

LUCAS CARVALHO LENZ

**MODELOS DE CORREÇÃO DA MEDIDA DA IRRADIÂNCIA DIFUSA PELO
MÉTODO DO DISCO DE SOMBREAMENTO**

Botucatu

2020

LUCAS CARVALHO LENZ

**MODELOS DE CORREÇÃO DA MEDIDA DA IRRADIÂNCIA DIFUSA PELO
MÉTODO DO DISCO DE SOMBREAMENTO**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Energia na agricultura

Orientador: Alexandre Dal Pai

Botucatu

2020

L575m

Lenz, Lucas Carvalho

Modelos de correção da medida da irradiância difusa pelo método do disco de sombreamento / Lucas Carvalho Lenz. -- Botucatu, 2020

46 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Alexandre Dal Pai

1. Radiometria. 2. Radiação difusa. 3. Cobertura de céu. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MODELOS DE CORREÇÃO DA MEDIDA DA IRRADIÂNCIA DIFUSA PELO MÉTODO DO DISCO DE SOMBREAMENTO

AUTOR: LUCAS CARVALHO LENZ

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

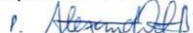
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



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



Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. EDUARDO NARDINI GOMES
Engenharia Agrônômica / Campus Experimental de Registro - UNESP



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

Botucatu, 29 de maio de 2020

Dedico este trabalho a Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus colegas Marquinhos, Matheus, Zé, Luís, Camila e Daniel pela companhia agradável e apoio.

Ao Prof. Dr. Alexandre, pela orientação, amizade e paciência.

Ao Prof. Dr. Enzo, pela amizade e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Escobedo, pelo acolhimento no grupo no começo do meu estágio.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida para realização do Doutorado.

Aos funcionários Eva, Raquel, Maria, Firmo, Marcelo, Jack e Du. Que, ao longo do processo me ajudaram e me impulsionaram no sentido da realização desse trabalho, seja na forma de ajuda técnica, ou na forma de conselhos pessoais e compartilhar experiências.

A Marina, minha companheira muito amada que sempre está ao meu lado todos os momentos, sempre me apoiando com uma força e coragem admiráveis.

Aos meus pais José e Elisama por serem meus grandes exemplos e modelos na vida.

Aos meus irmão André e Clara, por fazerem minha vida muito mais leve e alegre.

RESUMO

O presente trabalho sugere modelos de correção para a irradiância solar difusa medida com o disco de sombreamento. A irradiância global foi medida por um piranômetro Eppley-PSP; a irradiância normal direta por um pireliômetro Eppley-NIP adaptado a um dispositivo de rastreamento solar ST-3 e irradiância difusa por um piranômetro Eppley-PSP instalado em um disco de sombreamento. O Laboratório de Radiometria Solar da Universidade Estadual Paulista forneceu as medições durante os anos de 1997 a 2000. Os resultados mostraram que ambos os modelos sugeridos, o modelo para todas as coberturas de céu e o modelo para as diferentes coberturas de céu melhoram a medida da irradiância difusa pelo método do disco de sombreamento permitindo a geração de um banco de dados de radiação global, direta e difusa, sem altos investimentos financeiros. A medida da Irradiância difusa sem correção apresentou um MBE de -4,64% e um RMSE de 12,23%, enquanto que os modelos de correção para todas as coberturas de céu e para as diferentes coberturas de céu obtiveram MBE de 0,48% e 0,85 e RMSE de 10,52% e 9,91%, respectivamente.

Palavras-chave: Radiometria. Radiação Difusa. Cobertura de céu.

ABSTRACT

The present work suggests correction models for diffuse solar irradiance measured with the shading disc. The global irradiance was measured by an Eppley-PSP pyranometer; normal direct irradiance by an Eppley-NIP pyrelimeter adapted to an ST-3 solar tracking device and diffuse irradiance by an Eppley-PSP pyranometer installed in a shading disc. The Laboratory of Solar Radiometry at the State University of São Paulo provided the measurements during the years 1997 to 2000. The results showed that both models suggested, the model for all sky covers and the model for different sky covers improve the measurement of diffuse irradiance by the shading disc method allowing the generation of a database of global radiation, direct and diffuse, without high financial investments. The measurement of diffuse irradiance without correction showed an MBE of -4.64% and an RMSE of 12.23%, while the correction models for all sky coverings and for the different sky coverings obtained an MBE of 0.48 % and 0.85 and RMSE of 10.52% and 9.91%, respectively.

Keywords: Radiometry. Diffuse radiation. Sky cover.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Descrição do local e clima.....	25
3.2	Instrumentação e controle de qualidade dos dados.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4.1	Modelos para todas as coberturas de céu.....	31
4.2	Modelos por cobertura de céu.....	33
4.3	Céu nublado.....	34
4.4	Céu parcialmente nublado e parcialmente aberto.....	35
4.5	Céu aberto.....	37
4.6	Validação.....	38
5	CONCLUSÕES.....	41
	REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a civilização humana tem alcançado grandes avanços tecnológicos, o volume de pesquisas científicas produzidas é praticamente imensurável em todas as áreas do conhecimento, e aparentemente, não há limites para esse avanço. Porém, a escassez de energia se apresenta diante desse cenário como um fator limitante para o desenvolvimento de muitos projetos.

Um exemplo da importância da energia na sociedade é a Revolução Industrial, ocorrida em meados do século XVIII que através do advento das máquinas à vapor propiciou profundas mudanças nos meios de produção e na economia da Europa e, posteriormente mundial. Desde a fabricação da primeira máquina à vapor até os dias de hoje, as fontes de energia mais utilizadas sempre foram fontes não renováveis, como por exemplo os combustíveis fósseis carvão mineral e petróleo, porém suas quantidades são limitadas e sua utilização causa prejuízos para o planeta, como emissão de gases do efeito estufa e poluição do ar.

Com a crescente evolução da consciência ambiental, a inviabilidade do uso exclusivo de fontes de energia não renováveis se tornou evidente. Devido a este fato, a busca por fontes de energia renováveis, como por exemplo, o etanol obtido à partir da fermentação da cana-de-açúcar e fontes de energia inesgotáveis como a energia eólica e térmica se tornou necessária.

Diante deste cenário, a radiação solar figura como uma alternativa plenamente viável, devido a sua abundância, grande alcance geográfico e também ao fato de ser uma fonte de energia limpa, ou seja, não entra em conflito com as preocupações ambientais.

Com o intuito de captar, armazenar e utilizar a energia solar, diversos estudos foram desenvolvidos ao redor do mundo, expandindo o conhecimento a seu respeito. Equipamentos que realizam sua medida foram fabricados ao longo dos anos além de modelos de estimativa para serem utilizados em situações de ausência de equipamentos.

Uma importante descoberta foi a de que a radiação solar não está presente apenas em locais onde ela incide diretamente. Em dias completamente nublados e em alguns ambientes sombreados como no interior de florestas também existe a presença da radiação solar, porém na forma de radiação solar difusa, isso explica o desenvolvimento de plantas em lugares que nunca recebem radiação solar

diretamente. Essa radiação solar difusa também é uma expressiva fonte de energia, essencial no desenvolvimento das plantas e determinante para o clima de regiões. Na agricultura, a radiação difusa é importante pois é aproveitada pelas plantas no processo de fotossíntese e é a radiação solar predominante nas casas de vegetação, viveiros e nos estratos mais próximos do solo em agroflorestas.

Apesar do grande interesse da comunidade científica no conhecimento da radiação solar tanto da que incide diretamente quanto da que incide de forma difusa, ainda existem muitas lacunas nesta área que precisam ser exploradas, e a instrumentação utilizada atualmente para a medida quantitativa de seus valores necessita de aprimoramento

Portanto, tendo em vista a importância do conhecimento da radiação solar difusa, e da dificuldade da realização de sua medida com precisão e exatidão satisfatórias, esta tese tem como objetivos:

1. Avaliar a precisão e exatidão da medida da radiação difusa pelo método do disco de sombreamento.
2. Propor uma metodologia para o aprimoramento da qualidade da mediada da radiação solar difusa.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Radiação é o nome dado ao fenômeno de transferência de energia sem a necessidade de um meio físico. Todo corpo que tenha temperatura acima do zero absoluto emite radiação. A forma pela qual a radiação é emitida pelos corpos foi descrita por Stefan-Boltzmann e pode ser calculada conforme a Equação 1, conhecida como Lei de Stefan-Boltzmann

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

Onde E é a energia radiante emitida pelo corpo, em Watts, ε é a emissividade do corpo, adimensional, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, que vale $5,670373 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \times \text{K}^4$ e T é a temperatura do corpo, em K.

A emissividade é uma característica inerente aos corpos, está relacionada à sua constituição, e pode variar entre zero e um. Um corpo com zero de emissividade é compreendido como um corpo que absorve toda a energia recebida e não a emite, enquanto que um corpo com emissividade igual a 1, também chamado de corpo negro, é aquele que emite toda energia que recebe. Ambos os valores absolutos zero e um são hipotéticos e nunca foram observados.

O Sol é uma estrela constituída por gases com emissividade muito próxima de um, e a temperatura em sua superfície é em torno de 6000K. Por apresentar uma emissividade muito próxima da unidade, convencionou-se considerá-lo um corpo negro (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Ao utilizar a Lei de Steffan-Boltsmann, considerando a emissividade do sol sendo um e a temperatura de sua superfície 6000K, é possível determinar a quantidade de energia que ele emite como sendo $62 \times 10^3 \text{ kW/m}^2$ (COULSON, 1973). Ao ser emitida, essa energia atravessa uma distancia média de 150 milhões de km.

A distância entre o planeta terra e o sol varia ao longo do ano, sendo aproximadamente de 147,1 milhões de quilômetros no periélio (dia 4 de Dezembro) e 152,1 milhões de Km no afélio (dia 4 de julho). Isso ocorre, pois a órbita da terra em torno do sol é elíptica (RUDDIMAN, 2008). Do total da energia emitida pelo sol, em média $1,6 \times 10^{24} \text{ kW}$ atinge o topo da atmosfera do planeta. Radiação extraterrestre é o nome dado á radiação solar que atinge o topo da atmosfera e seu valor pode ser

calculado pelo produto da constante solar I_{CS} $1367W/m^2$ pelo cosseno do ângulo zenital θ_z (KING et al., 2015).

A radiação solar pode ser observada na forma de partículas de energia chamadas de fótons ou na forma de ondas eletromagnéticas, nunca das duas formas simultaneamente (XU & XUAN, 2019). No decorrer deste trabalho, a radiação solar será estudada como onda eletromagnética.

O espectro eletromagnético da radiação solar abrange os comprimentos de onda da radiação ultravioleta (comprimentos de onda menores que $0,2 \mu m$), passando pela luz visível (comprimentos de onda de $0,2 \mu m$ a $0,3 \mu m$) até a radiação infravermelha (comprimentos de onda de $0,3 \mu m$ a $3 \mu m$) (AGUIAR et al., 2011).

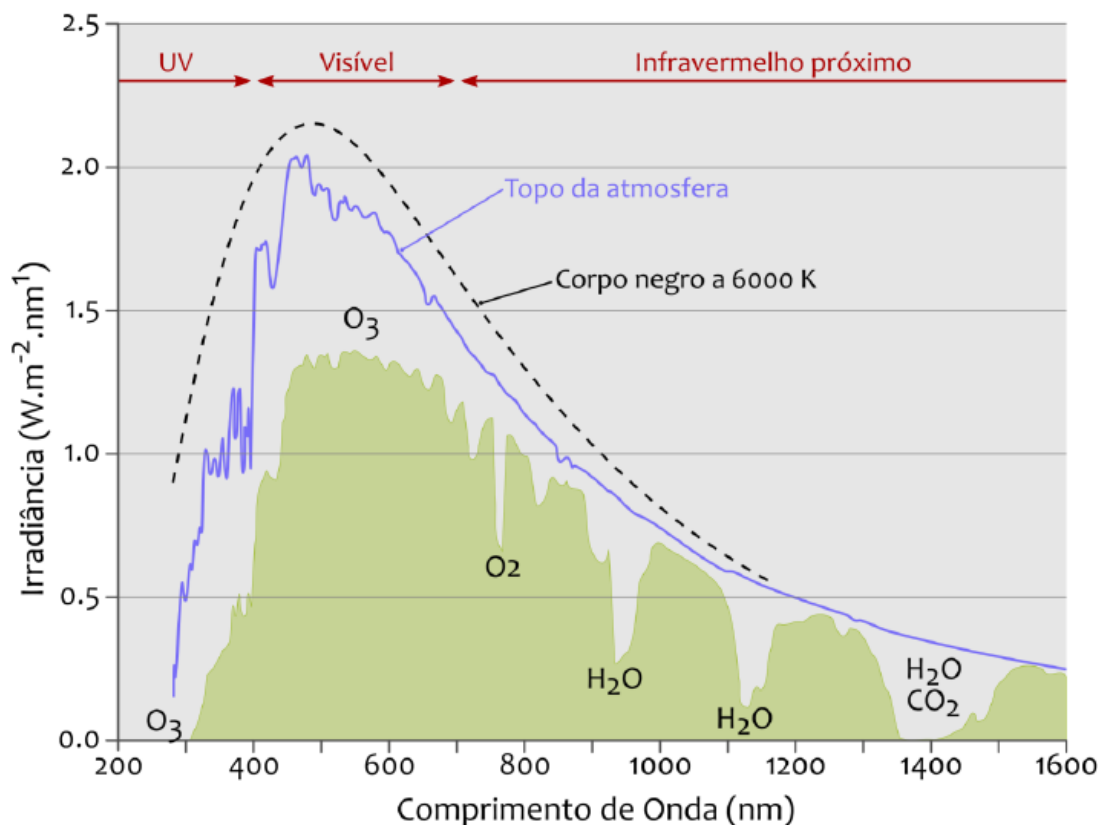
As principais unidades de medida da radiação utilizadas neste estudo para quantificar a energia solar são a irradiância, que corresponde ao fluxo de energia que continuamente atinge uma determinada área, em W/m^2 e radiação, que representa a quantidade total de energia recebida em uma área ao longo de um determinado período de tempo, em J/m^2 ou MJ/m^2 . Os períodos de tempo são chamados de partições de tempo e podem ser de horas, dias, meses e anos (CHAVES & ESCOBEDO, 2000).

Por se comportar como ondas eletromagnéticas, a radiação extraterrestre ao atingir o topo da atmosfera passa a interagir com seus constituintes. A atmosfera terrestre é composta predominantemente pelos gases Nitrogênio, Oxigênio e argônio. Também estão presentes em menor quantidade os chamados gases traços Ozônio dióxido de carbono, vapor de água entre outros, além de partículas suspensas como aerossóis e poeira (HART, 1977).

Ao atingir a atmosfera terrestre, a radiação solar interage com seus constituintes por meio de três processos físicos: reflexão, absorção e transmissão (THORIN, 2014). A reflexão é o fenômeno que ocorre quando a radiação solar interage com os constituintes atmosféricos e é redirecionada, podendo ser refletida novamente para o espaço ou em direção à superfície terrestre. A absorção é o fenômeno que ocorre quando a radiação solar ao entrar em contato com os constituintes atmosféricos é convertida em energia térmica, resultando no aumento da temperatura da atmosfera. A Figura 1 mostra a absorção da radiação solar pelos gases presentes na atmosfera. Transmissão é o nome dado ao fenômeno que ocorre quando a radiação solar atravessa a atmosfera e atinge a superfície terrestre

sem interagir com seus constituintes (DONOHOE & BATTISTI, 2011; PADOVAN & COL, 2010).

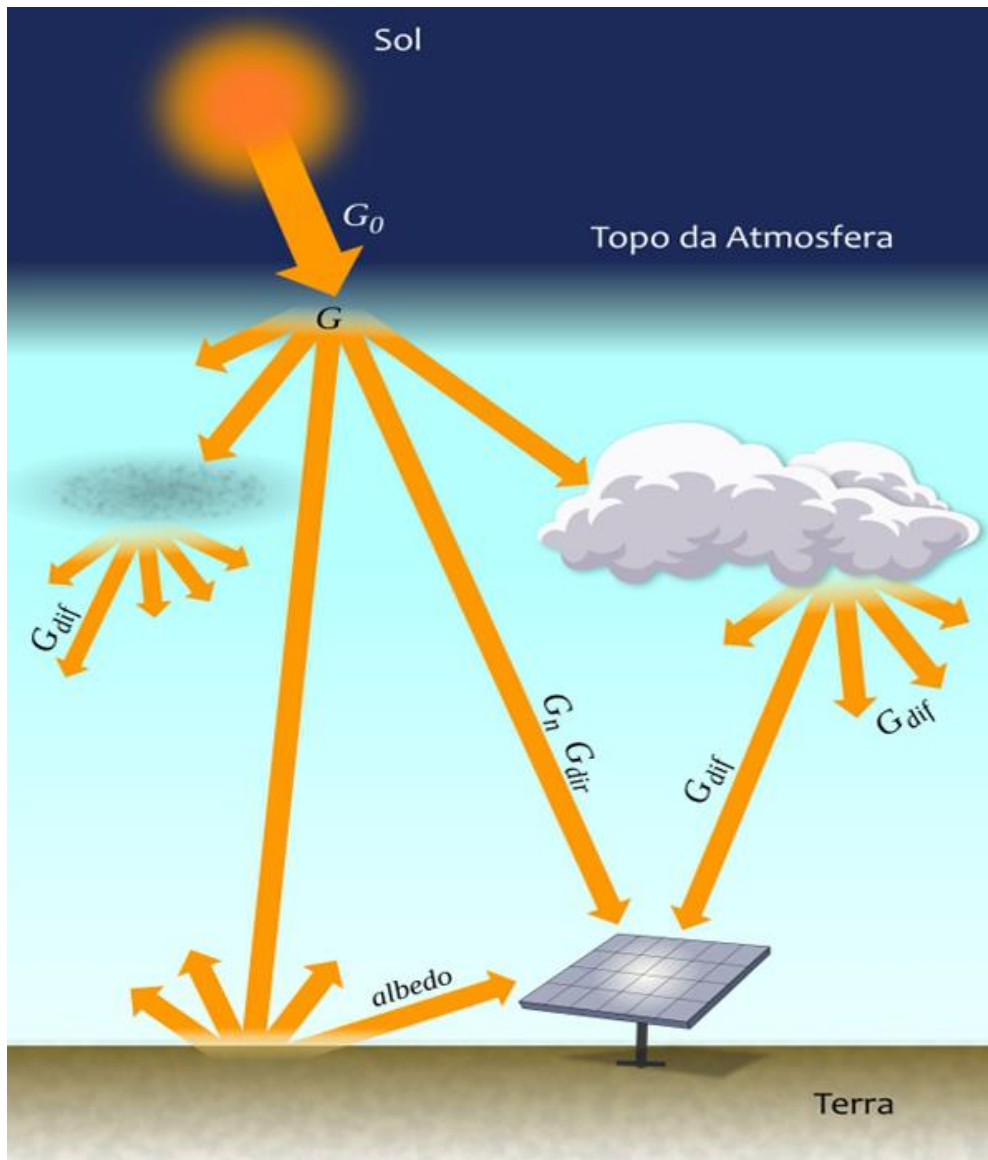
Figura 1 - Interação da irradiância solar com a atmosfera.



Fonte: Pereira et al. (2017).

A fração da irradiância extraterrestre I_0 que passa diretamente pela atmosfera sem interagir com seus constituintes e então alcança a superfície terrestre é denominada irradiância direta I_D (BLANC et al., 2014), e tem como características a direção sempre no sentido do ângulo zenital, sendo altamente energética. A outra parcela da irradiância solar a qual interage com os gases e aerossóis presentes na atmosfera e sofre multireflexões, é chamada irradiância difusa I_{DIF} . A I_{DIF} é multidirecional e menos energética que a I_D . A soma da I_D com a I_{DIF} é chamada de irradiância global I_G e representa o total de irradiância solar incidente na superfície terrestre (THOMALLA et al., 1983; MANJU; SANDEEP, 2019). A Figura 2 ilustra as irradiâncias extraterrestre, Global, Difusa e Direta.

Figura 2 - Radiação solar e suas componentes



Onde G_0 é a irradiância extraterrestre, G é a irradiância Global, G_{dif} é a irradiância difusa e G_{dir} a irradiância direta. **Fonte:** Pereira et al. (2017).

Devido aos processos de absorção e reflexão, a I_G que atinge a superfície terrestre é quantitativamente inferior à I_0 . A relação entre a I_G pela I_0 é chamada de transmissividade atmosférica ou índice K_t (CARROLL, 1985) e pode ser expressa segundo a Equação 2:

$$K_t = \frac{I_G}{I_0} \quad (2)$$

O índice K_t além de expressar a atenuação que a I_0 sofre ao atravessar a atmosfera terrestre, pode ser utilizado como um parâmetro para a classificação da cobertura do céu, tendo em vista que nos dias em que o céu está nublado, ou seja, coberto por nuvens, a intensidade da I_G é menor se comparado a dias com ausência de nuvens no céu em uma mesma localidade. Conseqüentemente, valores de K_t próximos de zero representam uma atmosfera com maior cobertura de nuvens e valores de K_t próximos de um representam uma atmosfera com menor cobertura de nuvens (ESCOBEDO et al., 2009; IQBAL, 1983).

O estudo da radiação solar difusa está relacionado a diversas áreas da ciência, devido ao seu potencial energético, sua capacidade iluminativa, e participação no processo de fotossíntese, entre outros fatores. Desta forma, é comum encontrar trabalhos que utilizam dados de Radiação Difusa nas áreas de arquitetura e urbanismo (DAL PAI et al., 2014a; JOURNÉE; BERTRAND, 2011; MORADI, 2009, REDWEIK; CATITA; BRITO 2013), meteorologia e climatologia (CHUNG; CHEN; CHANG, 2018; DAL PAI et al., 2014b), fontes alternativas de energia (ALI; JAMIL; FAKHRUDDIN, 2019; KHORASANIZADEH; MOHAMMADI, 2016), engenharias (LI; LOU; LAM, 2015; CAO et al., 2017) e ecologia (CHEN et al., 2019; WANG et al., 2018).

Na agricultura, a I_{DIF} é importante, pois junto com a I_D é a energia responsável pelo processo de fotossíntese.

Em plantações, as plantas que estão nas bordas do terreno cultivado e as folhas localizadas na parte superior da plantação recebem I_D e I_{DIF} , enquanto as folhas localizadas nas regiões inferiores das plantas são sombreadas pelas folhas posicionadas acima e realizam a fotossíntese graças à interceptação da I_{DIF} incidente. Diversos estudos concluíram que a I_{DIF} é mais bem aproveitada por algumas plantas se comparada à radiação direta (GU et al., 2002).

A I_{DIF} também tem destaque em casas de vegetação, que são estruturas construídas com a finalidade de criar um ambiente controlado em seu interior mais propício ao desenvolvimento das plantas e na maioria dos casos atuam como barreira para a I_D , convertendo-a em I_{DIF} em seu interior (COOPER, 1968; MÖLLER et al., 2010).

Nas florestas, as árvores dos estratos superiores ao formarem o dossel, recebem I_{DIF} e I_D , enquanto as árvores do sub bosque, as espécies secundárias e

clímaxes dependem da I_{DIF} para realizarem a fotossíntese e necessitam de sombreamento para o seu desenvolvimento (KNOHL & BALDOCCHI; 2008).

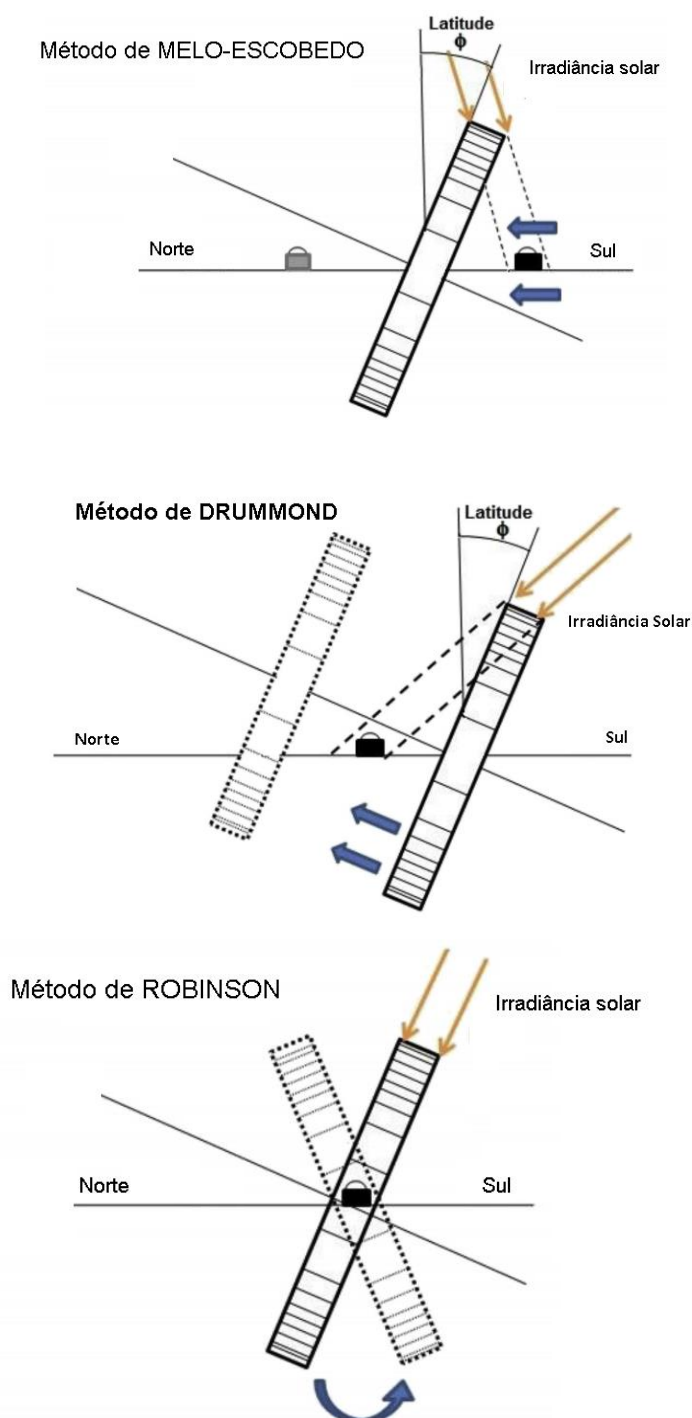
Isso também se aplica às agroflorestas, um sistema de cultivo que consorcia espécies florestais e agrícolas e que, na maioria das vezes, as espécies agrícolas se localizam nos estratos inferiores, se desenvolve na sombra e recebem predominantemente I_{DIF} (MANCUSO; SORATTO; PERDONÁ; 2013; CAMPANHA et al., 2007).

A medida das irradiâncias difusa I_{DIF} , direta I_{DIR} e global I_G é realizada em estações climatológicas e radiométricas automáticas por sensores de termopilha que geram uma voltagem ao serem aquecidos e o valor dessa voltagem corresponde à um valor de irradiância. O processo de calibração destes sensores é feito na fábrica e consiste na aplicação de níveis conhecidos de irradiância e na observação da resposta emitida pelo sensor de acordo com a irradiância aplicada. Os sensores devem ter um corpo com elevada capacidade de troca de calor, para evitar que a temperatura seja afetada por outros fatores que não sejam a irradiância solar (MEDUGU; BURARI; ABDULAZEEZ, 2010).

O sensor que realiza a medida da I_{DIR} é chamado de pireliômetro, necessita de um aparato de rastreamento solar e de um extinguidor de irradiância difusa, para garantir que apenas a I_{DIR} atinja a termopilha (CIALDEA, 2018). A medida da I_G é realizada por um instrumento chamado piranômetro, que registra tanto a I_{DIR} quanto a I_{DIF} simultaneamente. A medida da I_{DIF} é realizada por um piranômetro, porém, é necessário que haja um dispositivo acoplado ao sensor com a função de mantê-lo sempre sombreado. Existem dois grupos de dispositivos de sombreamento: os discos e os anéis de sombreamento (JACOVIDES et al., 2006).

Os anéis de sombreamento são montados no eixo norte-sul e apresentam inclinação correspondente à latitude do local, mantendo o piranômetro na sombra ao bloquear a radiação direta. As formas mais utilizadas para se montar o anel de sombreamento são as de Melo e Escobedo (1994), de Drummond (1956) e a de Robinson e Stoch (1965) A Figura 3 ilustra os métodos mais utilizados na montagem dos anéis de sombreamento.

Figura 3 - Métodos de montagem de anéis de sombreamento



Três dos mais utilizados métodos de montagem dos anéis de sombreamento. **Fonte:** Dal Pai (2005)

Os discos de sombreamento são montados junto de rastreadores solares semelhantes aos utilizados nos pireliômetros e acompanham a movimentação do sol, bloqueando a radiação direta e assim mantendo o piranômetro sombreado (MYERS, 2005) (Figura 4).

Figura 4 - Método do disco de sombreamento

Diversos estudos sobre os anéis de sombreamento evidenciaram que, apesar de produzirem sombra, são também fontes de erro na medida da I_{DIF} . Desta forma, é necessário aplicar correções de natureza geométricas e anisotrópicas, que melhoram seu desempenho em diferentes coberturas de céu (DAL PAI et al., 2016). Porém para o disco de sombreamento não existem estudos que avaliem o desempenho do sensor quando exposto a diferentes condições atmosféricas.

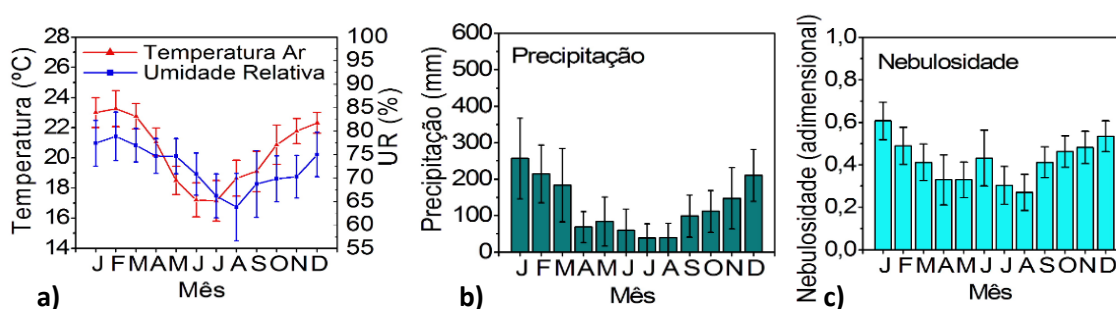
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição do local e clima

Os dados utilizados neste trabalho foram medidos no Laboratório de Radiometria Solar durante o período de 1997 a 2000. Foram utilizados 75% dos dados com a finalidade de estimar o fator de correção a ser utilizado e 25% dos dados na validação do modelo de correção, a cada quatro linhas do banco de dados três eram transferidas para uma planilha utilizada na modelagem e a quarta linha era transferida para uma planilha destinada à validação. O Laboratório de Radiometria Solar está localizado no Município de Botucatu no Campus da Universidade Estadual Paulista (22 54´S, 48 27º, 716m). Botucatu é um município no interior do Estado de São Paulo, rodeado por reflorestamentos de eucaliptos e plantações de cana de açúcar. Atualmente possui 144.820 habitantes, algumas indústrias e economia baseada em serviços.

O clima local pode ser classificado como Cwa (Clima subtropical úmido - mesotérmico) de acordo com a classificação climática de Köppen, com verões quentes e úmidos e invernos secos (ROSSI et al., 2018). A Figura 5 mostra as médias mensais da temperatura do ar, umidade relativa, nebulosidade e precipitação no período de 1971 a 2013.

Figura 5 - Séries climáticas de a) temperatura do ar e umidade relativa; b) precipitação e c) Nebulosidade no período de 1971 a 2013.



Fonte: <http://estacaolageado.fca.unesp.br/index.html>

Os valores de temperatura do ar e umidade relativa acompanham as variações astronômicas e os valores máximos e mínimos são 22,78 °C (Fevereiro) e 16,54 °C (Julho) para a temperatura e 77,40% (Fevereiro) e 61,85% (Agosto) para a

umidade relativa, respectivamente. A estação chuvosa ocorre no período de Setembro a Março, e é responsável por 80% da precipitação anual com o valor máximo em Janeiro (311 mm). Durante esses meses as chuvas são convectivas e causadas pela intensa evaporação de água. Essas chuvas ocorrem principalmente à tarde e início da noite, são localizadas e tem grande variabilidade espacial, a intensidade das chuvas varia de moderada a alta e têm curta duração. Na estação seca (Abril a Agosto) as médias mensais são inferiores a 100 mm e o mês mais seco é Agosto (33,55 mm). Neste período predominam as chuvas frontais, causadas pelo encontro de massas de ar secas e frias oriundas do sul com as massas de ar quentes e úmidas das regiões Amazônicas (MARTINS et al., 2018). Essas chuvas ocorrem em grandes áreas, tem intensidade baixa ou moderada e tendem a ser de longa duração (horas ou dias), dependendo da velocidade das frentes. Com relação à nebulosidade, os valores máximos ocorreram no verão. Janeiro é o mês mais nebuloso, devido à alta presença de nuvens característica do período. Como os meses de verão são quentes e úmidos, e a intensidade de nuvens no céu é alta, as horas de brilho solar são minimizadas. Nos meses de inverno, o número de dias com céu aberto é maior, conseqüentemente, maximizando o número de horas de brilho solar no período, com o máximo observado em Agosto.

3.2 Instrumentação e controle de qualidade dos dados

Neste estudo, as medidas da irradiância solar Global I_G foram obtidas por um piranômetro Eppley-PSP, a irradiância direta I_{DIR} na Normal por um pireliômetro Eppley-NIP acoplado a um rastreador solar ST-3; e a irradiância difusa I_{DIF} por um piranômetro sob a sombra de um disco de sombreamento com 5 cm de raio. A Estação Solar Radiométrica possui piranômetros extras que são utilizados na calibração anual dos sensores que realizam as medidas rotineiramente. A Figura 6 mostra os equipamentos que realizaram as medidas e a Tabela 1 informa as características operacionais dos equipamentos.

Figura 6 – a) Piranômetro; b) Pireliômetro c) Difusa com disco de sombreamento



Foto: Lenz (2019).



Tabela 1 - Características operacionais dos sensores das irradiâncias Global, Direta e Difusa.

Irradiância	Global	Direta	Difusa Disco
Sensor-Modelo	EppleyPrecisionSpectralpyr anometer	Eppley Normal IncidencePyrheli ometer	EppleyPrecisionSpectralPyr anometer
Sensibilidade	7,45 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$	7,59 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$	7,47 $\mu\text{V}/\text{Wm}^2$
Alcance Espectral	295-288nm	295-288nm	295-288nm
Tempo de resposta	1s	1s	1s
Linearidade	± 0.5 (de 0 a 2800 W/m^2)	± 0.5 (de 0 a 1400 W/m^2)	± 0.5 (de 0 a 2800 W/m^2)
Cosseno	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($0^\circ \leq Z < 80^\circ$)	-	$\pm 1\%$ ($0^\circ < Z < 70^\circ$) $\pm 3\%$ ($0^\circ \leq Z < 80^\circ$)
DependênciadaTemp eratura	$\pm 1\%$ (de -20 até +40°C)	$\pm 1\%$ (de -20 até +40°C)	$\pm 1\%$ (de-20até40°C)

Fonte: The Eppley Laboratory (<http://www.eppleylab.com>)

A I_{DIF} de referência, considerada a irradiância difusa verdadeira, foi calculada pela diferença entre as I_{G} e I_{DIR} na horizontal segundo a equação (3):

$$I_{\text{dREF}} = I_{\text{G}} - I_{\text{N}} \cdot \cos \theta_{\text{Z}} \quad (3)$$

Onde I_{dREF} é a irradiância difusa de referência (W/m^2), I_{G} é a irradiância global (W/m^2), I_{b} é a irradiância direta na normal (W/m^2) e θ_{Z} é o ângulo zenital (graus).

As correções para as diferentes coberturas do céu foram baseadas no índice de transmissividade atmosférica K_{t} . A transmissividade atmosférica é a razão entre as irradiâncias Global (I_{G}) e Extraterrestre (I_{o}) e representa a porcentagem do total da irradiância extraterrestre que atravessou a atmosfera e atingiu a superfície. As Eq. (4) e Eq. (5) mostram a transmissividade atmosférica e a irradiância extraterrestre (I_{o}), respectivamente.

$$K_{\text{T}} = \frac{I_{\text{G}}}{I_{\text{o}}} \quad (4)$$

$$I_{\text{o}} = 1367 \cdot E_{\text{0}} \cdot \cos(\theta_{\text{Z}}) \quad (5)$$

Sendo K_t a transmissividade atmosférica (adimensional, varia entre 0 e 1), I_G é a irradiância Global (W/m^2), E_o a excentricidade da órbita da terra (adimensional) e θ_z o ângulo Zênital (Graus). A transmissividade atmosférica K_t também foi utilizada para classificar a cobertura do céu segundo a metodologia sugerida por Escobedo (2009) conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da cobertura de céu e seus respectivos intervalos de K_t .

Intervalo de K_t	Cobertura de Céu
$0,00 \leq K_t < 0,35$	Nublado
$0,35 \leq K_t < 0,55$	Parcialmente Nublado
$0,55 \leq K_t < 0,65$	Parcialmente Aberto
$0,65 \leq K_t < 1,00$	Aberto

Um datalogger fabricado pela empresa Campbell Scientific modelo Cr23X foi utilizado para registrar e armazenar os dados das irradiâncias solares. As irradiâncias I_G , I_{DIF} e I_{DIR} são medidas a cada 5 segundos e ao fim de cada 5 minutos é calculada uma média e o valor é registrado. Todas as manhãs os valores foram coletados e transferidos para um computador através da utilização do módulo de memória SM-192.

Dos 201.842 pontos obtidos durante os quatro anos de medidas, 31.662 desses valores (15,7 % do total) foram removidos após a aplicação de filtros lógicos. Os valores que foram descartados apresentaram erros devido ao desalinhamento dos sensores, danos na fiação e quedas da eletricidade.

A avaliação das correções numéricas foi realizada pela utilização dos indicadores estatísticos MBE (mean bias error) e RMSE (root mean square error) segundo as eq. 5 e 6, respectivamente.

$$MBE = (\sum_i^N (y_i - x_i) / N) \quad (6)$$

$$RMSE = (\sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N)^{1/2} \quad (7)$$

Onde y_i é a irradiância difusa medida pelo método do disco de sombreamento I_{DIF_DISC} (W/m^2), x_i é a irradiância difusa de referência I_{DIF_REF} (W/m^2) e N o número de observações.

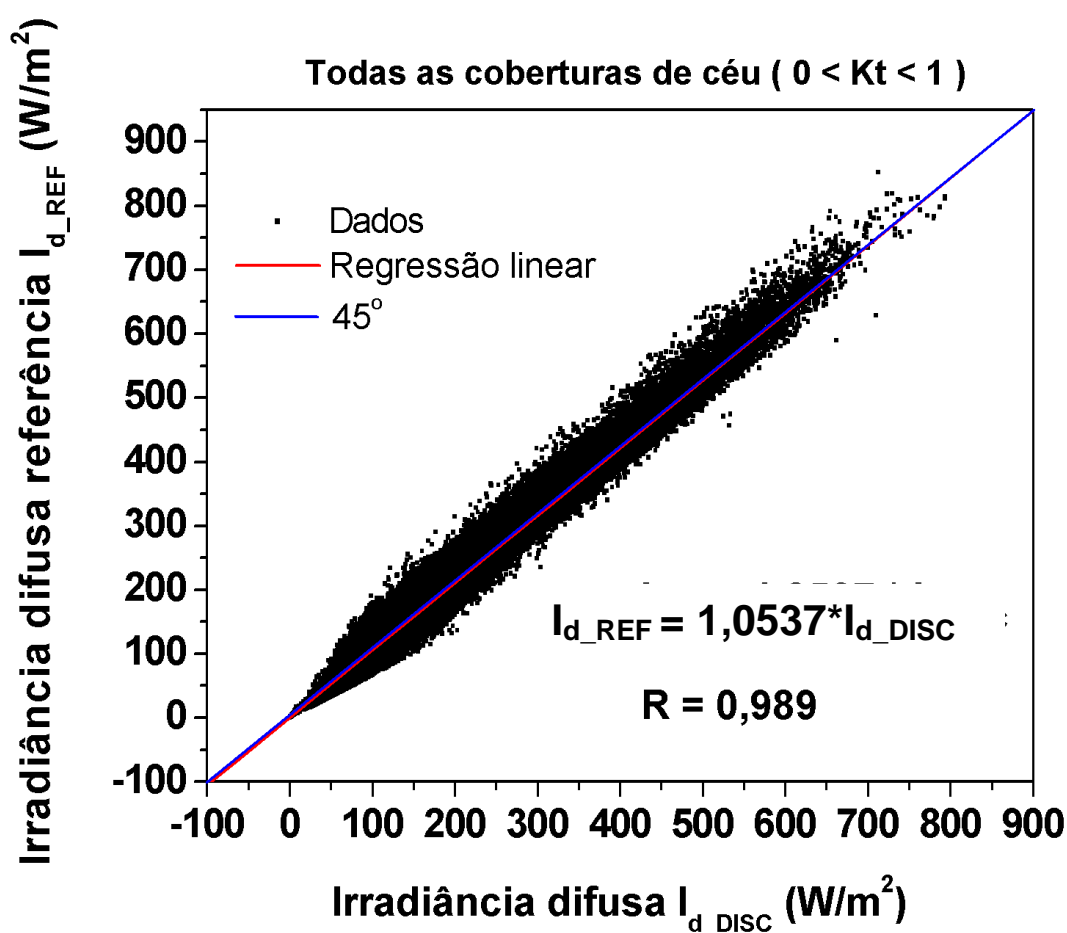
O indicador estatístico MBE avalia o desempenho do modelo em longo prazo. Valores positivos ou negativos representam superestimação ou subestimação. A desvantagem deste indicador é o fato de que valores superestimados e subestimados registrados em momentos diferentes são anulados. O RMSE por outro lado fornece informação sobre o desempenho do modelo em curto prazo devido a possibilidade de comparação de cada observação individualmente da diferença entre os valores observados e os valores estimados. Valores altos de RMSE representam grande espalhamento dos pontos enquanto valores baixos representam baixo espalhamento. As desvantagens desse indicador são eventuais pontos com erro que produzem um grande aumento no RMSE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Modelo para todas as coberturas de céu

Para quantificar o efeito do sombreamento promovido pelo disco sobre o sensor da irradiância solar difusa I_{DIF_DISC} , sua medida foi comparada com a irradiância solar difusa referência I_{DIF_REF} para uma base de dados de 4 anos e para todas as condições atmosféricas. A Figura 7 mostra a correlação entre as irradiâncias solares difusa referência e disco para todas as condições atmosféricas.

Figura 7 - Correlação entre as irradiâncias solares difusa referência e disco para todas as condições atmosféricas.



A linearidade apresentada na Figura 7 mostra correlação de 0,989 entre as duas irradiâncias solares difusa, permitindo a obtenção de sua regressão linear. No entanto, a dispersão dos pontos em torno da reta de regressão deve-se à partição

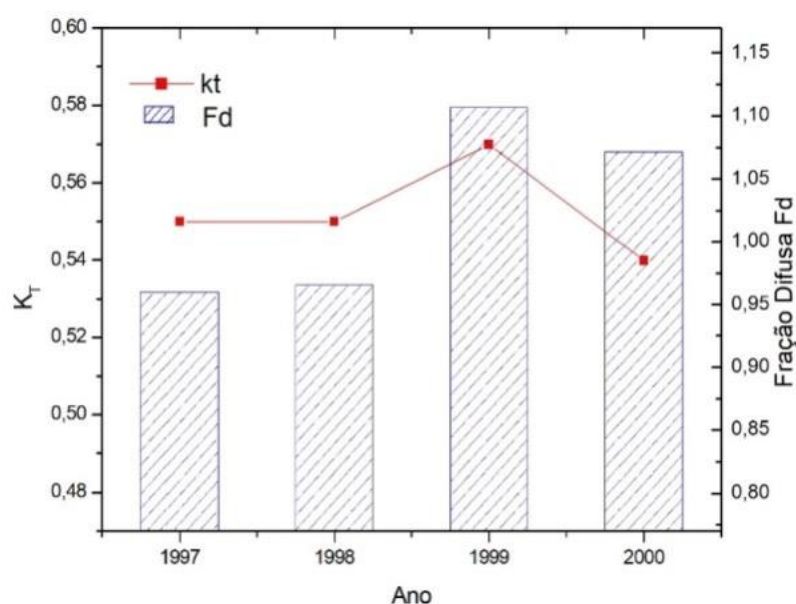
de tempo de 5 minutos. Em partições de tempo menores é possível verificar processos atmosféricos mais complexos, fruto da interação dinâmica da radiação com a atmosfera (LAW et al., 2014). A Equação (8) mostra a regressão linear entre as irradiancias solares difusa de referência e disco.

$$I_{DIF_REF} = 1,0537 I_{DIF_DISC} \quad (8)$$

Os valores efetivos das irradiancias solares I_{DIF_REF} e I_{DIF_DISC} ocorrem durante o fotoperíodo, ou seja, entre os horários do nascer e por do sol. No período noturno, esses valores são nulos e essa situação é contemplada ao se fazer passar a regressão linear pela origem, atribuindo valor zero para o coeficiente linear. Já o coeficiente angular obtido de 1,054 mostra, na média, que os níveis quantitativos válidos entre as duas irradiancias solares são diferentes. Para todas as condições atmosféricas, a I_{DIF_DISC} é 5,4% menor que a I_{DIF_REF} provavelmente devido ao sombreamento do sensor e à interação da radiação com a atmosfera (LIU, JORDAN, 1960). Portanto, como a medida da I_{DIF_DISC} é subestimada para todas as condições atmosféricas, seus valores necessitam, na média, da aplicação de uma correção de 5,4%.

Para verificar o efeito da atmosfera nessa correção, os dados foram separados por ano e foram calculados os valores médios da transmissividade atmosférica K_t e do fator de correção (razão entre as irradiancias solares I_{DIF_REF} e I_{DIF_DISC}). O K_t é a razão entre as irradiancias solares I_G e I_0 e expressa a interação da radiação com a distribuição e a concentração dos elementos constituintes da atmosfera. Valores próximos de 1 indicam uma alta transmissividade atmosférica, característicos de dias com baixa concentração de partículas e nebulosidade, enquanto que valores próximos de zero indicam baixa transmissividade atmosférica em função da elevada nebulosidade. A Figura 8 mostra os valores médio-anuais da transmissividade atmosférica K_t e do fator de correção para os anos de 1997, 1998, 1999 e 2000.

Figura 8 - Valores médio-anuais da transmissividade atmosférica K_T e do fator de correção para os anos de 1997 a 2000.



Pela Figura 8 é possível verificar que existe uma associação entre o K_t e o fator de correção. Nos anos de 1997 e 1998, tanto o K_t como o fator de correção não mostrou grandes variações em seus valores médio-anuais. Em 1999 verificou-se uma elevação no valor do K_t acompanhado de uma elevação no valor do fator de correção. Já em 2000, a queda verificada no K_t também foi acompanhada de uma queda no fator de correção, o que sugere a existência de uma dependência entre esses dois parâmetros. Portanto, o próximo tópico aborda como essa dependência afeta o fator de correção para diferentes intervalos de K_t .

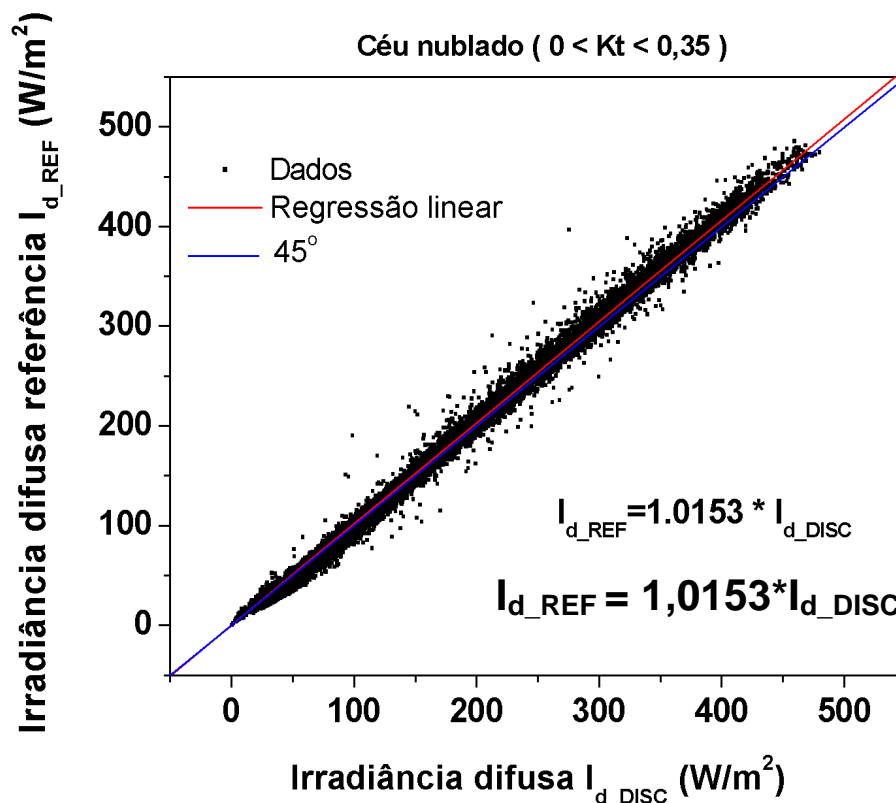
4.2 Modelos por Coberturas de céu

De acordo com o observado anteriormente, a correção na irradiância solar difusa medida com disco de sombreamento foi obtida para todas as condições atmosféricas segundo os intervalos de K_t . Porém, ao observar a Figura 8, fica claro que o fator de correção varia de acordo com a transmissividade atmosférica K_t . Portanto, com o objetivo de ajustar modelos mais precisos, os dados de I_{dif} foram agrupados em classes (Céu aberto, parcialmente aberto, parcialmente nublado e nublado), de acordo com o K_t .

4.3 Céu Nublado

Quando o valor do índice K_t obtido se encontra dentro do intervalo compreendido entre zero e 0,35, a radiação solar medida na superfície varia de zero a 35% do total incidindo no topo da atmosfera terrestre. Em outras palavras, pode-se dizer que a atmosfera bloqueia pelo menos 65% do total da irradiância que atinge o planeta. Isso ocorre devido à cobertura de nuvens no céu, que bloqueiam a irradiância solar. Os 35% ou menos da irradiância que não são barrados pela atmosfera, atingem a superfície terrestre predominantemente na forma de I_{DIF} após interagir com as nuvens e sofrer reflexão. A Figura 9 mostra a relação entre a I_{DIF_DISC} e a I_{DIF_REF} quando o céu estava nublado ($0,0 < K_t < 0,35$), segundo a classificação proposta por Escobedo (2009).

Figura 9 - Correlação entre as irradiâncias solares difusa referencia e disco para céu nublado.



Como ilustra a figura 9, em condições atmosféricas de céu nublado a I_{DIF_DISC} e a I_{DIF_REF} se comportam de forma linear com coeficiente angular de 1.015, 1,5% acima do ideal (45°), indicando que quando a irradiância predominante é a difusa (céu

nublado), o disco de sombreamento registra valores em média 1,5% menores que os reais, ou seja, o disco barra essa fração da irradiância difusa no momento da medida. A Equação 9 mostra o modelo obtido para condições de céu nublado.

$$I_{DIF_REF} = 1,0153 I_{DIF_DISC} \quad (9)$$

4.4 Céu Parcialmente Nublado e parcialmente aberto.

Quando os valores de K_t se encontram entre 0,35 e 0,65 o céu não pode ser considerada nem aberto nem nublado, então, de acordo com a classificação de cobertura de céu utilizada nesse trabalho, duas classificações são utilizadas: parcialmente aberto e parcialmente nublado. Nestas condições, existe presença representativa na composição da I_G tanto a I_{DIF} quanto a I_{DIR} sendo que no céu parcialmente nublado a I_{DIF} é mais presente que a I_{DIR} e no parcialmente aberto a I_{DIR} é mais presente que a I_{DIF} . A figura 10 e 11 mostra, respectivamente, a correlação entre a I_{DIF_REF} e a I_{DIF_DISC} para céus parcialmente nublados e parcialmente abertos.

Figura 10 - Correlação entre as irradiâncias solares difusa referencia e disco para céu parcialmente nublado.

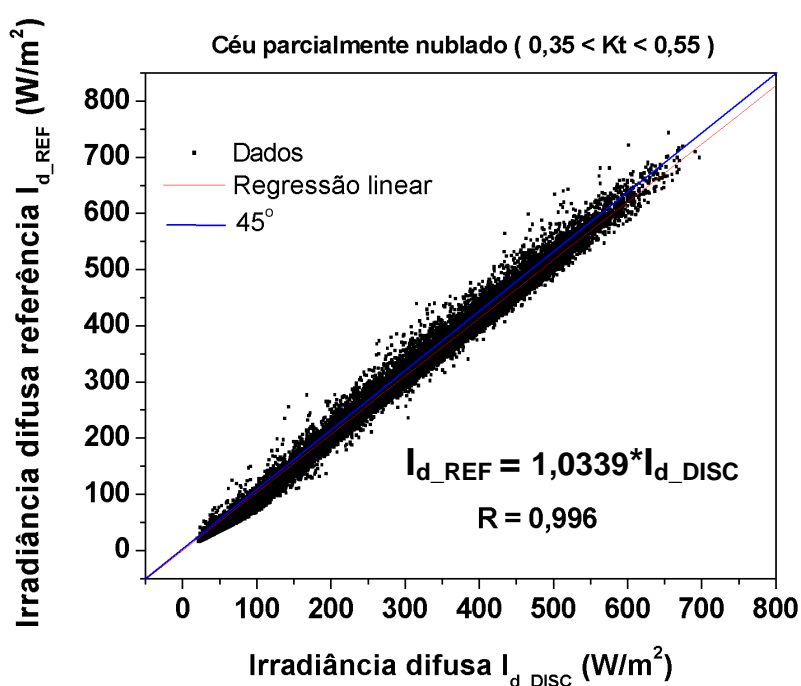
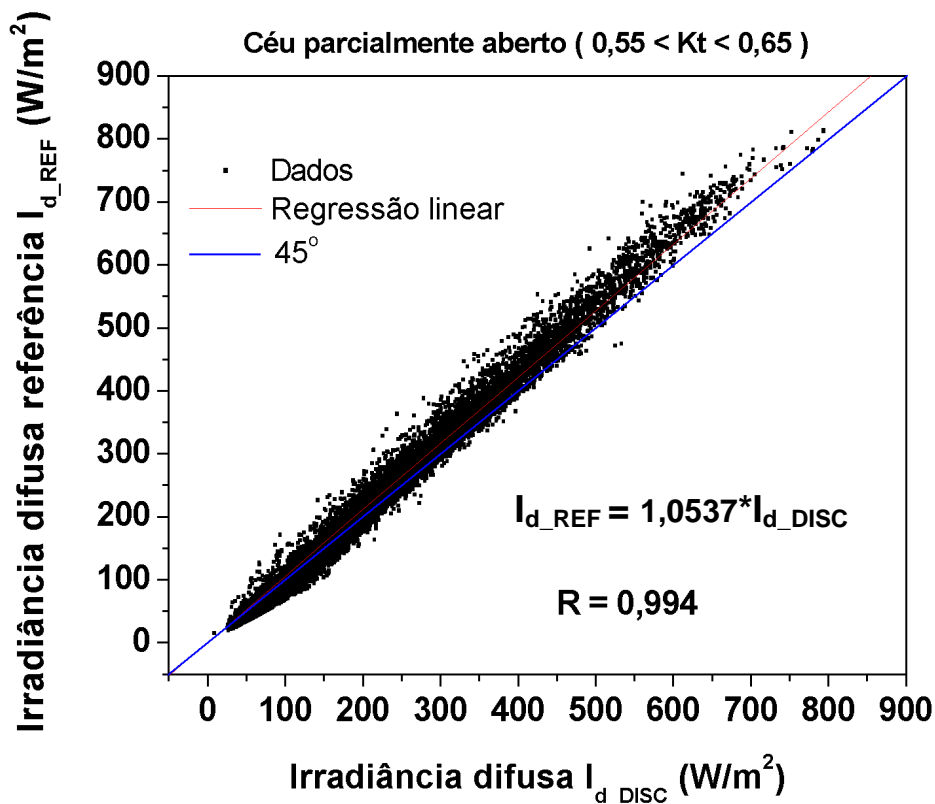


Figura 11 - Correlação entre as irradiancias solares difusa referencia e disco para céu parcialmente aberto.



Os modelos para céu parcialmente nublado e parcialmente aberto apresentaram correlação de 0,996 e 0,994 respectivamente e coeficiente angular de 1,0339 e 1,0537. As equações 10 e 11 mostram os modelos obtidos para céu parcialmente nublado e parcialmente aberto, respectivamente.

$$I_{DIF_REF} = 1,0339 I_{DIF_DISC} \quad (10)$$

$$I_{DIF_REF} = 1,0537 I_{DIF_DISC} \quad (11)$$

Ao observar os coeficientes angulares, nota-se a tendencia dos valores se afastarem da reta ideal de 45° conforme os valores de K_t se aproximam de 1 pois o modelo para céu parcialmente nublado ($0,35 < K_t < 0,55$) obteve o coeficiente angular de 1,0339 e o modelo de céu parcialmente aberto ($0,55 < K_t < 0,65$) obteve o coeficiente angular de 1,0537, maior que o do modelo parcialmente nublado e ambos maiores que o coeficiente angular do modelo de céu nublado ($0,35 < K_t <$

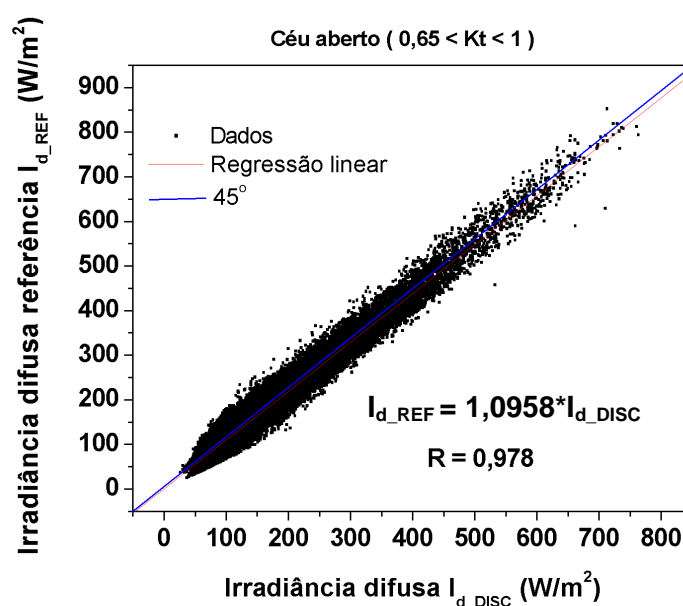
0,55) de 1,015, indicando que o disco de sombreamento tem um pior desempenho na medida da I_{DIF} conforme o K_t se aproxima de um. Nestas condições devido a pouca quantidade de nuvens, a irradiância no topo da atmosfera I_0 interage não com grandes moléculas de vapor de água que constituem as nuvens, mas com partículas diminutas de aerossóis e materiais particulados suspensos, que devido ao tamanho, causam a reflexão anisotrópica da radiação solar.

4.5 Céu Aberto

Quando o céu está aberto, o valor de K_t se encontra no intervalo entre 0,65 e 1. Isso representa uma situação onde mais que 65% da I_0 atinge a superfície terrestre. Nestas condições, o céu apresenta baixa incidência de nuvens ou ausência total, porém ainda existe a presença da I_{DIF} .

A presença da I_{DIF} quando não há nuvens no céu pode ser explicada através da constatação de que a irradiância solar além de interagir com vapor de água, sendo refletida de forma isotrópica pode interagir com partículas ainda menores, como aerossóis e poeira, refletindo de forma anisotrópica, ou seja, predominantemente na direção do feixe de luz. A figura 12 mostra correlação entre a I_{DIF_REF} e a I_{DIF_DISC} para valores de K_t acima de 0,65.

Figura 12 - Correlação entre as irradiâncias solares difusa referencia e disco para céu aberto.



Em condições atmosféricas de céu aberto, o modelo apresentou o maior desvio do coeficiente angular ideal, com um valor de 1,0958 e correlação de 0,978. A equação 12 mostra o modelo obtido para condições de céu aberto.

$$I_{DIF_REF} = 1,0958 I_{DIF_DISC} \quad (12)$$

As medidas obtidas pelo método do disco de sombreamento foram em média 9,6% subestimadas em relação a medida da I_{DIF_REF} . Este fato indica que o disco de sombreamento ao mesmo tempo que bloqueia a I_D bloqueia também a irradiância I_{DIF} que chega na mesma direção, e que no caso de céus abertos é difundida predominantemente de forma anisotrópica e chega em maior quantidade na mesma direção da I_D .

4.6 Validação

Com a finalidade de avaliar o desempenho dos modelos obtidos através da correlação da I_{DIF_REF} com a I_{DIF_DISC} , para todas as coberturas de céu e para as diferentes coberturas de céu, foram utilizados os indicadores estatísticos MBE e RMSE. A Tabela 3 mostra o MBE e RMSE obtidos após a aplicação da correção na I_{DIF_DISC} para todas as coberturas de céu e para as quatro coberturas de céu separadamente: céu nublado, céu parcialmente nublado, céu parcialmente aberto e céu aberto em relação à I_{DIF_REF} .

Tabela 3 - MBE e RMSE dos modelos para todas as coberturas de céu, para céu nublado, para céu parcialmente nublado, para céu parcialmente aberto e para céu aberto

Modelo	MBE	MBE (%)	RMSE	RMSE (%)
Sem correção	-8,84228	-4,6416	23,29793	12,22984
Todas as coberturas de céu	0,90732	0,47628	20,03711	10,51814
Diferentes coberturas de céu	1,62382	0,8524	18,88853	9,9152

Ao observar a tabela 3 nota-se que o modelo com melhor desempenho em relação ao MBE foi o modelo para todas as coberturas de céu com um valor de de 0,9, superestimando em média a I_{DIF_REF} em 0,476%, o MBE obtido para o modelo utilizando as correções para as diferentes coberturas de céu foi de 1,62, superestimando a I_{DIF_REF} em 0,85. Ambos os modelos apresentaram uma melhora

significativa na estimativa da I_{DIF_DISC} se comparado à sua medida sem correção, que subestima a I_{DIF_REF} em 4,64%. Em relação ao RMSE o modelo com a I_{DIF_DISC} corrigida em função das diferentes coberturas de céu apresentou melhor desempenho, com um valor de RMSE de 9,91% e o modelo para todas as coberturas de céu que teve o RMSE de 10,51%. A Figura 13 mostra o MBE em % dos diferentes modelos enquanto a Figura 14 mostra o RMSE em % dos diferentes modelos.

Figura 13 - MBE em % dos diferentes modelos

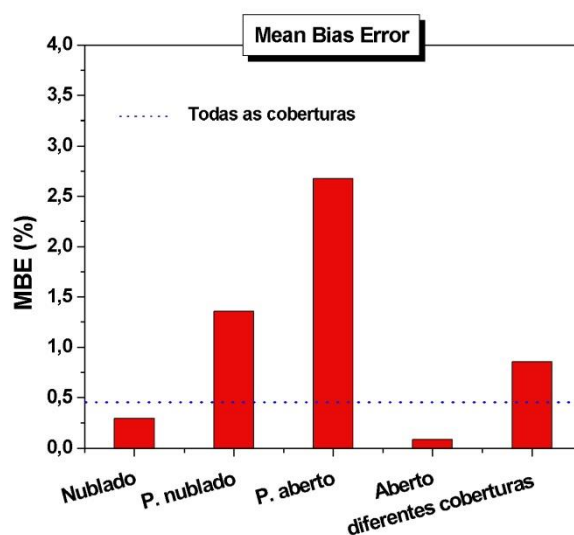
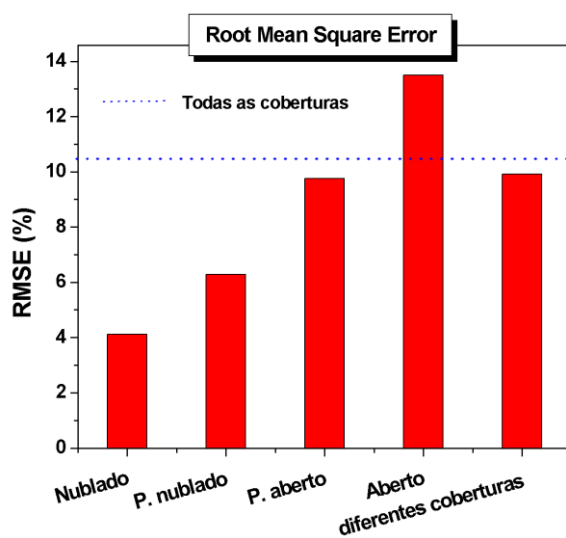
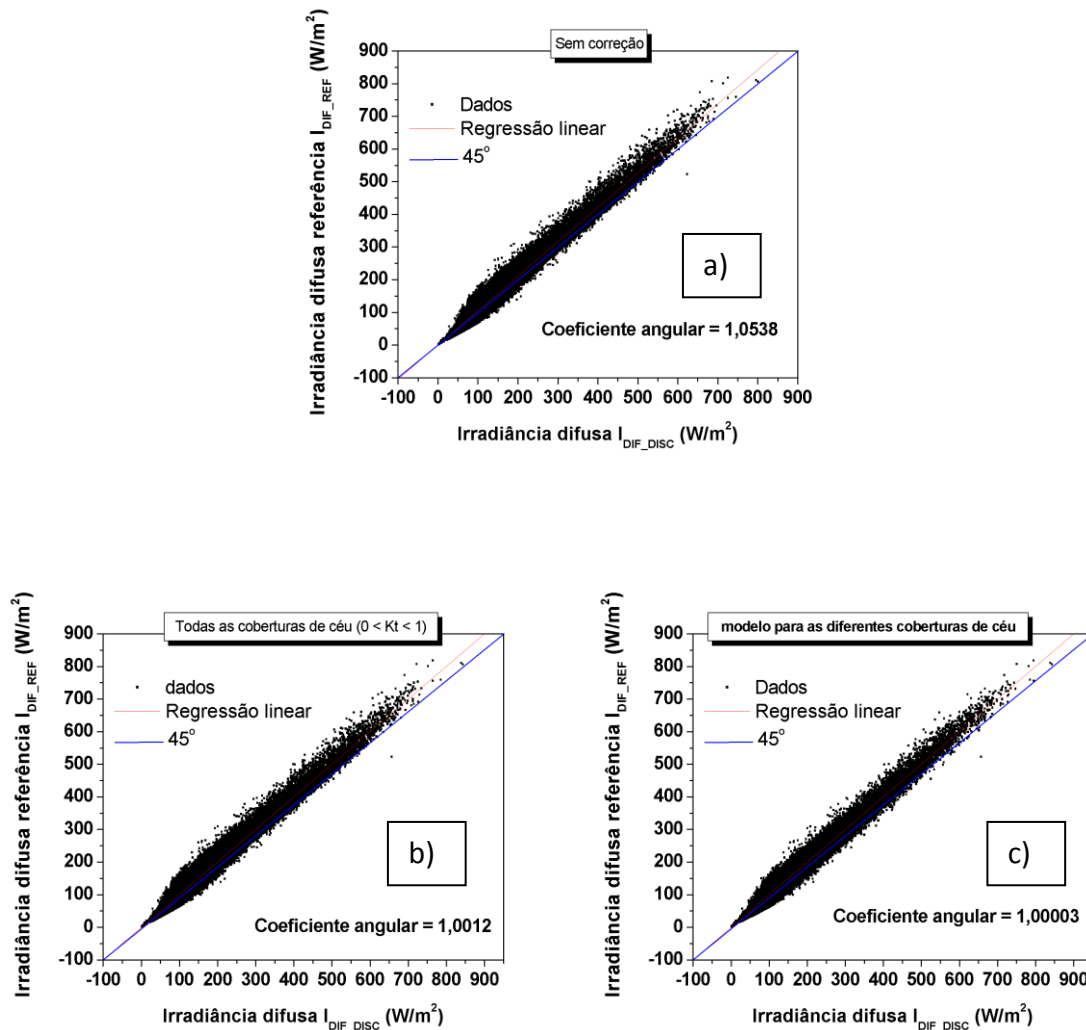


Figura 14 - RMSE em % dos diferentes modelos



A Figura 15 mostra a correlação entre a I_{DIF_REF} e a I_{DIF_DISC} não corrigida (a), corrigida com o modelo para todas as coberturas de céu (b) e corrigida com o modelo para as diferentes coberturas de céu (c).

Figura 15 - Correlação entre a I_{DIF_REF} e a I_{DIF_DISC} não corrigida (a), corrigida com o modelo para todas as coberturas de céu (b) e corrigida com o modelo para as diferentes coberturas de céu (c).



De acordo com o observado na figura 15, os modelos para todas as coberturas de céu (a) e para as diferentes coberturas de céu (b) aproximaram a I_{DIF_DISC} da I_{DIF_REF} e melhoraram a precisão da medida se comparada à medida sem correção.

5 CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados obtidos é possível concluir que:

- 1 - A medida da I_{DIF_DISC} subestima a I_{DIF_REF} e é sensível à interação da I_G com os constituintes atmosféricos.
- 2 - Em condições atmosféricas de céu aberto ($K_t > 0,65$), a medida da I_{DIF_DISC} sem correção teve seu pior desempenho.
- 3 - Em condições atmosféricas de céu nublado ($K_t < 0,35$), a medida da I_{DIF_DISC} sem correção é mais próxima da I_{DIF_REF} comparado a outras situações de cobertura de céu.
- 4 - Ambos os modelos sugeridos (modelo para todas as coberturas de céu e modelo para as diferentes coberturas de céu) melhoraram a medida da I_{DIF_DISC} .
- 5 – Após corrigida pelo modelo para todas as coberturas de céu, a medida da I_{DIF_DISC} obteve um MBE de 0,48% e um RMSE de 10,52% quando comparada com a I_{DIF_REF} .
- 6 – Após corrigida pelo modelo para as diferentes coberturas de céu, a medida da I_{DIF_DISC} obteve um MBE de 0,85%, e um RMSE de 9,91% quando comparada com a I_{DIF_REF} .

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, L. J.G., COSTA, J. M. N., FISCHER, G. R., AGUIAR, R. G., COSTA, A. C. L. FERREIRA, W. P. M. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em área de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 215-224, 2011.
- ALI, M.; JAMIL, B.; FAKHRUDDIN. Estimating diffuse solar radiation in India: performance characterization of generalized single-input empirical models. **UrbanClimate**, v. 27, n. August 2018, p. 314–350, 2019.
- BLANC, P.; ESPINAR, B.; GEUDER, N.; et al. Direct normal irradiance related definitions and applications: The circumsolar issue. **Solar Energy**, 2014.
- CAMPANHA, M. M.; SANTOS, R. H. S.; FREITAS, G. B.; MATINEZ, E. P.; JARAMILLO-BOTERO, C.; GARCIA, S. L. Análise comparativa das características da serrapilheira do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e monocultura, na Zona da Mata MG. *Revista Árvore*, Viçosa, 31 (5), 805 – 812, 2007.
- CAO, F.; LI, H.; YANG, T.; et al. Evaluation of diffuse solar radiation models in Northern China: New model establishment and radiation sources comparison. **Renewable Energy**, v. 103, p. 708–720, 2017.
- CARROLL, J. J. Global transmissivity and diffuse fraction of solar radiation for clear and cloudy skies as measured and as predicted by bulk transmissivity models. **Solar Energy**, v. 35, n. 2, p. 105–118, 1985.
- CHAVES, M. A.; ESCOBEDO, J. F. A software to process daily solar radiation data. **Renewable Energy**, v. 19, p. 339-344, 2000.
- CHEN, J. L.; HE, L.; CHEN, Q.; et al. Study of monthly mean daily diffuse and direct beam radiation estimation with MODIS atmospheric product. **Renewable Energy**, v. 132, p. 221–232, 2019.
- CHUNG, K. M.; CHEN, C. C.; CHANG, K. C. Effect of diffuse solar radiation on the thermal performance of solar collectors. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 12, n. October, p. 759–764, 2018.
- CIALDEA, R. Unnuovo tipo di pireliometro di Angstrom a compensazione elettrica. **Annals of Geophysics**, v. 1, n. 1, p. 69–79, 1948.
- COOPER, P. I. THE ABSORPTION OF RADIATION IN SOLAR STILL. **Solar Energy**, v. 2, p. 333–346, 1968.
- 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**. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

[a] DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; PAI, E. D.; DOS SANTOS, C. M. Estimation of hourly, daily and monthly mean diffuse radiation based on MEO shadowing correction. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1150–1159, 2014.

[b] DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; MARTINS, D.; TERAMOTO, É. T. Analysis of hourly global, direct and diffuse solar radiations attenuation as a function of optical air mass. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1060–1069, 2014.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; et al. MEO shadowing method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, 2016.

DONOHUE, A.; BATTISTI, D. S. Atmospheric and surface contributions to planetary albedo. **Journal of Climate**, v. 24, n. 16, p. 4402–4418, 2011.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v.7, p.413-36, 1956.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. 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, n. 3, p. 299–309, 2009.

GU, L.; BALDOCCHI, D.; VERMA, S. B.; et al. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 107, n. 5–6, 2002.

HART, M. H. The evolution of the atmosphere of the earth. **Icarus**, v. 33, n. 1, p. 23–39, 1978.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. Academic Press, New York, p. 390, 1983.

JACOVIDES, C. P.; TYMVIOS, F. S.; ASSIMAKOPOULOS, V. D.; KALTSOUNIDES, N. A. Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. **Renewable Energy**, v. 31, n. 15, p. 2492–2504, 2006.

JOURNÉE, M.; BERTRAND, C. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. **Solar Energy**, v. 85, n. 1, p. 72–86, 2011.

KHORASANIZADEH, H.; MOHAMMADI, K. Diffuse solar radiation on a horizontal surface: Reviewing and categorizing the empirical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 338–362, 2016.

KING, D. A.; BACHELET, D. M.; SYMSTAD, A. J.; FERSCHWEILER, K.; HOBBS, M. Estimation of potential evapotranspiration from extraterrestrial radiation, air temperature and humidity to assess future climate change effects on the vegetation of the Northern Great Plains, USA. **Ecological Modelling**, v. 297, p. 86–97, 2015.

KNOHL, A.; BALDOCCHI, D. D. Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 113, n. 2, p. 1–17, 2008.

LI, D. H. W.; LOU, S. W.; LAM, J. C. An Analysis of Global, Direct and Diffuse Solar Radiation. **Energy Procedia**, v. 75, p. 388–393, 2015.

MANCUSO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; PERDONÁ, M. J. Produção De Café Sombreado. **Colloquium Agrariae**, v. 9, n. 1, p. 31–44, 2013.

MANJU, S.; SANDEEP, M. Prediction and performance assessment of global solar radiation in Indian cities: A comparison of satellite and surface measured data. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 116–128, 2019.

MARTINS, V. S.; NOVO, E. M. L. M.; LYAPUSTIN, A.; et al. Seasonal and interannual assessment of cloud cover and atmospheric constituents across the Amazon (2000–2015): Insights for remote sensing and climate analysis. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 145, n. October 2017, p. 309–327, 2018.

MEDUGU, D. W.; BURARI, F. W.; ABDULAZEEZ, A. A. Construction of a reliable model pyranometer for irradiance measurements. **African Journal of Biotechnology**, 2010.

MELO, J. M. D., ESCOBEDO, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: ENERGIAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, Vigo, Espanha. Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY, v. 1, 1994.

MÖLLER, M.; COHEN, S.; PIRKNER, M.; ISRAELI, Y.; TANNY, J. Transmission of short-wave radiation by agricultural screens. **Biosystems Engineering**, v. 107, n. 4, p. 317–327, 2010.

MORADI, I. Quality control of global solar radiation using sunshine duration hours. **Energy**, v. 34, n. 1, p. 1–6, 2009.

MYERS, D. R. Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: Data and model quality. **Energy**, v. 30, n. 9 SPEC. ISS., p. 1517–1531, 2005.

PADOVAN, A.; DEL COL, D. Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes. **Solar Energy**, v. 84, n. 12, p. 2068–2084, 2010.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2 ed., São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.

REDWEIK, P.; CATITA, C.; BRITO, M. Solar energy potential on roofs and facades in an urban landscape. **Solar Energy**, v. 97, p. 332–341, 2013.

ROBINSON, H., STOCH, L. Sky radiation and measurements and corrections. **Journal of Applied Meteorology**, v.3, p.179-81, 1964.

ROSSI, T. J.; ESCOBEDO, J. F.; DOS SANTOS, C. M.; et al. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. October 2017, p. 448–459, 2018.

RUDDIMAN, W.F. Earth's Climate: Past and Future. **W.H. Freeman**, New York, p. 388, 2008.

THOMALLA, E.; KÖPKE, P.; MÜLLER, H.; QUENZEL, H. Circumsolar radiation calculated for various atmospheric conditions. **Solar Energy**, 1983.

THORIN, E. Basics of Energy. *In: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier Inc., 2014.

VAREJÃO-SILVA, M.A. Meteorologia e climatologia. **INMET**, Brasília, p. 463, 2006.

WANG, H.; SUN, F.; WANG, T.; LIU, W. Estimation of daily and monthly diffuse radiation from measurements of global solar radiation a case study across China. **Renewable Energy**, v. 126, p. 226–241, 2018.

XU, Y.; XUAN, Y. Photon management of full-spectrum solar energy through integrated honeycomb/cone nanostructures. **Optics Communications**, v. 430, p. 440–449, 2019.