

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Ricardo Boscaini

**DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO
SOLAR E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Santa Maria, RS

2018

Ricardo Boscaini

**DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Dias Robaina

Santa Maria, RS
2018

Boscaini, Ricardo
DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR
E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA / Ricardo Boscaini.-
2018.
65 p.; 30 cm

Orientador: Adroaldo Dias Robaina
Coorientadora: Marcia Xavier Peiter
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2018

1. Calibração 2. Equações Simplificadas 3. Temperatura
do Ar 4. Modelagem I. Dias Robaina , Adroaldo II.
Xavier Peiter , Marcia III. Título.

Ricardo Boscaini

**DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR E
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

Aprovado em 16 de julho de 2018:



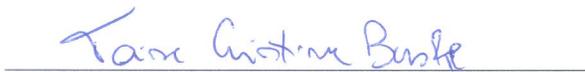
Adroaldo Dias Robaina, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Marcia Xavier Peiter, Dr^a. (UFSM)
(Coorientadora)



Ana Carla dos Santos Gomes, Dr^a.
(IFFAR)



Taise Cristine Buske, Dr^a. (IFC)

Santa Maria, RS
2018

Ofereço

*A minha mãe Lurdes e meu pai Valdir, pela força, pela confiança, pelo incentivo e
pelas batalhas que juntos vencemos*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo amor incondicional e presença em nossas vidas.

À minha família e amigos, pois com eles as dificuldades são mais fáceis de serem superadas.

Ao professor orientador Adroaldo Dias Robaina, pela oportunidade, pelos ensinamentos, atenção, amizade e profissionalismo.

À professora coorientadora Marcia Xavier Peiter, pela oportunidade, carinho, amizade, ensinamentos e profissionalismo.

À minha namorada e companheira Mayara Torres Mendonça, pelo cuidado, carinho, compreensão e companheirismo, sempre dando apoio para seguir em frente.

Aos colegas do laboratório de hidráulica e engenharia de irrigação da UFSM, por toda amizade, compreensão, amparo e troca de conhecimentos.

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), pela oportunidade e estrutura disponibilizada.

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

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

AUTOR: Ricardo Boscaini
ORIENTADOR: Adroaldo Dias Robaina

A radiação solar (R_s) é a mais importante fonte de energia da natureza e influência diretamente no processo de evapotranspiração. Existem muitas formas de estimativas da radiação solar e da evapotranspiração, no entanto, necessitam de uma série de dados, muitas vezes não disponíveis. Sendo que, na ausência de dados observados de R_s é possível estimá-los mediante a utilização de modelos matemáticos. Em geral, os modelos variam em grau de complexidade e nos coeficientes de ajuste, e esses devem ser calibrados para o local de interesse para obtenção do melhor desempenho. Neste sentido, objetivou-se avaliar o desempenho de modelos para a estimativa da radiação solar global e da evapotranspiração de referência em escala diária, a partir de dados meteorológicos limitados, para a região de Santa Maria - RS. Os dados foram adquiridos da estação meteorológica automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na cidade de Santa Maria – RS. Foram avaliados dez modelos no total, nas estimativas de radiação solar global, sendo cinco modelos com coeficientes calibrados, estes ajustados por meio do software TableCurve 2D e, cinco modelos, com os coeficientes determinados pelos autores. Posteriormente realizou-se a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman Monteith, utilizando os dados de radiação solar medidos na estação, sendo esses considerados como padrão e comparados com os resultados de radiação solar estimados pelos dez modelos. Observou-se que, para os modelos com calibração dos seus coeficientes, os modelos propostos por Ball (BA), Chen (CH) e Meza e Varas (MV) apresentaram índice de desempenho de 0,80, indicando “ótimo” desempenho. Dessa forma, são recomendados para uso quando não houver disponibilidade de dados medidos no local de estudo. Para os modelos sem calibração, exceto o modelo de Donatelli e Campbell (DC), que obteve um desempenho “bom”, os demais modelos apresentaram índice em média de 0,77, indicando um desempenho “muito bom”. Na estimativa da evapotranspiração de referência, nove dos dez modelos apresentaram desempenho “excelente”. Sendo assim, conclui-se que não há necessidade de calibração dos coeficientes e que todos os modelos são indicados para Santa Maria – RS.

Palavras-chave: calibração, equações simplificadas, temperatura do ar, modelagem

ABSTRACT

PERFORMANCE OF SOLAR RADIATION ESTIMATION MODELS AND REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

AUTHOR: Ricardo Boscaini
ORIENTER: Adroaldo Dias Robaina

Solar radiation (R_s) is the most important source of energy in nature and directly influences the evapotranspiration process. There are many ways of estimating solar radiation and evapotranspiration, however, they require a range of data, often unavailable. Given that, in the absence of observed R_s data, it is possible to estimate them using mathematical models. Overall, the models vary in degree of complexity as well as in the adjustment coefficients, and they must be calibrated to the place of interest to obtain the best performance. In this sense, the main purpose of this study is to evaluate the performance of models for the estimation of global solar radiation and reference evapotranspiration on a daily scale, based on limited meteorological data, for the region of Santa Maria - RS. The data were taken from the automatic meteorological station (EMA) of the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), located in the city of Santa Maria - RS. Ten models were evaluated in the estimations of global solar radiation, where five models with calibrated coefficients were used and adjusted through the software TableCurve 2D and, five models had the coefficients determined by the authors. Then, the reference evapotranspiration was estimated using the Penman Monteith method, adopting the solar radiation data measured at the station, which were considered as standard and compared with the solar radiation results estimated by the ten models. The models proposed by Ball (BA), Chen (CH) and Meza and Varas (MV) presented a performance index of 0.80, indicating "optimal" performance for the models with calibration of their coefficients. In this way, they are recommended when there is no availability of measured data at the study site. For the non-calibration models, except the Donatelli and Campbell (DC) model, in which obtained a "good" performance, the other models had an average index of 0.77, indicating a "very good" performance. Considering the estimation of reference evapotranspiration, nine of the ten models presented "excellent" performance. Therefore, it is concluded that there is no need to calibrate the coefficients and all models are indicated for Santa Maria - RS.

Keywords: Calibration, Simplified Equations, Air Temperature, Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa com a localização geográfica da estação meteorológica utilizada no	29
Figura 2 - Gráficos de dispersão dos valores de Rs estimados a partir de cinco modelos calibrados e medidos para Santa Maria - RS.	39
Figura 3 - Gráficos de dispersão dos valores de Rs estimados a partir de cinco modelos não calibrados e medidos para Santa Maria – RS.....	44
Figura 4 - Gráficos de dispersão dos valores de ETo estimados: utilizando a Rs calculada por diferentes modelos e com dados medidos para Santa Maria – RS.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos de estimativa da radiação solar , coeficientes e referências.....	31
Tabela 2 - Critério para interpretação do Índice de Concordância, do Coeficiente de	37
Tabela 3 - Coeficientes calibrados dos modelos, no período de 2002 a 2017, em Santa Maria - RS.	41
Tabela 4 - Resumo das avaliações dos modelos com os coeficientes calibrados: Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), Erro Absoluto Médio (MBE) e Coeficiente de Determinação (R ²).	42
Tabela 5 - Resumo das avaliações dos modelos com os coeficientes calibrados: Índice de Concordância (d), Coeficiente de Correlação (r), Índice de Desempenho (Id) e sua respectiva classificação.....	43
Tabela 6 - Resumo das avaliações dos modelos sem os coeficientes calibrados: Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), Erro Absoluto Médio (MBE) e Coeficiente de Determinação (R ²).	46
Tabela 7 – Resumo das avaliações dos modelos sem os coeficientes calibrados: Índice de Concordância (d), Coeficiente de Correlação (r), Índice de Desempenho (Id) e sua respectiva classificação.....	47
Tabela 8 - Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), Erro Absoluto Médio (MBE) e Coeficiente de Determinação (R ²) da estimativa da ETo com a utilização de estimativas da radiação solar por diferentes modelos para Santa Maria - RS.	51
Tabela 9 - Índice de Concordância (d), Coeficiente de Correlação (r) e Índice de Desempenho (Id) da estimativa da ETo, com a utilização de estimativas da Rs por diferentes modelos para Santa Maria - RS.....	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	RADIAÇÃO SOLAR.....	13
2.2	MODELOS DE ESTIMATIVA DA R_s ATRAVÉS DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS	15
2.4	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)	18
2.5	EFEITO DA R_s NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o).....	20
2.6	FATORES QUE AFETAM A ET_o	21
2.7	ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO	23
2.8	MODELOS DE ESTIMATIVA DA ET_o	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	LOCAL DO ESTUDO.....	29
3.2	OBTENÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS	30
3.3	TRATAMENTO DOS DADOS METEOROLÓGICOS	30
3.4	MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR AVALIADOS.....	30
3.5	CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA	32
3.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	RADIAÇÃO SOLAR PELOS DIFERENTES MODELOS COM CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES.....	38
4.1.1	COEFICIENTES CALIBRADOS.....	40
4.2	DESEMPENHO ESTATÍSTICO DOS MODELOS CALIBRADOS.....	41
4.3	RADIAÇÃO SOLAR PELOS MODELOS SEM CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES	43
4.4	INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA NA ET_o	47
4.5	DESEMPENHO ESTATÍSTICO DOS MODELOS NA ESTIMATIVA DA ET_o .	50
5	CONCLUSÃO	54
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

A radiação solar que atinge a superfície da Terra é uma variável de entrada indispensável para várias aplicações, tais como: meteorologia, hidrologia, ecologia, modelos de crescimento de culturas, estimativa da evapotranspiração de referência e uso de energia solar renovável. No entanto, ao contrário de outras variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, precipitação e umidade relativa do ar, as medições de radiação solar global (R_s) não estão prontamente disponíveis para diversos locais do mundo, especialmente nos países em desenvolvimento.

A radiação solar é medida por instrumentos como os radiômetros, actinógrafos bimetalicos e piranômetros, que também medem a radiação difusa, sendo este o mais utilizado no Brasil (DORNELAS *et al.*, 2006). Porém, tais instrumentos não estão disponíveis na maioria dos locais, devido ao alto custo de aquisição e problemas de manutenção e calibração dos mesmos (SILVA *et al.*, 2012; ROBAA, 2009).

Os problemas supracitados demandaram a necessidade do desenvolvimento de modelos alternativos para estimar a R_s quando há ausência de dados disponíveis no local de interesse. Por conseguinte, destacam-se modelos baseados na umidade do ar, precipitação, duração do brilho solar, temperatura do ar, insolação, nebulosidade e amplitude térmica, dentre outros. Entre as abordagens acima, os modelos propostos para a estimativa da R_s com base na temperatura do ar são os mais usados, devido às suas entradas prontamente acessíveis e baixos custos computacionais.

Uma limitação dos modelos de estimativa é que eles são, em geral, restritos às condições para as quais foram desenvolvidos, sendo pouco eficientes se não forem devidamente calibrados para as condições climáticas do novo local. No entanto, quando devidamente calibrados, têm como vantagem o uso de elementos meteorológicos registrados no local de estudo, representando, portanto, as condições meteorológicas locais.

Modelos que estimam R_s a partir da insolação são mais precisos do que aqueles que a estimam a partir da temperatura do ar e precipitação (RIVINGTON *et al.*, 2006; TRNKA *et al.*, 2005; PODESTÁ *et al.*, 2004), porém, os dados de insolação são pouco comuns (ALMOROX, 2011), enquanto que os dados de temperatura do ar e chuva são registrados em praticamente todas as estações meteorológicas. Além

disso, os equipamentos de medição desses elementos são de baixo custo e de simples operação.

Para o dimensionamento e gestão de sistemas de irrigação, entre outras aplicações, dados de evapotranspiração de referência (ET_o) são fundamentais na qual a radiação solar é uma variável importante na sua estimativa, pois é a principal fonte de energia para o processo evapotranspirativo. Conhecer o efeito da R_s estimada por modelos empíricos na ET_o é fator decisivo para a adoção dos mesmos no planejamento e manejo eficiente de sistemas de irrigação.

Nesse contexto, ressalta-se a importância de estudos da radiação solar e evapotranspiração de referência, sendo imprescindível a definição de modelos adequados para sua estimativa, que demandem um número menor de fatores atmosféricos.

Considerando o exposto, o objetivo geral e os específicos do presente estudo foram:

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de modelos para a estimativa da radiação solar global e da evapotranspiração de referência em escala diária, a partir de dados meteorológicos limitados, para o município de Santa Maria-RS.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar a calibração dos coeficientes e avaliar o desempenho estatístico de dez modelos simplificados de estimativa de radiação solar global baseados na temperatura do ar para Santa Maria-RS;

Avaliar a influência da estimativa da radiação solar na obtenção da evapotranspiração de referência diária pelo método Penman-Monteith FAO 56, para Santa Maria-RS.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão de literatura dos principais pontos que fundamentaram o presente estudo. Serão descritos os aspectos relacionados à radiação solar global e à evapotranspiração de referência, bem como os seus modelos de estimativa.

2.1 RADIAÇÃO SOLAR

A energia solar é a fonte de energia renovável mais promissora para suprir uma parte significativa da demanda mundial de energia. O conhecimento preciso da radiação solar é considerado o primeiro passo na avaliação da disponibilidade de energia solar e serve como principal insumo para diferentes aplicações de energia solar (JANJAI S *et al.*, 2009).

A radiação solar é a energia responsável, direta ou indiretamente, pelos processos físicos, evaporação e aquecimento; reações gasosas na atmosfera e superfície terrestre e processos biológicos como, por exemplo, a fotossíntese. É uma variável meteorológica aplicada em diversos estudos para fins agrometeorológicos, climáticos, hidrológicos, entre outros, que impulsiona fenômenos inerentes ao sistema Terra-Atmosfera, além de ser determinante para o tempo e o clima (CHOU, 1992; BORGES *et al.*, 2010).

Segundo Lemos Filho *et al.* (2010), a radiação solar incidente na superfície terrestre (R_s) é o elemento climático que mais interage com a evapotranspiração, sendo um dado de suma importância para modelos de estimativa de E_{To} , como por exemplo, Penman, Penman-Monteith-FAO, Makkink, Turc, Camargo, Priestley-Taylor, entre outros (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

As diversas trocas de energia que ocorrem na atmosfera são favorecidas pela radiação emitida pelo Sol, de ondas curtas e pela radiação emitida pela superfície terrestre, de ondas longas. Sendo assim, com o conhecimento da energia presente em todos os comprimentos de ondas que atuam na superfície, é possível determinar a radiação líquida, também denominada saldo de radiação (R_n), ou seja, é o balanço entre as entradas e saídas de radiação de ondas curtas e ondas longas, incidentes em uma dada superfície e emitidos pela mesma (VAREJÃO-SILVA, 2006).

A radiação solar global (R_s) que chega à superfície da terra é uma variável de suma importância para a otimização do projeto e o uso de sistemas de irrigação (A. TEKE *et al.*, 2015). No entanto, ao contrário de outras variáveis meteorológicas observadas rotineiramente (como exemplo, duração da luz do sol, temperatura do ar, precipitação e umidade relativa), as medições de radiação solar global não estão prontamente disponíveis em muitos locais devido aos altos custos e dificuldade de manutenção e calibração do equipamento de gravação (B. JAHANI *et al.*, 2017).

Como as medições de radiação solar nem sempre estão disponíveis, devido ao alto custo e aos requisitos de calibração e manutenção de equipamentos, empregam-se, para a estimativa de seu valor, modelos empíricos que façam uso de outros elementos meteorológicos disponíveis (TANAKA, 2013).

Apesar de ser medido diretamente em estações meteorológicas de superfície com o uso de radiômetros, actinógrafos e piranômetros, o registro diário da (R_s) é, muitas vezes, limitado pela ausência de instrumentos adequados para a medição ou até mesmo pela falta de manutenção dos mesmos. Assim, na inexistência de registros disponíveis de (R_s) para uma determinada área de interesse, torna-se necessário o uso de métodos simplificados de estimativa da (R_s) (CHRYSOULAKIS; DIAMANDAKIS; PRASTACOS., 2004).

Segundo Chen *et al.* (2011), a utilização de modelos para estimativa da radiação solar tornou-se uma prática comum, principalmente quando vinculados à obtenção por outros elementos meteorológicos com dados disponíveis e mais facilmente encontrados, como umidade, precipitação, brilho solar e temperatura do ar. Os modelos de estimativa variam em grau de complexidade e geralmente apresentam índices parametrizados, que dependem de calibrações para propiciar melhores resultados e aplicações.

Sendo assim, vários métodos têm sido desenvolvidos para estimar indiretamente a radiação solar, como resultado da falta de dados de radiação medidos, tais como modelos empíricos, modelos baseados em inteligência artificial e métodos baseados em satélite. Entre os métodos acima mencionados, os modelos empíricos são mais comumente usados devido aos seus insumos prontamente disponíveis e baixos custos computacionais (F. BESHARAT., 2013).

Conforme Meza e Varas (2000), um dos modelos empíricos mais utilizados para a estimativa da radiação solar foi proposto originalmente por Angström (1924) e modificado por Prescott (1940). A equação de Angström-Prescott baseia-se na relação entre a radiação solar incidente na superfície e a radiação solar incidente no topo da atmosfera.

Em áreas com topografia irregular, a determinação da (R_s) pode ficar comprometida até mesmo pelo sombreamento ocasionado pelo próprio relevo, em especial em latitudes médias ou altas, de modo que esse efeito se torna mais evidente nas estações de outono e inverno. Esse cenário resulta em diferenças no tempo e no espaço dos balanços energéticos, bem como na determinação de processos inerentes ao ciclo hidrológico a exemplo da evapotranspiração (LEFEVRE; WALD; DIABATE, 2007; AGUILAR; HERRERO; POLO, 2010).

2.2 MODELOS DE ESTIMATIVA DA R_s ATRAVÉS DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS

A radiação solar incidente na superfície terrestre (R_s) é necessária para a obtenção das estimativas da evapotranspiração de referência. Estimá-la a partir de dados prontamente disponíveis como temperatura e precipitação (LIU; SCOTT, 2001; WEISS; HAYS, 2001) são alternativas para locais com ausência de equipamentos para medi-la ou quando há um longo período sem registro ou dados fora da faixa esperada, o que pode ocorrer devido a falhas no equipamento e outros problemas (HUNT *et al.*, 1998).

Devido à necessidade de dados de radiação solar com alta precisão, exigidos por processos como a evapotranspiração, muitos estudos foram desenvolvidos para criar modelos que pudessem estimá-la. Eles vão desde modelos com fórmula empírica simples até modelos extremamente complexos, dependendo dos dados de entrada disponíveis (BRISTOW; CAMPBELL, 1984).

O uso desses modelos se justifica em função da temperatura do ar ser um dos principais efeitos da radiação solar na superfície terrestre. Os raios solares aquecem a superfície que, por transporte de calor, aquece a atmosfera adjacente (ARAÚJO, 2011).

Com base nessas afirmações, Hargreaves (1982), Bristow e Campbell (1984) propuseram equações que utilizam dados diários de temperatura máxima e mínima do ar para estimar a R_s . O modelo de Hargreaves tem sido amplamente utilizado devido a sua simplicidade, sendo, inclusive, recomendado pelo boletim da FAO-56 para ser usado quando os dados são ausentes ou de qualidade duvidosa (ALLEN *et al.*, 1998).

2.3 DESEMPENHO DOS MODELOS DE ESTIMATIVA DA R_s

O desempenho dos modelos de estimativa de (R_s) varia conforme a região. Dessa forma, um mesmo modelo com bom desempenho em um dado local pode não repetir o desempenho em outro, climatologicamente diferente. Segundo Gambi *et al.* (1998), as nuvens são responsáveis pela maior parte da dispersão aleatória das estimativas dos modelos, devido à ampla variabilidade temporal, tipo e características microfísicas. Conforme Souza Echer *et al.* (2006), as nuvens desempenham um papel importante na transmitância atmosférica da radiação de ondas curtas e longas, com atuação significativa no bloqueio dessa última, e esse efeito bloqueador depende dos tipos de nuvens que compõem a cobertura.

Avaliar o desempenho de alguns desses modelos é importante para verificar se eles possuem boa precisão em diferentes regiões. El-Metwally (2004), ao comparar modelos de estimativa de (R_s) a partir de dados de temperatura máxima e mínima com os que estimam com base na insolação, para o Egito, em diferentes estações do ano, verificou desempenho satisfatório e concluiu que eles podem ser usados, caso não se disponha de dados de insolação. O autor também verificou melhor desempenho desses modelos para as condições de céu claro e parcialmente nublado em relação às condições de céu nublado. Al-Salaymeh (2006), em Amman (Jordânia), observou que os modelos avaliados por ele foram precisos, mostrando que os valores estimados tiveram boa concordância com os valores medidos. Mahmood e Hubbard (2002) encontraram estimativas mais estáveis para diferentes condições climáticas, em dias de céu claro e maior amplitude térmica diária com o modelo de Bristow e Campbell.

Normalmente, esses modelos necessitam de calibração local, o que requer alguns dados observados de radiação solar para a derivação dos coeficientes, e isso

pode restringir sua aplicação em locais onde ela não tenha sido observada anteriormente. Porém, para alguns locais, estudos demonstraram que a melhoria é pequena e nem sempre a calibração é necessária. Fortin *et al.* (2008) verificaram que a calibração local do modelo de Hargreaves não se justifica, pois em estudos conduzidos pelos autores às condições climáticas do nordeste dos EUA, a redução da raiz do quadrado médio do erro (RQME) foi de apenas 1% em relação ao original. Eles afirmaram ainda que a simplicidade desse modelo o confirma como referência. Borges *et al.* (2010) também recomendaram o modelo de Hargreaves, sem calibração, para Cruz das Almas, Bahia.

No entanto, Ball *et al.* (2004), trabalhando com alguns modelos em 13 locais, no Canadá, verificaram que calibração local do modelo de Hargreaves melhora seu desempenho. Diversos outros autores relataram a importância da calibração local dos modelos de estimativa da R_s na sua representatividade (FORTIN *et al.*, 2008; YIN *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2009; CARVALHO *et al.*, 2011).

Estudos conduzidos por Almorox (2011), em Aranjuez, Espanha, confirmaram que o modelo proposto por Hargreaves fornece valores precisos para o local onde o modelo foi calibrado. Para o modelo de Bristow e Campbell, Wu *et al.* (2007) verificaram que, em uma região da China, o menor erro de estimativa foi obtido com ele calibrado às condições climáticas do local de estudo, com RQME igual a $4,32 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, o qual recomendaram quando apenas dados de temperatura estão disponíveis.

Deve-se ressaltar ainda que, quanto melhor o desempenho do modelo de estimativa, melhores são os cálculos das variáveis que necessitam desse dado. Assim, para obter dados de ETo precisos, a calibração pode ser determinante. Estudos conduzidos por Yin *et al.* (2008) mostraram que a radiação estimada no local, com o modelo devidamente calibrado, serviu de base para obter a ETo com precisão, o que seria superestimada em cerca de 27%, se não houvesse calibração, para um local na China. Também Liu *et al.* (2009) ressaltaram a importância da calibração e afirmaram que esta melhora o manejo da irrigação. Segundo Almorox (2011), as estimativas são razoavelmente precisas quando da calibração local dos coeficientes, tornando-os uma ferramenta adequada, com a vantagem de utilizarem dados comumente disponíveis.

Um fator a ser considerado é se os modelos de estimativa da radiação solar com dados apenas de temperatura do ar são precisos quando comparados àqueles que englobam maiores números de variáveis na sua determinação. Almorox (2011), avaliando 15 modelos de estimativa da radiação solar na Espanha, obteve melhores resultados à medida que utilizou modelos com maior número de variáveis climáticas. No entanto, quanto maior o número de variáveis requeridas, maiores são as restrições dos modelos, especialmente quanto à carência de dados climáticos. Hunt *et al.* (1998), com base na avaliação de cinco modelos de estimativa da radiação solar, encontraram melhores estimativas em um modelo múltiplo-linear, relacionando-se a (R_s) com a temperatura do ar e chuva. Porém, para dias com elevada precipitação, a (R_s) estimada pode ser negativa (ABRAHA; SAVAGE, 2008).

Assim, para verificar se esses modelos se ajustam a um dado local, qual deles apresenta melhores estimativas e quais os valores dos coeficientes, estudos são necessários.

2.4 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0)

A evapotranspiração (ET) é definida como sendo a combinação dos processos de evaporação da água a partir da superfície do solo e da transpiração das plantas (RÁCZ *et al.*, 2013). É ainda um parâmetro crucial do ciclo hidrológico na agricultura, particularmente em sistemas irrigados (MARTÍ *et al.*, 2015), possuindo expressiva importância na modelagem hidrológica, na determinação de preços de cobrança pelo uso da água e no gerenciamento de recursos hídricos de modo geral (KISI, 2011; ABDULLAH *et al.*, 2015; TEGOS *et al.*, 2015).

A taxa de evapotranspiração de uma superfície vegetada é determinada por fatores climáticos, características da vegetação e do solo, além das condições ambientais e das práticas agrícolas. A interdependência entre fatores atmosféricos e da superfície, associada à variabilidade espacial e temporal destes fatores, inviabiliza o desenvolvimento de um modelo capaz de contabilizar a ET para diferentes cultivos sob diferentes condições ambientais (ALLEN, *et al.*, 1998; ROJAS & SHEFFIELD, 2013).

A evapotranspiração é um indicador eficiente, que reflete a mudança climática e a transferência de energia entre terra e atmosfera. Também desempenha um papel

importante na estimativa da demanda hídrica das culturas irrigadas, sendo isso bastante enfatizado por Wu *et al.*, (2015); Xie *et al.*, (2013); Todorovic *et al.*, (2013) e Kite & Droogers, (2000).

A evapotranspiração de referência foi definida por Doorenbos & Pruitt (1977), no Boletim 24 da FAO, como a taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície, com cobertura gramada de altura uniforme, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem déficit de água. Essa definição foi extensamente aplicada até a revisão proposta Allen *et al.* (1998), no Boletim 56 da FAO, no qual as características da cultura de referência foram fixadas em 12 cm de altura, resistência total da superfície de 70 s m^{-1} e coeficiente de reflexão de 0,23. As duas superfícies de referência para o cálculo da ETo, comumente utilizadas para propósitos agrícolas, são a grama e a alfafa. A alfafa de referência é similar à grama, no entanto, possui maior altura (KISI, 2011).

A ETo é uma informação e parâmetro agrometeorológico indispensável para o planejamento e manejo de irrigação (CARVALHO *et al.*, 2011). A evapotranspiração das culturas é estimada com base no coeficiente de cultura e nos valores da evapotranspiração de referência.

A ETo expressa a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, características do solo, estágio de desenvolvimento e práticas de manejo, sendo dependente apenas de variáveis climáticas, simplificando o cômputo da evapotranspiração, que pode ser realizado a partir de dados meteorológicos (SENTELHAS *et al.*, 2010; ROJAS & SHEFFIELD, 2013).

Nesse sentido, com o passar dos anos, de acordo com Carvalho *et al.* (2011), vários modelos para estimar a evapotranspiração de referência foram desenvolvidos. Três importantes razões concorreram para isso: adequação do método às condições climáticas da região, simplicidade de uso e limitação de elementos meteorológicos ou climatológicos que alimentam estes modelos. Devido à diversidade de modelos existentes, em razão da grande variabilidade dos parâmetros que influenciam o fenômeno e, também, considerando o empirismo de muitos deles, é comum haver pesquisas para avaliar o método que tem maior aplicabilidade ao local de estudo.

2.5 EFEITO DA R_s NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)

Uma informação importante para os modelos de estimativa de R_s é avaliar qual o impacto nos processos que dependem diretamente dos valores estimados, como por exemplo, a evapotranspiração. Apesar de a evapotranspiração poder ser medida diretamente, esse é um processo trabalhoso, demorado e caro, sendo ela, portanto, estimada na maioria das situações (LIU *et al.*, 2009). Vários métodos podem ser empregados para seu cálculo (CONCEIÇÃO, 2010). A abordagem mais utilizada é o modelo de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO (Food and Agriculture Organization) como padrão, o qual é calculado para uma cultura de referência em função de ser o mais razoável, tanto para condições climáticas úmidas, quanto áridas, fornecendo valores para o planejamento e uso eficiente dos recursos hídricos na agricultura, na qual a radiação líquida do local de estudo é um componente importante na sua determinação (YIN *et al.*, 2008). Dessa forma, nota-se que a ET_o é dependente da quantidade de energia disponível no ambiente, sendo, portanto, a R_s uma variável importante na sua estimativa (CARVALHO *et al.*, 2011).

Trabalhos desenvolvidos em diferentes locais vêm demonstrando a importância de estimar R_s para aplicar no método padrão de estimativa da ET_o na ausência de dados medidos. Carvalho *et al.* (2011), Seropédica, RJ, obtiveram índice de desempenho ótimo em todas as metodologias utilizadas, porém, segundo os autores, a calibração local produziu resultados mais satisfatórios no cálculo da evapotranspiração. Bellocchi *et al.* (2003), em vinte locais, nos cinco continentes, também não encontraram diferenças significativas entre as ET_o obtidas com R_s estimada pelo modelo Bristow e Campbell e a obtida a partir da medida.

Também Jabloun e Sahli (2008), observaram que, na falta de R_s medida, modelos que a estimaram a partir de dados de temperatura máxima e mínima diária produziram estimativas precisas de ET_o , em oito locais da Tunísia. Esses autores verificaram ainda que métodos que usam apenas dados de temperatura para estimar ET_o são menos eficientes do que o método parametrizado pela FAO, mesmo quando há necessidade de estimar R_s . Segundo Bois *et al.* (2008), a radiação solar tem grande influência no cálculo da ET_o , justificando, portanto, sua estimativa. Assim, utilizar o método padrão, mesmo com dados de R_s estimada, é mais eficiente do que dispor de modelos que a calcula sem essa variável. Esses trabalhos supracitados vêm

demonstrando que é preferível estimar R_s a partir de elementos fáceis de serem medidos, como a temperatura máxima e mínima do ar, do que usar outro método para o cálculo da ETo pois, na maioria dos casos, os resultados são mais precisos.

2.6 FATORES QUE AFETAM A ETo

De acordo com Allen *et al.* (1998), os fatores meteorológicos determinantes da evapotranspiração de referência são aqueles que fornecem energia para vaporização e que promovem a remoção do vapor de água da superfície evaporante. Dentre esses fatores, os principais são a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade e a velocidade do vento.

Por ser a fonte de energia primária para os fenômenos meteorológicos, a radiação solar possui expressiva influência no processo de evapotranspiração (CARVALHO *et al.*, 2011), sendo a variável climática mais mencionada por alguns autores na estimativa da ETo (LEMOS FILHO *et al.*, 2010). A temperatura do ar exerce um papel de controle sobre a ETo na medida em que o calor sensível do ar é transferido às plantas (ALLEN *et al.*, 1998), além de influenciar outros termos importantes na estimativa da ETo . A umidade relativa do ar é um fator determinante da capacidade evaporativa do ar, pois está relacionada ao déficit de pressão de vapor entre a superfície e o ar circundante (LEMOS FILHO *et al.*, 2010). A influência da velocidade do vento se dá na renovação da camada de ar saturada que se forma sobre a superfície evaporante e, assim como a umidade do ar, possui maior importância relativa em situações em que ocorrem fortes advecções locais ou regionais (ALLEN *et al.*, 1998; LEMOS FILHO *et al.*, 2010).

A ETo é uma função não linear e complexa desses fatores meteorológicos, sendo que a variação de um parâmetro provoca mudanças em outros parâmetros, de modo que o efeito dessas mudanças na ETo é difícil de ser compreendido (DINPASHOH *et al.*, 2011). A resposta da ETo às variações nos componentes climáticos também é influenciada pela região e época do ano (GONG *et al.*, 2006).

Diante dessa complexidade, vários pesquisadores vêm buscando avaliar a sensibilidade da ETo aos elementos climáticos. Uma breve comparação entre alguns desses estudos revela a diversidade de resultados, conforme a região e condições climáticas. Dinpashoh *et al.* (2011), em estudo de análise de tendência da ETo no Irã,

concluíram que a velocidade do vento é a variável de maior impacto na ETo sobre a maior parte do Irã, com exceção da região costeira do mar Cáspio, onde a temperatura foi a variável determinante. Já Gong *et al.* (2006), em avaliação da sensibilidade da equação de Penman-Monteith, na bacia do rio Yangtzé, na China, concluíram que, de modo geral, a umidade relativa do ar foi a variável de maior impacto na ETo, seguida pela radiação solar de ondas curtas e a temperatura do ar, sendo que a velocidade do vento foi a variável de menor impacto.

Nos Estados Unidos, Irmak *et al.* (2006), em avaliações realizadas sobre os efeitos dos elementos climáticos sobre a ETo em diferentes regiões, constataram diferentes resultados em função da época do ano, e de modo geral, a radiação solar foi a variável preponderante para a estação do verão, e o déficit pressão de vapor para a estação do inverno.

Avaliando a influência dos elementos meteorológicos sobre a ETo no Estado de Minas Gerais, Lemos Filho *et al.* (2010), constataram que a radiação solar se apresentou como fator determinante da ETo, e a velocidade do vento foi de menor influência. Segundo os autores, a menor influência da velocidade do vento pode ser explicada pela continentalidade e aspectos topográficos da região estudada. Já Alencar *et al.* (2014) constataram maior sensibilidade da ETo calculada pela equação de Penman-Monteith à temperatura máxima, seguida da umidade relativa, para a cidade de Uberaba-MG. Silva *et al.* (2011), ao avaliarem a sensibilidade da equação de Penman-Monteith no município de Capim-PB, concluíram que o saldo de radiação é a variável de maior influência na determinação da ETo, e a temperatura média do ar a de menor impacto.

No Brasil, poucos estudos têm sido realizados para analisar a variação temporal da evapotranspiração decorrente das novas condições climáticas. Alencar *et al.* (2011) relatam predisposição de aumento de $2,85 \text{ mm ano}^{-1}$ no Estado de Minas Gerais, influenciada principalmente pela tendência de diminuição da umidade relativa e a alta sensibilidade da ETo a este elemento climático na região estudada. Alencar *et al.* (2014) constataram significativo aumento da ETo da ordem de $1,2 \text{ mm ano}^{-1}$ no município de Catalão-GO, associada a tendências de aumento nas temperaturas máxima e mínima, além da radiação solar. Gondim *et al.* (2011) concluíram que aumentos de temperatura, associados às mudanças climáticas globais, ocasionariam

aumento nas demandas hídricas para a cultura da banana na Bacia do Rio Jaguaribe, no Estado do Ceará, em função de respectivos aumentos da ETo.

2.7 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Nos últimos 100 (cem) anos, muitos pesquisadores vêm empregando esforços no sentido de estimar a ET com precisão, tendo como motivação a crescente consciência de que a água é essencial para a sustentabilidade da vida no planeta (ABDULLAH *et al.*, 2015).

Técnicas convencionais de medida da evapotranspiração diferem em aspectos como complexidade, aplicabilidade, precisão e custos (EUSER *et al.*, 2014). A evapotranspiração pode ser medida diretamente por meio de lisímetros, ou por meio de balanço hídrico e controle de umidade no solo, além de métodos micrometeorológicos. Também pode ser estimada indiretamente por meio de modelos matemáticos que utilizam dados climáticos como parâmetros de entrada (KUMAR *et al.*, 2008; BARROS *et al.*, 2009; LACERDA & TURCO, 2015).

O método direto é mais preciso para estimar a evapotranspiração é o balanço de água por meio de lisímetros (KUMAR *et al.*, 2008; VALIPOUR, 2015). Os lisímetros são equipamentos muito caros e complexos, e sua operação demanda tempo, mão de obra especializada e exige experimentos precisos e cuidadosamente planejados (KUMAR *et al.*, 2008; TABARI *et al.*, 2013; VALIPOUR, 2015). Em contrapartida, apesar de exigir a implantação de uma estrutura física muitas vezes onerosa, a obtenção de dados de evapotranspiração por meio de lisímetros permite planejamento mais confiável da agricultura irrigada, possibilitando o uso mais racional dos recursos hídricos (BARROS *et al.*, 2009). Também são utilizados no desenvolvimento, calibração e avaliação da performance de modelos indiretos de estimativa da ETo (XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011; PEREIRA *et al.*, 2015).

Outra abordagem para estimativa da ET é através de métodos micrometeorológicos, como o da correlação de vórtices turbulentos e do balanço de energia baseado na Razão de Bowen (BEZERRA *et al.*, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2014). A combinação da Razão de Bowen com a radiação solar líquida (R_n) e com o fluxo de calor no solo (G) permite que seja determinado o fluxo de calor latente sobre a superfície vegetada (BIUDES *et al.*, 2008). A razão de Bowen pode ser determinada

multiplicando a constante psicrométrica pela razão entre os gradientes de temperatura e pressão de vapor (LIMA *et al.*, 2011). A contabilização dos gradientes de temperatura e pressão de vapor na coluna de ar imediatamente acima da superfície evaporante é efetuada por meio da instalação de sensores em diferentes altitudes, ou por meio de sensores de alta resolução capazes de realizar medições de temperatura e pressão atual de vapor em várias altitudes (BIUDES *et al.*, 2008; EUSER *et al.*, 2014).

Apesar das medições diretas para estimar a ET serem mais precisas, os custos elevados e as dificuldades de implementação dessas técnicas acabam limitando a disponibilidade desse tipo de informação, de modo que, na maioria dos casos, a ET é estimada através de medições indiretas (AZHAR & PERERA, 2011).

Muitos pesquisadores buscaram alternativas às medidas diretas, e desenvolveram vários métodos de estimativa indireta da ET com base em modelos hidro meteorológicos e matemáticos que utilizam como parâmetros de entrada dados climáticos (KUMAR *et al.*, 2008).

A evapotranspiração de referência é objeto abundante na literatura, devido à sua grande importância para o manejo da irrigação, em que são encontrados mais de 50 modelos que visam à sua estimativa (MCMAHON *et al.*, 2013; TEGOS *et al.*, 2015). Essa grande diversidade de modelos para a estimativa da evapotranspiração advém da complexidade física do fenômeno, disponibilidade de dados e diversidade de condições climáticas (TEGOS *et al.*, 2015).

Os métodos indiretos de estimativa da ETo variam de modelos simples, baseados na evaporação de tanques, até métodos com boa base teórica e física, que incluem termos energéticos e aerodinâmicos (KUMAR *et al.*, 2008). Segundo Rojas & Sheffield (2013), modelos de estimativa da ETo podem ser divididos em três categorias: 1) métodos empíricos que se baseiam na temperatura do ar; 2) métodos empíricos baseados na radiação; 3) métodos com embasamento físico que combinam elementos de balanço de energia e transporte de massa. Em geral, os métodos com embasamento físico apresentam resultados mais precisos em diferentes condições climáticas, no entanto, requerem vários parâmetros que nem sempre estão disponíveis, como o método de Penman-Monteith. Por outro lado, as equações empíricas mais simples, que requerem menos dados climáticos, comumente resultam em estimativas menos precisas (KUMAR *et al.*, 2008; VEGA & JARA, 2009).

Além das tradicionais equações, recentemente outras técnicas de estimativa da ETo têm sido avaliadas, visando à aplicação em situações com baixa disponibilidade de dados, a exemplo do uso de redes neurais artificiais (LANDERAS *et al.*, 2008; KISI *et al.*, 2015). Redes neurais artificiais (ANN) são modelos empíricos ideais para modelagem de fenômenos complexos e não lineares. Arquitetura ANN é um sistema massivo e paralelamente distribuído de processamento de informações que possui certas características de performance semelhante ao arranjo biológico de neurônios em um cérebro humano. Em muitas maneiras, ANNs são similares a modelos de regressão em hidrologia, exceto pelo fato de que uma ANN não exige a especificação de um modelo matemático (KUMAR *et al.*, 2008). Como exemplo do uso desta técnica de modelagem, Kisi (2011) e Kumar *et al.* (2008) constataram performance superior de redes neurais em relação às equações empíricas de estimativa da ETo no Estado da Califórnia, EUA, em comparação com a equação de Penman-Monteith.

Outra abordagem recentemente estudada para estimar a ET em situações de escassez de dados é por meio de informações de sensoriamento remoto. Sensores a bordo de satélites são capazes de fornecer informações relativas às condições climáticas da superfície, a exemplo do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, cujos dados de temperatura foram utilizados com sucesso por Maeda *et al.* (2011) para estimar a ETo no Quênia. Outra técnica bastante estudada nesse campo de pesquisa é a utilização do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), em que a ET é determinada a partir da quantificação da densidade de fluxo de calor latente, o qual é obtido como resíduo da equação do balanço de energia, utilizando-se dados radiométricos de sensores orbitais (BEZERRA *et al.*, 2008).

2.8 MODELOS DE ESTIMATIVA DA ETo

Muitos pesquisadores de diversos lugares do mundo dedicam-se à avaliação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo, chegando a resultados que apresentam grande variabilidade, muito em função das características climáticas de cada região estudada, e devido ao empirismo inerente à maioria dos métodos (BARROS *et al.*, 2009; SENTELHAS *et al.*, 2010). Esses métodos apresentam ainda problemas de precisão, principalmente pela falta de ajuste dos coeficientes dos

modelos, além de erros de leitura, acurácia dos sensores, e por serem desenvolvidos para condições climáticas e agronômicas específicas que não têm validade para condições distintas (BARROS *et al.*, 2009).

Devido a sua importância, a quantidade de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência aumentou significativamente, por razões como adequação de métodos quanto ao clima, modelos mais simples com necessidade de menor número de dados e limitação de dados de elementos meteorológicos necessários para a utilização de tais métodos (CARVALHO *et al.*, 2011).

De todos os métodos de estimativa da ET_o , desenvolvidos ao longo dos últimos cem anos, o método combinado de Penman-Monteith, proposto pela FAO como método padrão (MARTÍ *et al.*, 2015), tem sido aplicado com sucesso em diferentes condições agrometeorológicas, sendo considerado robusto e preciso (RÁCZ *et al.*, 2013).

O desenvolvimento dos métodos combinados teve início com o trabalho de Penman ao relacionar a ET com o balanço de energia, taxas de calor sensível e transferência de vapor de água (JENSEN, 2010). Segundo Penman (1948), duas condições devem ser satisfeitas para que haja evaporação de forma contínua: 1) deve haver uma fonte de energia para prover calor latente de vaporização, e 2) um mecanismo que remova o vapor produzido da superfície evaporante.

De acordo com Sentelhas *et al.* (2010) ao observarem a utilização de métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração de referência após a calibração local dos parâmetros do modelo, os mesmos forneceram dados consistentes. Muitos trabalhos utilizando modelos simplificados de estimativa têm sido feitos devido à limitação da utilização do modelo de Penman-Monteith FAO em locais em que não se disponibilizam todos os dados de entrada deste modelo, com boa precisão dos dados estimados (JABLON; SAHLI, 2008; SILVA *et al.*, 2008).

Pela incorporação de expressões simplificadas da resistência aerodinâmica e resistência total da superfície, Allen *et al.* (1998) parametrizaram a equação original de Penman-Monteith para a grama hipotética de referência, originando a equação conhecida como Penman-Monteith-FAO, a qual passou a ser recomendada como o método padrão para determinar a ET_o e para avaliar o desempenho de outros métodos (ALLEN *et al.*, 1998; TODOROVIC *et al.*, 2013; MARTÍ *et al.*, 2015).

Em estudo realizado por Jensen, utilizando lisímetros em diversos locais do mundo, o método de Penman-Monteith foi o que apresentou o melhor desempenho, tanto na escala diária como mensal (ROJAS & SHEFFIELD, 2013). No entanto, esse método possui como inconveniente a demanda de grande número de dados climáticos, como temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação, os quais nem sempre estão disponíveis em muitas regiões do mundo, em quantidade e consistência necessárias, sobretudo em países em desenvolvimento (VALIANTZAS, 2013; MARTÍ *et al.*, 2015; TEGOS *et al.*, 2015).

Apesar de ser amplamente estudado e aplicado em diversas regiões do mundo, em certas condições climáticas especiais, o método de Penman-Monteith recomendado pela FAO pode apresentar imprecisões (WIDMOSER, 2009). Azhar & Perera (2011) constataram subestimativa da ETo, quando calculada pela equação Penman-Monteith em três localidades da Austrália, em comparação com dados de lisímetros. Segundo Katerji & Rana (2014) as principais fontes de erro da equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO são devidas ao fato do não atendimento da premissa de regime permanente considerada nesta metodologia, sobretudo quando a equação é aplicada à escala diária ou para períodos maiores, e também por negligenciar a variação na resistência da superfície de referência, a qual é considerada fixa com valor de 70 s m^{-1} , sendo que alguns estudos indicam valores variando de 10 a 130 s m^{-1} .

As recomendações de Allen *et al.* (1998), em situações de ausência de dados climáticos, têm sido avaliadas em diferentes países e climas para testar sua viabilidade (ALENCAR *et al.*, 2015). Todorovic *et al.* (2013) compararam o desempenho do método de Penman-Monteith- FAO com dados limitados e Hargreaves-Samani, em 16 países com diferentes condições climáticas na região do Mediterrâneo, constatando que, para condições climáticas mais áridas, o método de Hargreaves-Samani apresentou melhor desempenho do que o Penman-Monteith-FAO com dados limitados, e para climas semiáridos a úmidos, o método de Penman-Monteith- FAO com dados limitados apresentou melhor desempenho.

Dentre os métodos que demandam poucos dados, os mais utilizados são aqueles que têm como fundamento a temperatura do ar. Segundo Martí *et al.* (2015) o desenvolvimento desses métodos se justifica por diversas razões, dentre as quais o fato de que a temperatura e a radiação solar explicam cerca de 80% da variabilidade

da ETo, e que a amplitude da temperatura diária pode ser relacionada com a umidade, nebulosidade e advecção, além do fato de que a temperatura é a variável climática mais largamente monitorada entre aquelas necessárias à estimativa da ETo.

Métodos baseados na temperatura são simples e demandam poucas variáveis de entrada. No entanto, o cálculo de alguns coeficientes empíricos requeridos pode ser difícil. Esses métodos são recomendados para serem usados na escala mensal ou para períodos maiores (RÁCZ *et al.*, 2013).

Dentre os métodos baseados na temperatura, o de Blaney-Criddle (modificado por Doorenbos & Pruitt, 1977) é um dos mais simples, e foi desenvolvido originalmente para uma região semiárida do oeste dos Estados Unidos, tendo sido amplamente utilizado para estimativa da ETo antes da introdução da equação de Penman-Monteith (FOOLADMAND & AHMADI, 2009; TUKIMAT *et al.*, 2012; MELO & FERNANDES, 2012; RÁCZ *et al.*, 2013).

Outra categoria de métodos de estimativa da ETo é aquela que se baseia na radiação solar, sendo fundamentada no fato de que a radiação solar é a fonte de energia primária para os fenômenos meteorológicos, possuindo contribuição expressiva na evapotranspiração (CARVALHO *et al.*, 2011). A literatura é abundante de casos em que métodos baseados na radiação se mostram superiores a métodos baseados na temperatura, a exemplo de Tukimat *et al.* (2012) para o norte da Malásia e Xystrakis & Matzarakis (2011) para a ilha de Creta na Grécia. RácZ *et al.* (2013) afirmam ainda que equações com base na radiação, se calibradas localmente, podem apresentar maior precisão do que métodos combinados. Sua aplicação depende da disponibilidade de dados de radiação solar ou número de horas de brilho solar (XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011).

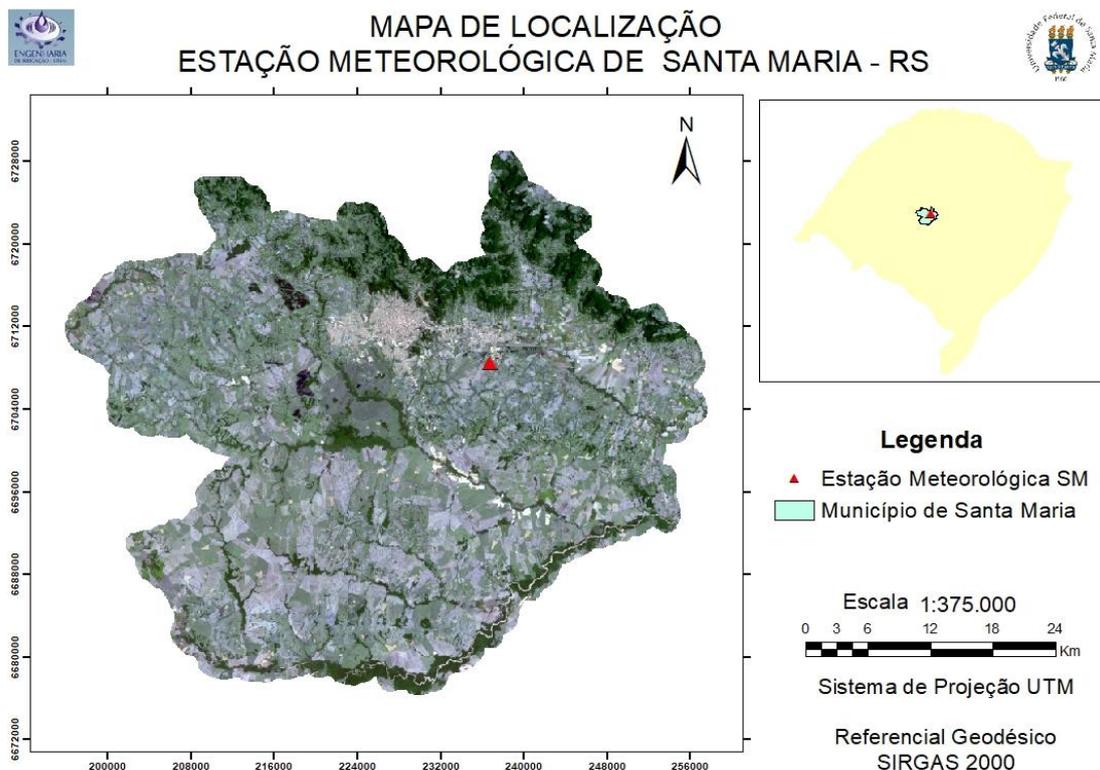
3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos empregados no desenvolvimento do presente estudo. Desse modo, serão expostos os procedimentos utilizados para a realização do experimento, que foi desenvolvido de forma teórica.

3.1 LOCAL DO ESTUDO

A área do presente estudo (Figura 1) está localizada na Universidade Federal de Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul, nas seguintes coordenadas geográficas: 29°42'25"S; 53°48'42"W e altitude de 95 metros. O clima na região é caracterizado, segundo Koppen, como sendo subtropical úmido (Cfa), sem estação seca, com temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e precipitação pluviométrica média anual de 1.616 mm (ALVARES *et al.*, 2013).

Figura 1 - Mapa com a localização geográfica da estação meteorológica utilizada no estudo.



Fonte: Yessica Ramirez Flores, 2018.

3.2 OBTENÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos necessários para realizar a calibração dos modelos de radiação solar e a sua influência na obtenção da evapotranspiração de referência diária, utilizados durante o desenvolvimento do estudo, foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática (EMA) disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), instalada nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria - UFSM.

Os dados foram obtidos dos registros diários referentes ao período de 1 de janeiro de 2002 a 31 de dezembro de 2017, compreendendo 15 anos de registros. Para este estudo, as médias diárias obtidas foram a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) e velocidade do vento a 2 metros de altura (m.s^{-1}).

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS METEOROLÓGICOS

A análise da qualidade dos dados é primordial para a obtenção de resultados consistentes e confiáveis. No presente estudo a análise de qualidade consistiu na identificação de valores discrepantes na série de dados da estação em estudo bem como a identificação de dados ausentes. A correção dos dados na série foi preenchida com a média dos valores em períodos de diferentes durações no mesmo ano, com o auxílio do programa CLIMA – Computação Lógica de Informação para Monitoramento Agroclimático (FARIA *et al.*, 2003).

3.4 MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR AVALIADOS

Os respectivos modelos de estimativa da radiação solar global avaliados, coeficientes com demanda para calibração e suas respectivas referências encontram-se na Tabela 1. Os modelos utilizados para este estudo são baseados na temperatura do ar, sendo esta variável medida na estação supracitada.

Os modelos foram ordenados de acordo com o nome do (s) autor (es), e em sua maioria, são modelos derivados das propostas de Hargreaves (1981) e Bristow e Campbel (1984). O critério usado na escolha dos modelos para o presente estudo

baseou-se no fato de que estes são amplamente utilizados nas mais diversas localidades do mundo, quando a dificuldade na obtenção de dados de radiação solar, também por serem modelos com baixo grau de complexidade e pelas variáveis de entrada.

Nas estimativas de radiação solar global foram utilizados modelos com coeficientes calibrados (1 a 5), sendo que os coeficientes dos modelos foram calibrados por meio do *software* TableCurve 2D v5.01 (SYSTAT, 2002), que utilizou como insumo de entrada para a calibração o saldo de radiação e amplitude térmica da temperatura do ar e, para os modelos 6 a 10, foram utilizados os coeficientes determinados pelos autores referidos.

Tabela 1 - Modelos de estimativa da radiação solar , coeficientes e referências.

Eq.nº	Abreviatura	Equação	Coeficientes	Referência
1	BA	$R_s = \{a[(T_{max} - T_{min})^{0,5}]b\}$	a,b	Ball <i>et al.</i> (2004)
2	BC	$R_s = a \cdot [exp(-b \Delta T^c)] \cdot R_a$ $b = 0,036exp.(-0,154 \cdot \overline{\Delta T})$	c	Bristow e Campbel (1984)
3	CH	$R_s = R_a \cdot [a(T_{max} - T_{min})^b]$	a,b	Chen <i>et al.</i> (2004)
4	Ha	$R_s = a \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a$	a	Hargreaves (1981)
5	MV	$R_s = 0,75 \cdot (1 - exp(-b\Delta T^2)) \cdot R_a$	b	Meza e Varas (2000)
6	Ann	$R_s = R_a \cdot K_{RS} \cdot (1 + 2,7 \cdot 10^{-5} \overline{\Delta T}) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5}$	-	Annandale <i>et al.</i> (2002)
7	DC	$R_s = R_a \cdot \{0,75[1 - exp(-0,226(T_{max} - T_{min})^2)]\}$	-	Donatelli e Campbell (1998)
8	GD	$R_s = R_a \cdot \{0,68[1 - exp(-0,03(T_{max} - T_{min})^{2,02})]\}$	-	Goodim <i>et al.</i> (1999)
9	HS	$R_s = K_{rs} \cdot \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \cdot R_a$	-	Hargreaves e Samani (1982)
10	WS	$R_s = 0,75 \cdot \left(1 - exp\left(-b \frac{\Delta T^2}{R_a}\right)\right) \cdot R_a$	-	Weiss <i>et al.</i> (2001)

R_s - radiação solar incidente na superfície ($MJ m^{-2} d^{-1}$); R_a - radiação solar incidente extraterrestre ($MJ m^{-2} d^{-1}$); a, b, c - coeficientes de calibração dos modelos empíricos (adimensionais) K_{RS} = coeficiente empírico, (0,16 para cidades do interior e 0,19 para cidades litorâneas); ΔT – amplitude térmica; $\overline{\Delta T}$ – amplitude térmica média; T_{min} – temperatura mínima do ar; T_{max} – temperatura máxima.

A radiação incidente no topo da atmosfera (R_a) foi obtida conforme os procedimentos sugeridos por Allen *et al.* (1998), através das seguintes equações:

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} \cdot d_r (\omega_s \cdot \text{sen}\varphi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\varphi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}\omega_s) \quad (11)$$

$$d_r = 1 + 0.003 \cdot \text{cos} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} \right) \quad (12)$$

$$\omega_s = \text{cos}^{-1}(-\text{tan}\varphi \cdot \text{tan}\delta) \quad (13)$$

$$\delta = 0.409 \cdot \text{sen} \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot J}{365} - 1,39 \right) \quad (14)$$

Em que: G_{sc} é a constante solar ($0,0820 \text{ MJ.m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$); d_r adimensional; ω_s é o ângulo horário do pôr do Sol, em radianos; φ é a latitude do local, em radianos; δ é o declinação solar, em radianos e J é o dia juliano.

A amplitude térmica ($^{\circ}\text{C}$) foi calculada de acordo com a equação a seguir:

$$\Delta T = T_{max} - T_{min} \quad (15)$$

3.5 CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Para calcular a evapotranspiração de referência (ET_o) utilizou-se o modelo de Penman Monteith, parametrizado pela FAO e recomendado como padrão pela comunidade agrônômica internacional (BOIS *et al.*, 2008), representado pela equação (6). Os cálculos foram realizados por meio do *software* Microsoft Excel 2016.

Os resultados da estimativa da evapotranspiração de referência com dados de radiação solar medidas na estação meteorológica foram considerados como padrão e foram comparados com os resultados obtidos da estimativa da evapotranspiração de

referência utilizando-se de dados de radiação solar estimados pelos modelos acima citados (Tabela 1).

$$ET_{o_PM} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T+273} \right) v (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34v)} \quad (16)$$

Em que: ET_{o_PM} é a evapotranspiração de referência, em gramado, mm d^{-1} ; (R_n) é a radiação líquida, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; (G) é o fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; T é a temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$; v é a velocidade média do vento a 2m de altura, m s^{-1} ; ($e_s - e_a$) é o déficit de pressão de vapor, kPa ; Δ - é a curva de pressão de vapor, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ é a constante psicrométrica, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ e 900 é o fator de conversão.

3.5.1 Declividade da curva de pressão de vapor d'água foi estimada através da equação (17).

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (17)$$

3.5.2 A pressão parcial de vapor foi estimada através da equação (18).

$$e_a = \frac{(e_s UR)}{100} \quad (18)$$

3.5.3 A pressão de saturação de vapor foi estimada através da equação (19).

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T}{(237,3 + T)} \right] \quad (19)$$

3.5.4 Calor latente de vaporização foi estimado através da equação (20).

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) T \quad (10)$$

3.5.5 Coeficiente psicrométrico foi estimado através da equação (21).

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P}{\lambda} \quad (11)$$

Em que P é a pressão atmosférica média diária (kPa).

3.5.6 O fluxo de calor no solo (G) foi considerado igual a zero, valor que pode ser assumido para períodos diários (ALLEN et al., 1998). A radiação líquida (R_n), para os valores diários, foi estimada através da equação (22).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (12)$$

Sendo, (R_{ns}), o saldo de radiação de ondas curtas e (R_{nl}), o saldo de radiação de ondas longas, em que (R_{ns}) é dado através da equação (23).

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (13)$$

Sendo que α é o albedo da superfície (0,23).

Para o cálculo do balanço de ondas longas (R_{nl}) foi usada a seguinte equação (24).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,K^4} + T_{min,K^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) (3,12) \quad (24)$$

Em que: R_{nl} é o balanço de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,9 \cdot 10^{-9} \text{ Mj K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{max} é a máxima temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C}$); T_{min} é a mínima temperatura absoluta ($^{\circ}\text{C}$); e_a é a pressão de vapor atual (kPa) e R_s/R_{so} é a relação da radiação solar incidente.

3.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os índices de desempenho estatísticos utilizados neste estudo foram: Coeficiente de Determinação da Regressão Linear (R^2), Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), e o Erro Absoluto Médio (MBE), conforme apresentado nas equações (25,26 e 27). Quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , melhor o ajuste dos valores estimados com os valores medidos, e quanto menor o valor de RMSE, melhor é o desempenho do modelo, mostrando pouca dispersão dos valores estimados. Não se sabe, contudo, se o modelo subestima ou superestima os valores (JACOVIDES & KONTOYIANNIS, 1995), por isso foi utilizado o MBE em que valores positivos superestimam e valores negativos subestimam os valores estimados.

$$R^2 = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2 \right]} \quad (25)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (26)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(N^{-1} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right)} \quad (27)$$

Em que: P_i são os valores estimados pelo método em avaliação, O_i são valores observados, O média dos valores observados e N é o número de observações.

Com o intuito de dar suporte à análise estatística, a exatidão foi determinada pelo índice de concordância (d) proposto por Willmott (1981). Seus valores variam de 0, para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice de concordância (28) fornece o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas e pode ser calculado pela seguinte equação:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (28)$$

Em que: P_i são os valores estimados, O_i são os valores observados e O é a média dos valores observados.

O índice de precisão (r) (29), adaptado do coeficiente de correlação de Pearson, permite quantificar o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise (LIRA; NETO, 2006), e pode ser estimado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P)(O_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}} \quad (29)$$

Em que P_i são os valores estimados, O_i os valores observados, P a média dos valores estimados e O a média dos valores observados.

Quanto mais próximo de 1,0 (positivo ou negativo), maior é o grau de dependência estatística linear entre as variáveis, e quanto mais próximo de zero, menor é a força dessa relação (FIGUEIREDO FILHO; JUNIOR, 2010).

A avaliação do desempenho dos modelos foi realizada através do índice de desempenho (Id) (30), adaptado de Camargo e Sentelhas (1997), cujo valor é o produto do índice de concordância (d) e do índice de precisão (r), expresso por:

$$Id = r \cdot d \quad (30)$$

Os critérios de interpretação do índice de concordância, índice de precisão e índice de desempenho e das respectivas classes de desempenho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Critério para interpretação do Índice de Concordância, do Coeficiente de Correlação e do Índice de Desempenho e suas respectivas classificações.

Índice de Concordância (d)	Coeficiente de Correlação (r)	Índice de Desempenho (Id)	Classificação
0.95 – 1.00	0.95 – 1.00	0.90 – 1.00	Excelente
0.89 – 0.95	0.89 – 0.95	0.80 – 0.90	Ótimo
0.84 – 0.89	0.84 – 0.89	0.70 – 0.80	Muito Bom
0.77 – 0.84	0.77 – 0.84	0.60 – 0.70	Bom
0.71 – 0.77	0.71 – 0.77	0.50 – 0.60	Moderadamente Bom
0.63 – 0.71	0.63 – 0.71	0.40 – 0.50	Moderado
0.55 – 0.63	0.55 – 0.63	0.30 – 0.40	Moderadamente Ruim
0.45 – 0.55	0.45 – 0.55	0.20 – 0.30	Ruim
0.32 – 0.45	0.32 – 0.45	0.10 – 0.20	Muito Ruim
0.00 – 0.32	0.00 – 0.32	0.00 – 0.10	Péssimo

Fonte: Pimenta *et al.* (2018)

O intervalo de valores empregados nesse estudo para interpretação do “Id” foi menor que os utilizados em classificações existentes na literatura. Isso incide para aumentar a precisão da interpretação desse índice.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no presente estudo. Primeiramente serão apresentados os dados referentes à estimativa da radiação solar global baseados na temperatura do ar, através dos modelos com e sem calibração dos coeficientes e seus indicadores estatísticos. Após, serão expostos os resultados encontrados para a influência da radiação solar global, na obtenção da evapotranspiração de referência diária pelo modelo padrão (ET_o_PM) e seus respectivos desempenhos.

4.1 RADIAÇÃO SOLAR PELOS DIFERENTES MODELOS COM CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES

Para este propósito, cinco modelos empíricos foram avaliados quanto a sua adequação para estimar a radiação solar global diária para o município de Santa Maria - RS. Os modelos empíricos são ferramentas adequadas e bastante simples de se usar com variáveis meteorológicas comumente disponíveis. No entanto, os coeficientes dos modelos empíricos requerem calibração para se obter um bom ajuste.

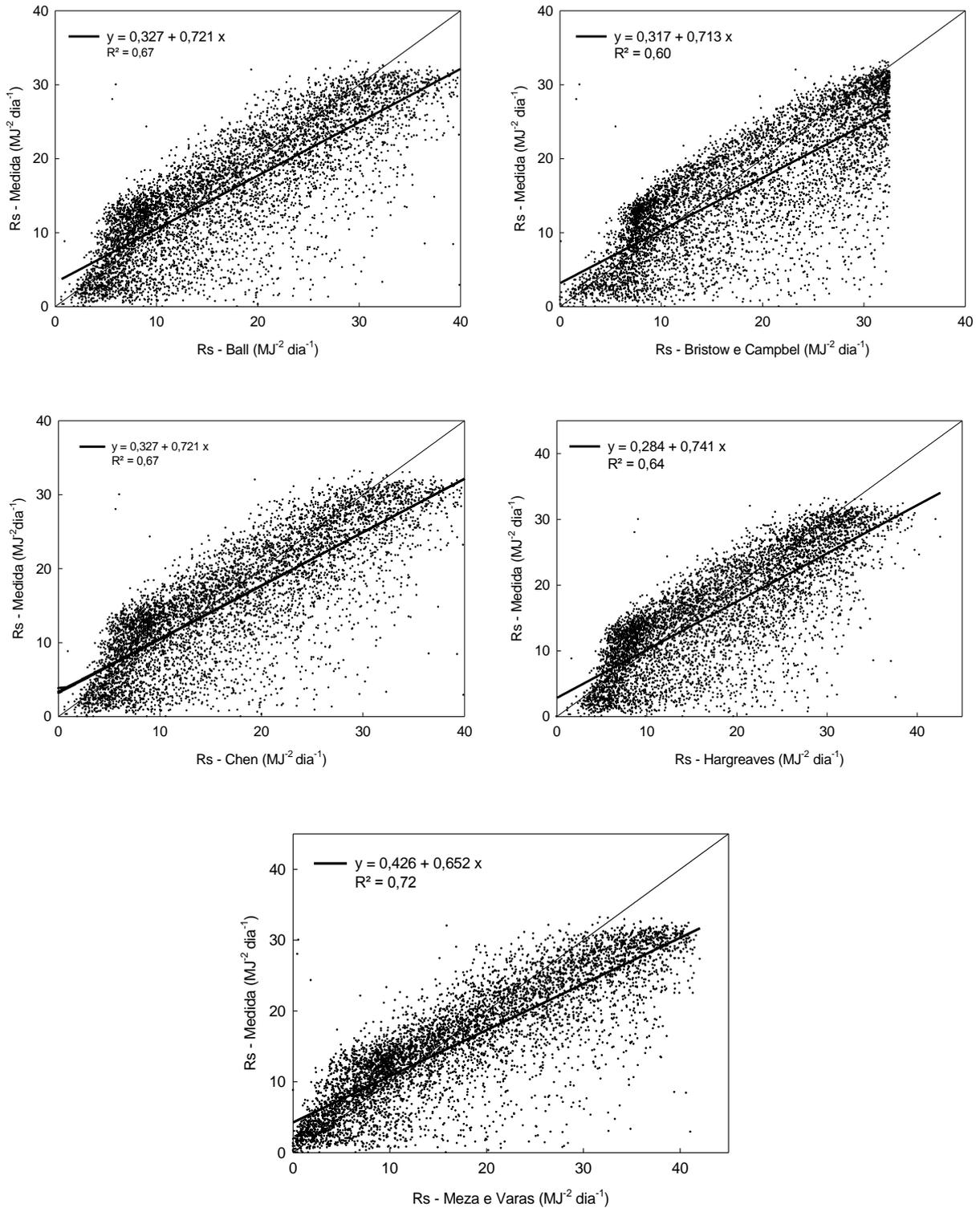
As regressões entre os pares de dados de radiação solar global (R_s) medidas na estação meteorológica e estimadas pelos modelos já calibrados, os valores de R² e a dispersão dos pontos em torno da reta 1:1, estão representados na Figura 2.

O coeficiente de determinação R² é um dos primeiros indicativos do bom desempenho do modelo, contudo necessita de outros parâmetros de avaliação, como o grau de dispersão entre os valores estimados, bem como a superestimativa e subestimativa do modelo e o seu grau de precisão.

Observa-se, na Figura 2, que todos os modelos testados tiveram um bom desempenho na estimativa da radiação solar global diária. No geral, o modelo proposto por Meza e Varas obteve o melhor desempenho com R² de 0,72. Para os demais modelos, os valores de R² variaram de 0,60 a 0,67. Estes resultados corroboram com os encontrados por Borges *et al.* (2010) para a cidade de Cruz das Almas-BA, são, porém, inferiores aos encontrados por Bristow e Campbell (1984), que oscilaram entre 0,92 e 0,95 e Donatelli e Campbell (1998) em média de 0,88. Estes

resultados são esperados, uma vez que os modelos desses autores foram desenvolvidos de acordo com as características climáticas do local.

Figura 2 - Gráficos de dispersão dos valores de R_s estimados a partir de cinco modelos calibrados e medidos para Santa Maria - RS.



Ao comparar a linha de tendência gerada entre os dados de R_s medidos e os estimados com a reta 1:1, observam-se as tendências de cada um dos modelos ao longo das variações de R_s . Dessa forma, os valores que estão abaixo do ponto de intercessão da linha de tendência não se anulam com os valores acima dela. Assim, nota-se que todos os cinco modelos calibrados Ball, Bristow e Campbel, Chen, Hargreaves e Meza e Varas, apresentaram tendência em subestimar os valores de R_s diária em relação à média, que foi em torno de $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e a superestimar os valores acima dessa, conforme verificado em outros estudos (MAHMOOD; HUBBARD, 2002; LIU et al., 2009; BORGES et al., 2010). Essas tendências, segundo Mahmood e Hubbard (2002), podem estar associadas com advecção em escala local, movimento frontal e o método de regressão. Com base nas afirmações supracitadas, os autores aplicaram uma regressão linear para nove locais nos EUA e obtiveram melhores desempenhos.

4.1.1 COEFICIENTES CALIBRADOS

Os coeficientes obtidos para cada modelo calibrado estão expressos na Tabela 3. O coeficiente “c” de Bristow & Campbell (BC) apresentou pouca variação para os anos estudados, com valor médio de 2,02, podendo esse ser utilizado, mostrando que não foi necessária a calibração desse coeficiente para Santa Maria-RS e demais locais semelhantes climatologicamente.

Para o modelo de Hargreaves (Ha), o coeficiente “a” obteve um valor médio de 0,16. Esse valor foi 6,1 % superior aos obtidos por Liu *et al.* (2009) e 5,7 % aos obtidos por Almorox *et al.* (2011), embora próximo ao recomendado por Allen *et al.* (1998) para um local situado no interior do continente e não calibrado, ressaltando a universalidade deste modelo.

O coeficiente “b” 0,010 obtido com o modelo de Meza e Varas (MV) foi igual aos apresentados pelos próprios autores Meza e Varas (2000), que sugerem que o valor de “b” após sua calibração fique na faixa de 0,004 a 0,010.

Os modelos propostos por Ball (BA) e Chen (CH), apresentaram resultados médios para o coeficiente “a” de 0,10, valores estes abaixo aos encontrados por Macêdo *et al.* (2016), em seis cidades do estado do Ceará, com média de 0,33 para o modelo de BA e 0,35 para o modelo de CH. O mesmo ocorreu para o coeficiente “b”

onde os valores foram abaixo dos encontrados pelo próprio Macêdo *et al.* (2016), que encontrou valores médios de 0,58 para Ball e 0,28 para Chen.

Tabela 3 - Coeficientes calibrados dos modelos, no período de 2002 a 2017, em Santa Maria - RS.

Modelos	Coeficientes Calibrados		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Ball (BA)	0.10	1.33	-
Bristow e Campbell (BC)	-	-	2.02
Chen (CH)	0.10	0.67	-
Hargreaves (Ha)	0.16	-	-
Meza e Varas (MV)	-	0.010	-

4.2 DESEMPENHO ESTATÍSTICO DOS MODELOS CALIBRADOS

Os resultados das avaliações de desempenho dos modelos calibrados estão representados na Tabela 4. Os valores da Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro RMSE, dos coeficientes calibrados para Santa Maria, estão próximos aos valores obtidos em trabalhos de avaliação de modelos de estimativa de Rs a partir da temperatura do ar.

Em geral, os valores medidos e os valores estimados de RMSE ficaram em média $5,91 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ para todos os modelos estudados. Valores esses inferiores aos encontrados por Liu *et al.* (2009), na China, e por Fortin *et al.* (2008), no Canadá, e superiores aos encontrados por Almorox *et al.* (2011), na Espanha e Silva *et al.* (2012) para as condições climáticas do noroeste de Minas Gerais. Em Cruz das Almas, Borges *et al.* (2010), encontraram valores de RMSE na faixa de 3,45 a $10,43 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Tais valores são próximos aos encontrados nesse estudo.

Analisando os dados de MBE expressos na Tabela 4, o menor desvio ($1,48 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) ocorreu para os modelos BA e CH, seguido dos modelos Ha e MV. O maior valor foi encontrado no modelo de BC ($1,83 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), valores inferiores aos encontrados por Fernandes *et al.* (2011) através da calibração de cinco modelos de estimativa da radiação solar, para dez cidades do estado de Goiás, que obtiveram valores médios de $2,84 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

Neste sentido, nota-se que todos os modelos apresentaram tendência em superestimar a Rs. Já os coeficientes de determinação foram, em média, próximos aos obtidos por Liu *et al.* (2009), que encontraram R^2 entre 0,68 e 0,77.

Tabela 4 - Resumo das avaliações dos modelos com os coeficientes calibrados: Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), Erro Absoluto Médio (MBE) e Coeficiente de Determinação (R^2).

Modelos	RMSE	MBE	R^2
Ball (BA)	5.70	1.50	0.67
Bristow e Campbell (BC)	6.16	1.83	0.60
Chen (CH)	5.70	1.48	0.67
Hargreaves (Ha)	5.90	1.81	0.64
Meza e Varas (MV)	6.11	1.78	0.72

Quanto aos índices de concordância, coeficiente de correlação e índice de desempenho, os mesmos estão representados na Tabela 5. Observa-se que todos os modelos estudados apresentaram bom desempenho, obtendo valores médios do índice de concordância “d” de 0,97, mostrando uma concordância perfeita entre as variáveis envolvidas, resultados esses superiores aos encontrados por Rodrigues *et al.* (2008) e por Conceição e Marin (2005), com índice de concordância de 0,76. Para o coeficiente de correlação “r” os valores encontrados variaram entre 0,78 a 0,85, apresentando uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis analisadas, radiação solar medida e estimada.

Já para o índice de desempenho “Id”, os resultados encontrados variaram entre 0,78 a 0,82, sendo classificados como “Muito Bom” e “Ótimo” de acordo com a Tabela 1. Destaca-se o modelo de Meza e Varas como sendo o de melhor desempenho, com índice de desempenho “Id” de 0,82, sendo classificado como “Ótimo”. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por Silva *et al.* (2012) para o noroeste de Minas Gerais.

Tabela 5 - Resumo das avaliações dos modelos com os coeficientes calibrados: Índice de Concordância (d), Coeficiente de Correlação (r), Índice de Desempenho (Id) e sua respectiva classificação.

Modelos	d	r	Id	Classificação
Ball (BA)	0.98	0.82	0.80	Ótimo
Bristow e Campbell (BC)	0.97	0.78	0.78	Muito Bom
Chen (CH)	0.98	0.82	0.80	Ótimo
Hargreaves (Ha)	0.97	0.80	0.78	Muito Bom
Meza e Varas (MV)	0.97	0.85	0.82	Ótimo

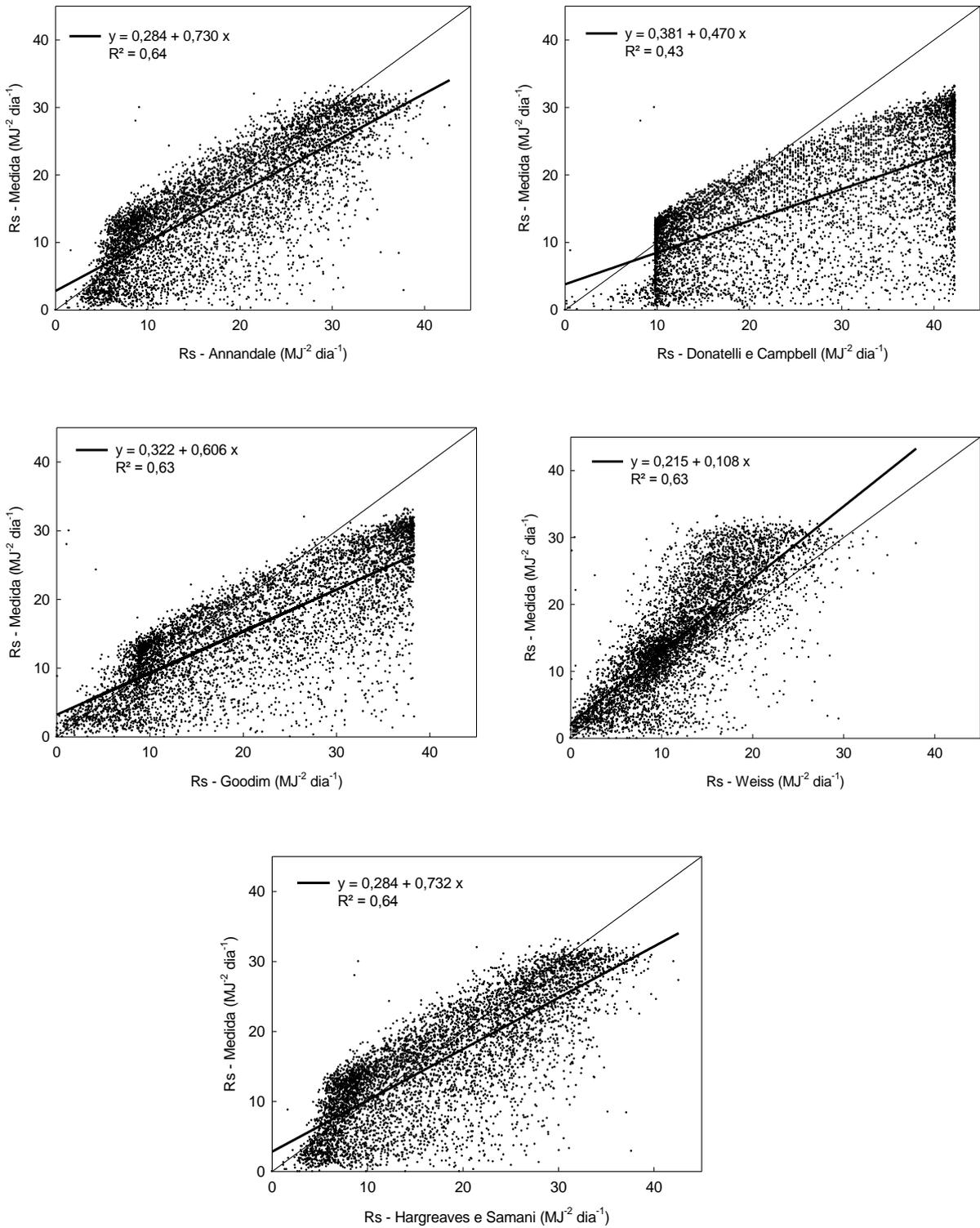
Usando o modelo de Meza e Varas com coeficiente “b” de 0,010 obteve-se os melhores resultados para Santa Maria – RS. Destacam-se também os modelos propostos por Ball e Chen com ótimo desempenho, sendo recomendados para Santa Maria.

4.3 RADIAÇÃO SOLAR PELOS MODELOS SEM CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES

Dentre os modelos estudados, em cinco deles não foi realizada a calibração dos seus coeficientes, podendo ser observados na Tabela 1. Na Figura 3, são representados os gráficos de dispersão dos valores. Os melhores resultados para o coeficiente de determinação foram obtidos pelos modelos propostos por Hargreaves e Samani, Annandale, Goodim e Weiss, com R^2 em torno de 63,5 %. Assim, pode-se afirmar que esses modelos apresentam uma eficiência acima de 60 % na estimativa da radiação solar, valores estes acima aos encontrados por LIU *et al.* (2009) e por ABRAHA e SAVAGE (2008).

O pior resultado foi encontrado utilizando-se o modelo proposto por Donatelli e Campbell (1998), o qual apresentou um coeficiente de determinação R^2 de 0,43, valor esse próximo aos encontrados por MACÊDO *et al.* (2016), em estudos realizados em seis cidades do estado do Ceará. Vale ressaltar que os modelos propostos por Hargreaves e Samani (1982) e Annandale *et al.* (2002), mesmo não possibilitando calibração, apresentaram bons resultados para Santa Maria, indicando que seus coeficientes constantes estão adequados para a cidade em estudo, podendo ser recomendado seu uso em condições semelhantes climatologicamente.

Figura 3 - Gráficos de dispersão dos valores de R_s estimados a partir de cinco modelos não calibrados e medidos para Santa Maria – RS.



Ao comparar a linha de tendência gerada entre os dados de R_s medidos na estação meteorológica e os estimados com a reta 1:1, para os modelos sem calibração, observam-se as tendências dos modelos ao longo das variações de R_s . Assim, nota-se que os modelos Hargreaves e Samani, Goodim e Annandale, apresentaram tendência em subestimar os valores de R_s da média, que foi em torno de $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, e a superestimar os valores acima desta, corroborando com LIU *et al.*, 2009; BORGES *et al.*, 2010.

O modelo proposto por Weiss *et al.* (2001) foi o único, dentre os demais modelos estudados, que apresentou tendência em subestimar os valores de R_s medidos em relação aos estimados. Em contrapartida, o modelo proposto por Donatelli e Campbell (1998) foi o modelo que mais superestimou os valores de R_s .

Na Tabela 6 podem ser verificados os indicadores estatísticos dos valores de radiação solar global diária, em função da temperatura do ar, para os modelos sem calibração. Os valores de RMSE encontrados foram superiores aos obtidos por Silva *et al.* (2012), que encontraram valores com média entre $3,0$ e $3,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, para onze cidades localizadas em três regiões de Minas Gerais. Destaca-se o modelo de Donatelli e Campbell com $12,98$ de RMSE, valor este muito acima do recomendado por (Meira, 2010), que indica o valor zero como uma previsão perfeita.

Analisando o Erro Absoluto Médio, os resultados obtidos pelos modelos de Hargreaves e Samani e Annandale foram de $1,81$ e $1,88 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ respectivamente, sendo esses valores inferiores aos encontrados por Borges *et al.* (2010) que, analisando três modelos para o Recôncavo Sul da Bahia, encontraram valores de $2,54 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para MBE. Para os demais modelos analisados, os valores foram superiores aos encontrados na literatura. Vale destacar que, dentre os modelos analisados, o modelo proposto por Weiss *et al.* (2001) foi o único que apresentou resultados negativos de MBE ($-3,20$), sendo assim, subestimando os valores estimados.

Tabela 6 - Resumo das avaliações dos modelos sem os coeficientes calibrados: Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), Erro Absoluto Médio (MBE) e Coeficiente de Determinação (R^2).

Modelos	RMSE	MBE	R^2
Annandale (Ann)	5.92	1.88	0.64
Donatelli e Campbell (DC)	12.98	9.50	0.43
Goodim (GD)	8.22	4.80	0.63
Hargreaves e Samani (HS)	5.89	1.81	0.64
Weiss (WS)	6.08	-3.20	0.63

Na avaliação dos índices de desempenho, apresentados na Tabela 7, os resultados encontrados para o Índice de Concordância “d” foram todos acima de 0,91, mostrando uma concordância perfeita (excelente) entre radiação solar medida e estimada com modelos sem calibração. Valores esses, bem acima aos encontrados por Massignam (2007), que obteve valores para “d” variando de 0,67 na localidade de Itajaí a 0,86 em Urussanga-SC. Borges *et al.* (2010) estimaram a radiação solar incidente em Cruz das Almas-BA, e encontraram, para o coeficiente de exatidão “d”, valores de 0,77 e 0,90.

Para o Coeficiente de Correlação “r” os modelos Annadale, Hargreaves e Samani, Goodim e Weiss apresentaram um bom grau dependência linear entre as variáveis, e que segundo Pimenta *et al.* (2018) é considerado “Bom”. Valores superiores aos de Rodrigues *et al.* (2008), que estimaram a R_s com base na amplitude térmica diária para cidade de Limoeiro do Norte-CE e encontraram Coeficiente de Correlação “r” de 0,59, classificado como “Alto” conforme Hoppinks (2002).

Os valores do Índice de Desempenho “Id” encontrados foram de 0,60 para o modelo de Donatelli e Campbell, sendo classificado como “Bom”, segundo Pimenta *et al.* (2018). Para os demais modelos os valores dos índices variaram de 0,76 a 0,78, sendo classificados como “Muito Bom”. Conceição e Marin (2005) encontraram desempenho classificado como “Bom” para as localidades de Jales e Piracicaba-SP, com “Id” de 0,71 e 0,72, respectivamente. Rodrigues *et al.* (2008) obtiveram desempenho “Moderado” nas estimativas de radiação solar para condições de Limoeiro do Norte-CE, com “Id” de 0,45.

Tabela 7 – Resumo das avaliações dos modelos sem os coeficientes calibrados: Índice de Concordância (d), Coeficiente de Correlação (r), Índice de Desempenho (Id) e sua respectiva classificação.

Modelos	d	r	Id	Classificação
Annandale (Ann)	0.97	0.80	0.78	Muito Bom
Donatelli e Campbell (DC)	0.91	0.66	0.60	Bom
Goodim (GD)	0.96	0.79	0.76	Muito Bom
Hargreaves e Samani (HS)	0.97	0.80	0.78	Muito Bom
Weiss (WS)	0.96	0.79	0.76	Muito Bom

Dentre os modelos sem calibração de seus coeficientes, todos os modelos apresentaram desempenho bom, sendo recomendados para Santa Maria, quando não houver disponibilidade de dados meteorológicos medidos no local.

4.4 INFLUÊNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR DIÁRIA NA ETo

Confirmada a diferença de precisão dos modelos de radiação solar estudados, com e sem calibração dos seus coeficientes, buscou-se verificar se estes produzem resultados significativos na obtenção da ETo.

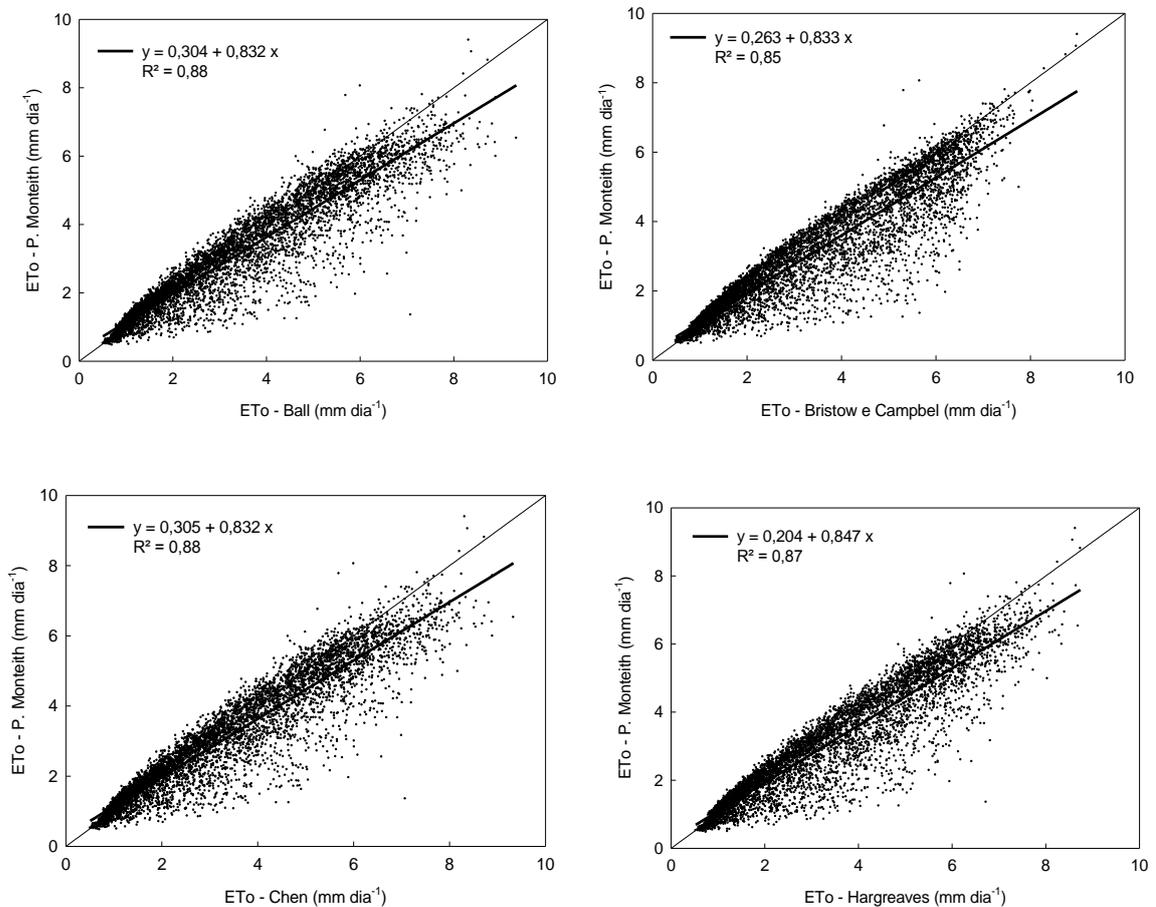
Na Figura 4 estão representadas as correlações entre os valores de evapotranspiração de referência estimados por Penman Monteith utilizando-se da radiação solar estimada pelos modelos supracitados e os valores estimados por Penman Monteith utilizando-se de dados medidos na estação meteorológica localizada em Santa Maria – RS.

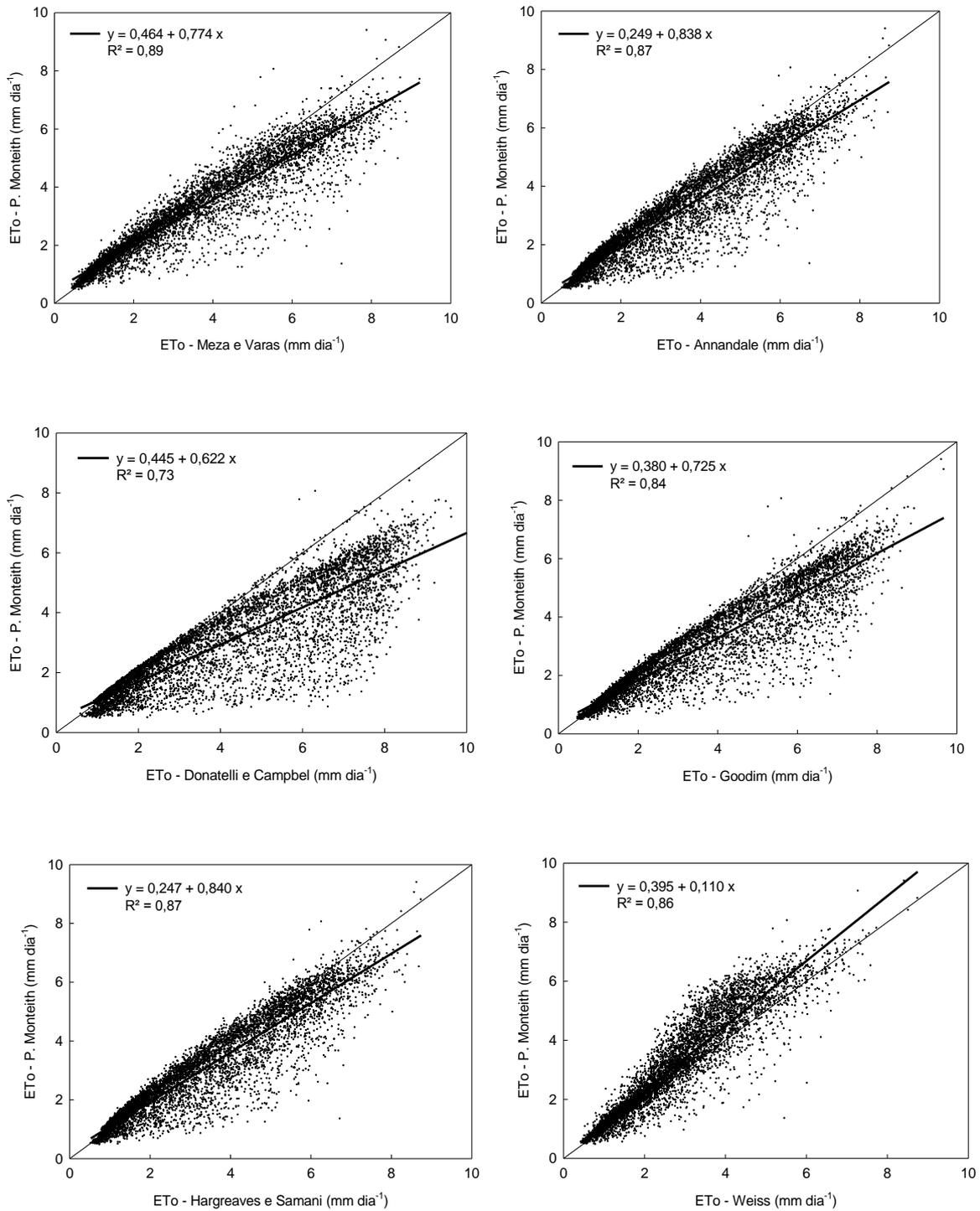
As comparações dos resultados mostraram que o desempenho na obtenção da ETo não foi muito afetado pelo desempenho dos modelos de estimativa da Rs, seguindo, em geral, a mesma tendência, conforme Figura 4. Bandyopadhyay *et al.* (2008), na Índia, encontraram resultados semelhantes aos resultados obtidos no presente trabalho, com valores de R² superiores a 0,70.

Para todos os modelos, o R² foi superior a 0,70. Esses resultados foram superiores aos obtidos por Conceição (2010), em Jales, SP e inferiores aos obtidos por Abraha e Savage (2008), na África do Sul e Jabloun e Sahli (2008), na Tunísia, que obtiveram R² de 0,95.

O desempenho dos modelos de estimativa de Rs na ETo pode ser explicado em função desta ser a principal fonte de energia para o processo evapotranspirativo e, conseqüentemente, o elemento meteorológico que mais interfere nesse processo, pois segundo Bois, *et al.* (2008), ela apresenta uma forte influência nessa determinação. Além disso, a radiação solar afeta todos os outros elementos, conforme relata Pereira *et al.* (2002). Portanto, na falta de equipamentos de medição, estimá-la a partir de dados de temperatura máxima e mínima do ar, todavia, com os respectivos modelos devidamente calibrados às condições climáticas locais, reduz erros na ETo (YIN *et al.*; 2008). Além disso, conforme estudos feitos por Lemos Filho (2010), os elementos meteorológicos possuem grande variabilidade espacial. Portanto, na falta de dados de Rs, é preferível estimá-la por modelos empíricos calibrados do que dispor de modelos mais simples para cálculo da ETo, pois os resultados são mais confiáveis.

Figura 4 - Gráficos de dispersão dos valores de ETo estimados: utilizando a Rs calculada por diferentes modelos e com dados medidos para Santa Maria – RS.





Comparando a Figura 4 com as Figuras 2 e 3, nota-se que as estimativas de ETo seguiram o mesmo padrão das radiações estimadas, ou seja, todos tenderam a subestimar os menores valores e superestimar os valores acima da média, confirmando a dependência do processo de evapotranspiração à radiação solar,

conforme relatado por Bandyopadhyay *et al.* (2008), e justifica a afirmação de Lemos Filho (2010), da necessidade de medir ou estimá-la com precisão.

No entanto, mesmo seguindo o mesmo padrão de tendência, os desempenhos da ETo foram consideravelmente melhores. Sendo que os modelos que tiveram os seus coeficientes calibrados apresentaram os maiores coeficientes de determinação, sendo todos superiores a 0,85. Já para os modelos em que não houve a calibração dos coeficientes, os valores de R^2 variaram de 0,73 a 0,87. Dentre os modelos com pior desempenho na estimativa da Rs, destacam-se o modelo BC e DC, que apresentaram R^2 de 0,85 e 0,73 para a ETo calculada. Resultados estes que podem ser explicados, segundo Righi *et al.* (1998), em função do saldo de radiação (R_n) utilizado para o cálculo da ETo ser menos sensível à variação da temperatura.

4.5 DESEMPENHO ESTATÍSTICO DOS MODELOS NA ESTIMATIVA DA ETo

Na Tabela 8 são apresentados os valores de RMSE, MBE e R^2 para Santa Maria – RS, para a estimativa da ETo calculada pelo modelo de Penman – Monteith utilizando-se de valores de radiação solar (com calibração local dos seus coeficientes), os resultados obtidos mostram o bom desempenho dos modelos estudados, indicando os modelos propostos por Ball e Chen como sendo os melhores, seguido pelos modelos de Hargreaves, Bristow e Campbell e Meza e Varas. Esses valores estão próximos aos obtidos em outros estudos para diferentes locais (ANNANDALE *et al.*, 2002; EL NESR *et al.*, 2011; JABLOUN; SAHLI, 2008). Já as estimativas de ETo utilizando-se de dados de radiação solar global estimados com os modelos não calibrados apresentaram uma maior dispersão dos valores em comparação com os coeficientes calibrados, em que o modelo de Weiss apresentou o melhor valor de RMSE 0,73 e o pior desempenho encontrado foi para o modelo de Donatelli e Campbell, que apresentou 1,72 de RMSE, entre todos os modelos estudados.

Contudo, só através do RMSE não se sabe se o modelo subestima ou superestima os valores. Nesse sentido, o Erro Absoluto Médio refere-se às subestimativas e superestimativas da evapotranspiração de referência. Observa-se, na Tabela 8, que, para a estimativa da ETo, os valores de radiação solar utilizados,

quando calibrados para o local de estudo, apresentaram valores positivos, superestimando os valores de ETo. Os modelos de radiação solar sem calibração local, quando aplicados ao modelo de Penman – Monteith para estimar a ETo, demonstraram uma dispersão maior dos valores. Os modelos Ann, DC, GD e HS, superestimaram os valores de ETo, sendo o modelo de WS o único que subestimou os valores. Isso indica que quando há calibração local dos modelos de estimativa da radiação solar, a estimativa da ETo por Penman – Monteith tende a apresentar comportamento semelhante a Rs.

Tabela 8 - Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro (RMSE), Erro Absoluto Médio (MBE) e Coeficiente de Determinação (R^2) da estimativa da ETo com a utilização de estimativas da radiação solar por diferentes modelos para Santa Maria - RS.

Modelos com calibração	RMSE	MBE	R²
Ball (BA)	0.72	0.24	0.88
Bristow e Campbell (BC)	0.79	0.31	0.85
Chen (CH)	0.72	0.27	0.88
Hargreaves (Ha)	0.74	0.30	0.87
Meza e Varas (MV)	0.80	0.31	0.89
Modelos sem calibração	RMSE	MBE	R²
Annandale (Ann)	0.75	0.31	0.87
Donatelli e Campbell (DC)	1.72	1.20	0.73
Goodim (GD)	1.11	0.66	0.84
Hargreaves e Samani (HS)	0.74	0.30	0.87
Weiss (WS)	0.73	-0.36	0.86

Quanto aos índices estudados, na Tabela 9 são apresentadas as classificações das estimativas da ETo através do uso da estimativa da Rs por meio de modelos com coeficientes calibrados e sem calibração.

Observa-se que tanto os modelos com calibração e os modelos sem calibração apresentaram pouca variabilidade entre si, com valores de 0,96 a 1,0 para o índice “d”. Valores superiores aos encontrados por Conceição e Marin (2005), que verificaram valores para “d” de 0,88 e 0,86 para Jales e Piracicaba-SP, respectivamente e Lêdo et al. (2012) que encontrou valores de 0,61 a 0,64 para Barbalha – CE.

Para o coeficiente de correlação “r” todos os modelos apresentaram boa relação, acima de 0,92 para modelos com calibração e de 0,86 para modelos sem calibração, sendo classificados como excelente e ótimo, mostrando uma grande dependência estatística linear entre as variáveis (FIGUEIREDO FILHO; JUNIOR, 2010).

O último índice estatístico avaliado foi o índice de desempenho “Id”, em que foram obtidos valores acima de 0,91 para modelos com calibração e 0,82 com Donatelli e Campbell, sendo esse o menor resultado encontrado para os modelos sem calibração. Para os demais modelos não calibrados, a média dos valores foi de 0,91, que segundo Pimenta *et al.* (2018), é classificado como excelente. Conceição e Marin (2005) encontraram desempenho classificado como “Muito Bom” para as localidades de Jales e Piracicaba-SP, com “Id” de 0,71 e 0,72, respectivamente. Massignam (2007) encontrou desempenho classificado como “Moderado” nas localidades de Itajaí, Pedras Grandes e Florianópolis-SC, com “Id” de 0,46, 0,47 e 0,48, respectivamente; e, classificação “Muito Bom” na localidade de Urussanga-SC, com valor de “Id” de 0,76. Rodrigues *et al.* (2008) obtiveram desempenho “Moderado” para condições de Limoeiro do Norte-CE, com “Id” de 0,45.

Tabela 9 - Índice de Concordância (d), Coeficiente de Correlação (r) e Índice de Desempenho (Id) da estimativa da ETo, com a utilização de estimativas da Rs por diferentes modelos para Santa Maria - RS.

Modelos com calibração	d	r	Id	Classificação
Ball (BA)	1.0	0.94	0.93	Excelente
Bristow e Campbell (BC)	0.98	0.92	0.91	Excelente
Chen (CH)	1.0	0.94	0.93	Excelente
Hargreaves (Ha)	1.0	0.93	0.92	Excelente
Meza e Varas (MV)	0.98	0.94	0.93	Excelente
Modelos sem calibração	d	r	Id	Classificação
Annandale (Ann)	1.0	0.93	0.92	Excelente
Donatelli e Campbell (DC)	0.96	0.86	0.82	Ótimo
Goodim (GD)	0.98	0.92	0.90	Excelente
Hargreaves e Samani (HS)	1.0	0.93	0.92	Excelente
Weiss (WS)	0.98	0.93	0.92	Excelente

Portanto, conclui-se que, tanto os modelos com calibração quanto os sem calibração para a estimativa da R_s , não interferem na estimativa da ET_o . Sendo assim, dada a impossibilidade de se obter os dados de R_s nas estações meteorológicas, é possível encontrar a ET_o usando algum destes modelos de estimativa da R_s para Santa Maria-RS.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a metodologia proposta neste estudo e os resultados obtidos foi possível concluir que:

Para os modelos com calibração dos seus coeficientes, os modelos propostos por Ball (BA), Chen (CH) e Meza e Varas (MV) apresentaram melhor desempenho, sendo assim, recomendados para uso quando não houver disponibilidade de dados de radiação medidos no local de estudo.

Os modelos sem calibração, exceto para o modelo de Donatelli e Campbell (DC), que apresentou desempenho bom, os demais modelos apresentaram desempenho em média de 0,77, indicando desempenho muito bom.

Na estimativa da evapotranspiração de referência, segundo o ordenamento dos índices estatísticos, nove dos dez modelos apresentaram desempenho excelente. Isso mostra que não há necessidade de calibração dos coeficientes e que todos os modelos são indicados para Santa Maria – RS.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. TEKE, H.B. YILDIRIM, Ö. ÇELİK. Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation. **Renew Sustain Energy Rev**, 50 (2015), pp. 1097-1107.

ABDULLAH, S. S.; MALEK, M. A.; ABDULLAH, N. S.; KISI, O.; YAP, K. S. Extreme Learning Machines: A new approach for prediction of reference evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v.527, p.184-195, 2015.

ABRAHA, M. G.; SAVAGE, M. J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.148, n. 3, p.401–416, 2008.

AGUILAR, C.; HERRERO, J.; POLO, M. J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, Göttingen, v. 14, n. 12, p. 2479-2494, 2010.

ALENCAR, L. P. de; MANTOVANI, E. C; BUFON, V. B.; SEDIYAMA, G. C.; Silva, T. G. F. da. Variação temporal dos elementos climáticos e da ETo em Catalão, Goiás, no período de 1961-2011. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.8, p.826–832, 2014.

ALENCAR, L. P. de; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p.39–50, 2015.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.19, n.5, p.437-449, 2011.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMOROX, J. Estimating global solar radiation from common meteorological data in Aranjuez, Spain. **Turkish Journal of Physics**, Erzurum, v. 35, n. 1, p. 53-64, 2011.

AL-SALAYMEH, A. Modelling of global daily radiation on horizontal surfaces for Amman city. **Emirates Journal for Engineering Research**, Al-Ain, v. 11, n. 1, p. 49-56, 2006.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L. de M.; SPAROVEK, G. Koppe's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2013.

ANGSTRÖM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 50, p. 121-126, 1924.

ANNANDALE, J.G.; JOVANIC, N. Z.; BENADE, N.; ALLEN, R. G. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**, Cordoba, v. 21, p. 57 – 67, 2002.

ARAÚJO, F. F. S. **Distribuição da temperatura do ar mensal e anual no estado do rio de janeiro baseada em modelos lineares**, Seropédica: UFRRJ, 2010. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, [S.l.], v. 5, n. 6, p. 1058-1069, 2011.

AZHAR, A. H.; PERERA, B. J. C. Evaluation of Reference Evapotranspiration Estimation Methods under Southeast Australian Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.137, n.5, p.268–279, 2011.

B. JAHANI, Y. DINPASHOH, A.R. NAFCHI. Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation. **Renew Sustain Energy Rev**, 73 (2017), pp. 878-891.

BALL, R. A.; PURCELL, L. C.; CAREY, S. K. Evaluation of solar radiation prediction models in North America. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 5, p. 391-397, 2004.

BANDYOPADHYAY, A.; et al. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 148, n. 11, p. 1707-1718, 2008.

BARROS, V. R.; SOUZA, A. P. de; FONSECA, D. C.; SILVA, L. B. D. da. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.198-203, 2009.

BELLOCCHI, G. DONATELLI, M. FILA, G. Evaluation of Estimated Radiation Data for Calculating Evapotranspiration and Crop Biomass. **Italian Journal of Agronomy**, Bologna, v. 7, n. 2, p. 95-102, 2003.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.305-317, 2008.

BIUDES, M. S.; VALENTINI, C. M. A.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; NOGUEIRA, J. de S. Estimativa da evapotranspiração numa pastagem mista, em condições de cerrado, pelos métodos de razão de Bowen e Penman-Monteith. **Ciência e Natura**, v.30, n.1, p.71-86, 2008.

BOIS, B.; et al. Using remotely sensed solar radiation data for reference evapotranspiration estimation at a daily time step. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.148, n. 4, p. 619-630, 2008.

BORGES, V. P. et al. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 961-969, 2010.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 31, p. 159 – 166, 1984.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, D. F. et al. Coeficientes da equação de Angström-Prescott e sua influência na evapotranspiração de referência em Seropédica, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 838-844, 2011.

CARVALHO, L. G. DE; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011.

CHEN, J. L.; LIU, H. B.; WU, W.; XIE, D. T. Estimation of monthly solar radiation from measured temperatures using support vector machines – a case study. **Renewable Energy**, Oxford, v. 36, p. 413-420, 2011.

CHEN, R. S.; ERSI, K.; YANG, J. P.; LU, S. H.; ZHAO, W. Z. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 45, p. 1759 – 1769, 2004.

CHOU, M. D. A solar radiation model for use in climate studies. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 49, p. 762-772, 1992.

CHRYSOULAKIS, N.; DIAMANDAKIS, M.; PRASTACOS, P. GIS Based estimation and mapping of local level daily irradiation on inclined surfaces. In: AGILE CONFERENCE ON GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE, 7., 2004, Heraklion. **Proceedings...** Heraklion, 2004.

CONCEIÇÃO, M. A. F. Evapotranspiração de referência com base na radiação solar global estimada pelo método de Bristow e Campbell. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 619-626, 2010.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MARIN, F. R. Estimativa da radiação solar incidente com base na amplitude térmica diária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14, 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2005. 1 CD-ROM.

DINPASHOH, Y.; JHAJHARIA, D.; FAKHERI-FARD, A.; SINGH, V. P.; KAHYA, E. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. **Journal of Hydrology**, v.399, p.422- 433, 2011.

DONATELLI, M.; CAMPBELL, G. S. A simple model to estimate global solar radiation. In: **Proceedings**. ESA Congr., 5th, Nitra, Slovak Republic, 28 June–2 July 1998. The Slovak Agricultural University, Nitra, Slovak Republic, p. 133–134, 1998.

DOOREMBOS, J.; PRUIT, W. O. **Guidelines for predicting Crop Water Requirements**. 2.ed. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

DORNELAS, K.D.S.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A.S. Coeficientes médios da equação de Angström-Prescott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v.41, n.8, p.1213-1219, 2006.

EL NESR, M. N.; ALAZBA, A. A.; AMIN, M. T. Modified Hargreaves' method as an alternative to the Penman-Monteith method in the Kingdom of Saudi Arabia. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, [S.l.], v. 5, n. 6, p. 1058-1069, 2011.

EL-METWALLY, M. Simple new methods to estimate global solar radiation based on meteorological data in Egypt. **Atmospheric Research**, León, v. 69, n. 3-4, p. 217-239, 2004.

EUSER, T.; LUXEMBURG, W. M. J.; EVERSON, C. S.; MENGISTU, M. G.; CLULOW, A. D.; BASTIAANSEN, W. G. M. A new method to measure Bowen ratios using high-resolution vertical dry and wet bulb temperature profiles. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.18, p.2021-2032, 2014.

F. BESHARAT, A.A. DEGHAN, A.R. FAGHIH. Empirical models for estimating global solar radiation: a review and case study. **Renew Sustain Energy Rev**, 21 (2013), pp. 798-821.

FAO. FAO Statistical Pocketbook. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, p.216, 2015. < <http://www.fao.org/3/a-i4691e.pdf> >. Acesso em: 14 de abril, 2018.

FARIA, R. T. et al. Clima – Programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 02, p. 372-387, 2003.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; TAKAY, B. Y. Avaliação do método Penman-Piche para a estimativa da evapotranspiração de referência em Uberaba - MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.3, p.270-276, 2011.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; JUNIOR, J. A. S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, 2010.

FOOLADMAND, H. R.; AHMADI, S. H.; Monthly spatial calibration of Blaney–Criddle equation for calculating monthly ETo in South of Iran. **Irrigation and Drainage**, v.58, p.234- 245, 2009.

FORTIN, J. G.; et al. Comparison of empirical daily surface incoming solar radiation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 148, n. 8-9, p. 1332-1340, 2008.

GAMBI, W.; et al. Influência da altitude e do tamanho das cidades nas previsões de radiação solar no modelo "IGMK" no Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 15-25, 1998.

GONDIM, R. S.; CASTRO, M. A. H. de; TEIXEIRA, A. dos S.; EVANGELISTA, S. R. de M. Impactos das mudanças climáticas na demanda de Irrigação da bananeira na Bacia do Jaguaribe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.6, p.594–600, 2011.

GOODIN, D. G.; HUTCHINSON, J. M. S.; VANDERLIP, R. L.; KNAPP, M. C. Estimating solar irradiance for crop modelling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**, Wooster, v. 91, p. 845–851, 1999.

GONG, L.; XU, C.; CHEN, D.; HALLDIN, S.; CHEN, Y. D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v.329, p.620-629, 2006.

HARGREAVES, G. H. Responding to tropical climates. In: **The 1980–81 Food and Climate Review**, The Food and Climate Forum, Aspen Institute for Humanistic Studies, Boulder, Colo, p. 29–32. 1981.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage**. ASCE; Delaware, v. 108, p. 225-30, 1982.

HOPKINS, W. G. **A scale of magnitudes for effect statistics**. 2002.

HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C. J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, Philadelphia, v. 91, n. 3–4, p. 293–300, 1998.

IRMAK, S.; PAYERO, J. O.; MARTIN, D. L.; IRMAK, A.; HOWELL, T. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.132, n.6, p.564-578, 2006.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, Auckland, v.27, p.365-371, 1995.

JANJAI S, PANKAEW P, LAKSANABOONSONG J. A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics. **Appl Energy** 2009; 86:1450–7.

JENSEN, M. E. Historical evolution of ET estimating methods: A century of progress. In: Evapotranspiration Workshop - CSU/ARS, Fort Collins, CO, USA, 12 de março de 2010.

KATERJI, N.; RANA, G. FAO-56 methodology for determining water requirement of irrigated crops: critical examination of the concepts, alternative proposals and validation in Mediterranean region. **Theoretical and Applied Climatology**, v.116. p.515-536, 2014.

KISI, O. Modeling Reference Evapotranspiration Using Evolutionary Neural Networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.137, p.636-643, 2011.

KISI, O.; SANIKHANI, H.; ZOUNEMAT-KERMANI, M.; NIAZI, F. Long-term monthly evapotranspiration modeling by several data-driven methods without climatic data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.115, p.66-77, 2015.

KITE, G. W, DROOGERS, P. Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. **Journal of Hydrology** 229: 3–18, 2000.

KUMAR, M.; BANDYOPADHYAY, A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Comparative study of conventional and artificial neural network-based ETo estimation models. **Irrigation Science**, v.26, p.531–545, 2008.

LACERDA, Z. C. de; TURCO, J. E. P. Estimation methods of reference evapotranspiration (ETo) for Uberlândia -MG. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.1, p.27–38, 2015.

LANDERAS, G.; ORTIZ-BARREDO, A.; LÓPEZ, J. J. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). **Agricultural Water Management**, v.95, p.553-565, 2008.

LÊDO, E. R. F.; SILVA, M. G.; NOGUEIRA, D. H.; ARRAES, F. D. D. Avaliação de modelo de estimativa da radiação solar global (Rs) com base na amplitude térmica. *Conex. Ci e Tecnologia*. Fortaleza, v.6 n.1, p. 15-26, 2012.

LEFEVRE, M.; WALD, L.; DIABATE, L. Using reduced data sets ISCCP-B2 from the Meteosat satellites to assess surface solar irradiance. *Solar Energy*, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 240-253. 2007.

LEMOS FILHO, L. C. A. et al. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010.

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. de O.; SOARES, W. de A. SOUZA, E. S. de. Fluxo de calor sensível em cultivo de feijão-caupi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.10, p.1037–1045, 2011.

LIRA, S. A.; NETO, A. C. Coeficientes de correlação para variáveis ordinais e dicotômicas derivados do coeficiente linear de Pearson. *Revista Ciência & Engenharia*, v. 15, n. 1/2, p. 45-53, 2006.

LIU, D. L.; SCOTT, B. J. Estimation of solar radiation in Australia from rainfall and temperature observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, New Haven, v. 106, n. 1, p. 41-59, 2001.

LIU, X.; et al. Variation in reference crop evapotranspiration caused by the Angström-PreScott coefficient: locally calibrated versus the FAO recommended. *Agricultural Water Management*, Colombo, v. 96, n. 7, p. 1137-1145, 2009.

MACÊDO, K. G.; OLIVEIRA, J. B.; ARRAES, F. D. D.; TORRES, W. L. V.; LIMA JUNIOR, J. C. Estimativa da radiação solar global com dados de temperatura do ar em seis cidades do estado do Ceará. *Engenharia na Agricultura*, v.24, n.1, p 68 – 75, 2016.

MAEDA, E. E.; WIBERG, D. A.; PELLIKKA, P. K. E. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. *Applied Geography*, v.31, p.251-258, 2011.

MAHMOOD, R.; HUBBARD, K. G. Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. *Agronomy Journal*, Madison, v. 94, n. 4, p. 723-733, 2002.

MARTÍ, P.; ZARZO, M.; VANDERLINDEN, K.; GIRONA, J. Parametric expressions for the adjusted Hargreaves coefficient in Eastern Spain. *Journal of Hydrology*, 2015.

MASSIGNAM, A. M., Estimativa da radiação solar em função da amplitude térmica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 15., 2007, Aracaju. *Anais...* Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007. 1 CD-ROM.

MCCMAHON, T. A.; PEEL, M. C.; LOWE, L.; SRIKANTHAN, R.; MCVICAR, T. R. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.17, p.1331-1363, 2013.

MELO, G. L. de; FERNANDES, A. L. T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, state of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v.32, n.5, p.875–888, 2012.

MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, n. 100, p. 231- 241, 2000.

OLIVEIRA, L. M. M. de; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, B. B. DA; ANTONINO, A. C. D.; MOURA, A. E. S. S. DE. Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.10, p.1039-1046, 2014.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. A193, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C., 2002a. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. 1º ed. Guaíba: Editora Agropecuária. 478p.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v.147, p.4-20, 2015.

PIMENTA, B. D.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X., MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J. H.; BEN, L. H. B. Performance of explicit approximations of the coefficient of head loss for pressurized conduits. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 5, p. 301-307, 2018.

PODESTÁ, G. P.; et al. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 123, n. 1-2, p. 41-53, 2004.

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

RÁCZ, C.; NAGY, J.; DOBOS, A. C. Comparison of Several Methods for Calculation of Reference Evapotranspiration. **Acta Silvatica & Lignaria Hungarica**, v.9, p.9-24, 2013.

RIGHI, E. Z.; SILVA, K. O. da; BARBIERI, V. A importância da temperatura do ar na estimativa de evapotranspiração por métodos simplificados e graus-dia: relações sazonais e anuais entre temperatura, radiação global e radiação líquida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, 1998, Brasília. **Anais...** 42 Brasília: CBM, 1998.

RIVINGTON, M.; et al. Evaluating uncertainty introduced to process-based simulation model estimates by alternative sources of meteorological data. **Agricultural Systems**, Wageningen, v. 88, n. 2-3, p. 451-471, 2006.

RODRIGUES, D. N. B. et al. Radiação solar global estimada através da amplitude térmica diária. In: XVIII CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 18., 2008, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABID, 2008. 1 CD-ROM.

ROJAS, J. P.; SHEFFIELD, R. E. Evaluation of Daily Reference Evapotranspiration Methods as Compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith Equation Using Limited Weather Data in Northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.139, p.285-292, 2013.

ROBAA, S.M. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. **Energy Conversion and Management**, v.50, n.1, p.184-193, 2009.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canadá. **Agricultural Water Management**, v.97, n.5, p.635-644, 2010.

SILVA, B. K. N.; SILVA, V. de P. R. da; AZEVEDO, P. V. de; FARIAS, C. H. de A. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1046-1053, 2011.

SILVA, B. M. et al. Estimate of reference evapotranspiration by FAO Penman-Monteith equation only having maximum and minimum temperatures in Lavras, Minas Gerais State, Brazil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 37., Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA. 1 CD-ROM, 2008.

SILVA, C. R.; SILVA, V. J.; ALVES JUNIOR, J.; CARVALHO, H. P. Radiação solar estimada com base na temperatura do ar para três regiões de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 3, p. 281-288, 2012.

SOUZA ECHER, M. P. de; MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B. A importância dos dados de cobertura de nuvens e de sua variabilidade: metodologias para aquisição de dados. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Porto Alegre, v. 28, n. 3, p. 341-352, 2006.

Systat for Windows version 5.01. Systat Software Inc. Chicago – IL, USA. 2002.

TABARI, H.; GRISMER, M. E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, v.31, p.107–117, 2013.

TANAKA, A. A. Avaliação de métodos de estimativa da radiação solar global e da evapotranspiração de referência para o estado de Mato Grosso. 2013. 109 p. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Universidade Estadual Paulista, 2013.

TEGOS, A.; MALAMOS, N.; KOUTSOYIANNIS, D. A parsimonious regional parametric evapotranspiration model based on a simplification of the Penman–Monteith formula. **Journal of Hydrology**, v.524, p.708-717, 2015.

TODOROVIC, M. KARIC, B., PEREIRA, L. S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. **Journal of Hydrology**. 166–176, 2013.

TUKIMAT, N. N. A.; HARUN, S.; SHAHID, S. Comparison of different methods in estimating potential evapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. **Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics**, v.113, n.1, p.77-85, 2012.

TRNKA, M.; et al. Global solar radiation in Central European lowlands estimated by various empirical formulae. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 131, n. 1-2, p. 54-76, 2005.

VALIANTZAS, J. D. Simplified forms for the standardized FAO56 Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. **Journal of Hydrology**, v.505, p.13-23, 2013.

VALIPOUR, M. Evaluation of radiation methods to study potential evapotranspiration of 31 provinces. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v.127, p.289–303, 2015.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. 2. ed. Recife: M. A.Varejão-Silva, 2006. 449 p. Versão Digital.

VEGA, E. C.; JARA, J. C. Estimación de la evapotranspiración de referência para das zonas (Costa y Región Andina) del Ecuador. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.3, p.390–403, 2009.

WEISS, A.; HAYS, C. J.; HU, Q.; EASTERLING, W. E. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. **Agronomy Journal**, Wooster, v. 93, p. 1321–1326, 2001.

WIDMOSER, P. A discussion on and alternative to Penman–Monteith equation. **Agricultural Water Management**, n.96, p.711–721, 2009.

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

WU, G.; LIU, Y.; WANG, T. Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data-A case study in Nanchang station, China. **Energy Conversion and Management**, Belton, v. 48, n. 9, p. 2447-2452, 2007.

WU, G.; LIU, Y.; WANG, T. Methods and strategy for modeling daily global solar XIE, H. ZHU, X., YUAN, D. Pan evaporation modelling and changing attribution analysis on the Tibetan Plateau (1970–2012). **Hydrology Process**. 29, 2164–2177, 2015.

XIE, H., ZHU, X. Reference evapotranspiration trends and their sensitivity to climatic change on the Tibetan Plateau (1970– 2009). **Hydrology Process**. 27, 3685–3693, 2013.

XYSTRAKIS, F.; MATZARAKIS, A. Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.137, n.4, p.211–222, 2011.

YIN, Y.; et al. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimation reference crop evapotranspiration in China. **Agricultural Water Management**, Colombo, v. 95, n. 1, p. 77-84, 2008.