância solar direta **diária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, utilizando-se de dados de insolação referentes ao período de 1961 a 1990, para Viçosa-MG. Observou-se que os maiores valores de irradiância solar direta, sobre uma superfície horizontal, em Viçosa-MG, ocorrem nos meses de janeiro, fevereiro e março, sendo o maior em fevereiro. Dentre os três meses, fevereiro é o que apresenta maior insolação, apesar de não ser o mês de maior irradiância no topo da atmosfera. O menor valor de irradiância solar direta acontece no mês de junho, em consequência de uma baixa insolação e de um baixo valor de

irradiância solar no topo da atmosfera. Neste mês, a irradiância no topo é a mais baixa do ano. Verificou-se que a irradiância solar direta decresce de fevereiro a junho (neste período de irradiância no topo da atmosfera, também diminui); de junho a agosto a irradiância direta aumenta; de agosto a setembro diminui; e a partir de setembro, a irradiância direta aumenta até o mês de fevereiro. O aumento, verificado na irradiância solar direta de julho a agosto, justifica-se pelo fato de o acréscimo na irradiância no topo da atmosfera ser maior que a redução da insolação. De agosto para setembro, embora a irradiância no topo da atmosfera aumente, verifica-se uma redução na irradiância direta, associada ao decréscimo substancial na insolação. De setembro para outubro, por outro lado, a irradiância direta manteve-se, praticamente, inalterada, uma vez que o aumento da irradiância no topo da atmosfera foi compensado pela redução da insolação.

Utilizaram-se de dados de insolação de 77 estações do INMET, sendo 49 do Estado de Minas e as restantes pertencentes aos estados vizinhos, para estimar a irradiância solar direta **diária**, média mensal sobre uma superfície horizontal, a partir da equação desenvolvida para Viçosa. Com base nesta estimativa, foram confeccionados mapas com isolinhas de irradiância solar direta para o Estado de Minas Gerais. A irradiância solar direta média anual no Estado de Minas Gerais variou de $6,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (em Juiz de Fora) a $11,5 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ (em Janaúba), sendo a região Norte do Estado a que recebe maior quantidade de radiação direta, e a região Sul a que recebe menor quantidade durante o ano.

Fevereiro é o mês de maior incidência de radiação direta, no Estado, e junho, o mês de menor. Sazonalmente, o Estado de Minas apresenta os seguintes valores médios de radiação direta verão ($9,6 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); outono ($9,3 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); inverno ($8,8 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$); e primavera ($9,0 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). Em termos de aproveitamento da energia solar direta, apesar de algumas áreas apresentarem baixos valores, o potencial do Estado é elevado, com média anual de $9,2 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

As principais conclusões deste trabalho foram:

- Descarta-se a possibilidade de poder estimar o potencial de radiação direta **horária** para o Brasil, com base nas séries de dados actinográficos existentes.
- Modelos empíricos, que correlacionam a radiação global **diária** com a insolação (Ångström-Prèscott, Bennett, Glover-McCulloch e Rietveld), forneceram valores de irradiância global com erros da mesma ordem (e até menores) que os erros do actinógrafo, utilizado para teste (um Siap-Bologna).
- A irradiância direta **horária** foi estimada com sucesso para Viçosa, por vários modelos empíricos (Liu e Jordan, Orgill e Hollans, Erbs et alii, Spencer, Boes et alii e Skartveit e Olseth), em função da irradiância global **horária**.
- Uma metodologia foi proposta para determinar a irradiância direta **diária**, e apresentou excelentes resultados para Viçosa. Entretanto, o número de variáveis envolvidas é muito grande.
- A irradiância direta (**diária e horária**) foi estimada com sucesso, para Viçosa, por vários modelos empíricos, em função da razão de insolação, destacando-se o modelo de Hussain.
- Determinou-se para Viçosa o coeficiente angular do modelo de Hussain, obtendo-se, assim, uma equação específica para Viçosa, a qual, testada para outra localidade (Januária-MG), apresentou resultados melhores que a equação original de Hussain, pelo fato, talvez, de esse coeficiente angular representar melhor a transparência atmosférica, para o Estado de Minas Gerais.
- Como primeira estimativa e, em função dos resultados anteriores de distribuição espacial e temporal da irradiância solar direta **diária**, para o Estado de Minas Gerais, evidencia-se que o Estado apresenta, em média, um elevado potencial de radiação solar direta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKINOGLU, B.G., ECEVIT, A. construction of a quadratic model using modified Ångström coefficients to estimate global solar radiation. *Solar Energy*, v.45, p.85-92, 1990.
- ALVES, R.A. **Irradiância solar global em superfícies de diferentes inclinações e azimutes, para Viçosa, MG.** Viçosa: UFV, 1981. 92p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1981.
- ÅNGSTRÖM, A. Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, v.13, p.214-223, 1961.
- ÅNGSTRÖM, A. The parameters of atmospheric turbidity. *Tellus*, v.16, p.64-75, 1964.
- BENINCASA, M., MALHEIROS, E.B., HODO, J. Y. Radiação solar global diária; uma análise de estimativas pela equação de Ångström. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilheus. *Anais...* Ilheus: SBEA, 1993. p.889-902.
- BENNETT, I. Monthly maps of mean daily insolation for the United States. *Solar Energy*, v.9, p.145-159, 1965.
- BIRD, R.E., HULSTROM, R.L. Review, evaluation, and improvement of direct irradiance models. *Transaction of the ASME*, v.103, p.182-192, 1981.

- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normas Climatológicas (1961-1990)**. Brasília: 1992. 84p.
- BRINE, D.T., IQBAL, M. Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless skies. **Solar Energy**, v.30, p.447-453, 1981.
- BRUNO, R. A correction procedure for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v.20, p.97-100, 1978.
- CHARTERS, W.W.S. **Solar energy utilization liquid flat plate collectors solar energy engineering**. New York: Academic Press, 1977. p.105-135
- COOPPER, P.I. The absorption of solar radiation in solar stills. **Solar Energy**, v.12, p.333-346, 1969.
- DAVE, J.V. Extensive datasets of the diffuse radiation in realistic atmospheric models with aerosols and common absorbing gases. **Solar Energy**, v.21, p.361-369, 1978.
- DEIRMENDJIAN, D., SEKERA, Z. Global radiation resulting from multiple scattering in a rayleigh atmosphere. **Tellus**, v.6, p.382-398, 1954.
- DRUMMOND, A.J. Commentes on "sky radiation measurement and correction". **Journal of Applied Meteorology**, v.3, p.810-811, 1964.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. **Solar energy thermal processes**. New York: A Wiley-Interscience, 1974. 386p.
- ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly; average global radiation. **Solar Energy**, v.28, p.293-302, 1982.
- FOSTER, P.R.P., SANTOS, J.M. Um estudo sobre heliogramas utilizados no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6, 1989, Maceió. **Anais...** Maceió: SBA, 1989. p.338-347.
- GLOVER, J., McCULLOCH, S.G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quarterly Journal Royal Meteorological Society**, v.84, p.172-175, 1958.

- GOPINATHAN, K.K. Computing the monthly mean daily diffuse radiation from clearness index and percent possible sunshine. **Solar Energy**, v.41, p.379-385, 1988.
- GUEYMARD, C. Critical analysis and performance assessment of clear sky solar irradiance models using theoretical and measured data. **Solar Energy**, v.51, p.121-138, 1993.
- HINRICHSEN, K. The Ångström formula with coefficients having a physical meaning. **Solar Energy**, v.52, p.491-495, 1994.
- HUSSAIN, M. Correlating beam radiation with sunshine duration. **Solar Energy**, v.48, p.145-149, 1992.
- IQBAL, M. Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. **Solar Energy**, v.23, p.169-173, 1979a.
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390p.
- IQBAL, M. Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v.24, p.491-403, 1979b.
- JAIN, P.C. A model for diffuse and global irradiation on horizontal surfaces. **Solar Energy**, v.45, p.301-308, 1990.
- KAMEL, M.A., SHALABY, S.A., MOSTAFA, S.S. Solar radiation over Egypt; comparison of predicted and measured meteorological data. **Solar Energy**, v.50, p.463-467, 1993.
- KATSOULIS, B.D., LEONTARIS, S.N. The distribution over Greece of global radiation on a horizontal surface. **Agricultural Meteorology**, v.23, p.217-229, 1981.
- LACIS, A.A., HANSEN, J.E. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.31, p.118-133, 1974.
- LECKNER, B. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface, elements of a model. **Solar Energy**, v.20, p.143-150, 1978.

- LIU, K.N. **An introduction to atmospheric radiation**. New York, Academic Press, 1980. 392p.
- LIU, B.Y.H., JORDAN, R.C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v.3, p.1-19, 1960.
- NUNES, G.S.S., ANDRÉ, R.G.B., VIANELLO, R.L. et al. **Estudo da distribuição de radiação solar incidente sobre o Brasil**. São José dos Campos; INPE, 1978. 45p.
- NUNES, G.S.S., NUNES, H.M.T., ALVIN, M.S.C., et al. Uma metodologia para avaliar a radiação solar no plano normal aos raios solares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7, 1992, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBMET, 1992. p.132-137.
- ORGILL, J.E., HOLLANS, K.G.T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v.19, p.357-359, 1977.
- PALTRIDGE, G.W., PLATT, C.M.R. **Radiative processes in meteorology and climatology**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1976. 318p.
- PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. São Paulo: Hemus, 1981. 358p.
- PEREZ, R., SEALS, R., ZELENKA, A., et al. Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance; prospects for performance. **Solar Energy**, v.44, p.99-108, 1990.
- PRÉSCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society of South Australia**, v.64, p.114-118, 1940.
- PYTLINSKI, J.T. Solar energy installations for pumping irrigation water. **Solar Energy**, v.21, p.225-262, 1978.
- RIETVELD, M.R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. **Agricultural Meteorology**, v.19, p.243-252, 1978.

- RIZZI, R., SERIO, C., GUZZI, R., et al. Solar direct irradiance at the ground: a parametric approach. **Solar Energy**, v.25, p.15-20, 1980.
- ROBINSON, N. **Solar radiation**. New York, American Elsevier, 1966. 347p.
- ROBINSON, N., STOCH, L. Sky radiation measurement and correction. **Journal of Applied Meteorology**, v.3, p.179-181, 1964.
- RUSSO, G. Analytical model and simulation code for the solar input determination; irradiance maps. **Solar Energy**, v.21, p.201-210, 1978.
- RUTH, D.W., CHANT, R.E. The relationship of diffuse radiation to total radiation in Canada. **Solar Energy**, v.18, p.153-154, 1976.
- SAKURAI, T. Solar furnaces. In: SAYIGH, A.A.M. (ed.) **Solar energy engineering**. New York: Academic Press, 1977. p.233-261, 1977.
- SARAIVA, F.A.M. Estimativa da radiação solar global durante a estação seca (agosto a dezembro) em Ipanguassu-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 8, 1994, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: SBMET, 1994, p.426-428.
- SFEIR, A.A. Solar radiation in Lebanon. **Solar Energy**, v.26, p.497-502, 1981.
- SKARTVEIT, A., OLSETH, J.A. A model for the diffuse fraction of hourly global radiation. **Solar Energy**, v.38, p.271-274, 1987.
- SOLER, A. Dependence on the cloudiness of the relation between the ratio of diffuse to global radiation and the ratio of global to extraterrestrial radiation for average daily values. **Solar Energy**, v.44, p.179-181, 1990a.
- SOLER, A. Dependence on latitude of the relation between the diffuse fraction of solar radiation and the ratio of global to extraterrestrial radiation for monthly average daily values. **Solar Energy**, v.44, p.297-302, 1990b.
- SOLER, A. Dependence on solar elevation and the daily sunshine fraction of the correlation between monthly-average-hourly diffuse and global radiation. **Solar Energy**, v.48, p.221-225, 1992.

- SPENCER, J.W. A comparison of methods for estimating hourly solar radiation from global solar radiation. **Solar Energy**, v.29, p.19-32, 1982.
- SRIVASTAVA, S.K., SINGH, O.P., PANDEY, G.N. Estimation of global solar radiation in Uttar Pradesh (India) and comparison of some existing correlations. **Solar Energy**, v.51, p.27-29, 1993.
- SUCKLING, P.W., HAY, J.E. Modelling direct, and diffuse, and total solar radiation for cloudless days. **Atmospher**, v.14, p.298-309, 1976.
- SWEEDLER, A.R. Photovoltaics; assessment and opportunities for Brazil. In: ROVERE, E.L., ROBERT, M. (eds.) **Fontes alternativas de energia, subsídios para uma política científica e tecnológica. Projeto FINEP /PNUD/UNESCO - BRA 82/004**; primeira coletânea. S.l.: s.n., 1988, p.249-284.
- THEKAEKARA, M.P. Solar irradiance; total and spectral. In: SAYIGH, A.A.M. (ed.) **Solar energy engineering**. New York: Academic Press, 1977. p.37-59.
- VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. 449p.
- WAHAB, M.A. new approach to estimate Ångström coefficients. **Solar Energy**, v.51, p.241-245, 1993.
- WENXIAN, L. A general correlation for estimating the monthly average daily direct radiation incident on a horizontal surface in yunnan province. **Solar Energy**, v.41, p.1-3, 1988.
- WILLIAMS, J.R. **Solar energy; technology and applications**. S.l.: Ann Arbor Science, 1977. 176p.
- WOOD, B.W. Solar energy measuring equipment. In: SAYIGH, A.A.M. (ed.) **Solar energy engineering**. New York: Academic Press, 1974. p.397-425.
- WORLD CLIMATE RESEARCH PROGRAMME - WCRP. WMO/ ICSU Joint Scientific Committee. **Revised instruction manual on radiation instruments and measurements**. S.l.: 1986. 140p. (WCRP publications series, 7).

- YAMAMOTO, G. Direct absorption of solar radiation by atmospheric water vapor, carbon dioxide and molecular oxygen. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.19, p.182-188, 1962.
- YEBOAH-AMANKWAH, D., AGYEMAN, K. Differential Ångström model for predicting insolation from hours of sunshine. **Solar Energy**, v.45, p.371-377, 1990.

APÉNDICES

APÊNDICE A

TRANSMITÂNCIAS ATMOSFÉRICAS ESPECTRAIS E IRRADIÂNCIA ESPECTRAL DIFUSA

- a - Transmitância atmosférica espectral (ou monocromática), considerando apenas o espalhamento Rayleigh, $\tau_{r\lambda}$
- b - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção e espalhamento da radiação pelos aerossóis, $\tau_{a\lambda}$
- c - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas o ozônio como agente de absorção, $\tau_{o\lambda}$
- d - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelos gases uniformemente misturados (CO_2 , N_2 , O_2 , ...), $\tau_{g\lambda}$
- e - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelo vapor de água, $\tau_{wa\lambda}$
- f - Irradiância espectral difusa associada ao espalhamento Rayleigh, considerando a primeira passagem pela atmosfera, $i_{da\lambda}$
- g - Irradiância espectral difusa produzida pelos aerossóis, considerando a primeira passagem pela atmosfera, $i_{da\lambda}$
- h - Irradiância espectral difusa, associada às múltiplas reflexões da radiação no sistema solo-atmosfera, $i_{dm\lambda}$

- a - Transmitância atmosférica espectral (ou monocromática), considerando apenas o espalhamento Rayleigh, $\tau_{r\lambda}$:

$$\tau_{r\lambda} = e^{(-0,008735\lambda^{-4,08} m_{r,p})}$$

sendo $m_{r,p}$ a massa ótica relativa do "ar seco", em um dado nível de pressão. Pode ser calculada pela Equação 15.

- b - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção e espalhamento da radiação pelos aerossóis, $\tau_{a\lambda}$

$$\tau_{a\lambda} = e^{(-\beta\lambda^\alpha m_{r,p})}$$

em que β é o coeficiente de turbidez de Ångström, que representa a quantidade de aerossóis existente na atmosfera; e α é o expoente do comprimento de onda (λ).

c - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas o ozônio como agente de absorção, $\tau_{o\lambda}$

$$\tau_{o\lambda} = e^{(-k_{o\lambda} I m_{r,p0})},$$

sendo $k_{o\lambda}$ o coeficiente de extinção monocromático, associado apenas à absorção pelo ozônio; I a massa ótica de ozônio, em CNTP - Tabela 1-; e $m_{r,p0}$ a massa ótica relativa do "ar seco" ao nível do mar (Equação 14).

d - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelos gases uniformemente misturados (CO_2, N_2, O_2, \dots), $\tau_{g\lambda}$

$$\tau_{g\lambda} = \exp \left[-1,41 k_{g\lambda} m_{r,p} / (1 + 118,93 k_{g\lambda} m_{r,p})^{0,45} \right],$$

$k_{g\lambda}$ é o coeficiente de extinção monocromático, associado apenas à absorção pela mistura de gases.

e - Transmitância atmosférica espectral, considerando apenas a absorção pelo vapor de água, $\tau_{wa\lambda}$

$$\tau_{wa\lambda} = \exp \left[-0,2385 k_{wa\lambda} w m_{r,p} / (1 + 20,07 k_{wa\lambda} w m_{r,p})^{0,45} \right],$$

$k_{wa\lambda}$ é o coeficiente de extinção monocromático, associado apenas à absorção pelo vapor de água; w é a quantidade de água precipitável em cm (Equação 34).

f - Irradiância espectral difusa associada ao espalhamento Rayleigh, considerando a primeira passagem pela atmosfera, $\dot{I}_{dr\lambda}$

$$\dot{I}_{dr\lambda} = \dot{I}_{on\lambda} \cos \theta \tau_{ma\lambda} [0,5(1 - \tau_{r\lambda}) \tau_{a\lambda}],$$

θ é o ângulo zenital do Sol; $\tau_{ma\lambda}$ é a transmitância atmosférica espectral total, associado à absorção molecular,

$$\tau_{ma\lambda} = \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{wa\lambda},$$

g - Irradiância espectral difusa produzida pelos aerossóis, considerando a primeira passagem pela atmosfera, $\dot{I}_{da\lambda}$,

$$\dot{I}_{da\lambda} = \dot{I}_{on\lambda} \cos \theta \tau_{ma\lambda} [F_e \omega_0 (1 - \tau_{a\lambda}) \tau_{r\lambda}],$$

sendo F_e a fração do espalhamento total na direção de incidência da radiação; e ω_0 albedo de espalhamento simples,

h - Irradiância espectral difusa, associada às múltiplas reflexões da radiação no sistema solo-atmosfera, $\dot{I}_{dm\lambda}$

$$\dot{I}_{dm\lambda} = Q_\lambda [\rho_{g\lambda} \rho'_{a\lambda} / (1 - \rho_{g\lambda} \rho'_{a\lambda})],$$

$$Q_\lambda = (\dot{I}_{dr\lambda} + \dot{I}_{da\lambda}) + \dot{I}_{n\lambda} \cos \theta,$$

em que Q_λ é a irradiância espectral difusa após a primeira passagem pela atmosfera; $\rho_{g\lambda}$ é o albedo espectral do solo; e $\rho'_{a\lambda}$ o albedo espectral da atmosfera.

APÊNDICE B

MODELO DE INTEGRAÇÃO ESPECTRAL

a - Irradiância solar direta sobre uma superfície normal aos raios solares, \dot{I}_n

b - Irradiância solar difusa, \dot{I}_d

c - Irradiância solar global sobre uma superfície horizontal, \dot{I}

Modelo de integração espectral

a - Irradiância solar direta sobre uma superfície normal aos raios solares, \dot{I}_n ,

$$\dot{I}_n = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \dot{I}_{n\lambda} \Delta\lambda = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \dot{I}_{0n\lambda} \tau_{\lambda} \Delta\lambda,$$

sendo $\dot{I}_{n\lambda}$ a irradiância espectral (ou monocromática) direta em uma superfície normal aos raios solares; $\dot{I}_{0n\lambda}$ a irradiância espectral no topo da atmosfera em uma superfície normal aos raios solares; τ_{λ} a transmitância monocromática da atmosfera; e $\Delta\lambda$ o intervalo elementar do comprimento de onda.

b - Irradiância solar difusa, \dot{I}_d ,

$$\dot{I}_d = \sum_{\lambda=0}^{\infty} \dot{I}_{d\lambda} \Delta\lambda,$$

em que $\dot{I}_{d\lambda}$ é a irradiância espectral difusa.

c - Irradiância solar global sobre uma superfície horizontal, \dot{I} ,

$$\dot{I} = \dot{I}_n \cos\theta + \dot{I}_d,$$

em que Ψ é o ângulo zenital do Sol.

APÊNDICE C

CALIBRAÇÃO DO ACTINÓGRAFO - SIAP-BOLOGNA

Para calibrar o actinógrafo Siap-Bologna utilizou-se de um piranômetro Eppley como padrão secundário (constante $11,95 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$).

Os dados para a calibração do actinógrafo foram coletados na Estação Climatológica Principal de Viçosa-MG. Coletaram-se dados durante 10 dias, durante os horários de 9 às 15 horas, totalizando 302 observações aproveitadas. Foram utilizados os dados, obtidos durante os instantes, em que a região do disco solar estava desobstruída de nuvens.

As leituras no actinograma, em mm, foram realizadas com o auxílio de uma lupa. Os dados foram coletados de 5 em 5 minutos, em virtude do longo tempo de resposta do actinógrafo (14 minutos). Ressalta-se que o tempo de resposta do piranômetro é de, aproximadamente, 1 segundo.

A calibração foi feita por dois processos diferentes: o método da razão e o método da regressão, sendo que, neste trabalho, utilizou-se da constante, obtida pelo método da razão. Os resultados da calibração são apresentados a seguir:

- Método da razão:

$$\text{Constante} = 27,050 \times 10^{-3} \text{ mm} / (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}).$$

$$(\text{EPE} = 46,75 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}, \text{EM} = -0,78 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ e EPM} = 5,3 \%).$$

- Método da Regressão:

$$\text{Rad} = 72,091 + 33,621 \times \text{mm},$$

$$(\text{r}^2 = 0,81 \text{ e EPE} = 45,87 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}, \text{EM} = -0,58 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \text{ e EPM} = 4,9\%)$$

As Figuras 1C e 2C ilustram os resultados, obtidos na calibração do actinógrafo pelo método da razão e pelo método da regressão, respectivamente.

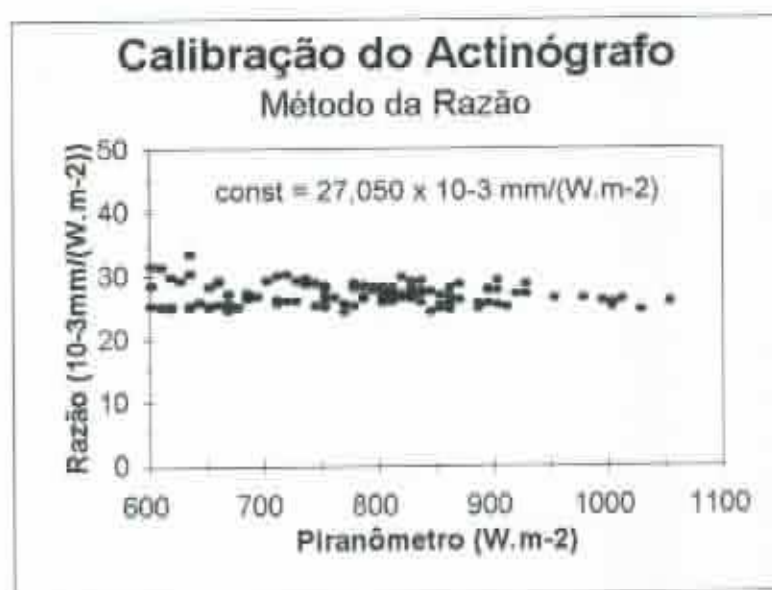


Figura 1C - Valores medidos no piranômetro (W.m⁻²) “versus” a razão, entre os valores, medidos no actinógrafo (mm) e os valores medidos no piranômetro (W.m⁻²), multiplicada por 10⁻³.

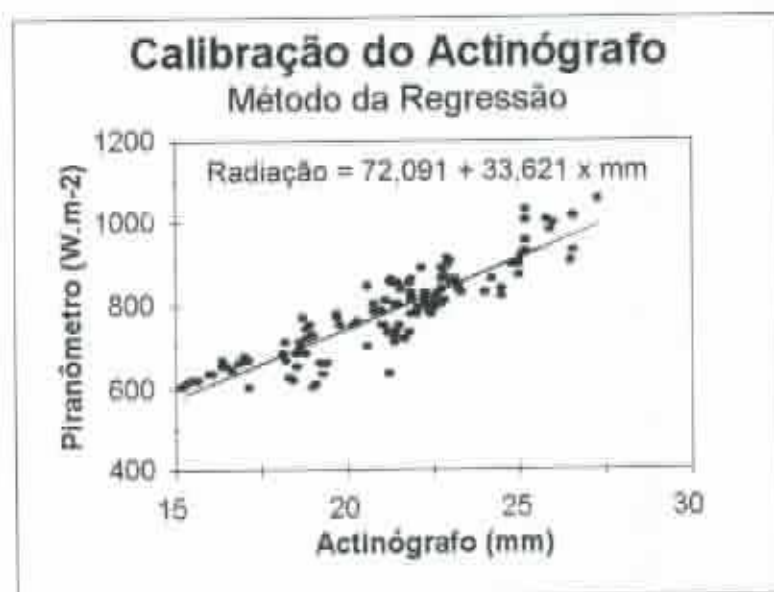


Figura 2C - Valores medidos pelo actinógrafo (mm) “versus” os valores medidos no piranômetro (W.m⁻²).

APÊNDICE D

AFERIÇÃO DO PIRANÔMETRO FOTOVOLTAICO (ELE), UTILIZANDO UM PIRANÔMETRO EPPLEY COMO PADRÃO

Para aferir o piranômetro fotovoltaico (ELE), usado na coleta dos dados de irradiância solar global, utilizados neste trabalho, empregou-se um piranômetro Eppley como padrão (constante $11,95 \mu\text{V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$). Os dados para a aferição foram coletados em dias de céu parcialmente coberto, o que, em função da diferença dos tempos de resposta dos equipamentos, pode ter provocado os pequenos desvios, observados na Figura 1D. Mesmo, assim, o resultado foi excelente, com um coeficiente de determinação (r^2) de 0,997, um erro-padrão de estimativa de $15,21 \text{ W/m}^2$ e um erro percentual de 5,12%.

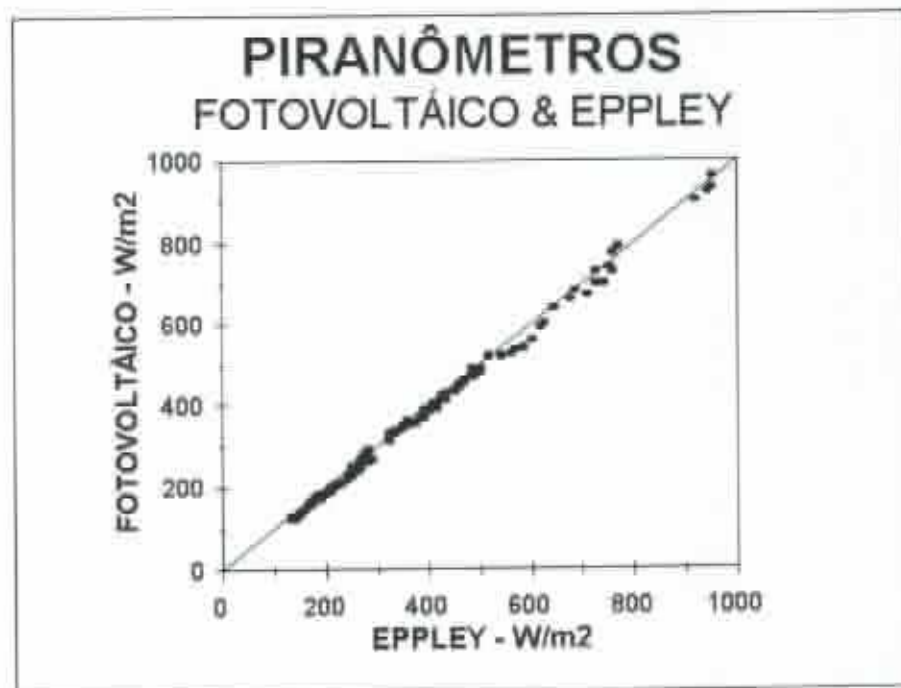


Figura 1D - Irradiância solar global, W/m^2 , medida pelo piranômetro fotovoltaico "versus" a medida pelo piranômetro Eppley.