

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**EVOLUÇÕES, FRAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS IRRADIAÇÕES GLOBAL,
DIRETA E DIFUSA EM SUPERFÍCIES INCLINADAS**

ADILSON PACHECO DE SOUZA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU - SP

Junho – 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**EVOLUÇÕES, FRAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS IRRADIAÇÕES GLOBAL,
DIRETA E DIFUSA EM SUPERFÍCIES INCLINADAS**

ADILSON PACHECO DE SOUZA

Orientador: Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu,
para obtenção do título de Mestre em Agronomia
(Irrigação e Drenagem).

BOTUCATU - SP

Junho – 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S729e Souza, Adilson Pacheco de, 1982-
Evoluções, frações e estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas / Adilson Pacheco de Souza . - Botucatu : [s.n.], 2009.
xii, 130 f. : il., color. , gráfs., tabs.

Dissertação(Mestrado)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2009
Orientador: João Francisco Escobedo
Inclui bibliografia

1. Irradiação solar. 2. Modelos de estimativas. 3. Índice de claridade. 4. Razão de insolação. I. Escobedo, João Francisco. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU**

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “EVOLUÇÕES, FRAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS IRRADIAÇÕES GLOBAL,
DIRETA E DIFUSA EM SUPERFÍCIES INCLINADAS”.**

ALUNO: ADILSON PACHECO DE SOUZA

ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO



PROF. DR. DINIVAL MARTINS



DR. ALEXANDRE DAL PAI

Data da Realização: 18 de junho de 2009.

OFEREÇO

A Lindalva Barra da Silva, *minha mãe*, Damicio Pacheco de Souza, *meu pai*,
A Edna Pacheco de Souza e Marcos Antônio de Souza, *minha irmã e meu sobrinho*,
por acreditarem e entenderem todos os momentos de ausência e de
lágrimas ocasionados pelos inúmeros dias distantes do aconchego familiar.

DEDICO

A Andréa Carvalho da Silva, *minha querida esposa e companheira*,
por me apoiar nos momentos felizes e tristes dessa caminhada.

*O que há de mais luminoso do que o Sol? E, entretanto, ele
tem eclipses, mas nunca deixa de contemplar a multidão
dos astros do céu. (Eclo, 17: 30-31)*

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por permitir concluir mais uma etapa de minha pequena formação profissional e pessoal.

A Paulina Maria de Azevedo Silva, Alderico Carvalho da Silva, Wanderson Carvalho da Silva e Janaína Gomes dos Santos, por suas orações e afeto.

A todos os meus avós e avôs, tios, tias, primos e primas, aqueles *in memoriam*, por apoiarem e acreditarem em toda a minha formação.

Ao Professor e Cientista Dr. João Francisco Escobedo, pelo incentivo, amizade e orientação nos diversos momentos da realização desse trabalho.

A Alexandre Dal Pai e Eduardo Nardini Gomes, pela dedicação, estímulo e abertura em transmitir conhecimentos sobre essa área de pesquisa tão fascinante.

A FCA/UNESP e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Irrigação e Drenagem.

Aos amigos e companheiros do Grupo de Pesquisa em Radiação Solar da FCA: Érico Tadao Teramoto, Enzo Dal Pai, Junior Dall'Antonia, Tiago do Nascimento Almeida, Fábio Henrique Pires Corrêa e Douglas Rodrigues.

Aos amigos de pós-graduação: Adriano Dawison, Roselani Araldi, Adriana Tanaka, Thaise Ribeiro, Emi Lorenzetti, Edvar de Sousa, Manoel Euzébio de Souza, José Joaquim, Amansleone Timóteo, Carla Deisiane, Simone Chiavatta, Danila Conceição, Quézia Pereira, José Luiz Siqueira e Nágela Farias pelos momentos de risadas, descontrações provindos da grande e sincera amizade.

Aos professores Daniel Fonseca de Carvalho e Leonardo Batista Duarte da UFRRJ, por permitirem minha iniciação em atividades científicas.

Aos amigos e companheiros da UFRRJ, com especial atenção a: Rayssa Pereira Vincentin, Wellington de Oliveira Aquino, Anelize Müller, Valcimar Andrade, Carlos Magno, Willian Pereira e Márcio Emanuel de Lima, entre tantos, todos os amigos e irmãos do GOU Renascer.

A todos aqueles que direta ou indiretamente ajudaram para que este trabalho fosse concluído, na construção e manutenção da base dados do Laboratório de Radiometria da FCA/UNESP, meus sinceros agradecimentos e que o Senhor Jesus ilumine e recompense todo o empenho disponibilizado.

SUMÁRIO

RESUMO	1
SUMMARY	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1. Radiação Solar	8
2.2. A Radiação solar em terrenos inclinados e a produtividade agrícola.....	9
2.3. Medidas de irradiação solar	10
2.4. Irradiação solar em superfícies inclinadas	14
2.5. Frações das irradiações global, direta e difusa em planos inclinados	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1. Localização e condições climáticas	26
3.2. Instrumentação.....	30
3.3. Base de Dados	32
3.4. Tratamentos dos dados.....	33
3.5. Indicativos estatísticos.....	34
3.6. Relações entre as frações da irradiação global, direta e difusa em superfícies inclinadas	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1. Níveis de irradiação extraterrestre em superfícies horizontais e inclinadas	37
4.2. Níveis da irradiação global em superfícies horizontais e inclinadas	42
4.3. Níveis de irradiação direta em superfícies horizontais e inclinadas	56
4.4. Níveis de irradiação refletida em superfícies inclinadas	61

4.5. Níveis de irradiação difusa em superfícies horizontais e inclinadas	63
4.6. Frações da irradiação global em superfícies inclinadas e horizontais	71
4.7. Frações da irradiação direta em superfícies inclinadas e horizontais	81
4.8. Frações da irradiação difusa em superfícies inclinadas e horizontais	93
4.9. Estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas com base na razão de insolação (Coeficientes de Angström-Prescott)	106
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
6. CONCLUSÕES	120
7. REFERÊNCIAS	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Razão de nebulosidade, precipitação pluviométrica e insolação mensais em Botucatu-SP, entre 1999 e 2005	28
Tabela 02. Características operacionais dos sensores da irradiância global e direta.....	31
Tabela 03. Variáveis meteorológicas, sensores e períodos de observação.....	32
Tabela 04. Disponibilidade total mensal de irradiação global em diferentes superfícies e em ângulos otimizados ao longo do ano.....	55
Tabela 05. Disponibilidade total mensal de irradiação direta em diferentes superfícies e em ângulos otimizados ao longo do ano.....	61
Tabela 06. Evolução dos fatores de correção da irradiação difusa medida em superfícies inclinadas e horizontais pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo	68
Tabela 07. Disponibilidade total mensal de irradiação difusa em diferentes superfícies e em ângulos otimizados ao longo do ano.....	70
Tabela 08. Índices de claridade $\left(\overline{K_T}\right)$ médios mensais para superfícies inclinadas e horizontais	72
Tabela 09. Resultados das validações das relações entre $\left(K_{T\beta}^d\right)$ e $\left(K_{TH}^d\right)$ com agrupamentos mensais e equações anuais.....	75
Tabela 10. Coeficientes angulares e de determinação da regressão linear $K_{T\beta}^d = a_1 \left(K_{TH}^d\right)$	76
Tabela 11. Resultados das validações das relações entre $\left(K_{T\beta}^d\right)$ e $\left(K_{TH}^d\right)$ com agrupamentos mensais e equações mensais	77
Tabela 12. Frações médias mensais da relação entre a irradiação direta e a irradiação global $\left(\overline{K_b}\right)$ para superfícies inclinadas e horizontais	81
Tabela 13. Resultados das validações das relações entre $\left(K_{b\beta}^{'d}\right)$ e $\left(K_{TH}^d\right)$ com agrupamentos mensais e equações anuais.....	89
Tabela 14. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração $\left(K_{b\beta}^{'d}\right)$ em função da fração $\left(K_{TH}^d\right)$, com agrupamentos mensais e coeficientes de determinação, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, com face voltada para o Norte.....	91

Tabela 15. Resultados das validações das relações entre $(K'_{b\beta}{}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações mensais	92
Tabela 16. Frações médias mensais da relação entre a irradiação difusa de referência e a irradiação global $(\overline{K_d})$ para superfícies inclinadas e horizontais	94
Tabela 17. Resultados das validações das relações entre $(K'_{d\beta}{}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações anuais	102
Tabela 18. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração $(K'_{d\beta}{}^d)$ em função da fração (K_{TH}^d) , com agrupamentos mensais e coeficientes de determinação, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte	104
Tabela 19. Resultados das validações das relações entre $(K'_{d\beta}{}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações mensais	105
Tabela 20. Resultados das validações das relações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ com as equações anuais nos agrupamentos sazonais	108
Tabela 21. Equações de estimativas sazonais das frações médias $(K_{T\beta}^d)$ em função de $(n/N)^d$ em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com face voltada para o Norte	109
Tabela 22. Resultados das validações das relações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ com equações e agrupamentos sazonais	110
Tabela 23. Resultados das validações das relações entre $(K'_{b\beta}{}^d)$ e $(n/N)^d$ com equações anuais nos agrupamentos sazonais	112
Tabela 24. Equações de estimativas sazonais das frações médias $(K'_{b\beta}{}^d)$ em função de $(n/N)^d$ em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte	113
Tabela 25. Resultados das validações das relações entre $(K'_{b\beta}{}^d)$ e $(n/N)^d$ com equações e agrupamentos sazonais	114
Tabela 26. Resultados das validações das relações entre $(K'_{d\beta}{}^d)$ e $(n/N)^d$ com equações anuais nos agrupamentos sazonais	116
Tabela 27. Equações de estimativas sazonais das frações médias $(K'_{d\beta}{}^d)$ em função de $(n/N)^d$ em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Radiação direta, difusa e refletida incidente em uma superfície inclinada	15
Figura 02. Ilustração da igualdade entre os ângulos θ_Z e θ_β	17
Figura 03. Número máximo de horas de brilho solar para superfície horizontal e superfícies inclinadas com face exposta ao Norte, em Botucatu-SP (Latitude 22,85° S).....	19
Figura 04. Irradiância global média de 5 minutos em superfícies horizontal e inclinada a 12,85°, no solstício de inverno e de verão, em 2002	25
Figura 05. Evolução anual da temperatura do ar e umidade relativa do ar médias mensais de 35 anos, em Botucatu-SP.....	27
Figura 06. Estação de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais, UNESP, Botucatu – SP	30
Figura 07. Piranômetros para medida da irradiância global e difusa em superfícies inclinadas, com a irradiância difusa sendo medida pelo anel de sombreamento ME.....	31
Figura 08. Evolução anual do fator Rb estimado para superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face voltada para o Norte.....	38
Figura 09. Evolução anual da irradiação solar no topo da atmosfera para superfície horizontal e superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face voltada para o Norte	38
Figura 10. Evolução anual dos desvios relativos considerando a irradiação calculada no topo da atmosfera para superfície horizontal e superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte	41
Figura 11. Evolução anual das médias mensais da irradiação global e do topo da atmosfera diárias na superfície horizontal e na superfície inclinada a 12,85°, com a face voltada para o Norte	42
Figura 12. Evolução anual das médias mensais da irradiação global e do topo da atmosfera diárias na superfície horizontal e na superfície inclinada a 22,85°, com a face voltada para o Norte	44
Figura 13. Evolução anual das médias mensais da irradiação global e do topo da atmosfera diárias na superfície horizontal e na superfície inclinada a 32,85°, com a face voltada para o Norte	45

Figura 14. Evolução anual dos desvios médios mensais das irradiações globais, usando as superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° como referência em relação à superfícies horizontais, para as mesmas épocas de medidas	47
Figura 15. Irradiação global média mensal diária para diferentes períodos de medidas em superfícies horizontais, separados em função dos períodos de medidas em cada inclinação	50
Figura 16. Razões médias mensais entre $(H_{G\beta}^d)$ e (H_{GH}^d)	51
Figura 17. Densidade óptica padrão (AOD) média mensal diária obtida pelo satélite AQUA-MIR, no período de 2000 a 2008.....	53
Figura 18. Evolução anual da irradiação direta medida na incidência e projetada em superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte	57
Figura 19. Evolução anual dos desvios médios mensais das irradiações direta em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° como referência em relação à superfícies horizontais, para as mesmas épocas de medidas	58
Figura 20. Irradiação direta média mensal diária para diferentes períodos de medidas em superfícies horizontais, separados em função dos períodos de medidas em cada inclinação	58
Figura 21. Razões médias mensais entre $(H_{B\beta}^d)$ e (H_{BH}^d)	59
Figura 22. Evolução anual da radiação refletida incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.....	62
Figura 23. Porcentagem da irradiação global referente aos níveis de irradiação refletida incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face para o Norte	63
Figura 24. Evolução anual da irradiação difusa de referência $(\overline{H}_{DR}^d)$ em superfícies horizontais e inclinadas a 12,85°(a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte .	64
Figura 25. Desvios médios mensais da irradiação difusa de referência incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, comparada com os valores médios mensais da irradiação difusa de referência em superfície horizontal.....	66
Figura 26. Razões médias mensais entre $(H_{D\beta}^d)$ e (H_{DH}^d)	67
Figura 27. Evolução dos fatores de correção da irradiação difusa medida em superfícies inclinadas e horizontais pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo	69

Figura 28. Índices de claridade $\left(\overline{K_T}\right)$ médios mensais para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85°, com a face voltada para o Norte	72
Figura 29. Correlações diárias entre os índices de claridade $\left(K_T^d\right)$ de superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face voltada para o Norte e de superfícies horizontais	74
Figura 30. Frequência de distribuição diária dos valores de índice de claridade para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face para o Norte	79
Figura 31. Frações médias mensais $\left(\overline{K_b}\right)$ para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.	82
Figura 32. Frações médias mensais da relação entre a irradiação direta e a irradiação no topo da atmosfera $\left(\overline{K_b}\right)$ para superfícies inclinadas e horizontais.....	84
Figura 33. Correlações entre $\left(K_{b\beta}^{'d}\right)$ de superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° com a face voltada para Norte e $\left(K_{TH}^d\right)$ de superfícies horizontais.....	86
Figura 34. Frações médias mensais $\left(\overline{K_d}\right)$ para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c) com face voltada para o Norte	95
Figura 35. Frações médias mensais da relação entre a irradiação difusa de referência e a irradiação no topo da atmosfera $\left(\overline{K_d}\right)$ para superfícies inclinadas e horizontais	97
Figura 36. Correlações entre $\left(\overline{K_{d\beta}^{'d}}\right)$ e $\left(K_{TH}^d\right)$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte	100
Figura 37. Correlações entre $\left(\overline{K_{T\beta}^{'d}}\right)$ e $\left(n/N\right)^d$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte	106
Figura 38. Correlações entre $\left(\overline{K_{b\beta}^{'d}}\right)$ e $\left(n/N\right)^d$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte. ...	111
Figura 39. Correlações entre $\left(\overline{K_{d\beta}^{'d}}\right)$ e $\left(n/N\right)^d$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte	115

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{sc}	Constante solar instantânea (1367W/m ²)
β	Ângulo de inclinação da superfície
E_0	Fator de correção da excentricidade da órbita da terra (u.a.)
δ	Declinação solar (graus)
ϕ	Latitude local (graus)
ω_s	Ângulo horário solar diário para superfície horizontal (graus)
ω'_s	Ângulo horário solar diário para superfícies inclinadas (graus)
θ_z	Ângulo zenital
DJ	Dia Juliano
Γ	Ângulo diário, em radianos
ρ	Albedo da superfície
R_B	Razão entre a irradiância no topo atmosfera para uma superfície inclinada e de uma superfície horizontal
n	Número de horas de brilho solar (horas)
N	Fotoperíodo (horas)
(n/N)	Razão de Insolação
I_{0H}	Irradiância no topo da atmosfera para uma superfície horizontal (W m ⁻²)
$I_{0\beta}$	Irradiância no topo da atmosfera para uma superfície inclinada (W m ⁻²)
I_{GH}	Irradiância global na superfície horizontal (W m ⁻²)
$I_{G\beta}$	Irradiância global na superfície inclinada (W m ⁻²)
I_{DH}	Irradiância difusa na superfície horizontal (W m ⁻²)
$I_{D\beta}$	Irradiância difusa na superfície inclinada (W m ⁻²)
I_{BN}	Irradiância direta na incidência (W m ⁻²)
I_{BH}	Irradiância direta na superfície horizontal (W m ⁻²)
$I_{B\beta}$	Irradiância direta na superfície inclinada (W m ⁻²)

H_{0H}^d	Irradiação no topo da atmosfera diária para superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{0\beta}^d$	Irradiação no topo da atmosfera diária para superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
H_{GH}^d	Irradiação global diária na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{G\beta}^d$	Irradiação global diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
H_{BH}^d	Irradiação direta diária na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{B\beta}^d$	Irradiação direta diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{D\beta}^d$	Irradiação difusa diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
H_{DRH}^d	Irradiação difusa diária de referência na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{DR\beta}^d$	Irradiação difusa diária de referência na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
H_{DMH}^d	Irradiação difusa diária medida na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{DM\beta}^d$	Irradiação difusa diária medida na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$H_{R\beta}^d$	Irradiação refletida diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
(H_G^d / H_0^d)	Razão entre a irradiação global diária e a irradiação diária no topo da atmosfera
$(\overline{H_{GH}^m})$	Irradiação global média mensal diária na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$(\overline{H_{G\beta}^m})$	Irradiação global média mensal diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$(\overline{H_{BH}^m})$	Irradiação direta média mensal diária na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$(\overline{H_{B\beta}^m})$	Irradiação direta média mensal diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$(\overline{H_{DH}^m})$	Irradiação difusa média mensal diária na superfície horizontal (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$(\overline{H_{D\beta}^m})$	Irradiação difusa média mensal diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
$(\overline{H_{R\beta}^m})$	Irradiação refletida média mensal diária na superfície inclinada (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
(K_T^d)	Fração global da irradiação no topo da atmosfera diária
(K_b^d)	Fração direta da irradiação global diária
(K_d^d)	Fração difusa da irradiação global diária
$(K_b'^d)$	Fração direta da irradiação no topo da atmosfera diária

(K'^d_d)	Fração difusa da irradiação no topo da atmosfera diária
(K^d_{TH})	Índice de claridade diário para superfície horizontal
$(K^d_{T\beta})$	Índice de claridade diário para superfície inclinada
$(\overline{K^m_{TH}})$	Índice de Claridade médio mensal diário para superfície horizontal
$(\overline{K^m_{T\beta}})$	Índice de Claridade médio mensal diário para superfície inclinada
(K^d_{bH})	Fração direta da irradiação global diária para superfície horizontal
$(K^d_{b\beta})$	Fração direta da irradiação global diária para superfície inclinada
$(\overline{K^m_{bH}})$	Fração direta média mensal diária da irradiação global para superfície horizontal
$(\overline{K^m_{b\beta}})$	Fração direta média mensal diária da irradiação global para superfície inclinada
(K^d_{dH})	Fração difusa da irradiação global diária para superfície horizontal
$(K^d_{d\beta})$	Fração difusa da irradiação global diária para superfície inclinada
$(\overline{K^m_{dH}})$	Fração difusa média mensal diária da irradiação global para superfície horizontal
$(\overline{K^m_{d\beta}})$	Fração difusa média mensal diária da irradiação global para superfície inclinada
(K'^d_{bH})	Fração direta da irradiação no topo da atmosfera diária para superfície horizontal
$(K'^d_{b\beta})$	Fração direta da irradiação no topo da atmosfera diária para superfície inclinada
$(\overline{K'^m_{bH}})$	Fração direta média mensal diária da irradiação no topo da atmosfera para superfície horizontal
$(\overline{K'^m_{b\beta}})$	Fração direta média mensal diária da irradiação no topo da atmosfera para superfície inclinada
(K'^d_{dH})	Fração difusa da irradiação no topo da atmosfera diária para superfície horizontal
$(K'^d_{d\beta})$	Fração difusa da irradiação no topo da atmosfera diária para superfície inclinada
$(\overline{K'^m_{dH}})$	Fração difusa média mensal diária da irradiação no topo da atmosfera para superfície horizontal
$(\overline{K'^m_{d\beta}})$	Fração difusa média mensal diária da irradiação no topo da atmosfera para superfície inclinada

EVOLUÇÕES, FRAÇÕES E ESTIMATIVAS DAS RADIAÇÕES GLOBAL, DIRETA E DIFUSA EM SUPERFÍCIES INCLINADAS. Botucatu, 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Autor: ADILSON PACHECO DE SOUZA

Orientador: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

RESUMO

Este trabalho objetivou apresentar a evolução anual das irradiações global ($H_{G\beta}^d$), direta ($H_{B\beta}^d$) e difusa de referência ($H_{DR\beta}^d$) média mensal com medidas diárias incidentes sobre superfícies inclinadas a $12,85^\circ \langle |L| - 10^\circ \rangle$, $22,85^\circ \langle |L| \rangle$ e $32,85^\circ \langle |L| + 10^\circ \rangle$ com a face voltada para o Norte e as estimativas das três irradiações com base em medidas da irradiação global na horizontal e da razão de insolação. O período de dados considerado no estudo foi de 1998 a 2007, com medidas realizadas entre 04/1998 a 08/2001 para a inclinação de $22,85^\circ$; de 09/2001 a 02/2003 para $12,85^\circ$ e de 01/2004 a 12/2007 para a inclinação de $32,85^\circ$. Em todos os períodos de medidas, os valores as tres irradiações foram comparadas com medidas realizadas em superfícies horizontais. Os níveis de $(\overline{H}_{G\beta}^d)$ nos planos inclinados foram inferiores no período de verão e superiores entre os equinócios quando comparados com as superfícies horizontais. Houve uma tendência de aumento da diferença entre $(\overline{H}_{G\beta}^d)$ e $(\overline{H}_{GH}^d)$ com o aumento da intensidade de inclinação. Os picos máximos médios mensais verificados nas inclinações foram de 22,04; 22,64 e 21,82 MJ m⁻² dia⁻¹, ocorridos em setembro, abril e agosto, enquanto que os picos mínimos foram de 16,08; 17,00 e 16,39 MJ m⁻² dia⁻¹ nos meses de maio, junho e janeiro, para as inclinações de $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, $\langle |L| \rangle$ e $\langle |L| + 10^\circ \rangle$, respectivamente. Nas superfícies horizontais nesse período de medidas foram verificados máximos e mínimos de 23,64 e 12,95 MJ m⁻² dia⁻¹, em novembro e junho. As radiações diretas na horizontal foram projetadas nas inclinações e foram obtidos pelo produto entre (H_{bH}^d) e o fator geométrico (R_B). Os valores de $(\overline{H}_{B\beta}^d)$ foram inferiores aos de $(\overline{H}_{BH}^d)$ no verão e superiores no inverno, com diferenças crescentes com o aumento da inclinação. Os valores máximos de $(\overline{H}_{B\beta}^d)$ foram

encontrados em abril ($16,71 \text{ MJ m}^{-2}$) na inclinação de $12,85^\circ$ e os mínimos em janeiro ($6,95 \text{ MJ m}^{-2}$) na inclinação de $32,85^\circ$. As irradiações refletidas que atingem as superfícies inclinadas equivaleram a 0,284%; 0,947% e 1,975% da irradiação global incidente nas inclinações de $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, respectivamente. Em grande parte dos meses os níveis de $\left(\overline{H}_{DR\beta}^d\right)$ foram inferiores aos valores verificados em superfícies horizontais, contudo, foi proposta a aplicação de fatores de correção numéricos mensais para correção da irradiação difusa medida com anel de sombreamento Melo-Escobedo em superfícies inclinadas. Os valores médios mensais dos índices de claridade (K_T) foram superiores nas superfícies inclinadas quando comparadas com as superfícies horizontais, nos meses de primavera e verão e inferiores nos meses de outono e inverno. Com base nesses índices foram propostas correlações de $(K_{T\beta})$ e (K_{TH}) para estimativa de $(H_{G\beta}^d)$ com base em medidas na horizontal. Independentemente dos ângulos de inclinação estudados foram verificados maiores valores de (K_b) médios mensais nas superfícies inclinadas, principalmente no mês de junho, com valores superiores a 70% de $(H_{b\beta}^d)$ incidido, quando comparado com a horizontal. Os valores das frações $\left(\overline{K'_{dH}}\right)$ foram superiores aos valores das frações $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$, no período de inverno, com maiores diferenças nos maiores ângulos de inclinação. Na avaliação da performance das equações de estimativa diária e mensal de $(K_{T\beta})$, $(K'_{b\beta})$ e $(K'_{d\beta})$ foram empregados os indicadores estatísticos *MBE*, *RMSE* e “d”, que demonstraram bons ajustes nas estimativas, independentemente da inclinação estudada, para análises nas escalas anual e mensal, para as estimativas com base no índice de claridade e na razão de insolação.

Palavras chaves: Superfície horizontal, superfícies inclinadas, irradiação solar, modelos de estimativa, índice de claridade, razão de insolação.

EVOLUTIONS, FRACTIONS AND ESTIMATES OF THE DIFFUSE, BEAM, AND GLOBAL RADIATIONS IN TILTED SURFACES. Botucatu, 2009. 130p. Dissertation (Master in Agronomy/Irrigation and Drainage) – Faculty of Agronomic Sciences, State University of São Paulo.

Author: ADILSON PACHECO DE SOUZA

Adviser: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

SUMMARY

This work planned to present the annual evolution of the diffuse reference, beam, and global irradiances of monthly medium with daily measures incidents about surfaces inclined to $12,85^\circ$ $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, $22,85^\circ$ $\langle |L| \rangle$ e $32,85^\circ$ $\langle |L| + 10^\circ \rangle$ with facing the North and the estimates of the three irradiances on the basis of measures of the global irradiation in the horizontal one and of the reason of sunshine. The period of facts considered in the study was of 1998 to 2007, with measures carried out between 04/1998 to 08/2001 for the inclination of $22,85^\circ$; of 09/2001 to 02/2003 for $12,85^\circ$ and of 01/2004 to 12/2007 for the inclination of $32,85^\circ$. In all of the periods of measures, the values the three irradiances were compared with measures carried out in horizontal surfaces. The levels of $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ in the planes tilts were lower in the period of summer and superiors between the equinoxes when compared with the horizontal surfaces. Had a tendency of increase of the difference between $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ and $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ increase with of the intensity of inclination. The monthly medium maximum peaks verified in the inclinations were of 22,04; 22,64 e 21,82 MJ m⁻², they occurred in september, april and august, whereas the most minimum peaks were of 16,08; 17,00 e 16,39 MJ m⁻² in the months of may, june and january, for the inclinations of L-10°, L and L+10°, respectively. In the horizontal surfaces in that period of measures were verified maximum and minimum of 23,64 e 12,95 MJ m⁻², in november and june. The direct radiations in the horizontal one were projected in the inclinations and were obtained by the product between $\left(H_{bH}^d\right)$ and the geometrical factor (R_B) . The values of $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ were lower to $\left(\overline{H}_{BH}^d\right)$ of the in the summer and superiors in the winter, with growing differences with the increase of

the inclination. The maximum values of were found in april ($16,71 \text{ MJ m}^{-2}$) in the inclination of 12.85° and the minimums in january ($6,95 \text{ MJ m}^{-2}$) in the inclination of $32,85^\circ$. The reflected irradiation that reach the surfaces slanted equalled to 0,284%; 0.947% and 1.975% of the global irradiation incident in the inclinations of $12,85^\circ$, 22.85° and $32,85^\circ$, respectively. To a great extent of the months the values of $\left(\overline{H_{DR\beta}^d}\right)$ were lower to the values verified in horizontal surfaces, however, were proposition the correction factors with application monthly for correction of the diffuse irradiation measure with shadowring of Melo-Escobedo in surfaces tilted. The monthly medium values of clearness index (K_T) were superiors in the surfaces tilted when compared with the horizontal surfaces, us months of spring and summer and lower in the months of autumnal and winter. On the basis of those index were proposals correlation of $(K_{T\beta})$ and (K_{TH}) for estimate of on the basis of measures in the horizontal. Independently of the angles of inclination studied were verified bigger values medium monthly of (K_b) in the surfaces tilted, mainly in june, with values over 70% of $(H_{b\beta}^d)$ reflected, when compared with the horizontal. The values of the fractions $\left(\overline{K_{dH}'}\right)$ were over the values of the fractions $\left(\overline{K_{d\beta}'}\right)$, in the period of winter, with the development of the intensity of inclination. In the evaluation of the performance of the equations of monthly and daily estimate of $(K_{T\beta})$, $(K_{b\beta}^{'d})$ and $(K_{d\beta}^{'d})$ were employees the indicative statisticians *MBE*, *RMSE* and "d of the Willmott", that showed good settlements in the estimates, independently of the inclination studied, for analyses in the monthly and annual scales, for the estimates on the basis of clearness index and in the reason of sunshine.

Keywords: Horizontal surface, tilted surfaces, solar irradiation, estimative models, clearness index, reason sunshine.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar e os fluxos de calor na camada atmosférica e na superfície do solo geram vários fatores ambientais que definem o clima global, regional e local, influenciando todas as fases de desenvolvimento das plantas. Trabalhos de pesquisa por meio dos quais se podem estimar o potencial de radiação solar disponível à superfície da Terra são plenamente justificados, em razão da sua real importância para a execução de projetos de irrigação, produção agrícola, aproveitamento de energia, conservação de alimentos, entre outros.

Os estudos econômicos de tecnologias de conversão energética dependem diretamente dos equipamentos, dos custos de operação, da porcentagem de radiação solar que pode ser convertida em algum tipo de energia disponível para utilização e da disponibilidade instantânea da radiação solar. Os usuários dessas tecnologias requerem dados com elevada qualidade e confiabilidade. Se a radiação solar disponível em certa localidade é menor que a estimada, o desempenho dos sistemas será deficiente e as metas econômicas não serão alcançadas. Todavia, se ocorrer o inverso, os sistemas poderão estar sendo subutilizados.

O conhecimento da irradiação solar sobre diferentes superfícies é requerido em uma grande variedade de aplicações, principalmente no setor agrícola. Quantitativamente, a radiação solar que incide sobre superfícies inclinadas em relação à superfície horizontal, com diferentes ângulos de inclinação e ângulo azimutal arbitrário, podem ser aplicados em projetos de engenharia para coletores solares, projetos de arquitetura

(conforto térmico), planejamento urbano, estudos agronômicos de insolação sobre vegetação (interligados às propriedades física e fisiológica das culturas) e em estudos micrometeorológicos sobre circulação local.

Para Dubayah e Rich (1995), a topografia é um fator muito importante para determinar a quantidade de energia solar incidente em um local na superfície terrestre, pois a variabilidade de altitude, inclinação (declividade), orientação (azimute) e sombreamento podem afetar direta ou indiretamente os níveis energéticos disponíveis, que por sua vez, interferem nos processos biofísicos de aquecimento do ar e do solo, além dos processos fisiológicos de produção.

O Brasil, país com grande potencial agrícola e florestal, atualmente encontra-se em pleno desenvolvimento tecnológico na área das fontes renováveis de energia como: conversão fototérmica e fotovoltaica, biomassa e biodiesel, entre outras. No entanto, entraves como a ausência de uma rede solarimétrica que permita gerar informações sobre radiações solares em toda extensão continental ainda são evidentes. Pois os monitoramentos e medições são restritos às Universidades (Souza et al., 2005; Tiba et al., 2005) e realizados com apenas uma ou duas das partições da radiação solar, inviabilizando assim o estudo variacional das radiações, até mesmo para uma única região.

Dessa forma, um conhecimento mais completo da incidência diferenciada da radiação solar sobre as várias partes de uma superfície topográfica natural pode fornecer aos profissionais da agricultura subsídios para uma melhor localização das culturas, visto que a demanda energética no processo fotossintético é variável para cada tipo de planta.

As medidas de irradiação global na superfície horizontal, em valores horários ou diários são feitas em várias localidades. O mesmo não ocorre para as medidas da irradiação global em uma superfície inclinada. No entanto, essas avaliações em superfícies inclinadas são de fundamental importância na estimativa da radiação absorvida por superfícies topográficas com inclinação natural, ou superfícies com inclinação forçadas, como é o caso de aquecedores solares.

Qualquer aplicação que pretenda desenvolver algum tipo de uso da energia solar deve começar com o estudo das radiações disponíveis na região selecionada e em

inclinações fixadas. Para Scola et al. (2003), estudos das intensidades e variações sazonais em superfícies inclinadas necessitam de medidas por um período mínimo de um ano.

No comportamento de uma cultura com relação ao clima, procura-se determinar quais as funções biológicas responsáveis pelo seu desenvolvimento, e que estão diretamente ligadas com os diferentes parâmetros meteorológicos expressos pela radiação solar, insolação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação (PEREIRA et al., 1997). A interação desses parâmetros com a cultura e o solo estimula a evapotranspiração que é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas. A disponibilidade de energia depende do local, da época do ano e de condições locais do terreno como a face de exposição ao movimento solar e da declividade.

Neste sentido, o presente trabalho objetivou: 1) Determinar as evoluções anuais das irradiações global, difusa e direta média mensal com base em medidas diárias incidentes sobre superfícies inclinadas com exposição ao Norte, para três inclinações: $1212,85^\circ \langle |L| - 10^\circ \rangle$, $22,85^\circ \langle |L| \rangle$ e $32,85^\circ \langle |L| + 10^\circ \rangle$ comparadas à incidência em superfície horizontal; 2) Determinar os índices radiométricos (frações) das três irradiações médias mensais diárias e suas correlações para as três inclinações; e 3) Analisar os coeficientes de Angström-Prescott para as três inclinações.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Radiação Solar

O Sol é a principal fonte de energia disponível aos processos naturais ocorrentes na superfície terrestre. A produção de energia pelo Sol é um fator considerado praticamente constante na escala de tempo terrestre, entretanto a energia que alcança a superfície do solo varia sazonalmente, permitindo assim que um mesmo local receba durante o ano quantidades diferentes de energia solar (Ometto, 1981).

Dal Pai (2005 apud COLSON, 1973), cita que o Sol é uma esfera gasosa, com temperatura de 6000 K na superfície da fotosfera, 1×10^6 K na coroa e 1×10^7 K em seu interior que promove a conversão de hidrogênio em hélio. Essa conversão resulta na emissão de cerca de $62 \times 10^3 \text{ kW m}^{-2}$ e, desta energia, apenas 1367 W m^{-2} atinge o topo da atmosfera terrestre, valor este conhecido como constante solar (I_{sc}).

Os fluxos de energia incidentes no topo da atmosfera terrestre apresentam pouca oscilação ao longo do tempo. Entretanto, quando integrados em somas diárias podem variar em função da latitude do local, da declinação solar e do ângulo horário. Esses fatores são dependentes dos movimentos de rotação e translação da Terra e permitem a um local receber raios solares com inclinação diferenciada ao longo do dia.

Essa quantidade de radiação solar que chega ao topo da atmosfera é igual para os locais com latitudes semelhantes, entretanto, ainda pode sofrer variação

conforme a inclinação da superfície receptora.

A radiação solar global, ao atravessar a atmosfera, sofre atenuação pelos fenômenos da reflexão, absorção e difusão. Tais processos se verificam quando os raios de luz colidem com os gases constituintes da atmosfera, com as nuvens e/ou com partículas em suspensão momentaneamente presentes na atmosfera. A reflexão é causada pelas nuvens, enquanto que a absorção é realizada por gases como vapor d'água, gás carbônico, ozônio, etc. O espalhamento (difusão) pode ser seletivo, quando realizado por partículas com as mesmas dimensões que o comprimento de onda incidente (principalmente nos menores comprimentos de onda do espectro solar) e não seletivo causado por partículas em suspensão (nuvens e aerossóis).

Esses fenômenos não são suficientes para reter todo o espectro da radiação solar. Uma parte da radiação solar atravessa a atmosfera sem qualquer interação, alcançando a superfície do solo, sendo denominada radiação direta. Algumas parcelas da radiação que foram difundidas na interação com a atmosfera, podem incidir posteriormente na superfície, recebendo o nome de radiação difusa. Esses dois fluxos de radiação (direta e difusa) chegam à superfície concomitantemente e representam o total de radiação solar que atinge uma superfície, sendo denominada de radiação solar global.

Ometto (1981) cita que para a cidade de Piracicaba-SP, percentualmente a absorção, a incidência direta e a difusão da radiação solar pela atmosfera compreendem 23%, 25% e 26%, respectivamente, sendo esta distribuição tomada em função dos valores médios da latitude, declinação solar, ângulo horário e turbidez atmosférica. E considera que a grande importância do conhecimento da radiação solar difusa encontra-se na possibilidade da determinação da radiação solar em superfícies com diferentes inclinações, exposições e orientações.

2.2. A Radiação solar em terrenos inclinados e a produtividade agrícola

Não é recente o interesse pelo estudo da influência do relevo e da exposição dos terrenos aos raios solares sobre o desenvolvimento das culturas agrícolas. Pioneiramente, Cottle (1932) citado por Aragon e Toledo Piza (1992), apresentaram resultados

datados de 1895 com estudos sobre a vegetação montanhosa do Texas. Esses autores assinalaram diferenças marcantes entre as espécies encontradas em terrenos com exposições norte e sul. E ainda concluíram que um dos fatores que mais afetaram o tipo de vegetação foi a exposição aos raios solares, que por conseguinte, alterou a temperatura e a quantidade de água disponível no solo.

No Brasil, Lopes (1973) e Latanze (1973) estudaram a influência da radiação solar incidente nas culturas de sorgo e feijão submetidas à rampas com diferentes declividades e orientações e verificaram a grande importância desse fator na produção destas culturas. Benincasa (1976) avaliou a influência das diferentes condições de radiação em rampas submetidas a cinco declividades e duas exposições na cultura do sorgo, usando o conceito de “bacia hidrográfica experimental”. Concluiu posteriormente que a produtividade e a distribuição de matéria seca foram afetadas pela disponibilidade de radiação solar.

Lopez (1986) analisou o comportamento da forrageira *Cynodon dactylon* (L.) Pers. Cv. Coastcross I em rampas semelhantes às utilizadas por Benincasa (1976), incluindo ainda uma rampa horizontal. Esse autor estabeleceu correlações significativas entre a produção de massa verde e matéria seca com a radiação solar incidente nas diferentes condições de exposição e declividades.

Turco et al., (1997) em Jaboticabal-SP, verificaram que áreas com exposição norte e declividade de 20%, foram mais satisfatórias para a exploração da soja no período de inverno. Em contrapartida, a ocorrência de geadas foi maior nas superfícies localizadas com exposição sul e declividade de 20%, pela incidência de menor radiação solar.

2.3. Medidas de irradiação solar

As medidas dos fluxos de radiação solar são normalmente tomadas no plano horizontal e disponibilizadas em valores médios diários ou horários. Todavia, são importantes duas definições quanto a estas medições.

A densidade de fluxo ou irradiância representa a taxa de energia radiante que incide em uma superfície, por unidade de área. Podem ser consideradas como medições instantâneas dos níveis energéticos recebidos pela superfície, visto que a cada

segundo chega ao plano desejado uma densidade de fluxo, variável ao longo do dia. No Sistema Internacional, a unidade de medida da irradiância é o W m^{-2} , possuindo equivalência com $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$.

Quando as densidades de fluxo incidentes por unidade de área, numa superfície, são integradas num intervalo de tempo (geralmente hora ou dia) recebem o nome de irradiação, com unidades iguais a Wh m^{-2} ou J m^{-2} . Nessas unidades podem ser empregados, conforme a recomendação do Sistema Internacional, os múltiplos e submúltiplos em potências de 10^3 , de cada uma das unidades (...G, M, k, m, μ , η ...). O resultado da integração, tanto ao longo da hora como do dia, permite a realização de vários estudos quanto ao comportamento das variações da irradiação.

A energia radiante total mensal vem sendo muito utilizada nos cálculos ou simulações dos comportamentos de alguns equipamentos solares e modelos de estimativa de desenvolvimento vegetal. Todavia, seu emprego em longos períodos de tempo pode conduzir a erros devido a não linearidade no desenvolvimento dos processos. Porém, análises médias mensais permitem a verificação da evolução do comportamento das partições da radiação solar ao longo do ano.

Os instrumentos de medida da radiação solar são basicamente de dois tipos. Os piranômetros medem a radiação global (difusa + direta), enquanto que os pireliômetros medem apenas a radiação direta. No caso de medidas da componente difusa da radiação, existe a necessidade dos piranômetros serem posicionados sob sistemas de interceptação da radiação direta.

Habitualmente, os piranômetros apresentam como elemento de captação da radiação, um sensor do tipo termopilha. Esse sensor mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, geralmente com colorações preta e branca e igualmente iluminadas (TIBA et al., 2001; DIAS, 2007). A grande vantagem desse tipo de sensor é a sua resposta uniforme em relação ao comprimento de onda incidente. Também são muito usados, para medições piranométricas, instrumentos com sensores de fotocélulas de silício monocromático. Seus custos são em torno de 20% superiores aos dos instrumentos que usam termopilhas. A maior limitação é a não uniformidade da resposta espectral e a região relativamente limitada de comprimento de onda ($0,40 \mu\text{m}$ a $1,1 \mu\text{m}$ com máximo em torno dos $0,90 \mu\text{m}$), na qual a fotocélula é sensível (TIBA et al., 2001).

A radiação solar direta pode ser medida diretamente através de um pireliômetro, conjuntamente com um mecanismo que acompanha o movimento aparente do Sol. Normalmente possui um sensor de radiação instalado na base de um tubo colimador, que isola a componente da luz na incidência normal eliminando as radiações difusa e refletida, todavia, este tubo colimador deverá sempre estar alinhado na direção do sol. As medidas da radiação direta são onerosas devido ao custo de aquisição e manutenção do equipamento (OLIVEIRA, 2001; GOMES, 2006a).

Na literatura, são apresentados dois métodos para medir a radiação solar difusa em superfícies horizontais. No método da diferença utiliza-se um piranômetro para medir a irradiância global e, simultaneamente, um pireliômetro acoplado a um rastreador solar para medir a irradiância direta na incidência (I_{BN}). Dessa forma, a irradiância difusa é obtida instantaneamente, pela diferença entre as componentes global e direta projetadas na horizontal.

O outro método encontrado se baseia no sombreamento de um piranômetro por meio de um pequeno disco que rastreia o movimento relativo do Sol ou por meio de um anel de sombreamento. No método do disco de sombreamento, o piranômetro posicionado no plano horizontal é sombreado por um disco móvel que bloqueia a radiação direta, permitindo somente a incidência da radiação difusa. O método do disco envolve um mecanismo de rastreamento solar similar aos usados nos pireliômetros, o que eleva o custo de aquisição e manutenção do sistema em medidas de rotina (DAL PAI, 2005).

No sombreamento pelo anel, podem ocorrer três formas diferentes de colocação do mesmo na plataforma de observação. Em duas condições, o anel, com seu eixo principal alinhado na direção Norte-Sul é inclinado para o Norte com ângulo igual a latitude local. Em uma destas possibilidades, o piranômetro anel é mantido fixo e o anel de sombreamento translada paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar, enquanto que, no outro caso, o piranômetro é móvel e possui liberdade de movimento paralelo ao eixo polar da Terra com o anel de sombreamento fixo (EPPLEY, 1964; MELO, 1994). Na terceira possibilidade, o anel de sombreamento possui liberdade de movimento rotacional, com seu centro comum ao sensor do piranômetro sob o anel (ROBINSON e STOCH, 1964).

Nestes casos, o anel intercepta a radiação solar direta e a variação da declinação solar é acompanhada pelo deslocamento de translação periódico do anel ou do piranômetro, sem a necessidade do rastreamento solar, exigindo apenas correções mecânicas diárias. No entanto, parte da radiação difusa também é bloqueada pelo anel, levando a necessidade do uso de fatores de correção, como os propostos por Drummond (1956), LeBaron et al., (1980), Ashjace et al., (1993), Melo (1994), Jacovides et al., (1996), Oliveira et al., (2002) e Dal Pai (2005), entre outros.

Segundo Ricieri (1998), os métodos que utilizam sistema de acompanhamento do movimento relativo do sol (método da diferença e disco) são considerados mais precisos devido à variação da massa ótica não interferir significativamente nas medidas, mas apresentam limitações das suas utilizações em função dos custos de aquisição e manutenção.

O sombreamento do piranômetro por anel é amplamente aceito por pesquisadores e sua elaboração é de baixo custo, motivo pela qual esta metodologia vem sendo a mais usada (ESCOBEDO et al., 1997). Os modelos de estimativa da radiação solar difusa merecem destaque especial em virtude da dificuldade das estações meteorológicas em medir esta componente (DAL PAI, 2001).

Burek et al., (1988) buscaram melhorar os resultados nas medidas de radiação difusa em superfícies horizontal e inclinada construindo uma plataforma equipada com anel de sombreamento e piranômetro. Estes autores desenvolveram uma expressão numérica para corrigir a radiação difusa, em função da latitude local, da declinação solar, do ângulo de inclinação do sensor, das dimensões do anel e do albedo da superfície local. Compararam os fatores de correção encontrados no plano horizontal, com os de Drummond (1956) e concluíram que se faz necessário considerar o albedo da superfície local, as reflexões por estruturas próximas ao piranômetro e suas aplicações para superfícies inclinadas.

Kondratyev & Manolova (1960) enfocam a necessidade de se estudar principalmente as componentes difusa e refletida da radiação em rampas com várias inclinações e exposições. Ao analisarem medidas feitas em diversas situações, concluíram que no período diurno há pouca variação destas componentes independentemente da inclinação da rampa. Afirmaram ainda que a orientação da rampa tem pouca influência na variação da radiação global quando a inclinação não supera 10°, entretanto, nas inclinações superiores a

este valor, o total da radiação pode ser grandemente alterado tanto pela orientação quanto pela inclinação.

As series temporal e espacial das componentes da radiação global permitem conhecer a disponibilidade energética diurna, mensal e anual, entretanto, exigem medidas simultâneas de rotina em vários locais e condições.

Por conseguinte, nos últimos anos foram desenvolvidas muitas equações de estimativa em função da radiação global para as condições brasileiras (Aragon e Toledo Piza, 1991; Pereira et al., 1998; Pereira et al., 2002; Escobedo et al., 2006) entre outros, demonstrando serem os meios mais simplificados na observação das tendências de variação, pois a radiação global é considerada como uma medida de rotina na maioria das estações meteorológicas distribuídas no país.

Todavia, esses estudos são direcionados para as condições de superfícies planas ou horizontais. Quanto às predições de equações em superfícies inclinadas no Brasil, alguns trabalhos já foram desenvolvidos, em Viçosa-MG (Alves, 1984), Jaboticabal-SP (Aragon e Toledo Piza, 1992) e em Botucatu-SP (Scolar et al., 2003).

2.4. Irradiação solar em superfícies inclinadas

Segundo Iqbal (1983) e Scolar (2004) a irradiação total ou global diária ($H_{G\beta}^d$) que incide em uma superfície inclinada, com um ângulo β de inclinação em relação à superfície horizontal, é dada pela soma das irradiações direta ($H_{B\beta}^d$), difusa ($H_{D\beta}^d$) e a refletida pelo solo $H_{R\beta}^d$, conforme Figura 01.

$$H_{GT}^d = H_{B\beta}^d + H_{D\beta}^d + H_{R\beta}^d \quad (01)$$

Segundo Alves et al. (1983), o ângulo de incidência dos raios solares diretos sobre uma superfície inclinada é o ângulo formado entre esses raios e a normal à superfície.

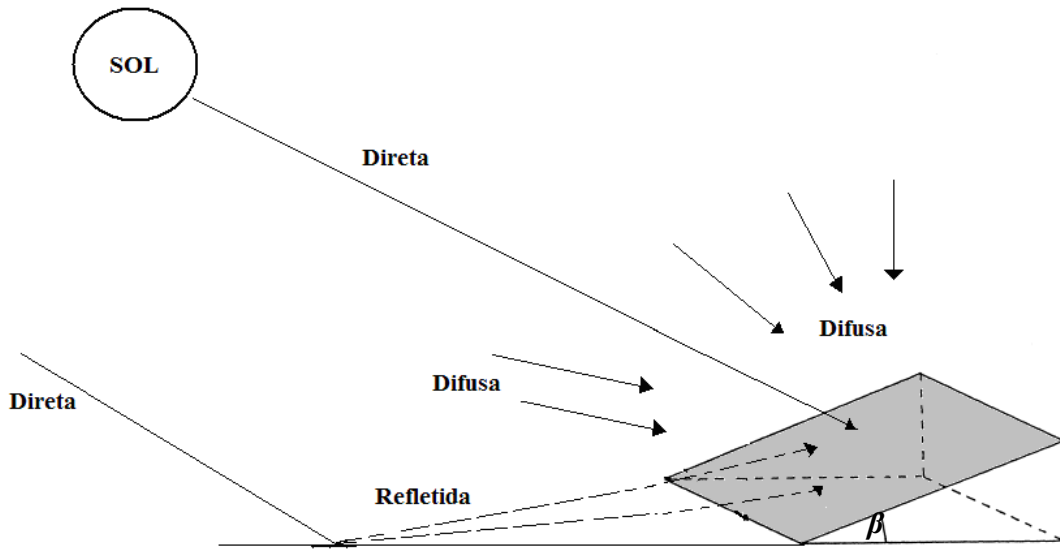


Figura 01. Radiação direta, difusa e refletida incidente em uma superfície inclinada.

A radiação incidente no topo da atmosfera para uma superfície horizontal (H_{oH}^d) pode ser estimada pela equação 02. Segundo Vianello e Alves (2004), a latitude local e o tempo são os dois fatores que fazem a radiação no topo da atmosfera variar.

$$H_{oH}^d = \left(\frac{24}{\pi} \right) H_{sc} E_0 \left[\left(\frac{\pi}{180} \right) \omega_s (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s) \right] \quad (02)$$

em que: H_{sc} é conhecida como a constante solar horária, com valor igual a $4921 \text{ KJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; E_0 é o fator de correção da excentricidade da Terra; ϕ é a latitude do local; δ é a declinação solar, dada em graus, pela equação 03 e ω_s é o ângulo horário solar diário dado por:

$$\delta = 23,45 \sin \left[\left(\frac{360}{365} \right) \times (DJ + 284) \right] \quad (03)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (04)$$

Durante um dia (24 horas) a variação máxima da declinação (que acontece nos equinócios) é menor que $0,5^\circ$, portanto, pode ser considerada constante ao longo do dia. O ângulo horário, por sua vez, é formado pelo ângulo (medido no pólo celeste) entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol, valendo 0° ao meio-dia (Tempo Solar Verdadeiro) e desde aí, muda 15° por hora. Para valores diários se torna dependente apenas da latitude e da declinação solar.

O plano que contém a órbita terrestre é chamado de *eclíptica* e o tempo que a Terra leva para percorrê-la é um ano. A excentricidade desta órbita é tal que a distância entre o Sol e a Terra varia 1,7% ao longo do ano. Tal excentricidade é a razão entre a distância de um dos focos ao centro da elipse (eclíptica) e o comprimento da metade do eixo maior dessa elipse. Contudo, o fator de correção da excentricidade da órbita da terra (E_0) diário pode ser obtido através da equação proposta por Spencer (1971), que apresenta um erro máximo de 0,0001:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \sin \Gamma + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \sin 2\Gamma \quad (05)$$

Sendo: $\Gamma = 2\pi \frac{(DJ - 1)}{366}$

Iqbal (1983) apresentou um tratamento específico para estimativa da irradiação incidente no topo da atmosfera para uma superfície inclinada ($H_{o\beta}^d$), com a face voltada para o Equador. Neste caso, a irradiância direta que incide nessa superfície no topo da atmosfera é totalmente dependente do ângulo β de inclinação da superfície, em relação à superfície horizontal e do ângulo de incidência, θ_β , dos raios solares nessa superfície, conforme a Figura 02 (no Hemisfério Sul). O ângulo de incidência dos raios solares na latitude ϕ onde está localizada a superfície inclinada com um ângulo β , é igual ao ângulo de incidência dos raios solares na superfície horizontal localizada na latitude $\phi + \beta$ (Scolar, 2004).

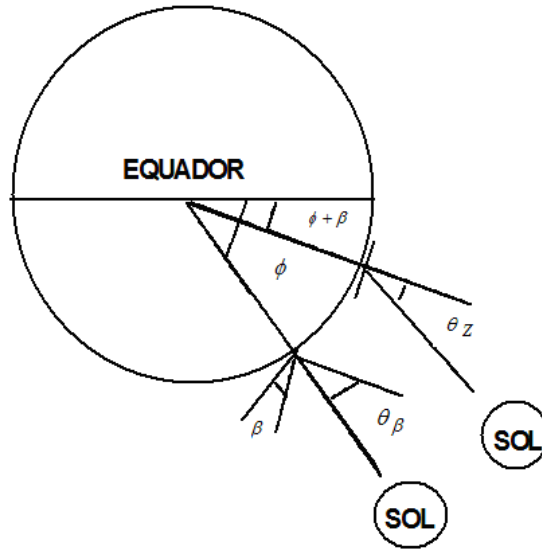


Figura 02. Ilustração da igualdade entre os ângulos θ_Z e θ_β . Adaptado de Iqbal (1983).

Dessa maneira, a equação que estima os níveis de irradiação diária que incide em uma superfície inclinada no topo da atmosfera, é a mesma utilizada para calcular a irradiância que incide em uma superfície horizontal, modificada apenas pelo ângulo relativo à superfície inclinada (β).

$$H_{\phi\beta}^d = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s (\sin \delta \sin(\phi - \beta)) + (\cos \delta \cos(\phi - \beta) \sin \omega'_s) \right] \quad (06)$$

Neste caso, as únicas diferenciações devem ser observadas no fato de que a diferença $(\phi - \beta)$ é aplicada nas regiões situadas no Hemisfério Norte, enquanto que no Hemisfério Sul, quando a face da superfície inclinada estiver voltada para o Norte, temos a relação modificada para $(\phi + \beta)$.

Porém, o termo ω'_s é o ângulo horário diário para uma superfície inclinada, dependente da declinação solar, da latitude e da inclinação da superfície, sendo necessário o seu estudo ao longo das estações do ano.

i) Durante o verão (no hemisfério Sul), $\delta < 0$, resultando em $\omega_s > \omega'_s$.

Isto significa que os raios solares atingem primeiro a superfície horizontal quando comparada com a superfície inclinada.

ii) Durante o inverno (no hemisfério Sul), $\delta > 0$. Matematicamente, resulta-se no fato de que o ângulo horário solar diário para a superfície inclinada será maior que na superfície horizontal. Esse fato não é fisicamente possível, permitindo escrever a expressão geral para o cálculo do ângulo horário solar em uma superfície inclinada no Hemisfério Sul, com a face voltada para o Norte.

$$\omega'_s = \min\{ \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) ; \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\phi - \beta)] \} \quad (07)$$

Essa consideração é importante na estimativa do fotoperíodo para uma dada latitude quando se utiliza superfícies inclinadas, principalmente com exposição ao Norte quando localizada no Hemisfério Sul. Caso não houvesse essa conotação, seriam verificados nas superfícies inclinadas um número maior de horas de fotoperíodo entre os equinócios (Figura 03a), quando comparado com a superfície horizontal.

Contundo, como o plano de horizonte limita o fotoperíodo para a superfície horizontal, as limitações citadas acima, configuram a Figura 03b. Observa-se que na inclinação igual a latitude local, obtêm-se o mesmo comportamento encontrado para regiões localizadas próximas a linha do Equador, com um fotoperíodo na primavera e verão igual a 12 horas. Ainda nestes períodos, o fotoperíodo diminui a medida que se tem um aumento dos ângulos de inclinação. Logicamente que essa diminuição do fotoperíodo é decorrente dos menores valores do ângulo horário solar para as superfícies inclinadas na primavera e verão, quando comparados com o ângulo horário solar para superfícies horizontais.

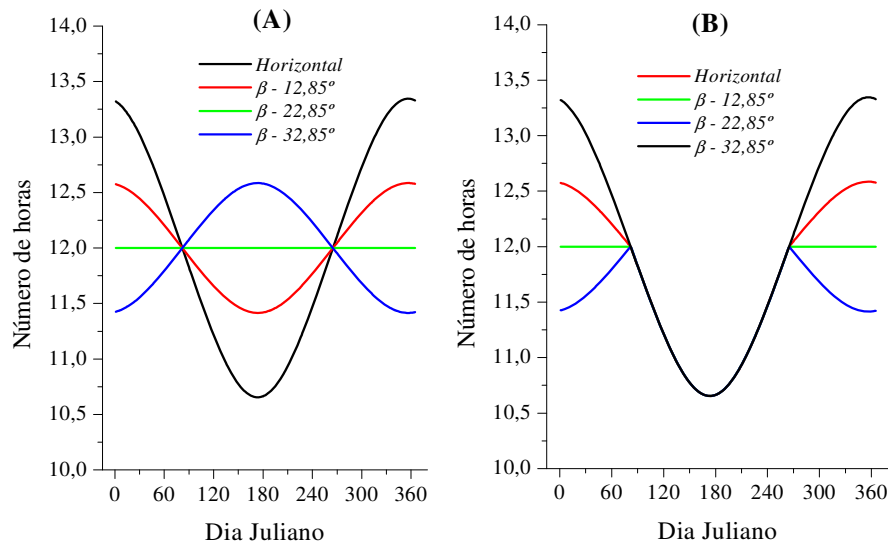


Figura 03. Número máximo de horas de brilho solar para superfície horizontal e superfícies inclinadas com face exposta ao Norte, em Botucatu-SP (latitude 22,85° S).

Liu e Jordan (1961) e Iqbal (1983) sugeriram que a relação existente entre a radiação incidente no topo da atmosfera em uma superfície inclinada e a incidente em uma superfície horizontal gera um fator geométrico diário (equação 08). A aplicação desse fator se faz necessário devido à mudança no ângulo de incidência dos raios solares sobre a superfície inclinada quando comparada com a superfície horizontal.

$$R_B = \frac{H_{0\beta}^d}{H_{0H}^d} \quad (08)$$

Esse fator geométrico quando exigido na partição diária, pode ser estimado diretamente pela aplicação da seguinte equação (IQBAL, 1983; WENXIAN et al., 1995), que representa a razão entre as equações 06 e 02, respectivamente.

$$R_B = \frac{(\pi/180) \omega'_s \sin \delta \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cos(\varphi - \beta) \sin \omega'_s}{(\pi/180) \omega_s \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \sin \omega_s} \quad (09)$$

Com relação à irradiação ao nível da superfície, os valores globais no plano horizontal (H_{GH}^d) podem ser obtidos através da integração da curva de irradiância global horizontal (I_{GH}).

$$H_{GH}^d = \int_{wi}^{wf} I_{GH} dt \quad (10)$$

em que: wi e wf correspondem aos horários do nascer e pôr-do-sol, respectivamente.

A irradiação direta na horizontal (H_{BH}^d) é obtida através da integração da curva de irradiância direta na incidência normal (I_{BH}) projetada na horizontal.

$$H_{GH}^d = \int_{wi}^{wf} I_B \cos(\theta_z) dt \quad (11)$$

Enquanto que a irradiação difusa (H_{DH}^d) de referência é obtida pela diferença entre as irradiações global e direta projetada na horizontal. Essa irradiação é considerada de referência, pois quando são realizadas medidas de irradiância difusa (I_{DH}) existe a necessidade do emprego de correções isotrópicas e anisotrópicas.

$$H_{DH}^d = H_{GH}^d - H_{BH}^d \quad (12)$$

Nesse contexto, os níveis de irradiação global ($H_{G\beta}^d$) incidentes nas superfícies inclinadas, também podem ser obtidos pela integração das irradiâncias globais ($I_{G\beta}$) incidentes nesse plano inclinado.

$$H_{G\beta}^d = \int_{wi}^{wf} I_{G\beta} dt \quad (13)$$

A taxa de radiação solar direta em uma superfície inclinada, segundo Iqbal (1983), pode ser calculada através da correção da radiação direta projetada na horizontal (H_{BH}^d) pelo fator R_B , sendo dada pela seguinte expressão:

$$H_{B\beta}^d = H_{BH}^d R_B \quad (14)$$

A componente refletida da irradiação global incidente em uma superfície inclinada pode ter comportamento isotrópico e anisotrópico. Entretanto, a componente anisotrópica pode ser aplicada somente para dias com céu claro e limpo, casos estes onde a reflexão não é perfeitamente difusa (Iqbal, 1983). Assim, a fração da energia refletida pelo solo que atinge a superfície inclinada pode ser dada apenas com base na reflexão isotrópica (WENXIAN et al., 1995; KAMALI et al., 2006; GUEYMARD, 2009).

$$H_{R\beta}^d = \frac{1}{2} H_{G\beta}^d \rho (1 - \cos\beta) \quad (15)$$

em que: ρ é o albedo da superfície (definido pela razão entre a irradiação refletida por uma superfície e a irradiação incidente nessa superfície), H_g^d é a irradiação global incidente na superfície inclinada, β é o ângulo de inclinação. O termo $[(1 - \cos(\beta))/2]$ é a razão entre a irradiação incidente na superfície inclinada sobre a radiação refletida pelo solo.

Esse tratamento matemático para as irradiações direta e refletida pelo solo, que incidem em superfícies inclinadas, é comum à maioria dos modelos propostos aos estudos das partições da irradiação total, excetuando-se uns poucos, como por exemplo, os de Temps & Coulson (1977) e Gueymard (1987), que dão tratamento anisotrópico para a irradiação refletida pelo solo.

Scolar (2003) e Dal Pai (2005) citam que para a componente difusa da irradiação, normalmente são utilizadas três sub-componentes para avaliar o seu comportamento anisotrópico: circunsolar, brilho horizontal e radiação difusa isotrópica. A

irradiação difusa que vem da região ao redor do disco solar é chamado de circunsolar, sendo predominantemente resultante do espalhamento devido aos aerossóis existente na atmosfera. O aumento na intensidade da radiação difusa próximo ao horizonte é chamado de brilho horizontal, devido ao fato que a radiação incidente percorre uma trajetória maior na atmosfera próximo ao horizonte e também devido às múltiplas reflexões na atmosfera terrestre. Isotrópica é o restante da radiação difusa assumida ser uniformemente distribuída na porção restante da hemisfério celeste.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos objetivando apresentar modelos propostos para estimar a irradiação difusa que atinge uma superfície inclinada (HARRISON e COOMBES, 1988; MEDIAVILLA et al., 2005; VARTIAINEN, 2000; ROBLEDO e SOLER, 2002; LI e CHEUNG, 2005; KAMALI et al., 2006; NOORIAN et al., 2008; BOLAND et al., 2008). No entanto, nem todos consideram essas três sub-componentes supracitadas da irradiação difusa. Isto demonstra a necessidade do conhecimento da variação sazonal dessa componente da irradiação total, visto a grande dificuldade de mensurá-la nas estações brasileiras.

2.5. Frações das irradiações global, direta e difusa em planos inclinados

Com relação a irradiação global, a transmissividade atmosférica, ou índice de claridade (K_T), dada pela razão entre a irradiação global pela irradiação no topo da atmosfera, são obtidos normalmente em superfícies horizontais. Esse índice representa a quantidade de irradiação efetiva que chega à superfície terrestre em relação à quantidade existente no topo da atmosfera, descontada os efeitos de absorção, reflexão e espalhamento direcional para o espaço.

Entretanto, devido à disponibilidade diferenciada de irradiação no topo da atmosfera nas diferentes inclinações ao longo do ano, este índice também pode variar para superfícies inclinadas.

O (K_T) é um número adimensional, cujos valores variam entre 0 e 1. Normalmente divide-se o índice de claridade em intervalos e adota-se a seguinte classificação: $0 < (K_T) < 0,30$, dias de céu completamente nublado; $0,30 < (K_T) < 0,65$, dias

de céu parcialmente nublado; e $0,65 < (K_T) < 1$, dias de céu aberto (LIU e JORDAN, 1960; IQBAL, 1983; DE MIGUEL et al., 1995; entre outros). Outras propostas de classificação estão sendo apresentadas e aceitas, e para Botucatu (SP) as condições de cobertura de céu apresentam subdivisões diferenciadas em função do índice de claridade (ESCOBEDO et al., 2007b; ESCOBEDO et al., 2009).

Outras frações que apresentam grande importância nos estudos de irradiação é a relação entre a irradiação direta e a irradiação global (K_b^d) e a relação entre a irradiação difusa e a irradiação global (K_d^d). Liu e Jordan (1960) foram os precursores da metodologia que correlaciona o índice de claridade (K_T) com as frações (K_b^d) e (K_d^d). Essas frações podem ser correlacionadas nas diferentes partições de tempo, como instantânea, horária e diária. Em Botucatu-SP, alguns trabalhos também utilizaram essa metodologia de estimativa das irradiações diretas (OLIVEIRA, 2001b; GOMES, 2006a) e difusas (DAL PAI, 2005).

Com relação a superfície inclinada, na mesma cidade supracitada, Sclar et al. (2003), também aplicaram essa conotação, entretanto apenas para uma superfície com inclinação igual a latitude local ($22,85^\circ$ S). Essas relações são importantes, pois possibilitam a estimativa das irradiações direta e difusa incidentes em um dado local com medidas realizadas apenas da irradiação global, e ainda permitem estimativas da irradiação total incidente em um plano inclinado com medidas da irradiação global realizadas apenas no plano horizontal.

Outra linha importante de estudo para obtenção da irradiação global são as correlações com parâmetros meteorológicos, geográficos, atmosféricos e astronômicos. Mediante a esse fato, Angström (1924) propôs um modelo estatístico linear para estimar a irradiação solar global em superfícies horizontais, com base na razão entre a irradiação em um dia completamente nublado pela irradiação em um dia completamente limpo e na razão entre o número de horas de brilho ao nível da superfície terrestre com o número máximo de horas de brilho solar no topo da atmosfera, ambos em um dia.

Entretanto, devido à dificuldade da medição da irradiação global em dias completamente limpos, o que não ocorre com frequência em muitas regiões devido principalmente a nebulosidade, Prescott (1940) correlacionou a razão (H_G^d / H_0^d) por meio de uma equação simplificada, conhecida como Angström-Prescott.

$$\frac{H_G^d}{H_0^d} = a + b \left(\frac{n}{N} \right) \quad (16)$$

Esse método se tornou o mais empregado, sendo que os valores dos coeficientes a e b (coeficientes da equação de Angström), característicos de um determinado local, são dependentes da latitude, da época do ano e da altitude. Nesta equação os significados físicos para os coeficientes a e b podem ser entendidos como: quando (n/N) tende a zero, (H_G^d / H_0^d) tende a a , mostrando que a não pode ser maior que 1, pois representa a transmissividade mínima da irradiação local. No outro extremo, num dia completamente claro (n/N) tende a 1, e (H_G^d / H_0^d) tende a $a + b$, representando a fração da irradiação extraterrestre incidente na superfície terrestre para dias com céu aberto, ou seja, representa o coeficiente de transmissão atmosférica.

Diversos trabalhos podem ser encontrados na literatura apresentando os valores desses coeficientes para um grande número de localidades brasileiras. Campelo Junior (1998), em Santo Antônio do Leverger, MT (latitude: 15°47'11" S), verificou que o valor de a foi praticamente constante ao longo do ano (0,21) e b variou de 0,26 a 0,54, sendo os maiores valores verificados no período de novembro a março e os menores de abril a agosto. Já Blanco e Sentelhas (2002) concluíram que em Piracicaba, SP (latitude 22°42'30" S), que a estimativa da insolação a partir dos valores anuais de a e b foi satisfatória, sendo $a = 0,231$ e $b = 0,50$, resultando na estimativa da insolação com precisão de 89% e exatidão de 97%.

Em Lavras – MG, latitude 21°13'32" S, Dantas et al. (2003), obtiveram ao longo um ano, a seguinte equação: $Q_g/Q_o = 0,23 + 0,49 n/N$, com um coeficiente de determinação médio de 0,89. E mais recentemente, Dornellas et al. (2006) encontraram em Brasília – DF (latitude 15°56'S), coeficientes médios mensais a variando de 0,241 a 0,345, e b de 0,430 a 0,515, enquanto que os coeficientes médios anuais a e b foram 0,278 e 0,498.

Entretanto, todos os estudos realizados no Brasil, foram aplicados em superfícies horizontais. Um ponto importante que deve ser considerado na possibilidade da aplicação da equação de Angström-Prescott, em superfícies inclinadas, é o fato do heliógrafo (aparelho que mede o número de horas de brilho solar ao nível da superfície terrestre) ser recomendado e instalado apenas em superfícies horizontais (planas). Sempre que o disco solar

puder ser visto e a radiação exceder um valor limitante mínimo haverá a queima do papel devido ao calor proveniente do sol.

Investigações em diferentes estações meteorológicas de vários países mostraram que o valor mínimo da irradiância necessária para o início da queima das tiras heliográficas varia entre 70 e 280 W m^{-2} (Baungartner, 1979). Estudos posteriores especialmente realizados na França propõem que um valor médio de 120 W m^{-2} seja admitido como um valor mínimo para início da queima da tira heliográfica utilizada pelo heliógrafo Campbell-Stokes. De acordo com a recomendação n° 10 da CIMO (Comissão para Instrumentação e Métodos de Observação) a duração do brilho solar de um dado período de tempo é definida como uma soma dos sub-períodos em que a irradiância solar direta excede à 120 W m^{-2} (WMO, 1996).

Pela verificação das partições instantâneas da irradiação global em dias considerados como críticos, como os solstícios e equinócios em condições de cobertura de céu variável, observou-se que o número de horas de brilho solar no nível da superfície é praticamente o mesmo para as superfícies horizontais e inclinada a 12,85°, pois o valor limitante de 120 W m^{-2} para a queima da fita heliográfica é atingindo concomitantemente pelas duas medidas (Figura 04), permitindo assim, a aplicação da equação de Angström-Prescott para superfícies inclinadas.

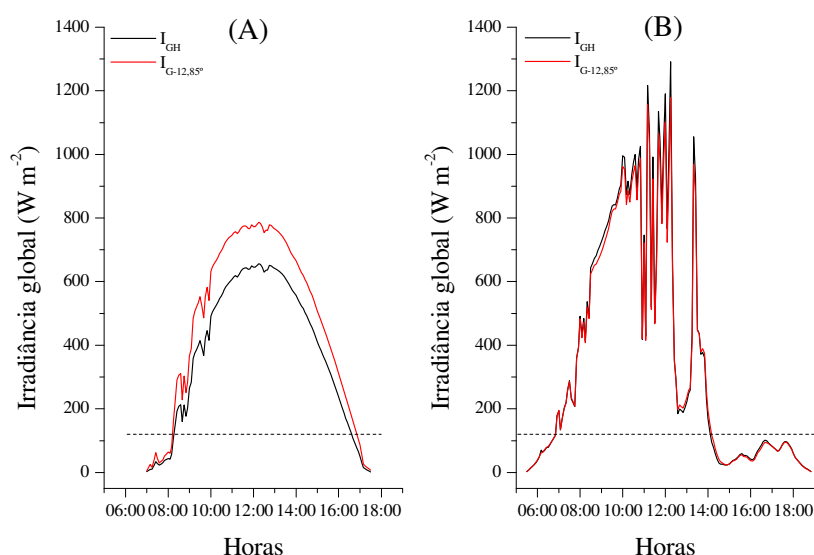


Figura 04. Irradiância global média de 5 minutos em superfícies horizontal e inclinada a 12,85°, com a face voltada para o Norte, no solstício de inverno (a) e de verão (b), em 2002.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e condições climáticas

Os dados das irradiâncias solar global, direta e difusa para as superfícies horizontal e inclinadas, com a face voltada para o Equador, foram obtidos da base de dados da Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP (latitude 22°51' Sul, longitude 48°26' Oeste, altitude 786m), coletados no período de janeiro de 1999 a dezembro de 2005.

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Cwa, caracterizado como temperado úmido, com inverno seco e verão quente. O dia que apresenta a maior disposição de brilho solar tem 13,4 horas (solstício de verão) e o com menor duração tem 10,6 horas (solstício de inverno).

Pela normal climatológica do município, as maiores precipitações ocorrem no mês de janeiro, com acumulo médio de 260,7 mm, enquanto que as mínimas são verificadas em agosto com 38,2 mm. Todavia, no período de realização desse estudo (1999 a 2005), esta variação não seguiu essa tendência, sendo encontradas somas mensais médias de $329,7 \pm 74,8$ e $38,7 \pm 32,8$ mm, como máxima e mínima, nos meses de janeiro e junho, respectivamente.

Segundo Oliveira (2003) existe uma alta probabilidade de ocorrência de ventos na região de Botucatu, com predominância na direção Nordeste – Leste, associados com a variação do anticiclone Atlântico Sul.

Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, com temperaturas médias de 23,20°C e 17,10°C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80%, respectivamente (Figura 05). Todavia, a evolução anual da temperatura e umidade relativa do ar media mensal seguem as variações astronômicas do sol, sendo os valores maiores verificados quando o Sol declina próximo da latitude local (solstício de verão), pois se tem níveis de irradiação solar mais elevados, e os menores valores quando declina no Hemisfério Norte (solstício de inverno para o Hemisfério Sul).

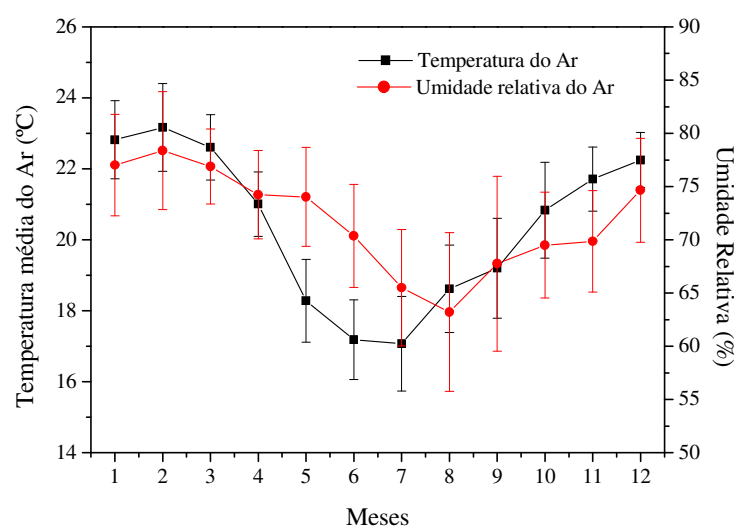


Figura 05. Evolução anual da temperatura do ar (a) e umidade relativa do ar (b) médias mensais de 35 anos, em Botucatu-SP.

Os efeitos climáticos característicos que afetam diretamente os valores das irradiações solares em Botucatu – SP podem ser observados por meio dos valores médios mensais nas séries mostradas na Tabela 01.

A razão de nebulosidade refere-se a fração do céu coberta pelas nuvens quando observado de uma localização em particular e expressa o número de horas que o sol ficou encoberto.

Tabela 01. Razão de nebulosidade, precipitação pluviométrica mensal e insolação em Botucatu-SP, entre 1999 e 2005.

Meses	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	Média	Desvio
Razão de Nebulosidade									
Janeiro	0,64	0,57	0,48	0,67	0,73	0,63	0,7	0,63	0,09
Fevereiro	0,54	0,53	0,52	0,61	0,43	0,45	0,35	0,49	0,09
Março	0,29	0,53	0,51	0,28	0,45	0,37	0,45	0,41	0,1
Abril	0,24	0,18	0,25	0,29	0,52	0,52	0,33	0,33	0,14
Maiο	0,25	0,24	0,39	0,44	0,21	0,46	0,31	0,33	0,1
Junho	0,36	0,28	0,64	0,54	0,42	0,55	0,53	0,47	0,12
Julho	0,24	0,29	0,39	0,46	0,29	0,38	0,36	0,34	0,08
Agosto	0,15	0,4	0,25	0,33	0,29	0,17	0,22	0,26	0,09
Setembro	0,34	0,45	0,34	0,46	0,37	0,31	0,49	0,39	0,07
Outubro	0,44	0,36	0,4	0,45	0,44	0,55	0,61	0,46	0,09
Novembro	0,42	0,44	0,48	0,55	0,56	0,45	0,47	0,48	0,05
Dezembro	0,48	0,56	0,68	0,6	0,49	0,51	0,52	0,55	0,07
Precipitação pluviométrica mensal (mm)									
Janeiro	357,9	220,7	315,5	271,3	412	302	428,4	329,7	74,8
Fevereiro	135,5	227,9	278,2	206,7	127,6	161,6	66,6	172	70,9
Março	35,6	162,4	156,6	150	179,8	122,3	113,8	131,5	48,1
Abril	70,3	12,1	24,9	2,8	87,5	107,5	78,7	54,8	41
Maiο	44,8	10,3	89,6	103,7	52,9	133,5	120,8	79,4	44,7
Junho	97,5	12,8	56,9	0	23,7	28,8	51,2	38,7	32,8
Julho	16,3	55	39,9	40,7	15,8	104,3	18,7	41,5	31,5
Agosto	0	73,7	53,8	76,4	33,9	0,2	52	41,4	31,6
Setembro	84,4	127,9	87,2	65,1	14,9	7,7	35,1	60,3	43,5
Outubro	35,3	20,3	142,7	52,7	149,1	109	121	90	53
Novembro	34,2	191,9	117,7	178,9	173,5	54,4	63,8	116,3	66,1
Dezembro	119	186,8	221,3	192	183,9	157,9	183,3	177,7	31,9
Insolação (horas)									
Janeiro	143,6	165,2	193,4	133,7	104,4	148,7	124,8	144,83	28,72
Fevereiro	147,4	171,7	170,1	125,1	204	201,7	232,5	178,93	36,6
Março	198	176,4	184,6	252,1	207,3	234,3	187,1	205,69	27,94
Abril	259	282,5	257,1	243,3	164,3	119,6	231,6	222,49	58,62
Maiο	236,7	257,2	200,2	189,1	264,6	181,4	234,1	223,33	33,19
Junho	203,8	228,4	112,5	146,6	177,9	144,2	149,8	166,17	39,67
Julho	245,2	237,7	198,1	180	237,4	206,4	201,8	215,23	24,79
Agosto	285,6	209,3	260,3	234,3	239,8	288,7	271,9	255,7	29,24
Setembro	235,7	190,5	228,5	187,6	224,9	247,7	180,7	213,66	26,75
Outubro	219,1	242,7	227,4	215,2	218	174,9	147,1	206,34	33,27
Novembro	205,7	221,2	198,4	172,4	168,9	182,1	200,8	192,79	19,02
Dezembro	146,8	176,3	120,3	155	211,7	189,6	186,5	169,46	30,73

A evolução temporal da razão de nebulosidade pode inferir quais os meses que apresentam maior número de dias de céu aberto e/ou nublado. Entre 1999 e 2005 verifica-se que os valores mais elevados ocorrem nos meses de janeiro (0,63), dezembro (0,55), fevereiro (0,49), novembro (0,48) e outubro (0,46), e os menores em abril (0,33), maio (0,33), julho (0,34), agosto (0,26) e setembro (0,39), como mostra a Tabela 01, a exceção ocorre por conta do mês de junho. Os maiores desvios são verificados nos meses de abril, maio e junho, sendo influenciados por conta das entradas das frentes frias vindas do sul do país, que trazem grandes quantidades de massas de ar frio, a partir da metade do outono.

Os meses que apresentaram a maior e a menor insolação foram agosto e janeiro, totalizando respectivamente, 255,7 e 144,83 horas. Por conseguinte, o fotoperíodo cujo comportamento foi apresentado na Figura 03, apresentou valores máximos acumulados na região no mês de dezembro (412,88 horas) e o mínimo no mês de junho (320,45 horas). Como os maiores índices pluviométricos são verificados nos meses do verão, permitem maiores razões de nebulosidade nesses meses, conseqüentemente menores razões de insolação.

A precipitação evoluiu proporcionalmente à nebulosidade, com valores acumulados entre novembro e fevereiro de 1017,2 mm, ou seja, 79,3% do total médio anual verificado entre 1999 e 2005. Os valores mais elevados são nos meses de janeiro (329,7 mm) e os menores em julho e agosto (31,5 mm). Esta variação demonstra claramente que a região de Botucatu, apresenta um ciclo da precipitação constituído de dois períodos bem distintos: chuvoso e seco, com chuvas de natureza convectiva (intensidade moderada a forte, com predominância no período da tarde ou início da noite, duração de curta a média, de minutos à horas) e frontal (intensidade de fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria, com duração de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente.), em cada período, respectivamente.

3.2. Instrumentação

Os dados foram armazenados em médias instantâneas de 5 minutos, em um sistema de aquisição de dados Microllogger CAMPBELL SCIENTIFIC, INC., modelo CR23X, operando na frequência de 1Hz, armazenando médias de 5 minutos ou 300 leituras. Na transferência dos dados é empregado um módulo de memória SM192 também da Campbell com interface SC532 para microcomputadores e operado pelo software PC 208W da Campbell. A disposição dos sensores de medidas da Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu-SP é demonstrada na Figura 06. A superfície inclinada (rampa) é apresentada na Figura 07.

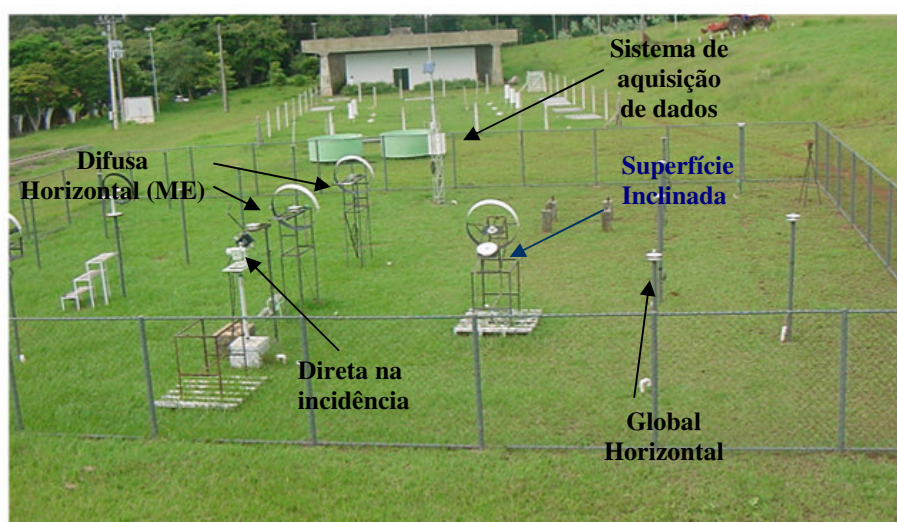


Figura 06. Estação de Radiometria Solar do Departamento de Recursos Naturais, UNESP, Botucatu – SP.

A irradiância global no plano horizontal foi medida com auxílio de um piranômetro EPPLEY-PSP, posicionado num plano horizontal e, nos planos inclinados a irradiância total foi obtida também com auxílio de piranômetros EPPLEY-PSP, posicionados paralelamente sobre os planos inclinados de 12,45°, 22,45° e 32,45°, com a face voltada para o Equador. Enquanto que, a irradiância direta na incidência foi obtida por um pireliômetro EPPLEY-NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 também da Eppley.



Figura 7. Piranômetros para medida da irradiância global e difusa em superfícies inclinadas, com a irradiância difusa sendo medida pelo anel de sombreamento ME.

As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação global e direta estão apresentadas na Tabela 02.

Tabela 02. Características operacionais dos sensores de irradiância global e direta.

Radiação	Global	Direta
Sensor- Marca	Piranômetro EPPLEY PSP	Pireliômetro - EPPLEY
Fator de Calibração	$7,45\mu\text{V/Wm}^{-2}$	$7,59\mu\text{V/Wm}^{-2}$
Range Espectral	295-2800 nm	250-2800 nm
Tempo de Resposta	1s	1s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a 2800 W/m^2) $\pm 1\%$ ($0 < z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($70^\circ < z < 80^\circ$)	$\pm 0,5\%$ (0 a 1400 W/m^2)
Co-seno		--
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C

Os valores das irradiações diretas na projeção da superfície horizontal foram obtidos através da seguinte equação:

$$H_{bh}^d = H_b^d \cos \theta_z \quad (17)$$

em que: θ_z é o ângulo zenital, dado pelas variações da declinação solar obtida pela equação 03 (δ) e do ângulo horário solar (ω_s) para uma dada latitude.

Dessa forma, a irradiação solar direta no plano inclinado foi obtida pela aplicação da equação 14, baseada no produto entre o fator R_b e a irradiação direta projetada na superfície horizontal (obtida pela integração diária dos valores instantâneos da irradiância).

A irradiação solar difusa tanto nas superfícies horizontais como nas inclinadas foram obtidas pelo método da diferença, conforme as equações abaixo.

$$H_{DH}^d = H_{GH}^d - H_{BH}^d \quad (18)$$

$$H_{D\beta}^d = H_{G\beta}^d - H_{B\beta}^d - H_{R\beta}^d \quad (19)$$

As outras variáveis meteorológicas que auxiliam nas análises das variações dos níveis das irradiações na superfície, os sensores e os períodos de observação utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 03. As calibrações dos sensores de irradiação solar são realizadas a cada 2 anos, usando os procedimentos recomendados pela World Meteorological Organization (1996).

Tabela 03. Variáveis meteorológicas, sensores e períodos de observação.

Variável	Sensor	Período
Umidade Relativa	Higrógrafo - Filotécnica Milano	1998-2005
Temperatura do Ar	Termógrafo - Filotécnica Milano	1998-2005
Insolação	Heliógrafo - Campbell Strokes	1998- 2005
Precipitação	Pluviógrafo Ota Keiki Seisakusho Co Ltda.	1998-2005

3.3. Base de Dados

A base de dados das irradiações solares global, direta e difusa na superfície horizontal empregadas neste estudo compreendeu os anos de 1998 a 2007. A discretização do período de dados para cada superfície inclinada foi a seguinte: na inclinação de 12,45° as medidas ocorreram entre 09/2001 e 02/2003; na inclinação de 22,85° entre 04/1998 e 08/2001 e na inclinação de 32,45° as medidas foram realizadas entre 01/2004 e

12/2007. Estes dados sofreram uma análise de consistência, para observação das possibilidades de agrupamento de dados nas partições diárias e mensais. Com base em integrações da partição instantânea foram obtidas as irradiações diárias (IQBAL, 1983).

Na análise das evoluções das diferentes irradiações em cada inclinação foram empregadas as medidas realizadas nos seguintes períodos: 12,35° - entre setembro de 2001 e fevereiro de 2003; 22,35° - entre janeiro de 1999 e dezembro de 2000; e em 32,85° - de janeiro de 2004 a dezembro de 2005. Nas evoluções anuais foram realizadas médias mensais diárias para cada uma das irradiações estudadas.

Para ajustes das equações de estimativas foram empregados os mesmos períodos de medidas supracitados nas evoluções anuais, com exceção apenas para a inclinação de 12,85°, onde foram empregados dados apenas do ano de 2002 nas correlações. Os demais dados respectivos a cada inclinação foram utilizados nas validações das equações de estimativa.

A série de dados foi inspecionada e os valores discrepantes foram removidos das séries, entretanto esses dias removidos retornaram a base de dados com os valores médios gerados pelos demais dados do respectivo mês. Nesse sentido, devido a erros de leitura do sensor ou ao mal funcionamento do sistema de aquisição de dados, foram removidos, para a radiação global nas superfícies inclinadas e horizontais, 26 dias em 1998, 39 dias em 1999, 27 dias em 2000, 30 dias em 2001, 20 dias em 2002, 21 dias em 2003, 37 dias em 2004, 25 dias em 2005, 09 dias em 2006 e 45 dias em 2007.

Com relação as medidas de insolação foram removidos da base de dados, 22 dias em 1999, 3 dias em 2000, 4 dias em 2001 e 2002, 1 dia em 2003, 6 dias em 2004 e 5 dias em 2005. Para a precipitação foram removidos 22 dias em 1999, 2 dias em 2000, 4 dias em 2001 e 2002, 1 dia em 2003, 6 dias em 2004 e 5 dias em 2005. Nesses dias removidos também foram adicionados os valores médios mensais do restante dos dados.

3.4. Tratamento dos dados

No processamento dos dados foram calculadas a hora do nascer e pôr do sol, declinação solar, irradiação no topo da atmosfera e cosseno do ângulo zenital ($\cos Z$) para superfície horizontal e inclinada, além do ângulo horário solar diário. Os arquivos destes

valores diários foram inseridos em planilhas (programa “ORIGIN 6.0”), conjuntamente com os dados experimentais medidos referentes aos respectivos dias.

A hora fornecida pelo sistema de aquisição de dados apresentava-se no formato da hora civil, sendo assim, com base nas equações de correção disponibilizadas por Iqbal (1983), foi determinado o horário solar, transportando os valores das radiações para o seu horário correto, permitindo que as densidades de fluxo das radiações medidas sejam consideradas a partir do horário do nascer do sol até o horário do pôr-do-sol.

A irradiação extraterrestre no topo da atmosfera para as superfícies plana e inclinada, foram estimadas pelas equações 02 (página 11) e 06 (página 13), respectivamente.

Com relação à irradiação ao nível da superfície no plano horizontal e nos planos inclinados, os mecanismos de integração da curva de irradiação global, direta e difusa foram apresentados no item 2.4. Entretanto, neste trabalho a irradiação difusa inclinada foi obtida pela diferença entre a global e a direta projetada nas inclinações.

3.5. Indicativos estatísticos

Foram empregados na avaliação da performance das equações de estimativa diária e mensal das radiações global, direta e difusa nas superfícies inclinadas quanto à horizontal, os indicativos estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de Willmott:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)}{N} \quad (20)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (22)$$

em que: P_i representa os valores estimados, O_i os valores medidos, N o número de observações, $|P_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \overline{O_i}$, e $|O_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \overline{O_i}$.

O indicativo *MBE* representa o desvio das médias e provê informações quanto à performance do modelo a longo prazo. Valores negativos de *MBE* indicam subestimativa do modelo testado, e vice-versa. Segundo Stone (1993), quanto menor o valor absoluto de *MBE*, melhor é a performance do modelo testado. A desvantagem deste método é que uma superestimativa cancela uma subestimativa.

O *RMSE* é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo. As desvantagens do *RMSE* são que alguns erros de grande proporção na soma podem causar acréscimos significativos nos valores de *RMSE*, além do que ele não diferencia superestimativa de subestimativa. Em geral, quanto menores os valores obtidos para *RMSE*, melhor performance dos modelos.

O índice de ajustamento “d” variando de 0 a 1 representa o quanto os valores estimados se ajustam com os valores medidos (WILLMOTT, 1981).

A utilização dos indicativos estatísticos *MBE*, *RMSE* e índice de ajustamento “d”, em conjunto é a alternativa adequada para validação de modelos estatísticos porque permite análise simultânea do desvio da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação as medidas.

3.6. Relações entre as frações da irradiação global, direta e difusa em superfícies inclinadas

Devido à complexidade nas mensurações das componentes da irradiação difusa ou da direta, além do custo envolvido na aquisição de equipamentos e instalação em superfícies inclinadas, foram verificadas através de regressões lineares e

polinomiais, as relações existentes entre as irradiações que incidem nas superfícies inclinadas e na horizontal, juntamente com as variáveis que influenciam em seu comportamento.

Os índices de claridade (K_T^d) diários foram obtidos através das razões entre as irradiações globais (H_G^d) e as irradiações no topo da atmosfera (H_0^d) , diferenciadas em superfícies inclinadas e horizontais para os mesmos períodos de medidas. As demais frações diárias foram obtidas pelas seguintes relações.

$$\begin{array}{ll}
 \text{(I)} \quad K_{bH}^d = \frac{H_{BH}^d}{H_{GH}^d} & \text{(II)} \quad K_{b\beta}^d = \frac{H_{B\beta}^d}{H_{G\beta}^d} \\
 \text{(III)} \quad K'_{bH}^d = \frac{H_{BH}^d}{H_{0H}^d} & \text{(IV)} \quad K'_{b\beta}^d = \frac{H_{B\beta}^d}{H_{0\beta}^d} \\
 \text{(V)} \quad K_{dH}^d = \frac{H_{DH}^d}{H_{GH}^d} & \text{(VI)} \quad K_{d\beta}^d = \frac{H_{D\beta}^d}{H_{G\beta}^d} \\
 \text{(VII)} \quad K'_{dH}^d = \frac{H_{DH}^d}{H_{0H}^d} & \text{(VIII)} \quad K'_{d\beta}^d = \frac{H_{D\beta}^d}{H_{0\beta}^d}
 \end{array}$$

As correlações estudadas foram entre os índices radiativos $(K_{T\beta}^d)$, $(K'_{b\beta}^d)$ e $(K'_{d\beta}^d)$ com os índices de claridade horizontais e a razão de insolação. No primeiro caso, foram geradas equações com agrupamentos anuais e mensais, sendo as equações anuais foram validadas nos anos e nos meses. Já na aplicação da correlação do tipo Angström- Prescott, foram considerados períodos sazonais (estações) e anuais, as validações ocorreram em seus respectivos períodos e as equações anuais também validadas nas estações. Essas últimas correlações, para as irradiações global, direta e difusa permitiram definir os coeficientes a e b da equação proposta por Angström-Prescott.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Níveis de irradiação extraterrestre em superfícies horizontais e inclinadas

Na Figura 08 pode ser observado que o fator R_b apresenta uma evolução anual variando com a intensidade da inclinação e com a época do ano. Nota-se que os maiores valores são encontrados no solstício de inverno (para o Hemisfério Sul) em todas as inclinações, entretanto a superfície exposta a $32,85^\circ$ de inclinação, apresenta valores de R_b em torno de 21,83% e 9,59% superiores aos verificados nas inclinações de $12,85^\circ$ e $22,85^\circ$, respectivamente. Ahmad (1989) cita que os valores de R_b apresentavam uma variação sazonal, diminuindo com o incremento de inclinação no solstício de verão e aumentando no solstício de inverno.

A aplicação desse fator de geométrico é importante por traduzir a relação existente tanto da irradiação no topo da atmosfera incidente em um plano inclinado e em um plano horizontal, quanto da irradiação direta incidentes nesses dois planos.

Nesse sentido, conota-se que em função do fator R_b , que traduz a relação geométrica entre os ângulos de incidência dos raios solares para superfícies inclinadas e horizontais, as superfícies inclinadas podem receber maiores quantidades de energia no topo da atmosfera durante o inverno e menores durante o verão.

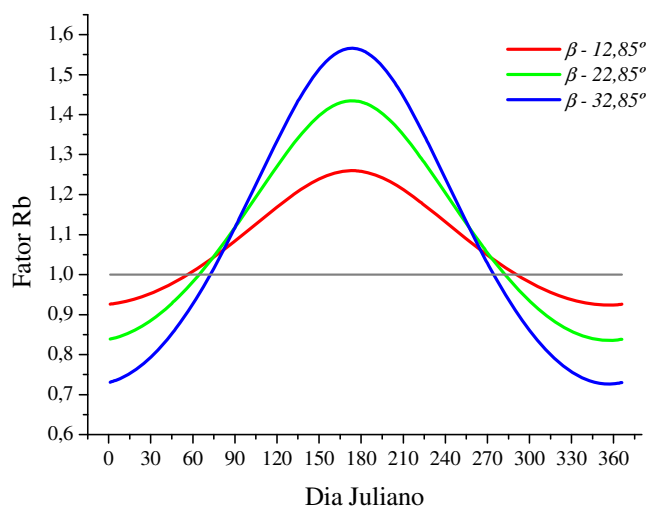


Figura 08. Evolução anual do fator R_b estimado para superfícies inclinadas a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$ com a face voltada para o Norte.

As irradiações extraterrestres diárias (H_0^d) projetadas nas superfícies horizontal e inclinadas, com ângulos de inclinação iguais a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, com face voltada para o Norte, situadas no Hemisfério Sul, são mostradas na Figura 09.

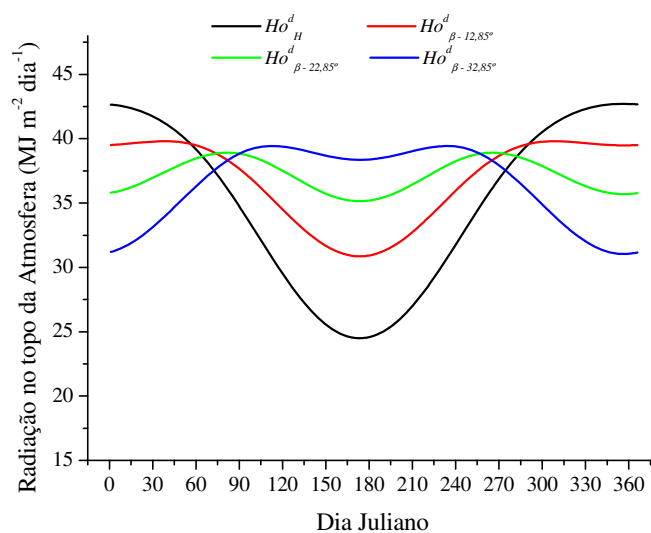


Figura 09. Evolução anual da irradiação solar no topo da atmosfera para superfície horizontal e superfícies inclinadas a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$ com a face voltada para o Norte.

Verifica-se que existe grande variação anual da energia recebida pela superfície horizontal, com pico mínimo de energia durante o inverno e máximo durante o verão. Entretanto, para maiores inclinações $\langle |L| + 10^\circ \rangle$ esses picos de energia apresentam sazonalidade diferenciada, com valores mínimos no verão.

A superfície com ângulo de inclinação de $22,85^\circ \langle |L| \rangle$ apresentou menores variações ao longo do ano nos níveis de energia recebida no topo da atmosfera, com pico mínimo durante o inverno e dois máximos durante os equinócios. Esses dados corroboram com os resultados verificados por Scola (2003), também para a cidade de Botucatu-SP e para essa mesma inclinação.

Por conseguinte, a superfície com inclinação de $12,85^\circ \langle |L| - 10^\circ \rangle$ apresentou um comportamento semelhante ao verificado para a superfície horizontal, com pico mínimo no solstício de inverno (20/06) e máximo no verão (20/12), porém com níveis energéticos superiores em $6,02 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e inferiores de $3,13 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em cada período, quando comparada com a horizontal, respectivamente.

Na inclinação de $32,85^\circ \langle |L| + 10^\circ \rangle$ verificaram-se quantidades diárias de irradiação no topo da atmosfera diferenciadas das demais superfícies estudadas, pois entre os equinócios ocorreram pequenas oscilações. Em 21/03 e 19/09 (equinócios de outono e primavera) têm-se $38,24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $38,32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. O pico máximo ocorreu no dia 22/04, com valor de $39,43 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e pico mínimo no dia 15/12 com níveis energéticos 20,86% inferiores ao do pico máximo.

A maior quantidade de irradiação que poderia ser recebida pelas superfícies inclinadas a $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, L e $\langle |L| + 10^\circ \rangle$ durante o outono e inverno, são explicadas pela maior exposição das superfícies aos raios solares quando comparadas a superfície horizontal, e também ao maior tempo de exposição durante no fotoperíodo, sendo o inverso verificado durante os meses de verão e primavera (Scola, 2004). Ainda pode ser considerado que, com a aplicação de ângulos de inclinação em uma dada superfície, se tem uma diminuição da área de exposição ao fluxo de energia durante o primavera e verão, que são as épocas onde o Sol declina no Hemisfério Sul. Durante o outono e inverno, ocorre um aumento dessa área de exposição ao fluxo de energia.

Todavia, para a inclinação $\langle |L| + 10^\circ \rangle$, a menor quantidade de $(H_{0\beta}^d)$ observada no verão dentre todas as superfícies estudadas, decorre do fato que esse ângulo de inclinação (em valor absoluto) é superior ao ângulo de $-23,45^\circ$, que corresponde ao máximo possível declinação do Sol no Hemisfério Sul.

Nas superfícies inclinadas estudadas, o Sol culminará no zênite da superfície em épocas diferenciadas ao longo do ano, pois ao se aplicar uma inclinação em uma superfície, ocorre um deslocamento no zênite da respectiva superfície com intensidade igual ao ângulo de inclinação e na direção de exposição submetida. Como o zênite equivale a um ponto perpendicular à superfície, para a condição horizontal em Botucatu, o Sol culmina no zênite local nos dias 04/01 e 08/12. Já para as inclinações estudadas como ocorrem deslocamentos do zênite, estes serão equivalentes aos verificados para as latitudes 10° S, 0° e 10° N, permitindo que nessas superfícies os zênites sejam atingidos nos dias 25/02 e 16/10 $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, 21/03 e 21/09 $\langle |L| \rangle$ equivalentes aos equinócios de outono e primavera para o Hemisfério Sul, 16/04 e 26/08 $\langle |L| + 10^\circ \rangle$.

Iqbal (1983) apresenta resultados para Miami ($25^\circ 49'$ N) e Montreal ($45^\circ 30'$ N), que em superfícies com inclinações iguais as latitudes locais e com a face voltada para o Sul, as variações sazonais da $(H_{0\beta}^d)$ são semelhantes ao verificado nesse trabalho, respeitando as diferenças existentes entre épocas do ano em que ocorrem verão e inverno nos Hemisférios Norte e Sul. Neste caso do Hemisfério Norte, durante os meses de verão (junho, julho, agosto e setembro), a superfície horizontal recebeu o pico máximo de insolação e a superfície inclinada apresentou o pico mínimo. Com a diminuição da latitude, a superfície inclinada apresentou aumento na variação anual da taxa de irradiação extraterrestre recebida.

Na avaliação dos percentuais relativos durante o ano entre a irradiação extraterrestre projetada nas superfícies horizontal e inclinada (Figura 10), fez-se uso da equação (23), que considera a irradiação no topo da atmosfera projetada na superfície inclinada como sendo a de referência.

$$\delta(\%) = \frac{H_{0\beta}^d - H_{0H}^d}{H_{0\beta}^d} \quad (23)$$

Os desvios máximos positivos e negativos aumentam com o incremento da intensidade de inclinação. Assim, são observados ganhos em torno de 20,6%, 30,3% e 36,1% durante o solstício de inverno, e perdas próximas a -8,2%, -19,7% e -37,6% no solstício de verão para as superfícies inclinadas a $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, $\langle |L| \rangle$ e $\langle |L| + 10^\circ \rangle$ quando comparadas com a superfície horizontal, respectivamente.

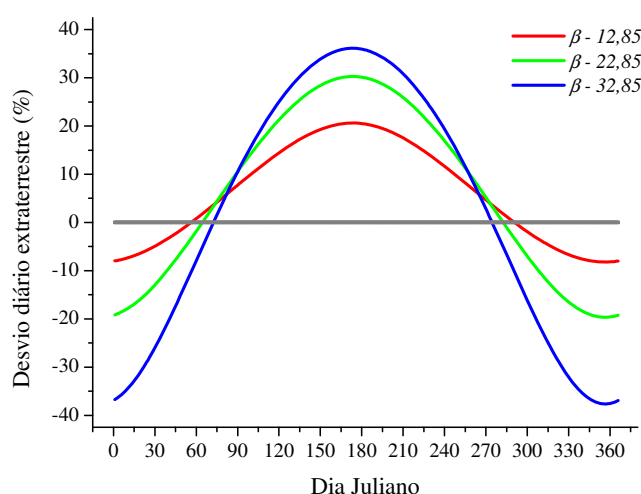


Figura 10. Evolução anual dos desvios relativos considerando a irradiação calculada no topo da atmosfera para superfície horizontal e superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

De uma maneira geral, quando se considera uma superfície inclinada com a face voltada para o Equador, existe um ‘ganho’ relativo de energia extraterrestre durante os meses de outono e inverno e uma ‘perda’ relativa durante os meses da primavera e verão, com variações intensificadas com o aumento da inclinação. Assim, grandes vantagens práticas podem ser obtidas com a melhor redistribuição e aproveitamento da energia solar ao longo do ano, como na utilização de aquecedores solares e painéis solares empregados em sistemas automatizados de irrigação.

4.2. Níveis de irradiação global em superfícies horizontais e inclinadas

Com objetivo de eliminar os problemas causados pela alternância de dias com céu nublado e dias com céu claro, todas as evoluções abaixo citadas foram apresentadas em médias mensais de energia incidente na superfície horizontal e nos planos inclinados a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$.

Na figura 11 são mostradas as médias mensais de energia recebida nas superfícies horizontal e inclinada a $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, com medidas realizadas entre setembro de 2001 e fevereiro de 2003. De uma maneira geral, a radiação incidente na superfície terrestre apresentou comportamento semelhante ao verificado no topo da atmosfera.

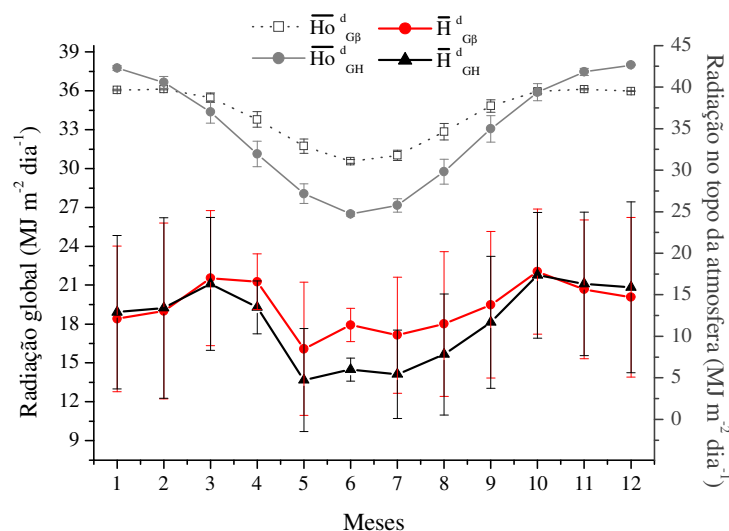


Figura 11. Evolução anual das médias mensais da irradiação global e do topo da atmosfera diárias na superfície horizontal e na superfície inclinada a $12,85^\circ$, com a face voltada para o Norte.

A energia global recebida pelo plano inclinado se apresentou inferior ao plano horizontal apenas entre os meses de novembro a fevereiro, sendo no mês de dezembro verificada a maior diferença ($0,77 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Na superfície inclinada foi verificada uma menor variação anual dos níveis energéticos recebidos, com valores superiores a condição horizontal a partir do início do outono até meados da primavera, sendo o pico máximo de diferença entre as duas superfícies observado no mês de junho ($3,44 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Para as duas superfícies os menores valores médios de irradiação global foram verificados no mês de maio, provavelmente em função da grande entrada de frentes frias na região de Botucatu, durante esse mês, o que aumentou a razão de nebulosidade (Tabela 01).

As irradiações no topo da atmosfera para as duas superfícies apresentam seus picos mínimos coincidentes no mês de junho, mês este que ainda apresentou os maiores valores de energia global recebida nas superfícies quando comparado com os meses de maio e agosto. Em junho, foram verificados valores médios superiores ao mês de maio em torno de 0,82; 0,37 MJ m⁻² dia⁻¹ e de agosto em 1,85 e 0,79 MJ m⁻² dia⁻¹ para as superfícies horizontal e inclinada, respectivamente.

Esse fato provavelmente foi condicionado pela ausência de precipitações pluviométricas no mês de junho de 2002 (Tabela 1), que permitiu um número maior de dias com céu aberto. Dessa mesma forma, também podem ser explicadas o incremento nas medias de irradiação global verificada para as duas superfícies no mês de outubro, visto que ocorreu um déficit de precipitação em torno de 40 mm da média verificada entre 1999 e 2005.

Como a razão de nebulosidade foi obtida pela relação $(1 - R_{INSOLAÇÃO})$, pode-se concluir que o incremento dos níveis médios de energia global do mês de março foi gerado em função de ter ocorrido 46,4 horas a mais de insolação nesse mês quando comparado com a média entre 1999 e 2005 e duas vezes maior do que o verificado para o mês de fevereiro de 2002.

A energia global recebida pelo plano inclinado a 22,85° (igual a latitude local), apresentou pouca variação ao longo do ano, em torno de 5,64 MJ m⁻² dia⁻¹ entre o pico máximo (abril) e o pico mínimo (junho). Nessa inclinação, os níveis energéticos globais são inferiores aos verificados para a condição horizontal nos meses de primavera e verão e superiores nos meses outono e inverno (Figura 12). Os valores médios mensais apresentados são obtidos de medidas compreendidas entre 01/1999 e 12/2000. Foram verificados ganhos de energia global nos meses de maio, junho e julho superiores a 4,06 MJ m⁻² dia⁻¹ quando comparada com a superfície horizontal.

Os valores de $(H_{G\beta}^d)$ dos meses de janeiro e fevereiro (17,53 e 18,75 MJ m⁻² dia⁻¹) são semelhantes aos verificados em junho, julho e agosto que apresentaram

variações de 17,00 a 18,87 MJ m⁻² dia⁻¹. Já na superfície horizontal, semelhanças foram verificadas entre os meses de janeiro e fevereiro, com os meses de abril e setembro, cujos valores foram de 19,47; 19,58; 19,47; e 19,16 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente.

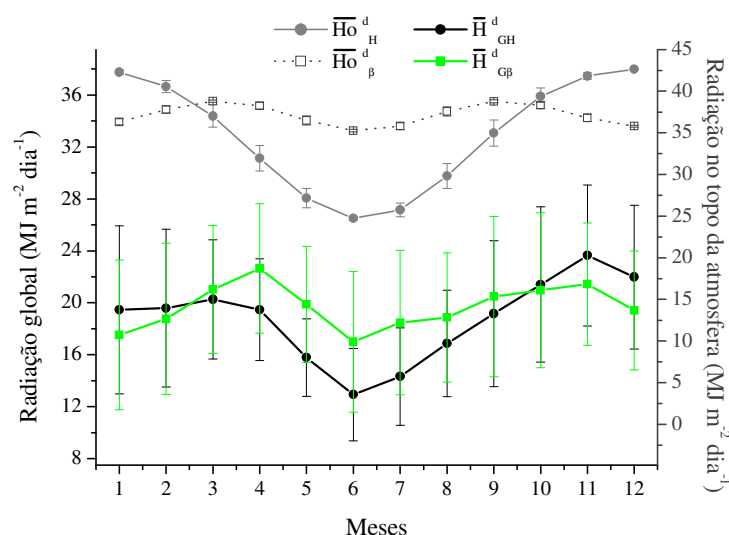


Figura 12. Evolução anual das médias mensais da irradiação global e do topo da atmosfera diárias na superfície horizontal e na superfície inclinada a 22,85°, com a face voltada para o Norte.

Os valores observados para as duas superfícies (horizontal e 22,85°) acompanharam os efeitos da sazonalidade verificada para a irradiação no topo da atmosfera, com influencia das variáveis climáticas, principalmente no período do verão.

No ano de 2000, no mês de abril foram verificadas reduções de 42,7 mm no regime pluviométrico médio entre 1999 e 2005 (Tabela 1), conjuntamente com a antecipação da entrada de frentes frias na região nos anos de 1999 e 2000, justificando assim essa variação com relação aos níveis de (H_{GH}^d) e $(H_{G\beta}^d)$ em abril.

A energia global recebida pela superfície inclinada a 32,85°, também apresentou pouca variação ao longo do ano, com picos máximo (agosto) e mínimo (dezembro) médios de 21,82 e 14,38 MJ m⁻² dia⁻¹. Entre os meses de fevereiro e julho, os valores de $(H_{G\beta}^d)$ se mantiveram praticamente constantes, oscilando entre 19,53 e 18,75 MJ m⁻² dia⁻¹ ou variação de 5,79%. Nessa inclinação, os níveis energéticos também apresentaram a tendência

de serem inferiores nos meses de primavera e verão e superiores nos meses outono e inverno, quando comparados com a superfície horizontal, acompanhando a variação sazonal da irradiação no topo da atmosfera para as duas inclinações (Figura 13).

Na superfície horizontal para esse período de medidas (01/2004 a 12/2005), nos meses de novembro, dezembro e fevereiro os valores de $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ médios mensais foram superiores a $21,60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Já nos meses de maio, junho e julho os níveis de $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ médios mensais foram inferiores a $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. No mês de outubro de 2004 e 2005 ocorreram nebulosidades e precipitações pluviométricas superiores às médias verificadas entre 1999 a 2005, reduzindo assim a tendência dos níveis de irradiação global para as duas superfícies (horizontal e $32,85^\circ$).

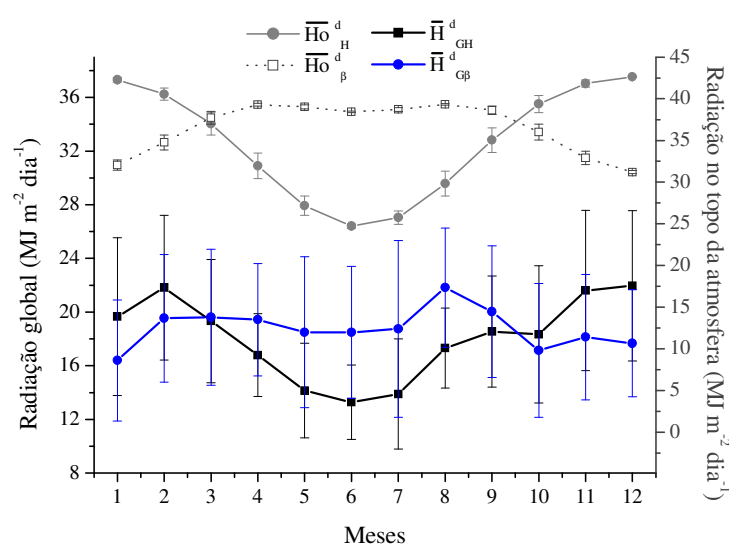


Figura 13. Evolução anual das médias mensais da irradiação global e do topo da atmosfera diárias na superfície horizontal e na superfície inclinada a $32,85^\circ$, com a face voltada para o Norte.

No mês de agosto ocorreu uma desuniformidade na tendência da evolução das irradiações globais para as duas superfícies, quando relacionado com a irradiação disponível no topo da atmosfera, pois o mês de setembro apresentou níveis de $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ inferiores em $3,68$ e $1,21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, quando comparado com agosto, respectivamente. Esse fato pode ser justificado pela baixa razão de nebulosidade verificada no mês de agosto nos

anos de 2004 e 2005 (Tabela 1), que permitiram um número maior de dias com céu claro ao longo do mês e uma soma de 288,7 e 271,9 horas de insolação, valores estes superiores em 12,9 e 6,3% a média de insolação verificada entre 1999 e 2005. Por conseguinte, ainda no mês de agosto, são verificadas as menores precipitações acumuladas na região de Botucatu.

Os desvios diários acompanharam a tendência das superfícies inclinadas apresentarem valores superiores de irradiação global quando comparadas com as superfícies horizontais, durante o outono e o inverno e inferiores a partir de meados da primavera e no verão (Figura 14). Notadamente, ocorreu um aumento dos desvios médios mensais com o incremento da inclinação, todavia, esse comportamento é normal, visto que a disponibilidade de energia no topo da atmosfera também sofre variações sazonais semelhantes com a mudança da inclinação.

Para a superfície inclinada a $12,85^\circ$ os ganhos máximos de $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ estão em torno de 19,2%, enquanto que as perdas máximas estão por volta de -3,8%. Em valores energéticos, os valores máximos representam $4,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (obtidos no inverno) e os valores mínimos $-2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (encontrados no verão). Na superfície inclinada a $22,85^\circ$, os valores percentuais máximos (23,91%) e os mínimos (-13,05%), também ocorreram no inverno e verão, que por sua vez, permitiram diferenças entre $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(H_{GH}^d\right)$ máximas em torno de $6,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e mínimas de $-4,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

Já para o plano inclinado a $32,85^\circ$, foram verificados valores percentuais máximos de ganhos equivalentes a 28,2% (junho) e mínimos de -24,3% (dezembro), seguindo a mesma tendência dos desvios verificados para as demais superfícies inclinadas. Entretanto, no mês de março, que compreende os dias próximos ao equinócio de outono, os desvios entre o plano inclinado e horizontal ficam em torno de 1,47%, enquanto que, na inclinação de $22,85^\circ$ os menores desvios relativos foram encontrados nos dias posteriores ao equinócio de primavera (-2,05%). Em valores absolutos, as variações ficaram em torno de 7,0 e $-6,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para os solstícios de inverno e verão.

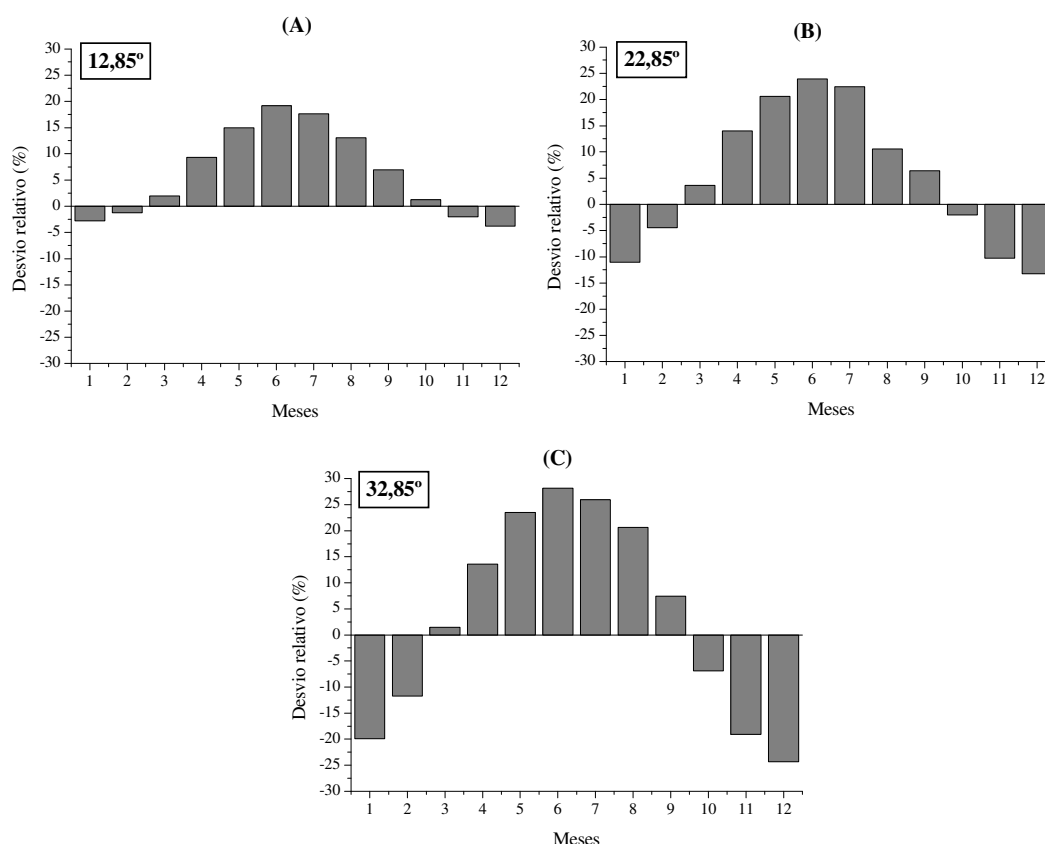


Figura 14. Evolução anual dos desvios médios mensais das irradiações globais, usando as superfícies inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c) como referência em relação à superfícies horizontais, para as mesmas épocas de medidas.

Em Barcelona, cidade espanhola situada na latitude 41° 23' N, Villarrubia et al. (1980) verificaram médias mensais de dados diários máximos de 23,40 MJ m⁻² em julho para a inclinação de 10° e o mínimo de 6,10 MJ m⁻² em dezembro para a superfície horizontal. Entretanto, como o verão no Hemisfério Norte ocorre nos meses junho, julho e agosto foi observada uma tendência de diminuição dos níveis de irradiação global com o aumento da inclinação (0 a 90°, com intervalos de 10°) e uma inversão dessa tendência no período do inverno. Essas tendências são semelhantes às verificadas para Botucatu, com diferenciação da época do ano devido a estar situada no Hemisfério Sul.

Em Karachi, no Paquistão (latitude de 24° 54' N), Ahmad (1989) verificou ao longo de 25 anos, que superfícies inclinadas a 10°, 20° e 30° apresentaram picos

máximos e mínimos em abril e agosto, onde no plano inclinado a 30° foram encontradas médias diárias de $(H_{G\beta}^d)$, com 22,64 e 16,32 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Em geral, esse autor obteve resultados com intensidades crescentes dos níveis de energia incidentes em abril e decrescentes em agosto com o aumento das inclinações.

Na região de Jaboticabal, estado de São Paulo, Lopes (1986), Aragon e Toledo Piza (1992) verificaram que os valores médios mensais da radiação solar global em rampas com exposição ao norte, aumentaram nos meses de março, junho e setembro e diminuíram no mês de dezembro, em função do incremento de declividade. Sendo que, apenas no verão as superfícies com inclinação variável entre 10% a 50% apresentaram valores inferiores à superfície plana. Esses resultados corroboram com os verificados nesse estudo em Botucatu-SP. Esses autores ainda verificaram que, no ano de 1984, os valores médios encontrados pelos autores supracitados, para o mês de março, junho, setembro e dezembro, foram de 22,12; 15,39; 19,98 e 18,48 MJ m⁻² dia⁻¹ para uma superfície com 20% de declividade e de 22,25; 17,35; 20,53 e 16,89 MJ m⁻² dia⁻¹ para declividades de 40%, ambas superfícies com exposição ao norte.

Também em Jaboticabal, Turco e Rizzatti (2006) verificaram em uma superfície inclinada a 20° e exposta ao Norte, que em dias de céu aberto do outono e do inverno as médias de irradiação global foram em torno de 22,80 MJ m⁻² (5 dias), 20,52 MJ m⁻² (6 dias), 18,36 MJ m⁻² (11 dias), 19,24 MJ m⁻² (12 dias) e 21,78 MJ m⁻² (8 dias) para os meses de abril, maio, junho, julho e agosto de 2002. Todavia, a análise apenas em dias com céu aberto não reflete as médias mensais, principalmente pelo baixo número de dias em cada mês que apresentaram cobertura de céu limpa.

De Miguel et al. (1995), em Burgos (latitude 42°20'25" N), na Espanha, citam que em superfícies planas nessa região são encontrados valores de irradiação global oscilando entre 23 e 26 MJ m⁻² dia⁻¹ no mês de julho e entre 4 a 5 MJ m⁻² dia⁻¹ nos meses de dezembro e janeiro. Para superfícies inclinadas com faces voltadas para o Sul, concluíram que durante os meses de inverno para o Hemisfério Norte (novembro a fevereiro), os ângulos que possibilitam o máximo aproveitamento de energia incidente variam entre 60° e 70°, enquanto que nos meses de verão (junho a agosto) são recomendadas inclinações com

amplitude máxima de 10° , visto que os a superfície plana apresenta valores semelhantes até essa inclinação limite.

Na cidade nigeriana de Lagos (latitude $6^\circ 19' 48''$ N), Oladiran (1995) verificou nas inclinações de $\langle L - 10^\circ \rangle$, $\langle L \rangle$ e $\langle L + 10^\circ \rangle$, que os máximos valores ocorreram na inclinação de $\langle L + 10^\circ \rangle$ entre novembro e dezembro (com valores médios diários de 33,14 e 30,49 MJ m⁻²), enquanto que os valores mínimos também foram incididos nessa inclinação durante o mês de julho (21,07 MJ m⁻² dia⁻¹). No mês de março (equinócio de outono para o Hemisfério Norte), esse autor ainda observou um aumento dos níveis da irradiação global com a elevação da inclinação, sendo o contrario verificado para o mês de setembro (equinócio de primavera). Entretanto, foram encontradas diferenças entre o pico máximo e mínimo de 5,76; 8,41 e 12,07 MJ m⁻² dia⁻¹, para as inclinações de $L - 10^\circ$, L e $L + 10^\circ$.

Esses valores são superiores aos verificados nas inclinações de $12,85^\circ$; $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, equivalentes a $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, $\langle |L| \rangle$ e $\langle |L| + 10^\circ \rangle$, cujas diferenças entre as médias mensais foram 4,11; 5,64 e 4,68 MJ m⁻² dia⁻¹, respectivamente. Como a Nigéria situa-se entre a latitude 4° e 14° Norte, está condicionada a apenas duas estações bem definidas, seca e chuvosa, que ocorrem entre março e setembro e entre outubro e fevereiro. A estação chuvosa é caracterizada por céu parcialmente nublado e elevada concentração de vapor d'água na atmosfera, enquanto que a estação seca está associada a mínima nebulosidade e a altas temperaturas, permitindo que os níveis máximos e mínimos ocorram nas estações seca e chuvosa, respectivamente, sendo a variação entre as duas controladas pelas condições geográficas locais (OLADIRAN, 1995).

Já no México, Ramírez e Salgado (2005) citam que em comparação com uma superfície horizontal, superfícies inclinadas com ângulo igual a latitude local, possibilitam benefícios com incrementos de 35% nos meses de inverno e no restante do ano de 10 a 15% para a Região Norte do país e nas regiões Centro-Sul o incremento anual está em torno de 10 a 15%.

Li e Lam (2007), verificaram em Kowloon, Hong Kong, que os melhores resultados para locais com latitude norte, são encontrados com as superfícies com as faces voltadas para o Sul, e o ângulo de inclinação de 20° apresentou os melhores resultados, recebendo ao longo do mês de março uma soma de 328,30 MJ m⁻² dia⁻¹ e de 615,20 MJ m⁻²

dia⁻¹ no mês de outubro, com médias diárias de 10,59 e 19,84 MJ m⁻², nos respectivos meses citados. Resultados semelhantes foram apresentados por Li et al. (2002), para as condições climáticas e geográficas de Hong Kong.

Resguardando as variações climáticas ocorridas nos períodos de medidas para cada uma das respectivas inclinações, na Figura 15 são apresentados os níveis médios mensais de $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ para diferentes períodos de medidas. Nesses períodos, as medidas foram distribuídas da seguinte forma: (2001-2003 para a inclinação de 12,85°; 1999-2000 para 22,85° e 2004-2005 para 32,85°) e média geral entre o período de 1998 a 2007. As evoluções foram analisadas até 2005, todavia a curva média geral compreende medidas até 2007, por incorporar também os dados utilizados para as validações dos modelos de estimativas.

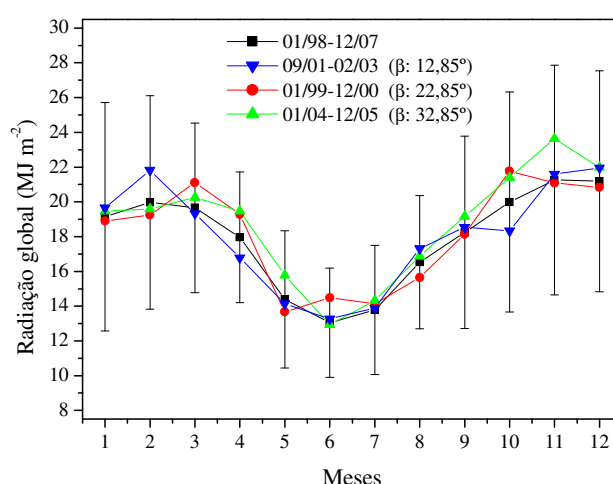


Figura 15. Irradiação global média mensal diária para diferentes períodos de medidas em superfícies horizontais, separados em função dos períodos de medidas em cada inclinação.

Observa-se claramente a tendência de evolução da irradiação global para superfícies horizontais, com valores máximos no verão e mínimos no inverno. Nos diferentes períodos de medidas, as tendências também são seguidas. Contudo, as variações verificadas em cada período, são decorrentes das variações climáticas ocorridas em cada mês, principalmente das razões de nebulosidade e precipitações pluviométricas, conforme o apresentado na Tabela 01, entretanto em todos os períodos essas variações permanecem dentro dos desvios padrões da curva média geral.

Essa conotação é importante, pois possibilita observar que houve pequenas variações nos níveis de $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$, em torno de $\pm 6\%$ nos meses de verão e inverno para todos os períodos.

As evoluções das razões entre os níveis de $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ para as inclinações de $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$ podem ser comparadas na Figura 16. Podemos verificar que existe uma correlação com a disponibilidade de energia verificada no topo da atmosfera para as inclinações estudadas, visto que, com o incremento de inclinação se tem um aumento no ganho de energia nos períodos de outono e inverno e uma redução dos níveis energéticos incidentes no verão. Essa variação sazonal também acompanha a evolução anual do fator geométrico R_B , dado pela razão entre $\left(\overline{H}_{0\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{0H}^d\right)$, conforme a Figura 7, entretanto com variações menores entre máximos e mínimos.

O uso dessas razões permite minimizar os efeitos das condições astronômicas e geográficas nos níveis de irradiação global para todas as superfícies. Entretanto, os efeitos climáticos ainda estão presentes, como pode ser verificado no mês de agosto (1,12) para a inclinação de $22,85^\circ$. Em junho são observados ganhos de 23,75%, 31,42% e 39,24% e em dezembro perdas em torno 3,69%, 11,70% e 19,55%, para as inclinações de $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, respectivamente.

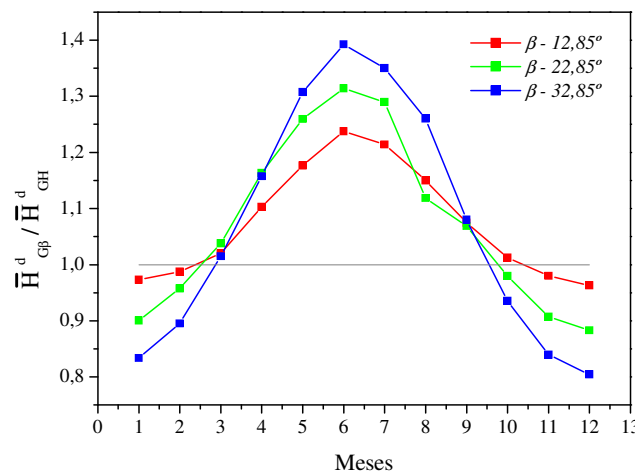


Figura 16. Razões médias mensais entre $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$.

Observa-se que não existe uma simetria entre as curvas médias mensais das razões supracitadas, visto que para as três inclinações os valores nos meses de março e setembro (equinócios de outono e primavera) são semelhantes. Em março as razões entre $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ foram de 1,02; 1,04 e 1,02 e em setembro de 1,08; 1,07; 1,08 para as inclinações iguais a $\langle|L|-10^\circ\rangle$, $\langle|L|\rangle$ e $\langle|L|+10^\circ\rangle$.

Essa ausência de simetria nas razões entre $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ estão relacionadas com o aumento significativo das partículas em suspensão na atmosfera local, expressos na forma de densidade óptica padrão (AOD), cujo valor máximo é verificado em setembro $0,313 \pm 0,12$ (Figura 17). As partículas em suspensão podem possibilitar aumentos nos níveis de $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$, em função do aumento da irradiação difusa, visto que a disponibilidade energética no topo da atmosfera é similar em março e setembro, para superfícies inclinadas e horizontais, contudo, a maior concentração de aerossóis permite ao mês de setembro níveis energéticos globais superiores aos verificados em março para todas as inclinações estudadas.

A evolução anual das médias mensais diárias da densidade óptica padrão, mostra que a partir do início das queimadas da cana de açúcar em junho/julho, a concentração de aerossóis aumenta consideravelmente nos meses de agosto e setembro, onde passa pelo valor máximo de $AOD = 0,313$, equivalente a concentração de PM_{10} de $70,0 \mu g m^{-3}$ (CODATO et al., 2008).

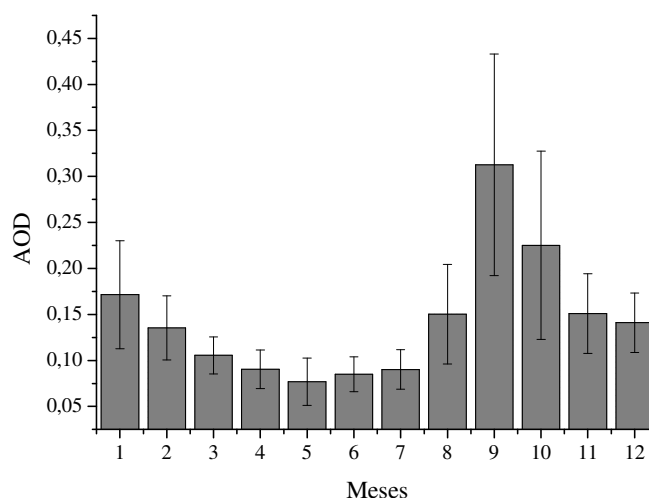


Figura 17. Densidade óptica padrão (AOD) média mensal diária obtida pelo satélite AQUA-MIR, no período de 2000 a 2008.

Botucatu apresenta 4% de sua área territorial (1483 km²) ocupado por cana de açúcar, com rendimento aproximado de 420.000 toneladas de cana por ano. Porém nos meses de inverno e primavera, a partir de junho até novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar e das usinas que produzem açúcar e álcool das cidades circunvizinhas, visto que as cidades adjacentes (70 cidades dentro de um raio de 100 km) totalizam um rendimento aproximado de 36 milhões de toneladas de cana por ano (CODATO et al., 2008). O ciclo da colheita da cana de açúcar termina no mês de novembro, devido a dificuldade do transporte da matéria prima no período chuvoso. Nos meses de outubro a dezembro, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, até atingir valores de $AOD = 0,14$ ou $20,0 \text{ ug.m}^{-3}$. De janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir o menor nível de concentração AOD no mês de maio (0,077).

Nijmeh e Mamlook (2000) verificaram para uma superfície inclinada a 45° com face voltada para o Sul na cidade de Amman (Jordânia) cuja latitude é de 31° 59' N, as seguintes razões entre irradiação global inclinada e horizontal: 1,65 (janeiro); 1,68 (fevereiro); 1,22 (março); 1,03 (abril); 0,86 (maio); 0,76 (junho); 0,80 (julho); 0,93 (agosto); 1,11 (setembro); 1,39 (outubro); 1,72 (novembro) e 1,63 (dezembro). Wenxian et al. (1995)

também verificaram essa tendência de evolução das razões, todavia esses autores apresentaram razões entre a irradiação global horizontal com a inclinada para 133 estações da Província chinesa de Yunnan (latitudes de 21 a 29° N). No verão dessa região (maio, junho e julho) as razões foram em torno de 0,98; 0,94; 0,85; 0,75 e 0,63 para superfícies inclinadas a 5°, 10°, 20°, 30° e 40°, respectivamente. Porém no inverno (dezembro e janeiro), as razões não ultrapassaram 1,12, com pequenas diferenças entre as inclinações.

Por conseguinte, as tendências verificadas por esses autores corroboram com as encontradas para Botucatu nas três inclinações, com valores maiores das razões entre $\left(\overline{H}_{G\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ no inverno e menores no verão, com intensidades crescentes com o aumento dos ângulos de inclinação.

Essa análise geral da evolução da irradiação global em função das inclinações permite a elaboração de um planejamento de submissão de superfícies coletoras em determinadas inclinações (Tabela 04), objetivando o máximo aproveitamento dos níveis energéticos disponíveis em cada mês na região de Botucatu – SP.

Normalmente é recomendado que os coletores solares sejam inclinados com ângulos iguais à latitude local por permitirem boas eficiências de conversão ao longo do ano (OLADIRAN, 1995; LI e LAM, 2007). Sem modificações nos ângulos de inclinação dos coletores ao longo do ano, os totais anuais de irradiação global verificados são maiores para a inclinação de 22,85° (7193,24 MJ m⁻²), corroborando com o recomendado.

Contudo, com a possibilidade de modificar a intensidade de inclinação ao longo do ano aumenta-se o ganho de irradiação global disponível em torno de 324,92 MJ m⁻² (4,74%) quando comparado com a inclinação recomendada (latitude local).

Ao longo do ano pode ser observada uma variação na quantidade de energia global disponível de 169,26 MJ m⁻² para a inclinação de 22,85°, cujos valores acumulados máximos e mínimos mensais seriam obtidos em abril (679,26 MJ m⁻²) e junho (510,00 MJ m⁻²).

Por conseguinte, com a modificação da intensidade de inclinação ao longo dos meses, poderiam ser alcançados ganhos anuais nos níveis de energia global incidentes de 473,95 MJ m⁻²; 663,16 MJ m⁻²; e 1017,29 MJ m⁻² em relação aos totais anuais verificados nas superfícies inclinadas a 12,85°; 32,85° e para a superfície horizontal,

respectivamente. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Oladiran (1995), que sugeriu inclinações iguais a $\langle L - 10^\circ \rangle$ e $\langle L + 10^\circ \rangle$ em coletores dependendo da estação do ano, para o Hemisfério Norte.

Tabela 04. Disponibilidade total mensal de irradiação global em diferentes superfícies e em ângulos otimizados ao longo do ano.

Mês	Horizontal	12,85°	22,85°	32,85°	Ângulo de Inclinação	Valores otimizados
Irradiação global (MJ m ⁻²)						
Janeiro	582,20	570,46	543,44	508,02	horizontal	582,20
Fevereiro	563,94	532,04	525,22	546,99	horizontal	563,94
Março	606,00	667,70	651,76	608,00	12,85°	667,70
Abril	526,28	638,10	679,26	582,90	22,85°	679,26
Maio	442,90	498,44	616,36	573,15	22,85°	616,36
Junho	395,68	537,81	510,00	554,31	32,85°	554,31
Julho	423,83	531,40	572,70	581,24	32,85°	581,24
Agosto	505,25	558,10	585,07	676,27	32,85°	676,27
Setembro	541,73	584,74	614,34	600,77	22,85°	614,34
Outubro	618,14	683,23	650,07	531,62	12,85°	683,23
Novembro	638,89	620,21	643,28	544,08	22,85°	643,28
Dezembro	656,03	621,98	601,74	547,63	horizontal	656,03
Total anual	6500,87	7044,21	7193,24	6854,99	-	7518,16

Entretanto, nesse enfoque outras inclinações ainda podem ser aplicadas. Ahmad (1989) verificou para a latitude 24°54' N (Karachi, Paquistão) que o máximo e o mínimo potencial de $\left(\overline{H}_G^d\right)$ foram encontrados em superfícies inclinadas a 30° e 90°, cujos totais anuais foram em torno 7467 MJ m⁻² e 4055 MJ m⁻².

De Miguel et al. (1995), demonstraram a possibilidade de uma variação dos ângulos de inclinação ao longo do ano, na cidade de Burgos (Espanha), propondo de janeiro a dezembro as inclinações de 70°; 60°; 45°; 30°; 20°; 7°; 10°; 20°; 40°; 50°; 60° e 70°, cujos totais mensais variaram de 279 a 750 MJ m⁻² (janeiro a julho) e deste valor a 241 MJ m⁻² (julho-dezembro), com um total anual de 5911,8 MJ m⁻².

Villarrubia et al. (1980) demonstrou que ângulos de inclinação acima de 30° não apresentam ganhos nos valores totais anuais de irradiação global disponíveis, pois ocorreram decréscimos de 6069 MJ m⁻² para 4068 MJ m⁻² quando se aumenta a inclinação de

30° para 90°. Entretanto, esses autores notaram ganhos significativos de energia disponível quando se aplicou ângulos de inclinação, visto que na horizontais foram verificados totais anuais de 5355 MJ m^{-2} , que evoluíram para os níveis supracitados em 30°.

4.3. Níveis de irradiação direta em superfícies horizontais e inclinadas

Nas inclinações de 22,85° e 32,85°, pode-se observar na Figura 18, que entre os equinócios (março a setembro) os níveis médios mensais de $\left(\overline{H}_B^d\right)$ foram superiores nos plano inclinados. No mês de junho (solstício de inverno), foram verificados ganhos médios diários de $2,85 \text{ MJ m}^{-2}$; $3,42 \text{ MJ m}^{-2}$ e $5,24 \text{ MJ m}^{-2}$ de irradiação direta diária nas superfícies inclinadas a 12,85°; 22,85° e 32,85° quando comparadas com os valores encontrados nos planos horizontais.

Os valores máximos de $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ foram encontrados em abril ($16,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) na inclinação de 12,85° e os mínimos em janeiro ($6,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) na inclinação de 32,85°. Independentemente do ângulo de inclinação da superfície, o mês de janeiro apresentou os menores índices de $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$, decorrentes das altas razões de nebulosidade (Tabela 01). Nas superfícies inclinadas a 12,85° e 22,85°, os picos máximos de $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ ocorreram no mês de abril ($16,71$ e $16,49 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto que, na inclinação de 32,85° foi no mês de agosto ($16,23 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), ou seja, os valores máximos possuem a mesma intensidade, porém sazonalidades diferentes.

Essas evoluções médias mensais de $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{BH}^d\right)$ apresentaram variações totalmente dependentes das condições atmosféricas locais relacionadas à nebulosidade e precipitação de cada mês, pois nos meses em que estes fatores apresentaram menores intensidades, a transmissividade atmosférica da irradiação direta foi elevada, e vice-versa, permitindo a variação sazonal. Todavia, a variação ao longo do ano das irradiações diretas inclinadas acompanham a evolução dos níveis da irradiação global em cada inclinação, visto que o aumento do ângulo de inclinação propicia maiores perdas no verão e maiores ganhos no inverno para essas duas componentes da irradiação incidente num plano inclinado.

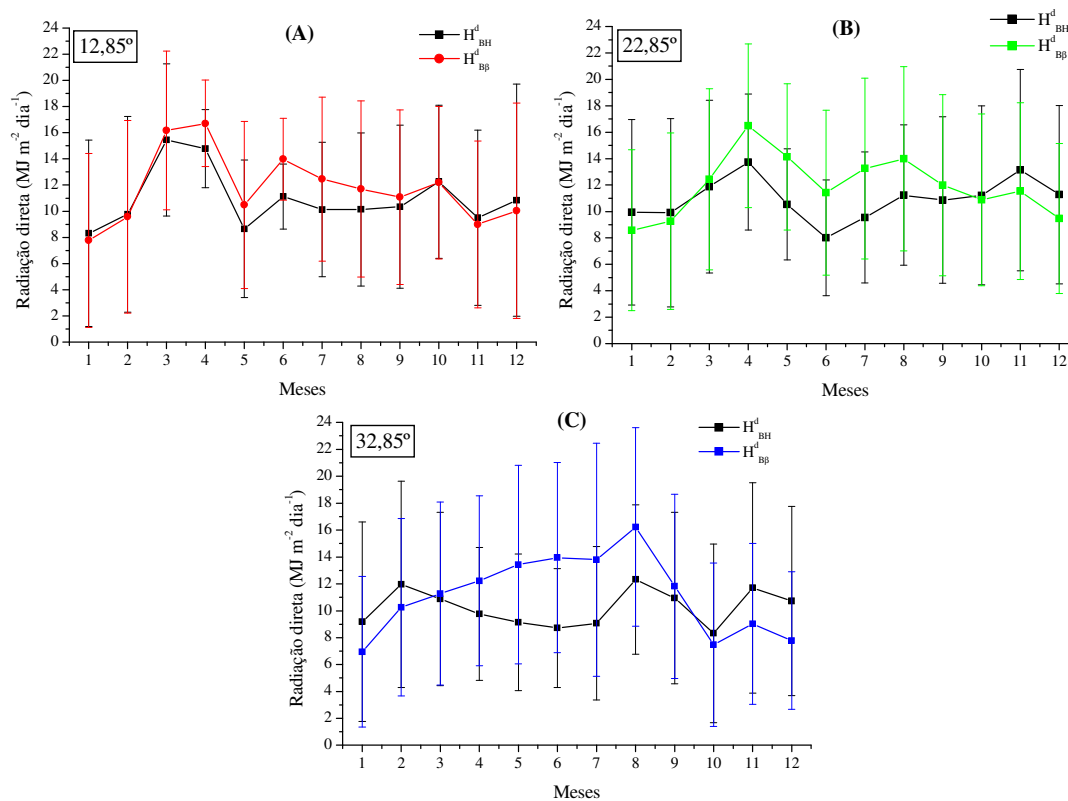


Figura 18. Evolução anual da irradiação direta medida na incidência e projetada em superfícies horizontais e superfícies inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Os desvios médios mensais entre as medidas de irradiação direta na superfície inclinada e horizontal aumentam com a intensidade da inclinação (Figura 19). Em todas as inclinações os ganhos e perdas máximas são verificados em junho e dezembro, com valores variando 20,4%, 29,9% e 37,5% para os desvios positivos e de -8,0%, -19,1% e -37,8% para os desvios negativos, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente.

Ramírez e Salgado (2005), analisando superfícies inclinadas com ângulo igual a latitude local em 30 cidades mexicanas, verificaram que na parte Sul do país ocorre um aumento em torno de 30% no mês de dezembro e na região Noroeste, ganhos por volta de 60% para a mesma época.

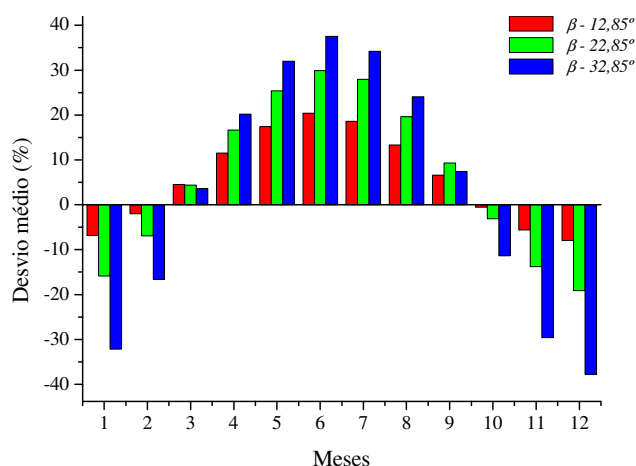


Figura 19. Evolução anual dos desvios médios mensais das irradiações direta em superfícies inclinadas a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$ como referência em relação à superfícies horizontais, para as mesmas épocas de medidas.

A Figura 20 mostra os valores médios mensais de irradiação direta em diferentes períodos de medidas. Os menores valores mensais verificados no período entre 1998 e 2005 foram em janeiro ($8,31 \pm 7,12 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), enquanto que os maiores ocorreram em março e abril e com valores semelhantes ($11,39 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e $11,46 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Entre agosto e novembro os níveis de $\left(\overline{H}_{BH}^d\right)$ permaneceram constantes e superiores a $10,21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$.

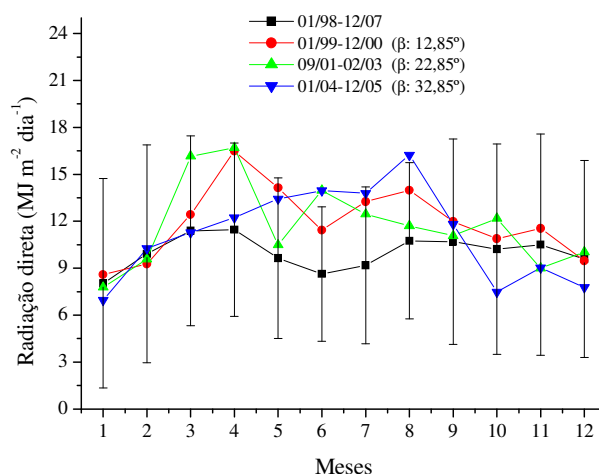


Figura 20. Irradiação direta média mensal diária para diferentes períodos de medidas em superfícies horizontais, separados em função dos períodos de medidas em cada inclinação.

As oscilações verificadas nos meses de março, abril, junho, outubro e novembro são decorrentes principalmente das diminuições de nebulosidade e precipitação pluviométrica nos respectivos meses (Tabela 01).

As razões entre a irradiação direta nas superfícies inclinadas e nas superfícies horizontais são apresentadas na Figura 21. De uma maneira geral, os níveis de $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ são superiores aos $\left(\overline{H}_{BH}^d\right)$ entre os meses de março e setembro, com picos máximos crescentes em função do aumento da inclinação. Nos demais meses ocorre um inversão, para maiores valores de inclinação, são verificados menores valores de $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$.

As razões apresentadas na Figura 21 são semelhantes aos valores apresentados para o fator geométrico R_B (Figura 07). Porém, não ocorrem as mesmas simetrias existentes entre as curvas do fator geométrico R_B em função da interferência da atmosfera na difusa de parte da radiação.

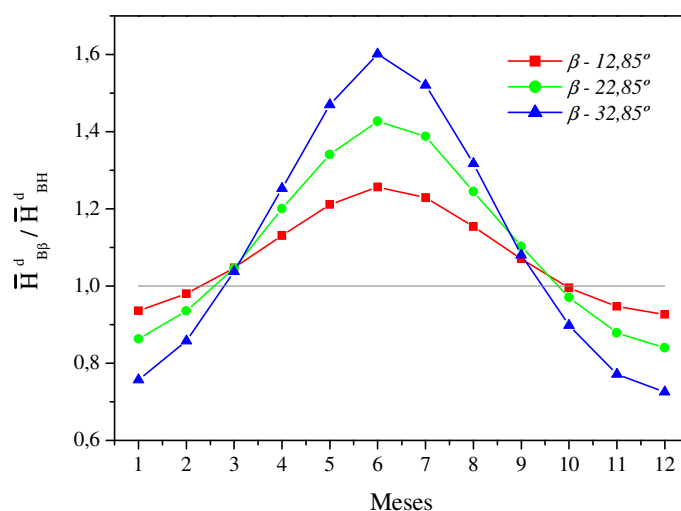


Figura 21. Razões médias mensais entre $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{BH}^d\right)$.

O uso dessas razões das irradiações diretas permite as análises sazonalidade com minimização dos efeitos climáticos. Todavia, essas variações sazonais para a irradiação direta são muito mais acentuadas quando comparadas com as irradiações globais nas mesmas inclinações. Tanto a componente global como a direta apresentam máximos em junho e mínimos em dezembro.

Os ganhos de radiação direta nas inclinações foram de 25,63%, 42,65% e 60,08%, superiores em quando comparados com os ganhos das irradiações globais em 1,87%, 11,32% e 20,8% para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Já as reduções dos níveis de irradiação direta também foram maiores com o incremento de inclinação, sendo de 7,3%, 16,04% e 27,44% para as mesmas inclinações.

Tian et al. (2001) citam que durante o verão (Hemisfério Norte) as razões entre irradiação direta em superfícies inclinadas com horizontais, aumentam com o incremento do ângulo de inclinação, pois o Sol está mais distante do local e assim, o ângulo entre os raios solares e a normal da superfície inclinada decresce com o aumento da inclinação. Ainda segundo estes autores, as razões entre $\left(\overline{H}_{B\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{BH}^d\right)$ atingem um máximo em inclinações em torno de 70°, para o qual os raios solares se tornam paralelos a normal da superfície inclinada. Em contraste, o ângulo entre os raios solares e o zênite da superfície atinge o seu valor mínimo no verão (Hemisfério Norte).

A Tabela 05 apresenta as somas mensais de irradiação direta disponíveis para superfícies inclinadas e horizontais ao longo do ano. Esses resultados são importantes em processos de conversão, por definirem níveis dentro do total incidente que estão prontamente disponíveis aos processos de conversão.

Observa-se que na inclinação recomendada para coletores, 22,85° (latitude local) o nível energético anual de irradiação direta é 4367,4 MJ m⁻², valor este superior em 72,4 MJ m⁻²; 284,67 MJ m⁻² e 718,03 MJ m⁻² quando comparado com as disposições de superfícies fixas em 12,85°, 32,85° e horizontal. Todavia, a modificação dos ângulos de inclinação ao longo do ano possibilita ganhos de 16,82% quando comparado com a inclinação recomendada (22,85°). Os maiores valores totais mensais foram encontrados em agosto (503,23 MJ m⁻²) para a inclinação de 32,85° e nos meses de março e abril (501 MJ m⁻²) na inclinação de 12,85°. Os menores valores são encontrados nos meses de verão e em grande parte inferiores a 300 MJ m⁻².

Tabela 05. Disponibilidade total mensal de irradiação direta em diferentes superfícies e em ângulos otimizados ao longo do ano.

Mês	Horizontal	12,85°	22,85°	32,85°	Ângulo de inclinação	Valores otimizados
Irradiação direta (MJ m ⁻²)						
Janeiro	249,12	241,03	266,00	215,45	22,85°	266,00
Fevereiro	277,67	268,19	259,51	287,20	32,85°	287,20
Março	353,04	501,11	385,30	349,40	12,85°	501,11
Abril	343,72	501,20	494,64	366,75	12,85°	501,20
Maió	298,86	325,10	438,09	416,37	22,85°	438,09
Junho	259,04	419,32	342,91	418,49	12,85°	419,32
Julho	284,66	385,94	410,68	427,62	32,85°	427,62
Agosto	333,28	362,80	433,47	503,23	32,85°	503,23
Setembro	320,87	332,39	359,57	354,42	22,85°	359,57
Outubro	316,62	377,74	337,44	231,74	12,85°	377,74
Novembro	315,23	269,94	346,19	270,86	22,85°	346,19
Dezembro	297,22	311,22	293,58	241,18	12,85°	311,22
Total anual	3649,34	4295,97	4367,37	4082,70	-	4738,49

4.4. Níveis de irradiação refletida em superfícies inclinadas

Com o aumento da intensidade das inclinações, a irradiação refletida apresentou incrementos incidentes diferenciados em cada superfície (Figura 22). Ao longo do o plano inclinado a 12,85° recebe em média 0,055 MJ m⁻² dia⁻¹, com pico máximo em outubro (0,063 MJ m⁻² dia⁻¹) e mínimo em maio (0,046 MJ m⁻² dia⁻¹). Já a superfície inclinada a 22,85° recebeu no mínimo 0,11 MJ m⁻² dia⁻¹ de $\left(\overline{H}_{R\beta}^d\right)$ a mais que a menor inclinação estudada, todavia, neste caso o pico máximo foi verificado em abril (0,21 MJ m⁻² dia⁻¹) e o mínimo em junho (24,9% inferior ao pico máximo). Nesse sentido, na inclinação de 32,85° foram encontrados valores médios anuais de irradiação refletida pela superfície (grama) superiores em 85,2% e 49,7%, quando comparados com os planos inclinados a 12,85° e 22,85°, respectivamente.

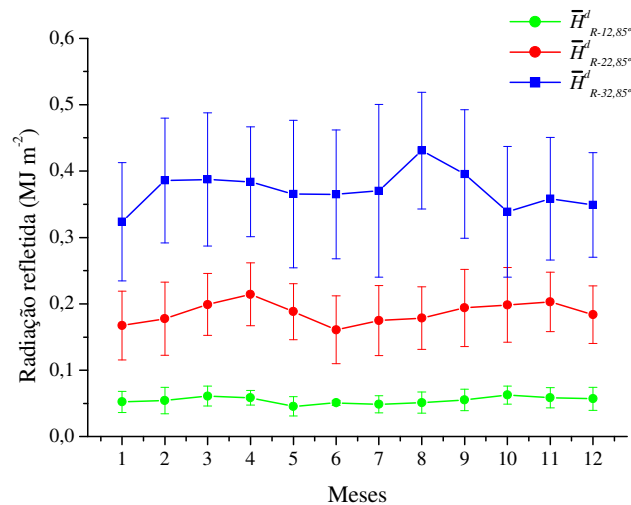


Figura 22. Evolução anual da radiação refletida incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Logicamente, a variação da irradiação refletida ao longo do ano acompanhou a evolução da irradiação global, visto que, pela equação 11, os níveis de $\left(\bar{H}_{R\beta}^d\right)$ interceptados por uma superfície inclinada dependem do albedo da superfície e dos valores de $\left(\bar{H}_{G\beta}^d\right)$. A razão entre a irradiação incidente no plano inclinado sobre a radiação refletida pelo solo (nesse caso, grama), representada pelo termo $[(1 - \cos(\beta))/2]$, foi de 0,0125; 0,0392 e 0,0799. Esses valores, associados a variação de $\left(\bar{H}_{G\beta}^d\right)$ em cada superfície, justificam a grande diferença entre os níveis de $\left(\bar{H}_{R\beta}^d\right)$ verificados para cada plano inclinado.

Na inclinação de 32,85°, o desvio máximo ($0,113 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi verificado no mês de julho, enquanto os níveis energéticos máximos e mínimos de $\left(\bar{H}_{R\beta}^d\right)$ foram encontrados no mês de agosto ($0,431 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e janeiro ($0,324 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). No plano inclinado a 22,85°, também não foi notada uma sincronização dos meses com os picos máximos e mínimos de $\left(\bar{H}_{R\beta}^d\right)$ com os meses maiores e menores desvios. Já para a inclinação de 12,85°, existem poucas oscilações ao longo do ano, com desvio máximo (fevereiro) em torno de 31,9% do valor máximo de $\left(\bar{H}_{R\beta}^d\right)$ nessa superfície (outubro).

As irradiações refletidas que atingem as superfícies inclinadas equivalem a 0,284%; 0,947% e 1,975% da irradiação global incidente nas inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Esses valores percentuais permanecem constantes ao longo do ano.

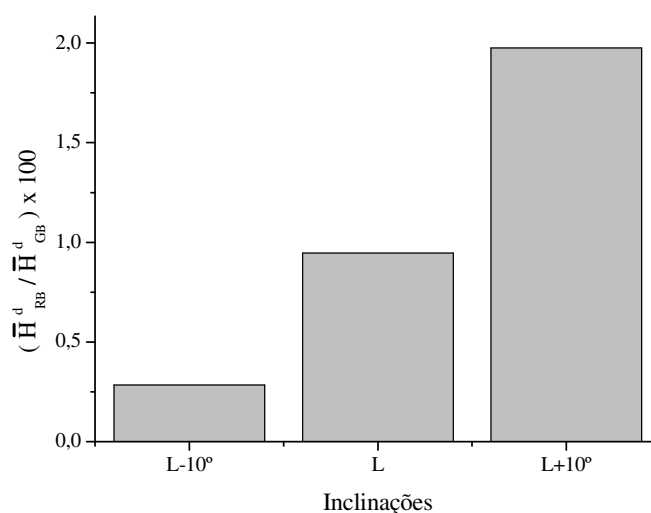


Figura 23. Porcentagem da irradiação global referente aos níveis de irradiação refletida incidente em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

4.5. Níveis de irradiação difusa incidentes em superfícies horizontais e inclinadas

Na Figura 24 são apresentadas as evoluções anuais da irradiação difusa de referência (obtida pela diferença entre as irradiações global, direta e refletida) e a medida sem a aplicação de fatores de correção nas superfícies inclinadas e as irradiações difusas médias mensais também de referência (obtida pela diferença entre as irradiações global e direta) nas superfícies horizontais. A irradiação difusa em superfícies inclinadas acompanha a evolução anual da irradiação difusa para superfícies horizontais, com maiores valores no verão e menores no inverno, decorrentes dos maiores e menores condições de cobertura do céu nas duas estações, respectivamente.

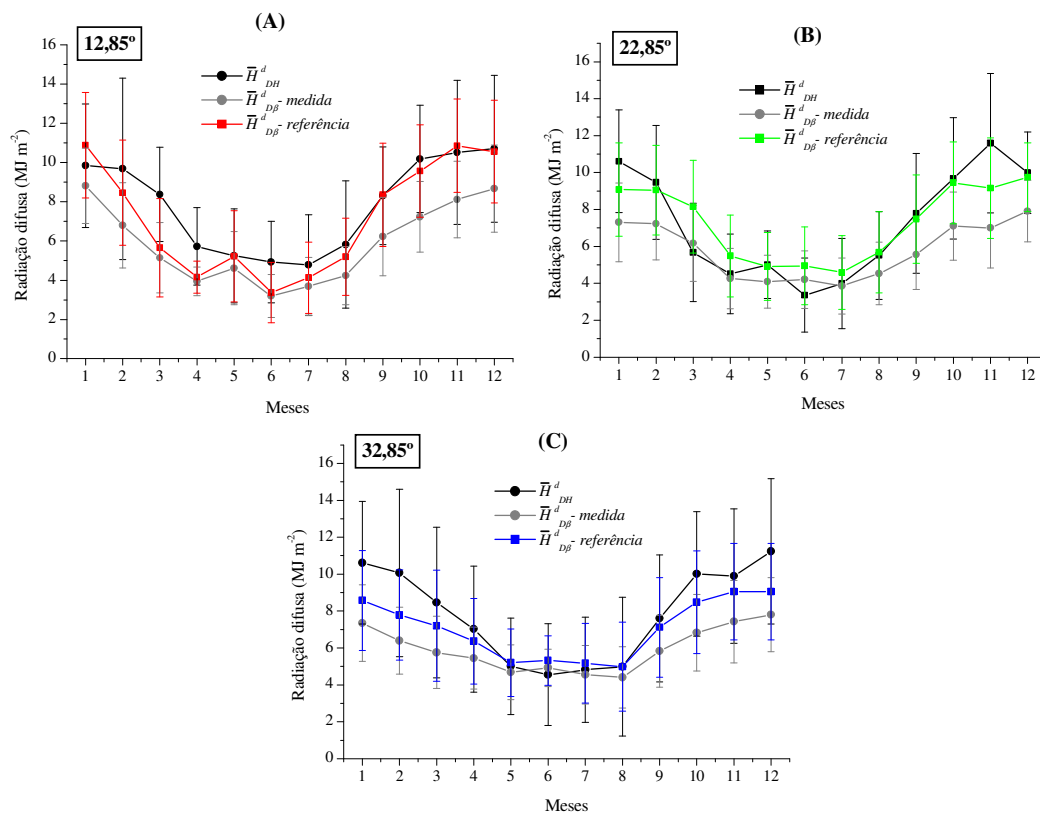


Figura 24. Evolução anual da irradiação difusa de referência ($\overline{H}^d_{DR}$) em superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Observa-se que os níveis de ($\overline{H}^d_{DBR}$) que na inclinação de 12,85° (09/2001 a 02/2003) são menores que os verificados na horizontal, com exceção apenas janeiro, maio, setembro e novembro, que são superiores em torno 7,4%; 5,7%; 0,56% e 8,9%, ou em 0,73; 0,30; 0,05 e 0,94 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, quando comparados com a horizontal. As maiores diferenças entre a superfície inclinada a 12,85° e a superfície horizontal são observadas em março, abril e junho, onde a horizontal recebe níveis difusos superiores em 2,92 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$; 1,22 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ e 1,28 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ quando comparados com os valores no plano inclinado.

Na inclinação de 22,85°, entre os equinócios de outono e primavera, a superfície inclinada apresentou valores superiores aos verificados no plano horizontal, sendo as maiores diferenças encontradas em março, abril e junho (2,48; 1,08 e 1,59 $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). Já

nos meses de janeiro e novembro, na superfície horizontal incidiu em torno de 1,52 e 2,43 MJ m⁻² dia⁻¹ a mais que o plano inclinado. Nos meses de fevereiro, maio e outubro, as duas superfícies (horizontal e inclinada a 22,85°) receberam níveis semelhantes de $\left(\overline{H}_{DR}^d\right)$, em média 9,26; 5,00 e 9,56 MJ m⁻² dia⁻¹.

Na inclinação de 32,85°, foram verificados níveis energéticos de $\left(\overline{H}_{DR}^d\right)$ similares entre as duas superfícies em maio e agosto (5,15 MJ m⁻² e 4,98 MJ m⁻²). Entre setembro e maio, o plano horizontal recebeu mais irradiação difusa quando comparado com o inclinado, sendo as maiores diferenças encontradas em dezembro, janeiro e fevereiro (2,18 MJ m⁻²; 2,04 MJ m⁻² e 2,29 MJ m⁻²). O contrário é notado nos meses de inverno, com maiores diferenças ocorridas em junho (0,73 MJ m⁻²).

Por conseguinte, os níveis de irradiação difusa nas três superfícies inclinadas estudadas, apresentaram uma evolução anual dependente das condições climáticas, com destaque maior para a nebulosidade e as precipitações pluviométricas. Em geral, como nos meses de verão as razões de nebulosidade são maiores (Tabela 01), a componente difusa da irradiação aumenta e a componente direta diminui. Para condições de cobertura de céu tendendo a aberto, ocorre uma inversão (DAL PAI, 2005; GOMES, 2006b).

Pode ser observado, que existe uma tendência da ocorrência de picos nos níveis de irradiação difusa no mês de novembro, justificados pelo início do período das chuvas na região. Porém, nos anos de 2004 e 2005, ocorreu uma inversão no regime pluviométrico de Botucatu, pois foram registrados em torno de 56 mm a mais de precipitações no mês de outubro quando comparado com novembro, evidenciando assim, as reduções nos níveis de $\left(\overline{H}_{DR}^d\right)$ nas superfícies horizontal e inclinada, concomitantemente.

Os valores de $\left(\overline{H}_{DR\beta}^d\right)$ medidos se apresentam sempre inferiores aos valores de referência, com menores diferenças no período de inverno, demonstrando a necessidade da aplicação de correções isotrópicas e anisotrópicas com intensidades diferenciadas ao longo do ano.

Os desvios médios mensais entre a irradiação difusa de referência nas superfícies inclinadas e horizontais são apresentados na Figura 25. Observa-se que em grande partes dos meses, as superfícies horizontais recebem níveis de $\left(\overline{H}_{DR}^d\right)$ superiores do que as

inclinações de $12,85^\circ$ e $32,85^\circ$. Todavia, as maiores perdas ocorrem na inclinação de $12,85^\circ$, que atingem desvios de até $-48,04\%$ (março), $-37,65\%$ (abril) e $-46,01\%$ (junho). Já os desvios negativos em $32,85^\circ$, são inferiores a $-29,34\%$, ocorridos no mês de fevereiro.

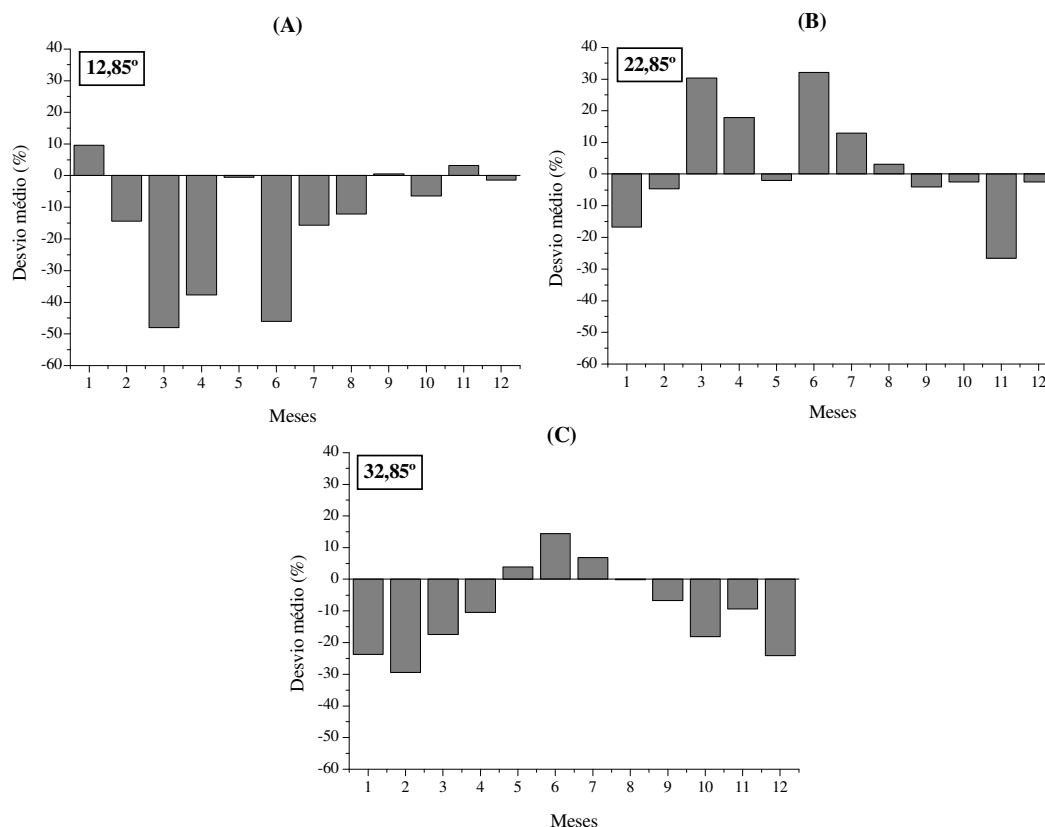


Figura 25. Desvios médios mensais da irradiação difusa de referência incidente em superfícies inclinadas a $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, comparada com os valores médios mensais da irradiação difusa de referência em superfície horizontal.

Os desvios máximos positivos foram verificados na inclinação de $22,85^\circ$ nos meses de março e junho ($30,35\%$ e $32,15\%$). Em geral, os menores desvios são observados nos meses de agosto, setembro e outubro para todas as inclinações, pois ocorrem menores variações das condições atmosféricas locais no período de inverno e também um aumento dos aerossóis na região nesse período (Figura 17). Por conseguinte, esses pequenos desvios estão diretamente ligados as variações atmosféricas e não ao efeito da intensidade de inclinação.

Na Figura 26, são apresentadas as razões médias mensais entre a irradiação difusa de referência em superfícies inclinadas e a difusa de referência para superfícies horizontais. Não são verificadas tendências de variações sazonais como nas componentes global e direta. Nas inclinações de 12,85° e 32,85° nota-se que na grande maioria dos meses os níveis de $\left(\overline{H}_{D\beta}^d\right)$ foram inferiores aos níveis de $\left(\overline{H}_{DH}^d\right)$, principalmente no inverno.

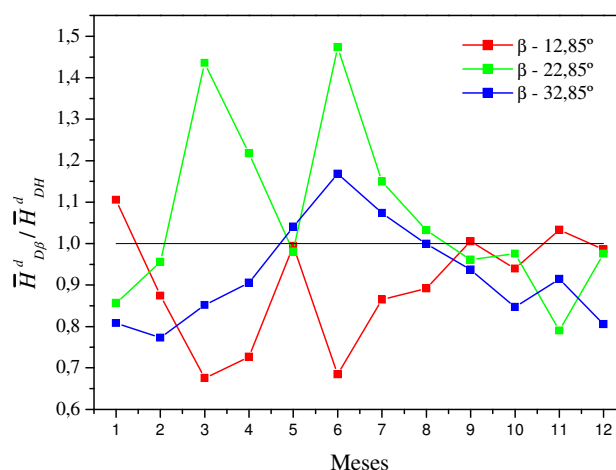


Figura 26. Razões médias mensais entre $\left(\overline{H}_{D\beta}^d\right)$ e $\left(\overline{H}_{DH}^d\right)$.

Para se obter um melhor desempenho na estimativa e na análise da evolução anual da irradiação difusa, recomenda-se a inclusão de fatores de correção isotrópicos e anisotrópicos (BUREK et al., 1988; LEBARON et al., 1990; BATTLES et al., 1995; DAL PAI, 2005). Contudo, a quantificação de cada uma das componentes que necessitam de correção, ainda é desconhecida para aplicações em superfícies inclinadas que utilizam o anel de sombreamento Melo-Escobedo para medidas da irradiação difusa.

Com isso, práticas que dependam diretamente dessa componente podem ser exploradas de maneira a se ter um planejamento da maior disponibilidade ao longo do ano, apenas com a aplicação de valores numéricos que contemplem ambas as componentes de correção. Assim, são apresentadas apenas as evoluções mensais das correções da irradiação difusa para cada período de medidas nas superfícies inclinadas e horizontais (Tabela 06). Esses fatores foram obtidos pela razão entre a irradiação difusa de referência e a irradiação difusa medida.

Tabela 06. Evolução dos fatores de correção da irradiação difusa medida em superfícies inclinadas e horizontais pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo.

Meses	1999 - 2000		2001-2003		2004 - 2005	
	Horizontal	$\beta - 22,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 12,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 32,85^\circ$
Janeiro	1,319 $\pm$ 0,19	1,252 $\pm$ 0,10	1,296 $\pm$ 0,12	1,232 $\pm$ 0,10	1,319 $\pm$ 0,16	1,165 $\pm$ 0,14
Fevereiro	1,346 $\pm$ 0,14	1,256 $\pm$ 0,08	1,317 $\pm$ 0,61	1,247 $\pm$ 0,16	1,349 $\pm$ 0,21	1,211 $\pm$ 0,15
Março	1,451 $\pm$ 0,20	1,334 $\pm$ 0,11	1,269 $\pm$ 0,05	1,075 $\pm$ 0,17	1,360 $\pm$ 0,20	1,234 $\pm$ 0,19
Abril	1,504 $\pm$ 0,17	1,284 $\pm$ 0,09	1,199 $\pm$ 0,06	1,059 $\pm$ 0,12	1,250 $\pm$ 0,16	1,148 $\pm$ 0,16
Mai	1,394 $\pm$ 0,18	1,195 $\pm$ 0,11	1,134 $\pm$ 0,09	1,110 $\pm$ 0,11	1,188 $\pm$ 0,16	1,109 $\pm$ 0,11
Junho	1,307 $\pm$ 0,16	1,155 $\pm$ 0,13	1,112 $\pm$ 0,08	1,031 $\pm$ 0,09	1,175 $\pm$ 0,11	1,077 $\pm$ 0,10
Julho	1,319 $\pm$ 0,16	1,177 $\pm$ 0,12	1,126 $\pm$ 0,11	1,104 $\pm$ 0,10	1,180 $\pm$ 0,20	1,113 $\pm$ 0,17
Agosto	1,389 $\pm$ 0,17	1,252 $\pm$ 0,08	1,276 $\pm$ 0,20	1,226 $\pm$ 0,17	1,128 $\pm$ 0,13	1,092 $\pm$ 0,16
Setembro	1,423 $\pm$ 0,18	1,356 $\pm$ 0,14	1,369 $\pm$ 0,17	1,351 $\pm$ 0,14	1,229 $\pm$ 0,15	1,212 $\pm$ 0,16
Outubro	1,404 $\pm$ 0,13	1,343 $\pm$ 0,10	1,413 $\pm$ 0,22	1,330 $\pm$ 0,15	1,327 $\pm$ 0,13	1,232 $\pm$ 0,10
Novembro	1,457 $\pm$ 0,15	1,318 $\pm$ 0,11	1,404 $\pm$ 0,20	1,354 $\pm$ 0,17	1,317 $\pm$ 0,16	1,234 $\pm$ 0,19
Dezembro	1,385 $\pm$ 0,13	1,240 $\pm$ 0,10	1,287 $\pm$ 0,09	1,224 $\pm$ 0,10	1,343 $\pm$ 0,18	1,159 $\pm$ 0,13

Observa-se que os menores valores dos fatores de correção ocorrem no inverno, para superfícies horizontais e inclinadas. Ainda pode ser notado que, existe uma tendência de redução do valor numérico de correção com o aumento da inclinação. Os maiores desvios dos fatores foram observados na inclinação de $32,85^\circ$, permitindo inferir que o efeito da nebulosidade e dos parâmetros climáticos influencia mais as medidas da irradiação difusa nesse ângulo.

Independentemente da inclinação, os fatores de correção nas superfícies inclinadas apresentam a mesma tendência observada nas superfícies horizontais, com picos máximos no verão e mínimos no inverno. Nos meses de outubro a março, ocorrem maiores contribuições da correção isotrópica propiciada pelas partículas de vapor d'água presentes na atmosfera, enquanto que nos meses de inverno, se tem um maior número de dias de céu aberto, conseqüentemente, um incremento da componente anisotrópica da irradiação difusa (Dal Pai, 2005).

Nota-se nos meses de dezembro e janeiro que os valores do fator de correção decrescem com o aumento da inclinação. Como no verão são verificados maiores níveis de $\left(\overline{H}_{GH}^d\right)$ ocorre também um aumento significativo da irradiação refletida que atinge as superfícies inclinadas (Figura 22). Quanto maior o ângulo de inclinação, maior a predisposição da superfície em interceptar irradiação refletida, com isso a irradiação difusa de referência

apresenta valores menores, que por sua vez, diminui os valores numéricos dos fatores de correção mensais.

As diferenças observadas entre as superfícies horizontais em cada período de medidas são resultados diretos das variações de nebulosidade e aerossóis na atmosfera do município (Tabela 01), influenciando principalmente a correção anisotrópica que é dependente das condições de cobertura do céu (DAL PAI, 2005).

Na Figura 27 são apresentadas as comparações entre os fatores de correção mensais para a irradiação difusa em superfícies inclinadas supracitados e os valores médios mensais do fator de correção isotrópico desenvolvido para o anel de sombreamento Melo-Escobedo (OLIVEIRA et al., 2002; DAL PAI e ESCOBEDO, 2004).

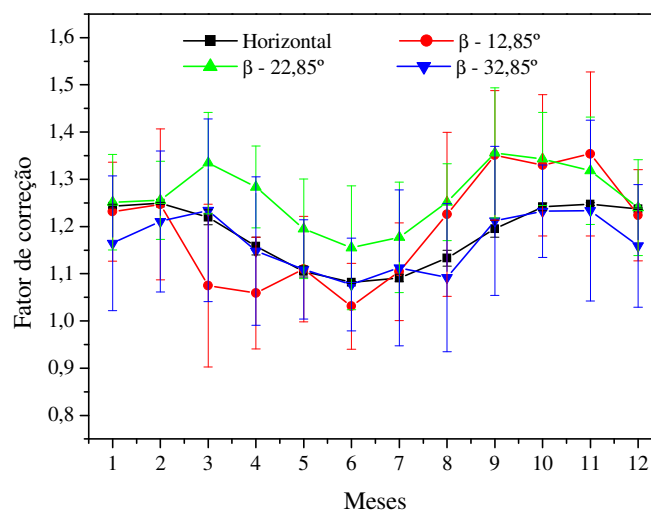


Figura 27. Evolução dos fatores de correção da irradiação difusa medida em superfícies inclinadas e horizontais pelo anel de sombreamento Melo-Escobedo.

Observa-se que entre os equinócios, para a inclinação de $32,85^\circ$, os valores dos fatores de correção são semelhantes aos aplicados isotropicamente em superfícies horizontais. Para a inclinação igual a latitude local ($22,85^\circ$), os fatores de correção são em grande parte dos meses superiores aos aplicados na horizontal e na inclinação de $12,85^\circ$, os fatores de correção inclinados são inferiores no verão e outono e superiores no inverno e primavera aos verificados para a horizontal. Esse comportamento indica efeitos diferenciados das condições

atmosféricas, em conjunto com a intensidade de inclinação nos fatores de correção ao longo do ano.

Essas evoluções demonstram que a irradiação difusa acompanha a evolução da irradiação global, ambas em superfícies inclinadas, pois nas inclinações foram verificados valores de irradiação global inferiores ao da superfície horizontal no verão. Todavia, existe uma grande contribuição da irradiação difusa no total de irradiação incidido nesses ângulos de inclinação nesse período, visto que nas inclinações os níveis de $\left(\overline{H}_D^d\right)$ são semelhantes aos verificados para os planos horizontais.

Os totais mensais de irradiação difusa incidentes em superfícies com diferentes inclinações são apresentados na Tabela 07. Neste caso, os ganhos com a mudança do ângulo de inclinação ao longo do ano totalizam $226,57 \text{ MJ m}^{-2}$ quando comparado com a inclinação de $22,85^\circ$. Entre os ângulos de inclinação de $12,85^\circ$, $22,85^\circ$ e $32,85^\circ$, as diferenças anuais não ultrapassam 103 MJ m^{-2} .

Tabela 07. Disponibilidade total mensal de irradiação difusa em diferentes superfícies e em ângulos otimizados ao longo do ano.

Mês	Horizontal	12,85°	22,85°	32,85°	Ângulo de inclinação	Valores otimizados
Irradiação difusa (MJ m^{-2})						
Janeiro	240,55	337,35	281,45	266,01	12,85°	337,35
Fevereiro	194,23	237,01	253,31	217,92	22,85°	253,31
Março	184,11	175,39	252,49	223,32	22,85°	252,49
Abril	141,36	124,82	164,63	190,89	32,85°	190,89
Maio	128,65	161,73	152,29	161,41	12,85°	161,73
Junho	116,21	101,15	148,55	159,67	32,85°	159,67
Julho	123,61	128,13	142,26	160,28	32,85°	160,28
Agosto	139,48	160,97	176,28	154,50	22,85°	176,28
Setembro	171,89	250,64	224,41	213,56	12,85°	250,64
Outubro	203,23	296,51	292,84	262,80	12,85°	296,51
Novembro	217,50	325,64	274,73	271,53	12,85°	325,64
Dezembro	242,02	327,17	302,16	280,61	12,85°	327,17
Total anual	2102,82	2626,51	2665,37	2562,51	-	2891,94

4.6. Frações da irradiação global em superfícies inclinadas e horizontais

As médias mensais dos índices de claridade $(\overline{K_T})$ diários são apresentados na Tabela 08 e na Figura 28. Independentemente do período de avaliação e da inclinação, os maiores valores foram verificados no mês de abril (média geral de 0,595), com exceção apenas da inclinação de 32,85° que apresentou os maiores valores de $(\overline{K_T})$ no mês de novembro (0,645). Essa tendência reflete claramente a diminuição da nebulosidade e das precipitações pluviométricas na região (Tabela 01), permitindo que se tenha um maior número de dias com céu limpo durante o mês de abril. Por conseguinte, entre os equinócios as superfícies horizontais apresentaram valores de $(\overline{K_T})$ superiores aos planos inclinados, sendo o oposto observado nos meses de verão.

Nos meses de verão (novembro a fevereiro), os valores de $(\overline{K_T})$ na inclinação de 12,85° são inferiores aos das demais inclinações, como por exemplo, no mês de janeiro temos 46,4% de irradiação global na superfície inclinada $\langle |L| - 10^\circ \rangle$, enquanto que nas demais temos 48,8% e 54,5%.

Na inclinação de 32,85°, foram verificados em grande parte do ano, níveis de irradiação global incidentes na superfície acima de 50% dos níveis esperados no topo da atmosfera, com exceção dos meses de junho e julho (inverno), ou seja, nessa inclinação são verificadas menores atenuações da irradiação na atmosfera ao longo do ano. Nas demais superfícies essas tendências são verificadas nos meses de janeiro e fevereiro, com índices de claridade acima de 0,46.

Nesse sentido, podem ser estabelecidos valores médios de $(\overline{K_T})$ em cada estação do ano para cada inclinação: verão – 0,480; 0,486; 0,509 e 0,564; outono – 0,575; 0,555; 0,561 e 0,545; inverno – 0,548; 0,545; 0,504 e 0,474; e na primavera – 0,538; 0,532; 0,553; e 0,573, para as superfícies horizontal e inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Assim, durante o verão e a primavera foi observada uma tendência de aumento dos valores de $(\overline{K_T})$ com o incremento das inclinações, enquanto que no inverno ocorreu uma inversão dessa tendência. A inclinação de 12,85° apresentou valores mais próximos aos da superfície horizontal.

Tabela 08. Índices de claridade ($\overline{K_T}$) médios mensais para superfícies horizontais e inclinadas, com face voltada para o Norte.

Meses	2001-2003		1999-2000		2004 - 2005	
	Horizontal	$\beta - 12,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 22,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 32,85^\circ$
Janeiro	$0,447 \pm 0,14$	$0,464 \pm 0,14$	$0,462 \pm 0,16$	$0,488 \pm 0,15$	$0,455 \pm 0,14$	$0,545 \pm 0,16$
Fevereiro	$0,482 \pm 0,16$	$0,486 \pm 0,16$	$0,483 \pm 0,15$	$0,496 \pm 0,15$	$0,482 \pm 0,15$	$0,539 \pm 0,16$
Março	$0,588 \pm 0,10$	$0,574 \pm 0,10$	$0,547 \pm 0,12$	$0,542 \pm 0,13$	$0,549 \pm 0,12$	$0,560 \pm 0,13$
Abril	$0,602 \pm 0,05$	$0,590 \pm 0,06$	$0,610 \pm 0,12$	$0,592 \pm 0,13$	$0,604 \pm 0,12$	$0,570 \pm 0,12$
Maiο	$0,514 \pm 0,13$	$0,502 \pm 0,14$	$0,584 \pm 0,10$	$0,549 \pm 0,12$	$0,575 \pm 0,10$	$0,504 \pm 0,10$
Junho	$0,586 \pm 0,04$	$0,577 \pm 0,04$	$0,523 \pm 0,14$	$0,482 \pm 0,15$	$0,517 \pm 0,14$	$0,436 \pm 0,14$
Julho	$0,549 \pm 0,13$	$0,539 \pm 0,14$	$0,554 \pm 0,14$	$0,515 \pm 0,15$	$0,552 \pm 0,14$	$0,475 \pm 0,14$
Agosto	$0,526 \pm 0,16$	$0,520 \pm 0,16$	$0,558 \pm 0,12$	$0,514 \pm 0,13$	$0,567 \pm 0,11$	$0,510 \pm 0,12$
Setembro	$0,519 \pm 0,15$	$0,517 \pm 0,15$	$0,546 \pm 0,15$	$0,528 \pm 0,16$	$0,526 \pm 0,15$	$0,513 \pm 0,16$
Outubro	$0,553 \pm 0,12$	$0,558 \pm 0,12$	$0,544 \pm 0,15$	$0,547 \pm 0,16$	$0,526 \pm 0,14$	$0,562 \pm 0,15$
Novembro	$0,505 \pm 0,13$	$0,520 \pm 0,13$	$0,565 \pm 0,13$	$0,583 \pm 0,13$	$0,558 \pm 0,12$	$0,645 \pm 0,14$
Dezembro	$0,489 \pm 0,15$	$0,508 \pm 0,16$	$0,515 \pm 0,13$	$0,542 \pm 0,13$	$0,502 \pm 0,13$	$0,607 \pm 0,15$

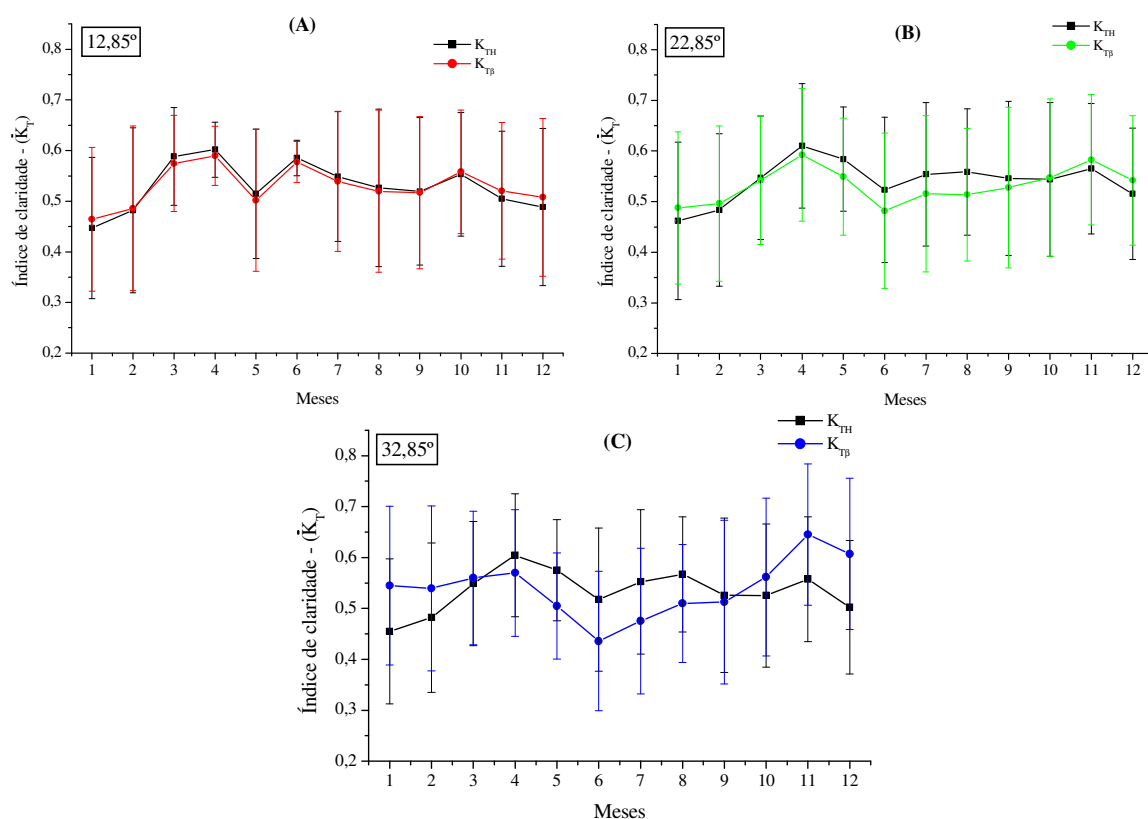


Figura 28. Índices de claridade ($\overline{K_T}$) médios mensais para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Observa-se que na análise das frações, ocorreu uma inversão da evolução verificada ao longo do ano para a irradiação global nas superfícies inclinadas (Figuras 11, 12 e 13). Neste caso, no período do inverno as frações para a superfície horizontal apresentou valores superiores aos das superfícies inclinadas, com diferenças acentuadas com o aumento do ângulo de inclinação. Esse fato é justificado pelos elevados valores da irradiação no topo da atmosfera para as superfícies inclinadas no período do inverno (Figura 09), que fazem as frações reduzirem, mesmo com os ganhos de irradiação global nos planos inclinados.

Foram propostas estimativas do tipo Liu e Jordan, com base nas correlações da partição diária com agrupamento anual, entre os índices de claridade (K_T) das superfícies inclinadas e horizontais, conforme a Figura 29.

Os níveis de irradiação global nas inclinações de 12,85° e 32,85° ao longo do ano foram maiores do que os verificados no plano horizontal, em função dos coeficientes angulares serem superiores a 1, todavia, esses coeficientes angulares encontrados são apenas estatísticos. Já na inclinação de 22,85° ocorreu uma inversão, com indicação de que a irradiação global na horizontal é maior do que na inclinada. Nota-se uma linearidade entre os valores de $(K_{T\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) , visto que para pequenos valores de (K_{TH}^d) são encontrados pequenos valores de $(K_{T\beta}^d)$.

Para a validação dos modelos de estimativas dos agrupamentos mensais da relação entre $(K_{T\beta})$ e (K_{TH}) , foram realizadas comparações com as medidas de irradiação global realizadas de 04/1998 e 12/1998 e ainda 01/2001 a 08/2001 para a inclinação de 22,85°; entre outubro e dezembro de 2001 e janeiro e fevereiro de 2003, para a inclinação de 12,85°; e entre janeiro de 2006 a dezembro de 2007 para a inclinação de 32,85°.

No desempenho das estimativas da irradiação global em superfícies inclinadas com base na irradiação global na horizontal, foram encontrados coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,88, que em conjunto com os demais índices estatísticos permitiram boas estimativas. Essas correlações de estimativa apresentaram tendências a superestimar os valores de $(K_{T\beta}^d)$, com MBE de 1,98%; 5,36% e 6,93% e índices de ajustamento em torno de 0,99. Todavia, quando os modelos são validados em função das frações estimadas não permitem análises em termos de energia.

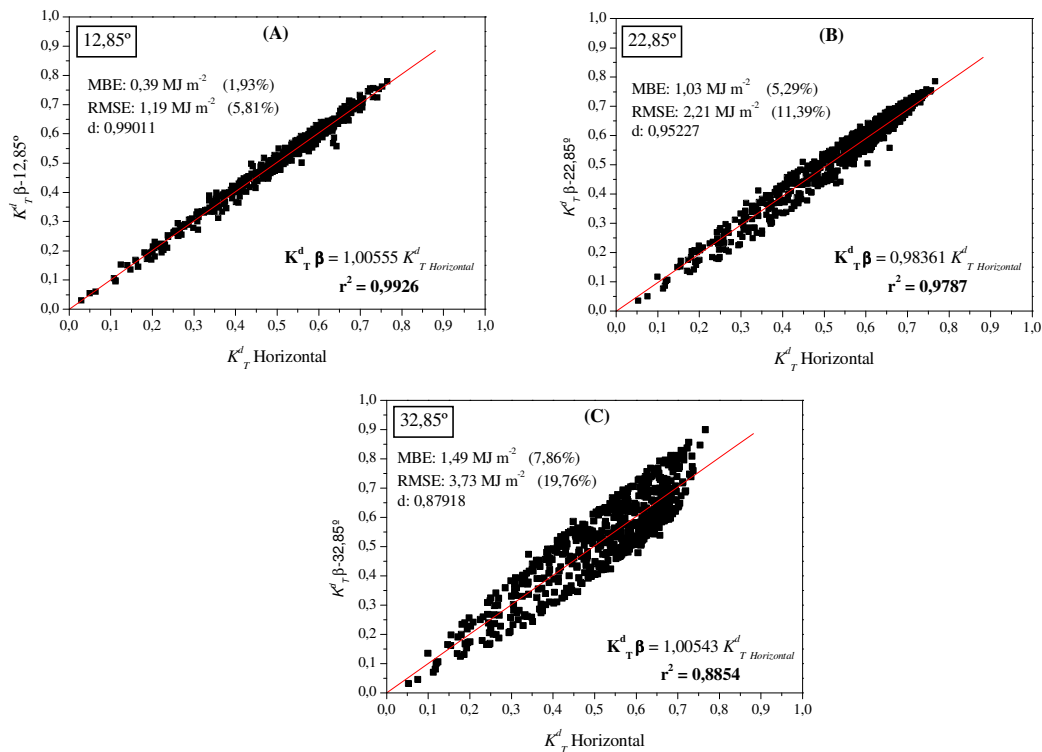


Figura 29. Correlações diárias entre os índices de claridade (K_T^d) de superfícies inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,8° (c) com a face voltada para o Norte e de superfícies horizontais.

Nas validações pelos valores estimados de irradiação global, são encontrados outros valores de MBE, RMSE e “d”. As três equações ajustadas apresentaram tendência de superestimar os valores de ($H_{G\beta}^d$), com valores de MBE crescentes com o aumento do ângulo de inclinação. Em 12,85°, 22,85° e 32,85° o MBE foi de 0,40 MJ m⁻² (1,93%); 1,03 MJ m⁻² (5,30%) e 1,49 MJ m⁻² (7,86%), respectivamente. Os espalhamentos também seguiram essa tendência de aumento com a intensidade de inclinação, indo de 1,19 MJ m⁻² (5,81%) até 3,73 MJ m⁻² (19,76%) dos níveis de ($H_{G\beta}^d$). Consequentemente, os índices de ajustamentos foram reduzidos em função das inclinações, sendo de 0,9901; 0,9523 e 0,8792, para 12,85°, 22,85° e 32,85°.

Os maiores espalhamentos verificados com o aumento da inclinação, podem ser decorrentes do aumento dos níveis da irradiação refletida em superfícies inclinadas com maiores ângulos (Figura 22) e também do ganho de irradiação direta nas maiores

inclinações no período de inverno (Figura 18). Apesar de apresentarem maiores espalhamentos e piores ajustes com os valores medidos, as validações com as irradiações estimadas permitem analisar os desvios em termos energéticos. As suas validações dentro dos meses são apresentadas na Tabela 09.

Tabela 09. Resultados das validações das relações entre $(K_{T\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações anuais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	17,8113	17,2983	-0,5130	0,8495	-2,8803	4,7695	0,9945
	Fevereiro	22,4492	22,5009	0,0517	1,0966	0,2304	4,8848	0,9905
	Setembro	20,2628	21,9159	1,6531	1,6877	8,1582	8,3290	0,9768
	Outubro	22,0298	23,4980	1,4682	1,8302	6,6647	8,3077	0,9716
	Novembro	21,2330	21,2533	0,0203	0,2744	0,0955	1,2922	0,9992
	Dezembro	18,9353	18,6719	-0,2635	0,6634	-1,3913	3,5033	0,9975
22,85°	Janeiro	20,8015	19,5022	-1,2993	1,3399	-6,2461	6,4412	0,9721
	Fevereiro	19,7261	19,1859	-0,5402	0,5967	-2,7385	3,0251	0,9963
	Março	20,9931	21,6143	0,6212	1,0324	2,9588	4,9177	0,9876
	Abril	20,6968	21,8321	1,1353	3,2347	5,4854	15,6291	0,8791
	Mai	18,3575	20,4747	2,1172	2,1742	11,5334	11,8437	0,9563
	Junho	17,8628	19,2286	1,3658	1,5525	7,6463	8,6915	0,9691
	Julho	18,6578	21,0825	2,4247	2,4769	12,9957	13,2757	0,9071
	Agosto	18,8267	20,8305	2,0038	3,0501	10,6432	16,2009	0,9258
	Setembro	16,6665	17,7039	1,0374	1,1979	6,2244	7,1875	0,9925
	Outubro	20,3063	20,1215	-0,1848	0,6379	-0,9103	3,1412	0,9965
	Novembro	21,8067	20,8009	-1,0058	1,0475	-4,6123	4,8037	0,9895
	Dezembro	19,9251	18,4234	-1,5018	1,5189	-7,5371	7,6232	0,9757
32,85°	Janeiro	16,3982	14,3056	-2,0926	5,4836	-12,7610	33,4404	0,7275
	Fevereiro	17,8557	17,4409	-0,4148	3,0981	-2,3229	17,3510	0,9119
	Março	19,1662	20,6220	1,4558	2,2376	7,5958	11,6750	0,9367
	Abril	20,5000	22,5624	2,0625	2,1768	10,0608	10,6187	0,9588
	Mai	17,0187	22,7876	5,7690	7,5869	33,8978	44,5800	0,7285
	Junho	19,2671	23,4326	4,1655	4,2923	21,6200	22,2779	0,7951
	Julho	19,0027	23,1091	4,1065	4,2521	21,6100	22,3764	0,8779
	Agosto	21,2489	24,6119	3,3630	3,5288	15,8267	16,6068	0,8018
	Setembro	20,5376	22,2289	1,6912	1,7524	8,2347	8,5328	0,9668
	Outubro	20,1168	20,2785	0,1617	0,8111	0,8037	4,0317	0,9887
	Novembro	18,1115	17,1648	-0,9467	1,0203	-5,2270	5,6335	0,9856
	Dezembro	17,4254	15,7376	-1,6878	2,2514	-9,6857	12,9205	0,9295

Observa-se que a aplicação das equações geradas com o agrupamento anual nos meses apresentou resultados melhores do que as validações no ano. Ainda pode ser considerado que, os maiores espalhamentos para as maiores inclinações nos agrupamentos anuais da Figura 24, são decorrentes dos altos valores de RMSE dos meses de janeiro, maio, junho e julho dos anos de 2004 e 2005.

Entretanto, quando se realiza a partição dessas estimativas ao longo do ano em meses, podem ser evidenciadas particularidades dentro dos meses (Tabela 10). Existem dois períodos distintos, que acompanham as evoluções das irradiações globais e extraterrestres. No verão as superfícies horizontais apresentam níveis incidentes maiores que os verificados na inclinada, com coeficientes angulares maiores que 1,0 e entre os equinócios, essa situação se inverte. As piores correlações foram verificadas no mês de abril, dadas pelo início da entrada das frentes frias na região, o que propicia uma grande variação no número de dias com céu nublado e céu aberto.

Tabela 10. Coeficientes angulares e de determinação (R^2) da regressão linear $K_{TB}^d = a_I (K_{TH}^d)$.

Mês	12,85°		22,85°		32,85°	
	a_I	R^2	a_I	R^2	a_I	R^2
Janeiro	1,0363	0,9966	1,0463	0,9961	1,0947	0,9944
Fevereiro	1,0068	0,9969	1,0252	0,9979	1,0485	0,9964
Março	0,9763	0,9935	0,9929	0,9924	0,9965	0,9946
Abril	0,9795	0,9283	0,9743	0,9987	0,9463	0,9880
Maio	0,9820	0,9981	0,9443	0,9914	0,9235	0,9949
Junho	0,9866	0,9888	0,9311	0,9936	0,9008	0,9924
Julho	0,9871	0,9968	0,9365	0,9902	0,9089	0,9942
Agosto	0,9909	0,9986	0,8927	0,9006	0,9560	0,9941
Setembro	0,9975	0,9985	0,9721	0,9946	0,9828	0,9957
Outubro	1,0081	0,9944	1,0075	0,9984	1,0239	0,9927
Novembro	1,0289	0,9978	1,0298	0,9981	1,0624	0,9957
Dezembro	1,0361	0,9978	1,0477	0,9980	1,0928	0,9953

Nota-se que nos meses de verão (dezembro e janeiro), as equações citadas na Tabela 10 para as inclinações de 22,85° e 32,85° apresentaram tendências de subestimar, dadas pelos valores de MBE negativos (Tabela 11). Em geral, na inclinação de 32,85% foram verificados os maiores desvios das médias nas estimativas de (H_{GB}^d) com

equações mensais de inverno, com desvios variando entre 1,30 e 1,90 MJ m⁻² entre os meses de maio e agosto. Acima de 85% dos modelos mensais superestimam os valores de $(H_{G\beta}^d)$.

Tabela 11. Resultados das validações das relações entre $(K_{T\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações mensais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE MJ m ⁻²	RMSE MJ m ⁻²	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	17,8113	17,8278	0,0165	0,5961	0,0925	3,3468	0,9974
	Fevereiro	22,4492	22,5285	0,0792 ^a	1,0956	0,3530 ^b	4,8805	0,9905
	Setembro	20,2628	21,7407	1,4778	1,5108	7,2934	7,4559	0,9811
	Outubro	22,0298	23,5583	1,5285 ^a	1,8825 ^a	6,9384 ^b	8,5453 ^b	0,9701 ^c
	Novembro	21,2330	21,7468	0,5138 ^a	0,6199 ^a	2,4198 ^b	2,9197 ^b	0,9962 ^c
	Dezembro	18,9353	19,2392	0,3038 ^a	0,7324 ^a	1,6045 ^b	3,8681 ^b	0,9970 ^c
22,85°	Janeiro	20,8015	20,7454	-0,0561	0,4121	-0,2697	1,9813	0,9975
	Fevereiro	19,7261	19,9974	0,2712	0,4053	1,3750	2,0548	0,9984
	Março	20,9931	21,8191	0,8260 ^a	1,1700 ^a	3,9344 ^b	5,5731 ^b	0,9843 ^c
	Abril	20,6968	21,6244	0,9275	3,1441	4,4816	15,1913	0,8839
	Maio	18,3575	19,6560	1,2985 ^a	1,4255	7,0737	7,7654	0,9799
	Junho	17,8628	19,2286	1,3658	1,5525	7,6463	8,6915	0,9691
	Julho	18,6578	20,0729	1,4152 ^a	1,5417	7,5849	8,2629	0,9598
	Agosto	18,8267	18,9052	0,0785	2,3621	0,4170	12,5464	0,9490
	Setembro	16,6665	17,6561	0,8293	1,0285	4,9760	6,1712	0,9944
	Outubro	20,3063	20,6102	0,3039	0,7009	1,4964	3,4518 ^b	0,9958 ^c
	Novembro	21,8067	21,7769	-0,0298	0,3036	-0,1368	1,3921	0,9992
	Dezembro	19,9251	19,6244	-0,3008	0,4204	-1,5096	2,1097	0,9982
32,85°	Janeiro	16,3982	15,5752	-0,8230	5,2245	-5,0187	31,8605	0,7531
	Fevereiro	17,8557	18,1322	0,3324	3,1139 ^a	1,8614	17,4391 ^b	0,9142
	Março	19,1662	20,4388	1,2727	2,1304	6,6402	11,1152	0,9417
	Abril	20,5000	21,2354	0,7355	1,1258	3,5880	5,4917	0,9879
	Maio	17,0187	19,3442	2,3255	5,4750	13,6645	32,1707	0,7947
	Junho	19,2671	20,9941	1,7270	2,0287	8,9636	10,5291	0,9376
	Julho	19,0027	20,8905	1,8878	2,1472	9,9344	11,2994	0,9618
	Agosto	21,2489	22,1780	0,9291	1,5097	4,3723	7,1050	0,9509
	Setembro	20,5376	21,7285	1,1909	1,2852	5,7986	6,2578	0,9814
	Outubro	20,1168	20,6504	0,5336 ^a	0,9467 ^a	2,6525 ^b	4,706 ^b	0,9849 ^c
	Novembro	18,1115	18,1372	0,0257	0,4855	0,1422	2,6807	0,9969
	Dezembro	17,4254	17,1058	-0,3196	1,5806	-1,8340	9,0706	0,9661

Para menores períodos no agrupamento de dados como observado entre anual e mensal, fora verificados melhores ajustamentos em todas as inclinações. Todavia, nos meses em que se têm um maior número de dias com céu parcialmente nublado, os modelos mensais apresentaram piores desempenhos, para os três indicativos analisados.

Outro ponto importante, e que necessita ser destacado é que, os raios solares que incidem em uma superfície inclinada apresentam um ângulo de incidência diferente quando comparado com o incidente em uma superfície horizontal. Assim, podem existir contribuições de nuvens localizadas em regiões circunvizinhas na transmissividade da radiação que chega a uma superfície inclinada. Justificando assim, a variação no número de dias nublados, parcialmente nublados ou com céu aberto, para as diferentes superfícies, conforme a Tabela 12.

Normalmente é adotada a classificação proposta por Liu e Jordan (1960) para a classificação da cobertura do céu em função do índice de claridade, adotando-se na partição diária os intervalos de $0 < (K_T^d) < 0,30$ para dias de céu completamente nublado, de $0,30 < (K_T^d) < 0,65$ para dias de céu parcialmente nublado e $0,65 < (K_T^d) < 1$ para dias de céu aberto (IQBAL, 1983; PEREZ et al., 1986; DE MIGUEL et al., 1995; DAL PAI, 2005; entre outros).

Todavia, para a região de Botucatu (SP) foi proposta uma classificação diferenciada. Segundo Escobedo et al. (2007b) e Escobedo et al. (2009) a análise variacional das irradiações global, direta e difusa horizontal plotadas em função dos índices de claridade subdivididos em 100 intervalos permitiu adotar a seguinte classificação de cobertura de céu para a partição diária: i) $(K_T^d) \leq 0,35$: a irradiação direta é praticamente nula, sendo a irradiação global igual a irradiação difusa; ii) $0,35 \leq (K_T^d) \leq 0,55$: a irradiação global é composta principalmente pela fração difusa (que se apresenta decresce acima desse intervalo) e em menor escala pela irradiação direta (crescente a partir desse intervalo). iii) $0,55 \leq (K_T^d) \leq 0,65$: é o inverso do segundo intervalo, sendo que a irradiação difusa diminui gradativamente nesse intervalo; iv) $(K_T^d) > 0,65$: a irradiação global possui a maior parcela composta pela irradiação direta e mínima difusa, portanto, a cobertura do céu é considerada aberta. Para valores de (K_T^d) acima de 0,78 não ocorre uma sequência lógica de evolução das três

irradiações em função da transmissividade atmosférica e por essa razão são eliminados das análises e também dos modelos de estimativas gerados.

A Figura 30 apresenta a frequência de dias em função do índice de claridade para as diferentes superfícies estudadas. Nessa análise foram considerados 544 dias (a), 731 dias (b) e 731 dias (c), correspondentes aos períodos de 09/2001 a 02/2003 (na inclinação de 12,85°), 01/1999 a 12/2000 (para a inclinação de 22,85°) e 01/2004 a 12/2005 (para a inclinação de 32,85°). Existem diferenças entre as frequências de dias para as diferentes coberturas de céu para a superfície horizontal, traduzidas conseqüentemente pelos efeitos das mudanças climáticas nos diferentes períodos de medidas. Foram encontrados para as superfícies horizontais nos três períodos supracitados os seguintes valores: 74, 86 e 85 dias com céu nublado; 206, 209 e 230 dias com céu parcialmente nublado com predominância difusa; 203, 253 e 261 dias com céu parcialmente nublado com predominância direta; 61, 183 e 155 dias com céu aberto.

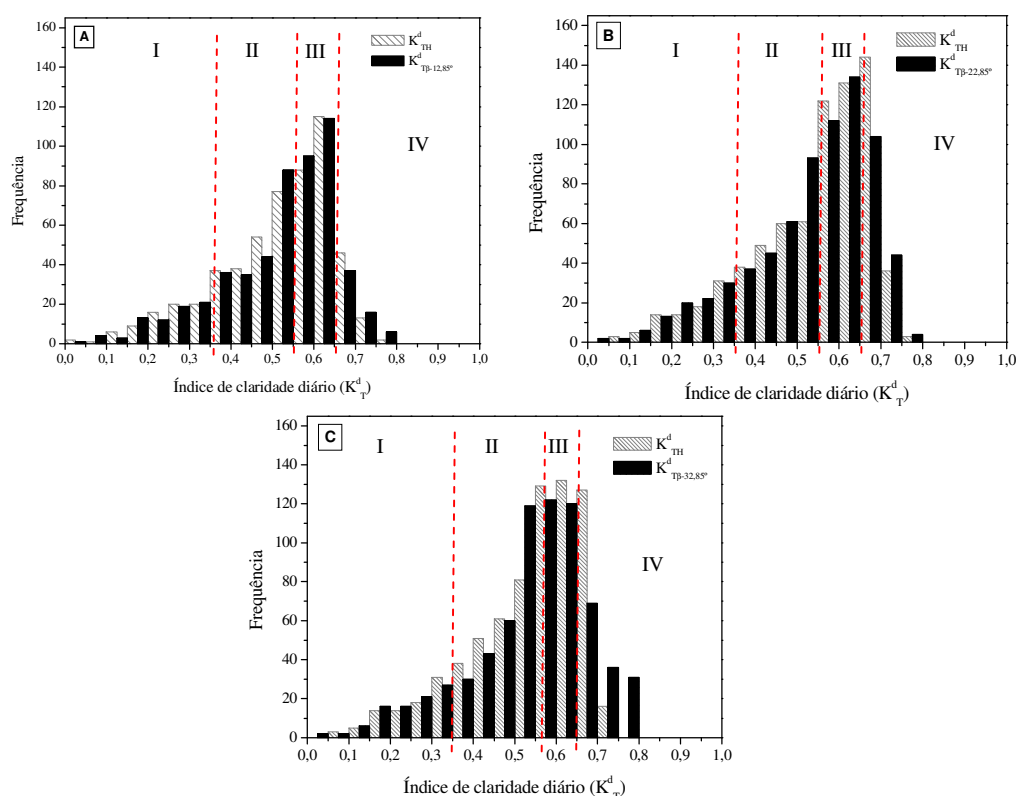


Figura 30. Frequência de distribuição diária dos valores de índice de claridade para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Considerando que as classes I e II são de céu tendem a céu nublado e as classes II e IV tendem a céu aberto, obtêm-se em valores percentuais 51,47%, 40,36% e 43,09% dos dias tendem a céu nublado para os períodos de medidas em L-10°, L e L+10° e 48,53%; 59,64% e 56,91% dos dias tendem a céu aberto nos respectivos períodos de medidas. Isso indica que Botucatu (SP) apresenta ao longo do ano, um número maior de dias com céu aberto, ou seja, na maioria dos dias a transmissividade atmosférica local é superior a 50%.

Nas classificações encontradas para as superfícies inclinadas são encontrados valores diferentes da horizontal. Na inclinação de 12,85°, a distribuição da frequência dos dias nas quatro classes é similar ao da horizontal, com 73, 203, 209 e 59 dias para as classes I, II, III e IV, respectivamente. Para a inclinação de 22,85°, são verificados aumentos de 10 dias com céu nublado e 28 dias com céu parcialmente nublado difuso, e reduções de 7 dias com céu parcialmente nublado direto e de 31 dias com aberto. Já na inclinação de 32,85°, ocorreu uma inversão da tendência encontrada em 22,85°, as reduções foram de 5 e 21 dias para as classes I e II e aumentos de 19 e 7 dias para as classes III e IV.

Esses valores encontrados nas superfícies inclinadas resultam em um aumento dos percentuais de dias com céu tendendo a nublado (50,74%, 45,55% e 46,65% para L-10°, L e L+10°). Em consequência, quando se analisa o comportamento da atmosfera para as inclinações se observa uma diminuição da transmissividade atmosférica. Essa tendência é decorrente da interação dos raios solares com as condições cobertura de céu das regiões circunvizinhas, visto que, ocorre uma mudança na exposição da superfície que predispõe uma maior interceptação de raios solares oriundos da direção Norte em face da diminuição do plano de horizonte para as superfícies inclinadas. Esse comportamento também permite que nas inclinações sejam verificados maiores níveis de irradiação difusa no solstício de inverno (Hemisfério Sul), pois os raios solares interagem com uma massa ótica maior devido a declinação no norte.

Essa informação é pertinente, devido ao fato que muitos modelos de estimativa, relacionam outras frações da irradiação solar com o índice de claridade, em cada uma dessas condições de céu.

4.7. Frações da irradiação direta em superfícies inclinadas e horizontais

As razões entre as irradiações direta e global $\left(\overline{K_b}\right)$ são apresentadas na Tabela 12 e Figura 31. Nas superfícies horizontais, pode-se notar uma variação ao longo dos períodos de medidas, causadas pelas condições climáticas de cada período. Todavia, o mês de janeiro foi o que apresentou os menores valores de $\left(\overline{K_b}\right)$ para as superfícies horizontais, indicando que nesse período em média, em torno de 37% da irradiação total incidente é fornecida pela componente direta. Por conseguinte, os maiores valores de $\left(\overline{K_b}\right)$ são verificados nos meses de março, abril, maio e junho, resultantes do maior número de dias de céu claro e limpo na região, ocasionados pelas reduções da nebulosidade e precipitação pluviométrica.

Independente dos ângulos de inclinação estudado foram verificados maiores valores médios de $\left(\overline{K_b}\right)$ nas superfícies inclinadas, sendo destacadas no mês de junho, para as inclinações de 12,85° e 32,85°, valores de irradiação direta superiores a 70% do total incidido. Já na inclinação de 22,85°, os valores máximos são verificados em abril e maio, coincidentes com a superfície horizontal, em torno de 0,68 com pequena oscilação ao longo do ano.

Tabela 12. Frações médias mensais da relação entre a irradiação direta e a irradiação global $\left(\overline{K_b}\right)$ para superfícies inclinadas e horizontais.

Meses	1999 - 2000		2001-2003		2004 - 2005	
	Horizontal	$\beta - 22,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 12,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 32,85^\circ$
Janeiro	0,439 $\pm$ 0,23	0,419 $\pm$ 0,23	0,371 $\pm$ 0,26	0,359 $\pm$ 0,25	0,399 $\pm$ 0,26	0,367 $\pm$ 0,24
Fevereiro	0,440 $\pm$ 0,25	0,429 $\pm$ 0,24	0,453 $\pm$ 0,29	0,450 $\pm$ 0,29	0,495 $\pm$ 0,28	0,474 $\pm$ 0,27
Março	0,538 $\pm$ 0,24	0,541 $\pm$ 0,24	0,691 $\pm$ 0,20	0,710 $\pm$ 0,21	0,518 $\pm$ 0,27	0,524 $\pm$ 0,27
Abril	0,666 $\pm$ 0,23	0,683 $\pm$ 0,23	0,762 $\pm$ 0,11	0,782 $\pm$ 0,11	0,553 $\pm$ 0,23	0,594 $\pm$ 0,24
Maio	0,643 $\pm$ 0,19	0,681 $\pm$ 0,19	0,564 $\pm$ 0,28	0,577 $\pm$ 0,27	0,594 $\pm$ 0,26	0,664 $\pm$ 0,26
Junho	0,561 $\pm$ 0,25	0,604 $\pm$ 0,25	0,765 $\pm$ 0,15	0,776 $\pm$ 0,15	0,615 $\pm$ 0,27	0,701 $\pm$ 0,28
Julho	0,606 $\pm$ 0,27	0,644 $\pm$ 0,27	0,664 $\pm$ 0,27	0,670 $\pm$ 0,26	0,581 $\pm$ 0,29	0,647 $\pm$ 0,30
Agosto	0,579 $\pm$ 0,26	0,614 $\pm$ 0,26	0,580 $\pm$ 0,30	0,580 $\pm$ 0,29	0,681 $\pm$ 0,26	0,706 $\pm$ 0,26
Setembro	0,510 $\pm$ 0,24	0,524 $\pm$ 0,25	0,509 $\pm$ 0,25	0,505 $\pm$ 0,24	0,542 $\pm$ 0,26	0,538 $\pm$ 0,25
Outubro	0,470 $\pm$ 0,24	0,466 $\pm$ 0,23	0,526 $\pm$ 0,21	0,515 $\pm$ 0,20	0,396 $\pm$ 0,25	0,378 $\pm$ 0,24
Novembro	0,509 $\pm$ 0,24	0,495 $\pm$ 0,24	0,403 $\pm$ 0,23	0,389 $\pm$ 0,23	0,484 $\pm$ 0,25	0,447 $\pm$ 0,24
Dezembro	0,466 $\pm$ 0,21	0,445 $\pm$ 0,20	0,443 $\pm$ 0,28	0,428 $\pm$ 0,27	0,441 $\pm$ 0,24	0,404 $\pm$ 0,23

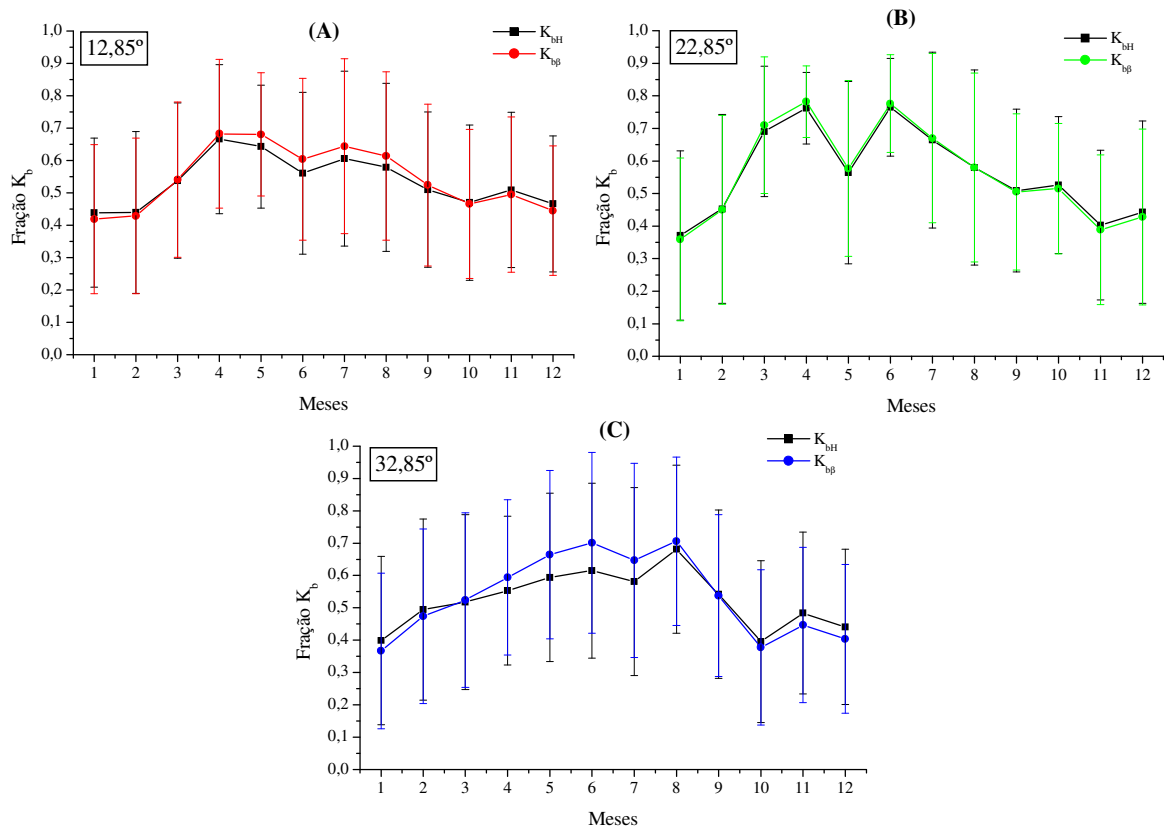


Figura 31. Frações médias mensais $\left(\overline{K_b}\right)$ para superfícies horizontais e inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

A inclinação de 22,85° apresentou os valores de $\left(\overline{K_b}\right)$ médios nas estações semelhantes ao plano horizontal, com 0,431 e 0,439 (verão), 0,635 e 0,614 (outono), 0,621 e 0,626 (inverno) e 0,495 e 0,483 (primavera), respectivamente. Enquanto que nas demais inclinações, foram verificadas grandes oscilações dos valores médios de $\left(\overline{K_b}\right)$ nas estações do ano, com 0,412 (verão), 0,690 (outono), 0,675 (inverno) e 0,470 (primavera) para a inclinação de 12,85° e 0,415; 0,594; 0,685 e 0,454, para as mesmas estações na inclinação de 22,85°.

Ao longo do ano, as frações $\left(\overline{K_{b\beta}}\right)$ acompanharam a evolução das frações $\left(\overline{K_{bh}}\right)$ na inclinação de 22,85°. Todavia, em $\langle |L| + 10^\circ \rangle$, entre maio e julho, foram verificadas frações da irradiação direta pela global superiores em torno de 7%. Os menores

valores das frações $\left(\overline{K_{b\beta}}\right)$ e $\left(\overline{K_{bH}}\right)$ são verificadas no verão, em função do aumento da nebulosidade, que propicia um aumento da componente difusa da irradiação total incidente em um plano inclinado.

As transmissividades diretas da atmosfera na forma da fração $\left(\overline{K'_b}\right)$, dada pela razão entre as irradiações direta e no topo da atmosfera, são apresentadas na Figura 32. Não existem diferenças significativas entre as superfícies inclinadas e as horizontais nas inclinações de 12,85° e 22,85°. Esses índices $\left(\overline{K'_b}\right)$ podem ser indicativos também das condições de céu, visto quanto menor o valor de $\left(\overline{K'_b}\right)$, menor será a contribuição da irradiação direta, conseqüentemente, ocorrerá um aumento da nebulosidade na atmosfera local, visto que a componente difusa prevalecerá nos totais de irradiações incidentes.

As médias anuais de transmissividade direta não apresentaram variações entre as superfícies inclinadas e horizontais, para um mesmo período de medidas, entretanto, entre os períodos de medidas ocorreram variações. Para as medidas no ângulo de 12,85° e na horizontal correspondente, foram verificadas médias anuais de $\left(K'_b\right)$ equivalentes a 0,322 e 0,3014, com máximos de 0,6894 e 0,6867. No período de 1999 e 2000, tivemos valores médios anuais de 0,3199 e 0,3019, com máximos em 0,6399, cujos valores foram iguais para a superfície inclinada a 22,85° e a superfície horizontal correspondente. Já entre 2004 e 2005, as médias foram de 0,3010 e 0,3017 e os valores máximos de 0,6728 e 0,6672, para a superfície inclinada a 32,85° e a horizontal correspondente.

Assim, pode ser notada uma diminuição linear dos valores médios anuais de $\left(K'_b\right)$ com o aumento da intensidade de inclinação, uma vez que entre as superfícies horizontais correspondentes a cada período não foram verificadas variações, mesmo com as diferenças climáticas observadas entre os períodos de medidas (Tabela 1).

As menores variações ao longo do ano são verificadas na inclinação de 32,85°, que apresenta valores máximos em agosto (0,41), todavia, entre fevereiro e julho, nesse plano inclinado foram encontrados valores de $\left(\overline{K'_b}\right)$ superiores ao do plano horizontal, com diferença máxima de 3% em junho. Em média, nessa inclinação do total de radiação incidente no topo da atmosfera, 26% foi transmitido diretamente à superfície na primavera e

no verão, já no outono e inverno foram em torno de 31% e 37%. Esses valores não diferem significativamente das porcentagens média (entre 1999 e 2005) para as superfícies horizontais, com exceção do outono que no plano horizontal apresentou $\left(\overline{K'_b}\right)$ médios de 0,364.

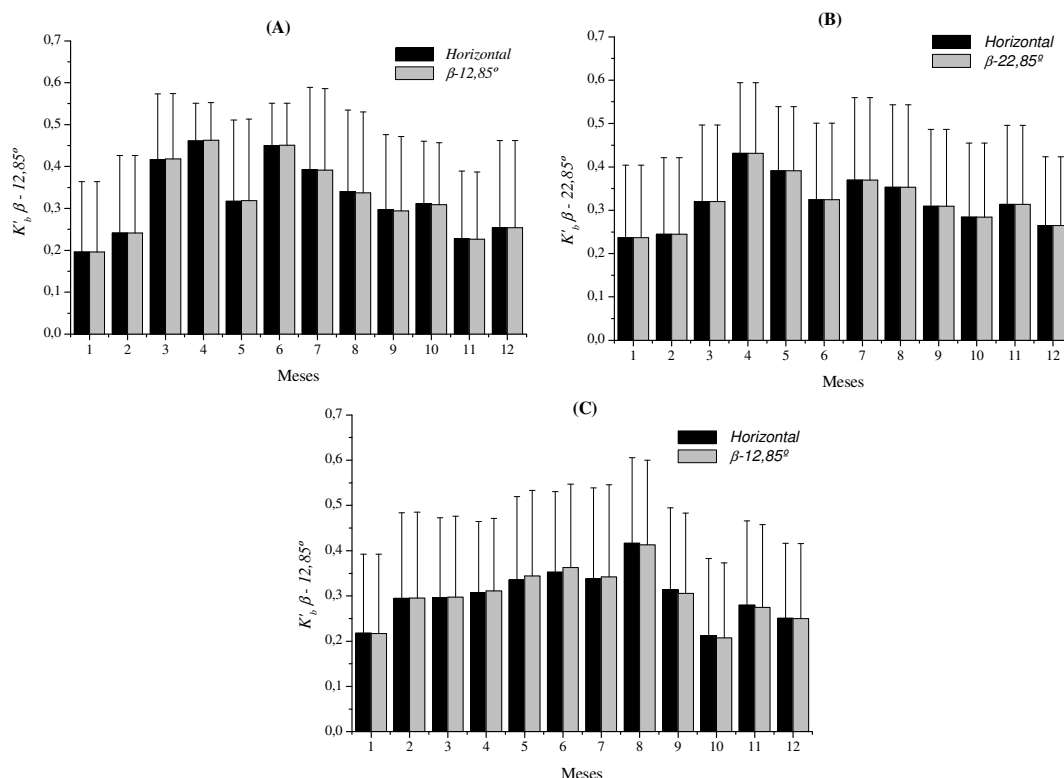


Figura 32. Frações médias mensais da relação entre a irradiação direta e a irradiação no topo da atmosfera $\left(\overline{K'_b}\right)$ para superfícies inclinadas e horizontais.

Os menores valores de $\left(\overline{K'_b}\right)$ nas inclinações de $12,85^\circ$ e $22,85^\circ$ são verificados nos meses de janeiro e fevereiro, com valores médios de 19%, 24%, 23% e 24%, nos respectivos meses e inclinações. Ainda nesses ângulos de inclinação, os picos máximos são verificados em abril, com 46,3% e 43,1%, respectivamente.

Entretanto, medidas de irradiação direta de rotina são difíceis de serem realizadas nas estações brasileiras, em função dos custos instrumentais e da manutenção do pireliômetro e rastreador solar, que são aparelhos importados e caros. Gomes (2006a) cita

que os poucos grupos de radiação solar que medem rotineiramente a irradiação direta na incidência são os grupos de radiação solar do IAG (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP de São Paulo) e da Faculdade de Engenharia Agrícola (UNIOESTE de Cascavel), porém ainda estão na formação de banco de dados.

Como grande do monitoramento das radiações nas Universidades está restrito à global, difusa, PAR e ondas longas (Soares, et al., 2004; Oliveira et al., 2002; Tiba et al., 2005; Codato et al., 2008; Escobedo et al., 2009), são escassas as informações sobre equações de estimativas da irradiação direta na incidência em função da global (OLIVEIRA, 2001b; OLIVEIRA e ESCOBEDO, 2001; GOMES et al., 2006a). Quando encontradas, essas correlações são feitas apenas para superfícies horizontais.

Em superfícies inclinadas, se destacam apenas os trabalhos desenvolvidos por Sclar et al. (2003) e Sclar (2004), realizados em Botucatu-SP, apenas para a inclinação de 22,85°. Nesses trabalhos, foram geradas equações de regressão linear para valores diários de irradiação direta com base nas frações (K_{TH}^d) , cujos coeficientes de determinação foram iguais a 0,90, com erro quadrático médio de 0,084 e erro médio de 0,002. Para valores de (K_{TH}^d) maior que 0,25, foi proposta a seguinte equação: $(K_{TH}^d) = -0,386 + 1,572(K_{TH}^d)$. Já, para valores de (K_{TH}^d) inferiores a 0,25, não foram identificados níveis de irradiação direta incidentes na superfície inclinada.

Contudo, medidas até mesmo da irradiação global em inclinações são difíceis de serem realizadas. Por conseguinte, nesse trabalho foram propostos ajustes de modelos que correlacionam apenas medidas da irradiação global em superfícies horizontais para obtenção dos níveis de irradiação direta nas superfícies inclinadas. Pelo emprego apenas de apenas com as frações $(K_{b\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) , visto que a irradiação no topo da atmosfera para superfícies horizontais e inclinadas são valores conhecidos ao longo do ano.

Os modelos de estimativas conceituais que correlacionam as frações da irradiação direta e difusa baseados no índice de claridade são chamados do tipo Liu-Jordan, que foram os primeiros a proporem tais correlações (LIU e JORDAN, 1960). A Figura 33 mostra a correlação entre $(K_{b\beta}^d)$, que expressa a relação entre a irradiação direta e a irradiação no topo da atmosfera para as superfícies inclinadas, com os índices de claridade (K_{TH}^d) .

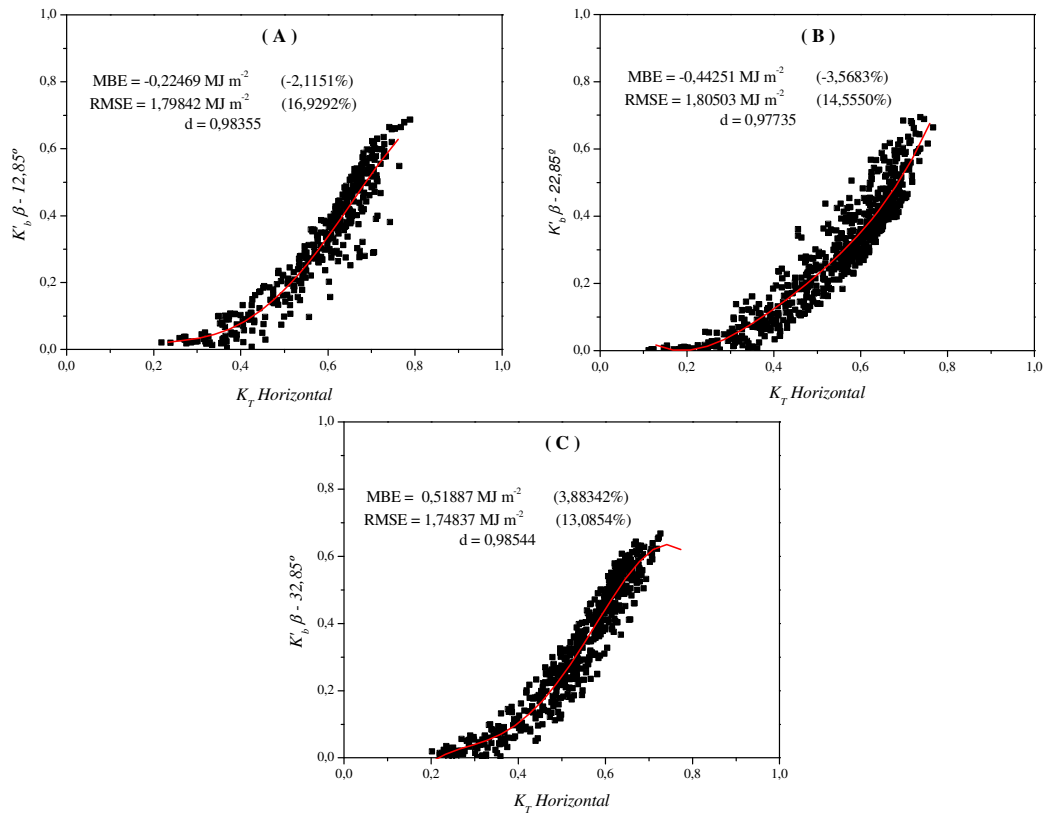


Figura 33. Correlações entre $(K'_{b\beta}^d)$ de superfícies inclinadas a 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c) com a face voltada para o Norte e (K_{TH}^d) de superfícies horizontais.

Os trabalhos que apresentam essas correlações apresentam na grande maioria os ajustes na forma sigmoideal (Oliveira, 2001b), polinomial de quarto grau (Gomes, 2006a; Gomes et al., 2006), ou lineares quando forem particionados os valores de (K_T^d) em função das condições de céu (SCOLAR et al., 2003).

Nesse trabalho, os modelos de estimativa de $(K'_{b\beta}^d)$ em função da fração (K_{TH}^d) da partição diária com agrupamentos mensais para as três inclinações estudadas, foram dados a partir da seguinte expressão:

$$K'_b{}^d = \sum_{j=0}^N a_j ((K_{TH}^d)^j) \quad (24)$$

em que: a_j representa os coeficientes da equação de estimativa e N o grau do polinômio ajustado.

Assim, as equações de quarto grau ajustadas através de regressão polinomial dos agrupamentos anuais das partições diárias para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, são dadas pelas equações 25, 26 e 27, correspondentes as Figuras 26a, 26b e 26c.

$$K'_{b\beta}{}^d = -0,20293 + 2,66318(K_{TH}^d) - 11,77585(K_{TH}^d)^2 + 22,07032(K_{TH}^d)^3 - 12,23303(K_{TH}^d)^4 \quad (25)$$

$$K'_{b\beta}{}^d = 0,22207 - 2,82839(K_{TH}^d) + 11,48682(K_{TH}^d)^2 - 16,36156(K_{TH}^d)^3 + 9,45413(K_{TH}^d)^4 \quad (26)$$

$$K'_{b\beta}{}^d = -0,72687 + 8,00744(K_{TH}^d) - 32,10447(K_{TH}^d)^2 + 56,21064(K_{TH}^d)^3 - 32,55354(K_{TH}^d)^4 \quad (27)$$

Em estudos que apresentam estimativas da irradiação direta na incidência ou projetadas em superfícies horizontais seguindo a proposta de Liu e Jordan (1960), são esperados coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,89, que resultam em coeficientes de correlação em torno de 0,94 (GOMES, 2006a). As equações supracitadas apresentaram coeficientes de correlação que corroboram com essas expectativas, com valores de 0,9481; 0,9393 e 0,9663.

Observa-se que não existe uma linearidade entre $(K'_{b\beta}{}^d)$ e (K_{TH}^d) , pois para um mesmo valor de (K_{TH}^d) são observados vários valores de $(K'_{b\beta}{}^d)$ resultantes do grande espalhamento da correlação. Existe uma concentração de pontos da correlação para valores de (K_{TH}^d) variáveis entre 0,50 e 0,70, dadas pelo maior número de dias de céu parcialmente nublado, conforme a Figura 30. Também, pode ser notado, que quando os valores de (K_{TH}^d) estão abaixo de 0,30, ou seja, dias com céu nublado, os níveis de irradiação direta tendem a ser zero.

O tamanho das amostras considerações na geração das equações apresentadas foram de 365 dias para a inclinação de 12,85° e 731 para as demais inclinações. Enquanto que, para as validações, foram utilizados 181 dias na inclinação de 12,85°, 606 dias para a inclinação de 22,85° e 730 dias para a inclinação de 32,85°.

Quando a fração (K_{TH}^d) assumiu valores acima de 0,78 não foram verificadas dependências lógicas, pois os níveis de $(K'_{b\beta}{}^d)$ diminuíram com o aumento dos valores de (K_{TH}^d) , por conseguinte, tais valores foram eliminados da correlação. Gomes (2006)

cita que esse comportamento ocorre as multireflexões causadas por nuvens adjacentes, principalmente em condições de céu parcialmente nublado (maior número de dias verificados nesse trabalho, conforme a Tabela 09), onde a fração direta da irradiação no topo da atmosfera ($K'_{b\beta}{}^d$) tende a diminuir enquanto a fração difusa ($K'_{d\beta}{}^d$) aumenta.

Nas condições de céu nublado ($K_{TH}^d \leq 0,30$), a fração ($K'_{b\beta}{}^d$) é praticamente nula, com média diária de 0,027; 0,015 e 0,023, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, ou seja, em dias com alta nebulosidade, a irradiação direta que incide nas superfícies inclinadas são inferiores a 2,5% do total incidido no topo da atmosfera. Na cobertura de céu parcialmente nublado, dado pelo intervalo de $0,30 \leq (K_{TH}^d) \leq 0,65$, os valores de ($K'_{b\beta}{}^d$) aumentam de 0,05 a 0,49; 0,04 a 0,58; 0,07 a 0,61, com médias de 0,235; 0,261 e 0,315, para as mesmas inclinações citadas anteriormente. Já nas condições de céu aberto, a transmissividade direta atinge valores médios de 50,7%; 49,3% e 56,6% e valores máximos de 68,7%; 69,4% e 66,7%, para (K_{TH}^d) variando entre 0,70 e 0,78, para 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente.

Ambas as equações com agrupamento anual possibilitaram boas estimativas dos valores de ($H_{b\beta}^d$), com tendências a subestimar em torno de -2,115% e -3,568% (-0,2247 e -0,4425 MJ m⁻²) para as inclinações de 12,85° e 22,85°. Já para a inclinação de 32,85° foram verificadas superestimativas de 0,5189 MJ m⁻² (3,8834%). Os espalhamentos verificados foram da ordem de 16,93%; 14,56% e 13,09%, ou de 1,7984; 1,8050 e 1,7484 MJ m⁻², com ajustamentos de 0,9836; 0,9774 e 0,9854, para as mesmas inclinações. As aplicações e validações das equações 25, 26 e 27 aplicadas nos agrupamentos mensais são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13. Resultados das validações das relações entre $(K'_{b\beta})$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações anuais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	8,1763	6,2915	-1,8848	2,7118	-23,0520	33,1660	0,9586
	Fevereiro	14,2343	12,0382	-2,1962	2,7016	-15,4290	18,9792	0,9596
	Setembro	12,1670	12,3157	0,1487	1,5679	1,2221	12,8867	0,9851
	Outubro	11,3965	12,0031	0,6066	1,4440	5,3227	12,6709	0,9884
	Novembro	9,8561	9,7977	-0,0584	1,4018	-0,5926	14,2224	0,9848
	Dezembro	12,0728	10,5696	-1,5032	2,3997	-12,4510	19,8770	0,9778
22,85°	Janeiro	11,7843	11,0362	-0,7481	1,6410	-6,3482	13,9249	0,9791
	Fevereiro	9,8195	9,5153	-0,3042	1,3118	-3,0978	13,3586	0,9892
	Março	14,3278	13,2732	-1,0546	1,7093	-7,3608	11,9297	0,9770
	Abril	14,7853	13,6540	-1,1313	1,9612	-7,6512	13,2647	0,9778
	Maio	14,1239	13,2182	-0,9057	1,8801	-6,4127	13,3113	0,9759
	Junho	11,5488	11,7449	0,1961	1,6777	1,6977	14,5269	0,9784
	Julho	13,8099	13,2708	-0,5391	1,3111	-3,9035	9,4941	0,9837
	Agosto	12,0496	11,9483	-0,1014	1,3762	-0,8411	11,4209	0,9878
	Setembro	10,2979	9,8739	-0,4240	1,0025	-4,1175	9,7354	0,9944
	Outubro	11,3965	13,2718	1,8753	2,3278	16,4550	20,4254	0,9713
	Novembro	14,0342	12,9196	-1,1146	1,7877	-7,9420	12,7380	0,9792
	Dezembro	11,2445	9,9592	-1,2854	1,6861	-11,4310	14,9950	0,9778
32,85°	Janeiro	6,7409	6,6475	-0,0934	1,2270	-1,3850	18,2016	0,9879
	Fevereiro	10,3860	11,0154	0,6294	1,4285	6,0598	13,7536	0,9893
	Março	11,9810	12,9360	0,9550	2,2273	7,9711	18,5904	0,9695
	Abril	16,9897	18,4384	1,4487	2,3621	8,5266	13,9029	0,9560
	Maio	16,3856	17,7099	1,3243	2,2049	8,0823	13,4560	0,9789
	Junho	16,1697	18,0670	1,8973	2,4185	11,7336	14,9567	0,9601
	Julho	17,4180	20,0574	2,6394	3,2068	15,1533	18,4108	0,8841
	Agosto	16,7434	18,7405	1,9971	2,4659	11,9274	14,7275	0,9573
	Setembro	13,8798	15,2364	1,3566	2,0330	9,7738	14,6470	0,9795
	Outubro	12,4096	13,8742	1,4646	2,1336	11,8024	17,1932	0,9637
	Novembro	10,0381	10,4195	0,3814	1,6705	3,7995	16,6411	0,9818
	Dezembro	8,9306	8,8101	-0,1205	1,2329	-1,3488	13,8048	0,9888

Para os agrupamentos mensais das partições diários das frações $(K'_{b\beta})$ em função de (K_{TH}^d) , também foram encontradas funções polinomiais de quarto grau

(Tabela 14). Nos agrupamentos mensais dos valores de $(K'_{b\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) também foram verificadas correlações acima de 94% para todos os meses e inclinações, visto que o menor coeficiente de determinação encontrado foi de 0,888, para o mês de março na inclinação de 32,85°.

Os maiores coeficientes de determinação foram encontrados entre os meses de maio e setembro, sendo um indicativo de boas correlações. A nebulosidade tende a diminuir nesses meses, pois se tem uma diminuição das precipitações pluviométricas, permitindo assim menores variações na cobertura de céu local, que proporciona um maior número de dias com céu aberto, consequentemente, melhores correlações entre frações.

Não existe uma tendência quanto aos sinais dos coeficientes dos polinômios mensais (Tabela 14), entretanto, para baixos valores de (K_{TH}^d) se tem valores menores ainda de $(K'_{b\beta}^d)$. Os modelos por ser gerados a partir de uma projeção mensal, sendo em média usados dados de 60 e 61 dias para cada modelo, apresentaram tendências de subestimativas e superestimativas variáveis entre as inclinações.

Para a inclinação de 12,85°, foram validados os modelos gerados apenas para os meses de primavera e verão, com subestimativas em janeiro e fevereiro e superestimativas entre outubro e dezembro (Tabela 15). Desvios acima de 1,0 MJ m⁻² em valor absoluto, foram encontrados somente no mês de fevereiro, contudo, os maiores espalhamentos foram verificados para o mês de janeiro (2,97 MJ m⁻²). Nessa inclinação, todos os modelos apresentaram ajustamentos entre valores medidos e estimados superiores a 94%. Na inclinação de 22,85° as subestimativas ocorreram nos meses de março, abril, maio, agosto e setembro, com MBE variando entre -1,15 e -2,81 MJ m⁻², sendo que o mês de abril apresentou o pior desempenho, com espalhamentos da ordem de 23% (3,41 MJ m⁻²) e ajustamento de 0,93.

Tabela 14. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração $(K'_{b\beta})$ em função da fração (K_{TH}^d) , com agrupamentos mensais e coeficientes de determinação, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Inclinação	Mês	$K'_b = \sum_{j=0}^4 a_j ((K_{TH}^d)^j)$					R ²
		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	
12,85°	Janeiro	1,9399	-17,8900	58,1573	-77,6346	38,4126	0,9428
	Fevereiro	0,0141	-0,2660	1,4304	-0,4686	0,6928	0,9625
	Março	1,4085	-10,3858	27,8481	-32,0076	13,6140	0,9307
	Abril	1,2195	-7,6474	17,9503	-18,6898	7,2851	0,9400
	Maio	-0,0887	1,3873	-6,5893	13,9448	-7,6584	0,9564
	Junho	1,3158	-8,5078	20,5188	-21,8595	8,6975	0,9764
	Julho	0,0006	-4,7246	11,5992	-8,4538	2,1584	0,9790
	Agosto	-0,5104	7,6822	-37,1234	71,3693	-44,2778	0,9584
	Setembro	-0,0113	0,2653	-1,6435	5,2932	-2,7193	0,9618
	Outubro	-0,2024	1,8526	-6,4587	11,4789	-5,5941	0,9195
	Novembro	1,3523	-13,7166	48,4054	-69,7583	37,4069	0,9452
	Dezembro	0,3056	-3,0743	10,2211	-11,6668	5,6917	0,9558
22,85°	Janeiro	-0,3374	3,7767	-15,1769	29,1215	-17,7169	0,9401
	Fevereiro	-0,3680	4,1341	-16,8460	31,8475	-19,2879	0,9396
	Março	0,4646	-4,5525	14,1645	-15,1179	6,2331	0,9340
	Abril	-0,0198	0,6297	-4,9885	13,8050	-9,3203	0,9256
	Maio	-0,9373	10,7740	-40,1736	65,2439	-36,5553	0,9498
	Junho	-0,3863	5,1785	-20,1082	34,5938	-19,6957	0,9797
	Julho	-0,1145	2,4910	-10,3522	19,1467	-10,6828	0,9632
	Agosto	-0,2512	3,5629	-15,4237	28,7655	-16,8943	0,9783
	Setembro	-0,1466	1,7614	-7,6484	15,4729	-8,8976	0,9583
	Outubro	0,3149	-3,4045	11,6509	-13,7244	6,7206	0,9785
	Novembro	0,3582	-3,6638	11,6015	-11,7171	4,7868	0,9674
	Dezembro	0,2853	-2,4429	5,9822	-1,3347	-1,8457	0,9635
32,85°	Janeiro	0,5059	-5,1620	17,4463	-21,7767	10,8786	0,9513
	Fevereiro	1,1987	-9,8723	27,2453	-30,0159	14,2965	0,8968
	Março	1,5762	-16,3868	58,6380	-85,1301	45,8438	0,8880
	Abril	-0,1388	0,1340	0,2077	0,7771	1,3330	0,9351
	Maio	0,6614	-7,6477	26,2191	-34,6042	18,0185	0,9615
	Junho	-0,6368	6,4197	-27,8155	52,4021	-31,8315	0,9334
	Julho	-0,4416	4,1555	-18,4796	36,0853	-21,7610	0,9808
	Agosto	-0,8749	8,7466	-34,8085	60,0273	-34,2813	0,9779
	Setembro	-0,3897	4,5248	-18,6009	33,2728	-18,4670	0,9635
	Outubro	0,0253	0,1616	-2,8525	9,6233	-5,9515	0,9426
	Novembro	-0,6017	7,3631	-31,7038	55,4553	-31,7505	0,9382
	Dezembro	0,1571	-1,0413	2,7521	0,0877	-0,9496	0,9055

Tabela 15. Resultados das validações das relações entre $(K'_{b\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações mensais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	8,1763	7,7011	-0,4752	2,9737 ^a	-5,8119	36,3693 ^b	0,9461 ^c
	Fevereiro	14,2343	12,8963	-1,3380	2,0371	-9,3997	14,3113	0,9755
	Setembro	12,167	12,8578	0,6907 ^a	1,5917 ^a	5,6771 ^b	13,0821 ^b	0,9842 ^c
	Outubro	11,3965	12,2181	0,8216 ^a	1,4896 ^a	7,2096 ^b	13,0709 ^b	0,9876 ^c
	Novembro	9,8561	9,8705	0,0144	1,1216	0,1464	11,3796	0,9898
	Dezembro	12,0728	9,3685	0,7043	1,7215	5,8337	14,2597	0,9886
22,85°	Janeiro	11,7843	13,3443	1,5597 ^a	2,2277 ^a	13,2357 ^b	18,9040 ^b	0,9648 ^c
	Fevereiro	9,8195	10,3862	0,5667 ^a	1,6435 ^a	5,7709 ^b	16,7366 ^b	0,9846 ^c
	Março	14,3278	13,1761	-1,1517 ^a	1,7287 ^a	-8,0383 ^b	12,0651 ^b	0,9768 ^c
	Abril	14,7853	11,9669	-2,8184 ^a	3,4065 ^a	-19,0624 ^b	23,0397 ^b	0,9295 ^c
	Maio	14,1239	14,0575	-0,0664	2,5269 ^a	-0,4699	17,8908 ^b	0,9438 ^c
	Junho	11,5488	12,0351	0,4862 ^a	2,3516 ^a	4,2103 ^b	20,3618 ^b	0,9469 ^c
	Julho	13,8099	14,4585	0,6485	1,6201	4,6960 ^b	11,7315 ^b	0,9721 ^c
	Agosto	12,0496	11,4590	-0,5906 ^a	1,7525	-4,9016 ^b	14,5439 ^b	0,9776 ^c
	Setembro	10,2979	9,0436	-1,2544 ^a	1,7283	-12,1808 ^b	16,7826 ^b	0,9826 ^c
	Outubro	11,3965	13,1846	1,7881	2,2783	15,6897	19,9910	0,9724
	Novembro	14,0342	14,5827	0,5485	1,5828	3,9084	11,2783	0,9854
	Dezembro	11,2445	11,7589	0,5145	1,4727	4,5751	13,0974	0,9850
32,85°	Janeiro	6,7409	6,3669	-0,3740 ^a	1,2309 ^a	-5,5479 ^b	18,2603 ^b	0,9869 ^c
	Fevereiro	10,386	11,2804	0,8944 ^a	2,9575 ^a	8,6119 ^b	28,4757 ^b	0,9650 ^c
	Março	11,981	12,8663	0,8853	2,4309 ^a	7,3894	20,2897 ^b	0,9638 ^c
	Abril	16,9897	16,5319	-0,4578	2,2632	-2,6945	13,3211	0,9661
	Maio	16,3856	16,0339	-0,3517	2,5298 ^a	-2,1462	15,4392 ^b	0,9796
	Junho	16,1697	16,0079	-0,1618	1,6930	-1,0006	10,4699	0,9808
	Julho	17,418	17,8540	0,4360	1,9649	2,5033	11,2806	0,9561
	Agosto	16,7434	15,9121	-0,8312	1,6746	-4,9646	10,0017	0,9807
	Setembro	13,8798	15,1055	1,2257	2,0436 ^a	8,8306	14,7237	0,9800
	Outubro	12,4096	12,9641	0,5545	1,4005	4,4685	11,2856	0,9836
	Novembro	10,0381	9,2366	-0,8015 ^a	1,6501	-7,9846 ^b	16,4379	0,9800
	Dezembro	8,9306	9,3392	0,4086 ^a	1,3028 ^a	4,5753 ^b	14,5882 ^b	0,9845 ^c

As equações mensais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nos meses em termos energéticos (a), em percentual (b) e em ajustamento (c).

Já na inclinação de $32,85^\circ$, em 6 meses ocorreram superestimativas com valores máximos de 8,83% ou $1,23 \text{ MJ m}^{-2}$. Os valores de MBE foram inferiores a -0,83 MJ m^{-2} (agosto) e em termos percentuais a -5,55% (em janeiro). Os maiores espalhamentos foram verificados em fevereiro e março, $2,96 \text{ MJ m}^{-2}$ (28,48%) e $2,43 \text{ MJ m}^{-2}$ (20,29%), respectivamente, com ajustamentos superiores a 95%.

Porém, na inclinação de $12,85^\circ$, as equações geradas com agrupamentos anuais (equações 25, 26 e 27) aplicadas nos meses de janeiro, setembro e outubro apresentaram desempenhos melhores do que as equações mensais em pelo menos dois indicativos estatísticos analisados. Na inclinação de $22,85^\circ$, os desempenhos das equações mensais foram superiores em maio, julho, outubro, novembro e dezembro e na inclinação de $32,85^\circ$ as equações anuais foram superiores em janeiro, fevereiro, março e dezembro. Todavia, na grande maioria dos meses em que as equações anuais foram melhores, os índices de ajustamento foram para as equações mensais foi acima de 97%, indicando que, podem-se aplicar tanto as equações anuais quanto as mensais nesses meses.

Esses resultados se apresentaram próximos aos obtidos por vários autores que realizaram essas correlações para superfícies horizontais, cujos valores de MBE variaram entre -1,5% e 13,2%; RMSE entre 6,7% e 31% (BATTLES et al., 2000; LOPEZ et al., 2000; GOMES, 2006).

Nesse contexto apresentado na Tabela 15, podemos observar os efeitos sazonais dos modelos, pois grande parte das subestimativas ocorreu no período em que o Sol está declinando para o Hemisfério Norte (21/03 a 21/09). Para os demais meses compreendendo o período da primavera e verão, os modelos podem ser caracterizados como de superestimativas.

4.8. Frações da irradiação difusa em superfícies inclinadas e horizontais

As razões entre as irradiações difusa de referência e global $\left(\overline{K_d}\right)$ para as superfícies inclinadas e horizontais nos respectivos períodos de medidas, são apresentadas na Tabela 16. Como a irradiação global em superfícies inclinadas, é dependente do somatório entre a irradiação direta, difusa e refletida incidente, nos meses em que a irradiação direta

apresentar menores valores médios ocorre um aumento dos valores médios da irradiação difusa.

Tabela 16. Frações médias mensais da relação entre a irradiação difusa de referência e a irradiação global $\left(\overline{K_d}\right)$ para superfícies horizontais e inclinadas, com face voltada para o Norte.

Meses	2001-2003		1999 - 2000		2004 - 2005	
	Horizontal	$\beta - 12,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 22,85^\circ$	Horizontal	$\beta - 32,85^\circ$
Janeiro	$0,580 \pm 0,24$	$0,637 \pm 0,22$	$0,562 \pm 0,28$	$0,619 \pm 0,24$	$0,651 \pm 0,30$	$0,721 \pm 0,25$
Fevereiro	$0,489 \pm 0,27$	$0,608 \pm 0,27$	$0,526 \pm 0,27$	$0,569 \pm 0,25$	$0,413 \pm 0,25$	$0,556 \pm 0,27$
Março	$0,297 \pm 0,20$	$0,301 \pm 0,21$	$0,418 \pm 0,25$	$0,455 \pm 0,25$	$0,434 \pm 0,28$	$0,493 \pm 0,30$
Abril	$0,205 \pm 0,06$	$0,219 \pm 0,11$	$0,261 \pm 0,23$	$0,302 \pm 0,23$	$0,416 \pm 0,24$	$0,439 \pm 0,28$
Maiο	$0,425 \pm 0,29$	$0,441 \pm 0,29$	$0,284 \pm 0,21$	$0,303 \pm 0,19$	$0,391 \pm 0,28$	$0,358 \pm 0,31$
Junho	$0,199 \pm 0,09$	$0,222 \pm 0,15$	$0,359 \pm 0,26$	$0,377 \pm 0,25$	$0,354 \pm 0,28$	$0,328 \pm 0,33$
Julho	$0,370 \pm 0,30$	$0,397 \pm 0,33$	$0,325 \pm 0,26$	$0,342 \pm 0,27$	$0,387 \pm 0,29$	$0,360 \pm 0,32$
Agosto	$0,329 \pm 0,28$	$0,437 \pm 0,31$	$0,368 \pm 0,26$	$0,349 \pm 0,28$	$0,249 \pm 0,21$	$0,274 \pm 0,26$
Setembro	$0,425 \pm 0,26$	$0,503 \pm 0,25$	$0,433 \pm 0,29$	$0,496 \pm 0,26$	$0,448 \pm 0,27$	$0,468 \pm 0,28$
Outubro	$0,399 \pm 0,23$	$0,525 \pm 0,22$	$0,441 \pm 0,27$	$0,540 \pm 0,22$	$0,560 \pm 0,29$	$0,694 \pm 0,25$
Novembro	$0,501 \pm 0,30$	$0,641 \pm 0,23$	$0,458 \pm 0,28$	$0,556 \pm 0,25$	$0,480 \pm 0,27$	$0,593 \pm 0,22$
Dezembro	$0,529 \pm 0,28$	$0,634 \pm 0,22$	$0,506 \pm 0,24$	$0,577 \pm 0,21$	$0,519 \pm 0,26$	$0,629 \pm 0,23$

Nas superfícies horizontais, pode-se notar uma variação ao longo dos períodos de medidas, causadas pelas condições climáticas de cada período. Nos anos de 1999, 2000, 2004 e 2005, o mês de janeiro apresentou os maiores valores de $\left(\overline{K_{dH}}\right)$ e nos anos de 2002 e 2003 foi o mês de fevereiro. Já os menores valores de $\left(\overline{K_{dH}}\right)$, também ocorreram em meses diferentes, sendo em julho (0,322) para 1999 e 2000, em junho para 2002 (0,200) e em agosto para 2004 e 2005 (0,249).

Todavia, pode ser observada uma variação sazonal dependente principalmente dos efeitos da nebulosidade. Entre novembro e fevereiro, a fração difusa da irradiação global para superfícies horizontais em Botucatu-SP foi de no mínimo $0,440 \pm 0,30$ (novembro) e no máximo de $0,699 \pm 0,30$ (janeiro). Já entre os equinócios de outono e primavera, os valores de $\left(\overline{K_{dH}}\right)$ variaram entre $0,200 \pm 0,09$ (junho) e $0,484 \pm 0,27$ (outubro).

Essa sazonalidade é importante, pois se apresenta como uma característica do local, permitindo a partir dessa análise se avaliar o efeito das inclinações.

Graficamente, a evolução das frações $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ e $\left(\overline{K'_{dH}}\right)$ são apresentadas na Figura 34. Apenas na inclinação de $32,85^\circ$, no período de inverno as frações inclinadas são inferiores ao verificado na horizontal. Porém, nos meses de verão, períodos com maiores razões de nebulosidade e precipitações pluviométricas, as superfícies inclinadas propiciaram maiores frações difusas da irradiação global. Esse fato decorre dos menores valores da irradiação no topo da atmosfera para os planos inclinados, quando comparados com a horizontal.

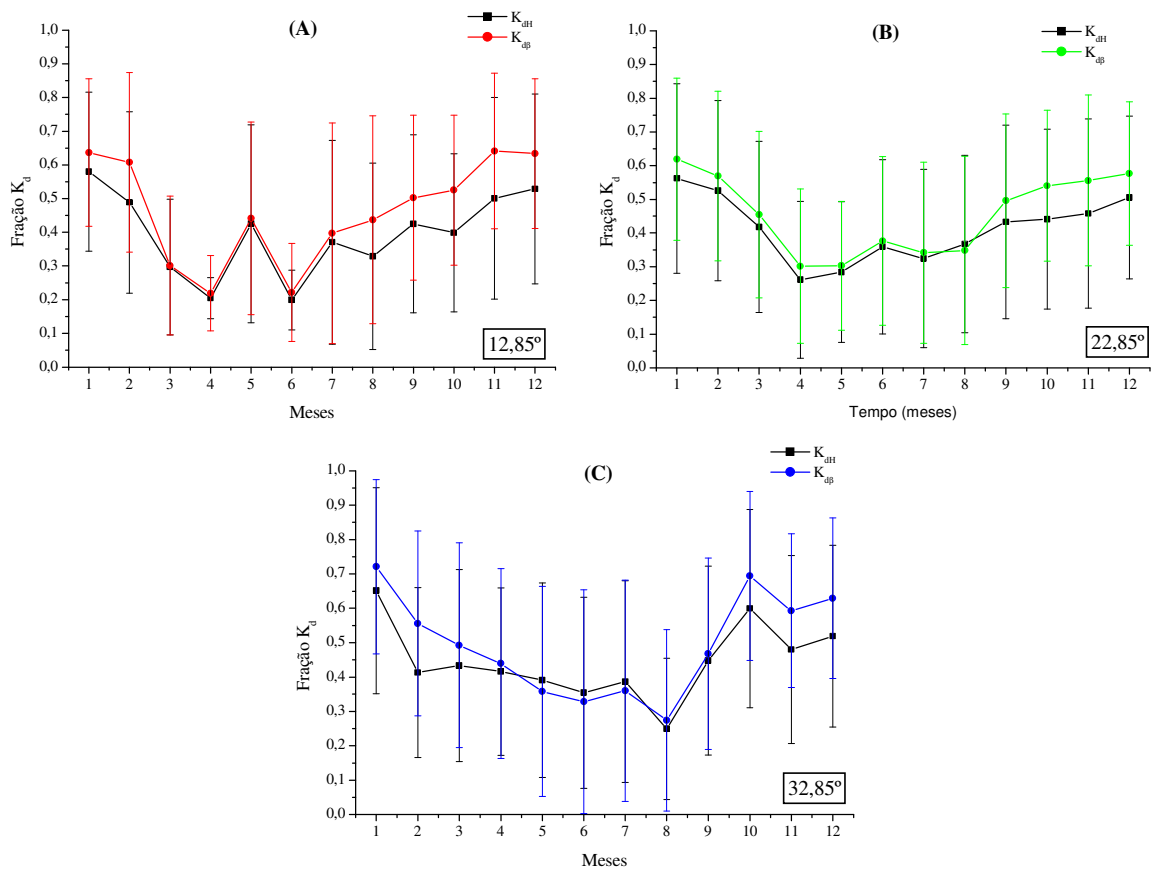


Figura 34. Frações médias mensais $\left(\overline{K_d}\right)$ para superfícies horizontais e inclinadas a $12,85^\circ$ (a), $22,85^\circ$ (b) e $32,85^\circ$ (c) com face voltada para o Norte.

Quando comparamos os valores de $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ das superfícies inclinadas com os valores das superfícies horizontais, em cada período de medidas, também podemos verificar uma sazonalidade dependente da inclinação. No ângulo de $12,85^\circ$, independente do

mês, a superfície inclinada apresentou valores de $\left(\overline{K_d}\right)$ inferiores ao da superfície horizontal, com menores diferenças no período de inverno e maiores no período de verão. Nessa inclinação o máximo da fração difusa em relação a irradiação global foi de 51,9% em janeiro e o mínimo de 18,7% em junho.

Na inclinação de 22,85°, os meses de maio, julho e agosto, apresentaram valores de $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ inferiores aos encontrados para a superfície horizontal. As maiores frações difusas das irradiações globais foram encontradas no mês de janeiro, tanto para a superfície inclinada quanto para a horizontal (0,618 e 0,585), indicando o efeito da inclinação.

Em 32,85°, esse comportamento foi acentuado, pois os valores de $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ foram superiores para superfície inclinada apenas nos meses de outubro, novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Nesse ano ocorreram valores de frações difusas elevados para a superfície horizontal nos meses de dezembro e janeiro, sendo também acompanhado pela superfície inclinada.

Mesmo com efeitos das variações climáticas entre os anos, as evoluções das frações nas superfícies inclinadas apresentam uma variação sazonal. Nos valores de declinação solar positivos, quando o Sol declina no Hemisfério Norte, podem ser esperados menores níveis da componente difusa da irradiação global cujos períodos dependem da intensidade de inclinação de superfícies com face voltada para o Norte no Hemisfério Sul.

As diferenças entre os valores de $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ no período de inverno são crescentes com o aumento da intensidade de inclinação. Esse comportamento não era esperado, pois ocorre uma diminuição da diferença entre os níveis de irradiação difusa entre a superfície horizontal e inclinada no período de inverno com o aumento da intensidade de inclinação. Todavia, o uso das frações pode propiciar a visualização dessas tendências, uma vez que, no seu emprego são eliminadas as dependências astronômicas e geográficas que os níveis das irradiações possuem, permanecendo apenas a dependência climática.

A Figura 35 apresenta a transmissividade difusa da atmosfera para superfícies inclinadas e horizontais. Neste caso também, são observados os mesmos efeitos verificados para as frações $\left(\overline{K_d}\right)$ da sazonalidade, em que se têm ao longo do ano as frações

$\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ menores do que as frações $\left(\overline{K'_{dH}}\right)$ para a inclinação de $12,85^\circ$. Já para o ângulo de $22,85^\circ$, esse comportamento ocorre somente nos meses de maio, junho e julho, enquanto que em $32,85^\circ$ vai de março a setembro.

As mesmas considerações sobre as variações climáticas que influenciaram na variação dos valores de $\left(\overline{K'_d}\right)$ nas superfícies horizontais entre os diferentes anos, também são validas para $\left(\overline{K'_d}\right)$.

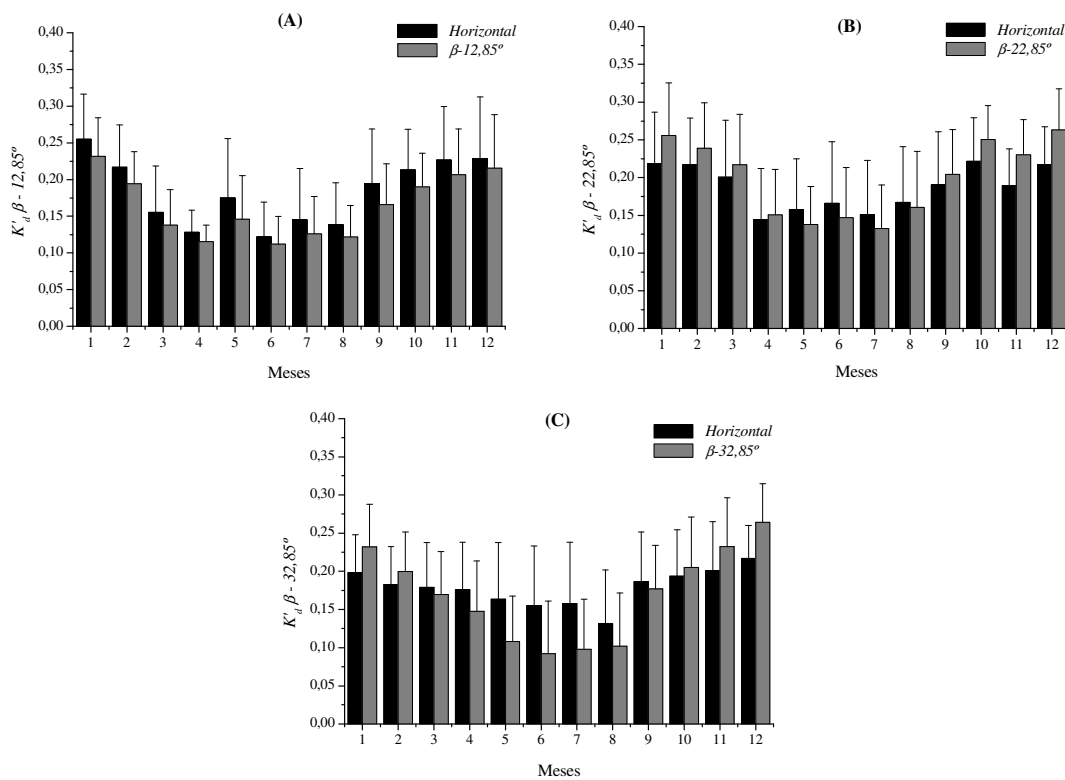


Figura 35. Frações médias mensais da relação entre a irradiação difusa de referência e a irradiação no topo da atmosfera $\left(\overline{K'_d}\right)$ para superfícies inclinadas e horizontais.

Na inclinação de $12,85^\circ$, os maiores valores foram verificados em dezembro (0,2317) e os menores em junho (0,1121). Porém, os níveis verificados em maio foram elevados nas duas superfícies (0,1461 e 0,1751 para inclinada e horizontal). Esses valores foram influenciados diretamente pelo aumento da nebulosidade no mês de maio (0,44), quando comparado à média de 1999 a 2005 ($0,33 \pm 0,1$), conforme a Tabela 1. No mês de

agosto são esperados níveis incidentes baixos de irradiação difusa, visto que, para as condições de Botucatu, nesse mês se tem as menores razões de nebulosidade, ou seja, grande parte dos dias apresenta céu aberto. As médias anuais de $(\overline{K'_d})$ foram de $0,1831 \pm 0,06$ e $0,1636 \pm 0,05$, para a inclinação de $12,85^\circ$ e horizontal, no ano de 2002.

Entre os meses de outubro e fevereiro para o período de medidas da inclinação de $22,85^\circ$, os valores de $(\overline{K'_{d\beta}})$ foram superiores a 0,23, sendo em média 12% maiores do que os valores $(\overline{K'_{dH}})$. Os maiores níveis de $(\overline{K'_{dH}})$ foram verificados em outubro ($0,2216 \pm 0,0578$), todavia, para a condição inclinada a $22,85^\circ$, foram em dezembro ($0,2631 \pm 0,05$), com valores superiores a 0,251 em janeiro e setembro. Os maiores e menores valores $(\overline{K'_{dH}})$ foram verificados na inclinação de $32,85^\circ$, nos meses de dezembro ($0,2641 \pm 0,05$) e junho ($0,0921 \pm 0,06$), respectivamente.

Observa-se que ocorre um aumento da diferença entre as frações $(\overline{K'_{dH}})$ e $(\overline{K'_{d\beta}})$, no período de inverno, com o incremento da intensidade de inclinação. Esse fato se justifica pelo ganho significativo que existe de irradiação no topo da atmosfera para superfícies com maiores inclinações durante o inverno (Figura 9) em conjunto com os menores valores de irradiação difusa de referência nas superfícies inclinadas (Figura 24).

As medidas de irradiação difusa em superfícies inclinadas com o emprego do anel de sombreamento Melo-Escobedo ainda apresentam restrições quanto à aplicação dos fatores de correção isotrópicos e anisotrópicos. Por conseguinte, modelos de estimativa dessa componente da irradiação global nas inclinadas são importantes e aplicáveis.

Scolar et al. (2003) apresentaram uma correlação entre $(K_{d\beta})$ e (K_{TH}) , com ajuste de um polinômio de quarto grau (equação 28), cujo R^2 foi de 0,91. Para essas correlações vários autores concluíram que os melhores ajustes são dados por polinômios de quarto grau, com imposição de limites máximos e mínimos para (K_{TH}) .

$$(K_d = 0,993 + 0,178(K_{TH}) - 0,945(K_{TH})^2 - 4,71(K_{TH})^3 + 4,89(K_{TH})^4 \quad (28)$$

Esses modelos também são chamados do tipo Liu e Jordan (1960), (K_d) pois estimam a irradiação difusa baseados nos índices de claridade. Porém, o uso das frações $(K_{d\beta})$ implica na necessidade da medida da irradiação global também nas inclinações. Assim, nesse trabalho foram ajustados modelos de estimativas que correlacionam as frações $(K'_{d\beta})$ com (K_{TH}) , que necessitam apenas de medidas da irradiação global na superfície horizontal.

A Figura 36 apresenta as correlações entre $(K'_{d\beta})$ e (K_{TH}) dadas pelas curvas médias dos intervalos centesimais de (K_{TH}) . Inicialmente a correlação entre $(K'_{d\beta})$ e (K_{TH}) apresentou grandes espalhamentos que dificultaram a geração de equações de estimativas, sendo necessária a aplicação da curva média. Nesse caso, os valores de (K_{TH}) foram discretizados em intervalos centesimais (de 0,01 em 0,01 unidades), possibilitando a avaliação da tendência média de variação de $(K'_{d\beta})$. Em cada um desses subintervalos foi calculada a média de $(\overline{K'_{d\beta}})$ e do desvio $(\delta\overline{K'_{d\beta}})$ para as três inclinações. Essa metodologia foi adotada seguindo os trabalhos de Gomes (2006a), Escobedo et al. (2007b) e Escobedo et al. (2009).

Foram ajustas polinômios de 2º grau (equações 29, 30 e 31) para os agrupamentos anuais de valores diários, com coeficientes de determinação iguais a 0,84025; 0,89071 e 0,87502, correspondentes as Figuras 33^a, 33b e 33d.

$$\overline{K'^d_{d\beta}} = -0,02254 + 1,22689(K_{TH}^d) - 1,49656(K_{TH}^d)^2 \quad (29)$$

$$\overline{K'^d_{d\beta}} = -0,02922 + 1,43189(K_{TH}^d) - 1,70392(K_{TH}^d)^2 \quad (30)$$

$$\overline{K'^d_{d\beta}} = -0,04254 + 1,51652(K_{TH}^d) - 1,96006(K_{TH}^d)^2 \quad (31)$$

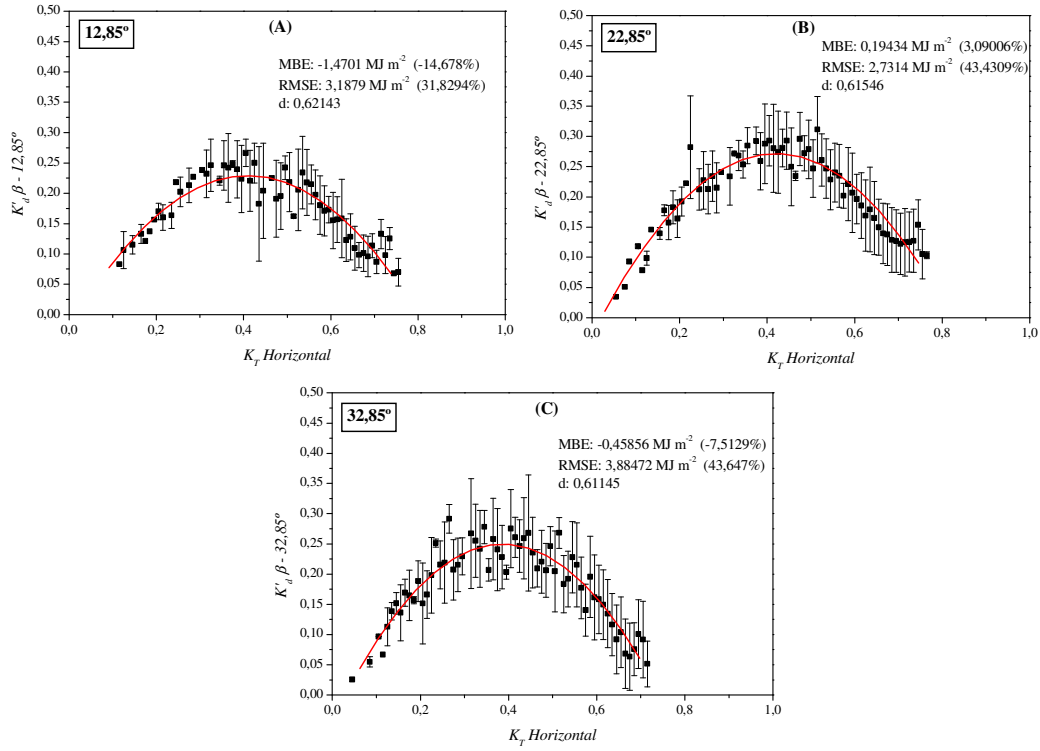


Figura 36. Correlações entre $\left(\overline{K'^d_{d\beta}}\right)$ e $\left(K^d_{TH}\right)$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,8° (c) com a face voltada para o Norte.

Essas curvas médias apresentam um crescimento dos valores de $\left(\overline{K'^d_{d\beta}}\right)$ até pontos máximos de 0,2666; 0,3115 e 0,2917, que correspondem a regiões de nebulosidade moderada ($\left(K_{TH}\right)$ variável entre 0,35 a 0,45), e decaem para valores em torno de 0,07; 0,10 e 0,05 para condições de pouca nebulosidade ($\left(K_{TH}\right)$ próximo a 0,75).

Pelas equações supracitadas, os pontos máximos são verificados também em condições de nebulosidade moderada, com valores de $\left(K_{TH}\right)$ iguais a 0,41; 0,42 e 0,39, propiciando valores de $\left(\overline{K'^d_{d\beta}}\right)$ em torno de 0,2289; 0,2632 e 0,2508 para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, respectivamente. Todavia, essas equações com agrupamentos anuais não apresentaram bons desempenhos em estimativas, visto que os ajustamentos são em torno de 62% apenas e os espalhamentos acima de 30%.

Dal Pai (2001) cita que estes valores máximos ocorrem na cobertura de céu parcialmente nublado, o que causa um aumento do fluxo difuso em virtude do comportamento complexo dessas condições de cobertura do céu, mesclando as componentes difusa e direta da irradiação ao mesmo tempo.

Esse comportamento quadrático dos dados pode ser explicado pelo fato de que durante o período do inverno, podem ocorrer dias com nebulosidade alta (céu nublado) decorrentes principalmente da entrada de frentes frias. Nesses dias, os índices de claridade são baixos, indicando que a irradiação global incidente também é baixa, com grande contribuição da componente difusa. Em contrapartida, a irradiação no topo da atmosfera aumenta conforme a intensidade de inclinação para os períodos de inverno, o que torna as frações $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ pequenas. Porém, para dias de céu aberto, a maiores contribuições nos níveis de irradiação global são dadas pela componente direta, diminuindo os níveis de irradiação difusa incidentes, permitindo também, um decréscimo dos valores de $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$. Outros autores também verificaram essa tendência quadrática da fração $\left(\overline{K'_{d\beta}}\right)$ correlacionada com o índice de claridade de superfícies horizontais (JIANG, 2009; POSADILLO e LUQUE, 2009).

A menor variação do desvio-padrão para valores de $\left(H_{TH}^d\right)$ inferiores a 0,20 (condição de céu nublado) são em função dos efeitos da massa ótica serem minimizados para essa cobertura de céu. Já na faixa intermediária dos valores de $\left(H_{TH}^d\right)$, essa variabilidade não depende exclusivamente dos valores dos índices de claridade, mas também da massa ótica, que permite gerar os efeitos de sazonalidade nos modelos de estimativa com agrupamentos mensais (REINDL et al., 1990; GONZÁLES E CALBÓ, 1999; DAL PAI, 2001).

A Tabela 17 apresenta a validação das equações com agrupamentos anuais nos meses para as três inclinações estudadas. Observa-se uma melhoria significativa nos desempenhos, pois as variações climáticas sazonais (como precipitações e razão de nebulosidade) apresentam seus efeitos distribuídos nos meses que apresentam maiores alterações, principalmente novembro, dezembro, janeiro e abril (entrada de frentes frias).

Tabela 17. Resultados das validações das relações entre $(K_{d\beta}^d)$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações anuais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	9,9100	8,8625	-1,0474	1,6806	-10,5690	16,9583	0,8724
	Fevereiro	7,6705	7,7913	0,1207	1,2046	1,5740	15,7037	0,8584
	Setembro	7,8245	6,9909	-0,8336	1,7030	-10,6540	21,7643	0,8664
	Outubro	9,5555	7,7544	-1,8011	2,1022	-18,8490	22,0001	0,8457
	Novembro	10,9091	10,2259	-0,6832	1,3461	-6,2630	12,3387	0,7990
	Dezembro	9,1503	8,3727	-0,7776	1,5362	-8,4980	16,7889	0,9101
22,85°	Janeiro	9,9475	7,8565	-2,0911	3,3689	-21,0210	33,8663	0,7997
	Fevereiro	9,4023	7,9490	-1,4533	1,7634	-15,4570	18,7545	0,8535
	Março	7,0516	7,6433	0,5917	1,3466	8,3903	19,0962	0,8153
	Abril	5,4317	7,0978	1,6661	2,2092	30,6744	40,6729	0,7756
	Maio	4,7452	5,6677	0,9225	1,5193	19,4413	32,0168	0,8872
	Junho	5,4391	7,0639	1,6248	2,1208	29,8726	38,9923	0,6957
	Julho	4,6623	6,6862	2,0239	2,2334	43,4098	47,9043	0,7130
	Agosto	6,3935	7,3066	0,9131	1,5282	14,2816	23,9024	0,8451
	Setembro	7,2463	7,7693	0,5230	0,7743	7,2175	10,6849	0,9694
	Outubro	7,6260	7,7431	0,1171	1,0324	1,5350	13,5372	0,9289
	Novembro	7,0160	6,4782	-0,5378	0,9429	-7,6656	13,4393	0,9122
	Dezembro	8,0054	7,5091	-0,4963	0,8785	-6,1995	10,9736	0,9133
32,85°	Janeiro	9,0722	9,0403	-0,0319	-2,0370	-0,3513	-22,4540	0,7474
	Fevereiro	7,8090	6,1687	-1,6403	2,0914	-21,0050	26,7824	0,8242
	Março	6,5691	6,4027	-0,1664	1,5219	-2,5332	23,1683	0,8528
	Abril	4,7038	5,5063	0,8026	1,4550	17,0625	30,9331	0,9164
	Maio	3,4493	5,0996	1,6504	2,2168	47,8462	64,2685	0,8194
	Junho	2,9044	3,3965	0,4922	1,3365	16,9463	46,0165	0,8972
	Julho	3,4106	3,6504	0,2398	1,8618	7,0316	54,5877	0,8126
	Agosto	4,1206	5,1365	1,0159	1,4876	24,6545	36,1014	0,9038
	Setembro	6,1374	5,6917	-0,4457	1,6021	-7,2612	26,1039	0,9141
	Outubro	7,4104	8,1390	0,7286	1,2468	9,8321	16,8255	0,8924
	Novembro	7,4623	7,8912	0,4289	1,0630	5,7480	14,2451	0,9399
	Dezembro	7,7317	5,7471	-1,9845	2,4029	-25,6680	31,0787	0,7298

Os modelos de estimativa com agrupamentos mensais, que correlacionam os valores de (K'_{dB}) e (K_{TH}) por equações quadráticas são apresentados na Tabela 18. As piores correlações são verificadas nos meses de fevereiro e março, com R^2 em torno de 0,80 para a inclinação de 22,85°. Todavia, em todos os meses os coeficientes de correlação (R) foram superiores a 0,89.

Em grande parte dos meses da inclinação de 32,85°, os modelos apresentaram tendências de subestimativas (Tabela 19), com desvios variando entre -0,0006 e -0,9487 MJ m⁻² ou em termos percentuais, entre -0,02 a -12,80. Já para a inclinação de 22,85°, na maioria dos meses os modelos superestimam os níveis de irradiação difusa incidentes, com oscilações entre 0,0521 e 0,9593 MJ m⁻² (1,12 e 12,58%). Os espalhamentos variaram entre 0,86 e 2,64 MJ m⁻², correspondentes a 11,99 % e 26,56%. Esses resultados estão em conformidade com os verificados na literatura para correlações entre fração difusa inclinada com índice de claridade horizontal, onde MBE varia de -2% a 7,59% e o RMSE pode atingir até 30,94% (POSADILLO e LUQUE, 2009; JIANG, 2009).

Na maioria dos meses foram encontrados índices de ajustamentos melhores do que os verificados nos agrupamentos anuais, todavia, os piores valores de “d” foram nos meses com grandes variações da cobertura do céu, como em dezembro, janeiro, fevereiro, setembro outubro, sendo nos primeiros a maior influencia gerada pela nebulosidade e dois últimos decorrentes as partículas em suspensão oriundas da queima da cana-de-açúcar na região.

Por conseguinte, para estimativas da irradiação difusa em superfícies inclinadas com base no índice de claridade as equações mensais podem ser aplicadas com bastante confiabilidade.

Tabela 18. Coeficientes de regressão dos modelos de estimativa da fração $(K'_{d\beta})$ em função da fração (K_{TH}^d) , com agrupamentos mensais e coeficientes de determinação, para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Inclinação	Mês	$K'_b{}^d = \sum_{j=0}^2 a_j ((K_{TH}^d) i)^j$			R ²
		a_0	a_1	a_2	
12,85°	Janeiro	0,15448	0,59413	-0,69286	0,81346
	Fevereiro	0,10877	0,60622	-0,75976	0,83698
	Março	0,00920	0,86660	-1,04845	0,81328
	Abril	-0,58221	2,72005	-2,54539	0,84126
	Maio	-0,08704	1,55289	-1,93393	0,92141
	Junho	-2,33230	8,46298	-7,36165	0,81837
	Julho	-0,06362	1,41214	-1,76859	0,89938
	Agosto	-0,05211	1,34381	-1,72665	0,87094
	Setembro	-0,08630	1,54482	-1,84645	0,91882
	Outubro	-0,07585	1,66250	-2,02203	0,85993
	Novembro	-0,07107	1,73430	-1,91993	0,87975
	Dezembro	-0,13902	1,96781	-2,24672	0,88464
22,85°	Janeiro	-0,04340	1,70539	-1,95908	0,85418
	Fevereiro	-0,01117	1,40207	-1,69964	0,80229
	Março	-0,08199	1,73952	-2,00677	0,80390
	Abril	-0,11659	1,69725	-2,07428	0,83180
	Maio	-0,02702	1,23125	-1,51659	0,78195
	Junho	-0,06162	1,48279	-1,87287	0,82899
	Julho	-0,08026	1,48448	-1,80609	0,78294
	Agosto	-0,16576	2,01193	-2,32126	0,81840
	Setembro	-0,03667	1,34814	-1,54377	0,81513
	Outubro	-0,04709	1,52706	-1,73532	0,84603
	Novembro	-0,04310	1,61370	-1,88325	0,91227
	Dezembro	0,06565	1,13187	-1,02416	0,94555
32,85°	Janeiro	-0,01960	1,72014	-2,02769	0,86934
	Fevereiro	-0,04759	1,58118	-1,88978	0,82113
	Março	-0,05251	1,51689	-1,86191	0,79769
	Abril	-0,05370	1,34036	-1,75558	0,93760
	Maio	-0,04937	1,16179	-1,50909	0,83051
	Junho	-0,13702	1,68712	-2,17766	0,89293
	Julho	-0,04840	1,26379	-1,70410	0,86776
	Agosto	-0,12963	1,81952	-2,30859	0,87416
	Setembro	-0,08699	1,70996	-2,11730	0,83197
	Outubro	-0,07279	1,79022	-2,22681	0,94661
	Novembro	-0,00867	1,52036	-1,87366	0,86698
	Dezembro	-0,04495	1,86822	-2,29548	0,89940

Tabela 19. Resultados das validações das relações entre $(K'_{d\beta})$ e (K_{TH}^d) com agrupamentos mensais e equações mensais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Janeiro	9,9099	10,0400	0,1301	2,1684 ^a	1,3127	21,8814 ^b	0,9407
	Fevereiro	7,6705	7,3251	-0,3454 ^a	1,2672 ^a	-4,5028 ^b	16,5205 ^b	0,9462
	Setembro	7,8245	8,0285	0,2040	1,4931	2,6066	19,0825	0,9083
	Outubro	9,5555	9,2413	-0,3139	1,4023	-3,2851	14,6750	0,9139
	Novembro	10,9091	10,5893	-0,3198	1,3438	-2,9316	11,7779	0,9296
	Dezembro	9,1503	8,1911	-0,9592 ^a	1,5060	-10,4830 ^b	16,4584	0,9314
22,85°	Janeiro	9,9475	9,8224	-0,1251	2,6430	-1,2580	26,5695	0,8476
	Fevereiro	9,4023	9,0292	-0,1788	1,3762	-2,1466	16,5208	0,9138
	Março	7,0516	6,8918	0,2710	1,4566 ^a	4,1774	22,4575 ^b	0,9028
	Abril	5,4317	4,6642	-0,7675	1,57420	-14,1300	28,4819	0,8924
	Maio	4,7452	5,2359	0,4907 ^a	1,3278	10,3417	27,9825	0,8903
	Junho	5,4391	5,0241	-0,4150	1,5031	-7,6294	27,6349	0,8344
	Julho	4,6623	4,7144	0,0521	0,9201	1,1170	19,7340	0,9300
	Agosto	6,3935	6,6466	0,2531	1,1532	3,9588	18,0369	0,9219
	Setembro	7,2463	7,5275	0,2581 ^a	0,8691 ^a	3,5616	11,9941 ^b	0,9577 ^c
	Outubro	7,6260	8,5853	0,9593 ^a	1,5419 ^a	12,5794 ^b	20,2195 ^b	0,8907 ^c
	Novembro	7,0160	7,4235	0,4075	0,9314	5,8083	13,2762	0,9171
	Dezembro	8,0054	7,8374	-0,1680	1,8617 ^a	-2,0989	23,2554 ^b	0,8558 ^c
32,85°	Janeiro	9,0722	9,5512	0,4790 ^a	2,0901 ^a	5,2800 ^b	23,0382 ^b	0,9061
	Fevereiro	7,8090	7,7540	-0,0551	1,5073	-0,7050	19,3022	0,8697
	Março	6,5691	7,1652	0,5961 ^a	1,4832	9,0750 ^b	22,5784	0,8823
	Abril	4,7038	3,9555	-0,7483	1,5462 ^a	-15,9083	32,8720 ^b	0,8994 ^c
	Maio	3,4493	3,1712	-0,2781	1,1147	-8,0631	32,3163	0,9172
	Junho	2,9044	2,9038	-0,0006	1,2584	-0,0196	23,3288	0,9034
	Julho	3,4106	2,8653	-0,5454 ^a	1,7525	-15,9898 ^b	31,3839	0,9074
	Agosto	4,1206	3,8387	-0,2820	1,0269	-6,8424	24,9200	0,9560
	Setembro	6,1374	5,7048	-0,4326	1,5501	-7,0493	25,2570	0,9144
	Outubro	7,4104	6,4618	-0,9487 ^a	1,3690 ^a	-12,8016 ^b	18,4744 ^b	0,8798 ^c
	Novembro	7,4623	7,1925	-0,2698	0,9969	-3,6157	13,3589	0,9381 ^c
	Dezembro	7,7317	8,2825	0,5508	1,4342	7,12396	18,5493	0,8718

As equações mensais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nos meses em termos energéticos (a), em percentual (b) e em ajustamento (c).

4.9. Estimativas das irradiações global, direta e difusa em superfícies inclinadas com base na razão de insolação (Coeficientes de Angström-Prescott)

A Figura 37 mostra as correlações entre os índices de claridade ($K_{T\beta}^d$) para superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85° em função da razão de insolação $(n/N)^d$ em agrupamentos anuais. Essas correlações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ são lineares independentemente do ângulo de inclinação e os coeficientes de determinação acima de 0,93 mostram que as frações estão bem correlacionadas com a razão de insolação.

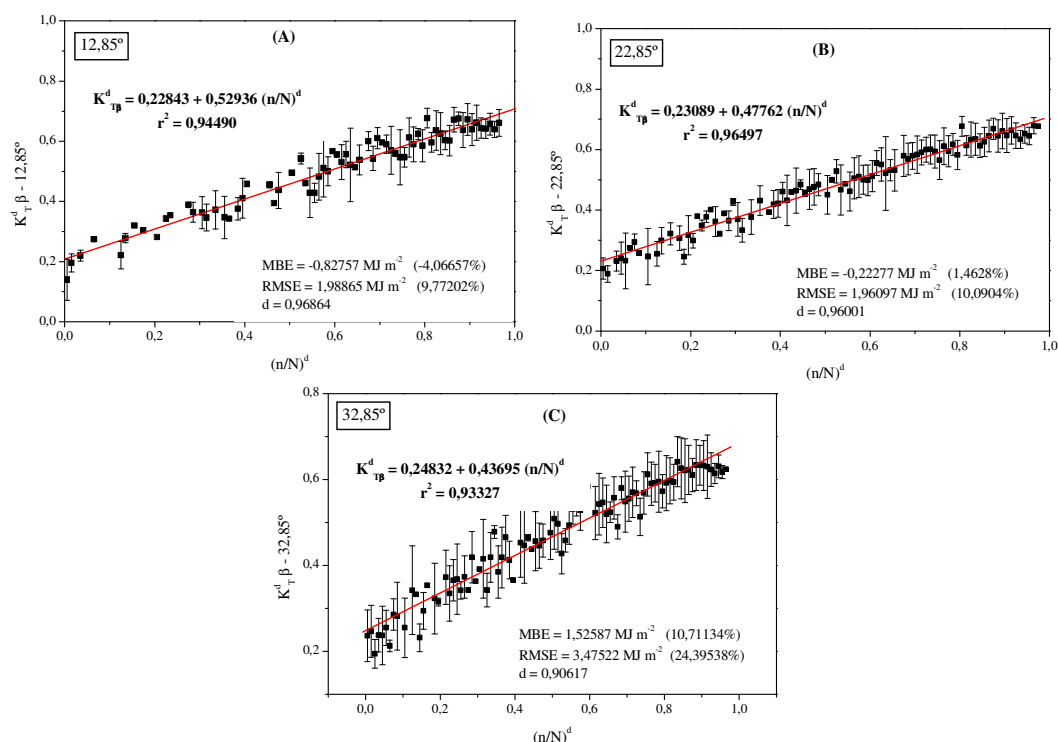


Figura 37. Correlações entre $(\overline{K}_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Os coeficientes a se apresentaram crescentes com o aumento da intensidade de inclinação, mostrando que para um dia completamente nublado, a transmissividade mínima da atmosfera situa-se acima de 22,84% para superfícies com ângulo

de inclinação superior a $12,85^\circ$. Já para dias com céu completamente aberto, onde a razão de insolação tende a 1, ocorre uma inversão, pois a maior transmissividade atmosférica é encontrada na inclinação de $12,85^\circ$ (75,78%), decrescendo com o aumento da intensidade de inclinação (68,53% para a inclinação de $32,85^\circ$).

Os valores dos coeficientes a para os agrupamentos anuais foram inferiores aos valores observados para superfícies horizontais em Botucatu-SP, que é de 26,35%, todavia a transmissividade máxima na inclinação de $12,85^\circ$ foi superior ao verificado para condições horizontais, que é de 73,71% (ESCOBEDO et al., 2007a).

Nas validações foram dados de $(H_{G\beta}^d)$, $(H_{0\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ de 01/98 a 12/98 e 01/01 a 08/01 para a inclinação de $22,85^\circ$; de 09/01 a 12/01 e 01/03 a 02/03 para $12,85^\circ$; e de 03/03 a 12/03 e 01/05 a 02/05 para $32,85^\circ$.

Essas correlações anuais apresentaram comportamentos de estimativas diferentes. Para a inclinação de $12,85^\circ$, houve uma tendência de subestimar os valores de $(H_{G\beta}^d)$ em torno de 4,07% ($-0,828 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), com um espalhamento de 9,8% ($1,99 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$). Com o aumento da inclinação para $22,85^\circ$, houve uma diminuição da tendência de subestimar para 1,46% ($-0,223 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), porém com maior espalhamento (10,09%). Para as maiores inclinações ($32,85^\circ$), o modelo anual ajustado superestimou os valores de $(H_{G\beta}^d)$ em 10,71% ($1,53 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) com espalhamentos em torno de 24,4%. Entretanto, os três modelos anuais ajustados nas correlações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ apresentaram ajustamentos superiores a 90%, permitindo boas estimativas nos valores de $(H_{G\beta}^d)$.

A Tabela 20 apresenta as validações das equações dos agrupamentos anuais apresentadas para as correlações de $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ nas estações. Observa-se um aumento dos espalhamentos e uma diminuição dos ajustamentos a medida que a intensidade de inclinação cresce.

Tabela 20. Resultados das validações das relações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ com as equações anuais nos agrupamentos sazonais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Verão	19,6819	18,0726	-1,6093	2,3940	-8,1767	12,1636	0,9604
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	21,4958	22,4606	0,9648	2,1415	4,4884	9,9622	0,9462
	Primavera	20,6199	19,6138	-1,0061	2,2260	-4,8793	10,7952	0,9565
22,85°	Verão	20,2152	16,9307	-3,2845	3,7974	-16,2478	18,7850	0,8388
	Outono	19,3180	20,0558	0,7379	2,0924	3,8196	10,8312	0,9534
	Inverno	18,8896	19,9356	1,0461	1,8466	5,5378	9,7755	0,9573
	Primavera	20,3063	18,8702	-1,4361	2,1532	-7,0721	10,6037	0,9606
32,85°	Verão	18,5214	16,7179	-1,8035	2,5764	-9,7374	13,9104	0,9344
	Outono	16,6803	22,8166	6,1363	6,8980	36,7878	41,3542	0,6390
	Inverno	17,2981	22,8315	5,5334	6,0821	31,9885	35,1606	0,6954
	Primavera	12,0008	17,1165	5,1157	5,7486	42,6274	47,9019	0,8201

As equações encontradas para as correlações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ nos agrupamentos sazonais estão dispostas na Tabela 21. Essas correlações sazonais apresentaram coeficientes de determinação no verão e outono inferiores aos agrupamentos anuais para as três inclinações estudadas, provavelmente pela não aplicação da curva média nessas correlações, o que possibilitou uma maior dispersão dos dados em relação a equação ajustada.

Observa-se que as transmissividades mínimas possuem uma variação sazonal específica, sendo máxima nos meses do verão e da primavera, corroborando com os resultados encontrados por Almorox et al. (2005) para superfícies horizontais em Toledo (Espanha). No verão, o menor valor do coeficiente a foi de 0,24152 na inclinação de 22,85° e o máximo de 0,25364 na inclinação de 12,85°. Já na primavera, foram de 0,21009 e 0,24266, nas inclinações de 32,85° e 22,85°.

As máximas transmissividades, também ocorrem no verão e na primavera para as inclinações de 22,85° e 32,85°, com máximos de 75,73%; 75,56%, 73,66% e 69,84%, respectivamente, com os menores valores na inclinação de 32,85°. Para o ângulo de 12,85°, na primavera é que ocorrem as máximas transmissividades (80,97%), seguidas pelo verão (76,1%), inverno (74,62%) e outono (73,82%). Os dias de outono e inverno

apresentaram transmissividades máximas semelhantes para as demais inclinações, variando de 64,88% a 67,92%. Esses resultados são inferiores aos recomendados pela FAO 56, em que para superfícies horizontais são esperados valores de 0,25 e 0,50 para os coeficientes a e b , (ALLEN et al., 1998). Também são inferiores aos valores mensais encontrados por Almorox et al. (2005) na Espanha, que em superfícies horizontais os valores máximos e mínimos foram de 0,329 (julho) 0,259 (outubro).

Martínez-Lozano et al. (1984) apresentaram os valores dos coeficientes a e b encontrados em 120 trabalhos científicos de diversas regiões da Terra. Os valores dos coeficientes a e b encontrados nos agrupamentos anuais e sazonais da fração $(K_{T\beta}^d)$ são semelhantes aos verificados na maioria dos trabalhos para superfície horizontais (com variações entre 0,14 e 0,35 para a e entre 0,35 e 0,79 para b).

Tabela 21. Equações de estimativas sazonais das frações médias $(K_{T\beta}^d)$ em função de $(n/N)^d$ em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Inclinação	Estação	Equação	R ²
12,85°	Verão	$K_{T\beta}^d = 0,25364 + 0,50750 (n/N)^d$	0,88787
	Outono	$K_{T\beta}^d = 0,22886 + 0,50938 (n/N)^d$	0,88816
	Inverno	$K_{T\beta}^d = 0,20161 + 0,54454 (n/N)^d$	0,93113
	Primavera	$K_{T\beta}^d = 0,22672 + 0,58302 (n/N)^d$	0,94624
22,85°	Verão	$K_{T\beta}^d = 0,24152 + 0,51575 (n/N)^d$	0,94648
	Outono	$K_{T\beta}^d = 0,19162 + 0,48755 (n/N)^d$	0,89046
	Inverno	$K_{T\beta}^d = 0,18462 + 0,48213 (n/N)^d$	0,93745
	Primavera	$K_{T\beta}^d = 0,24226 + 0,51338 (n/N)^d$	0,94142
32,85°	Verão	$K_{T\beta}^d = 0,24350 + 0,49311 (n/N)^d$	0,88142
	Outono	$K_{T\beta}^d = 0,21578 + 0,43841 (n/N)^d$	0,89698
	Inverno	$K_{T\beta}^d = 0,20393 + 0,44495 (n/N)^d$	0,93013
	Primavera	$K_{T\beta}^d = 0,21099 + 0,48829 (n/N)^d$	0,94099

Os resultados das validações das correlações sazonais entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ são apresentados na Tabela 22. Nos dias de verão, independentemente do ângulo de

inclinação, os modelos sazonais, apresentaram tendências de subestimar os valores de $(H_{G\beta}^d)$ em até $-1,9267 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($-9,53\%$). Nas demais estações, os modelos superestimaram os valores de $(H_{G\beta}^d)$, com máximo de $1,67 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ($8,86\%$) no inverno para a inclinação de $22,85^\circ$.

Já os espalhamentos variaram entre $1,56$ e $3,91 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, com máximos em outono e inverno da inclinação de $32,85^\circ$, decorrentes das elevadas razões de nebulosidade dos meses de abril, maio e junho de 2004, em conjunto com junho, setembro e outubro de 2005 (Tabela 01), que também influenciaram nos baixos valores de ajustamento. Nas demais estações, os valores de d foram superiores a $0,9102$. Apenas no outono e inverno para a inclinação de $22,85^\circ$, os modelos anuais apresentaram desempenhos melhores do que os modelos sazonais, tanto em termos energéticos como percentuais.

Tabela 22. Resultados das validações das relações entre $(K_{T\beta}^d)$ e $(n/N)^d$ com equações e agrupamentos sazonais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m^{-2})	Valor Estimado (MJ m^{-2})	MBE (MJ m^{-2})	RMSE (MJ m^{-2})	MBE (%)	RMSE (%)	d
$12,85^\circ$	Verão	19,6819	18,6554	-1,0265	2,0888	-5,2156	10,6128	0,9682
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	21,4958	21,9141	0,4183	1,9083	1,9459	8,8773	0,9579
	Primavera	20,6199	20,6579	0,0380	2,2038	0,1842	10,6876	0,9710
$22,85^\circ$	Verão	20,2152	18,2885	-1,9267	2,7540	-9,5308	13,6232	0,9102
	Outono	19,3180	20,7709	1,4529 ^a	2,4340 ^a	7,5211 ^b	12,5995 ^b	0,9415 ^c
	Inverno	18,8896	20,5658	1,6741 ^a	2,3252 ^a	8,8625 ^b	12,3095 ^b	0,9418 ^c
	Primavera	20,3063	21,0645	0,7582	1,5579	3,7339	7,6719	0,9826
$32,85^\circ$	Verão	18,5214	17,5712	-0,9502	1,9992	-5,1304	10,7941	0,9632
	Outono	16,6803	17,0257	0,3454	3,9130	2,0709	23,4591	0,7420
	Inverno	17,2981	18,3082	0,9593	3,2408	5,5456	18,7349	0,8476
	Primavera	12,0008	13,0696	1,0687	2,5342	8,9053	21,1165	0,9602

As equações sazonais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nas estações em termos energéticos (a), em percentual (b) e em ajustamento (c).

Supit e Van Kappel (1998) citam que os valores médios de RMSE para correlações com $(n/N)^d$ podem variar entre $1,36$ e $3,32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para superfícies

horizontais, corroborando com a grande maioria dos valores de RMSE encontrados nesse trabalho.

Na Figura 38, são apresentadas as correlações entre $(K'_{b\beta})^d$ e $(n/N)^d$ pela curva média para as três inclinações estudadas. Essas correlações se fazem importantes pela dificuldade de se obter dados de $(H_{B\beta}^d)$ em superfícies inclinadas e até mesmo em superfícies horizontais. Para esse último caso, Escobedo et al. (2007a) encontraram uma equação (34) que estima a fração (K_{bH}^d) dada pela razão entre (H_{BH}^d) e (H_{GH}^d) . Observa-se que para dias completamente nublados a irradiação direta que incide em superfície horizontal é em torno de 2,47% da irradiação global.

$$K_{bH}^d = 0,02474 + 0,868(n/N)^d \quad (32)$$

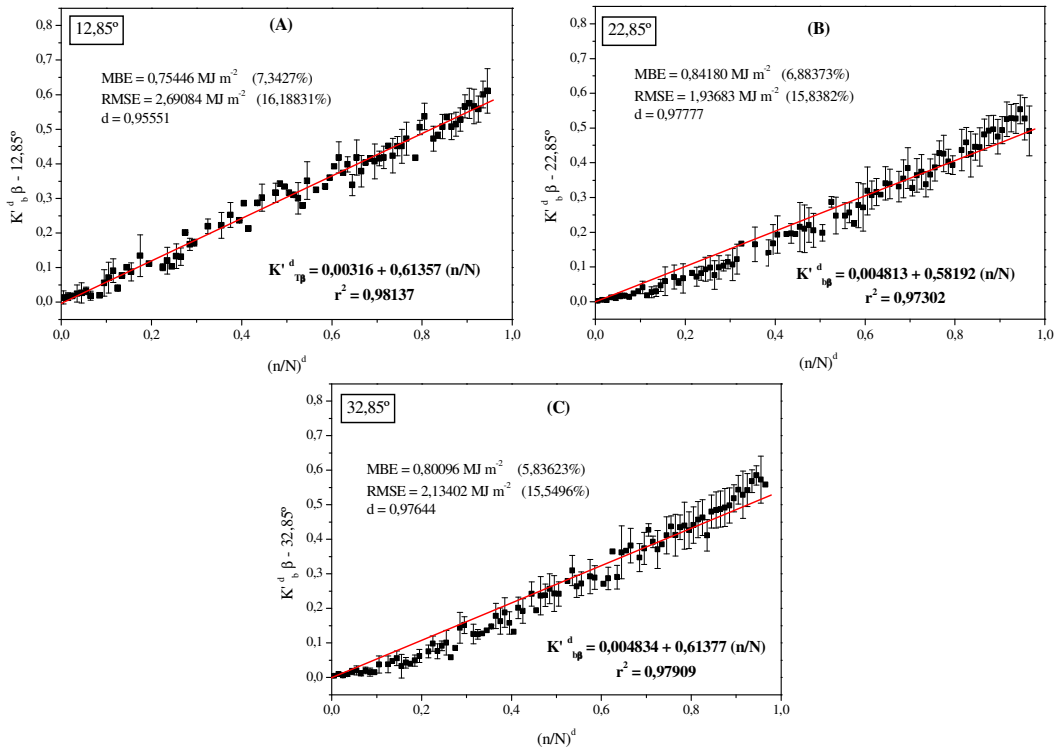


Figura 38. Correlações entre $(\overline{K'_{b\beta}})^d$ e $(n/N)^d$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Para superfícies inclinadas, correlações com a fração $(K_{b\beta}^d)$ apresentam limitações por necessitarem de medidas da irradiação global inclinada. Observa-se que do total de irradiação disponível no topo da atmosfera, para dias de céu completamente nublado, ou seja, em que a razão de insolação diária tende a zero, a transmissividade direta mínima atmosfera é crescente com o aumento dos ângulos de inclinação, permanecendo entre 0,316% e 0,4834% para os ângulos de 12,85° e 32,85°.

Dentre os coeficientes b encontrados, o menor valor foi na inclinação de 22,85°, permitindo que, nessa superfície em dias com céu completamente aberto se tenha incidido na superfície, valores próximos a 58% de irradiação direta do total disponível no topo da atmosfera. Nas demais inclinações os valores de b são semelhantes (0,613).

As três equações encontradas com aplicação da curva média no agrupamento anual superestimam os valores de $(H_{B\beta}^d)$ em no mínimo 0,75 MJ m⁻² dia⁻¹ e com espalhamentos acima de 15% (no mínimo de 1,937 MJ m⁻²). Ambas as equações possibilitam bons ajustamentos entre valores medidos e estimados nas estações, com tendências de superestimativas (Tabela 23).

Tabela 23. Resultados das validações das relações entre $(K_{b\beta}^{'d})$ e $(n/N)^d$ com equações anuais nos agrupamentos sazonais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Verão	9,3193	10,2803	0,9609	2,2174	10,3111	23,7932	0,9750
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	14,7853	17,6150	2,8296	4,0654	19,1382	27,4960	0,7337
	Primavera	9,3743	12,1880	2,8138	3,7420	30,0156	39,9177	0,9091
22,85°	Verão	9,2654	10,2484	0,9830	1,7988	10,6089	19,4139	0,9744
	Outono	13,7572	14,2677	0,5105	1,8716	3,7110	13,6044	0,9786
	Inverno	12,5779	13,7653	1,1874	2,0878	9,4407	16,5988	0,9724
	Primavera	11,9320	12,6473	0,7152	1,9181	5,9940	16,0753	0,9798
32,85°	Verão	10,0116	10,9178	0,9062	1,9960	9,0511	19,9369	0,9778
	Outono	16,2711	17,0511	0,7800	2,4758	4,7938	15,2161	0,9567
	Inverno	17,7517	18,5065	0,7548	2,0496	4,8419	13,1482	0,9731
	Primavera	11,4119	12,0624	0,6505	1,9056	5,7001	16,6986	0,9796

As equações sazonais de estimativas de $(H_{B\beta}^d)$ em função da razão de insolação diária são apresentadas na Tabela 24 e suas respectivas validações na Tabela 25. Todas as equações sazonais apresentaram coeficientes de determinação (R^2) inferiores aos encontrados para os agrupamentos anuais, por causa da não utilização da curva média para obtenção das correlações sazonais.

Os maiores valores do coeficiente a são encontrados no inverno e na primavera, indicando uma transmissividade direta da atmosfera maior nesses meses, decorrentes provavelmente, das baixas razões de nebulosidade que possibilitam maior número de dias com céu parcialmente nublado tendendo a aberto. Com exceção apenas na inclinação de 12,85°, onde o período do outono apresentou o coeficiente a igual a 0,0061, que por sua vez pode ter sido influenciado pelo número de horas de insolação nos meses de maio e junho de 2002 (189,1 e 146,6) serem bem inferiores aos valores médios dos mesmos meses (223,3 e 166,2 horas), conforme a Tabela 01.

Tabela 24. Equações de estimativas sazonais das frações médias $(K_{b\beta}^{'d})$ em função de $(n/N)^d$ em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Inclinação	Estação	Equação	R^2
12,85°	Verão	$K_{b\beta}^{'d} = 0,000096 + 0,62348 (n/N)^d$	0,96670
	Outono	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00610 + 0,62330 (n/N)^d$	0,97168
	Inverno	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00375 + 0,61443 (n/N)^d$	0,97135
	Primavera	$K_{b\beta}^{'d} = 0,001642 + 0,62973 (n/N)^d$	0,97921
22,85°	Verão	$K_{b\beta}^{'d} = 0,000415 + 0,60462 (n/N)^d$	0,96686
	Outono	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00349 + 0,56574 (n/N)^d$	0,95669
	Inverno	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00681 + 0,60037 (n/N)^d$	0,95627
	Primavera	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00524 + 0,60548 (n/N)^d$	0,95748
32,85°	Verão	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00282 + 0,57577 (n/N)^d$	0,95431
	Outono	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00482 + 0,63325 (n/N)^d$	0,97496
	Inverno	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00546 + 0,62086 (n/N)^d$	0,96908
	Primavera	$K_{b\beta}^{'d} = 0,00483 + 0,61337 (n/N)^d$	0,97909

A maioria das equações supracitadas apresentou tendências de superestimar os valores de $(H_{\beta\beta}^d)$, não ultrapassando $1,24 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Somente no inverno, para a inclinação de $12,85^\circ$ ocorreu subestimativa de $-0,1596 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Os valores de RMSE diminuíram praticamente em todas as estações com o aumento do ângulo de inclinação e oscilaram entre $3,08$ e $1,85 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$. Todavia, todas as equações sazonais da correlação entre $(K_{\beta\beta}^{'d})$ e $(n/N)^d$ possibilitaram bons ajustamentos entre os dados de irradiação direta inclinada medida e estimada (acima de $88,74\%$). Porém para a inclinação de $22,85^\circ$, no verão e primavera, o modelo anual apresentou desempenho melhor do que o sazonal, todavia, os ajustamentos sazonais são bons (acima de $0,974$), indicando que podem ser aplicados tanto os modelos sazonais quanto o anual para essa inclinação. Para $12,85^\circ$ e $22,85^\circ$, apenas no verão e inverno, respectivamente, os modelos anuais foram melhores do que os sazonais.

Tabela 25. Resultados das validações das relações entre $(K_{\beta\beta}^{'d})$ e $(n/N)^d$ com equações e agrupamentos sazonais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m^{-2})	Valor Estimado (MJ m^{-2})	MBE (MJ m^{-2})	RMSE (MJ m^{-2})	MBE (%)	RMSE (%)	d
$12,85^\circ$	Verão	9,3193	10,3194	1,0001 ^a	2,2433 ^a	10,7313 ^b	24,0719 ^b	0,9748 ^c
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	14,7853	14,6257	-0,1596	3,0757	-1,0797	20,8021	0,8874
	Primavera	9,3743	10,4814	1,1071	2,4313	11,8101	25,9359	0,9528
$22,85^\circ$	Verão	9,2654	10,3203	1,0548 ^a	1,8458 ^a	11,3845 ^b	19,9208 ^b	0,9741 ^c
	Outono	13,7572	13,8286	0,0715	1,8649	0,5195	13,5555	0,9781 ^c
	Inverno	12,5779	13,7890	1,2111 ^a	2,0592	9,6288 ^b	16,3712	0,9739
	Primavera	11,9320	13,1676	1,2356 ^a	2,0953 ^a	10,3549 ^b	17,5603 ^b	0,9769 ^c
$32,85^\circ$	Verão	10,0116	10,1834	0,1718	1,8767	1,7157	18,7454	0,9790
	Outono	16,2711	16,3865	0,1154	2,3731	0,7089	14,5848	0,9594
	Inverno	17,7517	18,8676	1,1159 ^a	2,2946 ^a	6,2861 ^b	12,9262	0,9494 ^c
	Primavera	11,4119	12,0545	0,6426	1,9044	5,6310	16,6875	0,9797

As equações sazonais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nas estações em termos energéticos (a), em percentual (b) e em ajustamento (c).

Notou-se o mesmo comportamento constatado nas correlações entre $(K_{\tau\beta}^d)$ e $(n/N)^d$, em que as equações sazonais apresentaram desempenhos piores do que os

modelos anuais, entretanto, nas correlações sazonais não foram empregadas as curvas médias, que por sua vez, possibilitam ajustes de equações considerando apenas os valores médios, ou seja, conseqüentemente as influências das variações das condições climáticas são menores quando se usa as curvas médias.

As frações $(K'_{d\beta})^d$ são decrescentes em correlações com a razão de insolação $(n/N)^d$ (Figura 36). Os coeficientes de determinação das equações de estimativas para $(K'_{d\beta})^d$ variando entre 0,8133 e 0,8691, são inferiores aos das equações de estimativa de $(K'_{b\beta})^d$ e $(K'_{T\beta})^d$ cujos valores foram acima de 0,9332. Entretanto dentro das equações de estimativas de cada fração isolada não foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os coeficientes, de tal forma que para as três inclinações, as frações $(K'_{b\beta})^d$ e $(K'_{T\beta})^d$ estão altamente correlacionadas com a razão de insolação, enquanto que a fração $(K'_{d\beta})^d$ apresenta piores correlações.

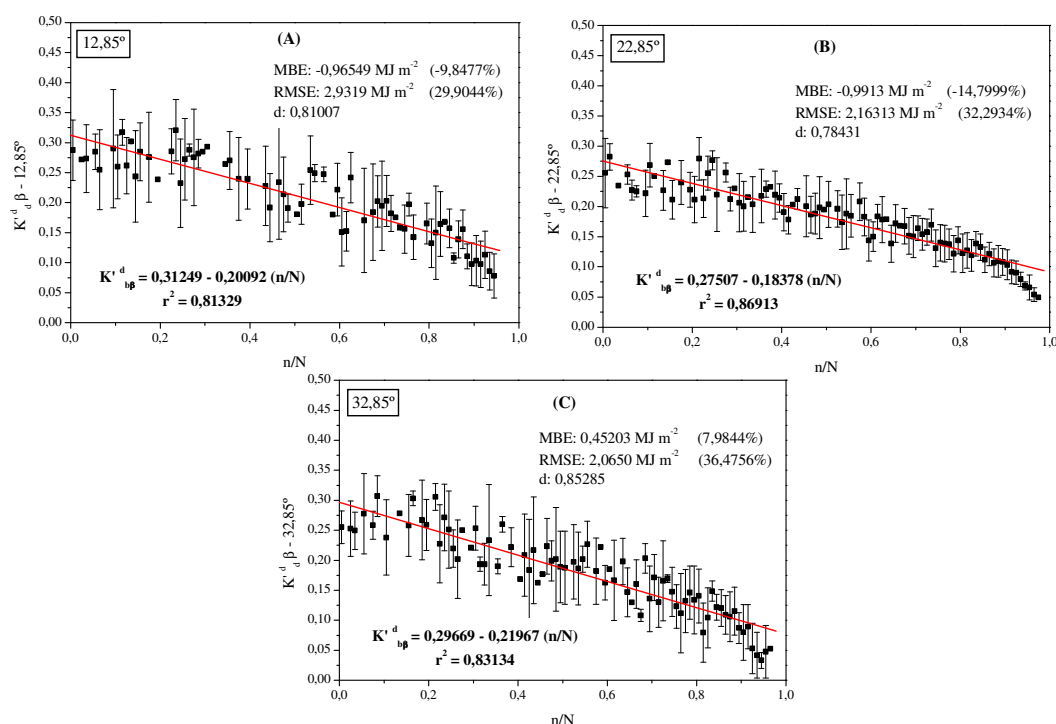


Figura 39. Correlações entre $(\overline{K'_{d\beta}})^d$ e $(n/N)^d$ pela curva média com agrupamento anual, para as inclinações de 12,85° (a), 22,85° (b) e 32,85° (c), com a face voltada para o Norte.

Os indicadores estatísticos MBE obtidos na validação das equações com agrupamentos anuais da estimativa de $(K'_{d\beta})$ em função da razão de insolação, mostram que para as inclinações de 12,85° e 22,85° ocorrem subestimativas das medidas em até 0,9913 MJ m⁻². Todavia, os espalhamentos (RMSE) encontrados foram acima de 29% e os índices de ajustamento “d” entre de 0,78 e 0,85, expressando dentre as três frações correlacionadas com a razão de insolação, o pior desempenho na concordância entre as frações medidas e estimadas.

A aplicação das equações com agrupamentos anuais nos meses também não resultou em bons desempenhos (Tabela 26), pois em grande parte das estações, propiciaram subestimativas das frações $(K'_{d\beta})$ acima de 12% (1,17 MJ m⁻² dia⁻¹) e espalhamentos chegando até 69%. Observa-se ainda que a aplicação das equações anuais nos meses possibilitou ajustamentos inferiores aos verificados na validação dessas equações no ano.

Tabela 26. Resultados das validações das relações entre $(K'_{d\beta})$ e $(n/N)^d$ com equações anuais nos agrupamentos sazonais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Verão	9,5872	8,4153	-1,1718	2,0421	-12,2229	21,3006	0,7948
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	7,6877	5,4260	-2,2618	3,1870	-29,4207	41,4556	0,5383
	Primavera	10,3312	7,9894	-2,3418	2,7077	-22,6671	26,2085	0,6541
22,85°	Verão	9,4266	6,9464	-2,4802	3,5332	-26,3108	37,4812	0,5047
	Outono	5,5693	5,1690	-0,4003	1,8645	-7,1878	33,4781	0,8238
	Inverno	5,8598	5,5863	-0,2735	2,3010	-4,6668	39,2683	0,6811
	Primavera	7,9202	5,3167	-2,6034	3,0342	-32,8710	38,3094	0,6206
32,85°	Verão	8,2707	6,9771	-1,2936	2,3440	-15,6405	28,3410	0,7762
	Outono	9,0436	5,6782	-3,3655	5,3469	-37,2135	59,1237	0,6395
	Inverno	4,4484	5,3455	0,8971	3,1104	20,1656	69,9222	0,7350
	Primavera	11,4549	5,7921	-5,6628	7,3077	-49,4359	63,7955	0,5998

Na Tabela 27, são apresentadas as equações sazonais de estimativas da fração $(K'_{d\beta})$ em função da razão de insolação. Suas aplicações se justificam pelos desempenhos deficientes das equações anuais para cada inclinação. Praticamente, em todas as estações e inclinações, as equações sazonais apresentaram coeficientes de determinação superiores aos encontrados nos agrupamentos anuais.

As correlações sazonais demonstram que a transmissividade máxima e mínima difusa da atmosfera ocorrem nas estações do verão e primavera, decorrentes da elevação das razões de nebulosidade e das precipitações na região de Botucatu-SP (Tabela 01).

Tabela 27. Equações de estimativas sazonais das frações médias $(K'_{d\beta})$ em função de $(n/N)^d$ em superfícies inclinadas a 12,85°, 22,85° e 32,85°, com a face voltada para o Norte.

Inclinação	Estação	Equação	R ²
12,85°	Verão	$K'_{d\beta} = 0,32022 - 0,18963 (n/N)^d$	0,85528
	Outono	$K'_{d\beta} = 0,26111 - 0,18480 (n/N)^d$	0,83962
	Inverno	$K'_{d\beta} = 0,26590 - 0,16654 (n/N)^d$	0,86570
	Primavera	$K'_{d\beta} = 0,35153 - 0,19838 (n/N)^d$	0,92491
22,85°	Verão	$K'_{d\beta} = 0,27692 - 0,17344 (n/N)^d$	0,87989
	Outono	$K'_{d\beta} = 0,28444 - 0,20582 (n/N)^d$	0,90168
	Inverno	$K'_{d\beta} = 0,24234 - 0,15090 (n/N)^d$	0,83977
	Primavera	$K'_{d\beta} = 0,27152 - 0,17793 (n/N)^d$	0,91965
32,85°	Verão	$K'_{d\beta} = 0,31507 - 0,19432 (n/N)^d$	0,90450
	Outono	$K'_{d\beta} = 0,25266 - 0,18274 (n/N)^d$	0,84038
	Inverno	$K'_{d\beta} = 0,23871 - 0,17555 (n/N)^d$	0,89760
	Primavera	$K'_{d\beta} = 0,33377 - 0,21179 (n/N)^d$	0,92715

As equações sazonais apresentaram em todas as estações e inclinações, desempenhos superiores aos agrupamentos anuais na estimativa de $(K'_{d\beta})$ pela razão de insolação (Tabela 28), com exceção apenas o outono e inverno na inclinação de 22,85° que apresentaram desvios (MBE) superiores em termos energéticos e percentuais. Os espalhamentos foram inferiores a 2,84 MJ m⁻² dia⁻¹ ou 33,40%. Todavia, os índices de

ajustamento “d” variaram em torno de 75% e 86%, confirmando que as frações $(K'_{d\beta})$ para as três inclinações estudadas não são fortemente correlacionadas com a razão de insolação, como ocorre para as frações $(K'_{b\beta})$ e $(K'_{T\beta})$.

Tabela 28. Resultados das validações das relações entre $(K'_{d\beta})$ e $(n/N)^d$ com agrupamentos sazonais e equações sazonais.

Inclinação	Mês	Valor Medido (MJ m ⁻²)	Valor Estimado (MJ m ⁻²)	MBE (MJ m ⁻²)	RMSE (MJ m ⁻²)	MBE (%)	RMSE (%)	d
12,85°	Verão	9,5872	8,3089	-0,8105	1,5718	-7,8449	15,2142	0,8321
	Outono	-	-	-	-	-	-	-
	Inverno	7,6877	8,9125	0,6212	2,3760	8,0800	30,9061	0,8217
	Primavera	10,3312	9,5207	-0,6746	1,7598	-7,0368	18,3556	0,8260
22,85°	Verão	9,4266	10,7780	1,3514	2,8457	14,3364	30,1882	0,8311
	Outono	5,5693	4,9476	-0,6217 ^a	1,8601	-11,1631 ^b	33,3987	0,8409
	Inverno	5,8598	5,1645	-0,6954 ^a	2,2918	-11,8678 ^b	29,1109	0,7551
	Primavera	7,9202	8,9051	0,9850	1,8555	12,4360	23,4280	0,8484
32,85°	Verão	8,2707	7,5934	-0,2699	1,8802	-3,2627	22,7332	0,8068
	Outono	9,0436	8,8402	-0,2035	1,6895	-2,2501	18,6812	0,8339
	Inverno	4,4484	4,2383	-0,0898	0,5450	-2,0187	12,2519	0,8665
	Primavera	11,4549	10,5940	-0,8609	2,5844	-7,5156	22,5619	0,8270

As equações sazonais apresentaram resultados de validações inferiores aos encontrados pela aplicação dos modelos anuais nas estações em termos energéticos (a), em percentual (b) e em ajustamento (c).

Em geral, para as frações $(K'_{d\beta})$ e $(K'_{T\beta})$ correlacionadas com a razão de insolação, as equações geradas com agrupamentos anuais ou sazonais apresentaram dispersões entre as radiações medidas e estimadas (RMSE) inferiores a 25%, corroborando com os valores encontrados na literatura (JAIN e JAIN, 1988; NEWLAND, 1989; REINDL, 1990; SUPIT e VAN KAPPEL, 1998; DE MIGUEL et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002; ALMOROX et al., 2005; ESCOBEDO et al., 2007a). Para as correlações entre $(K'_{d\beta})$ e $(n/N)^d$, espalhamentos inferiores a 25% são encontrados apenas com a aplicação das equações sazonais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento das irradiações incidentes em superfícies inclinadas é importante em várias aplicações agronômicas. Estudos futuros podem avaliar a influência dessas variações dos níveis de irradiação em superfícies inclinadas em processos fisiológicos como a evapotranspiração e em seus modelos de estimativa de referência. Além disso, conhecer o comportamento, principalmente da irradiação global em outras faces de exposição e intensidades de inclinação semelhantes às declividades das lavouras brasileiras.

6. CONCLUSÕES

As superfícies inclinadas com a face voltada para o Norte, recebem uma quantidade maior de irradiação global do que a superfície horizontal durante os meses do inverno e outono, com ganhos em torno de 23,75%, 31,42% e 39,24% e uma quantidade menor de irradiação global durante a primavera e verão, com perdas em 3,69%, 11,70% e 19,55% para as inclinações de 12,85°, 22,85° e 32,85°.

Os ganhos de irradiação direta nas superfícies inclinadas são de 25,63%, 42,65% e 60,08% e as perdas de 1,87%, 11,32% e 20,8% para as inclinações $\langle |L| \rangle$, $\langle |L| - 10^\circ \rangle$ e $\langle |L| + 10^\circ \rangle$, e acompanha a mesma sazonalidade da irradiação global.

Os níveis de irradiação refletida incidente em superfícies inclinadas aumentam significativamente para maiores ângulos de inclinação, contribuindo para os maiores espalhamentos das frações da irradiação global nas superfícies inclinadas a 32,85°.

A irradiação difusa de referência nas superfícies inclinadas a 12,85° e 32,85° foi inferior ao encontrado na horizontal na maioria dos meses, com perdas de até 65%. Apenas na primavera, as superfícies inclinadas apresentaram valores similares aos da horizontal. As medidas da irradiação difusa com o anel de sombreamento Melo-Escobedo foram sempre inferiores aos valores de referência, indicando a necessidade da aplicação de fatores de correção isotrópicos e anisotrópicos com intensidades sazonais e dependentes da cobertura de céu.

Na avaliação dos modelos de estimativa da irradiação global, direta e difusa que incide nas superfícies inclinadas, utilizando partição diária de energia com agrupamentos anuais e mensais, as correlações com o índice de claridade e razão de insolação apresentaram bons resultados. Nas correlações com (K_{TH}^d) , para as frações $(K_{T\beta}^d)$ e $(K_{b\beta}'^d)$ podem ser aplicados as equações anuais e mensais, todavia, para $(K_{d\beta}'^d)$ as equações mensais apresentam desempenhos superiores. Já nas correlações com $(n/N)^d$, as equações anuais e sazonais apresentaram resultados semelhantes na estimativa $(H_{G\beta}^d)$, $(H_{B\beta}^d)$ e $(H_{D\beta}^d)$.

7. REFERÊNCIAS

- AHMAD, F. **Solar radiation studies at Karachi, Pakistan**. 1989. 130 f. Thesis (Doctor Science in Physics), University of Karachi, Karachi, Pakistan, 1989. Disponível em: <<http://eprints.hec.gov.pk/1234/1/953.html.htm>>.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requeriments**. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Rome, 1998.
- ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of monthly Angström-Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. **Renewable Energy**, v. 30, n. 06, p. 931-936, 2005.
- ALVES, A. R. **Irradiância solar global em superfícies de diferentes inclinações e azimutes, para Viçosa-MG**. 1981. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1984.
- ALVES, A. R.; VIANELLO, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; COELHO, D. T. Determinação analítica dos instantes do “nacer” e do “pôr-do-sol” para superfícies inclinadas quaisquer. **Ciência e cultura**, v. 35, n. 02, 1983.
- ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 50, p. 121-126, 1924.
- ARAGON, F. F.; TOLEDO PIZA, J. A. N. Modelo matemático generalizado de radiação solar diária sobre superfícies planas. **Energia na Agricultura**, v. 06, n. 01, p. 5-14, 1991.
- ARAGON, F. F.; TOLEDO PIZA, J. A. N. Avaliação global da incidência de radiação solar em superfícies topográficas. **Energia na Agricultura**, v. 07, n. 01, p. 26-40, 1992.

ASHJACEM, M.; ROOMINAS, M. R.; AZAR, G. Estimating direct, diffuse and global radiation for various cites in Iran by two methods and their comparation with the measured data. **Solar Energy**, v. 50, n. 05, p. 441-446, 1993.

BATTLES, F.J., RUBIO, M.A., TOVAR, J., OLMO, F.J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. Empirical modeling of hourly direct irradiance by means of hourly global irradiance. **Energy**, v.25, n. 07, p. 675-688, 2000.

BATTLES, F. J., OLMO, F. J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v. 54, n. 02, p. 105-114, 1995.

BAUNGARTNER, M. **Die schwellenintensitet des sonnenscheinnatongraphen Campbell-Stockes na wolkenlosen tagen.** Zurich, Arbeitsberichte des Schweizerichen Meteorologischen Zentralannstalt, 1979.

BENINCASA, M. **Efeitos de rampas com diferentes declividades e exposições norte e sul de uma bacia hidrográfica sobre o microclima e produtividade biológica do *Sorghum bicolor* (L) Moench.** 1976. 109 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1976.

BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Antsgröm-Prescott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 02, p. 295-300, 2002.

BOLAND, J.; RIDLEY, B.; BROWN, B. Models of diffuse solar radiation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 04, p. 575-584, 2008.

BUREK, S. A. M.; NORTON, B.; PROBERT, S. D. Analitical and experimental methods for shadow-band correction factors for solarimeters on inclined planes under isotropically diffuse and overcast skies. **Solar Energy**, v. 40, n. 02, p. 151-160, 1988.

CAMPELO JUNIOR, J. H. Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no Sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 06, n. 02, p. 193-199, 1998.

CODATO, G.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; PAI, A. D. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural áreas in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 93, n. 01, p. 57-73, 2008.

COTTLE, H. J. Vegetation on North and South Slopes of Mountains in Southwestern Texas. **Ecology**, v. 13, n. 02, p. 121-134, 1932.

COULSON, K. L. Solar and terrestrial radiation, methods and measurements. Academic Press, New York, 1973.

DAL PAI, A. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de**

sombreamento Melo-Escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa. 2005. 87f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Comparação entre os anéis de sombreamento de Drummond e Melo-Escobedo na medida da irradiância difusa. In: Reunión Argentina y Latinoamericana de Agrometeorología, 10, 4, 2004, Mar del Plata, Argentina. **Anais...** Mar de Plata: AADA, 2004. I CD-ROM.

DAL PAI, A. **Radiação solar difusa instantânea: avaliação dos fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa.** 2001. 81f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Estimativa da radiação solar global para a Região de Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 06, p. 1260-1263, 2003.

DE MIGUEL, A.; BILBAO, J.; AGUIAR, R.; KAMBEZIDIS, H.; NEGRO, E. Diffuse solar irradiation model evaluation in North Mediterranean belt area. **Solar Energy**, v. 70, n. 02, p. 143-153, 2001.

DE MIGUEL, A.; BILBAO, J.; DIEZ, M. Solar radiation incident on tilted surfaces in Burgos, Spain: isotropic models. **Energy Conversion and Management**, v. 30, n. 10, p. 945-951, 1995.

DIAS, C. A. A. **Procedimentos de medição e aquisição de dados de uma torre micrometeorológica em Sinop-MT.** 89 f. 2007. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 2007.

DORNELLAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 08, p. 1213-1219, 2006.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. **Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie**, v. 07, p. 413-436, 1956.

DUBAYAH, R.; RICH, P. M. Topographic solar radiation model for GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 09, n. 04, p. 405-419, 1995.

EPPLEY LABORATORY, Inc. **Instructions for installation and operation of diffuse sky radiation.** Newport, p. 1-6, 1964.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAT and NIR to global solar radiation under various Sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 02, p. 299-309, 2009.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Estimativa das radiações global, direta e difusa em função do índice de claridade (K_t) e razão de insolação (n/N). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1, 2007a, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABENS, 2007a. I CD-ROM.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Equações e estimativa diária para as radiações UV, PAR e IV em função da global para cobertura atmosférica total e discreta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 1, 2007, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABENS, 2007b. I CD-ROM.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Radiações solares UV, PAR e IV: I – estimativa em função da global. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 10, p. 79-86, 2006.

ESCOBEDO, J. F.; FRISINA, V. A.; RICIERI, R. P.; OLIVEIRA, A. P. Radiômetros Solares com Termopilhas de Filmes Finos I - Descrição e Custos. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, São José dos Campos, v. 16, n. 01, p. 10-15, 1997.

GOMES, E. N. **Medidas e modelos de estimativa da radiação direta na incidência**. 2006. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006a.

GOMES, E. N.; ESCOBEDO, J. F.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. Evolução diurna e anual da radiação direta na incidência. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 10, p. 121-129, 2006b.

GONZÁLES, J.; CALBÓ, J. Influence of the global radiation variability on the hourly diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v. 65, n. 02, p. 119-131, 1999.

GUEYMARD, C. A. Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications. **Solar Energy**, v. 83, n. 03, p. 432-444, 2009.

GUEYMARD, C. A. An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparasion with selected engineering algorithms. **Solar Energy**, v. 38, n. 05, p. 367-386, 1987.

HARRISON, A. W.; COOMBES, C. A. Comparison of model and indirectly measured diffuse sky irradiances of tilted surfaces. **Atmosphere-Ocean**, v. 26, n. 02, p. 193-202, 1988.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Canadá: Academic Press, 1983. 390 p.

JACOVIDES, C. P.; HADJIDANNOV, L.; PASHIARDS, S. On the diffuse fraction of daily and monthly global radiation for Island Cyprus. **Solar Energy**, v. 56, n. 06, p. 565-720, 1996.

JAIN, S.; JAIN, P. C. A comparasion of the Angstrom-type correlations and the estimation of monthly average daily global irradiation. **Solar Energy**, v. 40, n. 02, p. 93-98, 1988.

JIANG, Y. Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. **Applied Energy**, v. 86, n. 09, p. 1458-1464, 2009.

KAMALI, G. A.; MORADI, I.; KHALILI, A. Estimating solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 84, n. 04, p. 235-241, 2006.

KONDRATYEV, K. J.; MANOLOVA, M. P. The radiation balance of slopes. **Solar Energy**, v. 4, n. 01, p. 14-19, 1960.

LATANZE, R. J. **Estudos ecológicos do feijoeiro (*Phseolus vulgaris* L.) – efeitos das exposições norte e sul**. 1973. 109 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1973.

LEBARON, B. A., MICHALSKY, J. J., PEREZ, R. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. **Solar Energy**, v. 44, n. 05, p. 249-256, 1990.

LI, D. H. W.; LAM, T. N. T. Determining the optimum tilt angle and orientation for solar energy collection based n measured solar radiance data. **International Journal of Photoenergy**, v. 08, n. 01, p. 01-09, 2007.

LI, D. H. W.; CHEUNG, G. H. W. Study of models for predicting the diffuse irradiance on inclined surfaces. **Applied Energy**, v. 81, n. 02, p. 170-186, 2005.

LI, D. H. W.; LAM, J. C.; LAU, C. C. S. A study of solar radiation daylight illuminance and sky luminance data measurements for Hong Kong. **Architectural Science Review**, v. 45, n. 01, p. 21-30, 2002.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v.03, n. 04, p. 01-19, 1960.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. Daily insolation on surfaces tilted towards the equator. **ASHRAE Journal**, v. 10, n. 03, p. 53-59, 1961.

LOPEZ, G., RUBIO, M.A., BATLLES, F.J. Estimation of hourly direct normal from measured global solar irradiance in Spain, **Renewable Energy**, v. 21, n. 02, p. 171-186, 2000.

LOPES, L. R. **Efeitos da exposição sobre o microclima da cultura do sorgo (*Sorghum vulgaris* Pers.)**. 1973. 105 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1973.

LOPEZ, L. R. **Efeitos da topografia sobre a variação da radiação solar incidente, temperatura do solo e produção de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. Cv. Coastcross I**. 1986. 103 f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1986.

MARTÍNEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; DE LA RUBIA, J. The historical evolution of the Angstrom formula and its modifications: review and bibliography.

Agricultural and Forest Meteorology, v. 33, n. 01, p. 109-128, 1984.

MEDIAVILLA, M. D.; MIGUEL, A.; BILBAO, J. Measurement and comparison of diffuse solar irradiance models on inclined surfaces in Valladolid (Spain). **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 08, p. 2075-2092, 2005.

MELO, J. M. D. **Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta**. 1994. 130 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1994.

NEWLAND, F. J. A study of solar radiation models for the coastal region of South China. **Solar Energy**, v. 43, n. 04, p. 227-235, 1989.

NIJMEH, S.; MAMLOOK, R. Testing of two models for computing global solar radiation on tilted surfaces. **Renewable Energy**, v. 20, n. 01, p. 75-81, 2000.

NOORIAN, A. M.; MORADI, I.; KAMALI, G. A. Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, v. 33, n. 06, p. 1406-1412, 2008.

OLADIRAN, M. T. Mean global radiation captured by inclined collectors at various surface azimuth angles in Nigeria. **Applied Energy**, v. 52, n. 04, p. 317-330, 1995.

OLIVEIRA, A. P. **Investigação da camada limite planetária na região de Iperó**. 2003. 225 p. Tese (Livre-Docência), Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2003.

OLIVEIRA, A. P., ESCOBEDO, J. F., MACHADO, A. J., SOARES, J. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. **Applied Energy**, v. 71, n. 01, p. 59-73, 2002.

OLIVEIRA, L. S.; ESCOBEDO, J. F. Coeficiente de atenuação da radiação solar direta para Botucatu/SP. **Energia na Agricultura**, v. 16, n. 01, p. 87-92, 2001a.

OLIVEIRA, L. S. **Estimativa da radiação solar direta na incidência nas partições instantânea, horária e diária a partir da radiação solar global**. 2001. 65 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001b.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1981. 413 p.

PEREIRA, A. B.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 59, n. 02, p. 211-216, 2002.

PEREIRA, A. B.; VILLA NOVA, N. A.; ESCOBEDO, J. F.; OLIVEIRA, A. Evaluation of the solar energy potential at surface in São Paulo, SP, Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 06, n. 01, p. 99-104, 1998.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREZ, R.; STEWART, R.; ARBOGAST, C.; SEALS, R.; SCOTT, T. An anisotropic hourly diffuse radiation model for sloping surfaces, description, performance, validation, site dependency evaluation. **Solar Energy**, v. 36, n. 06, p. 481-497, 1986.

POSADILLO, R.; LUQUE, R. L. Hourly distributions of the diffuse fraction of global solar irradiation in Córdoba (Spain). **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 02, p. 223-231, 2009.

PRESCOTT, J. A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transactions of the Royal Society Science Australian**, Adelaide, v. 64, p. 114-118, 1940.

RAMÍREZ, V. E. C.; SALGADO, R. A. **Irradiaciones global, directa y difusa, em superfícies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana**. Ciudad Universitaria: UNAM, Instituto de Ingeniería, México, 2005. 68 p. (Serie Investigación y Desarrollo)

REINDL, D. T.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy**, v. 45, n. 01, p. 9-17, 1990.

RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. 1998. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

ROBINSON, N.; STOCH, L. Sky radiation measurement and corrections. **Journal of Applied Meteorology**, v. 03, n. 01, p. 179-181, 1964.

ROBLEDO, L.; SOLER, A. A simple clear skies model for the luminous efficacy of diffuse solar radiation on inclined surfaces. **Renewable Energy**, v. 26, n. 02, p. 169-176, 2002.

SCOLAR, J. **Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal**. 2004. 65 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

SCOLAR, J.; MARTINS, D.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 21, n. 03, p. 249-258, 2003.

- SOARES, J.; OLIVEIRA, A. P.; BOZNAR, M. Z.; MLAKAR, P.; ESCOBEDO, J. F.; MACHADO, A. J. Modeling hourly diffuse solar-radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. **Applied Energy**, v. 79, n. 02, p. 201-204, 2004.
- SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, n. 08, 1203-1220, 2005.
- SPENCER, J. W. Fourier series representation of the position of the sun. **Search** 2, v. 5, p.172, 1971.
- STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 04, p. 289-291, 1993.
- SUPIT, I.; VAN KAPPEL, R. R. A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, v. 63, n. 03, p. 147-160, 1998.
- TEMPS, R. C.; COULSON, K. L. Solar radiation incident upon slopes of different orientations. **Solar Energy**, v. 19, n. 02, p. 179-184, 1977.
- TIAN, Y. Q.; DAVIES-COLLEY, R. J.; GONG, P.; THORROLD, B. W. Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 109, n. 01, p. 67-74, 2001.
- TIBA, C. AGUIAR, R., FRAIDENRAICH, N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, n. 06, p. 957-966, 2005.
- TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; MOSZKOWICZ, M.; CAVALCANTI, E. S. C.; LYRA, J. M.; NOGUEIRA, A. M. B.; GROSSI, H. G. **Atlas Solatimétrico do Brasil**. Recife, Pernambuco: Editora Universitária – UFPE, 2001. 111p.
- TURCO, J. E. P.; RIZZATI, G. S. Avaliação de modelo matemático para estimar a radiação solar incidente sobre superfícies com diferentes exposições e inclinações. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 01, p. 257-267, 2006.
- TURCO, J. E. P.; PINOTTI JÚNIOR, M.; RODRIGUES, T. J. D.; FERNANDES, E. J. Desenvolvimento da cultura da soja em diferentes terrenos com diferentes exposições e declividades. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n. 02, p. 21-28, 1997.
- VARTIAINEN, E. A new approach to estimating the diffuse irradiance on inclined surfaces. **Renewable Energy**, v. 20, n. 01, p. 45-64, 2000.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A.R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 3ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2004. 449 p.

VILLARRUBIA, M.; CORONAS, A.; LLORENS, M. Solar radiation incident on tilted flat surfaces in Barcelona, Spain. **Solar Energy**, v. 25, n. 03, p. 259-263, 1980.

WENXIAN, L.; WENGENG, G.; SHAOXUAN, P. U.; ENRONG, L. U. Ratios of global radiation on a tilted to horizontal surface for Yunnan Province, China. **Energy**, v. 20, n. 08, p. 723-728, 1995.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 02, n. 02, p. 184-194, 1981.

WORD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. WMO n° 8, Geneva. 1996.