

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
AMBIENTAL**

**RADIAÇÃO DIFUSA HORÁRIA NA TRANSIÇÃO
CERRADO-AMAZÔNIA**

TAMARA ZAMADEI

PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA

**Sinop, MT
Julho/2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA
AMBIENTAL**

**RADIAÇÃO DIFUSA HORÁRIA NA TRANSIÇÃO
CERRADO-AMAZÔNIA**

TAMARA ZAMADEI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Física Ambiental.

PROF. DR. ADILSON PACHECO DE SOUZA

**Sinop, MT
Julho/2019**

DEDICO

*Aos meus pais,
Agostinho e Assunta Zamadei,
por possibilitarem a
conquista deste título.
À minha querida irmã, Taiane Zamadei,
pelo apoio e amor incondicional.
Ao meu amado, Alef B. Rodrigues,
pela força nos momentos
mais difíceis desta caminhada.*

Poema al sol

*Oh, girasol vidente,
oh semilla amarilla,
tu nombre cabe en una sílaba, dijo el poeta*

*Oh, padre de las mitologías,
el sueño de la luz produce formas,
dijo el pintor*

[...]

*La enciclopedia del Sol es mi libro de cabecera,
la enciclopedia del Sol es un ojo que brilla
a través de las tapas cerradas, dijo el pintor*

*En los rincones de mi biblioteca,
oculto entre miles de palabras,
el poema del Sol está brillando, dijo el poeta
[...]*

*Oh, sílaba amarilla,
Oh, girasol vidente,
dijo el poeta ~*

(Homero Aridjis)

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser Pai e ter me dado forças para prosseguir e acreditar que Seus planos são maiores que os meus.

Aos meus amigos e familiares que entenderam minha ausência nestes longos anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Adilson Pacheco de Souza, por ter confiado na minha capacidade e não me abandonado nos percalços desta caminhada.

Ao Grupo de Pesquisa Ambiente e Planta, pela amizade, companheirismo e auxílio. Em especial aos colegas pesquisadores do mestrado e doutorado que compartilharam comigo alegrias e tristezas.

Aos professores e colegas do PGFA por terem se tornado minha família durante o período que residi em Cuiabá.

À minha amiga irmã Soliane Huber, pelo incentivo constante e laço duradouro em mais uma das etapas da minha vida.

Aos meus amigos Tatiana C. Dias e Rafael Menon, presentes da pós-graduação, que mesmo distantes se fizeram próximos e compartilharam comigo esta fase, com conselhos e palavras de apoio.

À Universidade Federal de Mato Grosso, *Campus* Sinop, a qual me considero filha, e que se tornou minha segunda casa desde 2008.

A todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a minha formação e a consolidação deste estudo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMÁTICA	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVOS	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 RADIAÇÃO SOLAR.....	5
2.2 RADIAÇÃO DIFUSA.....	7
2.2.1 Frações radiométricas.....	9
2.2.2 Medidas e correções da radiação difusa.....	12
2.2.3 Modelos de estimativa da radiação difusa	15
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 LOCALIZAÇÃO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	22
3.2 INSTRUMENTAÇÃO	24
3.3 TRATAMENTO DA BASE DE DADOS	25
3.4 MODELOS DE ESTIMATIVA E INDICATIVOS ESTATÍSTICOS	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO OBSERVACIONAL.....	33
4.2 MODELAGEM E ESTIMATIVA	39
5 CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Demonstração dos padrões angulares do espalhamento da luz visível (0,5 μ m) em função do diâmetro da partícula: a) 10 ⁻⁴ μ m; b) 0,1 μ m e c) 1,0 μ m. (Fonte: LIOU, 2002).....	8
Figura 2. Esquema do anel de sombreamento Melo-Escobedo (MEO) (Fonte: DAL PAI, 2005).....	13
Figura 3. Mapa de localização da Estação Meteorológica Automática da UFMT, Campus Sinop.	22
Figura 4. Valores médios mensais da precipitação (A), da temperatura e umidade relativa do ar (B), insolação (C) e focos de calor (D) coletados na EMA Sinop (2011-2016) e as normais climatológicas da Gleba Celeste (1972-2010). (Fonte: INMET, 2016).	24
Figura 5. Anel de sombreamento MEO (MELO, 1994) instalado na Estação Meteorológica Automática da UFMT, Campus Universitário de Sinop.....	25
Figura 6. Evolução diurna anual da radiação extraterrestre (H_0^h), global (H_G^h) e difusa (H_{DF}^h), e respectivos desvios-padrão para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.	33
Figura 7. Evolução diurna sazonal da radiação no topo da atmosfera (H_0^h), global (H_G^h) e difusa (H_{DF}^h), e respectivos desvios-padrão para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.	34
Figura 8. Evolução diurna sazonal da radiação difusa (H_{DF}^h) e respectivos desvios-padrão para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.	35
Figura 9. Evolução diurna anual de K_T^h , K_d^h e $K_{d'}^h$, para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.	36
Figura 10. Evolução diurna sazonal de K_T^h , K_d^h e $K_{d'}^h$, na região de Sinop-MT, para as quatro estações hídricas.....	37
Figura 11. Correlação $K_d^h \times K_T^h$ para a cidade de Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.....	39
Figura 12. Correlação $K_d^h \times K_T^h$ sazonal para a cidade de Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.....	40
Figura 13. Equação anual gerada para a correlação $K_d^h \times K_T^h$, Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.....	41

Figura 14. Equações sazonais geradas através da correlação K_d^h x K_T^h , Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Transmissividade em condições de céu nublado (com diferentes tipos de nuvens) em relação ao céu claro.	11
Tabela 2. Valores dos coeficientes a, b, c, d para latitudes dentre 20 e 45° Sul.	19
Tabela 3. Fatores de correção anisotrópica para radiação difusa pelo método anel de sombreamento MEO.	26
Tabela 4. Valores médios mensais de variáveis meteorológicas da região Médio-Norte de Mato Grosso (base de dados da Estação Gleba Celeste em Vera/MT – latitude -12,29°; longitude -55,29°), de 1972 a 2010).	27
Tabela 5. Descrição dos modelos de estimativa da radiação difusa horária utilizados neste estudo.	29
Tabela 6. Valores médios horários de H_0^h , H_G^h e H_{DF}^h e das frações radiométricas K_T^h , K_d^h e K_d^h , ao meio dia solar nas diferentes estações hídricas, para Sinop/MT dentre 2011 e 2016.	38
Tabela 7. Frequências das condições de céu (base horária) de acordo com a classificação de Escobedo et al. (2009) em Sinop –MT, dentre 2011 e 2016.	39
Tabela 8. Coeficientes de regressão das equações de estimativa da radiação solar difusa horária, para a região de Sinop-MT, geradas através da correlação $K_d^h \times K_T^h$	42
Tabela 9. Modelos de estimativa da radiação solar difusa horária, para a região de Sinop-MT, gerados através da correlação $K_d^h \times K_T^h$, na base anual.	43
Tabela 10. Indicativos estatísticos das equações de estimativa da radiação solar difusa horária, para a região de Sinop-MT, geradas através da correlação $K_d^h \times K_T^h$, em diferentes intervalos.	44
Tabela 11. Indicativos estatísticos de desempenho dos modelos de estimativa da radiação difusa horária aplicados para dados do município de Sinop-MT, dentre 2011 e 2016.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

I_{SC}	constante solar
H_{SC}	constante solar horária ($4.921 \text{ KJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
δ	declinação solar
ϕ	latitude local
ω	ângulo horário
Θ_Z	ângulo zenital
h	ângulo de elevação solar
FC	fator de correção
H_0^h	Irradiação no topo da atmosfera horária na superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
H_G^h	Irradiação global horária na superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
H_{DF}^h	Irradiação difusa horária na superfície horizontal ($\text{MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)
K_T^h	Fração global horária da radiação no topo da atmosfera (coeficiente de transmissividade) horizontal
K_d^h	Fração difusa da radiação global horária horizontal
$K_d^{h'}$	Fração difusa da radiação no topo da atmosfera horária horizontal

RESUMO

O conhecimento acerca dos níveis energéticos incidentes na superfície terrestre é essencial para os mais diversos fins em variadas áreas, como ambiental, agrícola, engenharia civil e arquitetura, dentre outras. O ecótono Cerrado-Amazônia no Estado de Mato Grosso, intensamente alterado antropicamente, ainda é desconhecido em termos de entendimento dos processos de conversão energética e balanço de energia, tornando o monitoramento e modelagem da radiação difusa essenciais nessa área. Em vista disso, o objetivo deste estudo foi analisar e modelar a radiação difusa horária incidente na horizontal na transição Cerrado-Amazônia Mato-Grossense. Para tal, foram obtidas medidas horárias da base de dados da Estação Meteorológica Automática da Universidade Federal de Mato Grosso, *Campus Sinop* (latitude -11,864°, longitude -55,485°, altitude 371m), entre junho de 2011 e outubro de 2016. As radiações global e difusa foram monitoradas por piranômetros posicionados sobre um anel de sombreamento modelo Melo-Escobedo. A estes dados foram aplicadas correções geométricas, astronômicas e anisotrópicas, sendo posteriormente geradas equações de estimativa nas bases anual e sazonal, em diferentes intervalos do coeficiente de transmissividade atmosférica (K_T^h). Além disso, foram avaliados 19 modelos para estimativa da fração difusa (K_d^h) descritos na literatura, subdivididos em 45 equações. O comportamento exibido pela radiação difusa foi similar ao da radiação global e no topo da atmosfera, com valores máximos ao meio dia solar. A sazonalidade é marcante, influenciando os valores da radiação difusa e também de suas frações radiométricas. Em todas as estações hídricas o céu apresentou-se nublado no início da manhã, com redução do K_T ao final do dia, exceto na época seca, devido aos baixos valores do ângulo de elevação solar. A correlação $K_d^h \times K_T^h$ estabelecida apresentou comportamento peculiar, com amplitude da curva característica de regiões localizadas em baixas latitudes (mais próximas do Equador). Os valores máximos observados para K_d^h foram de 0,8 a 0,9 na faixa de K_T^h inferior a 0,2. As equações de estimativa geradas tenderam a subestimar os valores da radiação difusa, com melhor desempenho apresentado pelos modelos anuais. Dentre os modelos de estimativa da radiação difusa avaliados, aqueles gerados neste estudo, em conjunto com os desenvolvidos para regiões tropicais, apresentaram melhor desempenho frente aos demais, o que confirma a influência da latitude nos níveis energéticos da radiação difusa.

Palavras-chave: coeficiente de transmissividade atmosférica; frações radiométricas; modelos de estimativa; cobertura de céu.

ABSTRACT

Knowledge about energy levels incident on the Earth's surface is essential for a wide range of purposes in a variety of areas, such as environmental, agricultural, civil engineering and architecture, among others. The ecotone Cerrado-Amazon in the state of Mato Grosso, intensely anthropically modified, is still unknown in terms of understanding the processes of energy conversion and energy balance, making the monitoring and modeling of diffuse radiation essential in this area. In view of this, the objective of this study was to analyze and model the hourly solar diffuse radiation on horizontal in the Mato-Grossense Cerrado-Amazon transition. For that, hourly measurements were obtained from the database of the Automatic Weather Station of the Federal University of Mato Grosso, Campus Sinop (-11.864°; -55.485°; 371m), between June 2011 and October 2016. The global and diffuse radiation was monitored by pyranometers positioned on a Melo-Escobedo shadow ring. Geometric, astronomical and anisotropic corrections were applied to these data; annual and seasonal estimation equations were generated at different intervals of the atmospheric transmissivity coefficient (K_T^h). In addition, it was evaluated 18 models of estimating the diffuse fraction (K_d^h) described in the literature, subdivided into 45 equations. The behavior exhibited by diffuse radiation was similar to that of the global and at the top of the atmosphere radiation, with maximum values at noon. The seasonality is striking, influencing the values of the diffuse radiation and also of its radiometric fractions. In all the seasons the sky was cloudy in the early morning, with K_T reduction at the end of the day, except in the dry season, due to the low values of the solar elevation angle. The established correlation $K_d^h \times K_T^h$ presented a peculiar behavior, with the curve amplitude characteristic of regions located in low latitudes (closer to the Equator). The maximum values observed for K_d^h were 0.8 to 0.9 in the range of K_T less than 0.2. The generated estimation equations tended to underestimate the values of the diffuse radiation, with better performance being presented by the annual models. Among the models of estimation evaluated, those generated in this study, together with those developed for tropical regions, presented better performance than the others, which confirms the influence of latitude on energy levels of diffuse radiation.

Keywords: clearness index; radiometric fractions; estimative models; sky cover.

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

A radiação solar é fonte primordial para a vida na Terra, integra/rege diversos processos físicos, químicos e biológicos, sendo um dos fatores determinantes do tempo e do clima. Seu conhecimento é aplicado em diversas áreas de estudo, como meteorologia, engenharia civil, ciências ambientais e agrícolas, o que torna seu monitoramento essencial.

Esforços vêm sendo realizados para o estabelecimento de uma rede solarimétrica no país com medidas de superfície para as mais variadas aplicações. Todavia, a falta de mão-de-obra qualificada e o alto custo de aquisição e manutenção dos sensores, especialmente os que registram as componentes difusa e direta da radiação global, faz com que o monitoramento seja realizado apenas em centros de observações e estudos, como universidades e institutos de pesquisa.

Uma alternativa econômica à mensuração dessas componentes, oriundas da atenuação atmosférica, é a utilização de anéis de sombreamento, que propiciam a quantificação dos diferentes níveis energéticos. Desta forma, obtêm-se os valores de radiação difusa utilizando um piranômetro posicionado sob um anel, sendo a componente direta obtida pelo método da diferença.

O anel de sombreamento Melo-Escobedo (MEO) é uma montagem com operação manual, na qual o anel mantém-se fixo e inclinado com ângulo igual à latitude local, e o piranômetro instalado numa base móvel translada paralelamente ao plano do horizonte, necessitando ajustes periódicos para permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel. É um equipamento de baixo custo, que pode ser construído sem necessidade de importação de materiais (MELO, 1994).

Independentemente do tipo de anel de sombreamento utilizado, parte da radiação difusa também é bloqueada, levando à necessidade do uso de fatores de correção. A validação dos fatores de correção da radiação solar difusa medida pelo anel de sombreamento MEO já foi estabelecida para outras localidades brasileiras, bem como as suas modelagens nas partições horária e diária, permitindo a criação de uma base de dados confiável para a região estudada, além de possibilitar o

conhecimento dos níveis energéticos em localidades próximas que não dispõem de equipamentos específicos.

Adicionalmente, os modelos de estimativa das componentes da radiação solar também merecem destaque especial, pois a maioria das estações meteorológicas mede apenas a radiação global em superfícies horizontais. Para estimativa da radiação difusa, comumente correlaciona-se as frações radiométricas K_d e K_d' ao coeficiente de transmissividade atmosférica (K_T) e à razão de insolação (n/N), em diferentes partições temporais.

1.2 JUSTIFICATIVA

Desde a Revolução Industrial o homem vem modificando intensamente o meio em que vive, acarretando danos ambientais em âmbito global. Atualmente busca-se entender a que níveis essas alterações afetam o meio ambiente e quais as alternativas para frear a degradação ambiental.

Atividades que ocasionam poluição atmosférica, como queima de combustíveis fósseis e alterações no uso e ocupação do solo, aumentam a quantidade de aerossóis em suspensão, interferindo na passagem da radiação solar e, conseqüentemente, nos mais diversos processos que são dependentes dessa disponibilidade energética.

Em virtude disso, fenômenos como o aquecimento global, *global dimming* e *brightening* estão sendo cada vez mais estudados e postos em foco pela comunidade científica. Pesquisas neste sentido são de extrema importância para a compreensão de dinâmicas como o crescimento e desenvolvimento das plantas (tanto de espécies florestais quanto agrícolas, nativas e plantadas), mudanças climáticas, ocorrência de desastres naturais, dentre outros.

Uma das possibilidades para redução de impactos é a utilização de energias limpas e renováveis, como a solar, que necessita de estudos locais de viabilidade e avaliação de potencial energético. Todavia, a ciência destes dados é escassa, principalmente em regiões mais isoladas do globo, onde a cobertura de redes de monitoramento é pequena quando comparada a países com maior grau de desenvolvimento.

Através de parceria celebrada entre a Universidade Federal de Mato Grosso e o Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, iniciou-se em 2011 o monitoramento da radiação global e difusa no *Campus* da UFMT Sinop, destacando-se como o único local com essas observações na região Norte de Mato Grosso.

O monitoramento e a modelagem da radiação solar difusa no ecótono Cerrado-Amazônia mato-grossense, em região de intensa alteração antrópica, principalmente no que se refere à conversão do solo para fins agropecuários, é essencial para o entendimento dos processos de conversão energética e balanço de energia. Ressalta-se que nos últimos anos a expansão agrícola no Brasil tem se dado a partir da Região Centro-Oeste em direção ao Norte, evidenciando tal área como uma das mais preocupantes quanto ao desmatamento e supressão da floresta amazônica.

Quantificar os níveis energéticos da radiação difusa nesta localidade, nos agrupamentos anual e sazonal, além de contribuir para a compreensão do comportamento dos fenômenos atmosféricos locais, serve como indicativo ambiental, visto que reflete a carga de aerossóis em suspensão em consequência de atividades antrópicas como os incêndios florestais. Além disso, fornece dados para estudos com fins científicos e de desenvolvimento socioeconômico, como o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a sazonalidade e desenvolver modelos estatísticos de estimativa da radiação difusa horária incidente na horizontal, na transição Cerrado-Amazônia Mato-Grossense.

1.3.2 Objetivos Específicos

- i. Caracterizar a evolução diurna anual e sazonal das radiações global e difusa e suas frações radiométricas na região de Sinop-MT;

- ii. Gerar e avaliar o desempenho estatístico de modelos de estimativa da radiação difusa horária com base no coeficiente de transmissividade atmosférica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

O Sol é a maior fonte de energia conhecida pela humanidade e, até onde se sabe, inesgotável devido às reações nucleares que ocorrem em seu centro. É uma esfera gasosa com raio visível de $6,96 \times 10^5$ km e massa de $1,99 \times 10^{30}$ kg, sendo que aproximadamente 90% desta massa é contida no interior de metade do seu raio. Seus compostos principais são o hidrogênio e o hélio, além de uma pequena quantidade de elementos mais pesados. A temperatura do Sol diminui a partir de um valor central de cerca de 5×10^6 K para aproximadamente 5800 K na superfície. Com uma distância média de $1,497 \times 10^8$ km entre a Terra e o Sol, praticamente toda a energia que a Terra recebe e que define a atmosfera e suas movimentações são decorrentes da energia emitida pela estrela (LIOU, 2002).

De toda a radiação emitida, 99,9% encontra-se na faixa compreendida entre 0,15 e 4,0 μm , denominada de ondas curtas. Dentro desse intervalo, cerca de 52% da radiação solar que atinge a superfície da Terra está na faixa espectral do infravermelho ($>0,7 \mu\text{m}$), 44% na do visível (0,4 a 0,7 μm) e 4% na do ultravioleta ($<0,4 \mu\text{m}$) (PEREIRA et al., 2002; VICTORIA, 2008; LOAIZA, 2015).

O termo radiação é utilizado para designar tanto a energia que se propaga sem necessidade de um meio material, quanto o próprio processo de transferência desse tipo de energia. A energia radiante, ora revela uma natureza corpuscular (fóton), ora se comporta como uma onda eletromagnética, acontecendo, na escala subatômica, de as propriedades ondulatória e corpuscular coexistirem e se complementarem (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A taxa de energia radiante que incide em uma superfície, por unidade de área e de tempo, é denominada de irradiância solar, representada no Sistema Internacional pela unidade de medida W m^{-2} (equivalência com $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Quando integradas num intervalo de tempo, as densidades de fluxo incidentes recebem o nome de irradiação, com unidades iguais a Wh m^{-2} (ou J m^{-2}). A integração das irradiâncias em diversas partições permite a realização de vários estudos quanto ao comportamento das variações da irradiação (SOUZA, 2012).

A produção de energia pelo Sol é um fator considerado praticamente constante na escala de tempo terrestre. O fluxo total da irradiação solar extraterrestre (medido fora da atmosfera) e integrado sob todo o espectro solar é denominado Constante Solar (I_{sc}) e caracteriza o fluxo de energia solar por unidade de tempo e de área normal à direção de propagação, para uma distância média Terra-Sol. A radiação incidente no topo da atmosfera terrestre apresenta pouca oscilação considerando-se a partição instantânea, entretanto, quando integrada em intervalos horários e/ou diários podem variar em função da latitude, época do ano e horário. Influenciados pelos movimentos de rotação e translação, os raios solares incidem com inclinação diferenciada ao longo do dia na superfície terrestre (IQBAL, 1983; GUIMARÃES, 2003; INÁCIO, 2009).

Após os processos de interação com a atmosfera, a energia solar incidente na superfície é comumente chamada de radiação global, dada por duas componentes: direta (não sofre atenuação atmosférica) e difusa (que atinge a superfície terrestre após ter sofrido espalhamento) (VAREJÃO-SILVA, 2006; KHATIB, 2012). Por conseguinte, a radiação direta é a proporção da radiação solar quase retilínea, que incide na superfície terrestre a partir de um ângulo com uma distância de $0,25^\circ$ em relação ao centro do Sol, atingindo uma zona normal, a qual é orientada perpendicularmente à direção da radiação (BECKER, 2001). Diferentemente do total de radiação que chega ao topo da atmosfera, que é igual para os locais de mesma latitude, a radiação global na superfície terrestre pode variar em locais de latitudes semelhantes (INÁCIO, 2009).

A variação sazonal da radiação solar na superfície terrestre é dependente das relações astronômicas (distância Terra-Sol e movimento de translação), geográficas e atmosféricas locais, relacionadas com as concentrações de vapor de água, aerossóis e nuvens presentes na atmosfera, que são altamente variáveis no tempo e determinantes na transmissividade atmosférica (SILVA et al., 2008; TERAMOTO, 2010). Segundo Pereira et al. (2002), a proporção entre a radiação solar direta e a radiação solar difusa varia ao longo do dia (ângulo de incidência dos raios solares) e em função das condições de nebulosidade. Quanto mais nublado, maior a proporção de radiação difusa, menor a de radiação direta, e menor o valor de radiação global.

O conhecimento dos parâmetros associados à radiação solar, como índice de nebulosidade, índice de claridade, turbidez, albedo, refletância, transmitância e absorvância da atmosfera é fundamental para aplicações em sistemas de conversão energética, arquitetura e construção civil, agricultura, dentre outros (BABATUNDE, 2012). O estudo da radiação solar pode ser desenvolvido nas partições mensal, diária, horária e instantânea, sendo que a escolha da partição a ser estudada deve atender aos objetivos específicos de cada trabalho.

A quantificação do potencial solar de uma região é importante para muitas áreas do conhecimento científico, com aplicações em climatologia, agronomia, iluminação passiva, conversão energética, sensoriamento remoto e superfícies inclinadas, que utilizam esta informação como parâmetro de entrada em modelos de balanço energético ou para otimização energética em análises térmicas e de conforto térmico (DAL PAI, 2005; DRECHMER, 2005). A atualização de arquivos climáticos é de suma importância para a alimentação correta de softwares de simulação como o EnergyPlus e o DesignBuilder.

2.2 RADIAÇÃO DIFUSA

A radiação difusa é caracterizada pela dispersão das ondas eletromagnéticas, que alteram sua direção devido à interação com a atmosfera (VICTORIA, 2008). Ao atravessá-la, a radiação solar sofre atenuação pelos processos físicos da absorção, reflexão e refração, oriundos do contato entre as ondas eletromagnéticas e os constituintes da atmosfera. Nuvens, gases, partículas atmosféricas e a superfície refletem cerca de 30% da radiação incidente no topo da atmosfera. Os 70% restantes são absorvidos produzindo aquecimento do sistema e ocasionando evaporação de água (calor latente) ou convecção (calor sensível). A energia absorvida pelo sistema Terra-Atmosfera é reemitida na faixa do infravermelho, sendo 6% proveniente da superfície e 64% originária de nuvens e constituintes atmosféricos (LIU, 2002; PEREIRA et al., 2006).

A difusão é um processo fundamental da física associado com as ondas eletromagnéticas e sua interação com a matéria, no qual partículas no caminho de uma onda eletromagnética irradiam a sua energia em todas as direções, ocorrendo

para todos os comprimentos de onda dentro do espectro eletromagnético. O tamanho das partículas interfere diretamente no processo de dispersão. Para uma partícula esférica, este é definido como a proporção entre a circunferência da partícula e o comprimento de onda incidente (λ), ou seja, $x = 2\pi a/\lambda$, onde 'a' é o raio da partícula. Se $x \ll 1$ (quando o diâmetro da partícula for inferior a 10% do tamanho do comprimento de onda incidente), a dispersão é chamada de seletiva ou isotrópica (espalhamento Rayleigh). Para partículas cujos tamanhos são semelhantes ou maiores do que o comprimento de onda, isto é, $x \geq 1$, a difusão é conhecida como não-seletiva ou anisotrópica (espalhamento Mie) (Figura 1) (LIOU, 2002).

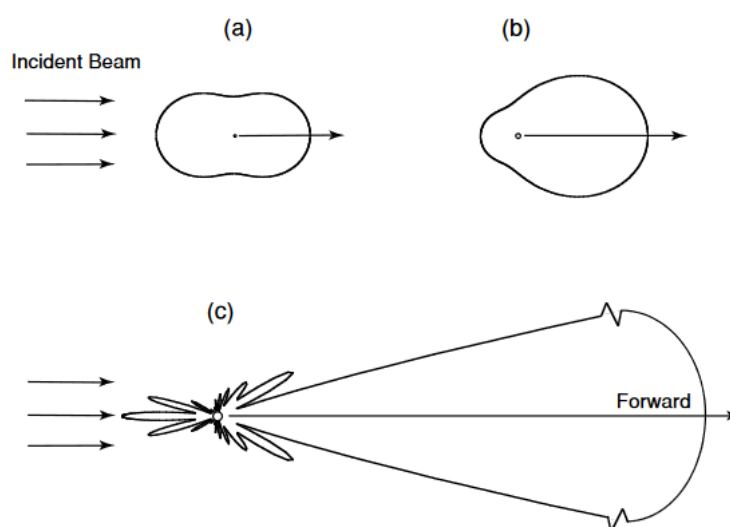


Figura 1. Demonstração dos padrões angulares do espalhamento da luz visível ($0,5\mu\text{m}$) em função do diâmetro da partícula: a) $10^{-4}\mu\text{m}$; b) $0,1\mu\text{m}$ e c) $1,0\mu\text{m}$. (Fonte: LIOU, 2002).

O espalhamento Rayleigh é ocasionado principalmente pela interação com o oxigênio e o nitrogênio (gases com maior presença no ar seco) e ocorre em maior proporção quando a atmosfera encontra-se limpa e livre de poluição; nesse caso, também é conhecido como espalhamento isotrópico, pois a radiação é espalhada uniformemente tanto no sentido atmosfera-solo como no sentido atmosfera-espaço. Já o espalhamento Mie, é causado por aerossóis e vapor d'água, ocorrendo, portanto para situações de atmosfera poluída e/ou turbida, sendo desuniforme e com maior fluxo radiativo no sentido atmosfera-solo do que para a atmosfera-espaço (DAL PAI, 2005). Segundo Liou (2002), isso ocorre porque uma pequena partícula tende a

dispersar a luz igualmente para frente e para trás, já quando a partícula é maior, a energia dispersa torna-se cada vez mais concentrada na direção à frente, com características de dispersão mais complexas.

A componente difusa apresenta comportamento isotrópico e anisotrópico, composta pelas subcomponentes circunsolar, brilho horizontal (multireflexões) e radiação difusa isotrópica. Isotrópica é a porção da radiação difusa que vem mais ou menos igualmente em todas as direções do céu; circunsolar é a radiação que advém da região ao redor do disco solar; enquanto que a radiação próxima ao horizonte, denominada de brilho horizontal, percorre uma trajetória maior e sofre múltiplas reflexões. A natureza não isotrópica da radiação difusa costumava ser ignorada ao se considerar a radiação incidente em uma superfície, porém isso pode levar a subestimativa apreciável da irradiância quando o Sol está alto no céu (LINACRE, 1992; SCOLAR et al., 2003).

Estudos encontrados na literatura apontam que os valores de radiação solar difusa acompanham o comportamento da radiação no topo da atmosfera e variam ao longo do ano conforme as condições atmosféricas locais (precipitação, nebulosidade, aerossóis). Na região Sudeste do Brasil foram registrados níveis mínimos de irradiação difusa no meio do ano e máximos no início, comprovando que os invernos no hemisfério sul são caracterizados por dias de céu claro, enquanto os verões são marcados por dias nublados (DRECHMER; RICIÉRI, 2006; INÁCIO, 2009; MARQUES FILHO et al., 2016).

2.2.1 Frações radiométricas

As frações radiométricas são empregadas visando melhorar o entendimento da influência das condições atmosféricas na passagem da radiação solar. O emprego de frações ou índices radiométricos traduz a razão entre as diferentes componentes da radiação quando comparados com a radiação global ou com a radiação extraterrestre, e permite minimizar os efeitos geográficos e astronômicos, visto que se considera que as componentes da radiação solar são obtidas no mesmo local e no mesmo intervalo de tempo (SOUZA, 2012), reduzindo os efeitos dos movimentos da Terra e do posicionamento geográfico do local. Em geral, essas frações são

consideradas como importantes indicadores dos processos de absorção e espalhamento ocasionado por nuvens, aerossóis e poluentes em suspensão na atmosfera, pelo fato de não apresentarem dependência dos fatores astronômicos (MARQUES FILHO et al., 2016).

O coeficiente de transmissividade atmosférica (K_T), ou índice de claridade, é obtido pela razão entre a irradiação global (H_G) e a irradiação no topo da atmosfera (H_0), podendo ser considerado na partição instantânea pela razão entre as irradiâncias. Esse índice reflete as condições atmosféricas associadas ao ângulo zenital e varia de acordo com a quantidade de nuvens e aerossóis na atmosfera, podendo ser utilizado como parâmetro de classificação da cobertura de céu (ESCOBEDO et al., 2009).

A sua utilização nesse tipo de classificação dispensa o uso de dados de radiação direta e/ou difusa, e considera basicamente quatro tipos de condição de céu: nublado ($K_T < 0,35$), parcialmente nublado ($0,35 \leq K_T < 0,55$), parcialmente aberto ($0,55 \leq K_T < 0,65$) e aberto ($0,65 \leq K_T < 0,82$). Quando K_T se aproxima da unidade (1,0), a radiação incidente na superfície terrestre é muito próxima daquela que incide no topo da atmosfera, ou seja, a radiação não sofre grandes alterações na sua transmissão, indicando a condição do céu como limpo. Todavia, ressalta-se que mesmo em condição de céu aberto, ocorrem atenuações por difusão seletiva, absorção de radiação (ozônio e UV) e reflexão, indicando que na superfície dificilmente ocorre a incidência do mesmo nível energético que atinge o topo da atmosfera terrestre. Já para valores próximos a zero, a radiação incidente na superfície é consideravelmente menor do que aquela incidente no topo da atmosfera, sugerindo céu nublado com alta concentração de nuvens e vapor d'água (RENSHENG et al. 2004; DRECHMER, 2005; TAVARES, 2005; MARTINS et al., 2012; KUO et al., 2014).

A altura, o tipo e a profundidade das nuvens influenciam na transmissividade atmosférica. Kasten; Czeplak (1980) estudaram o impacto do tipo de cobertura de nuvens na radiação global em Hamburgo (Alemanha) e observaram diferenças significativas principalmente no que se refere às nuvens altas (Tabela 1).

Tabela 1. Transmissividade em condições de céu nublado (com diferentes tipos de nuvens) em relação ao céu claro.

Tipo de nuvem	Transmissividade relativa
Cirrus, cirrostratus, e cirrocumulus	0,61
Alto cumulus e altostratus	0,27
Cumulus	0,25
Stratus	0,18
Nimbostratus	0,16

Fonte: Kasten; Czeplak (1980).

As frações da radiação difusa podem estar relacionadas com H_G e com H_0 , sendo definidas como K_d e K_d' , que representam as relações entre a irradiação difusa (H_d) pela irradiação global (H_G) e entre a irradiação difusa (H_d) e a irradiação no topo da atmosfera (H_0), respectivamente. Em 1960, Liu e Jordan expressaram a razão entre a radiação difusa e a radiação global incidentes em superfície horizontal (K_d) como uma função com bons ajustes estatísticos quando relacionada com a transmissividade atmosférica (K_T). De acordo com Linacre (1992), as frações K_d e K_d' são dependentes do ângulo de elevação solar (h), cobertura de céu e época do ano. A poluição do ar propicia elevação dos valores de K_d , enquanto a nebulosidade aumenta os valores de K_d e reduz os valores de K_T , de modo que as duas frações podem ser relacionadas (SINGH et al., 2013). Essa conotação é conveniente, visto que K_T pode ser estimado com facilidade e apresenta ampla possibilidade de aplicação, já que as estações meteorológicas automáticas apresentam em sua maioria, monitoramento de rotina da radiação global.

Alterações nas propriedades das nuvens e aerossóis em suspensão na atmosfera, incluindo poeiras, emissões vulcânicas e antropogênicas alteram tanto K_T quanto K_d , afetando a produtividade das plantas e o sequestro de carbono do solo (AL-AYED et al., 1998; WENXIAN et al., 1996; BUTT et al., 2010; REN et al., 2013). Oliveira et al. (2007) verificaram que a alta carga de aerossóis e a cobertura de nuvens têm impacto importante na assimilação de carbono pela floresta amazônica em áreas onde ocorrem queimas de biomassa, devido à alteração na quantidade de radiação solar que incide na superfície e o aumento da taxa da fração difusa em relação à direta.

2.2.2 Medidas e correções da radiação difusa

O estudo dos valores energéticos da radiação solar envolve basicamente três tipos de análise: a distribuição espacial, sua variabilidade temporal e as incertezas associadas às duas primeiras, sendo ambas, essenciais para análises de viabilidade de aproveitamento da energia solar e à elaboração de cenários de aplicação (PEREIRA et al., 2017).

As medidas dos fluxos de radiação solar são normalmente tomadas no plano horizontal e disponibilizadas em valores médios de cinco ou dez minutos (em muitos casos, considerada como partição instantânea), horários e/ou diários. Os instrumentos meteorológicos empregados nas medidas da radiação solar são classificados em função do tipo de variável a ser medida, campo de visão, resposta espectral e o emprego principal a que se destina (WMO, 2008).

Para a obtenção dos dados solarimétricos utilizam-se instrumentos específicos que medem a potência incidente por unidade de área, integrada sob os diversos comprimentos de onda. Para as medidas da radiação global e difusa frequentemente são empregados os piranômetros, cujo elemento sensível (sensor) é dado por conjuntos de pilhas termoelétricas, constituídas por termopares em série. A função dos termopares é gerar uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintadas com diferentes cores (preto e branco) e igualmente iluminadas; assim, a diferença de potencial medida na saída do instrumento pode ser relacionada com o nível de irradiância incidente (GUIMARÃES, 2003).

Todavia, para a medida da radiação difusa deve-se eliminar a componente direta da radiação, sendo nesse caso, empregados os métodos da diferença, sombreamento por disco ou anel. No método da diferença, ou método padrão, a radiação global e a radiação direta são medidas simultaneamente, sendo a difusa obtida por diferença. No método do disco de sombreamento, a componente difusa é medida por um piranômetro posicionado no plano horizontal e sombreado por um disco associado a um dispositivo de rastreamento solar (DRECHMER, 2005). Em ambos os casos, o custo de monitoramento é elevado em função do sistema de rastreamento solar.

O método do anel de sombreamento, por ser mais barato, tem sido uma técnica amplamente empregada. O anel, com seu eixo principal alinhado na direção norte-sul e inclinado com ângulo igual à latitude local, obstrui a irradiância direta sobre o piranômetro posicionado na área sombreada, permitindo apenas a incidência da irradiância difusa (DAL PAI; ESCOBEDO, 2006).

Diferentes montagens de anéis de sombreamento são encontradas na literatura, sendo as mais conhecidas de Drummond (1956) e Robinson; Stoch (1964). Na montagem de Drummond, o piranômetro mantém-se fixo e o anel de sombreamento translada paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar. Na montagem de Robinson & Stoch, o piranômetro mantém-se fixo no centro do anel, que rotaciona em torno de seu centro para compensar as variações da declinação solar. Uma montagem alternativa de baixo custo, fácil operação e manutenção foi proposta por Melo; Escobedo (MELO, 1994) – montagem MEO – cujo princípio operacional é inverso à montagem de Drummond. Nesse sistema o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado com ângulo igual à latitude local, e para compensar a declinação solar, com ajuste manual, o piranômetro translada paralelamente ao plano do horizonte local numa base móvel para permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel (Figura 2).

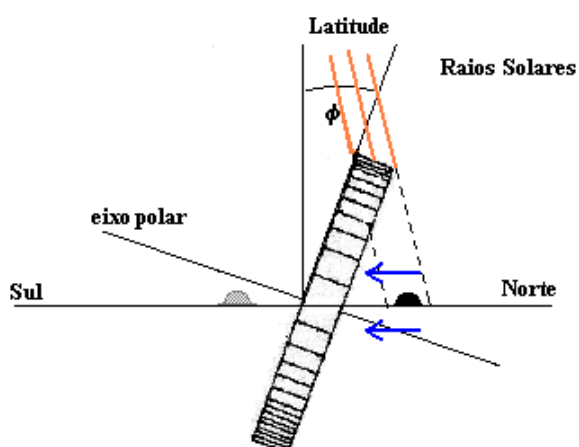


Figura 2. Esquema do anel de sombreamento Melo-Escobedo (MEO) (Fonte: DAL PAI, 2005).

Independentemente do método escolhido, no monitoramento da radiação difusa torna-se necessária a aplicação de coeficientes de correção, visto que ocorre o

bloqueio de uma porção da própria componente difusa. Esta correção oscila entre 5 e 25%, apresentando grande variabilidade, dependendo de parâmetros como dimensões geométricas do anel (largura e raio), latitude, época do ano, turbidez atmosférica e grau de nebulosidade, albedo das superfícies vizinhas e refletividade da superfície interna do anel (GUIMARÃES, 2003; DAL PAI; ESCOBEDO, 2006).

Drummond (1956) desenvolveu um modelo de fator de correção para céu uniforme e equipamentos com largura do anel de sombreamento pequena em comparação ao raio, com base nos cálculos geométricos de incidência solar (Equações 1 e 2). Esse autor observou que somente o fator de correção geométrico não era suficiente, sendo necessário adicionar correções que levassem em conta a radiação circunsolar bloqueada pelo anel de sombreamento; que por sua vez, é definida como anisotrópica. Os valores médios de correções adicionais observados nos experimentos variaram de 3% para céu nublado a 7% em condições de céu sem nuvens.

$$FC = \frac{1}{1 - \frac{X}{T}} \quad (1)$$

$$\frac{X}{T} = \frac{2b}{\pi r} \cos^3 \delta (\sin \phi \sin \delta t_0 + \cos \phi \cos \delta \sin t_0) \quad (2)$$

em que: b é a largura do anel de sombreamento, r é o raio do anel, δ é a declinação solar, ϕ é a latitude local e t_0 é o ângulo de nascimento do Sol em radianos.

Outro procedimento para a correção da medida da radiação difusa foi desenvolvido por LeBaron et al. (1990) e, quando comparado com o procedimento adotado por Drummond (1956), fornece resultados ligeiramente melhores. Essa correção utiliza quatro parâmetros para descrever os efeitos isotrópicos e anisotrópicos da radiação solar. O parâmetro para descrever o efeito isotrópico da radiação é o mesmo obtido por Drummond, e o efeito anisotrópico é obtido através dos parâmetros ângulo zenital, índice de claridade e brilho solar (VICTORIA, 2008).

Diversos outros autores tem reportado a necessidade da aplicação de fatores de correção anisotrópicos adicionais aos geométricos (BATTLES et al., 1995;

MUNEER; ZHANG, 2002; SOUZA; ESCOBEDO, 2013; MUNEER; THAM, 2014), tendo sido desenvolvidos diversos modelos nestes últimos anos, aplicáveis aos diferentes tipos de anel de sombreamento existentes. Dentre eles, os fatores de correção propostos por Dal Pai et al. (2011), com base no coeficiente de transmissividade atmosférica em acordo com a classificação de cobertura de céu proposta por Escobedo et al. (2009).

2.2.3 Modelos de estimativa da radiação difusa

Nas estimativas da radiação solar incidente na superfície existem vários parâmetros que alteram os níveis das componentes direta e difusa, como horário (vinculado ao movimento de rotação), época do ano, latitude, altitude, ângulo de inclinação, ângulo zenital, transmissividade atmosférica, vapor d'água (umidade relativa do ar), albedo regional, fotoperíodo, temperatura do ar, condições de nebulosidade, dentre outros. Portanto, é muito difícil obter uma fórmula geral (única) para estimativa das radiações direta e difusa, considerando as influências supracitadas, com ocorrência simultânea; por outro lado, alguns desses parâmetros têm pouco efeito na radiação solar e podem ser desprezados (ASHJAE et al., 1993).

A modelagem da radiação difusa é considerada um dos principais desafios na temática micrometeorológica, visto que vários modelos têm sido desenvolvidos para estimar a quantidade de radiação difusa nas superfícies horizontais utilizando parâmetros climáticos, como insolação, cobertura de nuvens, umidade, temperatura, velocidade do vento (EL-SEBAII et al., 2010; AL-RAWAHI et al., 2011). Todavia, os mais utilizados são aqueles que correlacionam a componente difusa com as radiações global e extraterrestre (DAL PAI; ESCOBEDO, 1999).

Dois tipos de modelos podem ser empregados na estimativa da radiação solar, os de decomposição e os parametrizados. Os modelos de decomposição são classificados de acordo com o método utilizado, podendo ser empíricos, analíticos, numéricos, estatísticos e de redes neurais. Os modelos estatísticos são representados por equações matemáticas ajustadas por regressões (linear ou polinomial) em correlações com as frações radiométricas ou com a razão de insolação (AL-RAWAHI et al., 2011).

Os modelos de regressão são ferramentas populares para estimativa da fração difusa (PAULESCU; BLAGA, 2016). As correlações tendem a apresentar grande variabilidade em função da equipartição escolhida, do local estudado e do tipo de ajuste. Neste caso, ocorre a necessidade de avaliação de desempenho por meio de indicadores estatísticos, comparando-se os valores estimados com dados medidos não empregados na obtenção das equações. Já os modelos parametrizados carecem de informações mais detalhadas das condições atmosféricas locais, conforme a componente a ser estimada, ou então a utilização de percentuais fixos de ocorrência de cada componente da radiação solar global (DAL PAI; ESCOBEDO, 1999; SOUZA et al., 2012).

Khorasanizadeh; Mohammadi (2016) classificaram os modelos de estimativa da radiação difusa em duas categorias primárias. Na primeira e maior categoria estão inseridos os modelos que correlacionam K_d com diferentes elementos de entrada (K_T , razão de insolação, ou ambos; temperatura do ar; dentre outros); e na segunda estão aqueles que correlacionam K_d' com estes mesmos elementos. Comumente, os modelos mais empregados correlacionam a fração K_d com K_T e n/N .

Liu; Jordan (1960) foram os pioneiros na concepção de modelos estatísticos de estimativa da radiação difusa, estabelecendo correlações entre a fração difusa K_d com o índice de claridade K_T para localidades dos EUA e Canadá. No entanto, por ser dependente da latitude, vários outros modelos para avaliar a componente difusa podem ser encontrados na literatura, até mesmo para fins de comparação de desempenho com o modelo precursor.

Estes modelos estatísticos são geralmente dados por funções polinomiais de primeiro a quarto graus, relacionando K_d com K_T , bem como com outras variáveis tais como a elevação solar, a temperatura do ar e a umidade relativa do ar. No entanto, o desempenho parece diminuir quando aplicadas a outras regiões diferentes daquelas que forneceram os dados iniciais para o desenvolvimento do modelo (ou calibração regional), por serem dependentes, inclusive, da latitude. Dessa forma, mais estudos são necessários para avaliar melhor as influências de fatores climáticos locais sobre o desempenho de modelos já desenvolvidos e permitir maiores aplicações em outros contextos climáticos e geográficos, perfazendo, portanto no grande desafio de se desenvolver um modelo universal com diversos parâmetros

climáticos para estimativas das componentes da radiação difusa (LEBARON; DIRMHIRN, 1983; DAL PAI; ESCOBEDO, 1999; KUO et al., 2014).

Das formas de ajuste para estimativas da radiação difusa, a primeira utilizada foi a polinomial de segundo grau (LIU; JORDAN, 1960) e posteriormente surgiram outros modelos empregando graus polinomiais mais elevados (OLIVEIRA et al., 2002b), bem como outras funções, como a logística (BOLAND et al., 2001; KUO et al., 2014), exponencial dupla (RUIZ-ARIAS et al., 2010) e sigmoideal (RUIZ-ARIAS et al., 2010; MARQUES FILHO et al., 2016). Ruiz-Arias et al. (2010) relataram o emprego das funções polinomiais também nas equações de regressão seccionadas, que dividem a faixa do K_T em diferentes intervalos. De acordo com Singh (2016), a utilização de equações polinomiais seccionadas foi muito comum em 1992, sendo preferível ao invés de se explorar métodos como ajuste contínuo, racional ou exponencial.

As correlações para intervalos de K_T extremos, correspondentes a céu nublado e aberto, apresentam-se geralmente como valores constantes (ORGILL; HOLLANDS, 1977; ERBS ET AL., 1982; SPENCER, 1982; REINDL ET AL, 1990; LAM; LI, 1996; MADUEKWE; CHENDO, 1997; MADUEKWE; GARBA, 1999; OLIVEIRA ET AL., 2002; SOARES ET AL., 2004; JACOVIDES ET AL., 2006; FURLAN ET AL., 2012). Isto se deve ao fato de que o comportamento da radiação difusa não é bem compreendido nestes intervalos, o que não justifica o ajuste de curvas a eles (MADUEKWE; GARBA, 1999).

A grande maioria dos modelos encontrados na literatura é para climas temperados e latitudes tropicais do hemisfério norte, principalmente acima de 40° (BOLAND et al., 2001; BOLAND; RIDLEY, 2008). De acordo com Oliveira et al. (2002b) até 2002 nenhum modelo de correlação havia sido desenvolvido para localidades na América do Sul. Abreu et al. (2019) relatam que regiões com alto albedo e zonas de clima tropical não são bem representadas. Singh et al. (2013) afirmam que os modelos desenvolvidos na Europa e América do Norte não podem ser extrapolados para países subtropicais e tropicais, por causa das diferenças nos padrões de forçamento radiativo, sendo válidos apenas para latitudes superiores a 40°.

Uma problemática na modelagem numérica é a representação apropriada dos efeitos das nuvens, principalmente em regiões tropicais como o Brasil. No país, soma-se o fato da grande variabilidade de cobertura do céu com a ausência de uma rede solarimétrica consistente, principalmente para medidas das componentes direta e difusa (PEREIRA et al., 1996; OLIVEIRA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002b; PAGE, 2012).

Encontram-se disponíveis na literatura diversos modelos de estimativa da radiação difusa horária com base em K_T . Os modelos variam conforme os elementos ambientais de entrada utilizados nas predições, com relação às partições de tempo escolhidas (instantâneas, horárias ou diárias) e com o intervalo de tempo dos agrupamentos de dados observados (DAL PAI; ESCOBEDO, 2000). Ocorrem ainda variações quanto ao tamanho da base de dados utilizada, de acordo com Abreu et al. (2019), a duração mais típica dos conjuntos de dados históricos é de dois anos, seguido por um, três e quatro anos, sendo que há na literatura estudos que utilizaram vinte e até trinta anos de dados para derivar seus modelos.

Posteriormente ao modelo de Liu e Jordan (1960), diversos autores desenvolveram equações a partir da correlação $K_d \times K_T$ para valores horários e diários. Após quase seis décadas, esse modelo pioneiro continua sendo aplicado em estudos a fim de verificar melhorias no desempenho dos novos coeficientes ajustados para a estimativa da radiação difusa, e se algum universal e preciso pode ser aplicado (GUEYMARD, 2010).

Orgill; Hollands (1977) utilizando o coeficiente de transmissividade atmosférica como única variável para predição, geraram equações de estimativa para três intervalos de K_T em Toronto, Canadá ($43,65^\circ$; $-79,38^\circ$). Os resultados encontrados foram comparados com os de equações geradas anteriormente por outros autores, levando a recomendações para utilização do modelo em latitudes entre 43° e 54° .

Spencer (1982) estimou a fração difusa da radiação global para localidades da Austrália (dentre as latitudes -20° a -37° e longitudes 114° a 150°) por meio de quatro modelos, e, além disso, estabeleceu equações de estimativa de K_d para três frações de K_T com diferentes coeficientes para latitudes dentre -20° e -45° (Tabela 2). As equações 3 a 5 foram ajustadas para Melbourne, Austrália ($-37,82^\circ$; $144,97^\circ$).

$$Kd = 0,85 \quad (K_T < 0,35) \quad (3)$$

$$Kd = 1,352 + 1,668K_T \quad (0,35 \leq K_T \leq 0,75) \quad (4)$$

$$Kd = 0,10 \quad (K_T > 0,75) \quad (5)$$

Tabela 2. Valores dos coeficientes a, b, c, d para latitudes dentre 20 e 45° Sul.

Latitude Sul (graus)	a	b	c	D
20	0,74	1,18	1,46	0,09
25	0,78	1,24	1,52	0,10
30	0,81	1,29	1,59	0,10
35	0,85	1,35	1,66	0,11
40	0,89	1,41	1,73	0,11
45	0,93	1,47	1,79	0,13

Fonte: Spencer (1982)

Os coeficientes a, b, c, d também podem ser calculados para outras latitudes através das Equações 6 a 9. Porém, esse autor não recomenda aplicações dos coeficientes calculados em extrapolações para latitudes abaixo de 20°, visto que estimativas realizadas com dados de radiação solar de Porto Moresby, Nova Guiné (-9,48°) não se ajustaram às tendências de latitude, apesar de terem sido próximas da média.

$$a = b - 0,3 c \quad (6)$$

$$b = 0,940 + 0,011814 \phi \quad (7)$$

$$c = 1,185 + 0,0135 \phi \quad (8)$$

$$d = b - 0,75c \quad (9)$$

Spencer (1982) relata que para a relação $Kd \times K_T$ há uma tendência crescente da fração difusa com o aumento da latitude (mais próxima dos polos). Ruth; Chant (1976) observaram a mesma relação ao analisar valores diários de radiação difusa no Canadá; Buckius; King (1978) sugeriram que para o Canadá, os dados poderiam ter sido influenciados pelo alto albedo do solo (neve) juntamente com as alterações na massa óptica. Porém, o estudo de Spencer foi conduzido em localidades da Austrália

onde não há grandes diferenças no albedo, sendo o efeito atribuído principalmente às variações da massa óptica que ocorrem com as mudanças de latitude.

Reindl et al. (1990), ao investigarem correlações de frações difusas horárias em seis localidades dos EUA e Europa (EUA: 42,7°; -73,8° e 28,4°; -80,6° / Europa: entre as latitudes 51,9° a 59,5° e longitudes 10° a 12,6°), tiveram como objetivo determinar se a incorporação de variáveis adicionais reduziria significativamente o erro padrão dos modelos tipo Liu e Jordan, e observaram que os erros foram reduzidos quando inclusos como variáveis o ângulo de elevação solar, temperatura e umidade relativa do ar.

Lam; Li (1996), em estudo conduzido em Hong Kong, China (22,3°; 114,3°), observaram que a correlação $K_d \times K_T$ é eficiente para todos os intervalos de K_T , porém, verificou-se que dentro da faixa $0,15 < K_T \leq 0,7$, as previsões tornaram-se melhores com o uso de um modelo híbrido contendo como variável valores da radiação direta.

Maduekwe; Chendo (1997) desenvolveram modelos de estimativa da radiação difusa horária para Lagos, Nigéria (6,46°; 3,40°); com expressões para diferentes intervalos de K_T , utilizando variáveis diversas: 1) equação do tipo Liu e Jordan ($K_d \times K_T$); 2) incluindo o seno da elevação solar ($\sin h$); 3) adicionando o coeficiente de turbidez. Como resultado encontraram que o segundo e terceiro modelos reduzem o erro padrão da equação mais usual (1).

Maduekwe; Garba (1999) geraram equações de estimativa para Lagos (6,58°; 3,33°) e Zaria (11,10°; 7,68°), Nigéria, seccionadas para diferentes intervalos de K_T . Ademais, incluíram o ângulo de elevação solar como variável explicativa nas correlações estabelecidas para Zaria, e testaram cinco modelos descritos na literatura. Os resultados encontrados foram melhor performance das estimativas com a inclusão da variável h , e predição errônea de K_d com a utilização dos modelos elaborados para altas latitudes.

Jacovides et al. (2006) propuseram correlações polinomiais de terceira ordem com base em K_T para a região de Athalassa, Cyprus (entre as latitudes 34,61° a 35,61° e longitudes 32° a 34,5°), comparando seu desempenho com mais dez modelos encontrados na literatura. Erbs et al. (1982) desenvolveram modelos polinomiais de quarta ordem em função de K_T para quatro cidades americanas (entre

as latitudes 31,08° a 42,42° e longitudes 71,48° a 121,70°), enquanto Boland et al. (2001) propuseram um novo modelo de estimativa da radiação difusa utilizando uma função logística para a região de Geelong, Austrália (-38,09°; 144,34°).

Boland; Ridley (2008) deram continuidade aos trabalhos realizados por Boland; Scott (1999) e Boland et al. (2001), estabelecendo modelos de correlação para estimativa da fração difusa nas cidades de Adelaide (-34,92°; 138,59°) e Geelong, Austrália. De acordo com os autores, dois resultados importantes foram demonstrados: a construção de um modelo genérico estatisticamente rigoroso; e a estimativa, com segurança, de quais valores de um conjunto de dados de radiação difusa são, com toda probabilidade, espúrios.

No Brasil, Oliveira et al. (2002b) estabeleceram correlações polinomiais de quarta ordem entre K_d e K_T para a cidade de São Paulo (-23,56°; -46,73°), e obtiveram bom desempenho para estimativas diárias e mensais, contudo, esse comportamento não foi observado para os valores horários. E ainda, a comparação com modelos desenvolvidos em outras localidades demonstrou diferenças relacionadas principalmente aos efeitos da altitude.

Soares et al. (2004) e Furlan et al. (2012) também desenvolveram modelos de estimativa para São Paulo. Os últimos autores incluíram como preditores os efeitos de nuvens (cobertura de céu e tipo de nuvem), variáveis meteorológicas tradicionais (temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica) e poluição do ar (concentração de material particulado). De acordo com os resultados o novo modelo foi capaz de estimar os valores de H_{DF}^h melhor do que os desenvolvidos anteriormente.

Marques Filho et al. (2016) ajustaram a equação de estimativa de Boland; Ridley (2008) para a cidade do Rio de Janeiro (-22,86°; -43,23°). Além disso, propuseram um novo modelo de correlação, baseado na função logística sigmoide, que apresentou melhor desempenho quando comparado a outros modelos aplicados aos dados observados, reproduzindo melhor o comportamento de K_d^h para todos os valores de K_T^h , especialmente quando este tende a 1.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Os valores de radiação solar, bem como das demais variáveis meteorológicas empregadas no estudo, foram obtidos da base de dados da Estação Meteorológica Automática (EMA) da Universidade Federal de Mato Grosso (Figura 3), *Campus* Universitário de Sinop (latitude $-11,864^\circ$, longitude $-55,485^\circ$ e altitude 371m), no período de junho de 2011 a outubro de 2016.

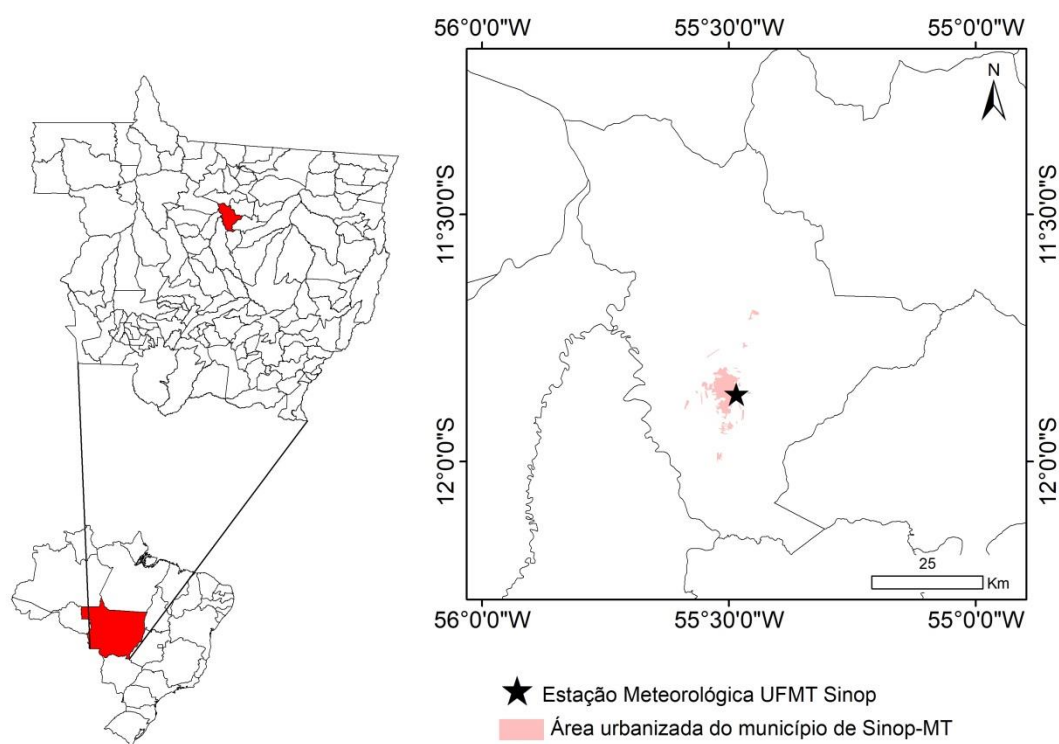


Figura 3. Mapa de localização da Estação Meteorológica Automática da UFMT, *Campus* Sinop.

O município de Sinop está localizado na Região Médio-Norte do Estado de Mato Grosso, possui 3.942,23 km² e cerca de 130 mil habitantes. Com grande crescimento populacional nos últimos sete anos (em torno de 20%), o uso e ocupação do solo tem sido intensamente alterado, com conversão de áreas vegetadas em urbanas e/ou agrícolas, e aumento na demanda por energia e outros recursos naturais (IBGE, 2018).

O clima da região segundo a classificação climática de Köppen é do tipo Aw tropical quente e úmido, caracterizado pela presença de duas estações bem definidas: chuvosa (outubro a abril) e seca (maio a setembro) (SOUZA et al., 2013). As temperaturas médias mensais oscilam entre 22,9 e 25,8°C, com média anual de 24,7°C, e os totais anuais de precipitação giram em torno de 2000 mm.

Com relação ao regime pluvial, o Centro-Oeste pode ser considerado como uma região de transição, afetada pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e por complexos convectivos característicos da região amazônica (PEREIRA et al., 2017). A ZCAS caracteriza-se pela intensa nebulosidade, orientada no sentido noroeste-sudeste, estendendo-se da Amazônia até o sudoeste do Oceano Atlântico, influenciando as precipitações desde o centro-sul da Região Norte até o norte do Paraná (ESCOBAR, 2014).

A Figura 4 exibe o comportamento das variáveis meteorológicas registradas durante o período de estudo (06/2011 a 10/2016) pela Estação Meteorológica Automática da UFMT - *Campus* Universitário de Sinop, em comparação às normais climatológicas da região. Para representação das normais foram utilizadas séries históricas da estação Gleba Celeste que, apesar de localizada em município vizinho (Vera-MT), apresenta o conjunto de dados mais antigo da região (1972 a 2010).

Durante o período de estudo, as variáveis meteorológicas apresentadas na Figura 4 seguiram o mesmo comportamento da normal climatológica, porém com diferenças na amplitude, dadas principalmente pela diferença de abrangência das séries de dados. Os totais de insolação foram superiores à média, totalizando 318,3 horas no mês de julho de 2011 (55 horas a mais do que o máximo exibido pela normal). Conseqüentemente, ocorreu aumento da temperatura do ar, ultrapassando 1°C de diferença, enquanto a umidade relativa do ar apresentou redução em função do aumento da pressão de saturação por vapor d'água (equação de Tétens). De acordo com a normal climatológica, a UR que apresenta valores médios mensais dentre 66 e 86%, no período de estudo atingiu valores inferiores a 60% em julho e agosto.

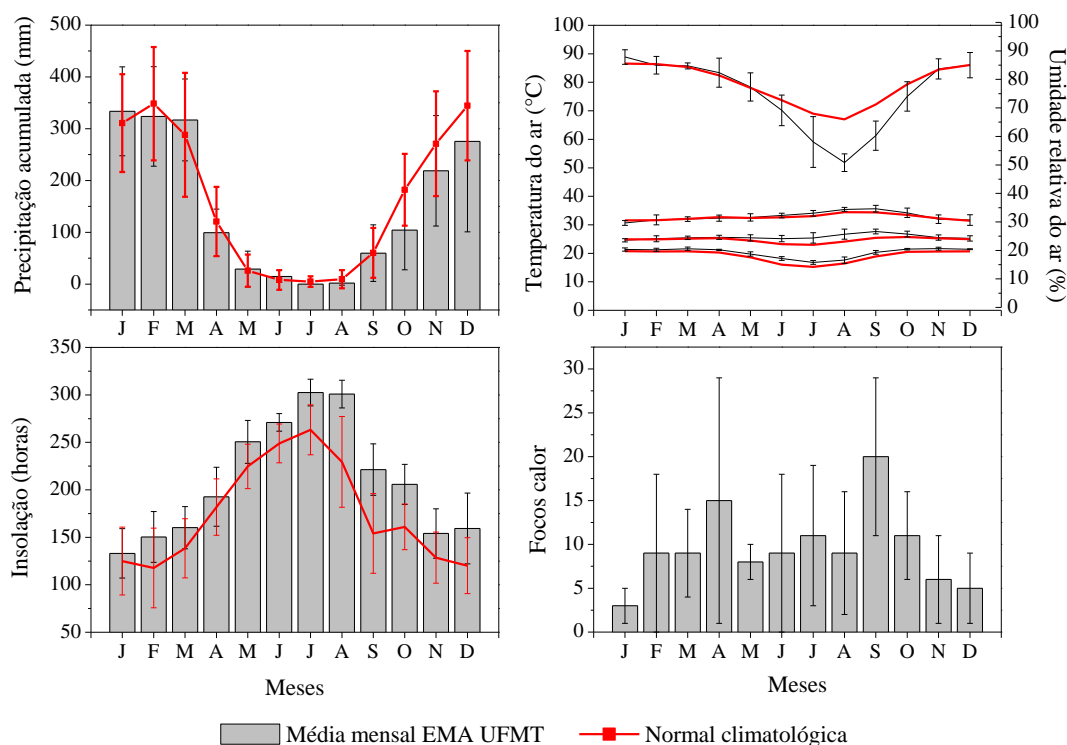


Figura 4. Valores médios mensais da precipitação (A), temperatura e umidade relativa do ar (B), insolação (C) e focos de calor (D) coletados na Estação Meteorológica Automática da UFMT *Campus Sinop* (2011-2016) e as normais climatológicas da estação Gleba Celeste (1972-2010). (Fonte: INMET, 2016).

Observa-se grande redução nos totais de insolação para o mês de setembro em todos os anos, quando comparado com agosto, sendo esse comportamento relacionado ao maior número de focos de calor que ocorrem na região neste período. Inclusive, nos dados da normal climatológica, a média mensal de insolação para outubro supera o mês de setembro, indicando que em períodos anteriores a mudança na cobertura do solo na região pode ter sido mais intensa.

3.2 INSTRUMENTAÇÃO

Os dados instantâneos de radiação global e difusa (médias de cinco minutos) foram monitorados por piranômetros CM3 da Kipp; Zonen, posicionados a 1,0 m de altura, que possuem uma sensibilidade de resposta de $\pm 10-35 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, tempo de resposta de 18 s, resposta a temperatura de $\pm 1,0\%$ para a faixa de -40 a $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e desvios para o efeito cosseno de $\pm 2\%$ ($0 < z < 80^\circ$). Os dados foram registrados por um datalogger Campbell Scientific modelo CR1000, operando na frequência de 1

Hz. Para a medida da radiação difusa, o piranômetro encontrava-se posicionado sob o anel de sombreamento MEO (MELO, 1994), permanecendo constantemente abaixo da sombra projetada pelo anel, enquanto que para a medida da radiação global, o sensor permaneceu a pleno Sol (Figura 5). O anel de sombreamento empregado possuía 0,1 m de largura e 0,4 m de raio.



Figura 5. Anel de sombreamento MEO (MELO, 1994) instalado na Estação Meteorológica Automática da UFMT, Campus Universitário de Sinop.

Além dos piranômetros e anel de sombreamento MEO, foram utilizados os seguintes sensores: psicrômetro com abrigo termométrico Vaisala CS 215 instalado a 2 m de altura, pluviógrafo Vaisala TE 525 a 1,5 m de altura, heliógrafo a 1,5 m de altura, para monitoramento dos elementos meteorológicos temperatura e umidade relativa do ar, precipitação e insolação, respectivamente.

3.3 TRATAMENTO DA BASE DE DADOS

Os dados de radiação solar foram submetidos à análise para observação de inconsistências geradas pelo sistema de coleta e armazenamento. Através da integração das partições instantâneas, obtiveram-se as irradiações horárias global

(H_G^h) e difusa (H_{DF}^h). A radiação extraterrestre horária foi calculada através da Eq. 10, conforme Iqbal (1983):

$$H_0^h = \left(\frac{24}{\pi}\right) H_{SC} \left[\left(\frac{\pi}{180}\right) \omega (\sin \delta \sin \phi) + (\cos \delta \cos \phi \sin \omega) \right] \quad (10)$$

em que: H_{SC} é a constante solar horária ($4.921 \text{ KJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$); ϕ é a latitude do local (em graus); δ é a declinação solar (em graus); ω é o ângulo horário.

Posteriormente às integrações horárias, os dados de H_{DF}^h foram submetidos a correções geométricas e astronômicas propostas por Oliveira et al. (2002a) (Eqs. 11 e 12). Para a localidade, FC varia de 0,99 a 1,00. Também foram aplicados fatores de correção anisotrópica propostos por Dal Pai et al. (2011), que são dependentes da transmissividade atmosférica em acordo à classificação da cobertura de céu descrita por Escobedo et al. (2009) (Tabela 3).

$$FC = \frac{1}{1 - F_p} \quad (11)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R}\right) \cos(\delta) \left[\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \cdot \int_0^{\omega_s} \cos(\theta_z) d\omega \quad (12)$$

em que: b - largura do anel (0,1 m); R - raio do anel (0,4 m); ω - ângulo horário; θ_z - ângulo zenital.

Tabela 3. Fatores de correção anisotrópica para radiação difusa pelo método anel de sombreamento MEO.

Intervalo de K_T	Cobertura de céu	Fator de correção
$0 \leq K_T < 0,35$	Nublado	0,975
$0,35 \leq K_T < 0,55$	Parcialmente nublado	1,034
$0,55 \leq K_T < 0,65$	Parcialmente aberto	1,083
$K_T \geq 0,65$	Aberto	1,108

Fonte: Dal Pai et al. (2011).

Em seguida, realizou-se a filtragem da base de dados horária, considerando-se os critérios descritos por Escobedo et al. (2009), sendo: i) $H_G^h/H_0^h < 0,82$; e ii) $H_{DF}^h/H_G^h < 1,0$. Após o tratamento dos dados ($n=23.704$ horas de observação da

radiação solar), obteve-se um “n” amostral de 22.506 horas, ou seja, houve perda de aproximadamente 5% dos dados.

Para a caracterização observacional da sazonalidade da radiação global e difusa optou-se pelo agrupamento nos meses de acordo com o regime hídrico (pluviométrico) da região, ao invés de dividir o ano de modo usual (quatro estações). Este tipo de análise sazonal é favorável em regiões onde as mais frequentes mudanças atmosféricas advém dos padrões de precipitação, tendo sido adotado também por Borges et al. (2017) na análise de estimativas da radiação solar difusa no Sudoeste da Amazônia. Souza et al. (2013) enfatizaram que o Estado de Mato Grosso é representante de grande complexidade ambiental, condicionada, dentre outros fatores, à disponibilidade hídrica.

Através da observação do comportamento da precipitação, com análise da Tabela 4, que engloba dados históricos representativos da região, agruparam-se os meses do ano em quatro estações de disponibilidade hídrica, de acordo com os seguintes critérios:

1. acima de 300mm mês⁻¹: estação chuvosa (dezembro a fevereiro);
2. abaixo de 10mm mês⁻¹: estação seca (junho a agosto)
3. dentre 10 e 300mm mês⁻¹: estações de transição (chuvosa/seca - março a maio; seca/chuvosa - setembro a novembro).

Tabela 4. Valores médios mensais de variáveis meteorológicas da região Médio-Norte de Mato Grosso (base de dados da Estação Gleba Celeste em Vera/MT – latitude -12,29°; longitude -55,29°), de 1972 a 2010).

Mês	Precipitação (mm mês ⁻¹)	Insolação (horas)	Tmax (°C)	Tmed (°C)	Tmin (°C)	UR (%)	VV (m s ⁻¹)	Nebulosidade (horas)
Jan	310,85	124,98	31,53	24,89	20,74	85,54	1,31	5,45
Fev	348,39	117,77	31,62	24,90	20,61	85,34	1,27	5,43
Mar	288,19	138,50	32,09	25,13	20,68	84,37	1,20	5,24
Abr	120,75	181,79	32,68	25,31	20,27	81,39	1,23	4,56
Mai	25,90	224,62	32,41	24,49	18,57	77,01	1,34	3,86
Jun	7,99	248,88	32,62	23,20	15,99	72,68	1,41	2,48
Jul	4,88	263,22	33,06	22,96	15,26	67,98	1,45	2,01
Ago	9,50	229,44	34,43	24,12	16,42	65,99	1,43	2,30
Set	60,21	154,08	34,35	25,43	18,90	71,18	1,31	3,80
Out	182,23	160,98	33,47	25,76	20,52	78,31	1,39	5,16
Nov	271,04	128,58	32,30	25,28	20,64	83,45	1,30	5,50
Dez	344,54	120,09	31,46	24,93	20,69	85,04	1,32	5,50

Fonte: INMET (2016). Tmax – temperatura máxima do ar; Tmed – temperatura média do ar; Tmin – temperatura mínima do ar; UR – umidade relativa do ar; VV – velocidade do vento média a 10,0m de altura; Nebulosidade – média mensal diária.

Foram calculados o coeficiente de transmissividade atmosférica horário (K_T^h) e as frações radiométricas K_d^h e $K_d^{h'}$ (Eqs. 13, 14 e 15). Posteriormente, foram geradas equações estatísticas das correlações entre a fração difusa de H_G (H_d^h) e o coeficiente de transmissividade atmosférica K_T^h , para os agrupamentos de dados anual e sazonal (quatro estações hídricas). Nesse caso, a série de dados foi dividida em duas partes, na proporção 2:1, para geração e validação das equações, respectivamente, adotando-se um esquema para que os meses de todos os anos fossem contemplados de forma proporcional na geração das equações (foram utilizados 42 meses para geração das equações e 23 para validação, uniformemente distribuídos ao longo dos anos).

$$K_T^h = \frac{H_G^h}{H_0^h} \quad (13)$$

$$K_d^h = \frac{H_d^h}{H_G^h} \quad (14)$$

$$K_d^{h'} = \frac{H_d^h}{H_0^h} \quad (15)$$

3.4 MODELOS DE ESTIMATIVA E INDICATIVOS ESTATÍSTICOS

Com a utilização de dois terços da base de dados foram geradas equações de correlação $K_d^h \times K_T^h$, ajustando-se os pontos dos gráficos a curvas polinomiais de 3ª ordem. Tal forma de ajuste foi escolhida por ser a mais utilizada entre os autores, seguida pela exponencial dupla e a logística (ABREU et al., 2019). Também foram geradas equações de regressão polinomiais para os intervalos de K_T^h : $0 \leq K_T^h < 0,55$ (que engloba as coberturas de céu nublado e parcialmente nublado); e $K_T^h \geq 0,55$ (céu parcialmente aberto e aberto), com vistas a melhorar o desempenho das estimativas. As correlações $K_d^h \times K_T^h$ são exibidas por meio de gráficos de dispersão, com análises em agrupamento total e sazonal de dados, ao longo do período avaliado.

As três correlações propostas neste estudo foram comparadas com 17 modelos de estimativa da radiação difusa horária com base na correlação $K_d^h \times K_T^h$ disponíveis na literatura para as mais diferentes regiões do globo (Tabela 5). Alguns dos modelos são particionados, com equações de estimativa para diferentes

intervalos de K_T , totalizando 42 equações. A tabela apresenta o local para o qual as equações foram desenvolvidas, bem como os intervalos de K_T correspondentes. As equações de Spencer (1982) foram ajustadas para a latitude local.

Tabela 5. Descrição dos modelos de estimativa da radiação difusa horária utilizados neste estudo.

N°	Referência	Local	Intervalo de K_T	Equação
1	Boland et al. (2001)	Geelong, Austrália (-38,09°;144,34°)	$0 \leq K_T \leq 1$	$Kd = \frac{1}{1 + \exp(7,997(K_T - 0,586))}$
2	Boland; Ridley (2008)	Adelaide (-34,92°;138,59° e Geelong, Austrália (-38,09°;144,34°)	$0 \leq K_T \leq 1$	$Kd = \frac{1}{1 + \exp(-5 + 8,6K_T)}$
3	Boland; Ridley (2008) ajustada por Marques Filho et al. (2016)	Rio de Janeiro, Brasil (-22,86°;-43,23°)	$0 \leq K_T \leq 1$	$Kd = \frac{1}{1 + \exp(-4,90 + 8,78K_T)}$
4	Erbs et al. (1982)	EUA (31,08° a 42,42°; -71,48° a -121,70°)	$K_T \leq 0,22$	$Kd = 1 - 0,09K_T$
5	Erbs et al. (1982)	EUA	$0,22 < K_T \leq 0,8$	$Kd = 0,9511 - 0,1604K_T + 4,388K_T^2 - 16,638K_T^3 + 12,336K_T^4$
6	Erbs et al. (1982)	EUA	$K_T > 0,8$	$Kd = 0,165$
7	Furlan et al. (2012)	São Paulo, Brasil (-23,56°;-46,73°)	$K_T < 0,228$	$Kd = 0,961$
8	Furlan et al. (2012)	São Paulo, Brasil	$K_T \geq 0,228$	$Kd = 1,337 - 1,65K_T$
9	Jacovides et al. (2006)	Athalassa, Chipre (34,61° a 35,61°; 32° a 34,5°)	$K_T \leq 0,1$	$Kd = 0,987$
10	Jacovides et al. (2006)	Athalassa, Chipre	$0,1 < K_T \leq 0,8$	$Kd = 0,94 + 0,937K_T - 5,01K_T^2 + 3,32K_T^3$
11	Jacovides et al. (2006)	Athalassa, Chipre	$K_T > 0,8$	$Kd = 0,165$
12	Lam; Li (1996)	Hong Kong, China (22,3°; 114,3°)	$K_T < 0,15$	$Kd = 0,977$
13	Lam; Li (1996)	Hong Kong, China	$0,15 \leq K_T \leq 0,7$	$Kd = 1,237 - 1,361K_T$
14	Lam; Li (1996)	Hong Kong, China	$K_T > 0,7$	$Kd = 0,273$
15	Maduekwe; Chendo (1997)	Lagos, Nigéria (6,46°; 3,40°)	$0 \leq K_T \leq 0,3$	$Kd = 1,021 - 0,151K_T$
16	Maduekwe; Chendo (1997)	Lagos, Nigéria	$0,3 < K_T < 0,8$	$Kd = 1,385 - 1,396K_T$
17	Maduekwe; Chendo (1997)	Lagos, Nigéria	$K_T \geq 0,8$	$Kd = 0,295$

18	Maduekwe; Garba (1999)	Zaria, Nigéria (11,10°; 7,68°)	$K_T \leq 0,18$	$Kd = 1,009 - 0,273K_T$
19	Maduekwe; Garba (1999)	Zaria, Nigéria	$0,18 < K_T < 0,68$	$Kd = 1,077 - 1,136K_T$
20	Maduekwe; Garba (1999)	Zaria, Nigéria	$K_T \geq 0,68$	$Kd = 0,292$
21	Maduekwe; Garba (1999)	Lagos, Nigéria (6,58°; 3,33°)	$K_T \leq 0,20$	$Kd = 1,002 - 0,028K_T$
22	Maduekwe; Garba (1999)	Lagos, Nigéria	$0,20 < K_T < 0,78$	$Kd = 1,336 - 1,369K_T$
23	Maduekwe; Garba (1999)	Lagos, Nigéria	$K_T \geq 0,78$	$Kd = 0,314$
24	Marques Filho et al. (2016)	Rio de Janeiro, Brasil (-22,86°; -43,23°)	$0 \leq K_T \leq 1$	$Kd = 0,13 + 0,86 \frac{1}{1 + \exp(-6,29 + 12,26K_T)}$
25	Oliveira et al. (2002b)	São Paulo, Brasil (-23,56°; -46,73°)	$K_T \leq 0,17$	$Kd = 1$
26	Oliveira et al. (2002b)	São Paulo, Brasil	$0,17 < K_T \leq 0,75$	$Kd = 0,97 + 0,8Kt - 3Kt^2 - 3,1Kt^3 + 5,2Kt^4$
27	Oliveira et al. (2002b)	São Paulo, Brasil	$K_T > 0,75$	$Kd = 0,17$
28	Orgill; Hollands (1977)	Toronto, Canadá (43,65°; -79,38°)	$K_T < 0,35$	$Kd = 1 - 0,249K_T$
29	Orgill; Hollands (1977)	Toronto, Canadá	$0,35 \leq K_T \leq 0,75$	$Kd = 1,577 - 1,84K_T$
30	Orgill; Hollands (1977)	Toronto, Canadá	$K_T > 0,75$	$Kd = 0,177$
31	Reindl et al (1990)	EUA (42,7°; -73,8 e 28,4°; -80,6°) Europa (51,9° a 59,5°; 10° a 12,6°)	$K_T < 0,3$	$Kd = 1,02 - 0,248K_T$
32	Reindl et al (1990)	EUA e Europa	$0,3 \leq K_T \leq 0,78$	$Kd = 1,45 - 1,67K_T$
33	Reindl et al (1990)	EUA e Europa	$K_T > 0,78$	$Kd = 0,147$
34	Soares et al. (2004)	São Paulo, Brasil (-23,56°; -46,73°)	$K_T \leq 0,17$	$Kd = 1$
35	Soares et al. (2004)	São Paulo, Brasil	$0,17 < K_T \leq 0,75$	$Kd = 0,9 + 1,1K_T - 4,5K_T^2 + 0,01K_T^3 + 3,14K_T^4$
36	Soares et al. (2004)	São Paulo, Brasil	$K_T > 0,75$	$Kd = 0,17$
37	Spencer (1982)	Melbourne, Austrália (-37,82°; 144,97°)	$K_T < 0,35$	$Kd = 0,85$
38	Spencer (1982)	Melbourne, Austrália	$0,35 \leq K_T \leq 0,75$	$Kd = 1,352 - 1,668K_T$
39	Spencer (1982)	Melbourne, Austrália	$K_T > 0,75$	$Kd = 0,10$
40	Spencer (1982) ajustada neste estudo	Sinop, Brasil (-11,86°; -55,48°)	$K_T < 0,35$	$Kd = 0,68$
41	Spencer (1982) ajustada neste estudo	Sinop, Brasil	$0,35 \leq K_T \leq 0,75$	$Kd = 1,08 - 1,35K_T$
42	Spencer (1982) ajustada neste estudo	Sinop, Brasil	$K_T > 0,75$	$Kd = 0,07$

Na avaliação do desempenho das equações e modelos de estimativa foram empregados os indicativos estatísticos MBE (*Mean Bias Error*), RMSE (*Root Mean Square Error*), “d” de Willmott e o coeficiente de determinação (R^2) (Eqs. 16 a 19), indicados por Abreu et al. (2019) como os mais utilizados.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (16)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2} \quad (18)$$

$$R^2 = \frac{SQ_{Reg}}{SQ_{TOTAL}} \quad (19)$$

em que: P_i - valores estimados; O_i - valores medidos; N - número de observações; $|P_i|$ - valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}_i$; $|O_i|$ - valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}_i$; SQ obtidos da ANOVA da regressão linear simples.

Os valores de MBE e RMSE representam, respectivamente, o desvio das médias e o valor real do erro produzido pelo modelo. Valores negativos de MBE indicam subestimativas do modelo testado, e vice-versa. Quanto menor o valor absoluto de MBE, melhor a performance do modelo testado; o mesmo aplica-se ao RMSE. O índice de concordância “d” reflete a precisão dos valores estimados em relação aos observados. Assume valores entre 0 e 1 sendo que, quanto mais próximo a 1, mais perfeita a concordância. Para o coeficiente de determinação, medida de quão bem o modelo descreve os dados observados, também quanto maior o valor, mais adequado é o modelo proposto (WILLMOTT, 1981; STONE, 1993; SCHNEIDER et al., 2010).

Com intuito de ordenar o desempenho dos modelos de estimativa testados, empregou-se o método dos valores de posição dos indicativos estatísticos (V_p), no qual atribuiu-se pesos de 1 a “n” para cada indicador estatístico em cada modelo, onde “n” corresponde ao número de modelos testados. Ao final, o melhor modelo considerado foi aquele que apresentou o menor somatório de pesos (menor V_p acumulado – $V_{p_{ac}}$) (SOUZA et al., 2015).

Os modelos foram classificados por desempenho dentro de cinco grupos, de acordo com o valor de V_p acumulado:

$V_{p_{ac}.1}$ – modelos contínuos;

$V_{p_{ac}.2}$ – todos os modelos;

$V_{p_{ac}.3}$ – modelos desenvolvidos para condições de céu nublado;

$V_{p_{ac}.4}$ – condições de céu intermediárias;

$V_{p_{ac}.5}$ – condições de céu aberto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO OBSERVACIONAL

Na Figura 6 é apresentada a evolução diurna anual de H_0^h , H_G^h e H_{DF}^h e seus respectivos desvios-padrão. Observa-se que o comportamento das radiações global e difusa é o mesmo da radiação incidente no topo da atmosfera, com valores máximos ao meio dia solar e mínimos no nascer e pôr do Sol. Os valores médios de H_0^h , H_G^h e H_{DF}^h às 12 horas são $4,57 \pm 0,03$; $2,25 \pm 0,12$ e $0,53 \pm 0,21$ $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectivamente. Nas horas de Sol nascente e poente, os valores médios observados para H_0^h são $0,35 \pm 0,07$ e $0,41 \pm 0,06$ $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, e para H_G^h são de $0,04 \pm 0,03$ e $0,08 \pm 0,02$ $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$; sendo a radiação global incidente nestes horários praticamente composta somente pela porção difusa ($H_{DF}^h = 0,03 \pm 0,04$ e $0,06 \pm 0,00$ às 6 e 18 horas, respectivamente).

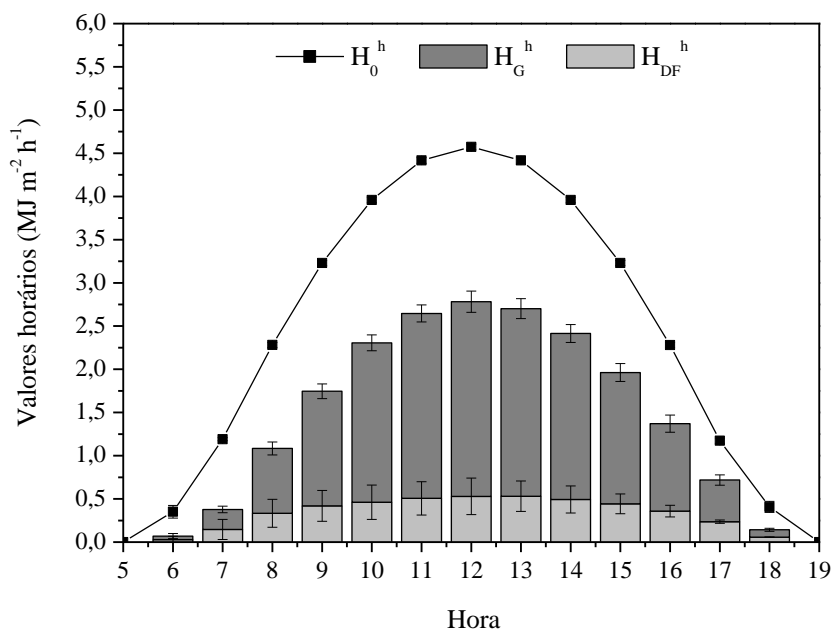


Figura 6. Evolução diurna anual da radiação extraterrestre (H_0^h), global (H_G^h) e difusa (H_{DF}^h), e respectivos desvios-padrão para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.

A evolução diurna sazonal de H_0^h , H_G^h e H_{DF}^h está ilustrada na Figura 7. O fotoperíodo durante as estações seca e transição chuvosa/seca é menor devido às variações astronômicas. Os valores médios sazonais de H_G^h e H_{DF}^h seguem o mesmo comportamento de H_0^h , com máximos para a radiação no topo da atmosfera durante a

estação chuvosa (Dez/Jan/Fev) e mínimos na estação seca (Jun/Jul/Ago), ambos às 12 horas (médias de H_0^h : $4,98 \pm 0,01$ e $4,07 \pm 0,00$ MJ m⁻² h⁻¹, respectivamente).

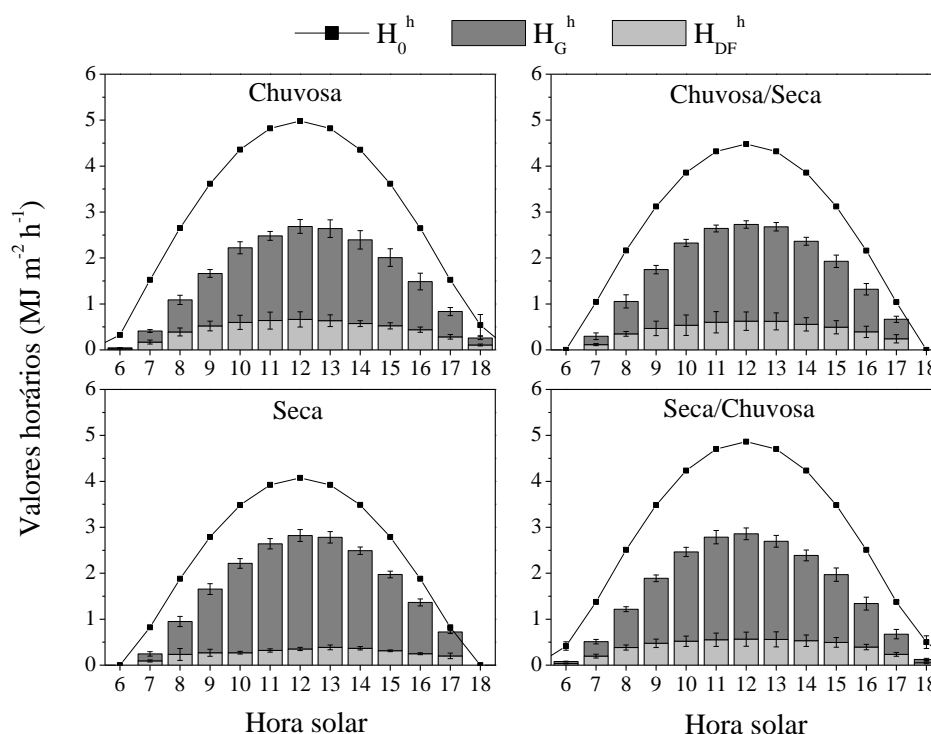


Figura 7. Evolução diurna sazonal da radiação no topo da atmosfera (H_0^h), global (H_G^h) e difusa (H_{DF}^h), e respectivos desvios-padrão para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.

Para radiação global, os valores médios máximos foram observados ao meio dia solar da estação seca $2,47 \pm 0,13$ MJ m⁻² h⁻¹. Comportamento semelhante é observado por Marques Filho et al. (2016) em estudo conduzido na cidade do Rio de Janeiro-RJ ($-22,86^\circ; -43,23^\circ$), justificado pelo fato de que a redução na precipitação no período seco está relacionada ao decréscimo na cobertura de nuvens, o que eleva os níveis de H_G^h .

Devido à alta nebulosidade durante a estação chuvosa, as menores médias de H_G^h e as maiores de H_{DF}^h (ao meio dia solar) também são observadas neste período, $2,02 \pm 0,15$ e $0,66 \pm 0,17$ MJ m⁻² h⁻¹, respectivamente. As médias mínimas de H_{DF}^h ao meio dia solar ocorrem no período seco $0,35 \pm 0,04$ MJ m⁻² h⁻¹. Os menores valores de desvio-padrão para radiação global e difusa são constatados durante a estação seca, devido à maior estabilidade das condições atmosféricas.

Quando comparadas as médias anuais de H_{DF}^h nos períodos matutino e vespertino observa-se maior valor durante a tarde ($H_{DF_{mat.}}^h = 0,27 \pm 0,21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e $H_{DF_{vesp.}}^h = 0,33 \pm 0,21 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). O aquecimento do solo, e consequentemente a evapotranspiração, são máximos no período vespertino, o que ocasiona maior atenuação da radiação solar pela elevada concentração de vapor d'água presente na atmosfera.

A radiação difusa apresenta comportamento semelhante ao da radiação global nas estações hídricas, com exceção da época seca, sendo que, nesse caso, não ocorre simetria entre período matutino e vespertino (Figura 8). Esse comportamento pode ser decorrente de processos de multireflexão associados a elevação do ângulo zenital, principalmente nas primeiras horas de exposição solar, com redução da dispersão de partículas em suspensão na atmosfera.

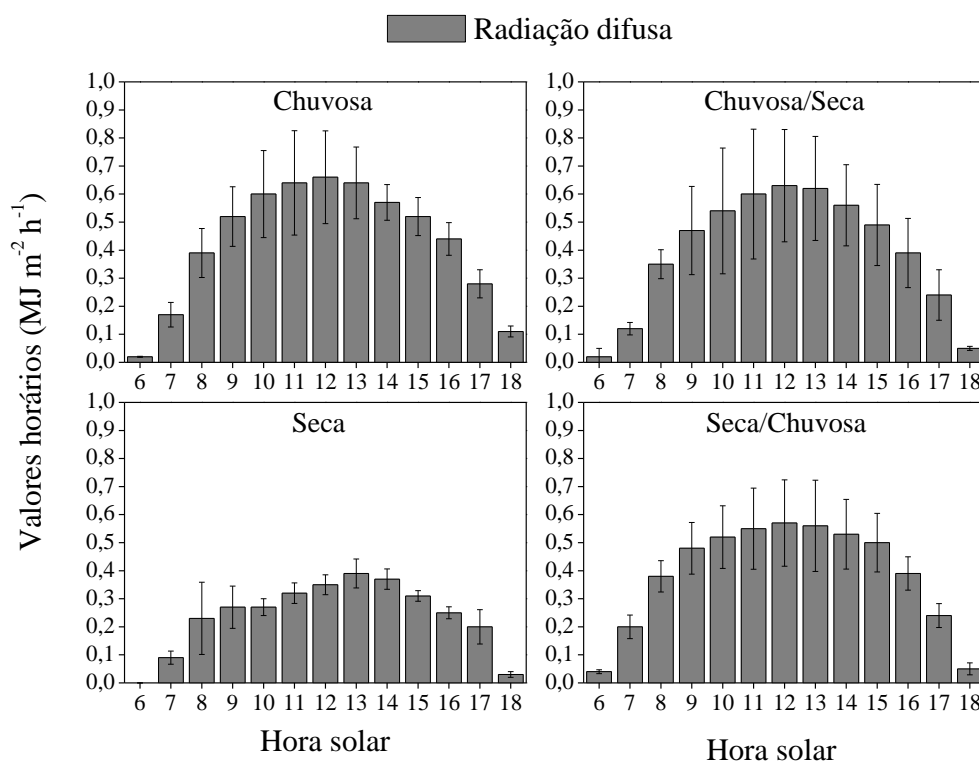


Figura 8. Evolução diurna sazonal da radiação difusa (H_{DF}^h) e respectivos desvios-padrão para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.

Na Figura 9 está representada a evolução diurna anual das frações radiométricas K_T^h , K_d^h e $K_{d'}^h$. O valor máximo de transmissividade atmosférica da radiação global ocorre ao meio dia solar, com níveis de radiação incidentes na superfície terrestre correspondentes à aproximadamente 50% de H_0^h . Já os mínimos são observados ao nascer do Sol. Para melhor análise da transmissividade atmosférica ao longo do ano, a Figura 10 apresenta a evolução diurna sazonal de K_T^h e das frações radiométricas K_d^h e $K_{d'}^h$ durante as quatro estações hídricas.

K_d^h apresenta comportamento inverso a K_T^h , com maiores valores no início e final do dia. Nestes horários a radiação global é composta predominantemente pela difusa, correspondente a cerca de 70% dos níveis energéticos (67,66 e 75,22%, respectivamente). Os valores médios horários de K_d^h oscilam de 0,15 a 0,78, com maior média horária na época chuvosa ($0,53 \pm 0,13$) devido à maior concentração de vapor d'água na atmosfera. Os menores valores de desvios-padrão para K_d^h na estação seca são justificáveis pela maior estabilidade nas condições atmosféricas.

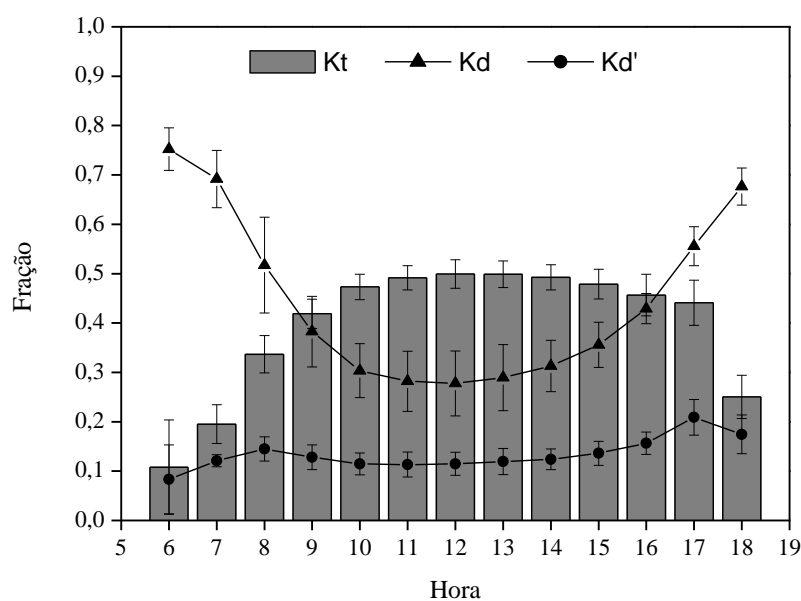


Figura 9. Evolução diurna anual de K_T^h , K_d^h e $K_{d'}^h$, para a região de Sinop-MT, dentre 2011-2016.

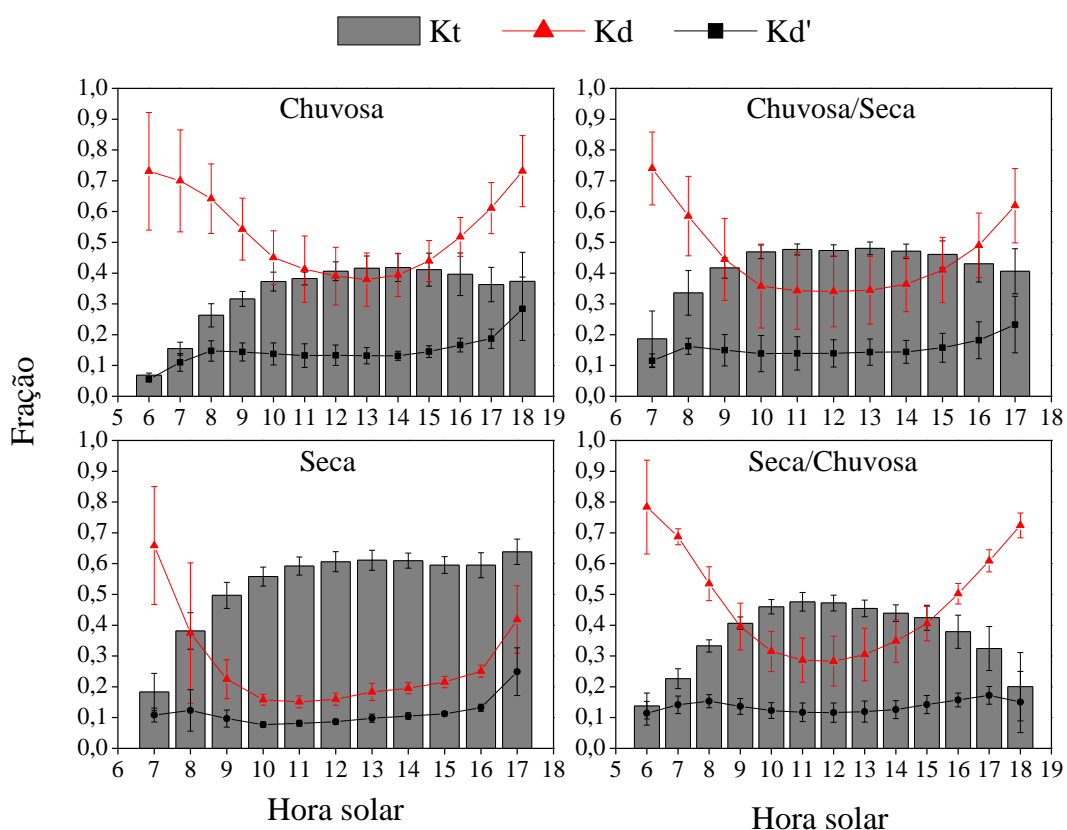


Figura 10. Evolução diurna sazonal de K_T^h , K_d^h e $K_{d'}^h$, na região de Sinop-MT, para as quatro estações hídricas.

O coeficiente de transmissividade atmosférica K_T^h oscila de 0,07 a 0,64, com maior valor médio na época da seca ($0,53 \pm 0,14$) devido à baixa nebulosidade, que permite maior passagem da radiação direta. O menor valor médio, consequentemente, é observado na época chuvosa, $0,33 \pm 0,11$, enquanto nas épocas de transição K_T^h varia de 0,36 a 0,42.

Através da análise dos valores médios de K_T^h , e de acordo com a classificação de cobertura de céu estabelecida por Escobedo et al. (2009), pode-se afirmar que o comportamento do céu de Sinop, na seca varia de nublado a parcialmente nublado no início do dia, e no decorrer das horas apresenta-se parcialmente aberto. Já na época chuvosa, o céu permanece nublado ou parcialmente nublado durante todo o dia.

Em todas as estações hídricas, o céu apresenta-se nublado no início da manhã, com redução do coeficiente de transmissividade atmosférica ao final do dia, exceto na época seca, na qual os valores de K_T^h continuam altos. Marques Filho et al. (2016) afirmam que os altos valores de K_T^h no final do dia se devem às reflexões de

superfície devido aos baixos valores do ângulo de elevação solar nesta época do ano. Na Tabela 6 são descritos os valores médios horários das componentes e frações da radiação solar às 12 horas, nas diferentes estações hídricas.

Tabela 6. Valores médios horários de H_0^h , H_G^h e H_{DF}^h e das frações radiométricas K_T^h , K_d^h e $K_{d'}^h$, ao meio dia solar nas diferentes estações hídricas, para Sinop/MT dentre 2011 e 2016.

Componentes	Estação hídrica			
	Chuvosa (MJ m ⁻² h ⁻¹)	Chuvosa/Seca (MJ m ⁻² h ⁻¹)	Seca (MJ m ⁻² h ⁻¹)	Seca/Chuvosa (MJ m ⁻² h ⁻¹)
H_0^h	4,98±0,01	4,48±0,01	4,07±0,00	4,86±0,02
H_G^h	2,02±0,15	2,10±0,08	2,47±0,13	2,29±0,13
H_{DF}^h	0,66±0,17	0,63±0,20	0,35±0,04	0,57±0,15
Frações	Chuvosa	Chuvosa/Seca	Seca	Seca/Chuvosa
K_T^h	0,41±0,03	0,47±0,02	0,61±0,03	0,47±0,03
K_d^h	0,39±0,09	0,34±0,12	0,16±0,02	0,28±0,08
$K_{d'}^h$	0,13±0,03	0,14±0,04	0,09±0,01	0,12±0,03

Zamadei et al. (2013) observaram a evolução diurna de K_T no município de Juína-MT, distante 360 km de Sinop-MT, entre 10/2007 e 01/2013, e verificaram que os maiores valores de K_T^h ocorreram quando o Sol apresentava ângulo de elevação superior a 45° em relação à superfície, sendo superiores no inverno (período seco). Assim como observado neste estudo, os maiores desvios ocorreram no período vespertino, indicando o aumento do conteúdo de vapor d'água presente na atmosfera decorrente do processo de evapotranspiração ocorrido na região ao longo do dia. Ainda segundo esses autores, as maiores frequências de céu claro incidiram nos meses de maio, junho e julho (período seco), já no período de novembro a março observou-se condição de céu nublado (período chuvoso), comportamento semelhante ao observado para Sinop.

Na Tabela 7 é possível observar o comportamento do céu ao longo do ano através da frequência de K_T^h dentro de cada estação hídrica. Na estação seca, predomina a condição de céu parcialmente aberto (31,22%), enquanto que no restante do ano, ocorre maior frequência de horários com condições de céu nublado (acima de 42%).

Tabela 7. Frequências das condições de céu (base horária) de acordo com a classificação de Escobedo et al. (2009) em Sinop –MT, dentre 2011 e 2016.

Estação hídrica	Condição de céu			
	I (Nublado)	II (Parcialmente nublado)	III (Parcialmente aberto)	IV (Aberto)
Chuvosa	54,90	31,21	9,54	4,35
Chuvosa/Seca	42,56	31,60	19,63	6,21
Seca	22,53	22,97	31,22	23,28
Seca/Chuvosa	42,45	39,47	14,92	3,16

4.2 MODELAGEM E ESTIMATIVA

A correlação $K_d^h \times K_T^h$ é exibida na Figura 11. Conforme observado e descrito na literatura, com o aumento do índice de claridade (K_T), a fração difusa tende a diminuir, visto que ocorre a diminuição dos efeitos isotrópicos (SOUZA, 2012).

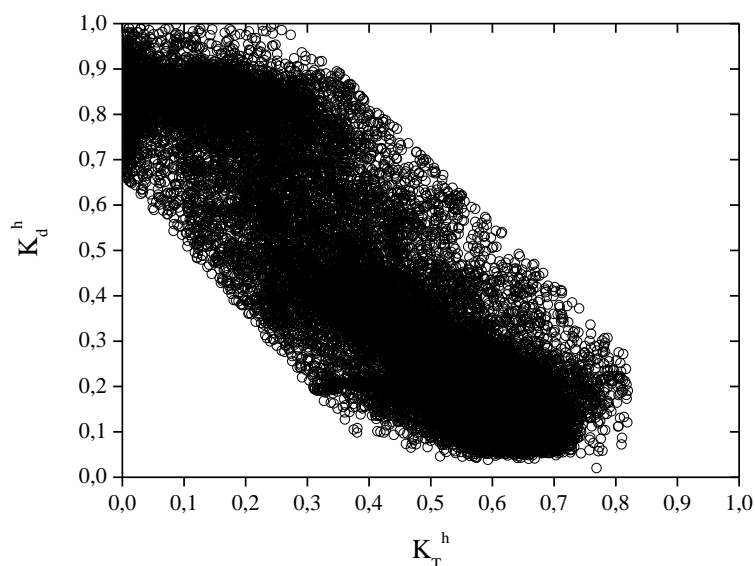


Figura 11. Correlação $K_d^h \times K_T^h$ para a cidade de Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.

A Figura 12 apresenta o comportamento da correlação nas diferentes estações hídricas. Observa-se que na estação seca a nuvem de pontos é mais concentrada para valores de K_T^h superiores a 0,4; visto que nesta estação predominam as condições de céu II, III e IV (Tabela 7). Nas estações chuvosa e transição chuvosa/seca há maior dispersão dos dados, indicando que para o mesmo valor de K_T^h há grande variabilidade dos valores da fração difusa. Borges et al. (2017) observaram

comportamento semelhante em estudo realizado no Estado de Rondônia ($-10,75^\circ$; $-62,35^\circ$), atribuindo tal fato às maiores variações atmosféricas (nebulosidade) que ocorrem durante as estações.

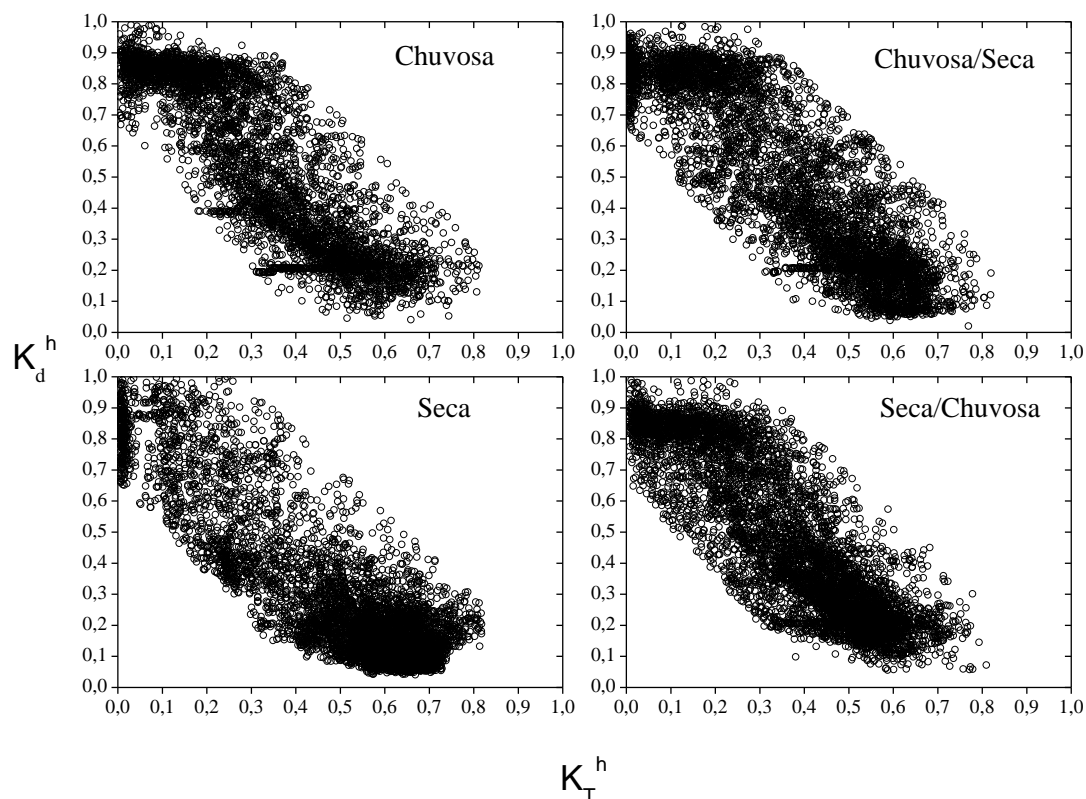


Figura 12. Correlação $K_d^h \times K_T^h$ sazonal para a cidade de Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.

O aumento da variabilidade da fração difusa também pode ser atribuído a um fenômeno denominado “efeito da lacuna de nuvem” (*cloud gap effect*, em inglês) (DUCHON; O’MALLEY, 1999; GU et al., 1999; OLIVEIRA et al., 2007). De acordo com os autores, em um dado ângulo de elevação solar, uma diminuição no coeficiente de transmissividade atmosférica geralmente indica um aumento na espessura da nuvem. No entanto, há exceção quando as nuvens não são distribuídas continuamente no céu. As superfícies do solo iluminadas pelo Sol, localizadas no final de caminhos de feixes solares que passam por aberturas formadas entre as nuvens, podem receber maior irradiância do que sob um céu claro, devido ao espalhamento e reflexão do feixe de radiação pela lateral das nuvens adjacentes. Esse

efeito pode elevar em até 20% a irradiação incidente no solo. Em suma, pode aumentar o K_T sem a indicação de que realmente o céu esteja aberto.

Se compararmos a amplitude da curva $K_d^h \times K_T^h$ gerada neste estudo (Figura 11) com a de outras regiões disponíveis na literatura, é possível perceber que a maior quantidade de pontos para $K_T < 0,2$ está concentrada entre 0,8-0,9 K_d , enquanto que em outros trabalhos este valor costuma ser acima de 0,9. Alguns autores geram equações de regressão seccionadas, particionando este intervalo de K_T com valores fixos para K_d (LAM; LI, 1996; JACOVIDES et al., 2006), inclusive no Brasil (OLIVEIRA et al., 2002b; SOARES et al., 2004; FURLAN et al., 2012).

Os menores valores da fração difusa quando K_T tende a 0, podem ser atribuídos ao menor brilho horizontal nesta região quando comparado a locais de altas altitudes e com relevo acidentado. De acordo com Perez; Seals (1987), a zona de horizonte é infinitesimalmente fina a 0° de elevação.

Nas Figuras 13 e 14 observam-se as correlações estabelecidas para o intervalo de K_T de 0 a 1, nas bases anual e sazonal. Na Tabela 8 são descritos os valores dos coeficientes de regressão das equações de estimativa geradas para os diferentes intervalos de K_T , nos agrupamentos de dados anual e sazonal. Os modelos anuais gerados para estes intervalos são apresentados na Tabela 9.

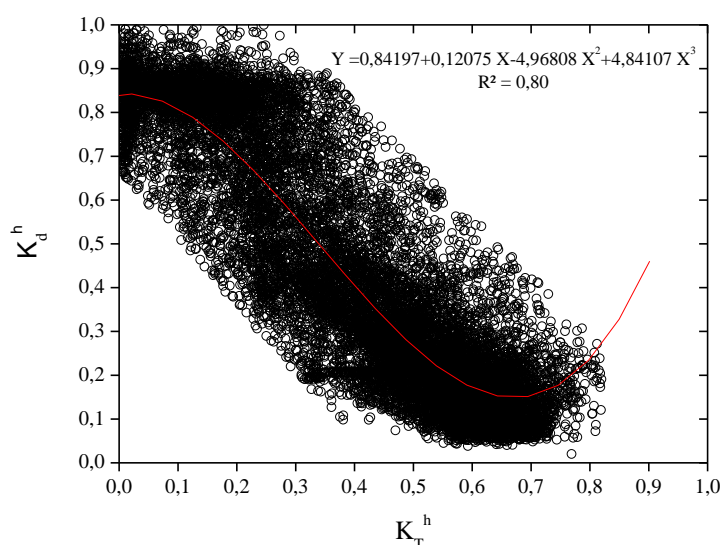


Figura 13. Equação anual gerada para a correlação $K_d^h \times K_T^h$, Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.

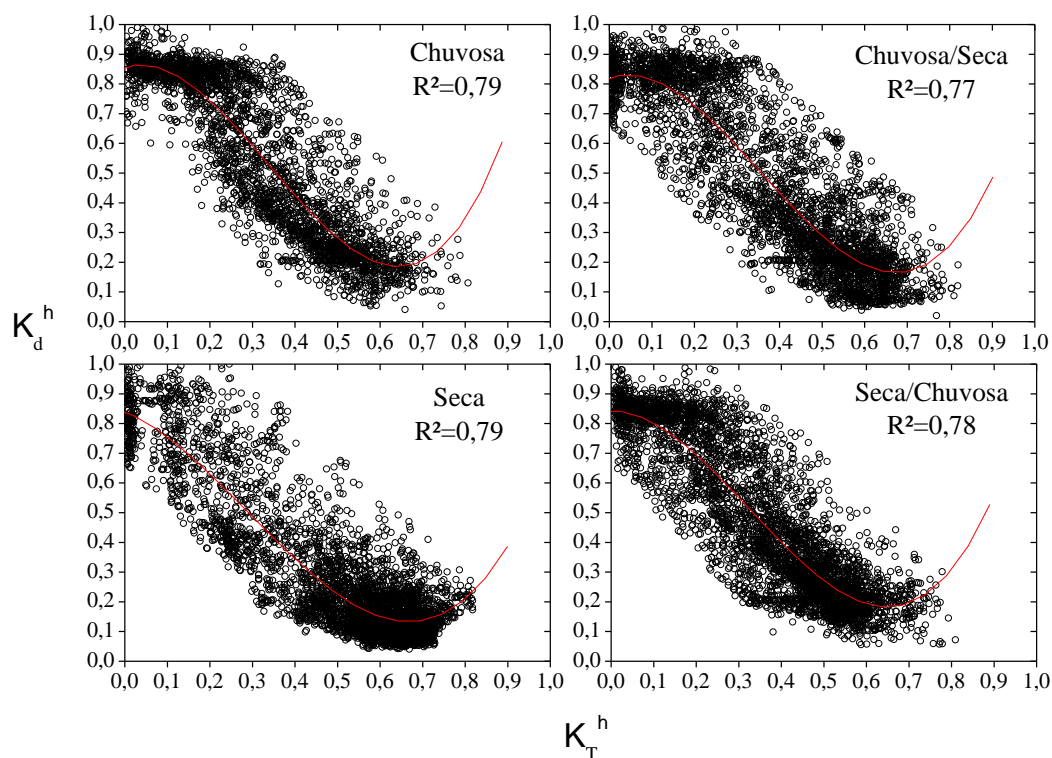


Figura 14. Equações sazonais geradas através da correlação K_d^h x K_T^h , Sinop-MT, dentre os anos de 2011 e 2016.

Tabela 8. Coeficientes de regressão das equações de estimativa da radiação solar difusa horária, para a região de Sinop-MT, geradas através da correlação K_d^h x K_T^h .

Intervalo de K_T^h	Período	a0	a1	a2	a3	R ²
$0 \leq K_T^h \leq 1$	Anual	0,8420	0,1208	-4,9681	4,8411	0,8001
	Seca	0,8401	-0,5850	-3,0117	3,4476	0,7927
	Seca/chuvosa	0,8434	0,0107	-4,7464	4,8705	0,7790
	Chuvosa	0,8567	0,4388	-6,2389	6,1148	0,7926
	Chuvosa/Seca	0,8209	0,4635	-5,7058	5,3027	0,7737
$0 \leq K_T^h < 0,55$	Anual	0,8249	0,5270	-6,8417	7,0930	0,7191
	Seca	0,8332	-0,3581	-4,2099	5,0256	0,7097
	Seca/chuvosa	0,8325	0,2254	-5,6085	5,7841	0,7338
	Chuvosa	0,8333	0,9628	-8,6778	9,1119	0,7436
$K_T^h \geq 0,55$	Chuvosa/Seca	0,8041	0,8778	-7,5616	7,4359	0,6989
	Anual	1,79465	-4,97788	4,05925	-0,43041	0,0453
	Seca	1,03061	-1,37255	-1,96688	3,00588	0,0430
	Seca/chuvosa	8,8134	-39,8605	61,39303	-31,453	0,0249
	Chuvosa	3,11025	-13,0974	19,72406	-9,9342	0,0081
	Chuvosa/Seca	2,4911	-9,79269	14,20117	-7,06672	0,0315

Tabela 9. Modelos de estimativa da radiação solar difusa horária, para a região de Sinop-MT, gerados através da correlação $K_d^h \times K_T^h$ na base anual.

Modelo	Intervalo de K_T	Equação
1	$0 \leq K_T \leq 1$	$Kd = 0,84197 + 0,12075 K_T - 4,96808 K_T^2 + 4,84107 K_T^3$
2a	$K_T < 0,55$	$Kd = 0,82492 + 0,52699 K_T - 6,84166 K_T^2 + 7,09304 K_T^3$
2b	$K_T \geq 0,55$	$Kd = 1,79465 - 4,97788 K_T + 4,05925 K_T^2 - 0,43041 K_T^3$

As equações geradas para todo o intervalo de K_T^h (0 a 1) apresentaram melhor desempenho que as seccionadas, com R^2 acima de 0,77. Neste mesmo intervalo, as estações seca e chuvosa apresentaram melhores ajustes, o que indica que as condições atmosféricas nas épocas de transição são mais instáveis, dificultando estimativas. Essa instabilidade pode ser justificada pela elevada carga de aerossóis provenientes de queima de biomassa, atividade antrópica de maior incidência nos meses de abril e setembro, correspondentes aos períodos em questão.

Os valores dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott para as equações de estimativa geradas podem ser observados na Tabela 10. As equações sazonais, nos intervalos de $0 \leq K_T \leq 1$ e $0 \leq K_T < 0,55$, apresentaram tendência a subestimar os valores da radiação difusa durante o ano. Comportamento semelhante foi observado por Oliveira et al. (2002) e Borges et al. (2017) nas correlações estabelecidas em seus estudos. No intervalo de $K_T \geq 0,55$, ocorreu inversão desse comportamento, com tendência a superestimativas.

Com relação às equações anuais, quando aplicadas nas estações hídricas, também observou-se propensão a subestimativas dos valores de H_{DF}^h , em especial para $K_T \geq 0,55$. Os valores de RMSE variaram de 112,8 a 206,3 $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, com maiores índices de espalhamento constatados na estação chuvosa, decorrentes da alta variação nas condições atmosféricas.

As equações sazonais apresentaram melhores desempenhos estatísticos quando comparadas às anuais nos mesmos períodos, com exceção da estação chuvosa nos intervalos $0 \leq K_T \leq 1$ e $0 \leq K_T < 0,55$, nos quais, a equação anual desenvolvida para cada partição apresentou melhores indicativos estatísticos do que a equação para cada período específico.

Tabela 10. Indicativos estatísticos das equações de estimativa da radiação solar difusa horária, para a região de Sinop-MT, geradas através da correlação $K_d^h \times K_T^h$ em diferentes intervalos.

Intervalo de K_T	Período	Sazonais			Anual		
		MBE (kJ m ⁻² h ⁻¹)	RMSE (kJ m ⁻² h ⁻¹)	d	MBE (kJ m ⁻² h ⁻¹)	RMSE (kJ m ⁻² h ⁻¹)	D
$0 \leq K_T \leq 1$	Seca	-1,3193	128,8759	0,8146	34,8982	135,2091	0,8262
	Seca/chuvosa	-8,4224	155,0778	0,8813	-20,0378	158,9490	0,8727
	Chuvosa	43,3050	190,1991	0,8441	9,0484	183,1416	0,8418
	Chuvosa/Seca	-12,2662	179,9711	0,8700	-38,2923	184,0373	0,8566
	Anual				-2,7689	164,4550	0,8620
$0 \leq K_T < 0,55$	Seca	-9,5501	112,7701	0,8995	21,3870	113,5406	0,9116
	Seca/chuvosa	-7,7196	152,1405	0,8965	-6,0579	152,7036	0,8959
	Chuvosa	53,6976	189,7712	0,8534	30,0348	179,8730	0,8592
	Chuvosa/Seca	-19,0742	173,9316	0,8957	-38,8433	178,2260	0,8850
	Anual				0,0482	160,7589	0,8918
$K_T \geq 0,55$	Seca	5,7624	141,0145	0,5982	50,6720	152,9184	0,6318
	Seca/chuvosa	1,7279	165,3808	0,5798	-71,2616	177,6153	0,5382
	Chuvosa	-34,0317	155,1230	0,7406	-112,2100	186,3051	0,6665
	Chuvosa/Seca	14,6280	206,3153	0,5297	-35,6082	203,5052	0,5082
	Anual				-8,0671	171,5742	0,6583

Com relação às equações anuais aplicadas para todo o conjunto de dados, há tendência para subestimativas nos intervalos $0 \leq K_T \leq 1$ e $K_T \geq 0,55$, e superestimativas dos valores quando $0 \leq K_T < 0,55$. O espalhamento em todos os intervalos de K_T é de cerca de $160 \text{ kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, e os valores do índice de ajustamento são melhores para os intervalos $0 \leq K_T \leq 1$ e $0 \leq K_T < 0,55$.

Na Tabela 11 é possível observar os indicativos estatísticos dos dezenove modelos testados, inclusive aqueles gerados neste estudo. As equações foram ordenadas por desempenho conforme os valores de V_p acumulado (sétima à décima primeira coluna).

Tabela 11. Indicativos estatísticos de desempenho dos modelos de estimativa da radiação difusa horária aplicados para dados do município de Sinop-MT, dentre 2011 e 2016.

Nº	Autores	R ²	MBE (kJ m ⁻² h ⁻¹)	RMSE (kJ m ⁻² h ⁻¹)	d	Ordem V _{pac.1}	Ordem V _{pac.2}	Ordem V _{pac.3}	Ordem V _{pac.4}	Ordem V _{pac.5}
1	Boland et al. (2001)	0,66	411,04	542,52	0,5761	5	40			
2	Boland; Ridley (2008)	0,65	405,76	537,79	0,5804	4	38			
3	Boland; Ridley (2008) ajustada	0,67	355,46	479,92	0,6195	3	34			
4	Erbs et al. (1982)	0,13	49,66	92,55	0,9524		13	3		
5	Erbs et al. (1982)	0,52	502,64	599,13	0,4815		41		8	
6	Erbs et al. (1982)	-	-22,50	74,53	0,9351		6			1
7	Furlan et al. (2012)	-	47,80	92,46	0,9545		11			
8	Furlan et al. (2012)	0,55	323,65	414,50	0,5959		31		3	
9	Jacovides et al. (2006)	-	11,09	19,37	0,9874		1			
10	Jacovides et al. (2006)	0,68	371,30	470,10	0,5814		35		4	
11	Jacovides et al. (2006)	-	-22,50	74,53	0,9351		7			1
12	Lam; Li (1996)	-	21,22	38,22	0,9813		2			
13	Lam; Li (1996)	0,66	388,16	478,45	0,5571		39		6	
14	Lam; Li (1996)	-	235,05	300,58	0,6069		28			10
15	Maduekwe; Chendo (1997)	0,27	107,56	193,01	0,8892		22	5		
16	Maduekwe; Chendo (1997)	0,43	673,86	752,01	0,3855		45		10	
17	Maduekwe; Chendo (1997)	-	-16,69	53,78	0,7335		10			3
18	Maduekwe; Garba (1999)	0,08	30,53	55,73	0,9735		3	1		
19	Maduekwe; Garba (1999)	0,62	334,18	426,01	0,5814		33		4	
20	Maduekwe; Garba (1999)	-	296,55	357,16	0,8663		26			8
21	Maduekwe; Garba (1999)	0,10	42,49	78,22	0,9592		8	2		
22	Maduekwe; Garba (1999)	0,60	552,21	644,74	0,4500		43		9	
23	Maduekwe; Garba (1999)	-	148,53	201,72	0,9432		20			6
24	Marques Filho et al. (2016)	0,66	323,39	444,28	0,6473	2	30			
25	Oliveira et al. (2002b)	-	30,63	54,32	0,9724		4			
26	Oliveira et al. (2002b)	0,63	378,78	465,83	0,5704		37		5	
27	Oliveira et al. (2002b)	-	-25,74	110,94	0,9012		15			5
28	Orgill; Hollands (1977)	0,37	141,32	258,74	0,8397		25	6		2
29	Orgill; Hollands (1977)	0,37	602,34	675,65	0,4151		44		10	

30	Orgill; Hollands (1977)	-	-14,90	109,15	0,9075		9	
31	Reindl et al (1990)	0,27	99,99	181,92	0,8980		21	4
32	Reindl et al (1990)	0,44	525,15	602,22	0,4572		42	9
33	Reindl et al (1990)	-	-73,05	118,859	0,9255		18	4
34	Soares et al. (2004)	-	30,63	54,323	0,9724		5	
35	Soares et al. (2004)	0,63	329,15	416,25	0,6053		32	2
36	Soares et al. (2004)	-	-25,74	110,94	0,9012		16	4
37	Spencer (1982)	-	103,37	218,12	0,8707		23	
38	Spencer (1982)	0,38	357,84	441,05	0,5447		36	7
39	Spencer (1982)	-	-134,08	185,07	0,6875		24	7
40	Spencer (1982) ajustada	-	29,64	143,53	0,9255		17	
41	Spencer (1982) ajustada	0,38	181,71	285,48	0,6659		27	3
42	Spencer (1982) ajustada	-	-180,52	231,66	0,5804		29	9
43	Modelo gerado 1	0,79	6,32	157,93	0,8707	1	14	
44	Modelo gerado 2	0,70	6,52	151,16	0,9040		12	1
45	Modelo gerado 2	0,05	7,51	171,60	0,6351		19	5

Os coeficientes de determinação dos modelos apresentaram valores máximos em torno de 0,7. Partições de tempo menores respondem com mais sensibilidade e rapidez às mudanças atmosféricas, gerando maior variabilidade e detalhamento da distribuição pontual da radiação solar, o que dificulta a estimativa. Estes efeitos são minimizados quando os valores são integrados em partições diárias e mensais (DAL PAI, 2005; SOUZA, 2012). Os modelos testados tendem a superestimar a fração difusa, com variações de -180,52 a 673,86 $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ para MBE. Já para RMSE, os menores e maiores valores de espalhamento observados foram de 19,37 e 752,01 $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectivamente.

As equações de Spencer (1982) ajustadas apresentaram melhor performance em relação às originais desenvolvidas para Melbourne, Austrália (N^{os}. 37, 38 e 39); exceto para a faixa de K_T superior a 0,75. Confirmando, portanto, as conclusões do autor acerca das influências da latitude nos valores da radiação difusa.

Dentre os cinco modelos contínuos testados, que predizem estimativas para todo o intervalo de K_T (N^{os}. 1, 2, 3, 24 e 43); os melhores ajustes foram observados pelo gerado neste estudo e o elaborado por Marques Filho et al. (2016) (Tabela 11 – Vp_{ac.1}). O modelo, desenvolvido para a cidade do Rio de Janeiro-RJ, tende a superestimar os valores da radiação difusa (323,39 $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$). É interessante citar

que os autores também aplicaram alguns dos modelos aqui empregados (OLIVEIRA et al., 2002b; JACOVIDES et al., 2006; BOLAND; RIDLEY, 2008; BOLAND; RIDLEY, 2008 ajustada) para estimar a radiação difusa local, e observaram melhor desempenho estatístico ao utilizar a correlação desenvolvida. De acordo com os mesmos, o modelo de correlação baseado na função sigmoide se ajustou melhor aos dados em comparação aos demais.

Singh (2016) comparou a eficiência de modelos contínuos e particionados na estimativa da radiação difusa, e chegou à conclusão de que os modelos contínuos apresentam desempenho similar ou superior aos particionados. Quando comparados os modelos testados neste estudo, contínuos e particionados, é possível confirmar a tese levantada por Singh. Dentre as 45 equações, os cinco modelos contínuos ficaram classificados em 14°, 30°, 34°, 38° e 40° lugares de acordo com V_p acumulado (Tabela 11 – $V_{p_{ac.2}}$). As equações que estimam K_d em coberturas de céu intermediárias apresentaram melhor desempenho que as demais do mesmo modelo.

Para análise dos modelos que apresentam equações de regressão seccionadas para diferentes intervalos do coeficiente de transmissividade atmosférica, foram desprezadas aquelas que determinam valores fixos para K_d . Posteriormente, foi analisado o desempenho quanto à estimativa da fração difusa dentro de cada partição.

Para condições de céu nublado, seis equações foram analisadas (N^{os} . 4, 15, 18, 21, 28 e 31), tendo os dois modelos gerados por Maduekwe; Garba (1999) exibidos as melhores performances (Tabela 11 – $V_{p_{ac.3}}$). As equações apesar de apresentarem coeficientes de determinação baixos (0,08 e 0,10), exibiram ótimas concordâncias (0,9735 e 0,9592) e baixos índices de espalhamento (55,73 e 78,22 $\text{kJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, respectivamente). Oliveira (2016) afirma que o coeficiente de determinação não deve ser utilizado individualmente na análise de desempenho, mas pode auxiliar na tomada de decisão quando se compara diferentes modelos de regressão.

Quatorze equações testadas correspondem a condições de céu intermediárias (parcialmente nublado/aberto), dentre elas a gerada neste estudo, que apresentou melhor desempenho na estimativa de K_d (Tabela 11 – $V_{p_{ac.4}}$). Os modelos de Soares et al. (2004), Furlan et al. (2012) e Spencer (1982) ajustada superestimaram a fração difusa e apresentaram maiores valores de espalhamento do que a equação n° 44, porém foram os melhores posicionados frente aos demais.

Os treze modelos seccionados que predizem estimativas para K_d^h em condições de céu aberto determinam valores fixos, com exceção do gerado neste estudo. A maioria destes tende a subestimar a fração difusa, com exceção das equações 14, 20, 23 e 45. Para esta faixa de K_T (acima de 0,7), os modelos desenvolvidos por Erbs et al. (1982) e Jacovides et al. (2006) apresentaram melhor desempenho perante os demais (Tabela 11 – $V_{p_{ac.5}}$).

Dos dez modelos que exibiram melhor performance para estimativa da fração difusa nas diferentes faixas de K_T , oito foram desenvolvidos ou ajustados para regiões tropicais (latitudes entre $6,58^\circ$ e $-23,56^\circ$). Destes, cinco para o Brasil, o que confirma a influência deste fator climático na radiação difusa incidente na superfície terrestre.

Recomenda-se para trabalhos futuros a modelagem de equações de estimativa com a inserção de maior número de variáveis meteorológicas, para verificar o desempenho em relação aos modelos gerados neste estudo; bem como a avaliação daquelas já existentes na literatura. A correlação entre a fração difusa K_d e a razão de insolação também pode ser trabalhada, afim de propor modelos com uma variável de fácil obtenção.

5 CONCLUSÕES

A radiação difusa horária na região de Sinop-MT apresenta comportamento semelhante ao da radiação incidente no topo da atmosfera e da global, com valores máximos ao meio dia solar. A sazonalidade é marcante, observando-se níveis energéticos médios máximos de H_{DF}^h durante o período chuvoso e mínimos na época seca, devido às mudanças atmosféricas locais.

As frações radiométricas também apresentam comportamentos característicos durante as diferentes estações hídricas. Os maiores valores do coeficiente de transmissividade atmosférica foram observados durante a estação seca, na qual o comportamento do céu varia de nublado a parcialmente nublado no início do dia, apresentando-se aberto no restante das horas.

A correlação $K_d^h \times K_T^h$ estabelecida apresentou comportamento peculiar, com amplitude da curva característica de regiões localizadas em baixas latitudes (mais próximas do Equador). Como nos outros estudos, quando K_T tende a 0, K_d tende a 1; porém para valores de K_T^h inferiores a 0,2 os valores máximos de K_d^h observados foram da ordem de 0,8 a 0,9.

Foram geradas equações de estimativa da fração difusa para três diferentes intervalos de K_T : $0 \leq K_T^h \leq 1$; $0 \leq K_T^h < 0,55$ (céu nublado e parcialmente nublado); e $K_T^h \geq 0,55$ (céu parcialmente aberto e aberto). As equações foram validadas nas diferentes bases (anual e sazonais), e verificou-se que os modelos desenvolvidos para K_T não-particionado apresentaram melhor desempenho. De forma geral, houve tendência para subestimativa dos valores de radiação difusa.

Os modelos contínuos e os seccionados para diferentes intervalos de K_T apresentaram desempenho similar. As equações de regressão seccionadas que estimam K_d^h em condições de cobertura de céu intermediárias foram mais efetivas na estimativa da fração difusa.

Dentre os 19 modelos de estimativa da radiação difusa avaliados, recomenda-se a utilização do desenvolvido neste estudo ou do elaborado por Marques Filho et al. (2016) para estimativas de K_d no intervalo de $0 \leq K_T^h \leq 1$ na região. Para condições de céu nublado, indica-se a aplicação dos modelos de Maduekwe; Garba (1999). Para coberturas de céu intermediárias (céu parcialmente nublado/aberto) o modelo gerado

neste estudo e os de Soares et al. (2004), Furlan et al. (2012) e Spencer (1982) ajustado apresentaram os melhores desempenhos. Já para céu aberto sugere-se o emprego dos modelos de Erbs et al. (1982) ou Jacovides et al. (2006). A maioria elaborada para regiões tropicais, o que confirma a influência da latitude nos níveis energéticos de H_{DF}^h .

REFERÊNCIAS

- ABREU, E. F. M.; CANHOTO, P.; COSTA, M. J. Prediction of diffuse horizontal irradiance using a new climate zone model. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 28-42, 2019.
- AL-AYED, M. S.; AL-DHAFIRI, A. M.; MAHFOODH, M. B. Global, direct and diffuse solar irradiance in Riyadh, Saudi Arabia. **Renewable Energy**, v. 14, n. 1-4, p. 249-254, 1998.
- AL-RAWAHI, O. N. Z.; ZURIGAT, Y. H.; AL-AZRI, N. A. Prediction of Hourly Solar Radiation on Horizontal and Inclined Surfaces for Muscat. **The Journal of Engineering Research**, v. 8, n. 2, p. 19-31, 2011.
- ASHJAEI, M.; ROOMINA, M. R.; GHAFOURI-AZAR, R. Estimating direct, diffuse, and global solar radiation for various cities in Iran by two methods and their comparison with the measured data. **Solar Energy**, v. 50, n. 5, p. 441-46, 1993.
- BABATUNDE, E. B. Solar radiation, a friendly renewable energy source. In: Babatunde, E. B. (Ed.). **Solar Radiation**. London: IntechOpen, 2012. 484 p.
- BATTLES, F. J., OLMO, F. J., ALADOS-ARBOLEDAS, L. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. **Solar Energy**, v. 54, n. 2, p. 105-114, 1995.
- BECKER, S. Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel. **Int. J. Climatol.**, v. 21, p. 1561-1576, 2001.
- BOLAND, J.; RIDLEY, B. Models of diffuse solar fraction. In: Badescu, V. (Ed.). **Modelling Solar Radiation at the Earth's Surface**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008. p. 193-219.
- BOLAND, J.; SCOTT, L.; LUTHER, M. Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface. **Environmetrics**, v. 12, p. 1003-116, 2001.
- BOLAND, J.; SCOTT, L. Predicting the diffuse fraction of global solar radiation using regression and fuzzy logic. In: PROCEEDINGS OF THE ANZSES CONFERENCE, 37., 1999, Geelong. **Anais...** Highett, Vic.: The Society, 1999.
- BORGES, G. A.; AGUIAR, L. J. G.; FISCHER, G. R.; AGUIAR, R. G.; OLIVEIRA, E. C. de; PAIM, B. L. Estimativa da radiação solar difusa sob todas condições de céu no sudoeste da Amazônia. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 10., 2017, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2017.
- BUTT, N.; NEW, M.; MALHI, Y.; COSTA, A. C. L. da; OLIVEIRA, P.; SILVA-ESPEJO, J. E. Diffuse radiation and cloud fraction relationships in two contrasting

Amazonian rainforest sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 3, p. 361-368, 2010.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; CORREA, F. H. P. Numerical correction for the diffuse solar irradiance by the Melo-Escobedo shadowring measuring method. In: Ises Solar World Congress 2011, 2011, Kassel. **Anais...** Kassel, 2011.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Série temporal diária média horária e anual média mensal diária da irradiação solar difusa anisotrópica. **Energ. Agric.**, v. 21, n. 2, p. 1-15, 2006.

DAL PAI, A. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento Melo-Escobedo**: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa. 2005. 87 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Unesp, Botucatu, 2005.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Modelo De Estimativa Da Radiação Solar Difusa Na Equipartição Instantânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000, p. 282-286.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F. Modelo de estimativa da radiação solar difusa instantânea. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1., 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 1999.

DRECHMER, P. A. de O. **Comportamento e correção da radiação solar difusa obtida com o anel de sombreamento**. 2005. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

DRECHMER, P. A. de O.; RICIERI, R. P. Irradiação global, direta e difusa, para a região de Cascavel, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**. Technology, v.28, n.1, p.73-77, 2006.

DRUMMOND, A. J. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v. 7, p. 413-436, 1956.

DUCHON, C. E.; O'MALLEY, M. S. Estimating Cloud Type from Pyranometer Observations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 1, p. 132-141, 1999.

EL-SEBAILI, A. A.; AL-HAZMI, F. S.; AL-GHAMDI, A. A.; YAGHMOUR, S. J. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. **Applied Energy**, v. 87, p. 568-576, 2010.

ERBS, D.G., KLEIN, S.A., DUFFIE, J.A. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. **Sol. Energy**, v. 28, p. 293-302, 1982.

ESCOBAR, G. C. J. Padrões de circulação em superfície e em 500 hpa na América do Sul e eventos de anomalias positivas de precipitação no Estado de Minas Gerais durante o mês de dezembro de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 105-124, 2014.

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.

FURLAN, C.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; CODATO, G.; ESCOBEDO, J. F. The role of clouds in improving the regression model for hourly values of diffuse solar radiation. **Appl. Energy**, v. 92, p. 240-254, 2012.

GU, L.; FUENTES, J. D.; SHUGART, H. H.; STAEBLER, R. M.; BLACK, T. A. Responses of net ecosystem exchanges of carbon dioxide to changes in cloudiness: Results from two North American deciduous forests. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104(D24), p. 31421–31434, 1999.

GUEYMARD, C. Progress in direct irradiance modeling and validation. In: ASES NATIONAL SOLAR CONFERENCE, 39., 2010, Phoenix, USA. **Anais...** Phoenix, USA: American Solar Energy Soc., 2010.

GUIMARÃES, A. P. C. **Estimativa de parâmetros da camada atmosférica para cálculo da irradiação solar incidente na superfície terrestre**. 2003. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

INÁCIO, T. **Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu**. 2009. 84f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades – Sinop/MT**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mt/sinop/panorama>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

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

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.

- KASTEN, F.; CZEPLAK, G. Solar radiation and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud, **Sol. Energy**, v. 24, p. 117-189, 1980.
- KHATIB, T.; MOHAMED, A.; SOPIAN, K. A review of solar energy modeling techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Malaysia, v. 16, p. 2864-2869, 2012.
- 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.
- KUO, C.; CHANG, W.; CHANG, K. Modeling the hourly solar diffuse fraction in Taiwan. **Renewable Energy**, v. 66, p. 56-61, 2014.
- LAM, J. C.; LI, D. H. W. Correlation between global solar radiation and its direct and diffuse components. **Building and Environment**, v. 31, n. 6, p. 527-535, 1996.
- LEBARON, B. A.; MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. **Solar Energy**, Kidlington, v. 44, n. 05, p. 249-56, 1990.
- LEBARON, B.; DIRMHIRN, I. Strengths and limitations of the Liu and Jordan model to determine diffuse from global irradiance. **Solar Energy**, v. 31, n. 2, p. 167-172, 1983.
- LINACRE, E. **Climate data and resources: a reference and guide**. Routledge, 1992. 366 p.
- LIOU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2002. 583 p.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, p. 1-19, 1960.
- LOAIZA, A. J. **Estimativa do saldo de radiação comparando os modelos de elevação digital, MED Cotado e o SRTM, na bacia do Rio Jacarecica**. 2015. 193f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.
- MACEDO, A. dos S.; FISCH, G. Variabilidade Temporal da Radiação Solar Durante o Experimento GOAmazon 2014/15. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 353-365, 2018.
- MADUEKWE, A. A. L.; CHENDO, M. A. C. Atmospheric turbidity and the diffuse irradiance in Lagos, Nigeria. **Solar Energy**, v. 61, n. 4, p. 241-249, 1997.

MADUEKWE, A. A. L.; GARBA, B. Characteristics of the monthly average hourly diffuse irradiance at Lagos and Zaira, Nigeria. **Renewable Energy**, v. 17, p. 213-25, 1999.

MARTINS, D.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; OLIVEIRA, A. P. de; SOARES, J. Análise sazonal das frações solares K_t , K_{dh} e k_d da radiação global em Botucatu/SP/Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, ano 3, v. 3, n. 1, p. 23-30, 2012.

MARQUES FILHO, E. P.; OLIVEIRA, A. P.; VITA, W. A.; MESQUITA, F. L. L.; CODATO, G.; ESCOBEDO, J. F.; CASSOL, M.; FRANÇA, J. R. A. Global, diffuse and direct solar radiation at the surface in the city of Rio de Janeiro: Observational characterization and empirical modeling. **Renewable Energy**, v. 91, p. 64-74, 2016.

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

MERCADO, L. M.; BELLOUIN, N.; SITCH, S.; BOUCHER, O.; HUNTINGFORD, C.; WILD, M.; COX, P. M. Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. **Nature**, v. 458, p. 1014-1017, 2009.

MUNEER, T.; THAM, Y. W. Solar Energy Measurements. In: KUTZ, M. (Ed.). **Mechanical Engineers' Handbook, Volume 4: Energy and Power**. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2014, p. 805-838.

MUNEER, T.; ZHANG, X. A new method for correcting shadow band diffuse irradiance data. **Journal of Solar Energy Engineering**, v. 124, n. 1, p.34-43, 2002.

OLIVEIRA, E. A. de. **Métodos para análise de concordância**: estudo de simulação e aplicação a dados de evapotranspiração. 2016. 178 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2016.

OLIVEIRA, P. H. F. et al. The effects of biomass burning aerosols and clouds on the CO₂ flux in Amazonia. **Tellus**, B59, p. 338-349, 2007.

OLIVEIRA, A. P.; MACHADO, A. J.; ESCOBEDO, J. F. A New Shadow-Ring Device for Measuring Diffuse Solar Radiation at the Surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 698-708, 2002a.

OLIVEIRA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; MACHADO, A. J., SOARES, J. Correlation models of diffuse solar-radiation applied to the city of Sao Paulo, Brazil. **Appl. Energy**, v. 71, p. 59–73, 2002b.

OLIVEIRA, A. P.; MACHADO, A. J.; ESCOBEDO, J. F.; SOARES, J. Diurnal evolution of the solar radiation in the City of São Paulo, Brazil: seasonal variation and modelling. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 71, p. 231-249, 2001.

- ORGILL, J. F.; HOLLANDS, K. G. T. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. **Solar Energy**, v. 19, n. 4, p. 357-359, 1977.
- PAGE, J. The Role of Solar-Radiation Climatology in the Design of Photovoltaic Systems. In: MCEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications**. 2. ed. Academic Press, 2012, p. 573-643.
- PAULESCU, E.; BLAGA, R. Regression models for hourly diffuse solar radiation. **Solar Energy**, v. 125, p. 111-124, 2016.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L. de; RÜTHER, R.; ABREU, S. L. de; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. de. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. de; RÜTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. 1. ed. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.; STUHLMANN, R.; REILAND, M.; COLLE, S. Survey of the incident solar-radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data. **Solar Energy**, v. 2, p. 125-32, 1996.
- PEREZ, R.; SEALS, R. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 39, n. 3, p. 221-231, 1987.
- REINDL, D. T.; BECKMAN, W. A.; DUFFIE, J. A. Diffuse fraction correlations. **Solar Energy**, v. 45, n. 1, p. 1-7, 1990.
- REN, X. L.; HE1, H. L.; ZHANG, L.; ZHOU, L.; YU1, G. R.; FAN, J. W. Spatiotemporal variability analysis of diffuse radiation in China during 1981–2010. **Ann. Geophys.**, v. 31, p. 277–289, 2013.
- RENSHENG, C.; ERSI, K.; JIANPING, Y.; SHIHUA, Z.W.; YONGJIAN, D. Estimation of Horizontal diffuse solar radiation with measured daily data in China. **Renewable Energy**. v. 29, p. 717-726, 2004.
- ROBINSON, N.; STOCH, L. Sky radiation measurement and corrections. **Journal of Applied Meteorology**, v. 3, n. 1, p. 179-181, 1964.
- RUIZ-ARIAS, J. A.; ALSAMAMRA, H.; TOVAR-PESCADOR, J.; POZO-VÁZQUEZ, D. Proposal of a regressive model for the hourly diffuse solar radiation under all sky conditions. **Energy Convers. Manag.**, v. 51, n. 5, p. 881–93, 2010.

RUTH, D. W.; CHANT, R. E. The relationship of diffuse to total radiation in Canada. **Solar Energy**, v. 18, n. 2, p. 153-154, 1976.

SCHNEIDER, A.; HOMMEL, G.; BLETTNER, M. Linear Regression Analysis. **Deutsches Ärzteblatt International**, v. 107, n. 44, p. 776-82, 2010.

SCOLAR, J.; MARTINS, D.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da irradiação total sobre uma superfície inclinada a partir da irradiação global na horizontal. **Rev. Bras. Geof.**, v. 21, n. 3, 2003.

SILVA, F. R. da; OLIVEIRA, H. S. M. de; MARINHO, G. S. Análise das componentes global e difusa da radiação solar em Natal-RN entre 2007 e 2008. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 2. e 3., 2008, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, 2008.

SINGH, U. P. **Diffuse Radiation Calculation Methods**. 2016. 78 f. Thesis (Master of Science), Arizona State University, Arizona, 2016.

SINGH, J.; BHATTACHARYA, B. K.; KUMARA, M.; MALLICK, K. Modelling monthly diffuse solar radiation fraction and its validity over the Indian sub-tropics. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 77, p. 86, 2013.

SOARES, J.; OLIVEIRA, A. P.; BOZNAR, M. Z.; MLAKAR, P.; ESCOBEDO, J. F.; MACHADO, J. Modeling hourly diffuse solar radiation in the city of São Paulo using neural network technique. **Appl. Energy**, v. 79, p. 201-214, 2004.

SOUZA, J. G. de. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.

SOUZA, A. P. de; SILVA, A. C.; MALLMANN, F. F.; DEMARTINI, W. F. B.; TANAKA, A. A.; SOUZA, M. E. Estimates of leaf area of *Curcubita moschata* Duch based on linear measures and degree-days in planting of winter in the central-western region of Brazil. **American Journal of Experimental Agriculture**, v. 5, n. 6, p. 562-572, 2015.

SOUZA, A. P. de; MOTA, L. L. DA; ZAMADEI, T.; MARTIM, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no Estado de Mato Grosso. **Nativa**, v.1, n. 1, p. 34-43, 2013.

SOUZA; A. P. de; ESCOBEDO, J. F. Estimates of Hourly Diffuse Radiation on Tilted Surfaces in Southeast of Brazil. **International Journal of Renewable Energy Research**, v. 3, n. 1, p. 207-221, 2013.

SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Annual evolution of global, direct and diffuse radiation and fractions in tilted surfaces. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 2, p. 247-260, 2012.

SOUZA, A. P. **Radiação solar difusa horária incidente em superfícies inclinadas: fatores de correção, evolução diurna e modelos de estimativa.** 2012. 146f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Unesp, Botucatu, 2012.

SPENCER, J. W. A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation. **Solar Energy**, v. 29, n. 1, p. 19-32, 1982.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.

TAVARES, P. S. **Observação e análise da radiação solar global e fotossinteticamente ativa na região de Maceió.** 2005, 42 p. TCC (Graduação em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Maceió, 2005.

TERAMOTO, E. T. **Distribuição de frequência das condições de céu em função das variações climáticas em Botucatu-SP.** 2010. 78 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu, Botucatu, 2010.

VAREJÃO SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia.** Recife: Versão Digital, 2006. 463 p.

VICTORIA, I. M. B. **Medição da radiação solar global e difusa utilizando piranômetros com sensores fotoelétricos.** 2008. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2008.

WENXIAN, L.; ENRONG, L.; WENFENG, G.; SHAOXUAN, P.; TAO, L. Distribution patterns of diffuse solar radiation in Yunnan Province, China. **Energy Conversion and Management**, v. 37, n. 5, p. 553-560, 1996.

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

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION – WMO. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.** 7. ed. Geneva: WMO, 2008.

ZAMADEI, T.; SILVA, C. C. da; WALTHER, N. V. dos. S.; SOUZA, A. P. de. Evolução média mensal horária da radiação global e do coeficiente de transmissividade atmosférica para noroeste do Mato Grosso. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 18., 2013, Belém. **Anais...** Belém: Universidade Federal do Pará, 2013.