

LUCIANO RONALDO ROSSI

**TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL
INFRAVERMELHA, HORÁRIA E DIÁRIA, EM BOTUCATU/SP/BRASIL**

**Botucatu
2020**

LUCIANO RONALDO ROSSI

**TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL
INFRAVERMELHA, HORÁRIA E DIÁRIA, EM BOTUCATU/SP/BRASIL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. João Francisco Escobedo

**Botucatu
2020**

R832t

Rossi, Luciano Ronaldo

Transmissividade atmosférica da irradiação solar global infravermelha, horária e diária, em Botucatu / SP / Brasil / Luciano Ronaldo Rossi. -- Botucatu, 2020

49 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: João Francisco Escobedo

1. Radiação Solar. 2. Radiação infravermelha. 3. Transmissividade de radiação. 4. Radiação global. 5. Estimativa de radiação infravermelha. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: TRANSMISSIVIDADE ATMOSFÉRICA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INFRAVERMELHA, HORÁRIA E DIÁRIA, NA CIDADE DE BOTUCATU/SP/BRASIL

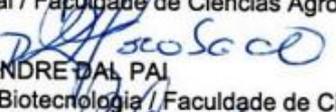
AUTOR: LUCIANO RONALDO ROSSI

ORIENTADOR: JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO
Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. ADRIANO DE SOUZA MARQUES
Computação / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

Botucatu, 06 de abril de 2020

Dedicatória:

Ao meu professor orientador João
Francisco Escobedo, pela paciência,
sabedoria, compreensão e presença.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos;

A Deus, por me conceder todas as condições necessárias para os desafios da vida.

A minha esposa Luciana, pelo conforto e incentivo nos momentos de dificuldade.

Ao Prof. Dr. João Francisco Escobedo, pelas orientações e paciência.

A Taiza, minha irmã que esteve comigo em cada passo.

Ao amigo Dr. Maurício Bruno Prado da Silva, pela grande ajuda.

A todos os colegas mestrandos e doutorandos que compartilharam momentos de busca, trabalho, conhecimento e boas prosas.

Aos professores que iluminaram o caminho do conhecimento.

Às minhas meninas, Mariana e Liz, pela compreensão nos momentos em que não pude estar presente.

Obrigado!

“Tornamos nosso mundo significativo pela coragem de nossas perguntas e pela profundidade de nossas respostas.”

SAGAN, Carl. Cosmos. Rio de Janeiro,
Editora Francisco Alves, 1986.

RESUMO

O trabalho apresenta uma análise estatística e climática das irradiações global (H_G) e global infravermelha (H_{GNIR}) e das frações global total ($K_t = H_G/H_0$) e global infravermelha ($K_{tNIR} = H_{GNIR}/H_{0NIR}$), transmitidas na atmosfera no período de 2001 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. Os valores das frações médias K_t e K_{tNIR} (horária e diária) calculadas estatisticamente foram: $K_t^h = 50,0\%$, $K_{tNIR}^h = 42,0\%$, e $K_t^d = 56,0\%$, $K_{tNIR}^d = 48,0\%$, respectivamente. O estudo mostra ainda a obtenção e a validação da equação de estimativa para K_{tNIR} em função de K_t obtidas por regressão linear ($y = ax$), onde $K_{tNIR}^h = 0,850K_t^h$ e $K_{tNIR}^d = 0,855K_t^d$ apresentaram elevados coeficientes de determinação: $R^2 = 0,981$ e $R^2 = 0,987$, respectivamente. Os valores horários obtidos na validação (ano típico e atípico) foram $(rMBE)^h = 1,0\%$ e $0,2\%$, $(rRMSE)^h = 6,3\%$ e $5,3\%$; $d^h = 0,994$ e $0,996$ respectivamente, enquanto que os valores diários foram $(rMBE)^d = 0,9\%$ e $0,05\%$; $(rRMSE)^d = 3,4\%$ e $2,6\%$; $d^d = 0,995$ e $0,998$. Os resultados mostram que as equações podem ser utilizadas com precisão e exatidão nas estimativas de K_{tNIR} . A análise sazonal mostrou que a equação $K_{tNIR}^h = 0,850K_t^h$ anual superestima K_{tNIR}^h no verão e primavera em $2,8\%$ e $1,0\%$, e subestima-o no outono e inverno em $1,0\%$ e $2,6\%$, respectivamente. Similarmente, $K_{tNIR}^d = 0,855K_t^d$ anual superestima K_{tNIR}^d no verão e primavera em $2,8\%$ e $1,3\%$ e subestima-o no outono e inverno em $1,0\%$ e $2,1\%$, respectivamente. A análise por cobertura de céu mostrou que: o valor K_{tNIR}^h anual superestima K_{tNIR}^h nas coberturas de céu I e III em $6,1\%$ e $0,5\%$ respectivamente, subestima-o na cobertura de céu II em $0,5\%$, e apresenta o mesmo valor na cobertura de céu IV, enquanto que K_{tNIR}^d anual superestima K_{tNIR}^d por cobertura de céu I, II e III em $4,9\%$, $2,3\%$ e $0,4\%$ respectivamente e subestima-o na cobertura de céu IV em $1,0\%$. Os valores dos desvios, inferiores ao valor de $8,4\%$, referente às incertezas dos equipamentos de medidas, indicaram que as equações anuais podem ser utilizadas sem restrições com relação à sazonalidade e cobertura de céu.

Palavras-chave: Radiação Solar. Espectral Radiação. Radiação Infravermelha Próxima.

ABSTRACT

This paper describes the statistical and climatic analysis of global (H_G) and infrared global (H_{GNIR}) irradiances, and total global ($Kt = H_G/H_0$) and infrared global ($Kt_{NIR} = H_{GNIR}/H_{0NIR}$) fractions, transmitted in the atmosphere from 2001 to 2006 in Botucatu/SP/Brazil: Values of mean fractions Kt and Kt_{NIR} (hourly and daily) calculated statistically were as follows: $Kt^h = 50,0\%$, $Kt_{NIR}^h = 42,0\%$, and $Kt^d = 56,0\%$, $Kt_{NIR}^d = 48,0\%$, respectively. The study also presents obtaining and validation of the estimate equation for Kt_{NIR} as a function of Kt . The equations obtained by linear regression ($y = ax$) $Kt_{NIR}^h = 0,850Kt^h$ and $Kt_{NIR}^d = 0,855Kt^d$ had high determination coefficient: $R^2 = 0,981$ and $0,987$ respectively. Hourly values based on validation (typical and atypical years) were as follows: $(rMBE)^h = 1,0\%$ and $0,2\%$, $(rMSE)^h = 6,3\%$ and $5,3\%$; $d^h = 0,994$ and $0,996$, respectively. Daily values were as follows: $(rMBE)^d = 0,9\%$ and $0,05\%$; $(rMSE)^d = 3,4\%$ and $2,6\%$; $d^d = 0,995$ and $0,998$. The results show that the equations can be used precisely and accurately for Kt_{NIR} estimates. Seasonal analysis showed that the annual $Kt_{NIR}^h = 0,850Kt^h$ equation overestimates Kt_{NIR}^h in the summer and spring by $2,8\%$ and $1,0\%$ and underestimates it in the autumn and winter by $1,0\%$ and $2,6\%$, respectively. Similarly, $Kt_{NIR}^d = 0,855Kt^d$ equation annual overestimates Kt_{NIR}^d in the summer and spring by $2,8\%$ e $1,3\%$ and underestimates it in the autumn and winter by $1,0\%$ e $2,1\%$, respectively. Considering sky covers, the analysis showed that annual Kt_{NIR}^h value overestimates Kt_{NIR}^h in sky covers I and III by $6,1\%$ and $0,5\%$ respectively; underestimates it in sky cover II by $0,5\%$, and it has the same value of it in sky cover IV. Annual Kt_{NIR}^d overestimates Kt_{NIR}^d in sky covers I, II and III by $4,9\%$, $2,3\%$ and $0,4\%$ respectively; underestimates it in sky cover IV by $1,0\%$. Values of deviations, which were lower than $8,4\%$ (referring to uncertainty of measuring instruments), showed that the annual equations can be used with no restrictions in relation to seasonal variation and sky cover.

Key-words: Solar Radiation. Spectral Radiation. NIR Radiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura - 1	Local das medidas: visualização da área de plantio da cana de açúcar, e fontes de vapor de água na região de Botucatu.	26
Figura - 2	Séries Climáticas - período: 1970-2008: (a) Temperatura e Umidade Relativa, (b) Nebulosidade, (c) Precipitação, (d) Relação entre a evolução anual da Profundidade Ótica dos Aerossóis (POA) médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005	27
Figura - 3	Piranômetro medindo: a) radiação global total; b) a radiação global NIR.....	29
Figura - 4	a) Evolução de H_0 e H_G horárias, b) evolução de K_t e $K_{t_{NIR}}$ horárias, c) Evolução de H_{0NIR} e H_{GNIR} diárias, d) Evolução de K_t e $K_{t_{NIR}}$ diárias no período de 2001 a 2006.	33
Figura - 5	(a,b) - Correlação entre as frações $K_{t_{NIR}}$ e K_t diários e reta de regressão linear com coeficiente de determinação (R^2) nas duas partições: a)horária e b) diária.	36
Figura - 6	Comparação entre os valores estimados pelas equações (4 e 5) e medidas de $K_{t_{NIR}}$ (horário e diário) para: a) ano típico e b) atípico.....	38
Figura - 7	Correlações sazonais entre: $K_{t_{NIR}}$ e K_t diários (a, b, c, d); para as quatro estações do ano.	39
Figura - 8	A e b: Comparação entre $K_{t_{NIR}}^h$ e $K_{t_{NIR}}^d$ total e por estações do ano verão, outono, inverno e primavera.....	40
Figura - 9	Correlações das transmissividade das irradiações global dos espectros total (K_t) e NIR($K_{t_{NIR}}$) cobertura de céu I, II, III e IV para as duas partições de tempo.	42
Figura - 10	(a, b) comparação entre $K_{t_{NIR}}^h$ e $K_{t_{NIR}}^d$ total e por cobertura de céu I II III e IV.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ano típico a atípico.....	30
Tabela 2 - Os valores médios H_G , H_0 , K_t , H_{GNIR} , H_{ONIR} , K_{tNIR} (horária e diária) das estações do ano, verão, outono, inverno, primavera e totais.....	35
Tabela 3 - Indicativos estatísticos $rMBE$, $rMSE$ e d de Willmot obtidos na validação das equações 12 e 13.	38
Tabela 4 - Equações sazonais entre K_{tNIR} e K_t nas estações do ano verão, outono, inverno e primavera nas duas partições de tempo	40
Tabela 5 - Equações de regressão entre K_{tNIR} e K_t (horária e diária), na cobertura de céu I, II, III e IV.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

d	Índice de Concordância de Willmott
FIR	Bandas espectrais infravermelho distante
H_0	Irradiação solar global no topo da atmosfera
H_G	Irradiação global
H_{GNIR}	Irradiação global infravermelha
I_0	Irradiância extraterrestre
I_G	Irradiância global
I_{GNIR}	Irradiância global infravermelha
K_{GNIR}	Fração infravermelha da irradiação total
K_t	Índice de claridade (razão entre as radiações global e extraterrestre).
K_t^d	Índice de claridade (diária)
K_t^h	Índice de claridade (horária)
K_{tNIR}	Índice de claridade radiação infravermelha (razão entre as radiações infravermelha global e extraterrestre).
K_{tNIR}^d	Índice de claridade infravermelha (diária)
K_{tNIR}^h	Índice de claridade infravermelho (horária)
MBE	Desvio da média (Mean Bias Error) (MJ/m^2).
MIR	Bandas espectrais infravermelho médio
NIR	Bandas espectrais infravermelho próximo
POA	Profundidade Ótica dos Aerossóis
r	Coefficiente de correlação
R^2	Coefficiente de determinação
\sqrt{MSE}	Raiz quadrada do desvio quadrático médio (Root Mean Square Error).
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
2	MATERIAL E MÉTODOS	26
2.1	Análise climática local	26
2.2	Medidas das irradiâncias global dos espectros total e infravermelho.	28
2.3	Base de dados de validação dos modelos: seleção dos anos típico e atípico	29
2.4	Indicativos estatísticos	30
2.5	Obtenção dos valores de H_0 e H_{0NIR}	31
2.6	Desvios relativos das equações de estimativas anual, sazonal e cobertura de céu	32
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1	Análise estatística e climática das irradiações e frações, horária e diária .	33
3.2	Correlação entre as transmissividades de K_{tNIR} e K_t	36
3.3	Validação da equação total	37
3.4	Análise da sazonalidade da equação total	39
3.5	Análise do efeito da cobertura de céu na equação total	41
4	CONCLUSÕES	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A radiação infravermelha do espectro total é constituída de 3 bandas espectrais infravermelho: a infravermelho próximo (NIR) de 0,78 a 3,0 μ m, infravermelho médio (MIR) de 3,0 a 50 μ m e infravermelho distante (FIR) de 50 a 1000 μ m (ISO, 2007). No geral, a radiação infravermelha total vem sendo utilizada em muitas áreas de pesquisa. Na área da meteorologia é usada na técnica observacional por satélites e seus produtos derivados, pela aplicação em estudos de propriedades físicas de nuvens e do efeito estufa na atmosfera (LARSEN E STAMNES, 2005; CARRER et al., 2012; RADEL et al., 2015; DOMBROVSKY et al., 2016).

A banda NIR, a única de origem solar, vem sendo estudada em áreas da engenharia, agronomia, biologia e saúde, entre outras. Na engenharia, a NIR guarda importância, como uma fonte renovável de energia, porque representa uma larga quantidade de energia do espectro solar total, em torno de 46,5%, e é responsável pelo aquecimento da superfície da Terra, aquecimento e iluminação natural de ambientes e secagem natural de produtos agrícolas, entre muitas outras aplicações. Nas áreas agrônômica e biológica, a NIR mesmo que pouca absorvida pelas plantas para fazer fotossíntese, na área de conforto térmico, nos meses mais frios do ano, o aquecimento interno pela radiação infravermelho é desejável para manter as condições térmicas ideais em ambientes protegidos (LAMNATOU E CHEMISANA, 2013). Temperaturas muito baixas podem ser cruciais no desenvolvimento fenológico das plantas, afetando desde a germinação das sementes até a coloração e maturação dos frutos.

Na saúde a NIR exerce efeito positivo no metabolismo humano, o corpo humano composto de 70% de água, pode potencialmente acumular uma grande quantidade de energia por meio da forte absorção da NIR solar, a qual é usada nos processos biológicos (YAO et al., 2009, TSAI E HAMBLIN, 2017). A pré-irradiação do infravermelho solar, protege os fibroblastos da pele humana contra os efeitos citotóxicos da radiação UVA e UVB (SALATIEL et al., 1998). Dependendo da faixa de comprimento de onda, a NIR pode penetrar a epiderme, derme e tecido subcutâneo em diferentes extensões (BAROLET et al., 2015), por isso, tem sido usada efetivamente como uma opção terapêutica para tratar/aliviar certas doenças

(autoimunidade, inflamação, distúrbios de cicatrização de feridas), alívio da dor e desconfortos (VATANSEVER e HAMBLIN, 2012; TSAI e HAMBLIN, 2017).

Entre as radiações do espectro solar a NIR é a menos estudada, quando comparada com outras radiações espectrais: Ultravioleta (UV) e a Fotossinteticamente Ativa (PAR), quer seja por meio de séries (medidas) ou por modelos de estimativas. As séries são resultados de medidas por um período de tempo às quais permitem conhecer a disponibilidade da NIR sem necessidade de outras medidas. A desvantagem está nos custos dos equipamentos e o longo tempo de medida contínua no local, além das aferições periódicas. Em função disso, há poucas informações disponíveis na literatura sobre bases de dados longas das radiações espectrais solares, UV, PAR e NIR (ESCOBEDO et al., 2014).

Ao contrário das séries, os modelos de estimativas para a irradiação global do espectro NIR (H_{GNIR}), necessitam de outras medidas das superfícies terrestre e/ou atmosférica. O modelo mais comum vem da modelagem estatística com as irradiações global dos dois espectros NIR e total: H_{GNIR} e H_G , respectivamente, por meio de regressão linear tipo $H_{GNIR} = K_{GNIR} \times H_G$. Este modelo é mais simples e possui a desvantagem de ser preciso apenas para locais específicos de origem das medidas. Os resultados obtidos mostram que o valor da fração K_{GNIR} de H_G anual e para todas as coberturas de céu juntas, é da ordem de 46,9% (ESCOBEDO et al., 2009a, 2011b). Sazonalmente, a fração K_{GNIR} é menor no verão (44,8%) e primavera (45,1%), e maior no outono (47,6%) e inverno (48,0%) como mostram os trabalhos (ROSSI et al., 2015). O valor de K_{GNIR} depende das condições de cobertura de céu, e pode variar do valor $K_{GNIR} = 44,0\%$ na cobertura de céu nublado até $K_{GNIR} = 51,5\%$ na cobertura de céu aberto (ESCOBEDO et al., 2009; ROSSI et al., 2016a, 2018b). Diante da necessidade de se conhecer melhor as relações entre as irradiações dos espectros total e NIR, neste trabalho é proposto um modelo estatístico o qual correlaciona a fração solar global transmitida do espectro infravermelho ($K_{tNIR} = H_{GNIR}/H_{0NIR}$) e a fração solar transmitida do espectro total ($K_t = H_G/H_0$) em que H_0 e H_{0NIR} são as irradiações no topo da atmosfera do espectro total e infravermelha. Teoricamente esse modelo elimina a dependência do dia e do local, e permite melhor observar os efeitos climáticos das nuvens, vapor de água e aerossóis nas relações entre a irradiação global de ambos os espectros solares. A principal

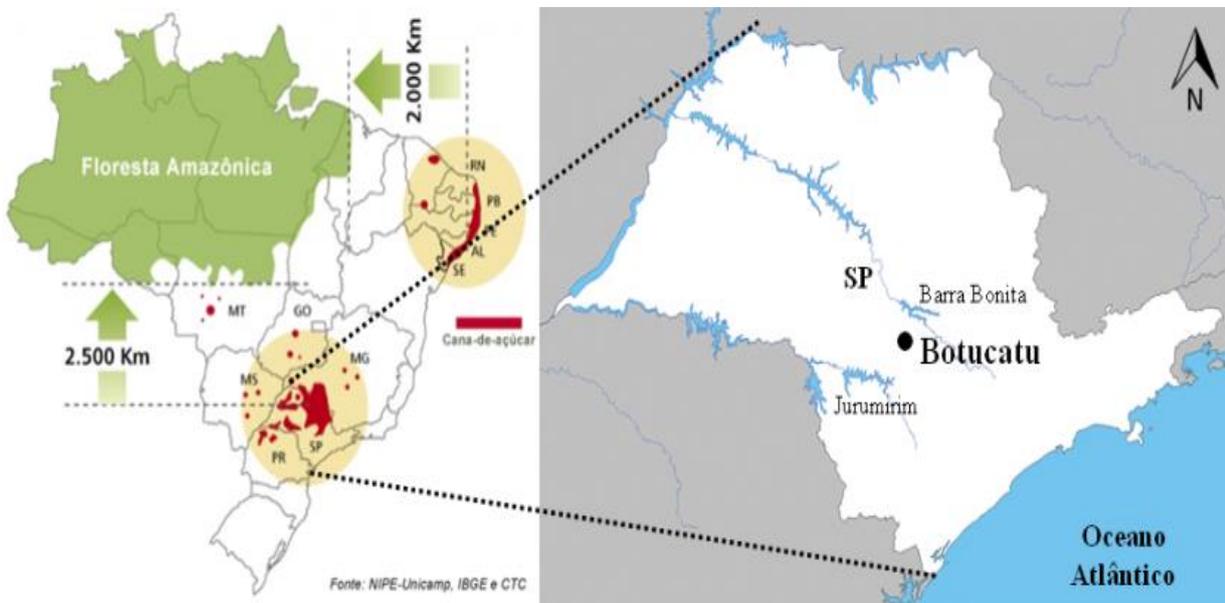
vantagem do modelo é que ele permite a estimativa da irradiação solar global NIR em função da irradiação global em qualquer local de clima similar ao de Botucatu. Assim, uma base de dados de 6 anos das irradiâncias global dos dois espectros foi medida em Botucatu/SP/Brasil no período de 2001 a 2006, com os seguintes objetivos: efetuar uma análise estatística dos valores médios totais e sazonais das irradiações H_G , H_{GNIR} e frações K_t e K_{tNIR} , em função das variações climáticas local; propor as equações de estimativas por meio regressão de K_{tNIR} em função de K_t sob todas as condições de céu juntas; efetuar uma análise da sazonalidade, bem como dos efeitos da cobertura de céu da equação anual obtida; validar equações de estimativas propostas, todos nas partições horária e diária.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Análise climática local

A Estação de Radiometria Solar, local das medidas, está localizada na área rural de Botucatu, na FCA/UNESP (Lat. 22.85° S e Long. 48.45° O, e altitude 786 metros), a aproximadamente 221 km do Oceano Atlântico. A cidade está inserida numa região com duas grandes represas e de grandes plantações de eucaliptos e cana de açúcar, que aumentam a concentração do vapor de água e nuvens na atmosfera, interferindo na transmissão da NIR na atmosfera (Figura 1).

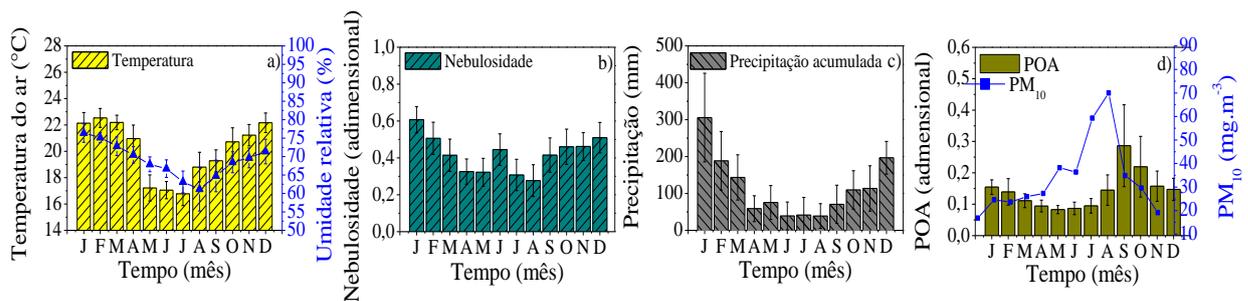
Figura 1- Local das medidas: visualização da área de plantio da cana de açúcar, e fontes de vapor de água na região de Botucatu.



O clima local de acordo com a classificação climática de Köppen é classificado como Cwa (CEPAGRI, 2012), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. A Figura 2 (a, b, c) mostram as séries climáticas da temperatura, umidade relativa, nebulosidade e precipitação, do período de 1970 a 2008 em Botucatu. A série anual da temperatura e umidade relativa (Figura 2-a) mostra que fevereiro é mês mais quente e julho é o mais frio do ano, com temperaturas médias de 22,5°C e 16,8°C, respectivamente. Os meses de janeiro e agosto são o mais e o menos úmido, com percentuais de 76,5% e 61,20% respectivamente.

A nebulosidade (f), calculada pela expressão $[f = 1 - (n/N)]$, expressa a fração do número de horas em que o sol fica encoberto por nuvens no dia, onde (n/N) é a razão de insolação, n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo. A nebulosidade (Figura 2-b) é mais elevada nos meses de janeiro ($f = 0,61$) e menor em agosto ($f = 0,28$). Por outro lado, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h, respectivamente.

Figura 2 - Séries Climáticas (período: 1970-2008): (a) Temperatura e Umidade Relativa, (b) Nebulosidade, (c) Precipitação, (d) Relação entre a evolução anual da Profundidade Ótica dos Aerossóis (POA) médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005.



A série anual da precipitação, Figura 2-c, segue a evolução da nebulosidade, e é constituído de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação de 100mm, aproximadamente. No período chuvoso, de outubro a março (primavera e verão), a precipitação é de natureza microclimática originada do processo de convecção livre e macro climática originadas dos eventos meteorológicos como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. O ZCAS atua desde a Bacia Amazônica até o oceano Atlântico Sul, como resultado da convergência de massas de ar quente e úmido oriundas da Bacia Amazônica e do oceano Atlântico Sul. O ZCAS gera aumento da nebulosidade e ocorrência de chuvas intensas e persistentes entre a primavera e verão (CARVALHO et al., 2004). A frequência de ocorrência é de duas a quatro vezes ao ano, com duração média de 8 dias e de intensidade variável (NOGUÉS-PAEGLE E MO, 1997). A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 304mm e a menor em junho e agosto com 38,8mm.

No período seco, de abril a setembro (outono e inverno), a precipitação é do tipo frontal originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região sudeste durante o outono, inverno. A distribuição da chuva frontal gera aumento na nebulosidade com ocorrência de

chuvas generalizada na região. A intensidade da precipitação é fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria, e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente (SATYAMURTY et al., 1998).

Segundo Lemos e Calbete (1996), ocorrem em média 5 eventos de sistemas frontais por mês no Estado de São Paulo. A menor precipitação no período seco ocorre em agosto com 38,2mm. Ainda nos meses de seca, e dois meses do período úmido, de junho a novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana-de-açúcar local (Figura 1) e das queimadas e incêndios florestais de outros locais na região central do Brasil (TERAMOTO et al., 2013; SANTOS E ESCOBEDO, 2016).

Em anos onde há o enfraquecimento do período chuvoso na região Central e Norte do Brasil, a prática dos incêndios se intensifica no mês de outubro e pode se estender até novembro (HOLBEN et al., 2001). A queima de biomassa gera aerossóis do tipo fino (diâmetro $< 2,5 \mu\text{m}$), que por meio de correntes convectivas são capazes de percorrer distâncias superiores a 1000km e permanecer em suspensão na atmosfera durante vários dias (JACOBSON, 2002). A evolução anual das médias mensais da POA (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005 mostra que no início das queimadas da cana-de-açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de $\text{POA} = 0,45$ em setembro, o que é equivalente à concentração PM_{10} de $70,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Figura 2-d) (CODATO et al., 2008).

2.2 Medidas das irradiâncias global dos espectros total e infravermelho

As medidas das irradiâncias global dos espectros total e infravermelho foram realizadas nos anos de 2001 a 2006 na estação de Radiometria da UNESP Botucatu. São considerados dias da base de dados quando as irradiâncias global do espectro total e infravermelho (I_G e I_{GNIR}) foram medidas simultaneamente. As irradiâncias global (I_G e I_{GNIR}) foram medidas por dois piranômetros Eppley PSP com cúpulas de transmissividade nos comprimentos de onda de $0,285$ a $3,0\mu\text{m}$ e $0,70$ a $3,0\mu\text{m}$, respectivamente (Figura 3: a, b).

Figura 3 - Piranômetro medindo: a) radiação global total; b) a radiação global NIR.



As medidas das radiações infravermelhas foram corrigidas por um fator de correção de 0,92 conforme recomendação do fabricante desses piranômetros, devido ao efeito térmico sobre a transmissão da cúpula no elemento sensível do instrumento utilizada como filtro. A imprecisão das medidas pelos piranômetros PSP da Eppley, é da ordem de 4,1% (REDA, 2008).

Na aquisição dos dados, utilizou-se um Datalogger Campbell 23X, operando na frequência de 0,2Hz, obtendo as medidas de 5 em 5 segundos e armazenando as médias de 5 em 5 minutos. Os dados de irradiâncias (I_G e I_{GNIR}) foram obtidos após passarem por um controle de qualidade no laboratório da Estação de Radiometria Solar, e numa segunda etapa, foram processados as integrações horária e diária das irradiações: H_G e H_{GNIR} (CHAVES E ESCOBEDO, 2000). A Estação de Radiometria Solar dispõe de um piranômetro da Eppley PSP, o qual é utilizado unicamente para aferição dos piranômetros de rotina, periodicamente pelo método comparativo sugerido pela Organização Mundial de Meteorologia.

2.3 Base de dados de validação dos modelos: seleção dos anos típico e atípico

Na validação do modelo foi utilizada uma base de dados de 1 ano da irradiação solar global diária (H_G), denominadas de ano típico e atípico, selecionados a partir da base de dados total de 6 anos (2001-2006). A seleção dos anos típico e atípico, foi efetuada através de análises estatísticas dos dados onde se comparou

para cada mês do ano, o valor da irradiação solar global (H_G) média inter-anos com desvio padrão de cada mês e o valor da irradiação média de cada mês por ano.

O processo de seleção do ano típico é similar ao processo de seleção do Ano Meteorológico Típico (WMO, 1981). Em cada mês do ano típico, os valores das irradiações média inter-anos praticamente coincidem com os valores das irradiações médias do ano. Ao contrário, no ano atípico, os valores das irradiações médias do ano estão mais distantes dos valores das irradiações médias inter-anos, externos ao intervalo de variação do desvio padrão inter-anos. Os resultados encontrados para os meses dos anos típico e atípico estão representados na Tabela 1 (SILVA et al., 2017).

Tabela 1- Ano típico a atípico

		Meses											
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ano	Típico	2006	2001	2003	2006	2005	2005	2005	2001	2003	2006	2004	2004
	Atípico	2001	2002	2004	2002	2003	2002	2004	2002	2005	2005	2001	2002

2.4 Indicativos estatísticos

Os indicadores estatísticos $rMBE$ (Relative Mean Bias Error), $rRMSE$ (Root Mean Square Error) e d (Índice de Concordância de Willmott) empregados na avaliação da performance das equações de estimativa diária da irradiação global infravermelha foram:

$$rMBE (\%) = 100 \times \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)}{N} \right)}{\bar{X}} \quad (1)$$

$$rRMSE (\%) = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{\bar{X}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (3)$$

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

O indicativo $rMBE$ representa o desvio das médias. O $rRMSE$ é a raiz quadrada do erro quadrático médio. Em geral, quanto menores os valores obtidos para $rMBE$ e $rRMSE$, melhor o desempenho das equações de estimativas. O índice de ajustamento “ d ” variando de 0 a 1 representam o total desajustamento e ajustamento, respectivamente, entre a estimativa e a medida (WILLMOTT, 1981).

2.5 Obtenção dos valores de H_0 e H_{0NIR}

Os valores horários e diários de H_0 e H_{0NIR} total e sazonais no topo da atmosfera (H_0 , $MJ\ m^{-2}$), Equação 4 (IQBAL, 1983), foram obtidos como função do fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (E_0); Equação 5: ângulo horário solar (ω_s , °); Equação 6: declinação solar (δ , °); Equação 7: latitude local (ϕ , °); dia Juliano (DJ): ângulo dia (Γ , rad); Equação 8: fotoperíodo (N); Equação 9.

Para a obtenção do valor de H_{0NIR} , substitui-se o valor de 1367 na Equação 4, por 758,6, que representa a porcentagem de radiação NIR de 55,5% do espectro total no topo da atmosfera, de acordo com Corrêa et al., 2011.

$$H_0 = 1367 (24/\pi) E_0 [(\pi/180) \omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega_s)] \quad (4)$$

$$E_0 = 1,000 + 0,034 \cos r + 0,0013 \sin(r) + 0,000719 \cos 2r + 0,000077 \cos 2r \quad (5)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\text{tg}(\phi) \cdot \text{tg}(\delta)] \quad (6)$$

$$\delta = 23,45 \sin [(360/365) (DJ + 284)] \quad (7)$$

$$\Gamma: 2\pi(DJ - 1)/366 \quad (8)$$

$$N = (2\omega_s/15) \quad (9)$$

2.6 Desvios relativos das equações de estimativas anual, sazonal e cobertura de céu

Para análise sazonal das equações de estimativas anuais (Equações 12 e 13) calculou-se desvio relativo $D(\%)$ por meio da Equação 10 entre os coeficientes lineares das equações anuais (\mathbf{a}_a) e das equações sazonais no verão, outono, inverno e primavera (\mathbf{a}_s).

$$D(\%) = 100 \times \left(\frac{a_a - a_s}{a_a} \right) \quad (10)$$

O valor de $D(\%)$ expressa a capacidade das equações (12 e 13) anuais de superestimar ou subestimar as equações estimativas sazonais. Se o resultado da operação da equação 10 entre os coeficientes angulares total e sazonal for positivo, significa que a estimativa da equação total superestima os valores de estimativa sazonal, enquanto que se for negativo, a estimativa da equação total subestima os valores de estimativa sazonal.

Similarmente a análise sazonal, para análise quantitativa do efeito da cobertura de céu da equação de estimativa anual, calculou-se desvio relativo $D(\%)$ por meio da Equação 11, entre os coeficientes lineares da equação anual (\mathbf{a}_a) e das equações por cobertura de céu I, II, III, e IV (\mathbf{a}_c) nas duas partições.

$$D(\%) = 100 \times \left(\frac{a_a - a_c}{a_a} \right) \quad (11)$$

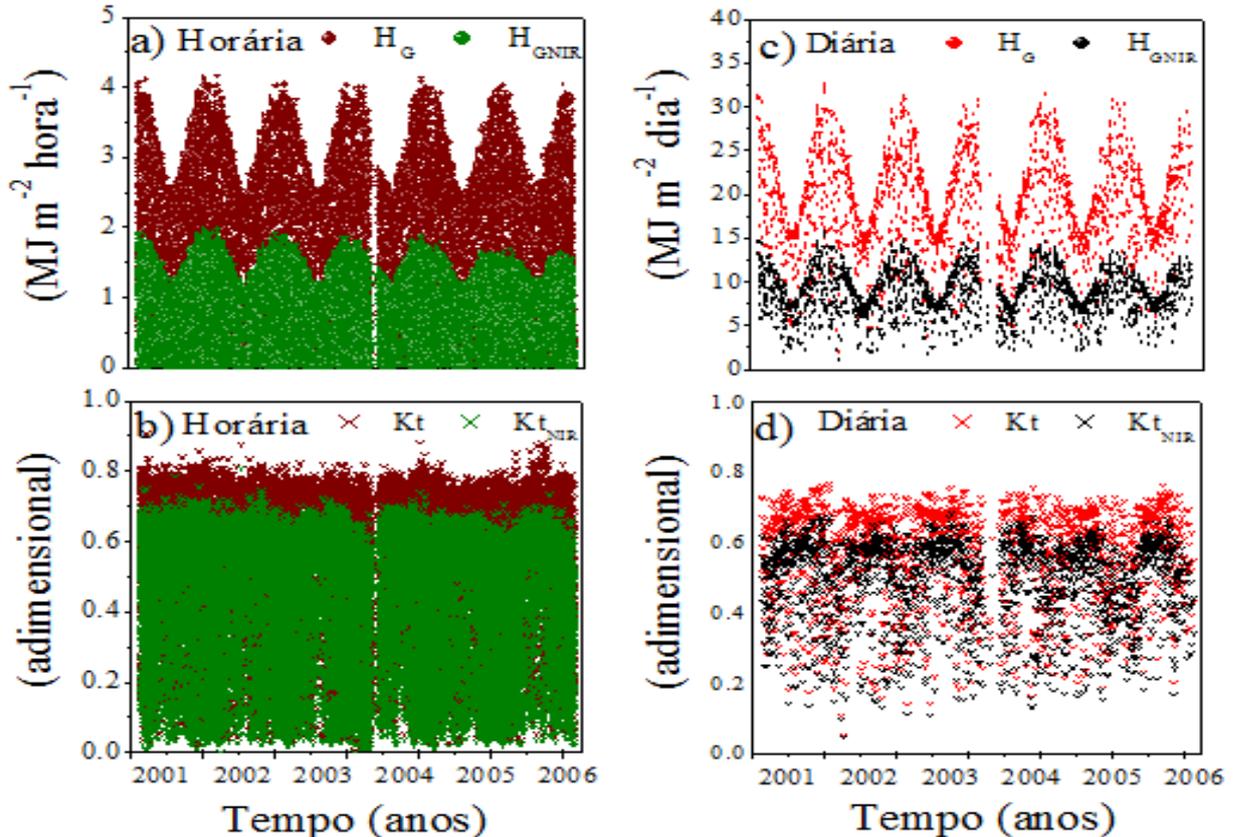
O valor de $D(\%)$ expressa a capacidade das equações para $K_{t_{NIR}}$ anual de superestimar ou subestimar as equações $K_{t_{NIR}}$ nas estimativas por coberturas de céu nas duas partições.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise estatística e climática das irradiações e frações, horária e diária

As figuras 4 (a e c) mostram as evoluções temporais de H_G e H_{GNIR} e as figuras 4 (b e d) as evoluções temporais de $K_t = (H_G/H_o)$ e $K_{tNIR} = (H_{GNIR}/H_{oNIR})$, horária e diária, do período de 2001 a 2006.

Figura 4 – a) Evolução de H_o e H_G (horária), b) evolução de K_t e K_{tNIR} (horárias), c) evolução de H_{oNIR} e H_{GNIR} (diária), d) evolução de K_t e K_{tNIR} (diária), no período de 2001 a 2006.



A descontinuidade nas evoluções de H_G , H_{GNIR} , K_t e K_{tNIR} , mostradas nas figuras 4 (a, b, c e d), foi devido a uma falha na programação do sistema de aquisição dos dados, a qual não registrou as medidas neste período de tempo. As figuras 4 (a e c) mostram que os valores de H_{GNIR} , são inferiores respectivamente aos valores de H_G nas duas partições. Isso ocorre porque o espectro NIR está contido no espectro total, ou seja, o valor de H_{GNIR} está contido no valor de H_G . Por outro lado, as figuras 4 (b e d) mostram que os valores de K_{tNIR} são inferiores aos valores de K_t . Isso ocorre porque a absorção pelo vapor de água na atmosfera é

desproporcional entre H_{GNIR} e H_{G} , é maior para H_{GNIR} que H_{G} . Conseqüentemente, o valor de K_{tNIR} diminui mais rápido que o valor de K_{t} , indicando que $K_{\text{tNIR}}/K_{\text{t}} < 1$. (ESCOBEDO et al., 2009; ROSSI et al., 2018).

As evoluções de H_{G} e H_{GNIR} (Figuras 4 - a e c), horária e diária, são periódicas anualmente e são resultantes das variações astronômicas devido ao movimento de translação solar, e climáticas devido as variações das concentrações de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera local, ao longo de cada ano, respectivamente. As evoluções de K_{t} e K_{tNIR} (Figura 4 - b e d), também são periódicas anualmente, porém muito menos acentuadas que as evoluções de H_{G} e H_{GNIR} , porque a sazonalidade é resultante apenas das variações dos constituintes atmosféricos como de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera local, ao longo de cada ano. O efeito cascata dos pontos experimentais, (Figura 4 - a, b, c e d), mostram que a nebulosidade é o parâmetro climático mais efetivo na variabilidade dos valores de H_{G} e H_{GNIR} , K_{t} e K_{tNIR} na camada atmosférica. Nas evoluções temporais, os valores de H_{GNIR} e K_{tNIR} acompanham os valores de H_{G} e K_{t} respectivamente, e demonstram que os efeitos de absorção e espalhamento por nuvens e vapor de água são comuns para as transmissões de H_{G} e H_{GNIR} na camada atmosférica. Em média, os valores de H_{G} e H_{GNIR} (horária e diária) são maiores no período chuvoso, primavera e verão, mesmo onde é maior absorção das H_{G} e H_{GNIR} devido as maiores concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera ao longo do ano. No período seco, outono e inverno, em média, os valores de H_{G} e H_{GNIR} são menores, onde é menor absorção das H_{G} e H_{GNIR} , devido às baixas concentrações da nebulosidade e vapor de água na atmosfera. Já os valores de K_{t} e K_{tNIR} (horária e diária) são menores na primavera e verão, nas quais são maiores a absorção das radiações H_{G} e H_{GNIR} por nuvens e vapor d'água na atmosfera. Por outro lado, os valores de K_{t} e K_{tNIR} são maiores no outono e inverno, nas quais são menores a absorção das H_{G} e H_{GNIR} , por nuvens e vapor de água na atmosfera.

Os valores médios de H_{G} , H_{GNIR} , K_{t} e K_{tNIR} (horária e diária) totais e sazonais das estações do ano, verão, outono, inverno e primavera, são apresentados na Tabela 2. A relação entre as radiações H_0 e $H_{0\text{NIR}}$ no espectro total e infravermelho é de 55,5%, ou seja, $H_{0\text{NIR}} = 0,555H_0$. (CORRÊA et. al., 2011).

Os valores sazonais mostram que existe uma simetria nos valores de H_G e H_{GNIR} , bem como de K_t e K_{tNIR} , entre as estações primavera e verão, e também, entre outono e inverno. Comparando os valores entre o verão e primavera, os valores de H_G e H_{GNIR} no verão foram inferiores em 1,9% e 1,3% (horária) e 0,5% e 2,0% (diária) aos da primavera, enquanto que entre o verão e primavera os valores K_t e K_{tNIR} foram inferiores em 2,2% e 2,6% (horária) e 1,8% e 2,2% (diária) aos da primavera respectivamente. Similarmente, comparando os valores entre o outono e inverno, os valores de H_G e H_{GNIR} no outono foram inferiores em 0,7% e 2,8% (horária) e 0,2% e 1,7% (diária) aos do inverno, enquanto que os valores de K_t e K_{tNIR} foram iguais e inferiores, 0,0% e 2,2% (horária) e 1,6% e 1,9% (diária) aos do inverno, respectivamente.

Tabela 2 – Os valores médios H_G , H_o , K_t , H_{GNIR} , H_{ONIR} , K_{tNIR} (horária e diária) das estações do ano, verão, outono, inverno, primavera e totais

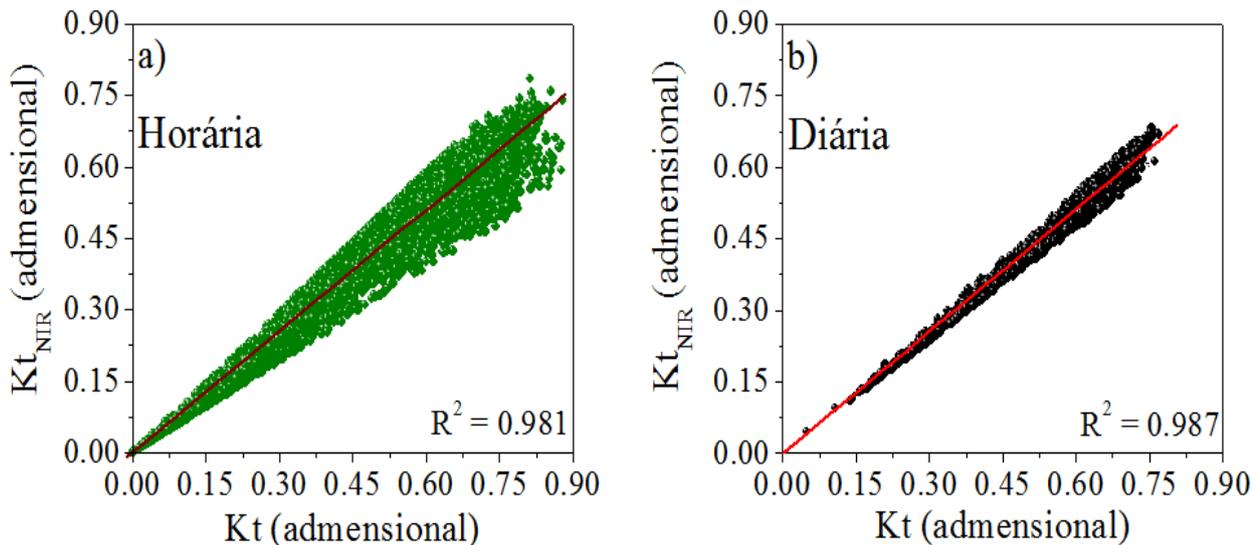
	Unidade de medida	VERÃO	OUTONO	INVERNO	PRIMAVERA	TOTAIS
H_G	(MJ m ⁻² hora ⁻¹)	1,59	1,45	1,46	1,62	1,53
	(MJ m ⁻² dia ⁻¹)	21,26	16,09	16,06	21,37	18,69
H_o	(MJ m ⁻² hora ⁻¹)	3,18	2,49	2,47	3,15	2,82
	(MJ m ⁻² dia ⁻¹)	40,44	27,08	26,88	39,71	33,53
K_t	(horário)	0,46	0,54	0,54	0,47	0,50
	(diário)	0,53	0,59	0,60	0,54	0,56
H_{GNIR}	(MJ m ⁻² hora ⁻¹)	0,75	0,68	0,70	0,74	0,71
	(MJ m ⁻² dia ⁻¹)	9,69	7,57	7,70	9,88	8,71
H_{ONIR}	(MJ m ⁻² hora ⁻¹)	1,75	1,37	1,36	1,73	1,55
	(MJ m ⁻² dia ⁻¹)	22,24	14,89	14,79	21,84	18,44
K_{tNIR}	(horário)	0,38	0,46	0,47	0,39	0,42
	(diário)	0,44	0,51	0,52	0,45	0,48

Os resultados obtidos são compatíveis e proporcionais às variações das concentrações da nebulosidade e umidade entre as estações no local: verão (50,0% e 74,4%); outono (35,0% e 70,6%); inverno (33% e 63,8%) e primavera (45% e 69,3%), respectivamente. (ROSSI et al., 2015). Os valores aproximadamente simétricos de H_G e H_{GNIR} e de K_t e K_{tNIR} indicam que os efeitos de absorção e espalhamento por nuvens, vapor de água e aerossóis na extinção das duas radiações global do espectro total e NIR são aproximadamente iguais nas estações úmidas (primavera e verão) na declinação sul, e também nas estações da seca (outono e inverno) na declinação norte.

3.2 Correlação entre as transmissividades de $K_{t_{NIR}}$ e K_t

A Figura 5(a, b) mostra as correlações do período de 2001 a 2006 em Botucatu, SP, entre a transmissividade atmosférica da irradiação solar global (K_t) e a transmissividade atmosférica da irradiação solar global infravermelha ($K_{t_{NIR}}$), nas duas partições, com os respectivos coeficientes de determinação.

Figura 5 - (a,b) – Correlações entre $K_{t_{NIR}}$ e K_t e reta de regressão linear com coeficiente de determinação (R^2) nas duas partições: a) horária e b) diária.



As curvas são lineares em todo intervalo de variação de K_t entre 0 e 1, mesmo que a densidade e distribuição dos pontos experimentais sejam diferentes devido a quantidade de observações nas duas partições. O alargamento da densidade de pontos, tende a ser maior quando K_t cresce, ou quando a cobertura de céu vai mudando de nublada para parcialmente nublada, até céu aberto, ou céu totalmente claro. Esse fenômeno é característico quando a transmissão das irradiâncias solares dependem das variações da massa ótica ou das concentrações de nuvens, vapor de água e aerossóis na atmosfera: Quanto menor for a partição de tempo, mais acentuada será a abertura cone dos pontos experimentais em função do crescimento de K_t . Exemplificando, na condição de céu aberto ou sem nuvens ($K_t > 0,65$), com variações na atmosferas do tipo seco com aerossóis ou úmido e sem aerossóis, as curvas atingem as maiores variações de $K_{t_{NIR}}$, onde pode ser visualizado que para $K_t = 0,75$ os valores de $K_{t_{NIR}}$ variam de 0,45 até 0,75 na partição horária e de $K_{t_{NIR}}$ de 0,5 até 0,6 na partição diária.

As equações lineares (tipo $Y = a \cdot X$) obtidas por regressão linear entre $K_{t_{NIR}}$ x K_t foram:

$$K_{t_{NIR}}^h = 0,850 K^h t \quad (12)$$

$$K_{t_{NIR}}^d = 0,855 K^d t \quad (13)$$

O coeficiente angular das equações 12 e 13, $K_{t_{NIR}}^h / K^h = 0,850$ e $K_{t_{NIR}}^d / K^d = 0,855$ expressam os valores proporcionais de 85,0% e 85,5% entre as irradiações global NIR e as irradiações global total transmitida para as condições de todas as coberturas de céu juntas, ao longo do ano. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,981$ e $R^2 = 0,987$, próximos de 1 mostram que a correlação entre K_t e $K_{t_{NIR}}$ estão próximo do 100,0% nas duas partições. A razão $K_{t_{NIR}}/K_t$ menor que 1 ($K_{t_{NIR}}/K_t < 1$) indica que a absorção pelo vapor de água na cobertura de céu total é desproporcional, é maior e mais rápida para H_{GNIR} que H_G , diminuído o valor de $K_{t_{NIR}}$ mais rápido que o valor de K_t . Consequentemente, o valor da razão $K_{t_{NIR}}/K_t$ é menor que 1

3.3 Validação da equação total

A Figura 6 (a, b, c, d) mostra a correlação obtida na validação, comparação entre estimativa de $K_{t_{NIR}}$ por meio das Equações 12 e 13, e as medidas de $K_{t_{NIR}}$ selecionadas dos anos típico e atípico.

As correlações entre os valores estimados e medidos estão em concordância com as curvas ideais de $45^\circ (r=1)$ nos ajustes, e são lineares nos intervalos de variação das medidas de $K_{t_{NIR}}$. Os valores do coeficiente de correlação (r), próximo de 1, para cada uma das correlações: horário ($r^t = 0,989$, $r^a = 0,993$) e diário ($r^t = 0,993$, $r^a = 0,997$), indicam que estatisticamente as estimativas das equações 12 e 13 estão bem correlacionadas com as medidas. Valores dos indicadores estatísticos $rMBE$, $rMSE$ e d de willmot obtidos na validação das equações 12 e 13 são mostrados na Tabela 3.

Figura 6 - Comparação entre os valores estimados pelas equações 12 e 13 e medidas anos típico e atípico

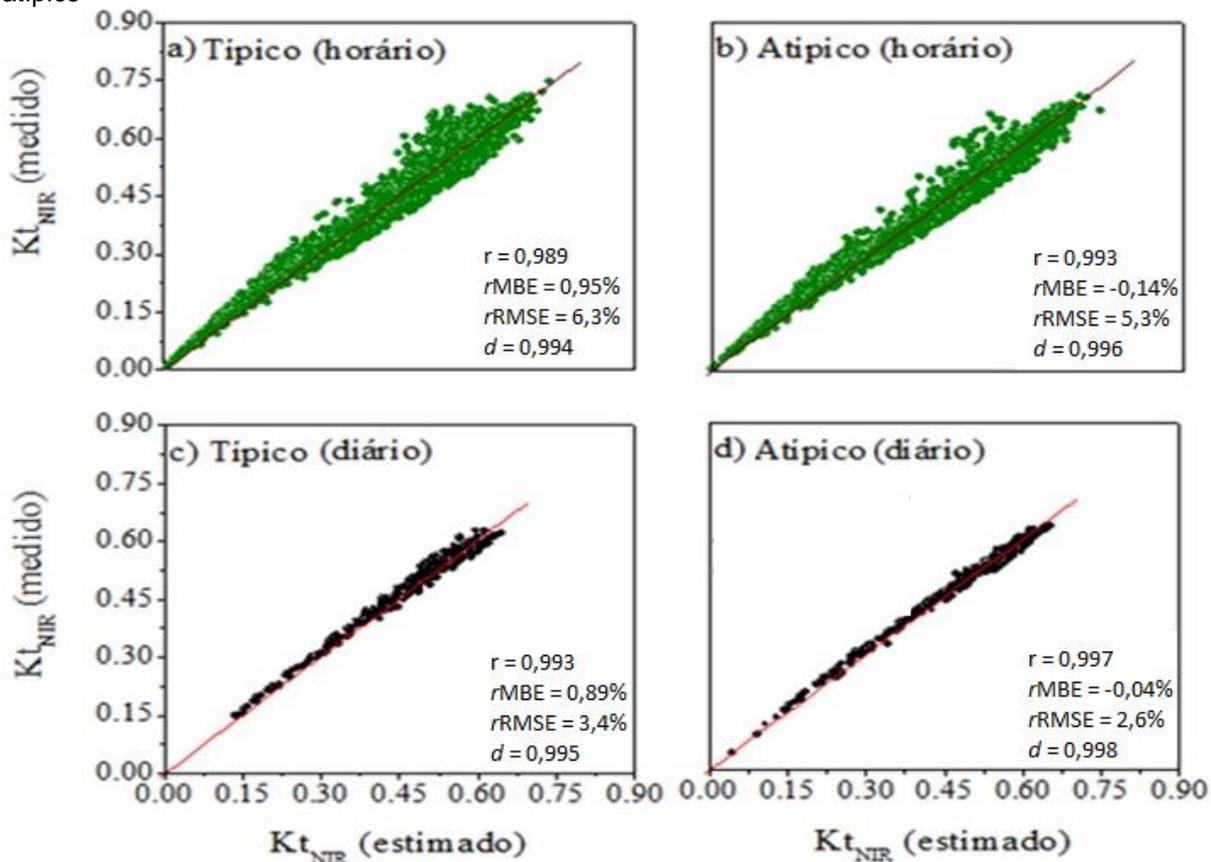


Tabela 3 – Indicativos estatísticos $rMBE$, $rMSE$ e d de Willmot obtidos na validação das equações 12 e 13.

Índices estatísticos	Kt_{NIR} (horário)		Kt_{NIR} (diário)	
	Típico	Atípico	Típico	Atípico
MBE ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)	0,004	-0,001	0,004	0,000
$rMBE$ %	0,953	-0,138	0,889	-0,041
$RMSE$ ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$)	0,027	0,023	0,016	0,012
$rRMSE\%$	6,325	5,334	3,367	2,574
D (adimensional)	0,994	0,996	0,995	0,998

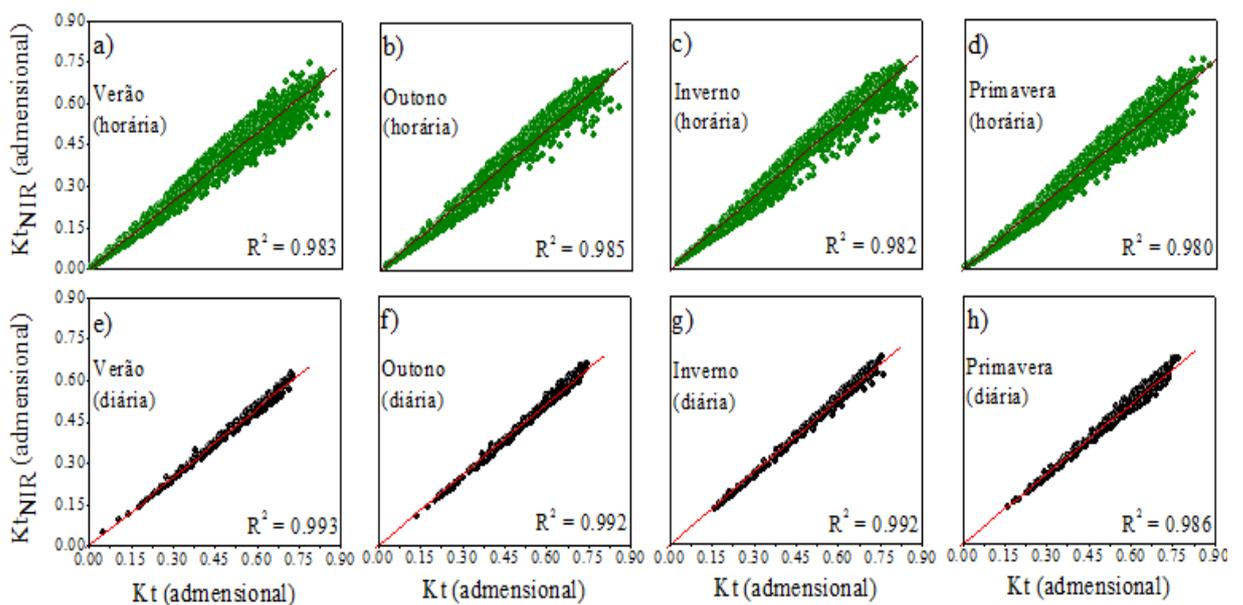
Os valores de $rMBE$ mostram que as equações 12 e 13, nas duas partições superestimam a medida com percentual inferior a 1,0% e subestimam a medida em 0,5% nos anos típico e atípico respectivamente. Os valores de $rMBE$ são inferiores às incertezas das medidas das irradiâncias global e global NIR, que são da ordem de 8,0%. Os valores de $rRMSE$ para as duas condições de validação mostram que o espalhamento ou desvio do erro médio das equações 12 e 13 inferiores a 7,0% são considerados ótimos estatisticamente (JAMIESON et al., 1991; HEINEMANN et al.,

2012; LI et al., 2013). Os valores do “d” de Willmott superiores 0,990 expressam elevada concordância no ajuste entre a estimativa e a medida de K_{tNIR} .

3.4 Análise da sazonalidade da equação de estimativa total

A Figura 7 mostra as correlações sazonais entre K_{tNIR} e K_t , com os respectivos coeficientes de determinação, para cada estação do ano.

Figura 7 - Correlações sazonais entre K_{tNIR} e K_t (a, b, c, d, e, f, g, h); para as quatro estações do ano com as curvas de regressão linear, nas duas partições de tempo.



As equações sazonais (Tabela 4) foram também obtidas por meio de regressão linear (tipo $Y = ax$) para cada estação do ano e são também lineares em amplos intervalos de variações. Os elevados coeficientes de determinação R^2 superiores a 0,980, próximo de 1, mostram que as transmissividades K_{tNIR} e K_t , espectros total e Infravermelho, nas duas partições estão bem correlacionadas nas quatro estações do ano (Figura 7).

Em relação aos valores $K_{tNIR}^h/K_t^h = 0,85$ e $K_{tNIR}^d/K_t^d = 0,855$ das equações 12 e 13, para coberturas de céu total, o valor sazonal K_{tNIR}/K_t nas estações do ano (Tabela 4), são menores nas coberturas de céu mais nebulosas e úmidas, onde ocorrem maior absorção da NIR pelo do vapor de água nas duas partições: $K_{tNIR}^h/K_t^h = 0,826$ e $K_{tNIR}^d/K_t^d = 0,831$ no verão, e $K_{tNIR}^h/K_t^h = 0,842$ e $K_{tNIR}^d/K_t^d = 0,844$ na primavera. Por outro lado, o valor sazonal K_{tNIR}/K_t nas estações são menores nas

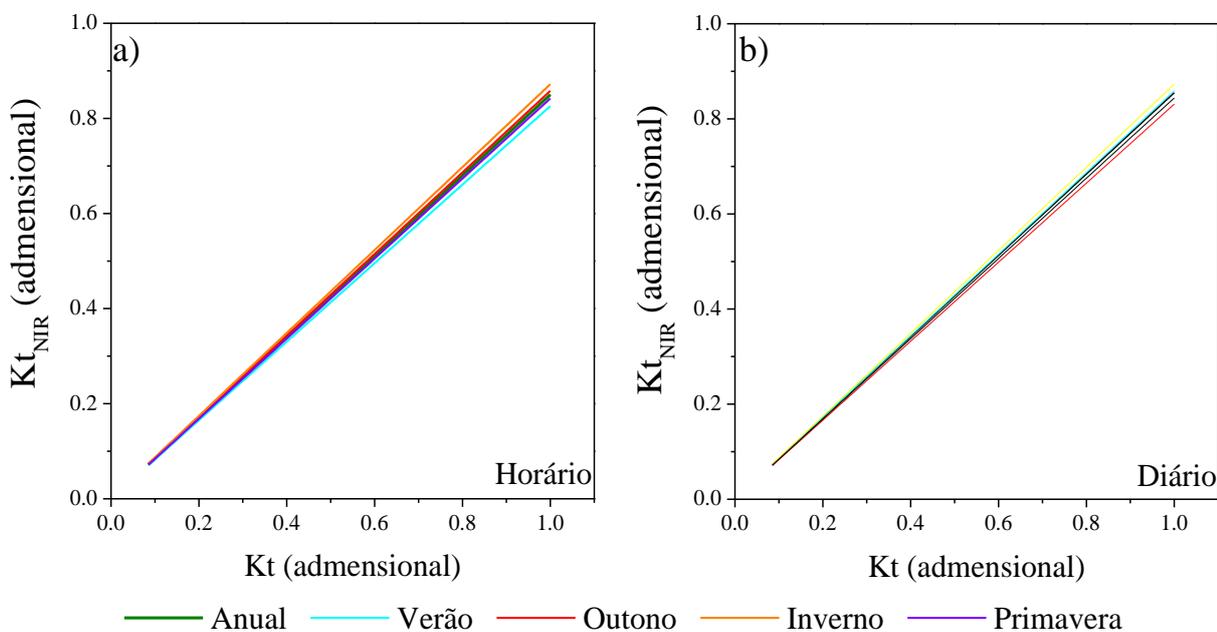
coberturas de céu, nas quais são maiores os dias de céu aberto, secos e com aerossóis onde há pouca absorção pelo vapor de água, e maior espalhamento pelo aerossóis nas duas partições: $Kt_{NIR}^h/Kt^h = 0,858$ e $Kt_{NIR}^d/Kt^d = 0,859$ no outono, e $Kt_{NIR}^h/Kt^h = 0,872$ e $Kt_{NIR}^d/Kt^d = 0,873$ no inverno.

Tabela 4 - Equações sazonais entre Kt_{NIR} e Kt nas estações do ano verão, outono, inverno e primavera nas duas partições de tempo.

Verão	(horária)	$Kt_{NIR} = 0,826 \times Kt$
	(diária)	$Kt_{NIR} = 0,831 \times Kt$
Outono	(horária)	$Kt_{NIR} = 0,858 \times Kt$
	(diária)	$Kt_{NIR} = 0,859 \times Kt$
Inverno	(horária)	$Kt_{NIR} = 0,872 \times Kt$
	(diária)	$Kt_{NIR} = 0,873 \times Kt$
Primavera	(horária)	$Kt_{NIR} = 0,842 \times Kt$
	(diária)	$Kt_{NIR} = 0,844 \times Kt$
Total	(horária)	$Kt_{NIR} = 0,850 \times Kt$
	(diária)	$Kt_{NIR} = 0,855 \times Kt$

A análise sazonal das equações de estimativas anuais (Equações 12 e 13) efetuada através do desvio relativo $D(\%)$, calculado pela Equação 10, entre os coeficientes lineares das equações anuais (a_a) e das equações sazonais no verão, outono, inverno e primavera (a_s) pode ser observada na figura 8.b.

Figura 8 - . (a, b) - Comparação entre os valores estimados Kt_{NIR}^h e Kt_{NIR}^d pela equação total e pelas equações por estações do ano: verão, outono, inverno e primavera, para as duas partições de tempo.



Para a estimativa Kt_{NIR}^h , os valores obtidos de D (%) mostram que a Equação 12 anual superestima Kt_{NIR}^h sazonal no verão e primavera em 2,8% e 1,0% e subestima no outono e inverno em 1,0% e 2,6%, respectivamente. Similarmente, para a estimativa Kt_{NIR}^d , os valores de D (%) mostram que a Equação 13 anual superestima Kt_{NIR}^h sazonal no verão e primavera em 2,8% e 1,3% respectivamente, e subestima no outono e inverno em 1,0% e 2,1%, respectivamente.

3.5 Análise do efeito da cobertura de céu na equação total

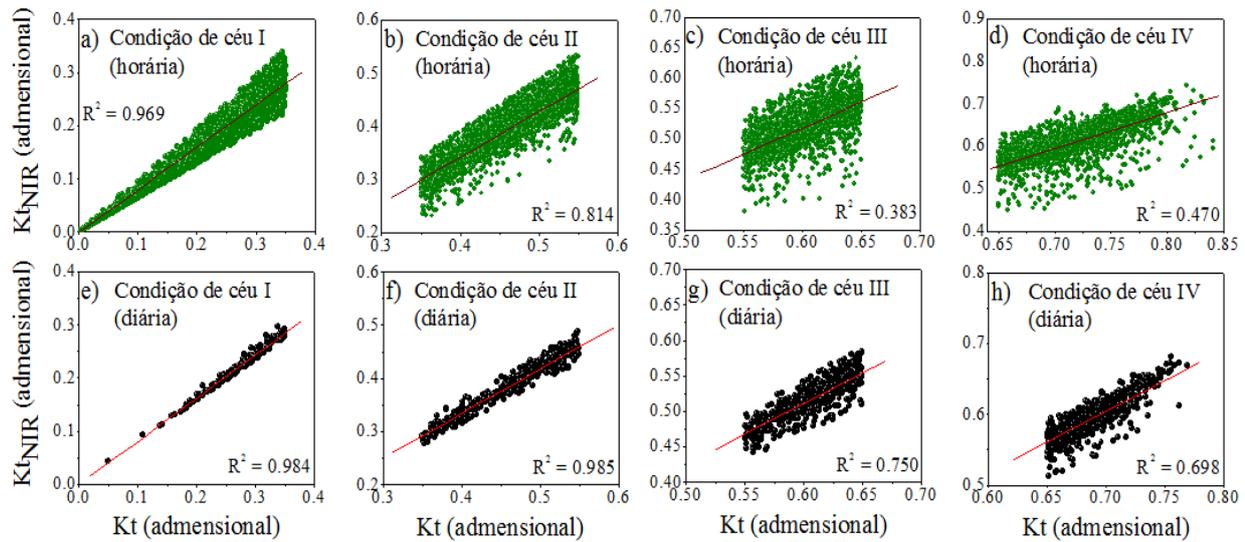
Na secção anterior ficou evidenciado que os valores das frações Kt_{NIR} apresentam variações sazonais, ou seja, dependem das condições climáticas, ou melhor dependem do tipo de coberturas de céu. Para análise mais detalhada dessas variações em função das variações das concentrações da nebulosidade, vapor de água e aerossóis na atmosfera, a base dos dados das radiações foram separadas em função de Kt em quatro tipos de cobertura de céu (I, II, III e IV). O índice Kt , denominado transmissividade atmosférica da radiação global, é um importante parâmetro meteorológico, definido como sendo a relação entre a irradiação global na superfície terrestre H_G e a irradiação extraterrestre H_0 ou $Kt = H_G / H_0$. O indicativo Kt é, portanto, o principal indicador da atenuação dos constituintes atmosféricos. A cobertura I - representa céu nebuloso (CN) com $Kt < 0,35$; cobertura II - céu parcialmente nublado com dominância para difuso (CPN1) com $0,35 \leq Kt < 0,55$; cobertura III - céu parcialmente nublado com dominância para claro (CPN2) com $0,55 \leq Kt < 0,65$ e cobertura IV - céu aberto ou sem nuvens (CA) com $Kt \geq 0,65$ (ESCOBEDO et al., 2009).

A Figura 9 (a, b, c, d, e, f, g, h), mostra as correlações entre Kt_{NIR} e Kt (horária e diária), para as quatro coberturas de céu I, II, III e IV, e os coeficientes de determinação R^2 das equações de regressão. As equações de regressão obtidas em todas as coberturas de céu são lineares em pequenos intervalos de Kt quando comparado ao intervalo total entre 0 e 1.

Na Figura 9 (a, b, c, d), partição horária, os valores dos coeficientes de determinação das equações decrescem da cobertura nublado até cobertura de céu aberto: foram elevados apenas nas coberturas de céu I ($R^2 = 0,969$) e II ($R^2 = 0,814$), enquanto que para as coberturas de céu III ($R^2 = 0,383$) e IV ($R^2 = 0,470$), os

coeficientes de determinação R^2 foram baixos e indicam não haver correlações entre as duas transmissividades, sem nenhuma possibilidade de uso nas estimativas de K_{tNIR}^h em ambas coberturas de céu. Similarmente, na Figura 9 (e, f, g, h), partição diária, os valores de R^2 foram elevados também apenas nas coberturas de céu I ($R^2 = 0,984$) e II ($R^2 = 0,985$), enquanto que para as correlações nas coberturas de céu III ($R^2 = 0,750$) e IV ($R^2 = 0,698$), os coeficientes de determinação R^2 foram inferiores aos valores das coberturas anteriores, com capacidade de utilização limitada, nas estimativas.

Figura 9 - (a,b,c,d): Correlações entre K_{tNIR} e K_t , nas coberturas de céu I, II, III e IV para as duas partições de tempo



É possível que a falta de correlações entre K_{tNIR} e K_t , nas coberturas de céu III e IV, estejam nos pequenos intervalos de variações entre K_{tNIR} e K_t . As equações de regressão de K_{tNIR} em função de K_t nas coberturas de céu I, II, III e IV são mostradas na Tabela 5.

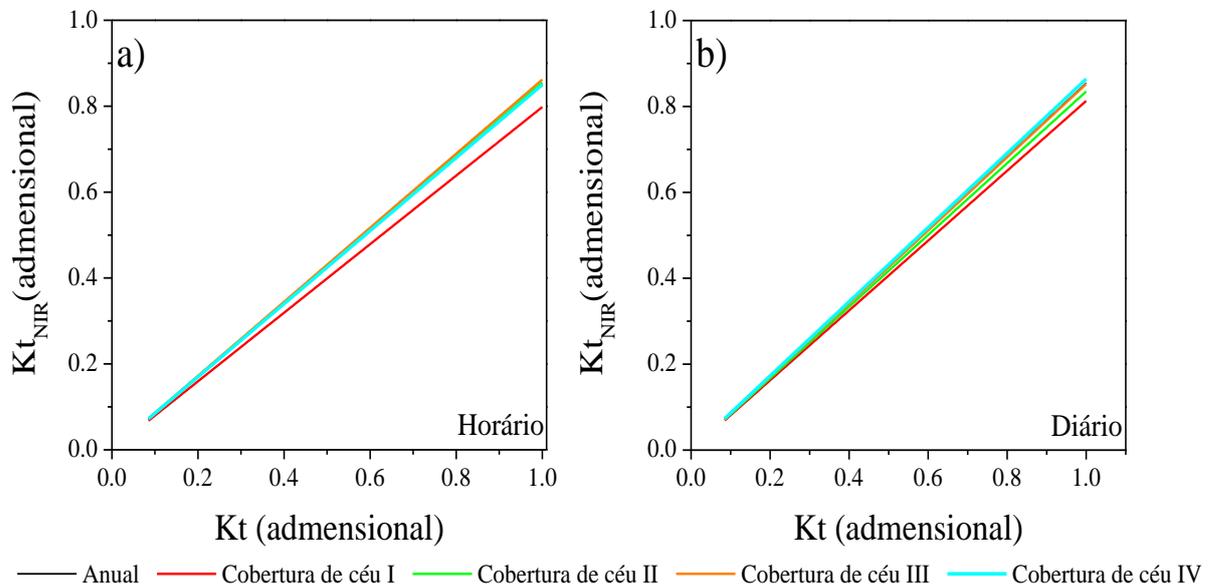
Tabela 5- Equações de regressão entre K_{tNIR} e K_t (horária e diária), na cobertura de céu I, II, III e IV.

$K_t < 0,35$ - I	(horário)	$K_{tNIR} = 0,798 \times K_t$
	(diário)	$K_{tNIR} = 0,813 \times K_t$
$0,35 \leq K_t < 0,55$ - II	(horário)	$K_{tNIR} = 0,855 \times K_t$
	(diário)	$K_{tNIR} = 0,835 \times K_t$
$0,55 \leq K_t < 0,65$ - III	(horário)	$K_{tNIR} = 0,862 \times K_t$
	(diário)	$K_{tNIR} = 0,852 \times K_t$
$K_t \geq 0,65$ - IV	(horário)	$K_{tNIR} = 0,850 \times K_t$
	(diário)	$K_{tNIR} = 0,864 \times K_t$
Total	(horário)	$K_{tNIR} = 0,850 \times K_t$
	(diário)	$K_{tNIR} = 0,855 \times K_t$

Em relação aos valores de $Kt_{NIR}^h = 0,850 Kt^h$ (Equação 12) e $Kt_{NIR}^d = 0,855 Kt^d$ (Equação 13) para coberturas de céu juntas ou total, o valor de Kt_{NIR}^h / Kt^h por cobertura de céu (Tabela 5) é superior na coberturas de céu com nuvens I (0,798), igual na cobertura de céu aberto IV (0,85) e é inferior aos das coberturas de céu II e III (0,855 e 0,862). O valor de Kt_{NIR}^d / Kt^d em função da cobertura de céu é superior nas coberturas de céu com nuvens I, II, III (0,813; 0,835 e 0,852) e é inferior a da cobertura de céu IV (0,855).

A análise quantitativa do efeito da cobertura de céu da equação de estimativa anual, através do desvio relativo $D(\%)$ calculado pela Equação 11, entre os coeficientes lineares da equação anual (a_a) e das equações por cobertura de céu I, II, III, e IV (a_c) nas duas partições é apresentada na figura 10.

Figura 10 - (a, b): Comparação entre os valores estimados Kt_{NIR}^h e Kt_{NIR}^d pelas equações anual ou total e pelas equações por cobertura de céu I II III e IV.



Para a estimativa Kt_{NIR}^h , os valores de $D(\%)$ obtidos mostram que o valor Kt_{NIR}^h anual superestima Kt_{NIR}^h nas coberturas de céu I e III em 6,1% e 0,5% respectivamente, subestima na cobertura de céu II em 0,5% , e é igual na cobertura de céu IV, enquanto que para a estimativa Kt_{NIR}^d , os valores de $D(\%)$ obtidos mostram Kt_{NIR}^d anual superestima Kt_{NIR}^d por cobertura de céu I, II e III em 4,9%, 2,3% e 0,4% respectivamente, subestima na cobertura de céu IV em 1,0%.

4 CONCLUSÕES

Dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- A sazonalidade das transmissividades das irradiações global total e global NIR: Kt^h , Kt^d , Kt_{NIR}^h e Kt_{NIR}^d anual, nas partições horária e diária, são resultantes das variações das concentrações de nuvens, vapor d'água e aerossóis da atmosfera local. Os valores médios de Kt^h , Kt^d , Kt_{NIR}^h e Kt_{NIR}^d são menores nas condições de atmosfera com elevadas concentrações de nuvens e vapor d'água no ano, e ao contrário são maiores no período seco, nas quais a atmosfera possui baixas concentrações de nuvens e vapor d'água e maior concentração de aerossóis.
- As equações propostas $Kt_{NIR}^h = 0,850 Kt^h$ e $Kt_{NIR}^d = 0,855 Kt^d$ com elevados coeficientes de determinação $R^2 = 0,981$ e $R^2 = 0,987$, e com os indicadores estatísticos obtidos na validação: $rMBE$ inferiores a 1,0%, $rRMSE$ inferiores a 7,0% e d superiores a 0,994 nas duas condições de validação, mostram que as mesmas podem ser utilizadas na estimativas de Kt_{NIR} em função de Kt com precisão e exatidão.
- A análise sazonal das equações $Kt_{NIR}^h = 0,850 Kt^h$ e $Kt_{NIR}^d = 0,855 Kt^d$ mostrou que a estimativa da equação $Kt_{NIR}^h = 0,850 Kt^h$ anual superestima no verão e primavera e subestima no outono e inverno, enquanto que a estimativa da equação $Kt_{NIR}^d = 0,855 Kt^d$ anual superestima Kt_{NIR}^d sazonal no verão e primavera e subestima no outono e inverno.
- Os valores dos desvios $D(\%)$, inferiores a incertezas das medidas, indicam que as equações anuais $Kt_{NIR}^h = 0,850 Kt^h$ e $Kt_{NIR}^d = 0,855 Kt^d$ devem ser usadas sem restrições de sazonalidade nas estimativas de Kt_{NIR}^h e Kt_{NIR}^d .
- A análise das equações $Kt_{NIR}^h = 0,850 Kt^h$ e $Kt_{NIR}^d = 0,855 Kt^d$ por cobertura de céu mostrou que a estimativa de Kt_{NIR}^h anual superestima Kt_{NIR}^h por cobertura de céu I e III e subestima na cobertura de céu II e é igual na cobertura de céu IV, enquanto Kt_{NIR}^d anual superestima Kt_{NIR}^d por cobertura de céu I, II e III respectivamente, subestima na cobertura de céu IV.
- Os valores dos desvios $D(\%)$, inferiores a incertezas das medidas, indicam que as equações anuais devem ser usadas sem restrições de cobertura de céu.

REFERÊNCIAS

- Barolet, D.; Christiaens, F.; Hamblin, M.R., 2015. Infrared and skin: friend or foe, J. Photochem. Photobiol. B, v.155, p.78–85.
- Carrer, D.; Dafont, S.; Roujean, J.L.; *et al.*, 2012. Incoming Solar and Infrared Radiation Derived from METEOSAT: Impact on the Modeled Land Water and Energy Budget over France. Journal of Hydrometeorology, v.13, p.504 – 520.
- Carvalho, L.M.V.; Jones, C.; Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: Intensity, Form, Persistence, and Relationships with Intraseasonal to Interannual and Extreme Rainfall. Journal of Climate, v.17, p.88-108.
- CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_086.html, (accessed: 14.07.2016).
- Chaves, M. & Escobedo, J.F., 2000. A software to process daily solar radiation data. Renewable Energy, v.19, p.339-344.
- Codato, G.; Oliveira, A. P.; Soares, J.; Escobedo, J. F.; Gomes, E. G.; Dal Pai, A., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. Theoretical and Applied Climatology, v.93, p.57-73.
- Corrêa, F.H.P. Estimativa das radiações ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR) e infravermelha (IV) em função da razão de insolação. 2011. xi, 69 f. Dissertação (mestrado) - Unviversidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2011. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/86481>>.
- Dombrovsky, L. A.; Fedorets, A. A.; Medvedev. D. N., 2016. The use of infrared irradiation to stabilize levitating clusters of water droplets. Infrared Physics & Technology, v.75, p.124-132.

Escobedo, J. F.; Dal Pai, A.; Oliveira, A. P., 2014. Diurnal and Annual Evolution of UV, PAR and NIR Irradiations in Botucatu/Brazil. *Energy Procedia*, v.57, p.1130-1139.

Escobedo, J. F.; Gomes, E.; Oliveira, A. P.; Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*, v.86, p.299-309.

Escobedo, J.F, Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. R., 2011. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, v.36, p.169-178.

Heinemann et al. Sensitivity of APSIM/ORYZA model due to estimation errors in solar radiation. *Bragantia, Campinas*, v. 71, n. 4, p.572-582, 2012.

Holben B. N.; Tanré, D.; Smirnov, A.; et al., 2001. An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research*, v.106, p.12.067-12.097.

ISO 20473, Optics and Photonics-Spectral Bands, ISO, Geneva, 2007.

Iqbal, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983. 390.

Jacobson, M. Z., 2002. Analysis of aerosol interactions with numerical techniques for solving coagulation, nucleation, condensation, dissolution and reversible chemistry among multiple size distributions. *Journal of Geophysical Research*, v.107, p.1-23.

Jamieson PD, Porter JR, Wilson DR. A test of the computer simulation model ARCWHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res* 1991;27:337–50.

Lamnatou, C. & Chemisana, D., 2013. Solar radiation manipulations and their role in greenhouse claddings: Fresnel lenses, NIR- and UV-blocking materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.18, p.271–287.

Larsen, N. F. & Stamnes, K., 2005. Use of shadows to retrieve water vapor in hazy atmospheres. *Applied Optics*, v.44, p.6986-94.

Lemos, C.F. & Calbete, N.O., 1996. Sistemas frontais que atuaram no litoral de 1987-1995. *Clima análise, Edição comemorativa 10 anos (INPE-10717-PRE/6178)*.

Nogués-Paegle J. & MO, K.C., 1997. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon Wea Rev.* v.125, p.279-291.

Radel, G.; Shinea, K. P.; Ptashnika, I. V., 2015. Global radiative and climate effect of the water vapour continuum at visible and near-infrared wavelengths. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v.141, p.727–738.

Reda IM, Myers DR, Stoffel TL. Uncertainty Estimate for the Outdoor Calibration of Solar Pyranometers: NCSLI.Measure, *The Journal of Measurement Science* 2008;3:58-66.

Rossi, T. J.; Escobedo, J. F.; Santos, C. M.; Silva, M. B. P.; Gomes, E. N., 2015. Equações de estimativas sazonais para as radiações global, difusa e direta infravermelha em Botucatu/SP/Brasil. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.19, p.11.55-11.66.

Rossi, T. J.; Rossi, L. R.; Santos, C. M.; Silva, M. B. P.; Escobedo, J. F., 2016. Dependência da cobertura de céunafrações solares global, difusa e direta do espectro infravermelhoemBotucatu/sp/Brasil. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v.VII, p.40-49.

Rossi, T.J., Escobedo, J.F., dos Santos, C.M., Rossi, L.R., da Silva, M.B.P., Dal Pai, E. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.82, p.448-459, 2018.

Salatiel, S.; Coulomb, B.; Lebreton, C.; Dubertret, L., 1998. Non-coherent near infrared radiation protects normal human dermal fibroblasts from solar ultraviolet toxicity. *The Journal of Investigative Dermatology*, v.111, p.629-633.

Santos, C. M. & Escobedo, J.F., 2016. Temporal variability of atmospheric turbidity and DNI attenuation in the sugarcane region, Botucatu/SP. *Atmospheric Research*, v.181, p.312–321.

Satyamurty, P., Nobre, C. A, Silva, D. P. L., 1998. Topics: South America. *Meteorological Monographs*, v.27, p.119-139.

Silva, M. B. P.; Escobedo, J. F.; Rossi, T. J.; et al., 2017. Performance of the Angstrom-Prescott model and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar radiation in Botucatu/SP/Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.160, p.11-23.

Teramoto, E. T, Escobedo, J. F, Dal Pai, A.; *et al.*, 2013. Influência de nuvens, aerossóis e ozônio sobre o KT_{UV} em Botucatu/SP/Brasil: cidade produtora de cana-de-açúcar. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.1, p.11.151-11.160.

Tsai, S. R. & Hamblin, M. R., 2017. Biological effects and medical applications of infrared radiation. *Journal of Photochemistry & Photobiology, B: Biology*, v.170, p.197–207.

Vatansver, F. & Hamblin, M.R., 2012. Far infrared radiation (FIR): its biological effects and medical applications, *Photonics Lasers Med*, v.4, p.255–266.

Yao, J.; Liu, B.; Qin, F., 2009. Rapid temperature jump by infrared diode laser irradiation for patch-clamp studies, *Biophys. J.*, v.96, p.3611–3619.

Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, p.184-194.

WMO - World Meteorological Organization. *Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source*. World Meteorological Organization Technical Note No. 172, 1981, WMO-No. 557, Geneva, 298.