

FRANCISCA ZENAIDE DE LIMA

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR
DIFUSA PARA VIÇOSA-MG

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

T
351 0172
21/11/96

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
NOVEMBRO - 1996

BIBLIOTECA
DEPTO. ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

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

T

L732d
1995

Lima, Francisca Zenaide de, 1961-

Desenvolvimento e avaliação de modelos de irradiância solar difusa para Viçosa-MG / Francisca Zenaide de Lima. - Viçosa : UFV, 1995.

68p. : il.

Orientador: Adil Rainier Alves

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa

1. Radiação solar difusa - Viçosa (MG) - Modelos matemáticos - Desenvolvimento. 2. Radiação solar difusa - Viçosa (MG) - Modelos matemáticos - Avaliação. 3. Modelos matemáticos - Desenvolvimento. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD. 19.ed. 551.5271

CDD. 20.ed. 551.5271


FRANCISCA ZENAIDE DE LIMA

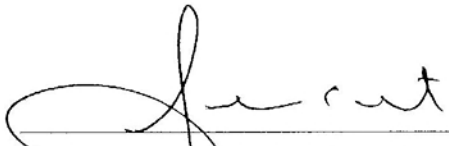
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE MODELOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR

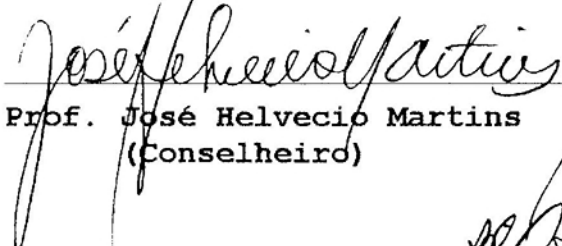
DIFUSA PARA VIÇOSA-MG


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


APROVADA: 21 de dezembro de 1995


Prof. José Eduardo Prates


Prof. Luiz Cláudio Costa


Prof. José Helvecio Martins
(Conselheiro)


Prof. José Maria N. da Costa
(Conselheiro)


Prof. Adil Rainier Alves
(Orientador)

BIBLIOTECA
DEPTO. ENGENHARIA AGRÍCOLA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

AGRADECIMENTO

A autora agradece, de modo geral, a todos os que contribuíram para a execução deste trabalho.

Ao Professor Adil Rainier Alves, pela orientação.

Aos Professores José Helvecio Martins, José Maria Nogueira e Paulo Cecon, pelas sugestões.

Ao Engenheiro Agrícola José Dermeval Saraiva Lopes, pela valiosa ajuda no desenvolvimento dos aplicativos computacionais utilizados na elaboração deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (**CAPES**) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (**FAPEMIG**), pelo apoio financeiro.

BIOGRAFIA

FRANCISCA ZENAIDE DE LIMA, filha de Raimundo Teles de Lima e Maria Rosalina de Lima, nasceu no dia 21 de junho de 1961, em Pio-IX, no Estado do Piauí.

Em 1987, graduou-se em Meteorologia pela Universidade Federal de Alagoas.

No período de 1988 a 1991, participou dos seguintes cursos de especialização: **"Aproveitamento em Recursos Hídricos"**, na Universidade Federal de Alagoas, e **"Meteorologia Tropical"**, na Universidade Federal do Pará, em convênio com a Organização Mundial de Meteorologia.

Em 1991, foi bolsista de aperfeiçoamento na Universidade Federal de Alagoas, realizando pesquisa na área de Climatologia.

Em maio de 1992, iniciou o Curso de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
EXTRATO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Aspectos preliminares.....	5
2.1.1. Irradiância solar global.....	6
2.1.2. Irradiância solar direta.....	7
2.1.3. Irradiância solar difusa.....	8
2.2. Modelos para estimação da irradiância solar difusa.....	10
2.2.1. Modelos para estimação da irradiância difusa diária.....	11
2.2.2. Modelos para estimação da irradiância difusa horária.....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1. Dados.....	15
3.1.1. Sistema de aquisição de dados.....	15
3.1.2. Configuração do sistema de aquisição de dados.....	16
3.1.3. Sensores do tipo PS ("Pyranometric Sensor").....	16
3.1.4. Dados de irradiância difusa.....	17
3.1.5. Correção das medidas de irradiância difusa.....	18

3.1.6. Irradiância horária no topo da atmosfera (I_0).....	19
3.2. Programa computacional.....	21
3.3. Avaliação e testes de modelos para estimar a irradiância solar difusa.....	22
3.4. Desenvolvimento de modelos.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1. Aferição do piranômetro fotovoltaico (da ELE), usando-se um piranômetro Eppley como padrão...	25
4.2. Correção do efeito de abóboda nas medições de irradiância solar difusa.....	25
4.3. Modelos horários.....	26
4.3.1. Um modelo proposto para Viçosa-MG.....	26
4.3.2. Modelos testados para Viçosa-MG.....	33
4.3.3. Modelos ajustados aos dados de Viçosa.....	37
4.4. Modelos diários.....	41
4.4.1. Modelo do tipo $K=f(K_T)$	41
4.4.1.1. Modelo ajustado para Viçosa.....	41
4.4.1.2. Avaliação de outros modelos, em sua forma original.....	43
4.4.1.3. Avaliação de outros modelos ajustados aos dados de Viçosa.....	44
4.4.2. Modelos do tipo $K=f(n/N)$	47
4.4.3. Modelos do tipo $\bar{K}=f(\bar{n}/\bar{N})$	47
4.4.4. Modelos do tipo $K=f(K_T;n/N)$	50
4.5. Análise dos dados de irradiância solar difusa diária.....	50
4.5.1. Variação de H_d/H em função de n/N	50
4.5.2. Variação de \bar{H}_d/\bar{H} e de seu desvio-padrão em função de n/N	54
4.5.3. Coeficiente de transmissão da irradiância solar difusa em função do índice H/H_0	56
4.5.4. Irradiância solar difusa com céu totalmente nublado.....	57
4.5.5. Valores de irradiância solar global e difusa para diferentes coberturas de céu...	58
4.5.6. Variação de I_d/I_0 com I/I_0 de acordo com a variação do ângulo de elevação do Sol.....	59
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS

- a** - Azimute do Sol nascente (graus).
- b** - Largura do anel sombreadar (10,3 cm).
- d_j** - Dia juliano (1 a 365).
- E₀** - Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (adimensional).
- EPE** - Erro-padrão de estimativa (%).
- F₀** - Densidade de fluxo de radiação solar sobre uma superfície horizontal, no topo da atmosfera (W.m^{-2}).
- F_{on}** - Irradiância solar em uma superfície normal aos raios solares, no topo da atmosfera (W.m^{-2}).
- fc** - Fator de correção aplicado às medidas da irradiância solar difusa (adimensional).
- h*** - Hora solar verdadeira (horas).
- H₀** - Irradiância solar diária sobre uma superfície horizontal, no topo da atmosfera (J.m^{-2}).
- \bar{H}_0** - Irradiância solar média diária sobre uma superfície horizontal, no topo da atmosfera (J.m^{-2}).
- H_d** - Irradiância solar difusa diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo (J.m^{-2}).
- \bar{H}_d** - Irradiância solar difusa média diária sobre uma

- superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- H_b** - Irradiância solar direta diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- H** - Irradiância solar global diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- \bar{H}** - Irradiância solar global média diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- I_{cs}** - Constante solar ($1367 W.m^{-2}$).
- I₀** - Irradiância horária sobre uma superfície horizontal, no topo da atmosfera ($J.m^{-2}$).
- I_d** - Irradiância solar difusa horária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- I_b** - Irradiância solar direta horária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- I** - Irradiância solar global horária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo ($J.m^{-2}$).
- K** - Razão entre H_d e H (adimensional).
- \bar{K}** - Razão entre \bar{H}_d e \bar{H} (adimensional).
- K_r** - Razão entre H e H_0 (adimensional).
- \bar{K}_r** - Razão entre \bar{H} e \bar{H}_0 (adimensional).
- M** - Razão entre I_d e I (adimensional).
- M_r** - Razão entre I e I_0 (adimensional).
- n** - Horas de brilho solar - insolação (horas).
- N** - Duração do período diurno (horas).
- n/N** - Razão de insolação (adimensional).
- \bar{n}/\bar{N}** - Razão de insolação média (adimensional).
- r** - Raio do anel sombreador (36,3 cm).
- r₀** - Distância média Terra-Sol (m).
- r_{r-s}** - Distância instantânea Terra-Sol (m).
- r²** - Coeficiente de determinação para regressão linear simples (%).
- R²** - Coeficiente de determinação para regressão linear múltipla (%).

- X** - Parte da irradiância solar difusa obstruída pelo
anel sombreador.
- Z** - Ângulo zenital do Sol (graus).
- δ** - Declinação do Sol (graus).
- Φ** - Latitude (graus).
- Ψ** - Ângulo horário do Sol (graus).
- Ω** - Módulo do vetor velocidade angular da Terra.
- λ** - Comprimento de onda (μm).

EXTRATO

LIMA, Francisca Zenaide de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 1996. **Desenvolvimento e avaliação de modelos de irradiância solar difusa para Viçosa-MG.** Orientador: Professor Adil Rainier Alves. Conselheiros: Professor José Helvecio Martins e José Maria Nogueira da Costa.

Neste trabalho, desenvolveram-se e avaliaram modelos para estimação da irradiância difusa horária e diária para Viçosa. Para tanto, mediram-se dados de irradiância difusa e global horária no período de 10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994, por meio de sensores fotovoltaicos. Para estimação da irradiância solar difusa horária, obteve-se um modelo do tipo $I_d/I = f(I/I_0)$, com desempenho satisfatório, com $r^2=85,74\%$ e $EPE=12\%$. Para estimação da irradiância difusa diária, obteve-se um modelo com $r^2=92,60\%$ e $EPE=7,1\%$. Os modelos horários (Orgill e Hollands, Erbs et al. e Spencer) e diários (Ruth e Chant; Collares-Pereira e Rabl) quando testados para Viçosa, em suas formas originais, apresentaram erros superiores aos erros do modelo proposto, porém, quando ajustados aos dados de Viçosa, seus desempenhos se aproximaram bem do desempenho

do modelo proposto. Utilizando-se o coeficiente de transmissão da radiação difusa caracterizou-se o céu como totalmente encoberto, para o intervalo de H/H_0 de 0 a 0,25; como parcialmente encoberto, de 0,25 a 0,50; e céu limpo para a condição de H/H_0 maior que 0,50. Em condição de céu encoberto e parcialmente encoberto, em termos médios, a irradiância difusa diária praticamente não variou com n/N , apresentando suave decréscimo com n/N para céu limpo. A variação da irradiância difusa horária com a razão I/I_0 foi praticamente linear para a condição de céu totalmente encoberto, e independente da elevação solar que se mostrou importante para as demais condições de cobertura do céu.

ABSTRACT

LIMA, Francisca Zenaide de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, november 1996. **Development and evaluation models of diffuse solar irradiance for Viçosa-MG.** Adviser: Adil Rainier Alves. Committee members: José Helvecio Martins e José Maria Nogueira da Costa.

In this work, hourly and daily diffuse solar radiation empirical models were developed for Viçosa MG, Brazil, based upon hourly and daily diffuse and global solar irradiance data collected in Viçosa, from July 10, 1993, to November, 30, 1994, using photovoltaic pyranometers. A model of the type $I_d/I = f(I/I_0)$ was developed to estimate hourly diffuse solar irradiance ($r^2 = 85,74\%$ and $RMSE = 12\%$). A model to estimate daily diffuse solar irradiance was also developed for Viçosa ($r^2 = 92,60\%$ and $RMSE = 7,1\%$). Comparisons were performed involving Viçosa's models and the hourly models of Orgill & Hollands, Erbs et al and Spencer and the daily models of Ruth & Chant and Collares-Pereira & Rabl. In their original form all the tested models showed greater errors than the proposed models. However, when adjusted to Viçosa's data, their performance was similar to the proposed model's

performances. Based upon a transmittance coefficient for diffuse radiation as a function of the clearness index (H/H_0), the sky was characterized as: very cloudy (H/H_0 less than 0.25), partly cloudy (H/H_0 between 0.25 and 0.50) and clear sky (H/H_0 greater than 0.50). Under very cloudy or partly cloudy conditions, the average daily diffuse irradiance varied only slowly with n/N , decreasing smoothly with n/N under clear sky conditions. Hourly diffuse irradiance showed a linear increase with the index I/I_0 for very cloud conditions, independently on the solar zenith angle, which showed important for other cloud cover conditions.

1. INTRODUÇÃO

Os países menos desenvolvidos, há várias décadas, vêm apresentando considerável aumento no índice de crescimento populacional, e a produção de alimentos nesses países não tem acompanhado esse crescimento. Segundo ASSAD e SANO (1993), o alto custo da energia tem sido apontado como uma das principais causas do declínio na produção de alimentos nas últimas décadas. Portanto, a política a ser adotada na avaliação do consumo, da demanda e do estoque da energia a ser usada pela humanidade não pode negligenciar três fatores, quais sejam: o crescimento populacional, a busca de novas fontes de energia e o custo dessa energia relacionado com a preservação do meio ambiente e com o desenvolvimento social. Dentre esses fatores, a busca de fontes não-convencionais de energia é uma necessidade inter-relacionada com outros fatores citados, tendo em vista que a energia é um elemento imprescindível na vida do homem, pois todas as suas atividades, sejam domésticas, sejam agrícolas, sejam pecuárias ou sejam industriais, dependem do uso de energia. Se não forem utilizadas, a médio prazo, novas formas de energia, o crescimento da população mundial poderá provocar déficit na energia

disponível para toda a humanidade.

Segundo Willians, citado por NICKLAS (1993), 70% da população mundial vive em países em desenvolvimento, ressaltando-se que mais de dois bilhões de pessoas não dispõem de energia elétrica. Esse mesmo autor citou, ainda, que até o ano 2050 a população mundial deverá praticamente dobrar, crescendo de 5,4 bilhões para mais de 10 bilhões de pessoas, e 90% desse aumento ocorrerá nos países em desenvolvimento. Portanto, um dos desafios do mundo atual está voltado para a busca de novas fontes de energia, economicamente viáveis, para suprirem as necessidades básicas de um adicional de 4,6 bilhões de pessoas até 2050, levando-se em consideração a preservação do meio ambiente.

Tendo em vista que a energia solar que chega à superfície da Terra é a maior fonte de energia renovável da natureza, ela, dentre outras fontes alternativas, vem recebendo bastante atenção dos pesquisadores. Já argumentava DECICO e SANTOS (1980), há quase duas décadas, que a energia solar, como fonte não-convencional, poderia ser, sem dúvida, uma excelente alternativa para o Brasil.

No que se refere aos projetos de aproveitamento da energia solar, é importante o conhecimento das características da radiação incidente. Uma vez que o estudo da distribuição espacial e temporal da radiação solar conduz a um conhecimento de sua real disponibilidade e flutuação, a pesquisa voltada para o aproveitamento das "formas" de energia solar (térmica, fotovoltaica ou fotoquímica) requer o desenvolvimento de novos métodos de análise da radiação solar que chega à superfície da Terra. Entretanto, para desenvolver novos métodos de análise da irradiância solar (densidade de fluxo de radiação solar incidente numa superfície), é necessária a observação da irradiância solar como base de dados a serem utilizados no planejamento e dimensionamento dos sistemas de aproveitamento da energia solar.

Segundo AZEVEDO et al. (1981), o zoneamento do potencial de energia solar de uma região se constitui num subsídio de grande valor a concepção, locação e instalação de sistemas de aproveitamento da energia solar e, segundo GOPINATHAN (1988), o desenvolvimento de um programa de pesquisa de energia solar deve ser iniciado por um estudo dos dados de radiação solar disponíveis na região de interesse.

Embora dados de irradiância solar sejam reconhecidamente muito importantes para diversas aplicações, o alto custo de aquisição e manutenção dos instrumentos que medem as componentes da radiação solar fazem com que este elemento não seja observado de uma forma contínua nas estações meteorológicas. No Brasil, a prática mais comum é a observação da insolação por meio dos heliógrafos e, depois, a medição da irradiância global. Raras são as observações das componentes direta e difusa da radiação solar. Em muitas aplicações práticas, entretanto, é necessário o conhecimento das distribuições horárias e diárias da irradiância global, irradiância direta e irradiância difusa. Na tentativa de obter informações sobre a radiação solar incidente na superfície da Terra, nas formas direta e difusa, vários pesquisadores têm desenvolvido relações estatísticas para estimar tais componentes (JETER e BALARAS, 1990).

Segundo ALVES (1981), em razão da grande importância do uso da energia solar em diversas atividades, é plenamente justificável a elaboração de modelos que permitam a estimação do potencial da irradiância solar disponível à superfície da Terra. Para o Brasil, todavia, modelos dessa natureza são praticamente inexistentes, principalmente quando se referem à irradiância difusa.

O conhecimento da fração difusa da radiação solar é importante em muitas áreas. Segundo SUEHRCKE e McCORMICK (1988), no que se refere ao aproveitamento da energia solar

como fonte de energia não-convencional, a radiação difusa é requerida para se proceder à análise de projetos de irradiância sobre superfícies inclinadas. Do ponto de vista agrometeorológico, o conhecimento da fração difusa da irradiância solar global é importante em muitos estudos, como no estudo do aproveitamento direto desta forma de radiação pelas culturas. Em culturas que apresentam o dossel com a distribuição vertical homogênea, as folhas da parte inferior do dossel recebem mais radiação difusa na faixa sinteticamente ativa. SINCLAIR e SHIRAIWA (1993) realizaram um estudo com soja (*Glycine max (L.)Merrill*) madura, em Gainesville (Flórida) e em Shiga (Japão), para examinar a influência da distribuição de oxigênio em folhas jovens e da fração da radiação difusa no uso e na eficiência de radiação solar nessa cultura. O uso e a eficiência da radiação foram substancialmente maiores para a soja plantada no Japão do que para a soja plantada na Flórida. Os autores justificaram essa diferença com o fato de a fração difusa incidente no Japão ser maior do que na Flórida.

Diante do que foi exposto, este trabalho teve como objetivos:

- a) Desenvolver modelos para a estimativa da irradiância solar difusa horária e diária em Viçosa, MG.
- b) Avaliar o desempenho de modelos propostos na literatura para estimar a irradiância difusa, utilizando-se dados observados em Viçosa-MG.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos preliminares

A fotosfera solar apresenta temperatura média de aproximadamente 6.000 K, e nas proximidades do núcleo do Sol a temperatura média está avaliada em cerca de 20.000 K (VIANELLO e ALVES, 1991). Segundo HALACY JR. (1977), a energia é gerada no Sol por meio de complexas reações termonucleares, as quais convertem partículas atômicas, ou seja, prótons do núcleo de hidrogênio, em partículas alfa (núcleo de hélio). Essa energia é emitida para a Terra na forma de radiação eletromagnética, e grande parte da energia solar se propaga em ondas de comprimento entre 0,2 e 3,0 μm (radiação de onda curta), aproximadamente. Segundo AYOADE (1986), a emitância máxima do Sol se dá no comprimento de onda de 0,5 μm e, em termos de quantidade de energia emitida, sua composição espectral é de 46% na faixa do infravermelho solar ($\lambda > 0,77 \mu\text{m}$), 45% na faixa do visível ($0,39 \leq \lambda \leq 0,77 \mu\text{m}$) e 9% na faixa do ultravioleta ($\lambda < 0,39 \mu\text{m}$). Segundo DECICO e SANTOS (1980), praticamente toda a energia utilizada nos processos físicos, químicos e biológicos que permitem a existência

das formas de vida na Terra vem do Sol. Dos $3,91 \times 10^{26} \text{ J.s}^{-1}$ que o Sol irradia, a Terra intercepta apenas $1,78 \times 10^{17} \text{ J.s}^{-1}$, sendo este valor cerca de 30 vezes maior que o consumo de energia pela humanidade em um ano.

Quando a radiação eletromagnética emitida pelo Sol interage com a atmosfera terrestre, é atenuada pelos processos de absorção e espalhamento, ou seja, parte é absorvida e parte é espalhada em todas as direções. Os principais responsáveis por esse fracionamento da radiação solar são as moléculas de ar seco, o vapor d'água, os aerossóis e as nuvens, considerando-se suas características espectrais (KUYE e JAGTAP, 1992).

2.1.1. Irradiância solar global

A radiação solar chega à superfície da Terra nas formas direta e difusa. A irradiância solar correspondente às duas frações, direta e difusa, é denominada irradiância solar global, medida por meio do instrumento denominado piranômetro. Os valores instantâneos de irradiância global, registrados por um piranômetro, estão esquematicamente representados na Figura 1, na qual se observa a diferença entre as curvas para dias tipicamente de céu descoberto e de céu parcialmente nublado. As áreas hachuradas da Figura 1 representam a quantidade de radiação global, I , durante o período de uma hora (das 9 às 10 horas).

Segundo IQBAL (1983), a irradiância solar global, para fins de engenharia, é usualmente medida em base horária, sendo a irradiância global diária (H) obtida por meio da integração dos valores horários (I), ou seja:

$$H = \int_{dia} I dt \quad (01)$$

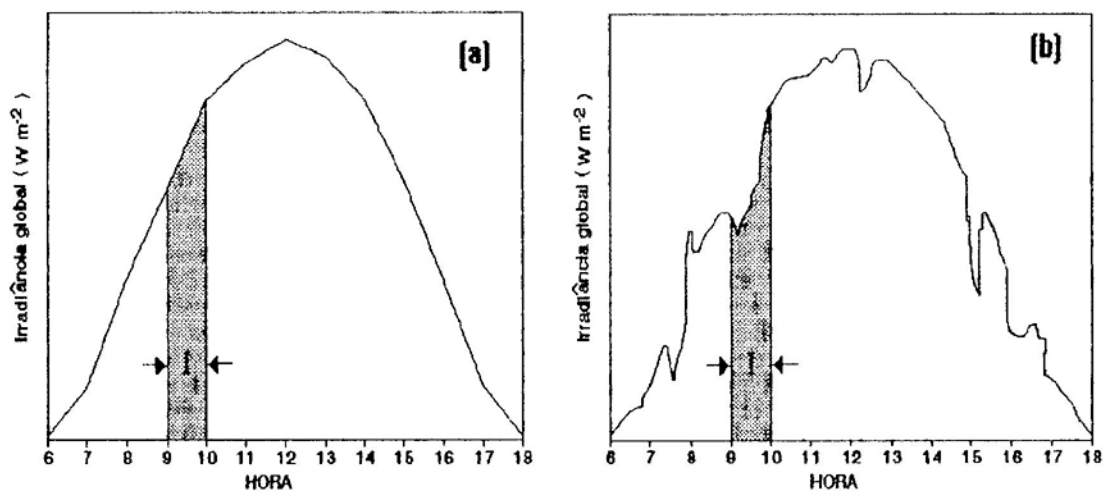


Figura 1 - Esquemas ilustrando variações diárias hipotéticas da irradiância solar global: a) dia de céu descoberto e b) dia de céu parcialmente encoberto.

2.1.2. Irradiância solar direta

A irradiância solar direta (I_b) compreende a radiação que vem diretamente do disco solar. Para dias de céu descoberto, a irradiância direta é bem maior do que a componente difusa, exceto para os horários em que a altitude solar é muito baixa.

A irradiância direta pode ser medida por dois métodos: o método direto e o indireto.

O método direto, que utiliza o instrumento denominado pireliômetro, o qual possui uma pequena abertura cônica ligeiramente maior do que o ângulo sólido subtendido pelo disco solar (FAIMAN et al., 1992). Esse instrumento possui uma pequena base equatorial que permite acompanhar o deslocamento do Sol. O pireliômetro fornece medidas da irradiância solar direta para uma superfície normal aos raios solares (I_n). A irradiância solar direta (I_b) sobre uma superfície horizontal é obtida da seguinte maneira:

$$I_b = I_n \cos Z \quad (02)$$

em que I_n é a irradiância solar direta instantânea medida no pireliômetro e Z , o ângulo zenital do Sol.

O método indireto utiliza medições de dois piranômetros, um dos quais com o sistema de obstrução da radiação direta (um disco opaco ou um anel sombreador). Dessa forma, a irradiância solar direta é obtida por diferença, isto é:

$$I_b = I - I_d \quad (03)$$

O valor diário da irradiância solar direta é obtido por meio da integração de seus valores horários, ou seja:

$$H_b = \int_{da} I_b dt \quad (04)$$

2.1.3. Irradiância solar difusa

A radiação solar recebida em uma superfície horizontal, num ângulo sólido de 2π sr, exceto a que chega ao ângulo sólido subentendido pelo Sol, é chamada de irradiância difusa. Essa componente da irradiância solar global é a parte espalhada pelos constituintes atmosféricos. Segundo IQBAL (1978), a irradiância difusa num dado instante depende da altitude e latitude do local, do ângulo de elevação e da declinação do Sol, do índice de turbidez atmosférica, da quantidade de vapor d'água presente na atmosfera e da nebulosidade, dentre outros fatores. A nebulosidade, associada ao tipo de nuvem, é o principal fator que afeta a chegada da radiação difusa até a superfície da Terra.

A irradiância difusa sob condições de céu encoberto é maior que sob condições de céu descoberto. Em dias de céu descoberto, a irradiância difusa corresponde à radiação solar espalhada pelas moléculas do ar e partículas sólidas em suspensão na atmosfera (aerossóis, poeiras etc.), enquanto em dias nublados a irradiância difusa tem uma

fração adicional da radiação espalhada pelas nuvens.

Em condições de céu descoberto e na ausência de partículas sólidas em suspensão, aproximadamente metade da radiação solar difundida retorna ao espaço, sendo a outra parte enviada na direção da superfície da Terra. Na presença de partículas sólidas em suspensão no ar, por outro lado, a porção espalhada na direção do solo é maior que a perda para o espaço (IQBAL, 1983). Segundo o Midwest Plan Service, citado por ALVES (1981), a fração da radiação difusa que chega à superfície da Terra em dia de céu descoberto é, em média, de 15% da irradiância global. PALTRIDGE e PLATT (1976) afirmaram que, sob condições de céu descoberto, o valor da irradiância difusa varia com o ângulo de elevação do Sol e, segundo IQBAL (1978), para valores de elevação do Sol maiores que 30° (ângulo zenital menor que 60°), a irradiância difusa é aproximadamente constante. Fritz, citado por LIST (1971), afirmou que, em dia de céu descoberto, a irradiância difusa sobre uma superfície horizontal situada ao nível do solo pode ser calculada, aproximadamente, pela metade do valor da densidade de fluxo de radiação solar espalhada pela atmosfera, considerando-se que o ozônio absorve 2% e o vapor d'água 7%. Na presença de nuvens, a quantidade de radiação difusa que chega à superfície da Terra depende do tipo de nuvens, da altura destas, do número de camadas de nuvens e da espessura destas, além dos demais constituintes atmosféricos.

A irradiância difusa, como já foi mencionado, pode ser medida, utilizando-se dois piranômetros, um deles sombreado por um anel ou por um disco opaco. O anel sombreador é montado em um eixo orientado na direção leste-oeste, tendo a inclinação igual à latitude. Quando se usa um disco circular opaco (de cerca de 10 cm de diâmetro), ele deve ser posicionado a aproximadamente um metro do sensor do piranômetro, para leitura direta da irradiância

difusa. Existem montagens mais complexas, com o disco acoplado a uma base equatorial que se desloca em sincronia com o movimento do Sol. Obviamente, para lugares onde existem medidas de irradiância global (I) e de direta (I_b), a irradiância solar difusa poderá ser obtida por diferença, ou seja:

$$I_d = I - I_b \quad (05)$$

ou

$$I_d = I - I_n \cos Z \quad (06)$$

A irradiância solar difusa diária (H_d), em uma superfície horizontal, é obtida por meio da integração dos valores horários (I_d), ou seja:

$$H_d = \int_{d_{in}} I_d dt \quad (07)$$

2.2. Modelos para estimação da irradiância solar difusa

A melhor forma de quantificar a irradiância solar difusa é por meio de sua medição com piranômetros. Entretanto, em razão da escassez de dados meteorológicos de tal natureza, torna-se necessário recorrer a formulações teóricas, utilizando parâmetros cuja medição seja confiável e contínua, para que se possa estimar a distribuição da irradiância solar difusa (temporal e espacial).

A determinação teórica da irradiância difusa envolve complexas teorias de transferência radiativa e exige considerações especiais na quantificação espacial e temporal dos elementos absorvedores e difusores presentes na atmosfera; para tal, são necessários dados do tipo de nuvem, das propriedades óticas das nuvens, da nebulosidade e da espessura das camadas de nuvens etc.

É também possível, entretanto, o desenvolvimento de modelos estatísticos para estimação da irradiância solar difusa, utilizando-se dados de irradiância global (HUSSAIN,

1992; CAMPS e SOLER, 1992; KUYE e JAGTAP, 1992).

2.2.1. Modelos para estimação da irradiância difusa diária

Segundo REINDL et al. (1990), Liu e Jordan foram os pioneiros neste tipo de modelagem de irradiância solar difusa, quando correlacionaram a irradiância difusa diária (H_d) com a irradiância global diária (H).

Ruth e Chant, citados por IQBAL (1978), trabalharam com dados de radiação de quatro estações meteorológicas do Canadá e obtiveram expressões analíticas para estimação da irradiância difusa diária, dadas pelas equações seguintes:

$$K = 0,980, \quad \text{para } K_T \leq 0,1 \quad (08)$$

$$K = 0,910 + 1,154 K_T - 4,936 K_T^2 + 2,848 K_T^3, \quad \text{para } 0,1 < K_T \leq 0,7 \quad (09)$$

em que

$$K = H_d/H;$$

$$K_T = H/H_0;$$

H_d = irradiância solar difusa diária sobre uma superfície horizontal ($J.m^{-2}$);

H_0 = irradiância solar diária no topo da atmosfera sobre uma superfície horizontal ($J.m^{-2}$); e

H = irradiância solar global diária sobre uma superfície horizontal ($J.m^{-2}$).

COLLARES-PEREIRA e RABL (1979) trabalharam com dados de cinco estações dos Estados Unidos e obtiveram a seguinte equação para estimar a irradiância difusa diária:

$$K = 0,99, \quad \text{para } K_T \leq 0,17 \quad (10)$$

$$K = 1,188 - 2,272 K_T + 9,473 K_T^2 + 21,856 K_T^3 + 14,638 K_T^4, \quad \text{para } (11)$$

$$0,17 < K_T \leq 0,8.$$

Segundo AL-HAMDANI et al. (1989), a média mensal da irradiância solar é usualmente requerida nos cálculos e no planejamento de aproveitamento de energia. Alguns pesquisadores têm proposto modelos do tipo $\bar{K} = f(\bar{n}/\bar{N})$,

para estimar a média mensal da irradiância solar difusa diária. Dentre os modelos mais citados na literatura, pode-se destacar a relação entre \bar{K} e (\bar{n}/\bar{N}) desenvolvida por IQBAL (1979), para o Canadá, dada como sendo

$$\bar{K} = 0,791 - 0,635 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (12)$$

GOPINATHAN (1988), usando dados de seis localidades da África do Sul (Cidade do Cabo, Boloemfontein, Pretória, Porto Elizabeth, Windhoek e Harere), obteve as seguintes equações:

$$\bar{K} = 0,697 - 0,577 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (13)$$

com coeficiente de correlação (r) igual a 93,7%; e

$$\bar{K} = 1,135 - 2,126 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) + 1,717 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 + 0,585 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^3 \quad (14)$$

com coeficiente de correlação (r) igual a 94,3%.

LEWIS (1983) obteve, com dados de duas estações da África do Sul (Salisbury e Bulawayo), a equação seguinte:

$$\bar{K} = 0,754 - 0,654 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (15)$$

Outra forma de se desenvolverem modelos para estimar a média mensal da irradiância solar difusa diária é por meio da associação entre os índices \bar{K}_T e (\bar{n}/\bar{N}) .

GOPINATHAN (1988) desenvolveu a seguinte equação, com dados das estações da Cidade do Cabo, de Boloemfontein, Pretória, Porto Elizabeth, Windhoek e Harere, na África do Sul:

$$\bar{K} = 0,879 - 0,575(\bar{K}_T) - 10,323 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (16)$$

com coeficiente de correlação (r) igual a 95,9%.

Outra forma de relacionar a média mensal da irradiância solar difusa com \bar{n}/\bar{N} é por meio do índice

$\bar{K}_0 = (\bar{H}_d / \bar{H}_0)$, observando-se que H_0 é a irradiância diária, média mensal, no topo da atmosfera. IQBAL (1979) relacionou essas variáveis para o Canadá e obteve a seguinte equação:

$$\bar{K}_0 = 0,163 + 0,478 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) - 0,655 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)^2 \quad (17)$$

JAIN (1990) apresentou três equações, respectivamente para Salisbury, Bulawayo e Macerata, na África do Sul, isto é:

$$\bar{K}_0 = 0,374 - 0,271 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right), \quad \text{para Salisbury,} \quad (18)$$

com $r = -94,6\%$;

$$\bar{K}_0 = 0,364 - 0,253 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right), \quad \text{para Bulawayo} \quad (19)$$

com $r = -96,5\%$ e

$$\bar{K}_0 = 0,293 - 0,135 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right), \quad \text{para Macerata} \quad (20)$$

com $r = -68,8\%$.

2.2.2. Modelos para estimação da irradiância difusa horária

Para simular os processos físicos envolvidos no aproveitamento de energia solar, em sistemas do tipo concentradores solares e células fotovoltaicas, é necessário o conhecimento das irradiâncias global, difusa e direta, em base horária (IQBAL, 1983). Com o objetivo de obter informações da irradiância difusa em base horária, muitos pesquisadores têm trabalhado com relações estatísticas entre a irradiância solar global horária (I) e a irradiância difusa horária (I_d), de forma semelhante como fizeram Liu e Jordan, para as irradiâncias diárias global (H) e difusa (H_d). Assim, admite-se a variação do índice $M = I_d / I$, em função de $M_T = (I / I_0)$, ou seja, $M = f(M_T)$, de forma semelhante à variação $K = g(K_T)$.

ORGILL e HOLLANDS (1977), com dados de Toronto (43°48'N), Canadá, determinaram relações entre I_d e I , dadas como

$$M = 1,0 - 0,249 M_T, \text{ para } 0 \leq M_T \leq 0,35 \quad (21)$$

$$M = 1,577 - 1,84 M_T, \text{ para } 0,35 < M_T \leq 0,75 \quad (22)$$

e;

$$M = 0,177, \text{ para } M_T > 0,75 \quad (23)$$

ERBS et al. (1982), com dados de cinco estações dos Estados Unidos, entre as latitudes de 31° N e 42° N, adotaram a metodologia de Orgill e Hollands, obtendo as seguintes equações:

$$M = 1,0 - 0,09 M_T, \text{ para } 0 \leq M_T \leq 0,22; \quad (24)$$

$$M = 0,9511 - 0,1604 M_T + 4,388 M_T^2 - 16,638 M_T^3 + 12,336 M_T^4, \quad (25)$$

para $0,22 < M_T \leq 0,80$; e

$$M = 0,165, \text{ para } M_T > 0,80 \quad (26)$$

SPENCER (1982) apresentou uma equação para estimação da irradiância solar difusa horária, dada como

$$M = a_1 - 0,35 b_1, \text{ para } M_T < 0,35; \quad (27)$$

$$M = a_1 - b_1 M_T, \text{ para } 0,35 \leq M_T \leq 0,75; \text{ e} \quad (28)$$

$$M = a_1 - 0,75 b_1, \text{ para } M_T > 0,75 \quad (29)$$

em que a_1 e b_1 são dados por

$$a_1 = 0,940 + 0,0118 |\Phi|; \text{ e} \quad (30)$$

$$b_1 = 1,185 + 0,0135 |\Phi|, \quad (31)$$

sendo Φ a latitude, em graus.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Dados

Os dados experimentais para a elaboração deste trabalho foram obtidos no período de 10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994. Utilizou-se um sistema automatizado de aquisição de dados da ELE ("Environmental Monitoring Station"), modelo EL507-200, com dois sensores para medição da irradiância solar global e da irradiância solar difusa e um heliógrafo do tipo Campbell-Stokes, para obtenção dos dados de brilho solar, em Viçosa-MG ($20^{\circ} 45' S$, $42^{\circ} 51' W$).

3.1.1. Sistema de aquisição de dados

Trata-se de um aparelho cujas principais funções são a tomada e o registro de dados obtidos por meio de diferentes sensores. Os canais de entrada dos terminais dos sensores podem receber sinais de tensão (V), de resistência (Ω), de frequência (Hz) e de contadores ou níveis digitais. Este aparelho pode receber instruções via computador, por meio de um "software" ou manualmente. Os

dados armazenados na memória do sistema podem ser transmitidos a uma impressora ou armazenados em disquetes.

3.1.2. Configuração do sistema de aquisição de dados

Para o objetivo deste trabalho, a estação foi configurada para operar com dois sensores do tipo PS ("Pyranometric Sensor"), coletando-se dados em intervalos de um minuto e armazenando um único valor médio do período de meia hora. Os dados foram armazenados em disquetes.

3.1.3. Sensores do tipo PS ("Pyranometric Sensor")

Os sensores do tipo PS são devidamente projetados para medir a irradiância solar, em $J.m^{-2}$. Com relação ao princípio de funcionamento dos sensores dos piranômetros, destaca-se que o elemento sensível é formado por um número de espirais de diodos de silício de baixa massa térmica, depositados numa base fina de vidro. Os diodos são montados em dois círculos concêntricos na parte inferior da base de vidro e conectados por meio de uma ponte. A parte inferior do sensor, sobre a disposição interna dos diodos, é pintada de preto, e a disposição concêntrica mais externa é pintada de branco. A diferença de temperatura resultante entre as disposições branca e preta, quando submetidas à irradiância solar, causa uma variação de potencial nos diodos, sendo proporcional à energia recebida ($J.m^{-2}$). Alguns detalhes sobre a especificação dos piranômetros tipo PS são apresentados a seguir: massa = 0,35 kg; dimensões = 99 mm (diâmetro) por 80 mm (altura); faixa espectral = 0,3 a 3,0 μm ; tempo de resposta = 17 s (para 65% da leitura final); corrente consumida: ≈ 3 mA; entrada de tensão = +10/-8V DC; e constante de calibração = 1 mV/($W.m^{-2}$).

3.1.4. Dados de irradiância difusa

Para obtenção dos dados de irradiância difusa, um dos piranômetros foi coberto por um anel sombreador de 36,3 cm de raio e 10,3 cm de largura, que teve a função de impedir a chegada de radiação direta ao sensor do instrumento. A parte externa do anel foi pintada de branco, para evitar o seu aquecimento, e a interna, de preto, para evitar a chegada ao sensor da radiação refletida pelo anel.

O anel sombreador foi instalado de forma que permaneceu paralelo ao plano do equador, com um ângulo de inclinação em relação à vertical local, de valor igual à latitude de Viçosa-MG ($20,75^{\circ}$ S). Durante o período do experimento, sua posição foi ajustada periodicamente, deslocando-se o anel segundo o eixo norte-sul, de acordo com a variação da declinação do Sol.

A Figura 2 ilustra o esquema da montagem do anel sombreador.

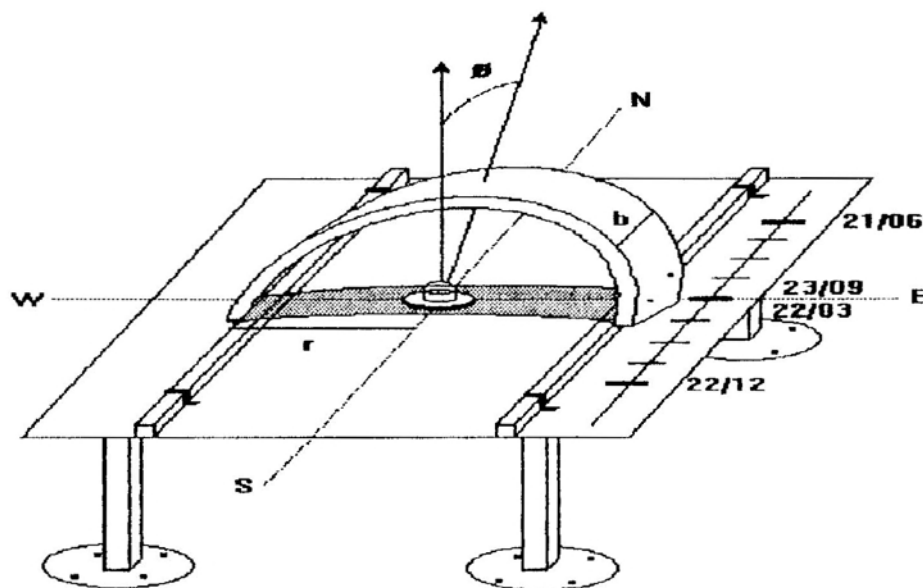


Figura 2 - Esquema da montagem do piranômetro com o anel sombreador.

3.1.5. Correção das medidas de irradiância difusa

O anel-sombreador não obstrui apenas a componente direta da radiação solar, mas também impede a chegada de uma parte da radiação difusa. Por esta razão, é necessário aplicar uma correção nas medidas da irradiância difusa, a correção de abóbada, que leva em consideração as dimensões do anel (raio e largura), o azimute do Sol nascente, a declinação do Sol e a latitude do local. Utilizou-se, neste trabalho, a formulação clássica de Drummond, de 1956 (IQBAL, 1983), para a correção do efeito abóbada. O fator de correção, fc , proposto por Drummond, considerando o campo de radiação difusa isotrópico, é calculado como segue:

$$fc = \frac{1}{1 - X} \quad (32)$$

em que

$$X = \left(\frac{2b}{\pi r} \right) \cos^3 \delta \left[\left(\frac{\pi a}{180} \right) \text{sen } \Phi \text{ sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta \text{ sen } a \right] \quad (33)$$

sendo

$$a = \cos^{-1} \left(\frac{-\text{sen } \delta}{\cos \Phi} \right) \quad (34)$$

$$\delta = 23,45^\circ \text{ sen } \left[\frac{360^\circ}{365} (284 + d_j) \right] \quad (35)$$

em que

d_j = dia juliano (de 1 a 365);

Φ = latitude (graus);

r = raio do anel (cm);

b = largura do anel (cm);

δ = declinação do Sol (graus); e

a = azimute do Sol nascente (graus).

3.1.6. Irradiância horária no topo da atmosfera (I_0)

A quantidade de energia solar, na unidade de tempo, que chega numa unidade de área de uma superfície normal aos raios solares, no topo da atmosfera, foi determinada como

$$F_{0n} = I_{cs} \left(\frac{r_0}{r_{T-S}} \right)^2 \quad (36)$$

ou

$$F_{0n} = I_{cs} E_0 \quad (37)$$

em que

F_{0n} = irradiância solar sobre uma superfície normal aos raios solares, no topo da atmosfera ($W m^{-2}$);

I_{cs} = constante solar ($1.367 W m^{-2}$); e

$E_0 = (r_0/r_{T-S})^2$ = fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, sendo r_0 a distância média Terra-Sol e r_{T-S} a distância instantânea.

Neste trabalho, o termo E_0 foi calculado pela expressão de Spencer (IQBAL, 1983), isto é:

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,00128 \text{sen} \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \text{sen} 2\Gamma \quad (38)$$

em que

$$\Gamma = \frac{2\pi (d_j - 1)}{365}, \text{ dado em radianos} \quad (39)$$

Em uma superfície horizontal, no topo da atmosfera, a densidade de fluxo de radiação solar (F_0) foi assim obtida:

$$F_0 = F_{0n} \cos Z \quad (40)$$

ou

$$F_0 = I_{cs} E_0 \cos Z \quad (41)$$

sendo Z o ângulo zenital do Sol, em graus.

A quantidade de energia, I_0 , no topo da atmosfera, por unidade de área, que chega numa superfície horizontal, num intervalo de tempo Δt ($t_2 - t_1$), foi assim calculada:

$$I_0 = \int_{t_1}^{t_2} F_0(t) dt \quad (42)$$

ou seja:

$$I_0 = \int_{t_1}^{t_2} (I_{cs} E_0 \cos Z) dt \quad (43)$$

sendo

$$\cos Z = \text{sen } \Phi \text{ sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta \text{ sen } \Psi, \quad (44)$$

em que

$$\Psi = (\hbar^* - 12) 15^\circ \quad (45)$$

sendo

Ψ = ângulo horário do Sol (graus); e

\hbar^* = hora solar verdadeira (hora).

Substituindo a equação 44 na 43, segue-se que

$$I_0 = I_{cs} E_0 \int_{t_1}^{t_2} (\text{sen } \Phi \text{ sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \Psi) dt \quad (46)$$

A mudança de variável da integração é feita por meio da relação entre o módulo do vetor velocidade angular de rotação da Terra, Ω , e a variação do ângulo horário, $d\Psi$, ou seja:

$$\Omega = \frac{2\pi}{24} = \frac{d\Psi}{dt} \quad (47)$$

$$dt = \frac{12}{\pi} d\Psi \quad (48)$$

Assim, pode-se rescrever a equação 46 conforme segue:

$$I_0 = \left(\frac{12}{\pi} I_{cs} E_0 \right) \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} (\text{sen } \Phi \text{ sen } \delta + \cos \Phi \cos \delta \cos \Psi) d\Psi \quad (49)$$

ou

$$I_0 = \left(\frac{12}{\pi} I_{cs} E_0 \right) \left[(\text{sen } \Phi) (\text{sen } \delta) \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} d\Psi + (\cos \Phi) (\cos \delta) \int_{\Psi_1}^{\Psi_2} \cos \Psi d\Psi \right] \quad (50)$$

Resolvendo a integral, tem-se

$$I_0 = \left(\frac{12}{\pi} I_{cs} E_0 \right) \left[(\text{sen } \Phi) (\text{sen } \delta) (\Psi_2 - \Psi_1) + (\cos \Phi) (\cos \delta) (\text{sen } \Psi_2 - \text{sen } \Psi_1) \right] \quad (51)$$

Substituindo o valor de I_{cs} , $4.921,2 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$, tem-se

$$I_0 = \left(4921,2 \frac{12}{\pi} E_0 \right) \left[(\sin \Phi)(\sin \delta)(\Psi_2 - \Psi_1) + (\cos \Phi)(\cos \delta)(\sin \Psi_2 - \sin \Psi_1) \right] \quad (52)$$

Essa é uma expressão geral para cálculo da irradiância solar no topo da atmosfera, em $\text{kJ.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$. Neste trabalho, I_0 foi calculada para períodos de uma hora.

3.2. Programa computacional

Para realizar os cálculos envolvidos no desenvolvimento deste trabalho, foi elaborado um programa computacional em Turbo Pascal, versão 5.5, envolvendo as seguintes etapas:

- Cálculo do azimute do Sol nascente (α), declinação do Sol (δ), ângulo zenital (Z) e ângulo horário (Ψ), conforme as equações 34, 35, 44 e 45, respectivamente.
- Cálculo da correção (fc), conforme equações 32 e 33.
- Cálculo do fator de correção associado à excentricidade da órbita terrestre (E_0), conforme a equação 38.
- Cálculo da irradiância horária no topo da atmosfera (I_0), conforme equação 52.
- Integração dos valores das irradiâncias difusa, global, direta e no topo da atmosfera, para o período de uma hora.
- Aplicação da correção do efeito abóbada aos dados de irradiância solar difusa.
- Cálculo dos índices horários $M = I_d/I$ e $M_T = I/I_0$.
- Cálculo dos índices diários $K = H_d/H$, $K_T = H/H_0$ e \bar{K} .
- Cálculo da razão de insolação diária, n/N .
- Cálculo das médias mensais: \bar{H} , \bar{H}_d , \bar{K} e \bar{n}/\bar{N} .
- Ordenação crescente dos valores de M_T , K_T , n/N e \bar{n}/\bar{N} .

3.3. Avaliação e testes de modelos para estimar a irradiância solar difusa

Foram testados e avaliados vários modelos, que se baseiam nas seguintes metodologias:

a) Metodologia de Liu e Jordan

Esta metodologia estabelece uma dependência funcional entre M e M_T , assim como entre K e K_T , isto é, $M = f(M_T)$ e $K = g(K_T)$, sendo

$$M = \frac{I_d}{I} \quad , \quad M_T = \frac{I}{I_0} \quad , \quad K = \frac{H_d}{H} \quad \text{e} \quad K_T = \frac{H}{H_0}$$

em que

I_d = irradiância solar difusa horária;

I = irradiância solar global horária;

I_0 = irradiância solar horária no topo da atmosfera;

H_d = irradiância solar difusa diária;

H = irradiância solar global; e

H_0 = irradiância solar diária no topo da atmosfera.

b) Metodologia de Ångström/Prèscott

O clássico estudo para estimar a radiação solar global, em superfícies horizontais, a partir de dados de insolação foi proposto por Ångström em 1924, surgindo, assim, o modelo de Ångström, que relaciona linearmente a razão entre a irradiância solar global diária (H) e a irradiância no topo da atmosfera (H_0) com a razão de insolação (n/N). Esse modelo, em sua forma modificada por Prèscott em 1940, tem sido extensivamente usado para diversas localidades. A equação de Ångström, modificada por Prèscott, é a seguinte:

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (53)$$

RIETVELD (1978), analisando os valores dos coeficientes **a** e **b** da equação de Ångström-Prèscott para várias localidades, observou que as relações entre os coeficientes **a** e **b** e a razão de insolação são, respectivamente, lineares e hiperbólicas. GLOVER McCULLOCH (1958) estudou o efeito da latitude na equação de Ångström-Prèscott, e BENNETT (1975) introduziu nela o efeito da altitude.

Recentemente, a utilização da razão de insolação tem sido também aplicada no desenvolvimento de modelos para estimar a irradiância solar difusa, ou seja, a dependência funcional $H_d/H = f(n/N)$ tem sido usada no desenvolvimento de modelos de estimação da irradiância solar difusa diária.

c) Modelos desenvolvidos por meio da combinação das metodologias de Liu e Jordan e de Ångström-Prèscott

Tais modelos relacionam K com K_T e n/N , isto é, estabelecem relações funcionais do tipo $K = f(K_T; n/N)$.

3.4. Desenvolvimento de modelos

Para o desenvolvimento de modelos que estimam a irradiância solar difusa, determinaram-se os índices $M = I/I_d$ e $M_T = I/I_0$, para o período de uma hora; e $K = H_d/H$ e $K_T = H/H_0$, em termos diários. No sentido de obter relações matemáticas entre M e M_T e entre K e K_T , por meio do estabelecimento de uma equação de ajuste dessas variáveis, inicialmente esses índices foram locados em sistemas de coordenadas cartesianas, ou seja, foram elaborados diagramas de dispersão para visualizar a curva de ajustamento dessas variáveis. Em seguida, por meio de análise de regressão, usando um programa computacional, analisou-se a variação de M em função de M_T , de K em

função de K_T , de K em função de K_T e de n/N e K em função de n/N , para todo o período experimental.

A escolha do melhor modelo foi feita com base nos seguintes parâmetros estatísticos:

- 1 - Coeficiente de determinação (r^2); e
- 2 - Erro-padrão de estimativa (EPE), dado por

$$EPE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (54)$$

sendo

X_i = valor observado;

Y_i = valor estimado; e

n = número de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Aferição do piranômetro fotovoltaico (da ELE), usando-se um piranômetro Eppley como padrão

A Figura 3 ilustra a curva de aferição entre os valores instantâneos, de irradiância solar global (W.m^{-2}), obtidos pelo piranômetro fotovoltaico da ELE e os obtidos por um piranômetro termoeletrico tipo estrela, da Eppley. Os dados foram medidos em condições de céu totalmente encoberto, de céu parcialmente encoberto e de céu descoberto. Visualmente, a curva de aferição indica que a dispersão entre os dados é pequena, especialmente em se tratando de equipamentos de tempos de resposta bem diferentes. O coeficiente de determinação entre as medidas dos dois piranômetros foi de 99,7% e EPE de $17,63 \text{ W.m}^{-2}$.

4.2. Correção do efeito de abóbada nas medições de irradiância solar difusa

A Figura 4 ilustra a variação do fator de correção aplicado às medidas de irradiância solar difusa. Os valores da correção, para cada mês, estão representados pela média do primeiro ao décimo dia, do décimo primeiro ao vigésimo

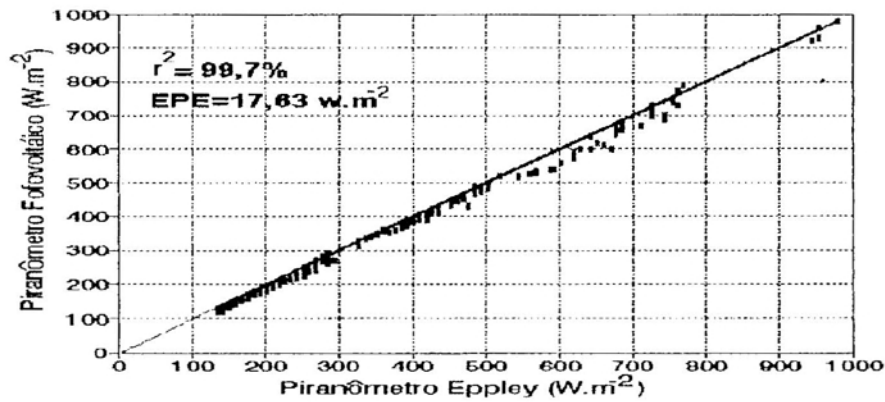


Figura 3 - Curva de aferição entre os valores instantâneos de irradiância solar global, medidos em Viçosa-MG por um piranômetro Eppley e um piranômetro fotovoltáico da ELE.

dia e do vigésimo primeiro ao último dia. Observa-se, nessa figura, que, durante o ano, a curva dos valores do fator de correção divide-se em duas fases praticamente simétricas, as quais estão relacionadas com a variação anual da declinação do Sol. Os valores máximos verificam-se quando a declinação solar é próxima de zero, e o valor mínimo ocorre próximo do solstício de inverno, quando a declinação é máxima. No Quadro 1, apresentam-se valores da correção para o efeito abóbada. Verifica-se, nesse quadro, que os valores máximos da correção são 1,2099 e 1,2101, para o período do primeiro ao décimo dia dos meses de março e outubro, respectivamente. O valor mínimo ocorre entre o vigésimo primeiro dia e o último dia de junho, sendo igual a 1,0744.

4.3. Modelos horários

4.3.1. Um modelo proposto para Viçosa-MG

Modelos de diferentes tipos, relacionando os índices M e M_T , foram testados para os dados de Viçosa, conforme ilustrado no Quadro 2.

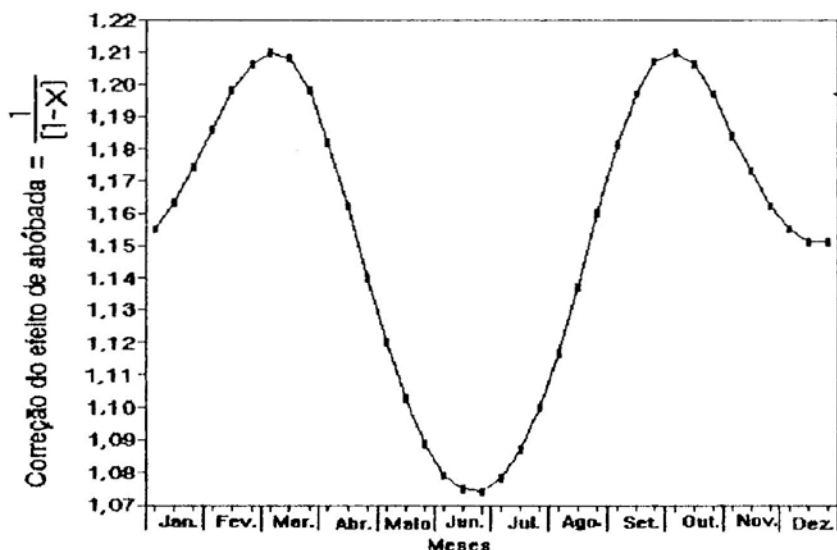


Figura 4 - Variação anual do fator de correção do efeito de abóbada a ser aplicado aos dados de irradiância solar difusa obtidos em Viçosa-MG, utilizando-se um piranômetro com anel sombreador de 10,3 cm de largura e 36,3 cm de raio.

Quadro 1 - Valores do fator de correção para o efeito de abóbada aplicados aos dados de irradiância solar difusa obtidos em Viçosa-MG, utilizando-se um piranômetro com anel sombreador de 10,3 cm de largura e 36,3 cm de raio

Mês	Correção		
	1 ^o ao 10 ^o dia	11 ^o ao 20 ^o dia	21 ^o ao último dia
Janeiro	1,1550	1,1626	1,1736
Fevereiro	1,1862	1,1978	1,2059
Março	1,2099	1,2081	1,1983
Abril	1,1817	1,1617	1,1403
Mai	1,1202	1,1028	1,0888
Junho	1,0793	1,0747	1,0744
Julho	1,0783	1,0866	1,0998
Agosto	1,1174	1,1372	1,1595
Setembro	1,1807	1,1907	1,2072
Outubro	1,2101	1,2062	1,1967
Novembro	1,1844	1,1725	1,1622
Dezembro	1,1547	1,1508	1,1508

Quadro 2 - Modelos ajustados aos dados de M e M_T para Viçosa

Modelo	r^2 (%)	Modelo	r^2 (%)
Cúbico	86,2	Exponencial	74,3
Cúbico Raiz	85,3	Logarítmico	60,5
Raiz Quadrada	85,2	Hiperbólico 2	52,9
Quadrático	84,3	Potencial	50,4
Linear	82,2		

Nota-se, no Quadro 2, que o melhor ajuste foi verificado para o modelo cúbico, com r^2 de 86,2%. Esse modelo foi ajustado, considerando-se todos os dados de M_T (variando de 0 a 0,8), para todo o período experimental. Testou-se, também, a combinação de diferentes modelos, e chegou-se à conclusão de que a forma mais satisfatória para os modelos de estimação da irradiância difusa horária é por meio da combinação de equações lineares e não-lineares cúbicas, considerando diferentes intervalos de M_T . As equações apresentadas a seguir representam as curvas de melhor ajuste entre M e M_T , para cada faixa de M_T considerada:

$$M = 1 - 0,221 M_T, \quad \text{para } M_T \leq 0,20 \quad (55)$$

$$M = 0,798 + 2,442 M_T - 9,634 M_T^2 + 6,9381 M_T^3, \quad \text{para} \quad (56)$$

$$0,20 < M_T \leq 0,80$$

$$M = 0,135, \quad \text{para } M_T > 0,80 \quad (57)$$

A escolha do modelo linear (eq. 55) passando pelo ponto (0;1) foi devida ao fato de que, sendo I/I_0 um índice de transmitância atmosférica quando este índice tende a zero, ou a atmosfera está extremamente turva ou, mesmo para condições de atmosfera mais limpa, a massa ótica é extremamente elevada ($Z \approx 90^\circ$); sob essas condições, a irradiância direta é praticamente zero, ou seja, a irradiância global corresponde à difusa ($I_d/I \approx 1$).

Na Figura 5, apresentam-se os valores observados de M e M_T , assim como a curva de ajuste do modelo representado pelas equações 55, 56 e 57. Na Figura 6, apresentam-se os valores observados de M e M_T , mês a mês, e o modelo anual ajustado, para uma simples verificação visual do ajuste e da dispersão dos dados.

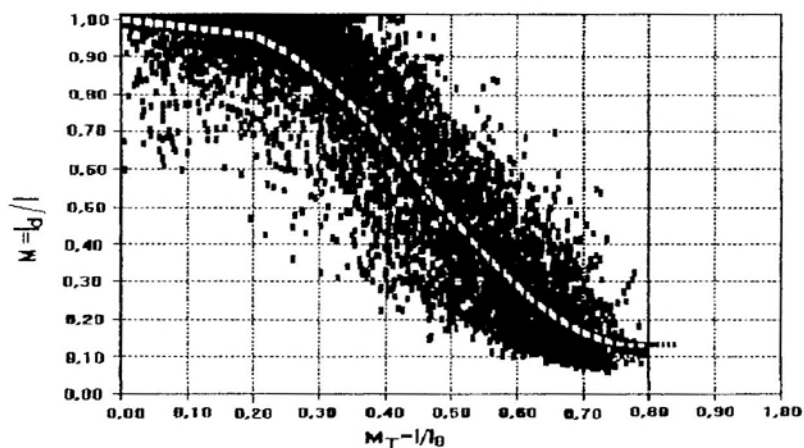


Figura 5 - Valores observados de M e M_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e a curva de ajuste do modelo proposto para Viçosa-MG.

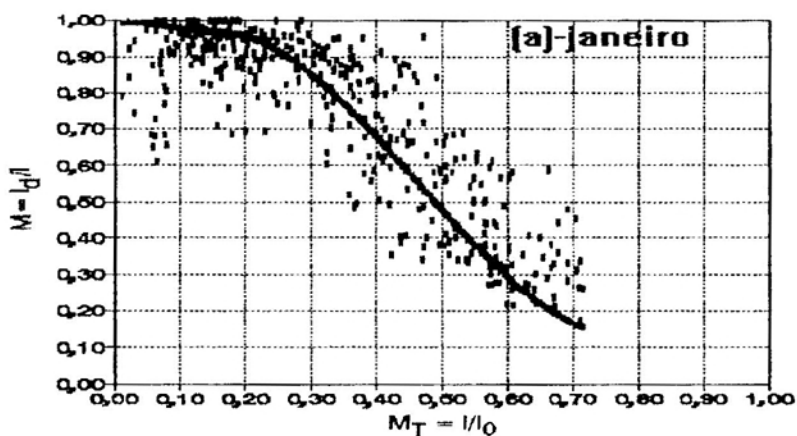


Figura 6 - Valores observados de M e M_T , para todos os meses do ano, no período de 10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994, em Viçosa-MG, e a curva de ajuste anual.

Figura 6, Cont.

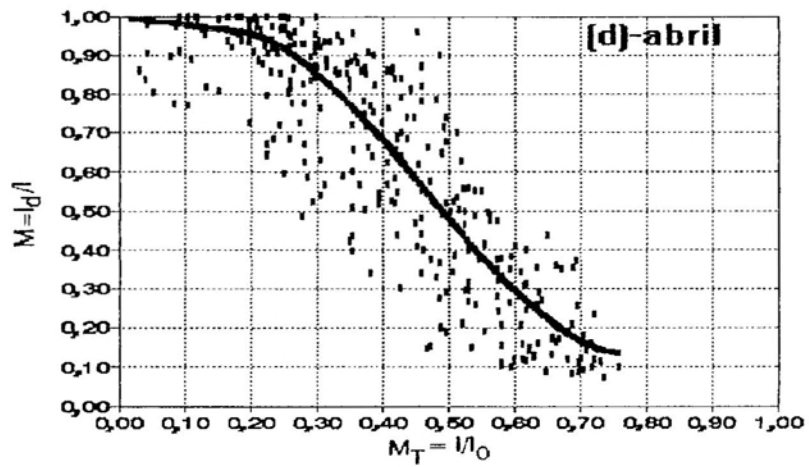
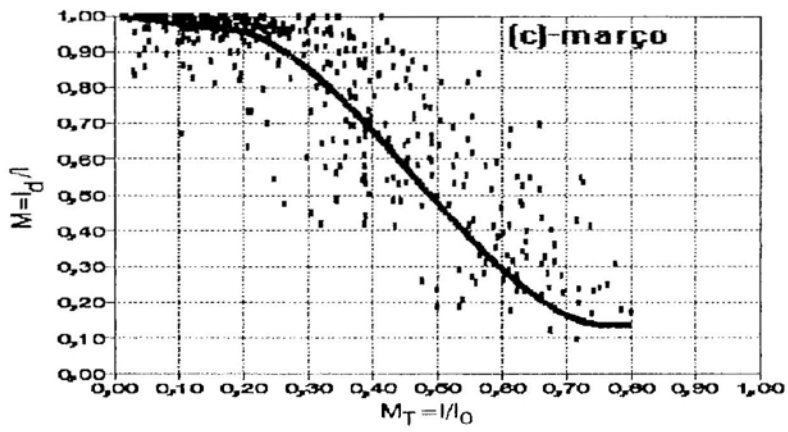
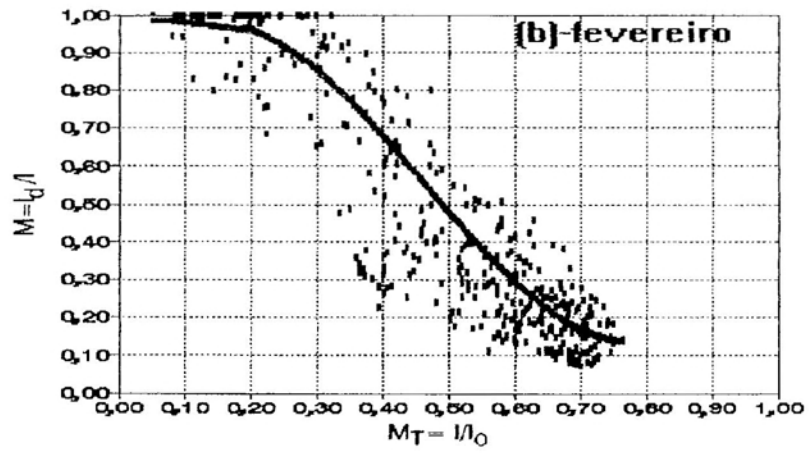


Figura 6, Cont.

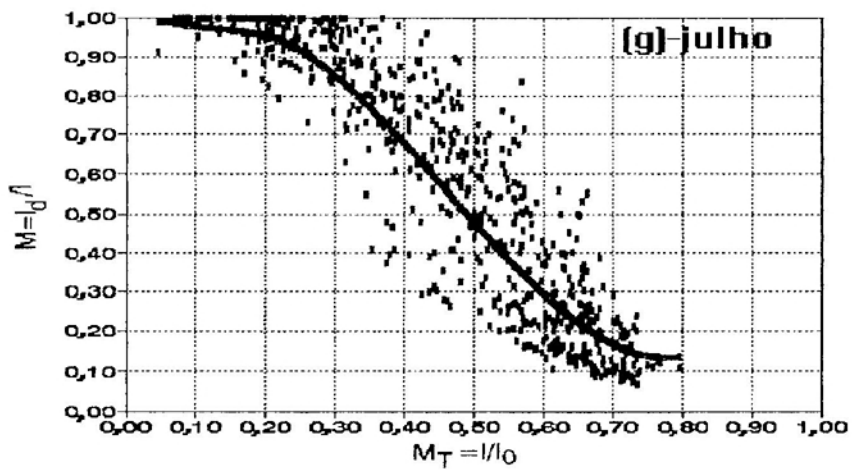
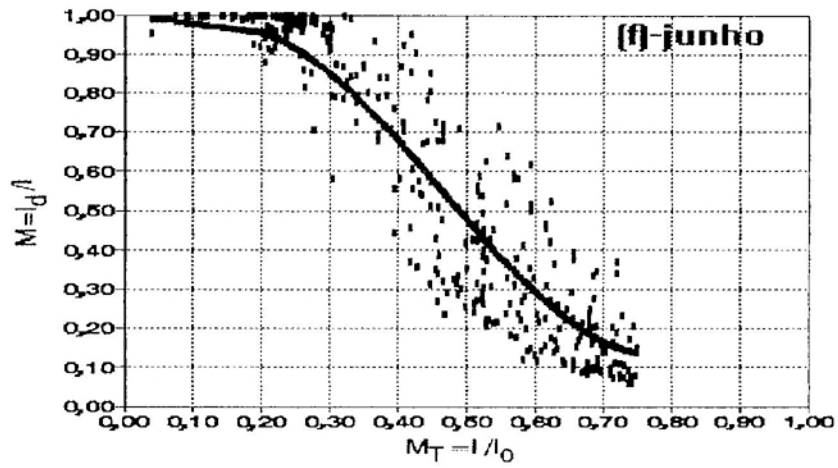
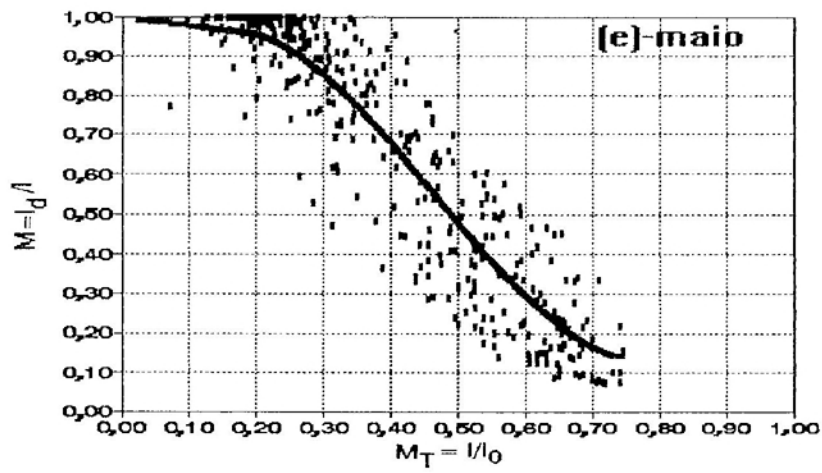


Figura 6, Cont.

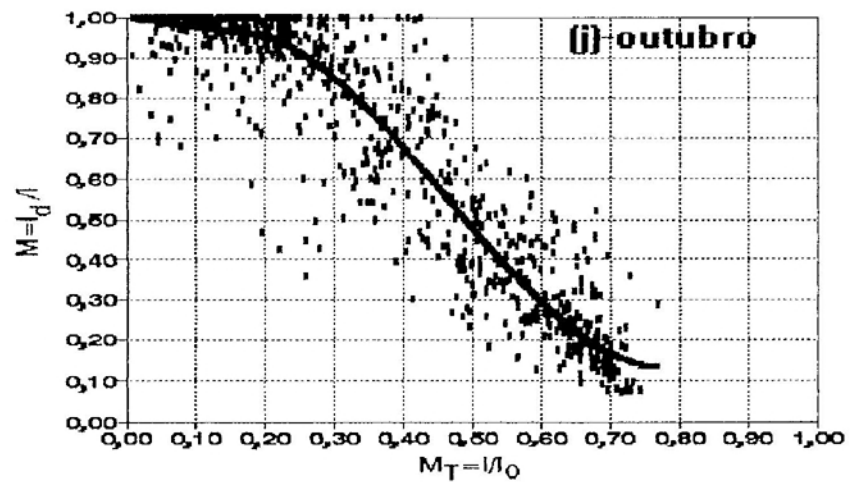
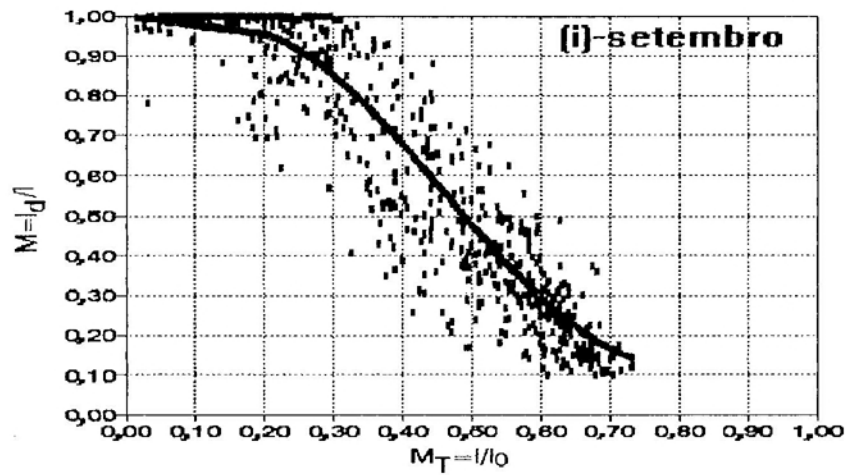
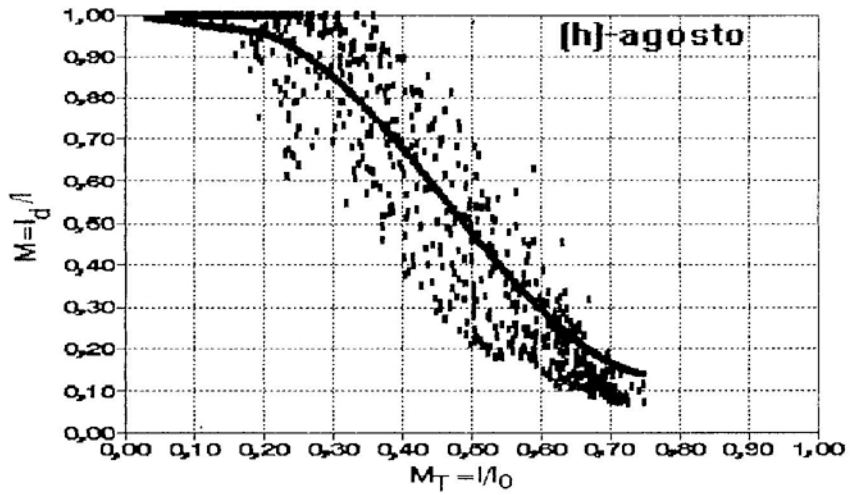
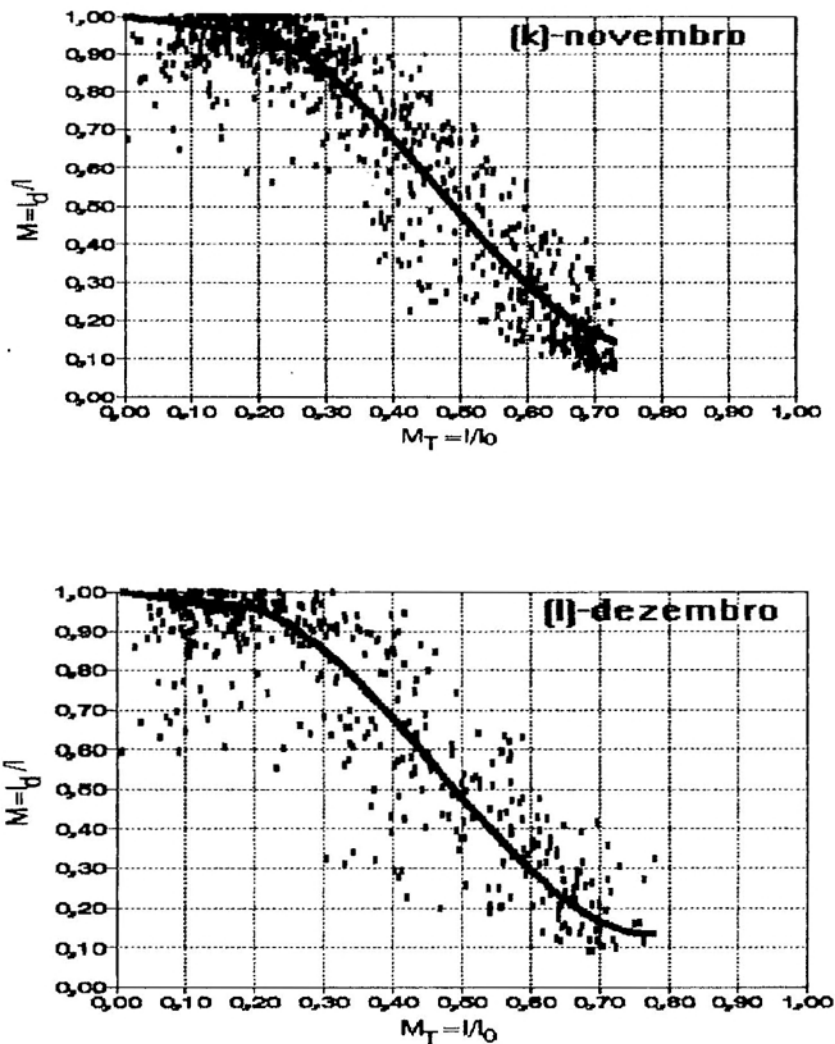


Figura 6, Cont.



4.3.2. Modelos testados para Viçosa-MG

Na Figura 7, mostram-se os valores observados de M e M_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e as curvas representando os modelos testados: o de Orgill e Hollands, o de Erbs et al. e o de Spencer. Essa figura também ilustra a curva do modelo anual ajustado para Viçosa-MG.

No Quadro 3, mostram-se estatísticas desses modelos e do modelo proposto. Observa-se, nesse quadro, que o modelo proposto apresenta coeficiente de determinação (r^2) de

85,74% e erro-padrão de estimativa (EPE) de 12%, enquanto, dentre os modelos testados, o que apresentou, estatisticamente, melhor ajustamento aos dados foi o de Erbs et al., com coeficiente de determinação de 83,35% e EPE de 17%, mas, de forma geral, a Figura 7 ilustra esse modelo apresentando estimativas superiores às do modelo proposto.

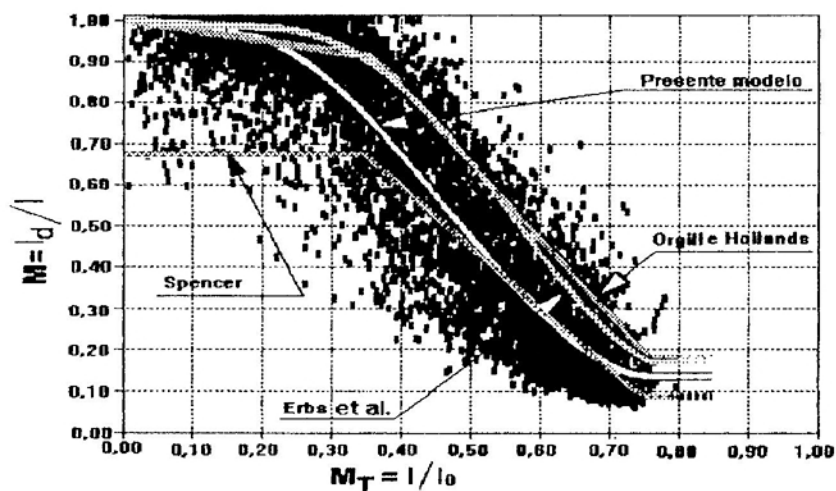


Figura 7 - Valores observados de M e M_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e as curvas representando os modelos de Spencer, de Erbs et al., de Orgill e Hollands e o proposto neste trabalho.

Quadro 3 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para o ajuste de M em função de M_T , usando-se os modelos de Orgill e Hollands, de Erbs et al., de Spencer e o modelo proposto neste trabalho

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	85,74	12
Erbs et al.	83,35	17
Orgill e Hollands	82,85	18
Spencer	81,68	21

Na Figura 7, mostra-se que, na faixa de M_T de 0,35 a 0,75, o modelo de Spencer se aproximou bastante do modelo proposto. Entretanto, para valores de M_T menores, o modelo de Spencer subestimou demasiadamente os dados observados. A grande diferença entre as estimativas de M apresentadas pelo modelo de Spencer (para $M_T \leq 0,35$) e as do modelo proposto para Viçosa justifica-se pela consideração de Spencer, na qual se estabelece M constante dentro desse intervalo. O mesmo se verifica para o intervalo $M_T > 0,75$. Considerando-se todo o intervalo de M_T , o modelo de Spencer foi o que apresentou, estatisticamente, o pior ajuste dentre os modelos testados. Entretanto, para o intervalo intermediário de M_T (0,35 a 0,75), o modelo de Spencer se aproximou bastante do proposto. Analisando os modelos de Orgill e Hollands e de Erbs et al., observa-se que, para a faixa de M_T entre 0 e 0,2, esses modelos foram bem próximos do modelo proposto, porém, para valores de M_T acima de 0,2, apresentaram estimativas superiores às do modelo proposto. Os modelos de Erbs et al. ($31^{\circ}N$ e $42^{\circ}N$) e Orgill e Hollands ($43^{\circ}48'N$), ambos desenvolvidos para o Hemisfério Norte, comportam-se de maneira semelhante quando comparados entre si. É interessante observar a relativa semelhança entre o modelo de Spencer (desprezando-se as faixas de $M_T \leq 0,35$ e $M_T > 0,75$) e o modelo proposto para Viçosa, ambos desenvolvidos para o Hemisfério Sul, o que de certa forma, num primeiro estudo, permite indicar o modelo desenvolvido para Viçosa para ser utilizado em outras localidades do Brasil, até que outros estudos desta natureza sejam conduzidos em tais localidades.

No Quadro 4, apresentam-se os valores de EPE para os modelos de Orgill e Hollands, de Erbs et al., de Spencer e o desenvolvido para Viçosa, para diferentes faixas de M_T , utilizando os dados observados em Viçosa no período de 10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994.

Quadro 4 - Erro-padrão de estimativa (EPE) de diferentes modelos para diferentes faixas de M_T , considerando-se os dados observados em Viçosa, no período de junho de 1993 a 30 de novembro de 1994

Modelo e Faixa de M_T	Equação	EPE (%)
Orgill e Hollands		
$M_T \leq 0,35$	$M = 1,00 - 0,249M_T$	11
$0,35 < M_T \leq 0,75$	$M = 1,577 - 1,840M_T$	21
$M_T > 0,75$	$M = 1,770$	09
Erbs et al.		
$M_T \leq 0,22$	$M = 1,00 - 0,09M_T$	09
$0,22 < M_T \leq 0,80$	$M = 0,9511 - 0,1604M_T + 4,388M_T^2 - 16,638M_T^3 + 12,336M_T^4$	19
Spencer		
$M_T \leq 0,35$	$M = 0,698$	27
$0,35 < M_T \leq 0,80$	$M = 1,185 - 1,465M_T$	14
Modelo Proposto		
$M_T \leq 0,20$	$M = 1,00 - 0,221M_T$	08
$0,20 < M_T \leq 0,80$	$M = 0,798 + 2,442M_T - 9,634M_T^2 + 6,938M_T^3$	13

Para os quatro modelos, os melhores resultados ocorreram nas faixas de variação de M_T correspondentes a uma equação do 1º grau (linear simples) para os menores valores de M_T , com exceção do modelo de Spencer, que apresentou essa equação para a segunda faixa de variação M_T ($0,35 < M_T \leq 0,80$). Na menor faixa, com $M_T \leq 0,35$, o modelo de Spencer foi o que apresentou maior EPE, de 27%, mostrando, assim, que modelos de estimação da irradiância solar difusa, do tipo $M=f(M_T)$, apresentam melhores resultados quando a curva de ajuste do modelo passa pelo ponto (0;1). Analisando a segunda faixa de variação de M_T para cada modelo, observou-se que o modelo de Orgill e Hollands (equação do 1º grau, com EPE=21%), assim como o modelo de Erbs et al. (equação do 4º grau, com EPE=19%),

apresentou EPE bem superior ao do modelo de Spencer (equação do 1º grau, com EPE=14%), evidenciando, mais uma vez, que para valores intermediários de M_T o modelo de Spencer se aproxima do modelo proposto para Viçosa, cujo EPE foi de 8% e 13%, respectivamente para a primeira e segunda faixa. No Quadro 5, apresentam-se valores de EPE, calculados para o modelo proposto, dentro das faixas de variação de M_T dos modelos originais de Orgill e Hollands, Erbs et al. e Spencer, o que mostra que o modelo proposto, mesmo para outras faixas de M_T , é superior a todos os modelos testados.

Quadro 5 - Erro-padrão de estimativa (EPE) calculado para o modelo proposto de acordo com as faixas de M_T correspondentes aos modelos de Orgill e Hollands, Erbs et al. e Spencer, considerando-se os dados observados em Viçosa

Faixa de M_T	EPE (%) para o Modelo Proposto
Correspondente ao modelo de Orgill e Hollands	
$M_T \leq 0,35$	10
$0,35 < M_T \leq 0,75$	14
$M_T > 0,75$	09
Correspondente ao modelo de Erbs et al.	
$M_T \leq 0,22$	08
$0,22 < M_T \leq 0,80$	13
Correspondente ao modelo de Spencer	
$M_T \leq 0,35$	10
$0,35 < M_T \leq 0,80$	18

4.3.3. Modelos ajustados aos dados de Viçosa

a) Modelo de Orgill e Hollands

As equações seguintes representam o modelo de Orgill e Hollands ajustado aos dados observados em Viçosa-MG:

$$M = 1,00 - 0,743M_T, \text{ para } 0 \leq M_T \leq 0,35 \quad (58)$$

$$M = 1,339 - 1,708M_T, \quad 0,35 < M_T \leq 0,75 \quad (59)$$

$$M = 0,060, \quad \text{para } M_T > 0,75 \quad (60)$$

A Figura 8 ilustra o modelo de Orgill e Hollands (ajustado) e o modelo proposto para Viçosa.

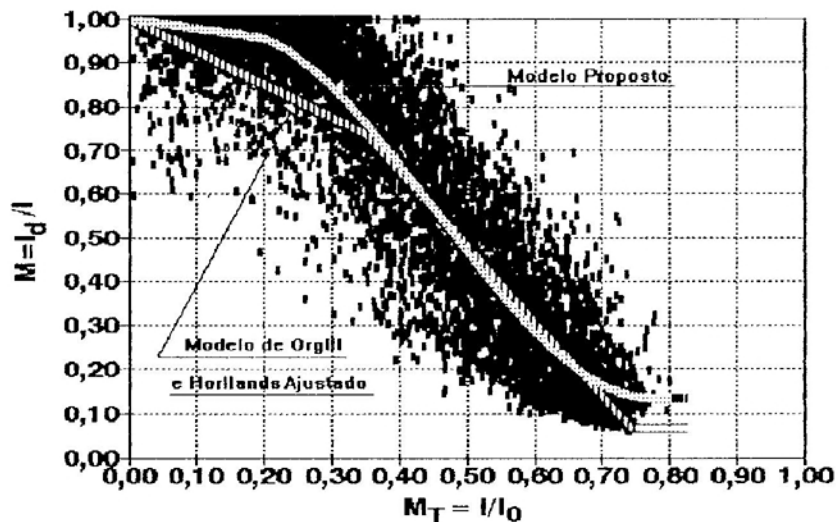


Figura 8 - Valores observados de M e M_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e as curvas representando o modelo de Orgill e Hollands (ajustado para os dados de Viçosa) e o modelo proposto para Viçosa-MG.

No Quadro 6, apresenta-se o desempenho do modelo de Orgill e Hollands ajustado aos dados de Viçosa, em comparação com o modelo original e o proposto para Viçosa.

Observa-se nesse quadro que, quando se ajustou-se o modelo de Orgill e Hollands aos dados de Viçosa, os novos resultados apresentados por esse modelo diferiram em apenas cerca de 1%, tanto em termos de r^2 quanto de EPE, com vantagem para o modelo proposto. Comparando o EPE do modelo de Orgill e Hollands na sua forma original com o EPE do

modelo ajustado, obteve-se uma substancial redução de 18 para 13%.

Quadro 6 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para o ajuste de M em função de M_T , usando-se o modelo de Orgill e Hollands, em sua forma original e ajustado aos dados de Viçosa, e o modelo proposto neste trabalho

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	85,74	12
Orgill e Hollands ajustado	85,10	13
Orgill e Hollands original	82,85	18

b) Modelo de Erbs et al.

O modelo de Erbs et al. ajustado para os dados de Viçosa ficou representado pelas seguintes equações:

$$M = 1,00 - 0,320 M_T, \quad \text{para } M_T \leq 0,22 \quad (61)$$

$$M = -0,147 + 11,624 M_T - 40,790 M_T^2 + 51,433 M_T^3 - 22,86 M_T^4, \quad (62)$$

para $0,22 < M_T \leq 0,80$

$$M = 0,015, \quad \text{para } M_T > 0,80 \quad (63)$$

Na Figura 9, mostram-se as curvas do modelo de Erbs et al. ajustado e do modelo desenvolvido para Viçosa. Nessa figura, observa-se que ambas as curvas são praticamente idênticas, exceto para valores de M_T maiores que 0,70.

No Quadro 7, mostram-se estatísticas, r^2 e EPE, do modelo de Erbs et al., em sua forma original e ajustada, em comparação com esses mesmos parâmetros do modelo proposto. O modelo de Erbs et al. ajustado aos dados de Viçosa apresentou resultados melhores do que quando analisado na

forma original. O r^2 passou de 83,35% para 84,16%, na forma ajustada, e o EPE diminuiu em 5%. O modelo de Erbs et al. ajustado, comparado com o modelo proposto, apresentou o mesmo EPE, 12%, mas foi inferior em termos de r^2 , em cerca de 2%.

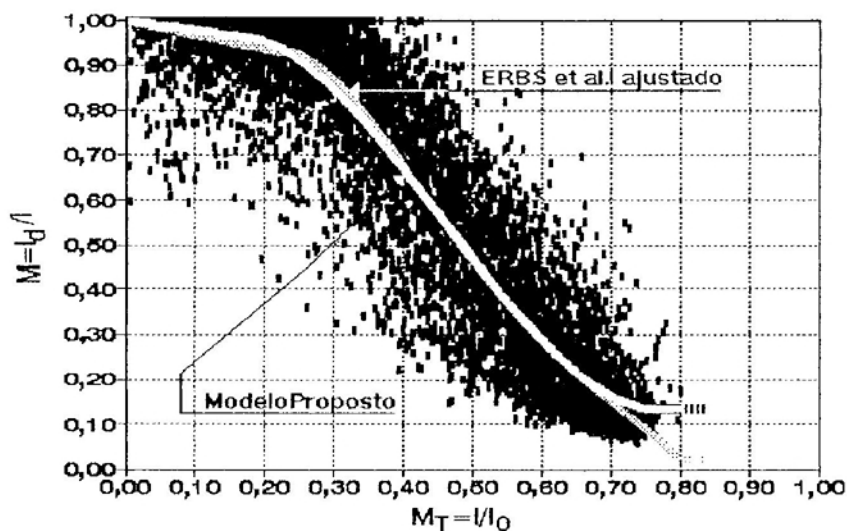


Figura 9 - Valores observados de M e M_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e as curvas representando o modelo de Erbs et al. (ajustado para os dados de Viçosa) e o modelo proposto para Viçosa-MG.

Quadro 7 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para o ajuste de M em função de M_T , usando-se o modelo de Erbs et al., em sua forma original e ajustado aos dados de Viçosa, e o modelo proposto neste trabalho

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	85,74	12
Erbs et al. ajustado	84,16	12
Erbs et al. original	83,35	17

4.4. Modelos diários

Foram estudados modelos diários dos seguintes tipos:

$$K = f(K_T), K = f(n/N), K = f(K_T; n/N) \text{ e } \bar{K} = f(\bar{n}/\bar{N}).$$

4.4.1. Modelos do tipo $K = f(K_T)$

4.4.1.1. Modelo ajustado para Viçosa

As equações a seguir representam a curva de melhor ajuste entre K e K_T (coeficiente de determinação de 92,6% e erro-padrão de estimativa de 7,1%), correspondendo a uma equação do 1º grau para $K_T < 0,14$ e uma do 3º grau (cúbico) para $K_T \geq 0,14$ (ponto de máximo da função cúbica), isto é:

$$K = 0,955, \text{ para } K_T < 0,14 \quad (64)$$

$$K = 0,887 + 1,296 K_T - 6,360 K_T^2 + 4,2185 K_T^3, \quad (65)$$

para $K_T \geq 0,14$.

A Figura 10 ilustra os valores de K e K_T observados no período experimental e também a curva estimada pelo modelo linear-cúbico ajustado para Viçosa (equações 64 e 65).

A Figura 11 ilustra o desempenho do modelo linear-cúbico desenvolvido para Viçosa (equações 64 e 65), considerando-se um período de observação em que os dados não foram usados no ajuste do modelo. O erro-padrão de estimativa para esse novo conjunto de dados foi 4,0%, representando mais ou menos 56% do EPE apresentado pelo modelo para os dados originais, ou seja, 7,1%. A dispersão dos dados pode ser visualizada de outra forma, como na Figura 12, na qual se mostra a relação entre os novos dados de irradiância solar difusa, observados e estimados. Quando se avaliou o modelo, com os novos dados, para estimação de H_d , o r^2 foi 90,8% e o EPE 672 kJ.m^{-2} .

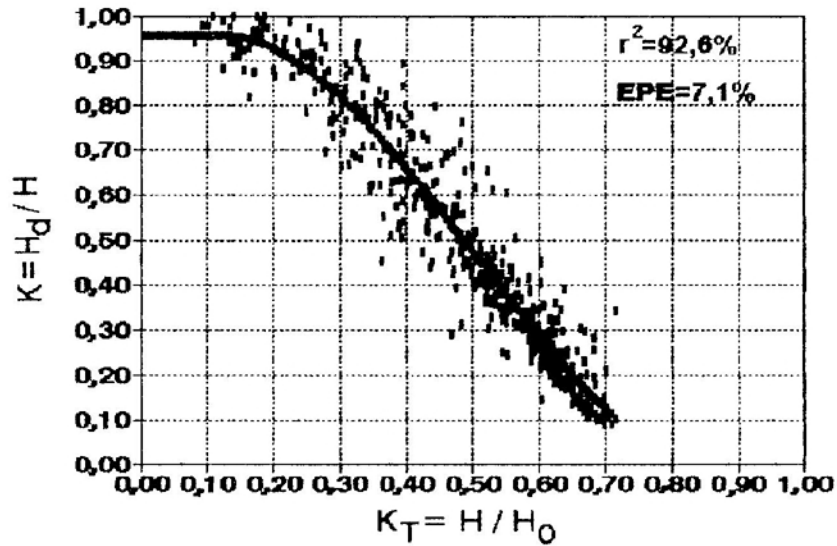


Figura 10 - Valores observados de K e K_T para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), em Viçosa-MG, e a curva representando o modelo linear-cúbico.

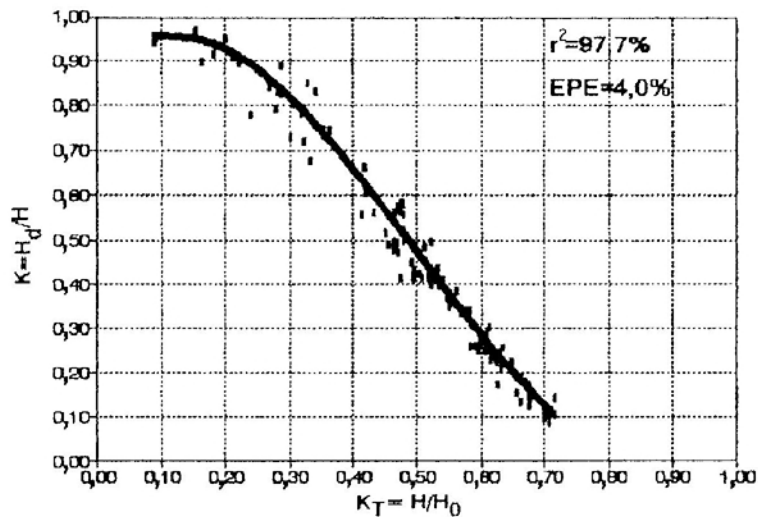


Figura 11 - Valores medidos de K e K_T , para um período de dados que não entraram na obtenção do modelo proposto, do tipo $K=f(K_T)$ (equações 64 e 65), e a curva de ajuste deste modelo.

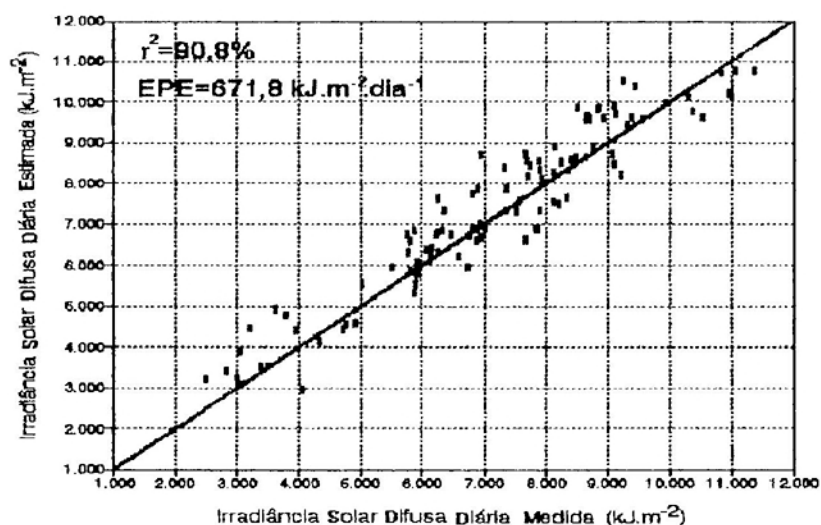


Figura 12 - Dados de irradiância solar difusa diária observados (e que não entraram no ajuste do modelo proposto, do tipo $K=f(K_T)$ e estimados por este modelo (equações 64 e 65).

4.4.1.2. Avaliação de outros modelos, em sua forma original

Avaliaram-se outros modelos do tipo $K=f(K_T)$, propostos por Collares-Pereira e Rabl e por Ruth e Chant. Na Figura 13 estão representadas as curvas referentes a estes modelos, bem como a curva para o modelo ajustado para Viçosa. No Quadro 8, mostram-se o coeficiente de determinação e o erro-padrão de estimativa para cada modelo. Observa-se, na Figura 13, que ambos os modelos testados fornecem estimativas superiores às do modelo proposto. Vale observar que o grau de ajuste do modelo de Collares-Pereira ($r^2=92,12\%$ - Quadro 8) aos dados de Viçosa foi praticamente o mesmo que o apresentado pelo modelo de Ruth e Chant ($r^2=92,50\%$ - Quadro 8), tendo o primeiro um EPE ligeiramente inferior. Ambos, entretanto, apresentaram praticamente o dobro do erro do modelo proposto (Quadro 8).

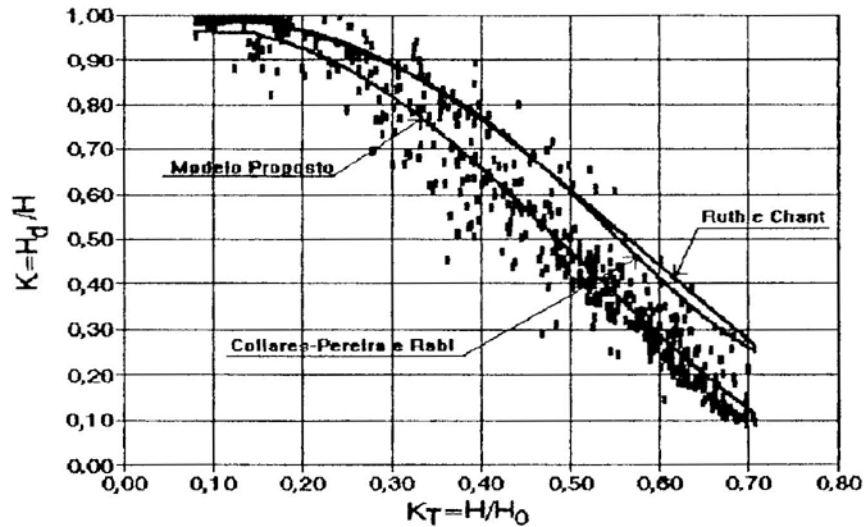


Figura 13 - Valores observados de K e K_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e as curvas representando os modelos de Collares-Pereira e Rabl, Ruth e Chant e o proposto para Viçosa.

Quadro 8 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para o ajuste de K em função de K_T , usando-se os modelos de Collares-Pereira, Ruth e Chant e o modelo para Viçosa

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	92,60	7,1
Collares-Pereira e Rabl	92,12	13,5
Ruth e Chant	92,50	14,9

4.4.1.3. Avaliação de outros modelos ajustados aos dados de Viçosa

a) Modelo de Ruth e Chant

As equações apresentadas a seguir representam o modelo de Ruth e Chant ajustado aos dados observados em Viçosa-MG:

$$K = 0,958, \quad \text{para } K_T \leq 0,10 \quad (66)$$

$$K = 0,893 + 1,208K_T - 6,065K_T^2 + 3,938K_T^3, \quad \text{para } 0,10 < K_T \leq 0,70 \quad (67)$$

O modelo de Ruth e Chant e o modelo proposto são essencialmente o mesmo, à exceção das faixas de K_T . Esta diferença, entretanto, não pode ser observada visualmente, conforme ilustra a Figura 14, nem estatisticamente, como mostrado no Quadro 9. Observa-se também, no Quadro 9, que o ajuste do modelo aos dados de Viçosa não alterou praticamente o r^2 , mas reduziu em mais de 50% o EPE.

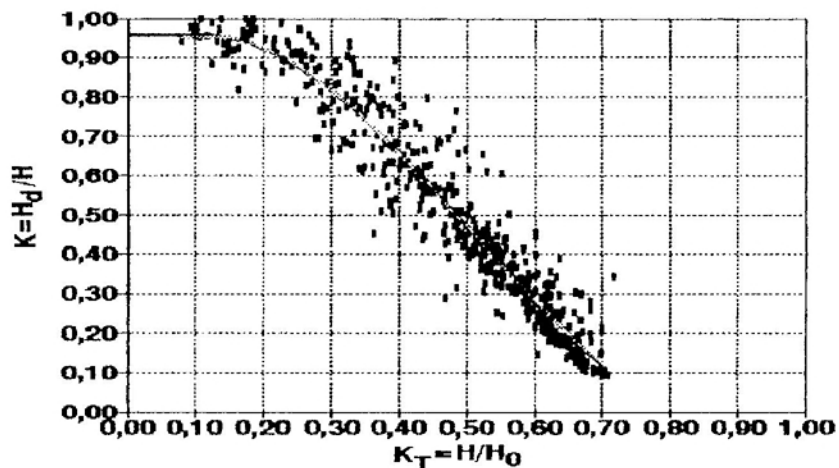


Figura 14 - Valores observados de K e K_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e a curva representando o modelo de Ruth e Chant ajustado aos dados observados em Viçosa e o modelo proposto.

b) Modelo de Collares-Pereira e Rabl

As equações apresentadas a seguir representam o modelo de Collares-Perreira e Rabl ajustado aos dados observados em Viçosa-MG.

$$K = 0,958, \quad \text{Para } K_T \leq 0,10 \quad (68)$$

$$K = 1,171 - 1,470K_T + 3,171K_T^2 - 9,729K_T^3 + 7,377K_T^4, \quad (69)$$

para $0,10 < K_T \leq 0,70$.

Quadro 9 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para o ajuste de K em função de K_T do modelo de Ruth e Chant, em sua forma original e ajustada aos dados de Viçosa, e do modelo proposto

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	92,60	7,1
Ruth e Chant ajustado	92,60	7,1
Ruth e Chant original	92,50	14,9

O modelo de Collares-Pereira e Rabl se ajustou bem aos dados de Viçosa, como mostra a Figura 15 e o Quadro 10. Conforme os dados desse quadro, o ajuste do modelo de Collares-Pereira e Rabl aos dados de Viçosa praticamente não alterou o r^2 , mas reduziu substancialmente o erro-padrão de estimativa em cerca de 50%.

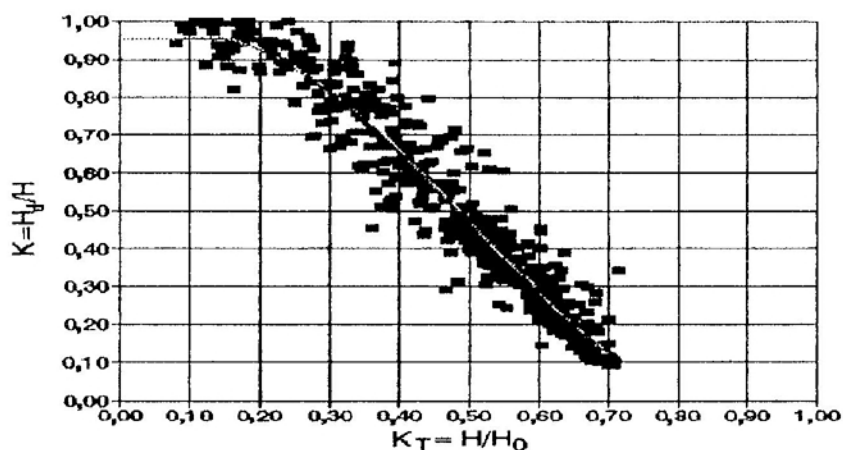


Figura 15 - Valores observados de K e K_T , para todo o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e a curva representando o modelo de Collares-Pereira e Rabl ajustado aos dados observados em Viçosa e o modelo proposto.

Quadro 10 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para o ajuste de K em função de K_T do modelo de Collares-Pereira e Rabl, em sua forma original e ajustado aos dados de Viçosa, e do modelo proposto

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	92,60	7,1
Collares-P e Rabl ajustado	92,60	7,2
Collares-P e Rabl original	92,12	13,5

4.4.2. Modelos do tipo $K = f(n/N)$

Desenvolveu-se um modelo para estimar a irradiância difusa diária em função da razão de insolação (n/N). A dispersão entre K e n/N é mostrada na Figura 16. A equação a seguir representa o melhor ajuste encontrado para modelos deste tipo para Viçosa, sendo obtido r^2 de 89,28% e EPE de 8,3%.

$$K = 0,916 - 1,089 \left(\frac{n}{N} \right) + 0,713 \left(\frac{n}{N} \right)^2 - 0,444 \left(\frac{n}{N} \right)^3 \quad (70)$$

Os valores de r^2 e EPE indicam que modelos do tipo $K=f(K_T)$ apresentam melhor desempenho para estimação de K, em relação a modelos do tipo $K=f(n/N)$. A estimação de K com os novos dados, que não entraram na obtenção do modelo, por meio da equação 70, apresentou r^2 de 91,7% e EPE 7,7%, porém quando essa equação foi usada para estimar H_d o r^2 decresceu para 63,3%, com EPE de 1373 $\text{kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

4.4.3. Modelos do tipo $\bar{K} = f(\bar{n}/\bar{N})$

Neste trabalho, modelos do tipo $\bar{K} = f(\bar{n}/\bar{N})$ foram também avaliados. A equação 71 representa o melhor ajuste para este tipo de modelo, com coeficiente de determinação igual a 96,17% e EPE de 2,0%:

$$\bar{K} = 0,719 - 0,539 \left(\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad .(71)$$

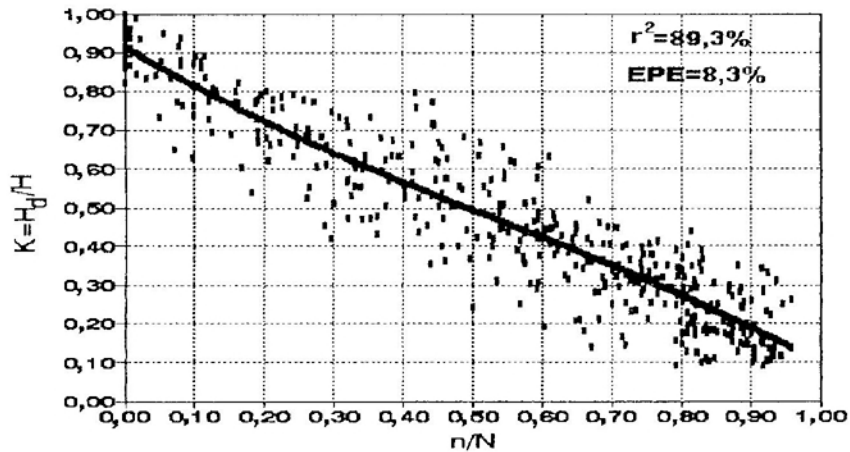


Figura 16 - Valores observados de K e (n/N) , para o período experimental (10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994), e a curva de ajuste do modelo do tipo $K = f(n/N)$.

Ressalta-se que o período durante o qual os dados foram obtidos foi muito curto para se ter um modelo dessa natureza representativo para as condições de Viçosa.

A Figura 17 ilustra os valores médios mensais para \bar{K} e (\bar{n}/\bar{N}) e também as curvas de ajuste para os modelos de Gopinathan (linear - eq.13; cúbico - eq.14), de Glaudius Lewis (linear - eq.15), de Iqbal (linear - eq.12) e o modelo proposto (linear - eq.71). No Quadro 11, mostram-se algumas estatísticas dos testes dos modelos do tipo $\bar{K} = f(\bar{n}/\bar{N})$ para Viçosa-MG, podendo-se verificar que todos os modelos testados, à exceção do modelo cúbico de Gopinathan, apresentaram o mesmo valor de r^2 , 96,17%, igual ao do modelo proposto para Viçosa (eq.71). Entretanto, os erros apresentados por esses modelos foram maiores, crescendo na seguinte ordem: Glaudius Lewis (linear), Iqbal (linear) e Gopinathan (linear). Ressalta-se que o modelo cúbico de

Gopinathan apresentou r^2 inferior em aproximadamente 10% e EPE duas vezes maior, em relação ao modelo proposto. Os valores de EPE dos modelos lineares de Iqbal e Gopinathan foram, também, relativamente altos (cerca de 80% maiores que o do modelo proposto).

Dentre os modelos testados, o que mais se aproximou do proposto para Viçosa foi o de Glaudius e Lewis, com o mesmo valor de r^2 (96,17%) e EPE 10% maior.

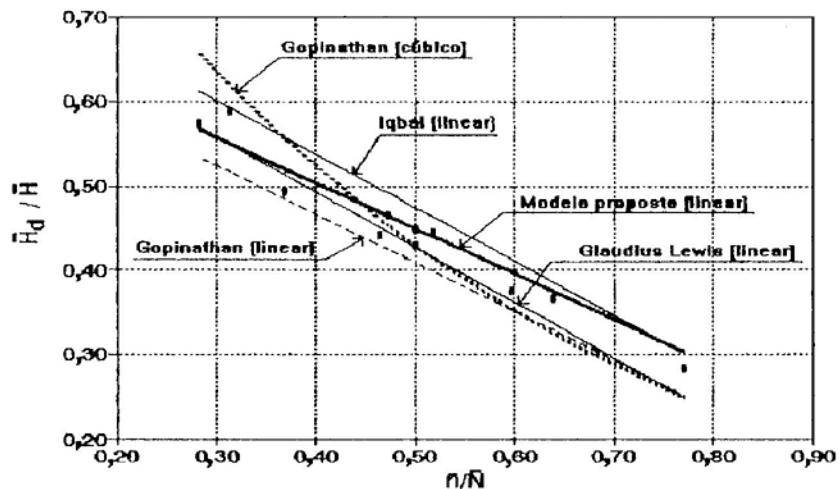


Figura 17 - Valores observados de $\bar{K} = \bar{H}_d/\bar{H}$ e \bar{n}/\bar{N} , para todo o período experimental e as curvas representando os modelos de Gopinathan, de Iqbal, de Glaudius Lewis e o modelo proposto.

Quadro 11 - Coeficiente de determinação (r^2) e erro-padrão de estimativa (EPE) para ajuste de \bar{K} em função de (\bar{n}/\bar{N}) , usando-se os modelos de Gopinathan (linear e cúbico), de Glaudius Lewis (linear), de Iqbal (linear) e o modelo proposto (linear)

MODELO	r^2 (%)	EPE (%)
Modelo proposto	96,17	2,0
Glaudius Lewis (linear)	96,17	2,2
Iqbal (linear)	96,17	3,6
Gopinathan (linear)	96,17	3,7
Gopinathan (cúbico)	86,68	4,0

4.4.4. Modelos do tipo $K = f(K_T; n/N)$

Modelos do tipo $K=f(K_T; n/N)$ foram também avaliados neste trabalho. A equação 72 representa o melhor ajuste para este tipo de modelo, com coeficiente de determinação igual a 92,8% e um erro-padrão de estimativa de 6,9%, isto é:

$$K = 1,026 - 0,365K_T - 0,688K_T^2 - 0,229\left(\frac{n}{N}\right) + 0,392\left(\frac{n}{N}\right)^2 - 0,708 K_T\left(\frac{n}{N}\right) \quad (72)$$

Observou-se que, ao associar K_T e n/N para estimar K , os resultados, em termos de R^2 e EPE, foram praticamente os mesmos em relação aos do modelo do tipo $K=f(K_T)$ (eqs. 64 e 65).

Quando aplicado aos novos dados, que não entraram no desenvolvimento do modelo, para a estimação de H_d , r^2 foi ligeiramente menor (90,1%) e EPE maior ($689 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), em comparação aos resultados do modelo do tipo $K=f(K_T)$, o que mostrou que não se justifica a inclusão de n/N para modelos de estimação da irradiância solar difusa. A semelhança apresentada no desempenho entre os modelos do tipo $K=f(K_T)$ e $K=f(K_T; n/N)$ era esperada, uma vez que se sabe ser n/N um bom estimador da irradiância solar global e, portanto, do índice K_T .

4.5. Análise dos dados de irradiância solar difusa diária

4.5.1. Variação de H_d/H em função de n/N

Para o período de 10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994, a irradiância solar difusa diária em Viçosa correspondeu, em média, a 48% da irradiância global, sendo o valor máximo de 100% e o mínimo de 9%. Na Figura 18, mostram-se as variações horárias das irradiâncias difusa e global para diferentes valores de n/N . A Figura

18-a refere-se ao dia 20 de setembro de 1994, no qual ocorreu a menor percentagem da irradiância difusa em relação à global, ou seja, 9%. No dia 21 de agosto de 1993 (Figura 18-j), a irradiância solar difusa correspondeu a 100% ($n/N=0$) da irradiância global. As demais figuras (18-b, 18-c, 18-d, 18-e, 18-f, 18-g, 18-h e 18-i) correspondem a dias em que a irradiância solar difusa foi 10% ($n/N=0,91$), 15% ($n/N=0,87$), 20% ($n/N=0,78$), 26% ($n/N=0,76$), 30% ($n/N=0,78$), 40% ($n/N=0,72$), 76% ($n/N=0,10$) e 80% ($n/N=0,16$) da irradiância global, respectivamente.

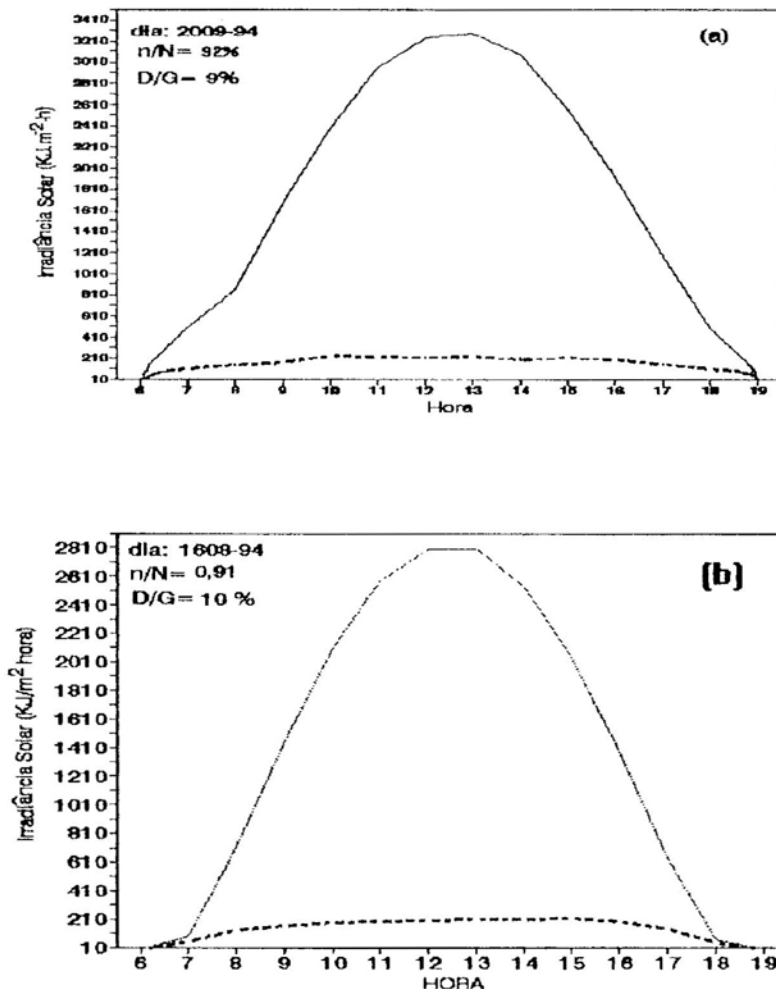


Figura 18 - Curvas de irradiância solar global (—) e difusa (----) medidas em Viçosa-MG, por um piranômetro fotovoltaico (ELE).

Figura 18, Cont.

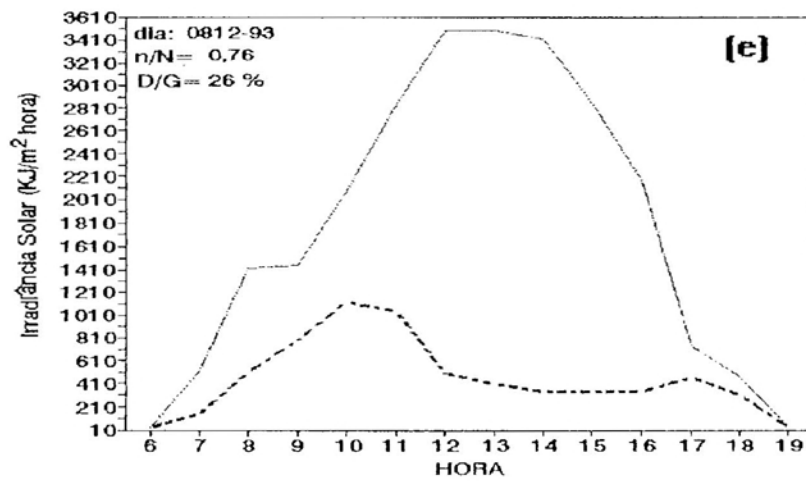
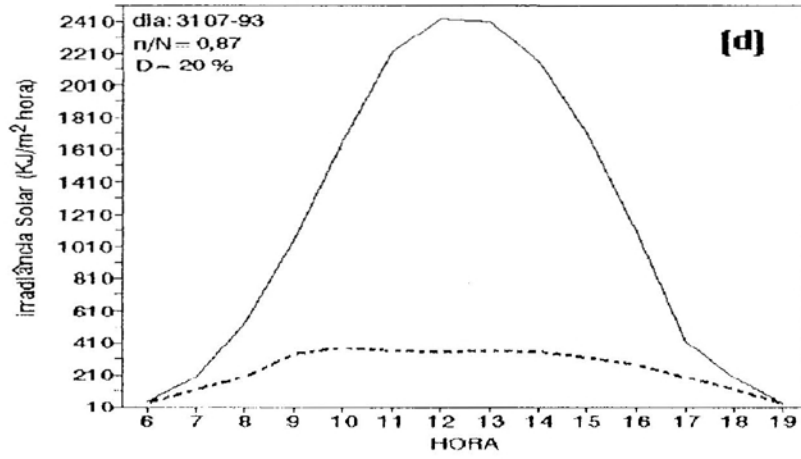
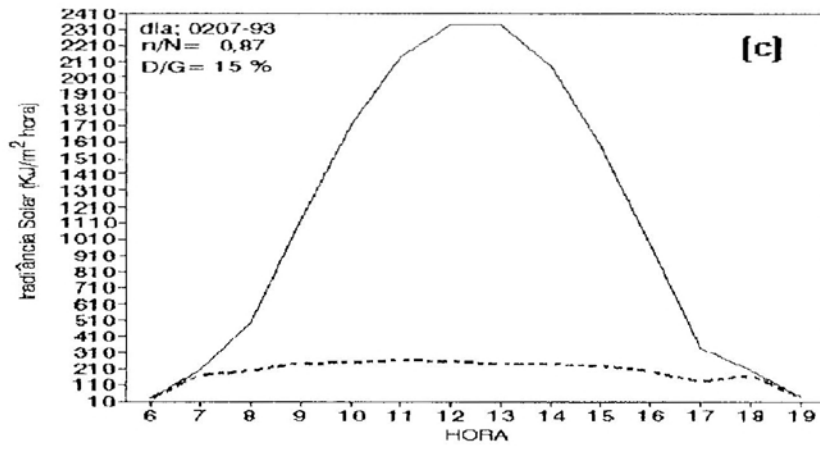


Figura 18, Cont.

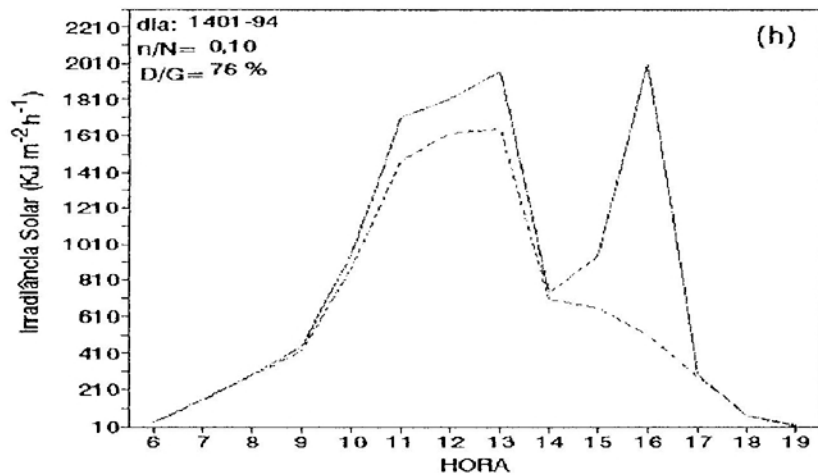
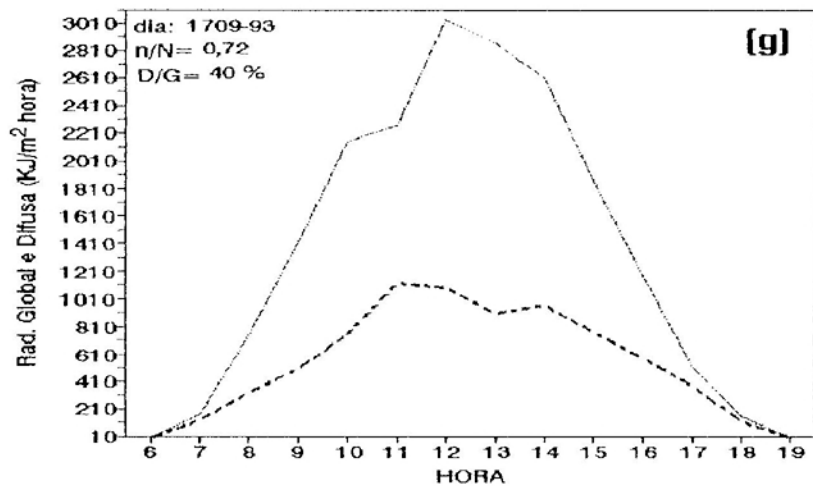
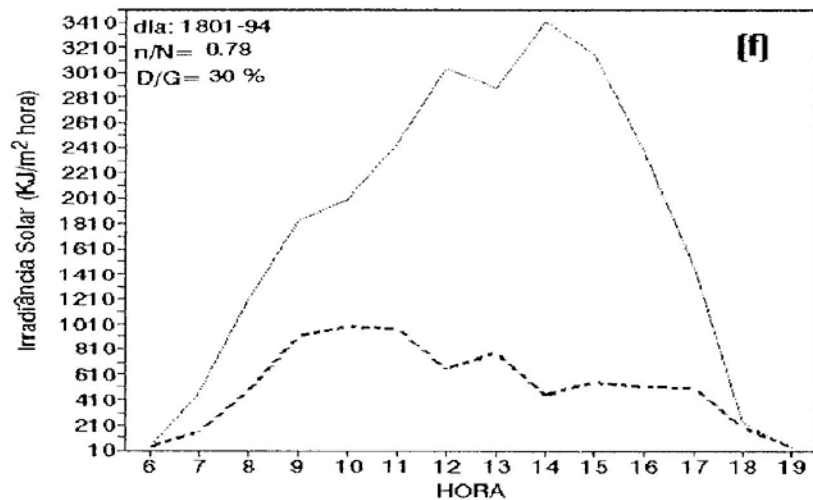
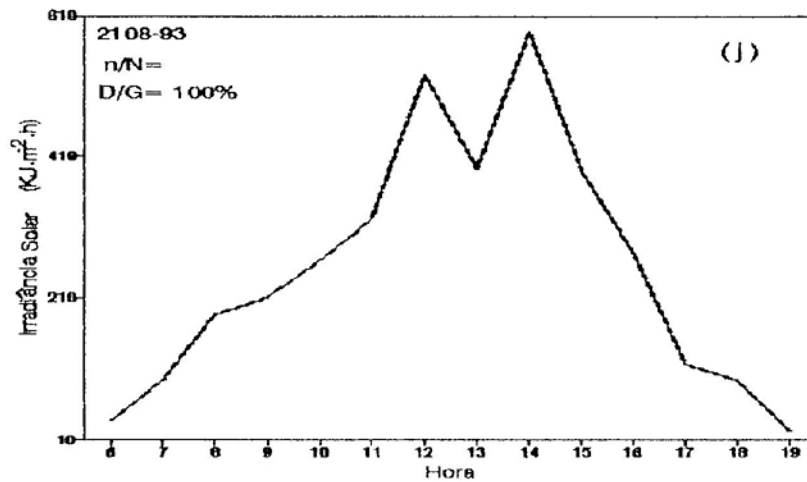
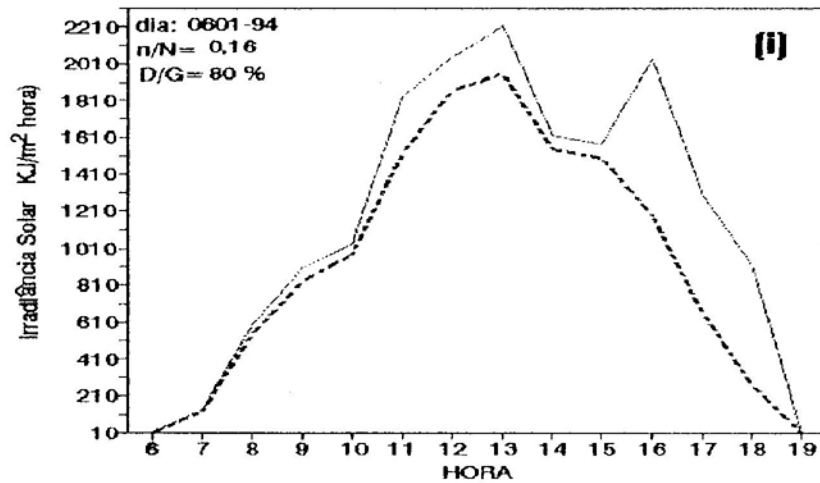


Figura 18, Cont.



4.5.2. Variação de \bar{H}_d/\bar{H} e de seu desvio-padrão em função de n/N

Na Figura 19, mostram-se os valores médios de H_d/H (Figura 19-a) e seus desvios-padrão (Figura 19-b), para intervalos de 0,1, de acordo com os valores da razão de insolação.

No Quadro 12, detalham-se os valores médios da percentagem da irradiância solar difusa em relação à global e os respectivos desvios-padrão, para cada intervalo de n/N, mostrando variação de 12 a 24%. Para n/N variando de 0

a 10%, a irradiância difusa é, em média, 83% da irradiância global, com desvio-padrão de 21%. Essa dispersão de H_d/H , em torno de um valor médio, indica que o fluxo da irradiância solar difusa é dependente de outros fatores, além da razão de insolação, dentre os quais se podem citar a presença de aerossóis, a quantidade e o tipo de nuvens, a espessura ótica das camadas de nuvens etc.

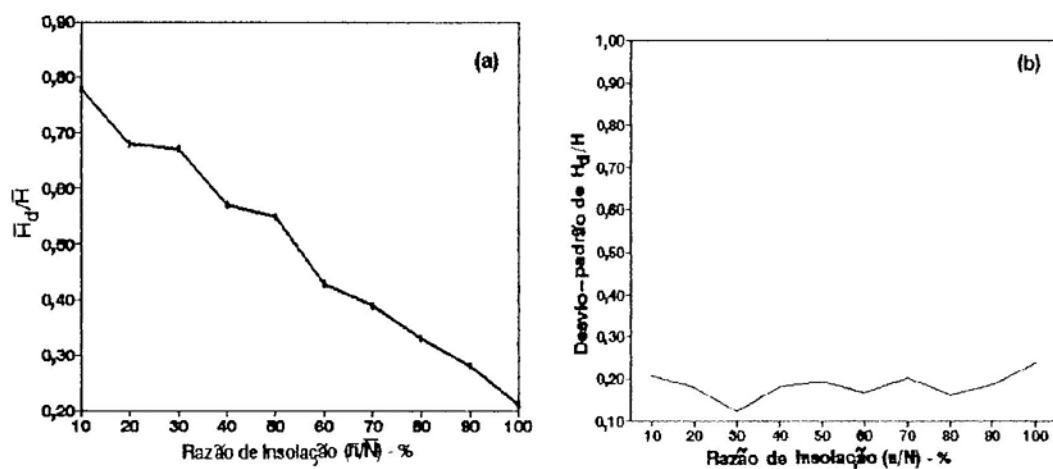


Figura 19 - (a)- Valores médios de H_d/H observados em Viçosa de acordo com faixas de (n/N) ; e (b)- desvios-padrão de H_d/H em função de (n/N) .

Quadro 12 - Valores médios de H_d/H e respectivos desvios-padrão, de acordo com intervalos de n/N

n/N (%)	\bar{H}_d/\bar{H} (%)	Desvio-Padrão (%)
0 - 10	83	21
10 - 20	71	12
20 - 30	66	17
30 - 40	60	18
40 - 50	55	19
50 - 60	50	16
60 - 70	44	20
70 - 80	35	16
80 - 90	28	18
90 - 100	28	24

4.5.3. Coeficiente de transmissão da irradiância solar difusa em função do índice H/H_0

A Figura 20 ilustra a relação entre o coeficiente de transmissão da irradiância solar difusa (H_d/H_0) e o índice H/H_0 medidos em Viçosa. A relação entre estes dois índices pode ser usada para estabelecer o grau de cobertura de céu. Na faixa de dias com céu totalmente encoberto ($H/H_0 < 0,25$), a irradiância global é baixa e corresponde, praticamente, à irradiância difusa. Isso pode ser visualizado pela forma linear apresentada na Figura 20, na faixa $H/H_0 < 0,25$. Em dias de céu parcialmente encoberto ($0,25 \leq H/H_0 \leq 0,50$), o coeficiente de transmissão da irradiância difusa em Viçosa variou entre 18% e 33%, aproximadamente. Em dias de céu limpo ($H/H_0 > 0,5$), a fração da irradiância difusa decresce, enquanto H/H_0 atinge seu valor máximo. Nessas condições de céu limpo, o coeficiente de transmissão da irradiância difusa variou de aproximadamente 9% a cerca de 22%, para uma variação de H/H_0 de 50 a 70%.

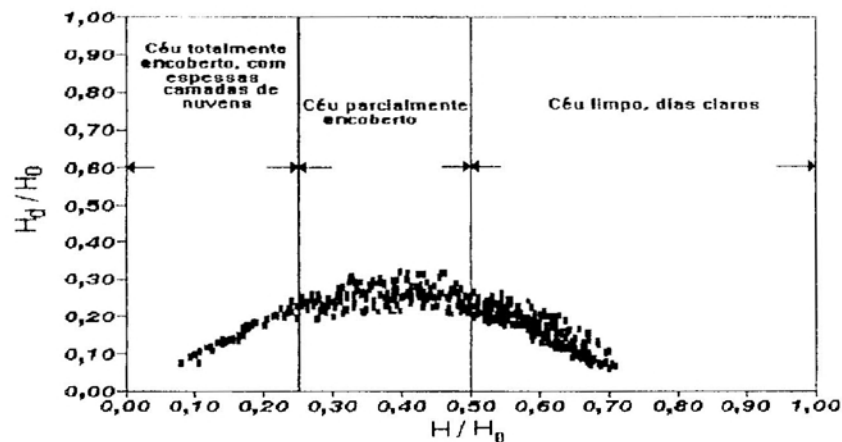


Figura 20 - Variação do coeficiente de transmissão da irradiância solar difusa (H_d/H_0) em função do índice H/H_0 .

4.5.4. Irradiância solar difusa com céu totalmente nublado

Realizaram-se medições de irradiância difusa, em um dia de céu totalmente nublado, em que a irradiância global é inteiramente difusa. As medições foram realizadas consecutivamente com e sem anel sombreador. O fluxo real da irradiância difusa é representado pelos valores obtidos sem o anel sombreador. O erro médio para as medições com anel (sem a correção de abóbada) foi de $42,65 \text{ W.m}^{-2}$. Porém, quando se aplica a correção a esses dados, o erro se reduz a $11,4 \text{ W.m}^{-2}$. Essa diferença pode ser observada visualmente pela comparação entre as Figuras 21 e 22. Na Figura 21 são mostrados valores reais de irradiância difusa (medições obtidas sem o anel) e valores obtidos usando o anel sombreador, mas sem a aplicação da correção de abóbada, enquanto a Figura 22 ilustra essa mesma relação para os dados obtidos com anel e que sofreram correção.

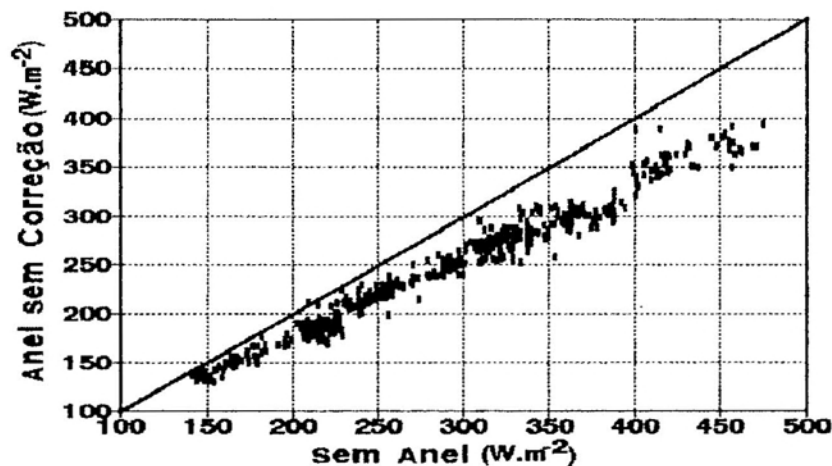


Figura 21 - Valores medidos de irradiância solar difusa, obtidas em um dia de céu totalmente nublado, sem o anel sombreador (fluxo real de radiação solar difusa) e com o anel (sem a aplicação da correção de abóbada).

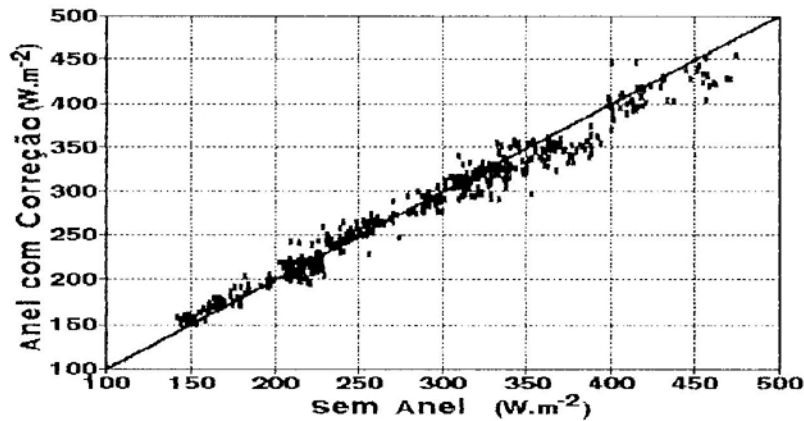


Figura 22 - Valores medidos de irradiância solar difusa, obtidas em um dia de céu totalmente nublado, sem o anel sombreador (fluxo real de radiação solar difusa) e com anel (com a aplicação da correção de abóbada).

4.5.5. Valores de irradiância solar global e difusa para diferentes coberturas de céu

A Figura 23 ilustra os valores de irradiância solar global e difusa diária, para condições de céu totalmente nublado, parcialmente nublado e de céu limpo. Tem-se que a irradiância difusa apresenta valores entre $500 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $1.000 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para as faixas de céu totalmente nublado e parcialmente nublado, respectivamente.

Para condições de céu limpo $[(n/N > 0,7)]$, a irradiância difusa decresce. Com relação à irradiância global, observa-se um crescimento com a razão de insolação. Os valores médios são apresentados na Figura 24. Na faixa de n/N entre 0 e 0,5, a irradiância difusa média é praticamente constante, alcançando um valor de cerca de $800 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Para $n/N > 0,5$, a irradiância difusa decresce, chegando a $400 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para n/N aproximadamente igual a 0,9. Com relação à irradiância global média, observa-se um crescimento de cerca de $800 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para aproximadamente $2.000 \text{ kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, quando n/N varia de 0 a próximo de 0,9.

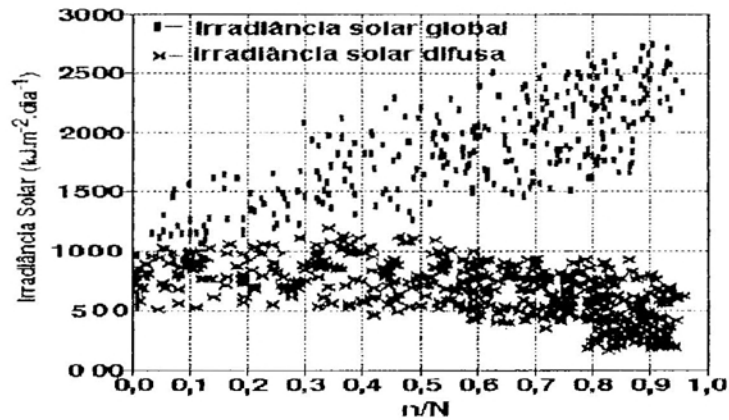


Figura 23 - Valores de irradiância global e difusa diária de acordo com a cobertura de nuvens presentes no céu.

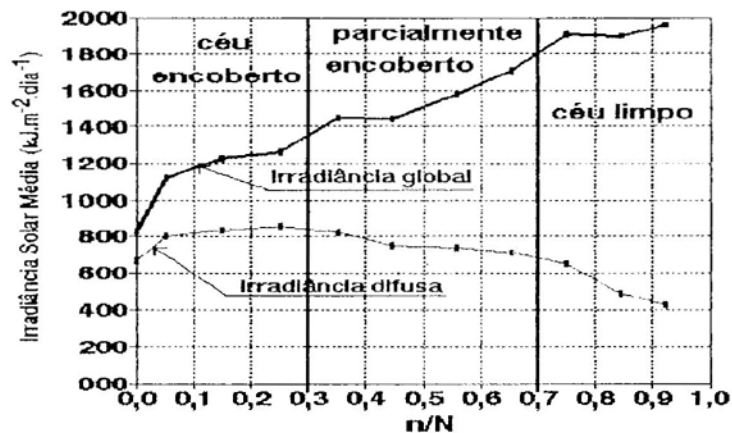


Figura 24 - Valores médios de irradiância global e difusa de acordo com a cobertura de nuvens presentes no céu.

4.5.6. Variação de I_d/I_0 com I/I_0 de acordo com a variação do ângulo de elevação do Sol

A variação de $M_0=I_d/I_0$ com $M_T=I/I_0$, de acordo com o ângulo de elevação do Sol, é outra forma de se caracterizar o grau de cobertura do céu. Na Figura 25, tem-se a variação de M_0 em função de M_T , medidos em Viçosa, para diferentes intervalos de elevação solar. Nessa figura, observa-se que, em condições de céu totalmente encoberto

(M_T aproximadamente menor que 0,35), M_0 aumenta linearmente com M_T , para qualquer ângulo de elevação solar (Figura 25-a a 25-i). Portanto, nessas condições de cobertura de céu, a irradiância solar difusa horária (I_d) independe do ângulo de elevação solar.

Nessa faixa, a irradiância solar direta é praticamente zero. Além dessa faixa de M_T ($M_T > 0,35$ - céu parcialmente encoberto), observa-se que o efeito da elevação solar começa a influenciar sobre a irradiância difusa horária (I_d). Nessas condições de céu, para qualquer ângulo de elevação solar, tem-se que a componente difusa aumenta com o incremento da irradiância global, atinge um valor máximo e, depois, começa a diminuir até um valor mínimo. O valor mínimo de M_T , no qual M_0 é mínimo, é diferente para cada faixa de elevação solar (Figura 25). Após o valor mínimo de M_0 , a próxima faixa de M_T (Figura 25) representa condições de céu limpo. Nessa faixa, M_0 aumenta novamente com M_T e a percentagem da irradiância global, que é difusa, é maior para os maiores ângulos de elevação solar.

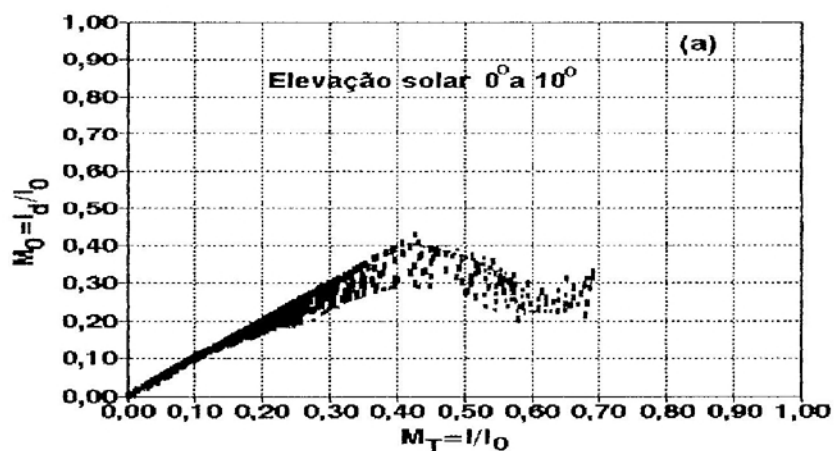


Figura 25 - Variação de $M_0 = I_d/I_0$ em função de $M_T = I/I_0$, de acordo com diferentes intervalos do ângulo de elevação do Sol.

Figura 25, Cont.

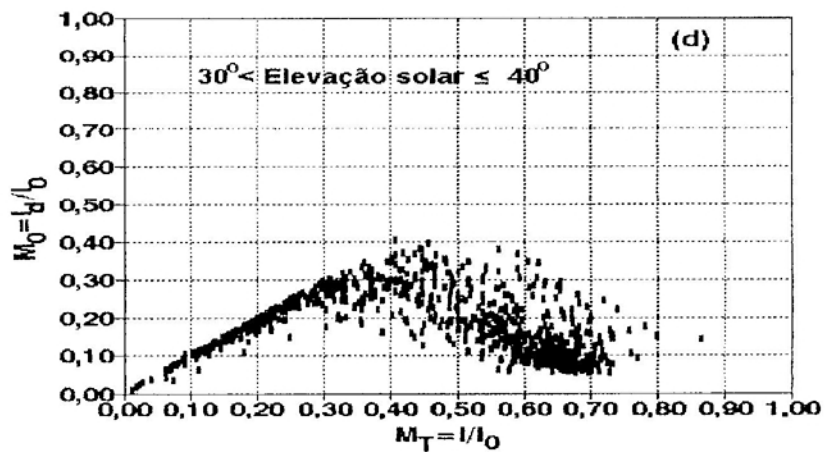
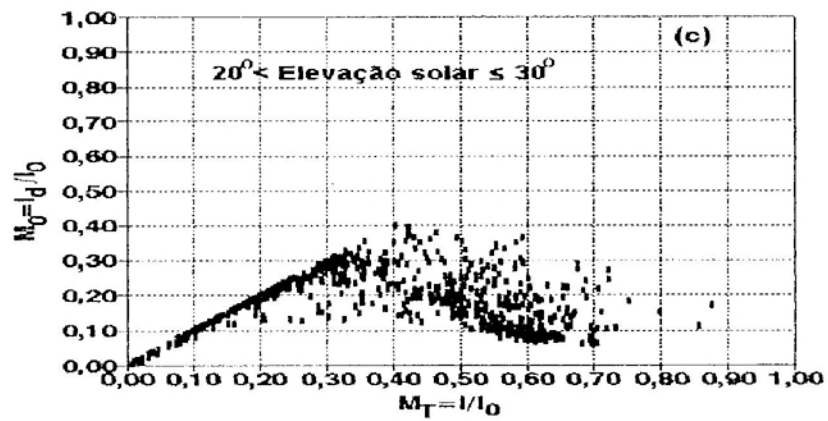
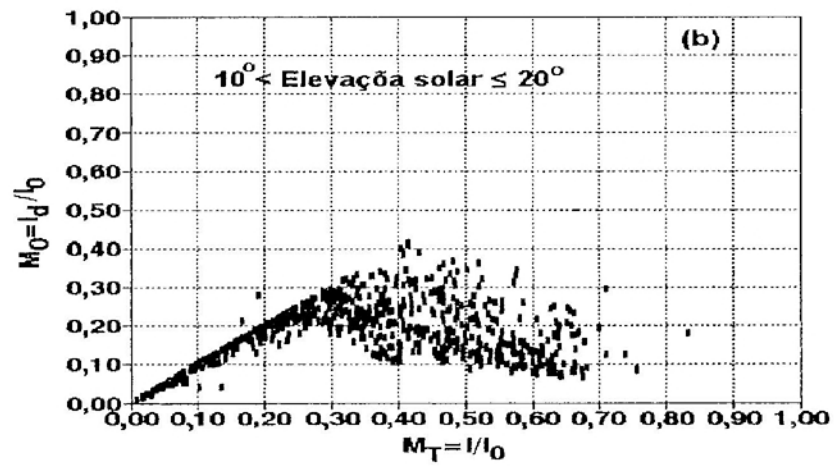


Figura 25, Cont.

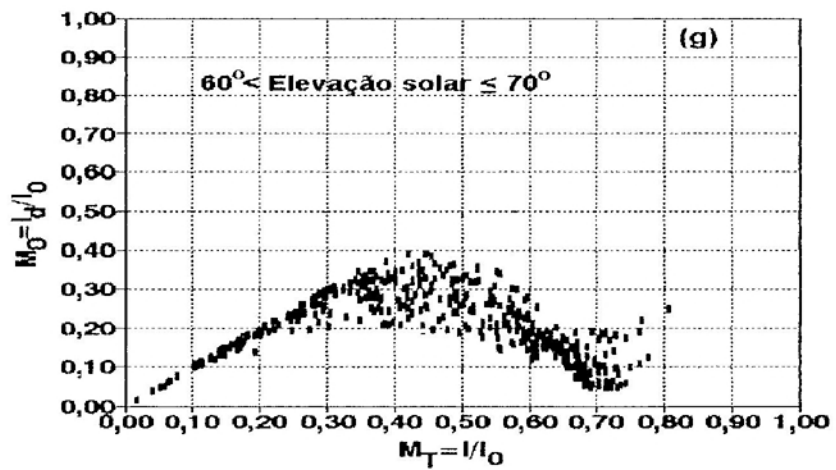
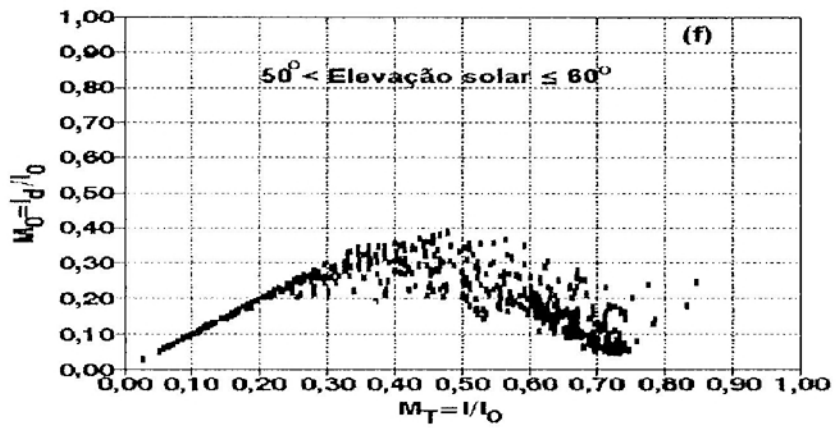
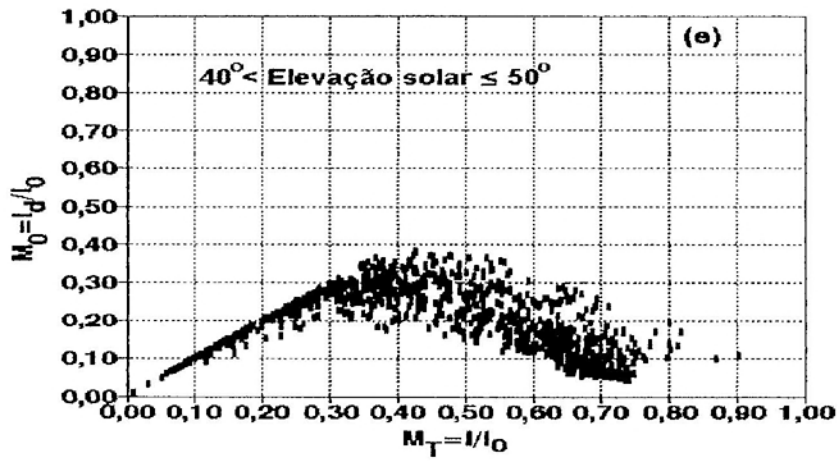
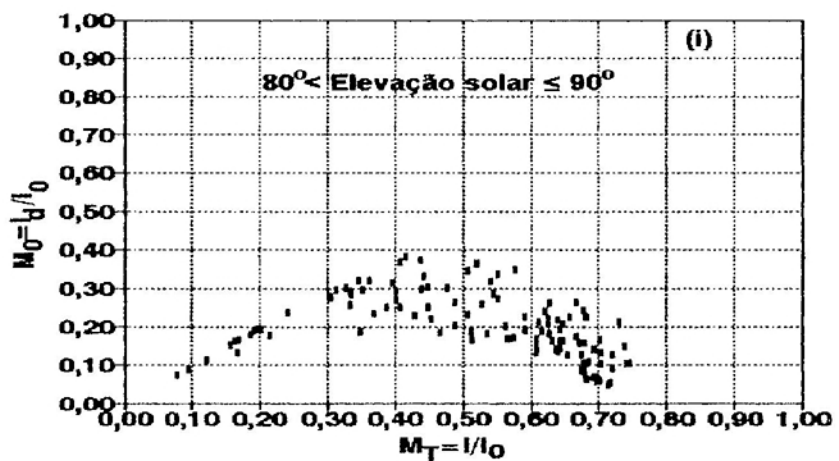
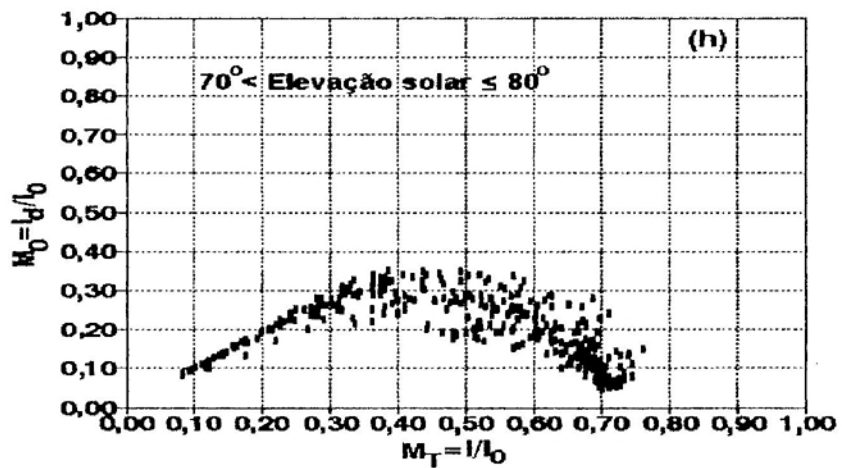


Figura 25, Cont.



5. RESUMO E CONCLUSÕES

Propuseram-se neste trabalho o desenvolvimento e a avaliação de modelos de irradiância solar difusa para Viçosa-MG. Para tanto, utilizou-se uma estação automática de aquisição de dados (da ELE), com sensores fotovoltaicos, para a medição da radiação global e difusa, no período de 10 de julho de 1993 a 30 de novembro de 1994, instalados no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Os sensores fotovoltaicos foram testados, usando-se um piranômetro da Eplley (tipo estrela) como padrão de comparação, que apresentou resultados satisfatórios.

Um modelo de estimação da radiação difusa horária foi proposto para Viçosa, em função da razão I/I_0 , apresentando $r^2=85,74\%$ e $EPE=12\%$. Este modelo foi comparado com outros propostos na literatura, quais sejam o de Orgill e Hollands, o de Erbs et al. e o de Spencer. Em sua forma original, esses modelos apresentaram erros relativamente altos em relação ao modelo proposto. Entretanto, quando ajustado aos dados de Viçosa, o modelo de Orgill e Hollands apresentou $r^2=85,10\%$ e $EPE=13\%$ e o modelo de Erbs et al.,

$r^2=84,16\%$ e $EPE=12\%$, não diferenciando praticamente do modelo proposto.

Com relação à estimação da irradiância difusa diária, propôs-se, também, um modelo para Viçosa, do tipo linear-cúbico, o qual apresentou r^2 igual a $92,60\%$ e EPE de $7,1\%$. Testaram-se os modelos de Collares-Pereira e Rabl e de Ruth e Chant, em sua forma original, para estimação da irradiância difusa diária com os dados de Viçosa. Esses modelos apresentaram valores de r^2 bem próximos do apresentado pelo modelo proposto, porém os erros superaram em mais de 5% os erros do modelo proposto para Viçosa. Quando esses modelos foram ajustados aos dados de Viçosa, seu desempenho foi idêntico ao do modelo proposto para Viçosa.

A razão H_d/H_0 , conhecida como coeficiente de transmissão da irradiância difusa, foi avaliada em função da cobertura do céu, expressa em termos de H/H_0 , o que permitiu caracterizar como céu totalmente encoberto o intervalo de H/H_0 de 0 a $0,25$; como parcialmente encoberto, de $0,25$ a $0,50$; e céu limpo para a condição de H/H_0 maior que $0,50$.

Observou-se, como esperado, uma redução na razão H_d/H com a redução da nebulosidade (aumento da razão de insolação n/N). Entretanto, em termos diários, verificou-se que, na média, H_d praticamente não variou com n/N , para as condições de céu encoberto e parcialmente encoberto, decrescendo suavemente com n/N para condições de céu limpo.

A variação da irradiância difusa com a razão I/I_0 foi também analisada, mostrando aumento praticamente linear da razão I_d/I para condições de céu totalmente encoberto, independentemente da elevação solar, que se mostrou importante para as demais condições de cobertura do céu.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-HAMDANA, N., AL-RIahi, M., TAHIR, K. Estimation of the diffuse fraction of daily and monthly average global radiation for Fudhaliyh-Baghda (Iraq). Solar Energy, v.42, n.1, p.81-85,1989.
- ALVES, A. R. Irradiância solar global em superfícies de diferentes inclinações e azimutes, para Viçosa, MG. 92p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola)- Universidade Federal de Viçosa - UFV, 1981.
- ASSAD, E. D., SANO, E.E. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. CEPAC. Brasília-DF: Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma Agrária, EMBRAPA, CEPAC, 1993. 274p.
- AYOADE, J. O. Introdução à climatologia para os trópicos. São Paulo: DIFEL, 1986.319p.
- AZEVEDO, P. V., VAREJÃO-SILVA, M.A., VARGAS, G. A. O. Zoneamento do potencial de energia solar do nordeste. Campina Grnade,PB: Universidade Federal da Paraíba, 1981. 77p.
- BENNETT, I. Monthly maps of mean daily insolation for United States. Solar Energy, v.9, p.145-158, 1975.
- CAMPS, J., SOLER, M. R. Estimation of diffuse solar irradiance on a horizontal surface for cloudless days. Solar Energy, v.49, n.1, p. 53-63, 1992.

- COLLARES-PEREIRA, M., RABL, A. The average distribution of solar radiation: correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy, v.22, p.154-164, 1979.
- DECICO, A., SANTOS, J. M. Considerações sobre a estimativa do potencial de radiação solar global. Ciência e Cultura, v.32, n.2, p.204-209, 1980.
- 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, n.4, p.293-304, 1982.
- FAIMAN, D., FEVERMANN, D., IBBETSON, P., ZEMEL, A. A multipyranometer instrument for obtaining the solar beam and diffuse components, and the irradiance on inclined planes. Solar Energy. v.48, n.4, p.253-259, 1992.
- GLOVER, J., McCULLOCH, J. S. G. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. Q.J.R.: Meteorological Society. v.84, p.172-175, 1958.
- GOPINATHAN, K. K. A general formula for computing the coefficients of the correlation connecting global solar radiation to sunshine duration. Solar Energy. v.41, n.6, p.499-502, 1988.
- HALACY JR., D. S. Earth, water, wind and sun: our energy alternatives. New York: Haper & Row, 1977, 186p.
- HUSSAIN, M. Correlating beam radiation with sunshine duration. Solar Energy, v.48, n.3, p.145-149, 1992.
- IQBAL, M. Hourly vs daily method of computing isolation on inclined surfaces. Solar Energy. v.21, p.485-489, 1978.
- IQBAL, M. A study of canadian diffuse and total solar radiation data: I monthly average daily horizontal radiation. Solar Energy, v.22, p.81-86, 1979.
- IQBAL, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press. 1983. 390p.
- JAIN, P. C. A model for diffuse and global irradiation on horizontal surfaces. Solar Energy. v.45, n.5, p.301-308, 1990.
- JETER, S. M., BALARAS, C. A. Development of improved solar radiation models for predicting beam transmittance. Solar Energy. v.44, n.3, p.149-156, 1990.

- KUYE, A., JAGTAP, S. S. Analysis of solar radiation data for solar energy. Solar Energy. v.49, n.2, p.139-145, 1992.
- LEWIS, G. Diffuse irradiation over Zimbabwe. Solar Energy. v.31, n.1, p.125-128, 1983.
- LIST, R. J. Smithsonian meteorological tables. 6.ed. Washington, DC: Smithsonian Institution Press, 1971, 527p.
- NIKLAS, M. Energy politics: can we achieve a sustainable energy?. Solar Energy. v.50, n.4, p.287-296, 1993.
- ORGIL, J. F., HOLLANDS, K. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. Solar Energy. v.9, p.357-359, 1977.
- PALTRIDGE, G. W., PLATT, C. M. R. Radiative processes in meteorology and climate. Amsterdam: Elsevier, 317p., 1976.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W.A., DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. Solar Energy. v.45, n.1, p.1-7, 1990.
- 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.
- SINCLAIR, T. R. & SHIRAIWA, T. Soybean radiation-use efficiency as influenced by nonuniform specific leaf nitrogen distribution and diffuse radiation. Crop science. v.33, 808-812p, 1993.
- SPENCER, J. W. A Comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation. Solar Energy. v.29, n.1, p.19-32, 1982.
- SUEHRCKE, H. & McCORMICK, P. G. The diffuse fraction of instantaneous solar radiation. Solar Energy, v.40, n.5, p.423-430, 1988.
- VIANELLO, R. L., ALVES. A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa, MG:UFV, 1991. 449p.