

VALDINEY JOSÉ DA SILVA

DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR NA  
REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-  
graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração  
em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Cláudio Ricardo da Silva

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2012

VALDINEY JOSÉ DA SILVA

DESEMPENHO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR NA  
REGIÃO DO TRIÂNGULO MINEIRO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de  
Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-  
graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração  
em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 17 de fevereiro de 2012.

Prof. Dr. Roberto Terumi Atarassi

UFU

Prof. Dr. Hudson de Paula Carvalho

UFU

Prof. Dr. José Alves Júnior

UFG

Prof. Dr. Cláudio Ricardo da Silva  
ICIAG-UFU  
(Orientador)

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL 2012

## **AGRADECIMENTOS**

À 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 orientador desse estudo, Cláudio Ricardo da Silva, e demais pesquisadores que contribuíram na sua confecção.

A todas as pessoas, em especial aos professores, que contribuíram para minha formação profissional.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelo fornecimento de dados que permitiram a realização desse estudo.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Modelos de estimativa da radiação solar a partir de elementos meteorológicos .....	3
2.2 Desempenho dos modelos de estimativa da radiação solar .....	5
2.3 Limitações dos modelos de estimativa da radiação solar.....	7
2.4 Efeito da radiação solar na evapotranspiração de referência .....	9
2.5 Efeito da radiação solar na produção agrícola .....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	12
3.1 Local e dados meteorológicos .....	12
3.2 Modelos de estimativa da radiação solar avaliados .....	13
3.3 Cálculo da evapotranspiração de referência.....	14
3.4 Simulação de produtividade .....	15
3.5 Calibração dos modelos de estimativa da radiação solar .....	16
3.6 Avaliação dos modelos .....	16
3.6.1 Parâmetros avaliados .....	16
3.6.2 Impacto no cálculo da $ET_o$ .....	17
3.6.3 Impacto na simulação de produtividade .....	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	18
4.1 Calibração dos modelos de estimativa da radiação solar .....	18
4.2 Desempenho dos modelos de estimativa da radiação solar .....	20
4.3 Impacto da estimativa da radiação solar incidente diária na $ET_o$ .....	27
4.4 Impacto da estimativa da radiação solar incidente diária na simulação de produtividade.....	32
5 CONCLUSÕES .....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

## RESUMO

SILVA, VALDINEY JOSÉ DA. **Desempenho de modelos de estimativa da radiação solar na região do Triângulo Mineiro**. 2012. 49p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

A radiação solar é determinante sobre o comportamento climático global e os fenômenos meteorológicos, sendo os dados exigidos em muitas aplicações e nas diferentes áreas de estudos. Em estudos agronômicos, o saldo de radiação ou de energia representa a quantidade de energia que está disponível para os processos de evapotranspiração, fotossíntese e de aquecimento do ar e do solo, sendo um dos fatores que mais afeta a evapotranspiração e a produtividade das culturas. No entanto, nem todas as estações meteorológicas dispõem de equipamentos para medi-la. Objetivou-se nesse trabalho calibrar modelos de estimativa da radiação solar incidente diária ( $R_s$ ) que usam dados de temperatura máxima e mínima do ar e de chuva e verificar o impacto da radiação estimada na evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e na simulação de produtividade para a região do Triângulo Mineiro, em Minas Gerais. Foram avaliados oito modelos: Bristow e Campbell (BC), Chen (CH), Donatelli e Campbell (DC), De Jong e Stewart (JS), Annandale (AN), Hargreaves (HA), Hargreaves modificado (HA-1) e Hunt (HU). Os modelos foram calibrados pelo método da minimização da raiz quadrada da soma do quadrado da diferença entre os valores observados e estimados e avaliados através da raiz do quadrado médio do erro ( $RQME$ ), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e erro médio ( $EM$ ). Verificou-se o efeito da  $R_s$  estimado por cada modelo na  $ET_o$  e na simulação de produtividade, comparando-se os resultados obtidos entre a  $R_s$  estimada e a medida através da  $RQME$  e  $R^2$ . Observou-se maior variação dos valores dos coeficientes com o aumento do número destes nos modelos, tornando a calibração local mais importante. Todos os modelos tenderam em superestimar os valores de  $R_s$  inferiores à média e a subestimar os acima desta, porém essas tendências foram mais fortes nos modelos HA, HA-1, AN e HU, principalmente para os valores mais baixos. Os modelos BC, DC, CH e JS foram mais precisos, com valores de  $RQME$  e  $R^2$  variando de 2,54 a 3,30 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> e 0,60 a 0,74, respectivamente. As estimativas da  $ET_o$  apresentaram  $R^2$  acima 0,70 e  $RQME$  inferior a 0,5 mm d<sup>-1</sup>, para todos os modelos, resultando em valores de  $ET_o$  confiáveis para gestão e dimensionamento de sistemas de irrigação. Simulações de produtividade são mais precisas com a  $R_s$  estimada pelo modelos do grupo I, independentemente do local, com  $R^2$  superior a 0,90, apresentando estimativas de produtividades confiáveis, tanto para o produtor, quanto para o auxílio à previsão de safras agrícolas.

**Palavras-chave:** equações empíricas, temperatura, calibração, evapotranspiração, simulação produtiva.

---

<sup>1</sup> Orientador: Cláudio Ricardo da Silva – UFU.

## ABSTRACT

SILVA, VALDINEY JOSÉ DA. **Performance of methods for estimating solar radiation in the region of Triângulo Mineiro**. 2012. 49p. Uberlândia: UFU, 2012. 45p. Dissertation (Master Program Agronomy/Crop Science) – Federal University of Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Solar radiation is determinant on global climate behavior and weather phenomena, and data on solar radiation is required in many applications in different areas of study. In agronomic studies, net radiation or energy represents the amount of energy that is available for the processes of evapotranspiration, photosynthesis and heating the air and soil, and is one of the factors that most affects evapotranspiration and crop productivity. However, not all weather stations are equipped to measure it. This study calibrated models for estimating daily solar radiation ( $R_s$ ) using data from maximum and minimum air temperatures and rainfall, and to determine the impact of estimated radiation on reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) and on the simulation of productivity for the Triângulo Mineiro region in Minas Gerais. Eight models were evaluated: Bristow and Campbell (BC), Chen (CH), Donatelli and Campbell (DC), De Jong and Stewart (JS), Annandale (AN), Hargreaves (HA), modified Hargreaves (HA-1) and Hunt (HU). The models were calibrated by the method of minimization of the square root of the squared sum of the difference between observed and predicted values, and evaluated by the root of the error mean square ( $RMSE$ ), coefficient of determination ( $R^2$ ) and mean error ( $EM$ ). The effect of estimated  $R_s$  by each model on the  $ET_o$  and on the simulation of productivity, comparing the results obtained between the estimated and measured  $R_s$  by  $RMSE$  and  $R^2$  was observed. There was greater variation of the coefficients as their number in the models increased, making the local calibration more important. All models tended to overestimate the  $R_s$  values below average and underestimated those above it, but these trends were stronger in the models HA, HA-1, AN and HU, especially for lower values. The models BC, DC, JS and CH were more accurate, with values of  $RMSE$  and  $R^2$  ranging from 2.54 to 3.30 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and from 0.60 to 0.74, respectively.  $ET_o$  estimates presented  $R^2$  above 0.70 and  $RMSE$  less than 0.5mm d<sup>-1</sup> for all the models, resulting in reliable  $ET_o$  values for management and design of irrigation systems. Simulations of productivity are more accurate with  $R_s$  estimated by the models of group I, regardless of location, with  $R^2$  greater than 0.90 showing productivity estimates reliable for both the producer and for aiding prediction of agricultural crops.

**Keywords:** empirical equations, temperature, calibration, evapotranspiration, productive simulation.

---

<sup>1</sup> Major Professor: Cláudio Ricardo da Silva – UFU.

# 1 INTRODUÇÃO

A radiação solar diária é o principal fator meteorológico em estudos ecológicos e ambientais, pois condiciona a temperatura do ar, do solo, dos processos de evapotranspiração e fotossíntese. Como fonte alternativa de energia, a radiação solar é muito atraente porque não polui, é confiável, livre de poluição e não é esgotável (AL-SALAYMEH, 2006). Uma vez que a radiação solar varia de acordo com a latitude do local, com as condições atmosféricas e altura do Sol ao longo do dia (LI; LAM, 1999), dessa forma, torna-se de fundamental importância o monitoramento da sua variação espacial e temporal.

A forma mais precisa para quantificar a radiação solar diária incidente na superfície ( $R_s$ ) é sua medida direta. A rede mundial dessas estações é muito esparsa e, com raras exceções, concentrada nos territórios dos países mais desenvolvidos economicamente (GAMBI et al., 1998; STEIDLE NETO et al., 2008). Recentemente, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) tem ampliado sua cobertura de medições no Brasil, com instalações de estações meteorológicas automáticas. Entretanto, dada à extensão do Brasil, a cobertura ainda é pequena, especialmente em escala local, como na maioria das propriedades agrícolas. Além disso, em locais onde é medida, pode haver muitos dias com falta de registro dos dados de radiação solar ou registrados fora da faixa esperada, devido à falha do equipamento e outros problemas (HUNT et al., 1998; LIU et al., 2009). Para localidades com ausência de coleta de dados, valores podem ser estimados por relações matemáticas empíricas usando outros dados meteorológicos, interpolação linear, dados de satélites geoestacionários, rede neural artificial, entre outros (BRISTOW; CAMPBELL, 1984). Esses modelos variam no grau de complexidade, dados de entrada e precisão dos resultados (ABRAHA; SAVAGE, 2008).

O uso de dados de estações tem sua precisão reduzida com o aumento da distância, pois a radiação é dependente do tempo e do relevo (WEISS et al., 2001; RIVINGTON et al., 2006). A interpolação linear muitas vezes não consegue reproduzir a variação diária real (SOLTANI et al., 2004). Redes de formação neural normalmente requerem grande quantidade de dados e o modelo resultante pode não ser aplicável a outros locais (WEISS; RAYS, 2004). Os modelos baseados em satélites podem ser inadequados devido à baixa frequência de amostragem e resolução grosseira dos satélites (PINKER et al., 1995).

Dessa maneira, os modelos baseados nas relações empíricas são mais atrativos devido à facilidade na aquisição dos dados e aplicação. Os elementos meteorológicos comumente utilizados são: a radiação incidente extraterrestre, insolação, temperatura do ar, nebulosidade, umidade relativa do ar, precipitação, altitude, latitude e número do dia do ano, que podem ser utilizados individualmente ou combinado entre si (BRISTOW; CAMPBELL, 1984; MENGES et al., 2006; LI et al., 2010).

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 (PODESTÁ et al., 2004; RIVINGTON et al., 2006; TRNKA et al., 2005), 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.

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

Para 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 sua principal fonte de energia para o processo evapotranspirativo. Além disso, é também a principal fonte de entrada em modelos de simulação de produtividade potencial, a qual, sob condições favoráveis, é limitada apenas pela radiação solar e temperatura do ar (SETIYONO et al., 2010).

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. Nos modelos de simulação de crescimento e produtividade, bons desempenhos da  $R_s$  estimada tornam as simulações próximas das reais, com boa confiabilidade nas previsões de colheitas e safras agrícolas. Nesse sentido, este trabalho objetivou: a) calibrar e avaliar o desempenho de oito modelos de estimativa da  $R_s$  que usam dados de temperatura máxima e mínima do ar ou chuva; b) verificar o impacto de suas estimativas na evapotranspiração de referência e na produtividade potencial de grãos de soja para a região do Triângulo Mineiro, em Minas Gerais.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Modelos de estimativa da radiação solar a partir de elementos meteorológicos

A radiação solar incidente na superfície terrestre ( $R_s$ ) é requerida para estimativas da evapotranspiração de referência e acúmulo de biomassa vegetal na maioria dos modelos de simulação de crescimento e produtividade das culturas. Estimá-la a partir de dados prontamente disponíveis como temperatura e precipitação (LIU; SCOTT, 2001; WEISS; HAYS, 2004) são alternativas para locais com ausência de equipamentos para medi-la ou quando há muitos dias sem registro ou dados fora da faixa esperada, devido a falhas no equipamento e outros problemas (HUNT et al., 1998). A falta de dados de  $R_s$  restringe a aplicação de modelos de simulação de crescimento e produtividade de culturas (HOOK; MCCLENDON, 1992) em locais onde não há registros. Sendo assim, dispor de modelos para estimá-la é uma das alternativas a esse problema.

A necessidade de dados de radiação solar com alta precisão, requerido por processos como a evapotranspiração, levou ao desenvolvimento de inúmeros modelos para estimá-la. Estes vão desde modelos com fórmula empírica simples, a modelos extremamente complexos, dependendo dos dados de entrada disponíveis (BRISTOW; CAMPBELL, 1984).

Dentre os vários modelos de estimativa, aqueles que usam elementos meteorológicos comumente medidos são atraentes e viáveis (ABRAHA; SAVAGE, 2008) devido à menor necessidade de dados e custos com computação (LIU et al., 2009). Entre esses modelos os que estimam a  $R_s$  com base na temperatura são amplamente utilizados.

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, aquecem a atmosfera adjacente (ARAÚJO, 2010). Segundo Rivington et al. (2006), esses modelos assumem que a temperatura máxima diária diminui com a redução da transmissividade provocada pela cobertura de nuvens, aerossóis e umidade, entre outros; enquanto que a temperatura mínima aumenta com a emissividade das nuvens. Conforme pressuposições de Allen (1997), a amplitude térmica diária fornece uma indicação geral da nebulosidade. Segundo esse autor, quando se compara céu claro com céu coberto por nuvens, a temperatura máxima do ar diminui devido ao baixo nível de radiação solar provocado pela cobertura das nuvens,

enquanto que a temperatura mínima do ar aumenta em função da maior emissão e reflexão da radiação de ondas longas causadas pelas nuvens durante a noite.

Porém, os processos físicos envolvidos na interação entre a radiação solar e os constituintes atmosféricos como o ozônio, oxigênio, vapor de água, poluentes e nuvens são extremamente complexos. Mesmo assim, Bristow e Campbell (1984) justificaram o uso desses modelos em função da relação existente entre a radiação solar e a amplitude térmica diária. Conforme esses autores, a amplitude térmica diária pode ser explicada pela elevação da temperatura durante o dia, devido ao calor sensível oriundo da radiação solar, e pela diminuição da temperatura durante a noite, tendendo à temperatura do ponto de orvalho pouco antes do sol nascer.

Com base nessas afirmações, Hargreaves (1981), 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 sua simplicidade, sendo inclusive recomendado no boletim da FAO-56 para ser usado quando os dados estão ausentes ou de qualidade duvidosa (ALLEN et al., 1998). Esse modelo possui apenas um coeficiente, que é multiplicado ao produto entre a raiz quadrada da amplitude térmica diária (diferença entre a temperatura máxima e mínima diária) e a radiação solar incidente no topo da atmosfera. Recomenda-se a calibração local desse coeficiente, porém quando não há possibilidade de determiná-lo, podem ser usados os valores sugeridos por Hargreaves (ALMOROX, 2011), de 0,16, para regiões do interior dominadas por grandes massas de terra, e 0,19, para regiões costeiras dominadas por grandes massas de água (BORGES et al. 2010).

O modelo de Hargreaves apresenta-se com um coeficiente, mas alguns autores o apresentaram com dois (HUNT et al., 1998; CHEN et al., 2004). Além disso, algumas modificações foram propostas ao longo do tempo. Chen et al. (2004) substituíram a raiz quadrada da amplitude térmica pela função logarítmica desse termo. Com esse novo modelo, os autores obtiveram melhor desempenho. Hunt et al. (1998) introduziram uma correção para o efeito da chuva em função desta reduzir a transmissividade solar (DE JONG; STEWART, 1993). Dessa forma, a inclusão de dados de chuva pode melhorar as estimativas de  $R_s$ . Com o novo modelo, Hunt, et al. (1998) obtiveram melhora de 12% no coeficiente de determinação. Annandale et al. (2002) introduziram uma correção em função da altitude aos valores dos coeficientes sugeridos por Hargreaves, na tentativa de representar os efeitos da redução da espessura da camada atmosférica

com o aumento da altitude e eliminar a necessidade de calibração a partir de elementos climáticos (BANDYOPADHYAY et al., 2008).

Outro modelo muito utilizado baseado na temperatura do ar é o proposto por Bristow e Campbell (1984), o qual possui três coeficientes adicionados de forma multiplicativa. Com esse modelo, os autores explicaram de 70 a 90% da variação da  $R_s$  em três locais na região noroeste dos EUA. Esse modelo é ajustado às condições meteorológicas locais a partir de três coeficientes. Embora os coeficientes sejam empíricos, o coeficiente  $a$  representa a máxima transmissividade esperada para um dia de céu claro, a qual depende da altitude e da poluição atmosférica local e, os coeficientes  $b$  e  $c$  controlam a taxa na qual  $a$  varia com a amplitude térmica (BRISTOW; CAMPBELL, 1984). Nesse modelo, a amplitude térmica diária é obtida com base no valor médio de duas temperaturas mínimas em dias subsequentes, com o objetivo de reduzir o efeito em larga escala da entrada advectiva de massas de ar quente ou fria no local.

De Jong e Stewart (1993), verificando a instabilidade dos coeficientes do modelo de Bristow e Campbell, propuseram um novo modelo baseado na função descrita por Richardson (1985), a qual ajusta a amplitude térmica por dois coeficientes. No novo modelo, incorporaram uma função da precipitação ajustada por outros dois coeficientes. Com esse modelo, os autores reduziram a  $RQME$  em 7% e aumentaram o coeficiente de correlação em torno de 23%.

Posteriormente, Donatelli e Campbell (1998) propuseram uma correção para reduzir o efeito da sazonalidade, dividindo a amplitude térmica diária pela amplitude térmica média do mês. Inúmeras outras modificações foram feitas ao modelo de Bristow e Campbell na tentativa de ajustar melhor o modelo a diferentes condições climáticas ou testando a necessidade de calibração local do modelo (GOODIN et al., 1999; THORNTON; RUNNING, 1999; DONATELLI; BELLOCCHI, 2001).

## **2.2 Desempenho dos modelos de estimativa da radiação solar**

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 micro físicas. 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 a estima 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 antes. 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, confirmou 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, para 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  $ET_o$  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  $ET_o$  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), 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 menos precisos quando comparados àqueles que englobam maiores números de variáveis na sua determinação. Almorox (2011), avaliando 15 modelos de estimativa da radiação solar em Aranjuez, na Espanha, obteve melhores resultados à medida que utilizaram 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 elevava precipitação, a  $R_s$  estimada pode ser negativa (ABRAHA; SAVAGE, 2008).

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

### **2.3 Limitações dos modelos de estimativa da radiação solar**

A radiação solar diária recebida na superfície da Terra afeta fortemente as condições térmicas na superfície e na atmosfera imediata, que por sua vez, pode ser usada como um indicador de nebulosidade e carga de radiação solar (MAHMOOD; HUBBARD, 2002). Modelos de estimativa de radiação solar que utilizam essas condições térmicas são baseados na suposição de que, em condições de céu claro, ocorre uma elevação da temperatura máxima diária do ar por causa da maior entrada de

radiação de ondas curtas, enquanto que a temperatura mínima do ar diminui devido à redução da emissão de ondas longas da atmosfera. Na presença de nuvens, ocorre o contrário: a temperatura máxima diminui devido à transmissividade reduzida, enquanto que a temperatura mínima aumenta devido ao aumento da emissão de ondas longas das nuvens (DONATELLI; CAMPBELL, 1998).

Entretanto, as correntes advectivas atuam transportando energia de uma área para outra, causando uma alteração no balanço energético local, dependendo das características dos gradientes de pressão envolvidos (FRITZSONS et al., 2008; RIGHI et al., 1998). Geralmente, quanto maior a frequência de entrada e intensidade de uma frente fria, menor é a relação entre a temperatura e a radiação.

Fatores como a continentalidade/oceanidade podem atuar de forma significativa no desempenho dos modelos de estimativa da  $R_s$ , se estes não forem devidamente calibrados. Quanto mais seco estiver o ar, maior será a variação diária da temperatura (PEREIRA et al., 2007). Grandes massas de água atuam como um regulador térmico, reduzindo a amplitude térmica diária em regiões costeiras. Dessa forma, regiões interiores dominadas por massas de ar pouco influenciadas por grandes massas de água apresentam maior amplitude térmica em comparação com regiões costeiras fortemente influenciadas por essas massas (ANNANDALE et al., 2002).

A altitude também é um fator importante na constituição do clima com efeito considerável sobre os elementos climatológicos. A espessura da camada atmosférica diminui com o aumento da altitude (ANNANDALE et al., 2002) e, conseqüentemente, espera-se maior nível de  $R_s$ , enquanto que a temperatura média do ar tende a diminuir com o aumento da altitude (FRITZSONS et al., 2008).

Outro problema dos modelos de estimativa da radiação solar com base na temperatura do ar é a de sub ou superestimar valores extremos de  $R_s$ . Normalmente, eles super estimam os menores valores de radiação e subestimam os maiores. Mahmood e Hubbard (2002), comparando modelos de estimativa da radiação solar global com base na temperatura máxima e mínima do ar em nove localidades no EUA, verificaram que os modelos por eles estudados subestimaram os valores elevados da radiação solar, alguns com maior e outros com menor estabilidade. Outros autores também encontraram resultados semelhantes (LIU et al., 2009; BORGES et al., 2010).

## 2.4 Efeito da radiação solar na evapotranspiração de referência

Uma informação importante para os modelos de estimativa de  $R_s$  é avaliar qual o impacto nos processos que depende 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, portanto, estimada na maioria das situações (LIU et al., 2009). Vários métodos podem ser empregados para calculá-la (CONCEIÇÃO, 2010). A abordagem mais utilizada é o modelo de Penman-Monteith parametrizado pela FAO (Food and Agriculture Organization) como padrão, na qual é calculada para uma cultura de referência ( $ET_o$ ) 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 produziram 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 BC 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 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 calculá-la a *ET<sub>o</sub>*, pois na maioria dos casos, os resultados são mais precisos.

## **2.5 Efeito da radiação solar na produção agrícola**

A produtividade potencial de uma cultura é determinada, principalmente, por suas características genéticas e grau de adaptação ao ambiente. As exigências ambientais de clima, solo e água para crescimento e rendimento ótimos diferem de cultura para cultura e entre as variedades (PEREIRA et al., 2007). Sob condições favoráveis, a produtividade potencial é limitada apenas pela radiação solar e temperatura do ar (SETIYONO et al., 2010). A temperatura do ar determina a taxa de desenvolvimento da cultura, consequentemente, influencia a duração do período total de crescimento necessário à colheita, enquanto que a radiação solar é a fonte de energia que desencadeia um processo complexo de bioconversão de energia em biomassa vegetal (PEREIRA et al., 2007) sendo, portanto, fundamental para o crescimento e manutenção do índice de área foliar de uma cultura, correlacionando-se de forma positiva com o rendimento das plantas (HIGASHIDE, 2009).

Em função desses aspectos, os modelos de simulação de culturas têm sido utilizados com sucesso para fornecer simulações de crescimento, desenvolvimento e rendimento, auxiliando nas estimativas da produtividade, previsões de safras agrícolas (KLERING et al., 2008) e tomadas de decisão, tornando essas informações mais eficientes (WU et al., 2010). Eles auxiliam também nas estimativas de perdas produtivas causadas por déficit hídrico (SHRESTHA et al., 2010), ataque de pragas e doenças (ORTIZ et al., 2009) e no desenvolvimento e manutenção de espécies e cultivares mais adaptadas às adversidades ligadas às mudanças climáticas (CHALLINOR et al., 2009), bem como contribuíram para a definição dos zoneamentos climáticos das culturas.

Esses são alguns dos fatores que têm contribuído para o destaque da radiação solar nas pesquisas dos últimos anos e que buscam explorar o rendimento potencial das culturas (KUNZ et al., 2007). Esses modelos, segundo Klering et al. (2008), além de reduzirem o caráter subjetivo das previsões de safras, em sua maioria, expressam também a influência de elementos meteorológicos no rendimento das culturas agrícolas, na qual a *R<sub>s</sub>* é o principal elemento de variação da produtividade, sendo, portanto, requerida pela maioria dos modelos ambientais e agronômicos (FORTIN et al., 2008; MAHMOOD; HUBBARD, 2002). Portanto, na ausência de dados de radiação solar, técnicas de estimativas têm um significado considerável.



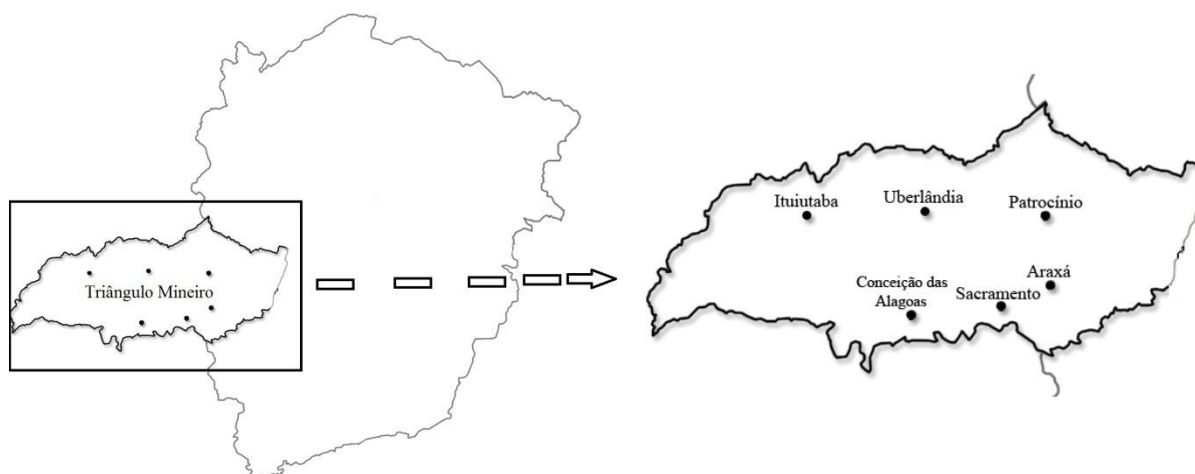
Apesar de os modelos de estimativa da  $R_s$ , a partir de elementos comumente medidos (LIU et AL., 2009) poderem ser uma alternativa viável para locais onde esta não pode ser medida, reduções na eficiência podem tornar as simulações de crescimento e produtividade não representativas (TRNKA et al., 2007). Rivington et al. (2002) afirmaram que a escolha de fonte de dados de radiação solar tem efeito marcante nos modelos de simulações. Nas simulações produtivas utilizando  $R_s$  estimada comparado com a medida, esses autores verificaram que, embora estimavas a partir de dados de insolação produzirem informações mais confiáveis, o modelo testado por eles, o qual usa somente dados de temperatura máxima e mínima do ar, pode ser utilizado na ausência de dados medidos ou de insolação diária. Rivington et al. (2006), trabalhando com modelos de simulação de produtividades, concluíram que o uso de dados de estações vizinhas produzem grandes incertezas nas simulações, mas dados estimados a partir da temperatura do ar reduzem essas incertezas, sendo, portanto, recomendado pelos autores nessas condições. Avaliações feitas por Abraha e Savage (2008), na África do Sul, comprovam a importância desses modelos, na ausência de equipamentos para medir a  $R_s$  ou insolação diária, para aplicação em modelos de simulação de produtividade. Hunt et al. (1998) também aprovaram seu uso de para esse fim.

Porém, Bellocchi et al. (2003), estudando a eficiência da  $R_s$  estimada na simulação de produtividade, observaram diferenças e concluíram que os modelos que consideram variações sazonais são mais eficientes. E Trnka et al. (2007) concluíram que os erros das estimativas podem comprometer a precisão das simulação de produtividade, principalmente se eles não forem devidamente calibrados.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local e dados meteorológicos

O estudo foi realizado a partir dos dados coletados nas estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), no período de 2009 a 2010. A região onde foram submetidos os estudos de calibração e performances dos modelos foi a do Triângulo Mineiro que engloba as cidades ilustradas na Figura 1 e listadas na Tabela 1.



**Figura 1.** Localização das cidades da região do Triângulo Mineiro. Desenho sem escala.

**Tabela 1.** Localização geográfica das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) que foram utilizadas no estudo.

Cidade	Lat.	Long.	Alt.	Período	Omissões (%)	$\Delta T$ °C	$R_s$ mín	$R_s$ máx	$R_s$ méd
							-----MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> -----		
Araxá	-19,60°	-46,93°	1020 m	2009-2010	0,96	10,40	2,94	35,73	20,82
Conceição das Alagoas	-19,99°	-48,15°	568 m	2009-2010	1,10	12,89	2,60	30,06	18,35
Ituiutaba	-18,95°	-49,52°	560 m	2009-2010	0,96	13,38	2,66	29,91	18,67
Patrocínio	-19,00°	-46,99°	963 m	2009-2010	1,10	13,00	2,99	31,52	18,92
Sacramento	-19,88°	-47,43°	912 m	2009-2010	0,68	11,30	2,18	30,52	18,30
Uberlândia	-18,92°	-48,25°	869 m	2009-2010	1,51	10,18	0,77	30,25	18,69

Legenda: *Lat.*, latitude; *Long.*, longitude; *Alt.*, altitude; *Rs mín.*, radiação solar incidente mínima observada; *Rs máx.*, radiação solar incidente máxima observada; *Rs méd.*, radiação solar incidente média observada;  $\Delta T$ , amplitude térmica diária média anual.

Os dados reportados em intervalos horários foram transformados para diários, obtendo-se valores de temperatura máxima ( $T_{máx}$ ) e mínima ( $T_{mín}$ ), velocidade média do vento, umidade relativa média, total diário de radiação solar incidente na superfície ( $R_s$ ) do solo e de precipitação. Em seguida, verificou-se a integridade e coerência dos dados utilizando o critério de eliminação feito por Liu, et al. (2009): a) dados ausentes para qualquer um dos elementos  $T_{máx}$ ,  $T_{mín}$  ou  $R_s$ ; b)  $T_{máx} < T_{mín}$ ; c)  $R_s/R_a > 1$ , onde  $R_a$  é a radiação solar incidente no topo da atmosfera do local. A porcentagem de omissões apresentados na Tabela 1 foi calculada dividindo-se os dados diários perdidos pelo total de dias do período considerado.

### 3.2 Modelos de estimativa da radiação solar avaliados

Na Tabela 2 estão listados os modelos empíricos de estimativa da  $R_s$  estudados. Os modelos foram divididos em dois grupos: o primeiro grupo (Grupo I) apresenta os modelos que possuem coeficientes de ajustes adicionados de forma multiplicativa à radiação solar extraterrestre ( $R_a$ ), e: segundo grupo (Grupo II) apresenta os modelos que possuem apenas um coeficiente, Annandale (AN) e Hargreaves (HA), ou dois ou mais coeficientes adicionados de forma aditiva à  $R_a$ , Hargreaves modificado (HA-1) e Hunt (HU).

**Tabela 2.** Resumo dos modelos estudados.

Modelo	Equação	Grupo	Coeficientes	Fonte
BC	$R_s = a \left( 1 - \exp(-b \Delta T_2^c) \right) R_a$	I	$a, b, c$	Bristow e Campbell (1984)
CH	$R_s = (a \ln \Delta T_1 + b) R_a$	I	$a, b$	Chen et al. (2004)
JS	$R_s = a \Delta T_1^b (1 + c P + d P^2) R_a$	I	$a, b, c, d$	De Jong e Stewart (1993)
DC	$R_s = a \left( 1 - \exp \left( -b \frac{\Delta T_2^c}{\Delta T_m} \right) \right) R_a$	I	$a, b, c$	Donatelli e Campbell (1998)
AN	$R_s = a (1 + 2,7 \cdot 10^{-5} Alt) \sqrt{\Delta T_1} R_a$	II	$a$	Annandale et al. (2002)
HA	$R_s = a \sqrt{\Delta T_1} R_a$	II	$a$	Hargreaves (1981)
HA-1	$R_s = a \sqrt{\Delta T_1} R_a + b$	II	$a, b$	Hunt et al. (1998)
HU	$R_s = a \sqrt{\Delta T_1} R_a + b T_{máx} + c P + d P^2 + e$	II	$a, b, c, d, e$	Hunt et al. (1998)

Em que:  $R_s$ , radiação solar diária incidente na superfície ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $R_a$ , radiação solar diária incidente no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $Alt.$ , Altitude local (m);  $\Delta T_1$ , Diferença entre a temperatura máxima e mínima do dia ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T_2$ , Diferença entre a temperatura máxima e a média da mínima dos dois dias consecutivos ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta T_m$ , Média mensal de  $\Delta T_2$ , e;  $P$ , precipitação diária.

A radiação solar diária incidente no topo da atmosfera foi calculada para cada local e dia do ano conforme Pereira et al. (2007), pela Equação 1:

$$Ra = 37,6 \left[ 1 + 0,033 \cos \left( NDA \frac{360}{365} \right) \right] \left[ \left( \frac{\pi}{180} \right) hn \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta \sin hn \right] \quad (1)$$

em que,

$\Phi$  - latitude do local, graus decimais;

$\delta$  - declinação solar, graus decimais;

$hn$  - ângulo horário do Nascer do Sol, graus decimais.

$NDA$  - número do dia do ano, variando de 1 para primeiro dia do ano a 365 para o último dia do ano.

A declinação solar foi calculada pela Equação 2:

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \frac{360}{365} (NDA - 80) \right] \quad (2)$$

O ângulo horário do Nascer do Sol foi calculado pela Equação 3:

$$hn = \arccos(-\tan \Phi \tan \delta) \quad (3)$$

### 3.3 Cálculo da evapotranspiração de referência

Para calcular a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), utilizou-se o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO e recomendado como padrão pela comunidade agrônômica internacional (BOIS et al., 2008), calculada pela Equação 4:

$$ET_o = \frac{0,408 s (R_n - G) + \frac{\gamma}{T + 273} \frac{900 U_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (4)$$

em que,

$ET_o$  - evapotranspiração de referência, mm d<sup>-1</sup>;

$s$  - declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura, kPa °C<sup>-1</sup>;

$R_n$  - radiação líquida total diária, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

$G$  - fluxo total diário de calor no solo, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico, 0,063 kPa °C<sup>-1</sup>;

$U_2$  - velocidade do vento medida a dois metros de altura, m s<sup>-1</sup>;

$e_s$  - pressão de saturação de vapor, kPa;

$e_a$  - pressão parcial de vapor, kPa, e;

$T$  - temperatura média do ar, °C.

O fluxo de calor no solo (G) foi considerado igual à zero, valor que pode ser assumido para períodos diários (ALLEN et al., 1998). A radiação líquida ( $R_n$ ), para valores diários, foi estimada conforme Pereira, et al. (2007), empregando-se a Equação 5:

$$R_n = 0,5 \ R_s \quad (5)$$

em que,

$R_s$  - radiação solar diária incidente na superfície, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

O termo  $R_s$  variou conforme o local e modelo de estimativa estudado. A pressão de saturação de vapor foi estimada pela Equação 6:

$$e_s = 0,06108 \ 10^{\left(\frac{7,5}{273,3+T}\right)} \quad (6)$$

A pressão parcial de vapor foi estimada pela Equação 7:

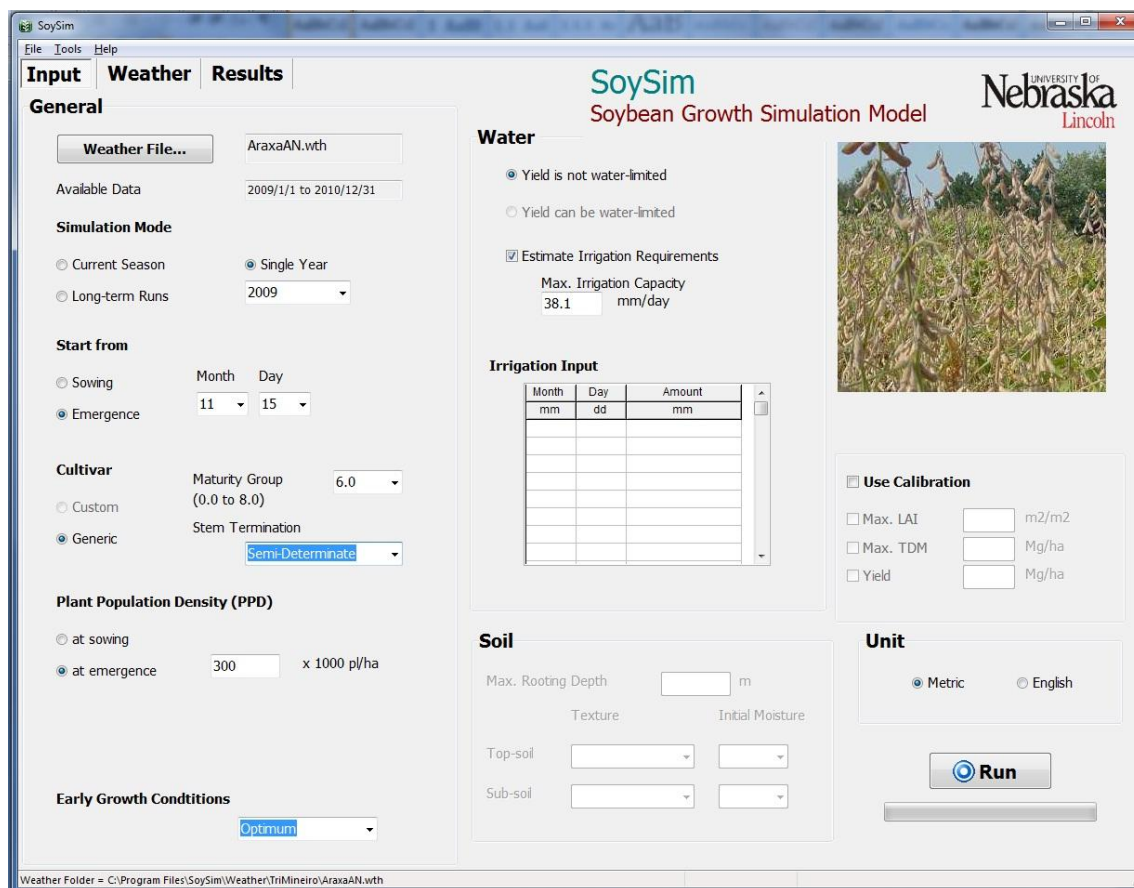
$$e_a = \frac{(e_s \ UR)}{100} \quad (7)$$

A declividade da curva de pressão de vapor foi calculada pela equação 8:

$$s = \frac{4098 \ e_s}{(T + 273,3)^2} \quad (8)$$

### 3.4 Simulação de produtividade

A simulação de produtividade foi feita com o simulador de crescimento e produtividade SoySim, versão 2009.1.0, desenvolvido pela Universidade de Nebraska, Lincoln, EUA. Por incorporar inovações científicas, esse simulador tem amplo potencial de uso, seja como ferramenta de apoio para melhorar o manejo da cultura, ou para uso em pesquisas e desenvolvimento de novas cultivares (SETIYONO et al., 2010). O programa simula a produtividade potencial da cultura da soja através de dados de  $R_s$ ,  $T_{máx}$ ,  $T_{mín}$ , fotoperíodo e densidade de plantio. Esses dados foram inicialmente computados para os locais de estudo, sendo que cada local apresentava-se com dados de  $R_s$  estimada pelos 8 modelos avaliados e com  $R_s$  observada, totalizando 54 arquivos de entrada. Esses arquivos foram desenvolvidos no próprio simulador. A simulação de produtividade (Figura 2) foi feita para o ano de 2010, escolhendo-se a emergência da cultura em 15 de novembro, cultivar de crescimento semi-determinado do grupo de maturidade 6,0, com população de 300 mil plantas por hectare na emergência da cultura e com condições ótimas de crescimento.



**Figura 2.** Detalhe da escolha dos parâmetros de entrada no modelo de simulação de crescimento e produtividade SoySim.

### 3.5 Calibração dos modelos de estimativa da radiação solar

Para o período de dados, o primeiro ano foi utilizado para calibrar os coeficientes e o segundo para avaliar o desempenho dos modelos. Os coeficientes dos modelos foram obtidos a partir do método da minimização da raiz quadrada do quadrado médio do erro, obtida a partir da diferença entre os valores observados e estimados.

### 3.6 Avaliação dos modelos

#### 3.6.1 Parâmetros avaliados

Para avaliar os modelos de estimativa da radiação solar, utilizou-se a raiz quadrada do quadrado médio do erro ( $RQME$ ), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio ( $EM$ ), obtidos pelas Equações 9, 10 e 11, respectivamente:

$$RQME = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$R^2 = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O})^2} \right] \quad (10)$$

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (11)$$

em que,

$O_i$  - radiação solar diária incidente na superfície observada, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

$E_i$  - radiação solar diária incidente na superfície estimada, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

$n$  - total de dados do período, adimensional.

$\bar{O}$  - média da radiação solar diária incidente na superfície observada durante o período de avaliação, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

A *RQME* varia de zero ao infinito, sendo que, quanto menor, melhor as estimativas de  $R_s$ . Entretanto, este índice não define se os dados estão sendo subestimados ou superestimados (JACOVIDES; KONTOYIANNIS, 1995). Similar ao *RQME*, quanto menor o valor absoluto de *EM*, melhor a estimativa. Porém, valores positivos indicam a quantidade média de superestimativa dos modelos e negativos, o contrário.

### 3.6.2 Impacto no cálculo da *ET<sub>o</sub>*

Calculou-se a *ET<sub>o</sub>* pelo método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO com dados de  $R_s$  estimada por cada modelo e comparou-os com *ET<sub>o</sub>* obtida com a medida para cada um dos locais avaliados através da *RQME* e  $R^2$ , obtidos conforme Equações 9 e 10, respectivamente, descritas acima.

### 3.6.3 Impacto na simulação de produtividade

Na produtividade simulada pelo simulador SoySim, avaliou-se o desempenho de cada modelo, comparando-se a  $R_s$  estimada com a observada na região do Triângulo Mineiro através do  $R^2$  obtidos conforme Equação 10 descrita no item 3.6.1. Fez-se também uma comparação direta entre cada produtividade simulada com  $R_s$  estimada e medida para cada local.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Calibração dos modelos de estimativa da radiação solar

Comparando-se os coeficientes calibrados expressos na Tabela 3, através da variação percentual destes na região, obtida pelo quociente da diferença entre o maior e menor valor pelo maior valor, nota-se a importância da calibração local dos modelos estudados. Mesmo nos modelos com menor variação, Annandale (AN) e Hargreaves (HA), o coeficiente  $a$  apresentou variação em torno de 18%, com o menor valor obtido em Conceição das Alagoas e Ituiutaba, e o maior em Araxá. A diferença entre os valores dos coeficientes desses modelos poderia ser explicada em função da variação da altitude entre esses locais. A estação de Araxá se encontra a uma altitude de 1020 metros, enquanto que Conceição das Alagoas e Ituiutaba, a 568 e 560 metros, respectivamente. Porém, Liu et al. (2009) obtiveram correlação muito fraca desse coeficiente com a altitude. Nota-se também que a correção para a altitude proposta por Annandale, et al. (2002) não se justifica, pois, praticamente, não alterou os valores dos coeficientes, corroborando com Liu et al. (2009) e Almorox (2011).

**Tabela 3.** Coeficientes calibrados dos modelos nos locais estudados.

Modelos		AN	BC			CH		JS				
Cidades /Coeficientes		<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
Araxá		0,183	0,862	0,017	1,861	0,513	-0,575	0,076	0,903	-5,90E-3	6,02E-5	
Conc. das alagoas		0,150	0,695	0,019	1,767	0,373	-0,387	0,079	0,763	-9,66E-4	-6,60E-7	
Ituiutaba		0,152	0,677	0,012	1,997	0,391	-0,436	0,085	0,733	-8,70E-5	-2,20E-5	
Patrocínio		0,153	0,873	0,039	1,304	0,383	-0,401	0,076	0,787	3,95E-3	-1,11E-4	
Sacramento		0,155	0,796	0,019	1,711	0,436	-0,504	0,059	0,923	-3,93E-3	6,31E-5	
Uberlândia		0,165	0,732	0,015	1,976	0,452	-0,492	0,073	0,885	-1,13E-2	1,33E-4	
Média		0,160	0,772	0,020	1,769	0,425	-0,466	0,075	0,832	---	---	
Variação	Diferença	0,033	0,196	0,027	0,672	0,140	0,188	0,026	0,190	---	---	
	%	18,0	22,4	69,2	34,0	27,3	32,7	30,6	20,6	---	---	

Modelos		DC			HA		HA-1	HU				
Cidades /Coeficientes		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
Araxá		0,758	0,064	2,413	0,188	0,179	0,983	0,131	0,543	-0,236	0,003	-7,899
Conc. das alagoas		0,654	0,115	2,067	0,153	0,175	-2,639	0,154	0,168	-0,117	0,002	-5,017
Ituiutaba		0,687	0,084	2,182	0,153	0,201	-5,914	0,172	0,286	-0,086	0,001	-10,982
Patrocínio		0,688	0,152	1,961	0,157	0,162	-0,593	0,141	0,211	-0,082	0,001	-3,730
Sacramento		0,671	0,066	2,340	0,159	0,159	0,019	0,134	0,287	-0,222	0,004	-4,688
Uberlândia		0,649	0,030	2,812	0,169	0,154	1,611	0,120	0,468	-0,265	0,004	-7,415
Média		0,686	0,089	2,251	0,163	0,172	-1,089	0,142	0,327	-0,168	0,003	-6,622
Variação	Diferença	0,104	0,100	0,582	0,035	0,047	7,525	0,052	0,375	0,183	0,003	7,252
	%	13,7	65,8	22,9	18,6	23,4	---	30,2	69,1	69,1	75,0	66,0

Quando se compara os valores calibrados com o sugerido por Hargreaves para regiões interiores, fica evidente a necessidade de calibração do modelo. A diferença



entre o menor e maior valor do coeficiente  $a$  foi 4 e 17% inferior e superior, respectivamente, ao sugerido (0,16) por Hargreaves. Percebe-se ainda que quanto maior o número de coeficientes dos modelos, maior é a necessidade de calibração. No modelo de Hargreaves com dois coeficientes (HA-1), a variação do coeficiente  $a$  foi de 23,4% entre os locais, enquanto que o coeficiente  $b$  alternou entre valores positivos e negativos. Na modificação proposta por Chen (CH), esses coeficientes variaram entre 27,3 e 32,7%, respectivamente, com alguns valores ocorrendo fora da faixa indicada por Chen, et al. (2004), que é entre 0,16 a 0,42 para  $a$  e -0,45 a 0,12 para  $b$ .

O modelo de Hunt com cinco coeficientes (HU) foi o que apresentou maior variação, com a maioria dos coeficientes variando em mais de 60%. Liu et al. (2009) também encontraram grandes variações dos coeficientes do mesmo. A explicação para essa variação dos coeficientes pode ser atribuída pela forma como os termos  $T_{máx}$  e  $P$  são inseridos no modelo HU. Aqui, esses termos são somados ao  $R_a$ , funcionando como coeficientes lineares. Assim, mesmo se não houver variação diária da temperatura e ocorresse chuva, haveria  $R_s$  positivo, o que seria um tanto estranho. Mesmo efeito ocorreria com  $T_{máx}$  maior que zero e variação diária da temperatura igual à zero. No modelo de De Jong e Stewart (JS), os coeficientes  $c$  e  $d$  oscilaram entre valores positivos e negativos, porém apresentando sempre valores próximos à zero.

Os coeficientes obtidos no modelo de Bristow e Campbell (BC) foram diferentes aos da faixa sugerida por Meza e Varas (2000), (0,7 para  $a$ , 0,004 a 0,010 para  $b$  e 2,4 para  $c$ ). Com base no valor médio do coeficiente  $a$ , verificou-se que o coeficiente de transmissividade da atmosfera para um dia de céu limpo foi de 0,77. Esse valor é 9% superior aos comumente encontrados (MEZA; VARAS, 2000), e ainda apresentou variação de 22,4%, com valores crescentes conforme a altitude, seguindo as observações de Bristow e Campbell (1984), os quais afirmaram que o coeficiente  $a$  varia com a altitude e com a poluição do ar. O modelo de Donatelli e Campbell (DC), proposto por esses autores com a finalidade de reduzir os efeitos sazonais do modelo BC, reduziu um pouco essa variação, porém não eliminou a necessidade de calibração local, visto que os coeficientes apresentaram ainda grande variação, com destaque para o coeficiente  $c$  que apresentou variação superior a 65%. Já Liu et al. (2009) verificaram maior variação para o coeficiente  $b$ . O modelo desenvolvido por De Jong e Stewart, com propósito de reduzir a instabilidade do modelo de Bristow e Campbell, também não eliminou a necessidade de calibração local, com os coeficientes  $a$  e  $b$  variando, aproximadamente, 30 e 20%, respectivamente.

As diferenças consideráveis entre os valores dos coeficientes indicam que o ajuste local dos modelos pode ser determinante no seu desempenho, conforme relatam alguns autores (HARGREAVES, 1981; MEZA; VARAS, 2000; ALMOROX, 2011).

#### 4.2 Desempenho dos modelos de estimativa da radiação solar

O resumo dos resultados da avaliação de desempenho dos modelos está expresso na Tabela 4. Os resultados de *RQME* estão próximos aos valores obtidos em outros estudos. Em geral, foram inferiores aos obtidos por Liu et al. (2009), na China, e por Fortin et al. (2008), no Canadá, e superiores aos de Almorox (2011), na Espanha. Borges, et al. (2010), em Cruz das Almas, encontraram valores de *RQME* na faixa de 3,54 a 10,43 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Já os coeficientes de determinação (*R*<sup>2</sup>) foram, em média, inferiores aos obtidos nesses estudos. Liu et al. (2009) encontraram *R*<sup>2</sup> entre 0,68 e 0,77.

**Tabela 4.** Resumo das avaliações dos modelos nos locais estudados: raiz quadrada média do erro (*RQME*); erro médio (*EM*), e; coeficiente de determinação (*R*<sup>2</sup>).

	Cidades	Araxá			Conceição das Alagoas			Ituiutaba		
Modelos	RQME	EM	R <sup>2</sup>	RQME	EM	R <sup>2</sup>	RQME	EM	R <sup>2</sup>	
Annandale	3,71	-0,62	0,58	3,31	-0,18	0,60	3,04	0,10	0,63	
Bristow e Campbell	3,02	-0,01	0,72	2,74	0,14	0,71	2,65	0,06	0,71	
Chen	3,22	-0,32	0,72	2,90	0,15	0,69	2,92	0,21	0,65	
De Jong e Stewart	3,00	0,06	0,73	3,09	0,40	0,65	3,13	0,38	0,60	
Donatelli e Campbell	3,18	-0,78	0,72	2,75	-0,50	0,71	2,54	-0,37	0,74	
Hargreaves	3,71	-0,63	0,58	3,31	-0,18	0,60	3,05	-0,11	0,63	
Hargreaves modificado	3,72	-0,63	0,58	3,29	-0,11	0,60	3,01	0,06	0,63	
Hunt	3,32	-0,43	0,66	3,21	-0,09	0,61	3,02	0,16	0,63	

	Cidades	Patrocínio		Sacramento			Uberlândia		
Annandale	3,43	0,15	0,54	3,47	-0,71	0,56	3,66	-0,76	0,49
Bristow e Campbell	3,10	0,74	0,64	2,77	-0,29	0,71	2,94	-0,32	0,67
Chen	3,10	0,38	0,63	2,87	-0,29	0,70	3,06	-0,31	0,64
De Jong e Stewart	3,30	0,69	0,60	3,07	0,19	0,65	3,10	-0,01	0,63
Donatelli e Campbell	3,05	-0,28	0,65	2,92	-0,89	0,71	3,18	-0,94	0,64
Hargreaves	3,43	0,15	0,54	3,48	-0,72	0,56	3,66	-0,78	0,49
Hargreaves modificado	3,43	0,16	0,54	3,48	-0,72	0,56	3,68	-0,80	0,49
Hunt	3,31	0,22	0,57	3,62	-0,29	0,50	3,29	-0,47	0,58

Das modificações propostas aos modelos aqui estudados, apenas o modelo proposto por Chen et al. (2004) melhorou o desempenho do modelo original de Hargreaves, com *RQME* e *R*<sup>2</sup>, em média, 12 e 16% inferior e superior, respectivamente. Esse resultado concorda com os obtidos por Wu, et al. (2007), na China.

A inclusão da altitude, conforme proposto por Annandale et al. (2002), ou de um segundo coeficiente, conforme citado por Hunt et al. (1998), ao modelo original de Hargreaves, praticamente não alteraram os valores de *RQME* e *R*<sup>2</sup>. Já a inclusão de

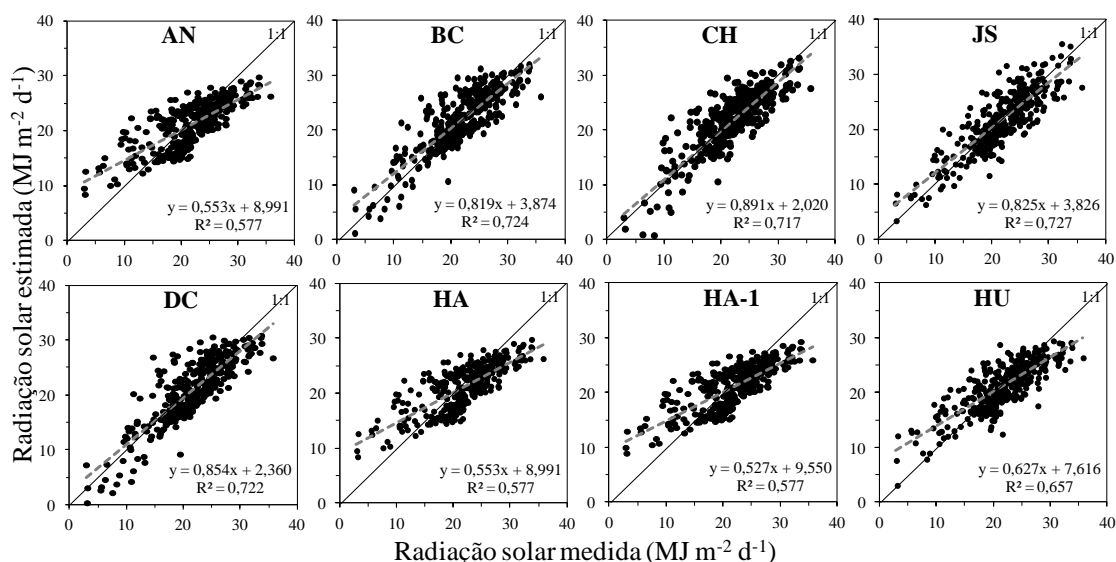
dados de chuva, conforme proposto por Hunt et al. (1998), resultou em uma melhora de apenas 4% na *RQME*. Além dessa melhora não ser expressiva, nota-se ainda que em dias com chuva muito elevada esse modelo tem forte tendência em superestimar *Rs*, concordando com resultados obtidos por Abraha e Savage (2008), em Pretoria, África do Sul e Griffith, Austrália. Além disso, em Sacramento, foi menos eficiente e preciso do que o Hargreaves original. Em geral, conforme resultados obtidos por Almorox (2011), espera-se melhor desempenho dos modelos de estimativa de *Rs* à medida que aumenta o número de elementos meteorológicos (LIU; SCOTT, 2001; LI et al., 2010), porém, para a região do Triângulo Mineiro, isso não foi observado. A explicação para essa tendência na região pode ser atribuída à distribuição irregular das chuvas, onde não é rara a ocorrência de dias com índices muito acima da média. Nessas condições, os modelos que usam dados de chuva podem apresentar forte tendência em superestimar *Rs*, conforme verificado em Sacramento no modelo HU, em que um dia com precipitação elevada a *Rs* medida foi de  $18 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  e a estimada aproximadamente  $51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , ou seja, quase três vezes superior.

Quando se compara o modelo BC com a modificação proposta por Donatelli e Campbell (1998), não se observa nenhuma melhora na eficiência e precisão na estimativa de *Rs*. Essa modificação apresentou melhor desempenho em apenas dois locais, mas, no geral, os valores médios de *RQME* e  $R^2$  foram 2 e 1% superior e inferior, respectivamente, aos do modelo BC. Mesmo nos locais onde foi superior, a diferença da *RQME* e  $R^2$  entre esses modelos não superou 4%, respectivamente. A modificação proposta por Donatelli e Campbell (1998) visa reduzir os efeitos sazonais em *Rs*, mas no Triângulo Mineiro, em geral, não se notou nenhuma melhora. Liu et al. (2009) obtiveram resultados semelhantes em 15 locais na China e afirmaram que a modificação do modelo BC não é necessária, pois apenas aumentaria a complexidade do modelo.

Analisando os dados de *EM* expressos na Tabela 4, nota-se que o modelo DC apresentou tendência geral em subestimar os valores de *Rs* em todos os locais, enquanto que os outros modelos ora subestimaram, ora superestimaram, dependendo do local. No entanto, esse índice estatístico tem como desvantagem a anulação mútua dos erros de sinais diferentes, conforme relatado por Almorox (2011), ou seja, o modelo pode apresentar tendência em subestimar valores abaixo da média geral e a superestimar valores acima desta e vice-versa, mas a estatística de *EM* não faz comparação linear entre os valores estimados e observados, apenas compara todos os valores abaixo da

média com os acima desta, apresentando, portanto, apenas uma tendência geral do modelo avaliado.

Ao comparar a linha de tendência gerada entre os dados de  $R_s$  medidos e os estimados com a reta 1:1 ilustrados nas Figuras 3, 4, 5, 6, 7, e 8, observam-se as tendências dos modelos ao longo das variações de  $R_s$ . Dessa forma, os valores abaixo da média não se anulam com os valores acima desta. Assim, nota-se que todos os modelos apresentaram tendência em superestimar os valores de  $R_s$  abaixo da média, que foi em torno de  $19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , e a subestimar os valores acima desta, conforme verificado em outros estudos (MAHMOOD; HUBBARD, 2002; LIU et al., 2009; BORGES et al., 2010). Essas tendências, segundo Mahmood e Hubbard (2002), são potencialmente associadas com advecção em escala local, movimento frontal e o método de regressão. Com base nessas afirmações, os autores aplicaram uma regressão linear para nove locais nos EUA e obtiveram melhores performances. Porém, pode-se inferir que essa tendência, na região do Triângulo Mineiro, embora siga o mesmo padrão apresentando em outros locais (MAHMOOD; HUBBARD, 2002; LIU et al., 2009; BORGES et al., 2010), é mais bem explicada pela concentração dos dados de radiação em torno da média, apresentando poucos valores próximos dos extremos, sendo, portanto, pouco representativos desta.



**Figura 3.** Comparação entre a radiação solar incidente diária medida e a estimada em Araxá.

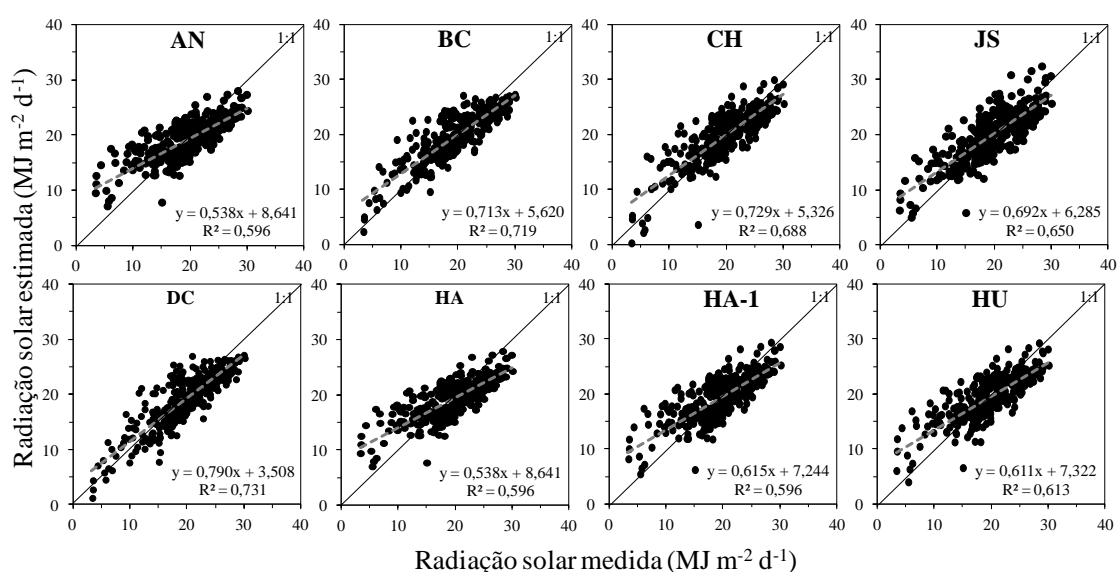
De maneira geral, modelos de estimativa da  $R_s$  que usam dados de temperatura máxima e mínima do ar aumentam a eficiência, na medida em que a amplitude térmica aumenta, conforme pode-se notar comparando os dados da amplitude térmica média anual ( $\Delta T$ ), expressos na Tabela 1, com os dados de  $RQME$ , expressos na Tabela 4. As cidades de Araxá e Uberlândia com menor  $\Delta T$  foram as que apresentaram maior  $RQME$ , enquanto que Ituiutaba, com maior  $\Delta T$ , apresentou menor  $RQME$ . Segundo Liu et al. (2009), a calibração desses modelos é mais sensível em regiões com maior umidade, onde  $\Delta T$  é geralmente menor e, consequentemente,  $RQME$  maior.

O modelo BC seguido pelos modelos de DC, CH e JS foram os mais eficientes e precisos. Esses modelos possuem mais de um coeficiente e são adicionados de forma multiplicativa à  $R_a$  (grupo I). Nos modelos com desempenho inferiores, com mais de um coeficiente (HA-1 e HU), eles são somados ao  $R_a$ , enquanto que os modelos HA e AN possuem apenas um coeficiente (grupo II). Comparando esses dois grupos de modelos, observa-se redução de até 20% na  $RQME$  e aumento de 18% em  $R^2$ , indicando que o efeito da  $R_s$  na amplitude térmica diária é melhor controlada nos modelos com mais de um coeficiente e adicionados de forma multiplicativa em  $R_a$ , conforme verificado em outros estudos (BALL et al., 2004; WU et al., 2007; LIU et al., 2009). De maneira geral, os modelos com apenas um coeficiente ou com os demais coeficientes somados ao  $R_a$  têm maior tendência em superestimar e subestimar os valores extremos, principalmente os menores.

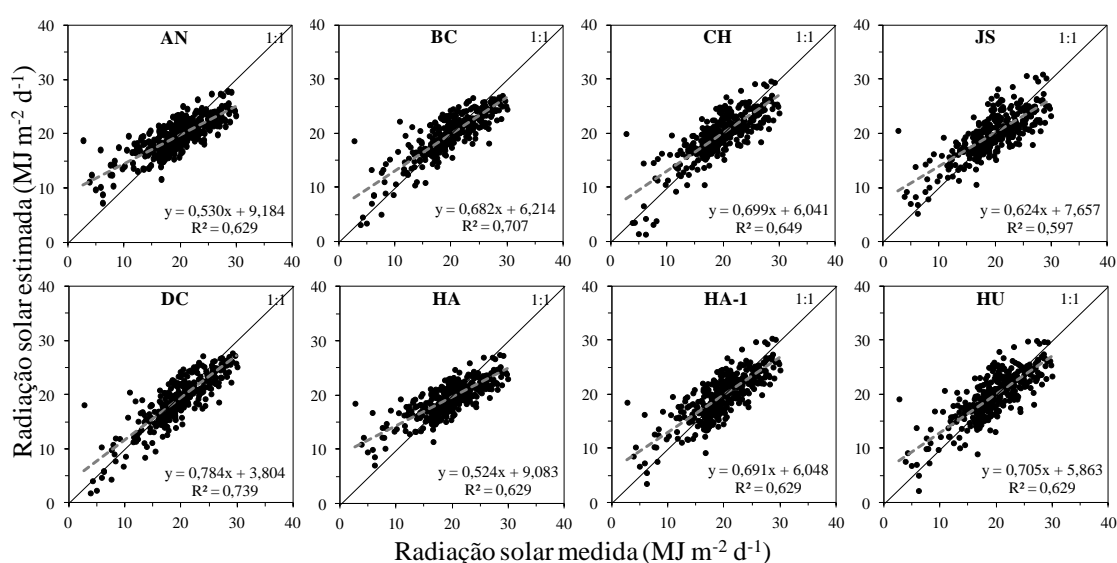
A análise dos modelos em cada local: Araxá (Figura 3), Conceição das Alagoas (Figura 4), Ituiutaba (Figura 5), Patrocínio (Figura 6), Sacramento (Figura 7) e Uberlândia (Figura 8), confirmam o melhor desempenho dos modelos do grupo I. Em média, o grupo I apresentou  $R^2$  13, 10, 4, 8, 15 e 14% superior ao grupo II, nos respectivos locais. Porém, essas relações podem ser afetadas positiva ou negativamente com a inclusão de dados de chuva, dependendo do local. Em Araxá (Figura 3), o desempenho dos modelos do grupo I não foi influenciado pela chuva, com todos os modelos apresentando valores de  $R^2$  próximos a 0,72. Já entre os modelos do grupo II, o modelo HU teve desempenho 8% superior com o acréscimo dessa variável. Em Conceição das Alagoas (Figura 4), o modelo DC obteve o melhor desempenho, enquanto que o JS teve o pior dentre os modelos do grupo I, com  $R^2$  de 0,73 e 0,65, respectivamente. Nesse local, os dados de chuva, conforme sugerido por De Jong e Stewart (1993) (modelo JS), afetaram negativamente a relação entre  $R_s$  e  $\Delta T$ , em comparação com os demais modelos do grupo I, e positivamente nos modelos do grupo

II, como pode-se notar ao comparar o modelo HU com os demais modelos desse grupo. Em média, o modelo JS apresentou  $R^2$  6% inferior em relação aos modelos do grupo I, e o modelo HU, 2% superior em relação aos modelos do grupo II.

Em Ituiutaba (Figura 5), os modelos do grupo II tiveram o melhor desempenho entre os locais e não foram influenciados pela chuva, apresentando  $R^2$  próximo a 0,63, porém, em média, ainda foram 4% inferiores aos modelos do grupo I. Já os modelos do grupo II tiveram  $R^2$ , em média, 10% inferior com a inclusão de dados de chuva.

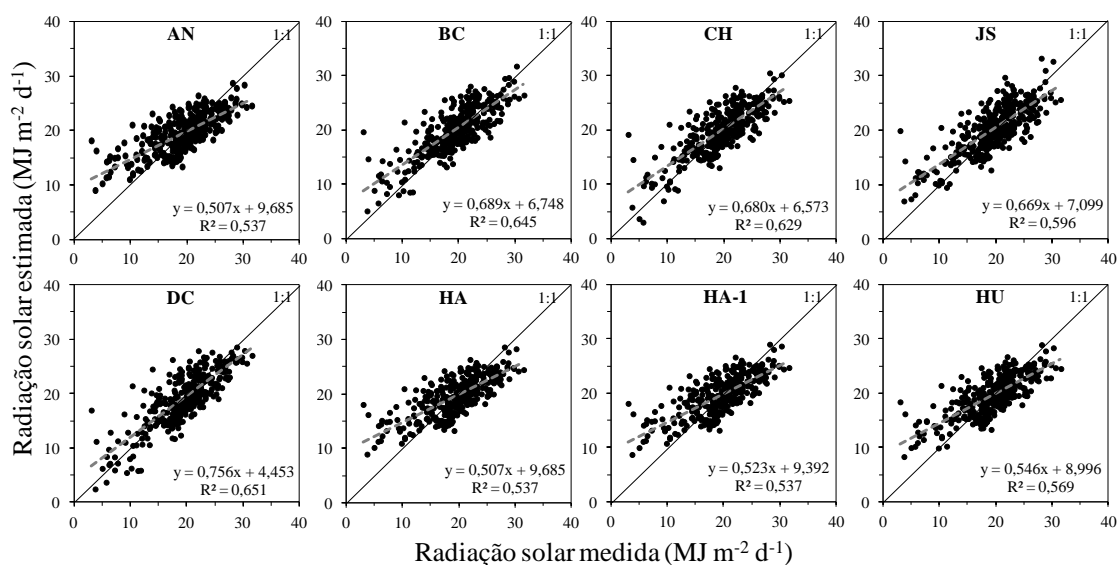


**Figura 4.** Comparação entre a radiação solar incidente diária medida e a estimada em Conceição das Alagoas.

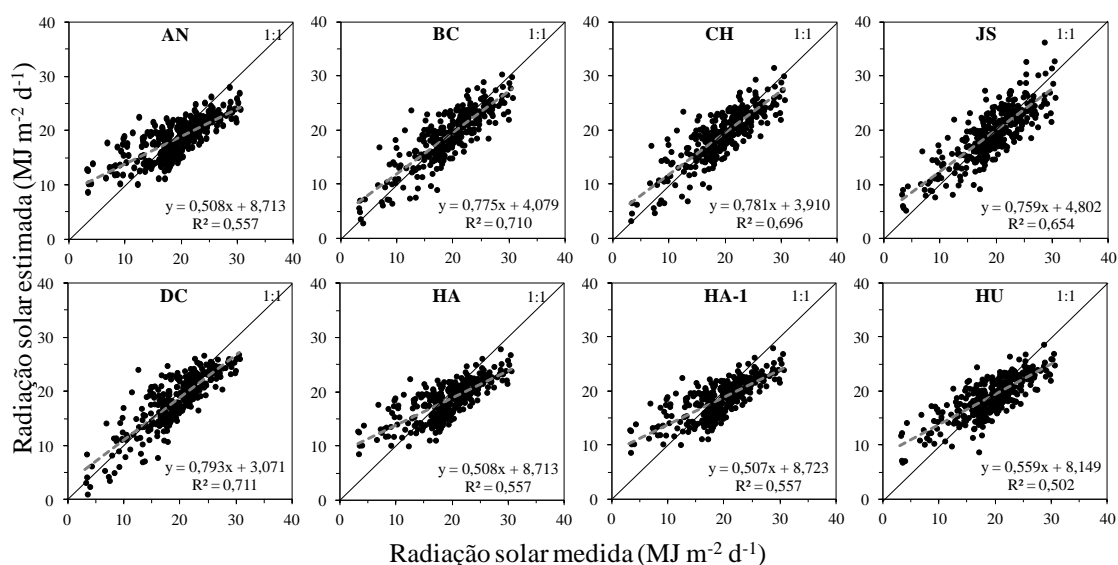


**Figura 5.** Comparação entre a radiação solar incidente diária medida e a estimada em Ituiutaba.

Na cidade de Patrocínio (Figura 6), os modelos do grupo I apresentaram o pior desempenho, porém ainda foram, em média, 8% superiores aos modelos do grupo II. Nesse local, dados de chuva diminuíram o desempenho dos modelos do grupo I e aumentaram do grupo II, em média, 4 e 3%, respectivamente. Sacramento (Figura 7) foi o único local que dados de chuva afetaram negativamente o  $R^2$  dos modelos do grupo II, sendo essa diferença próxima de 6%. Nos modelos do grupo I, essa redução foi, em média, 5%.

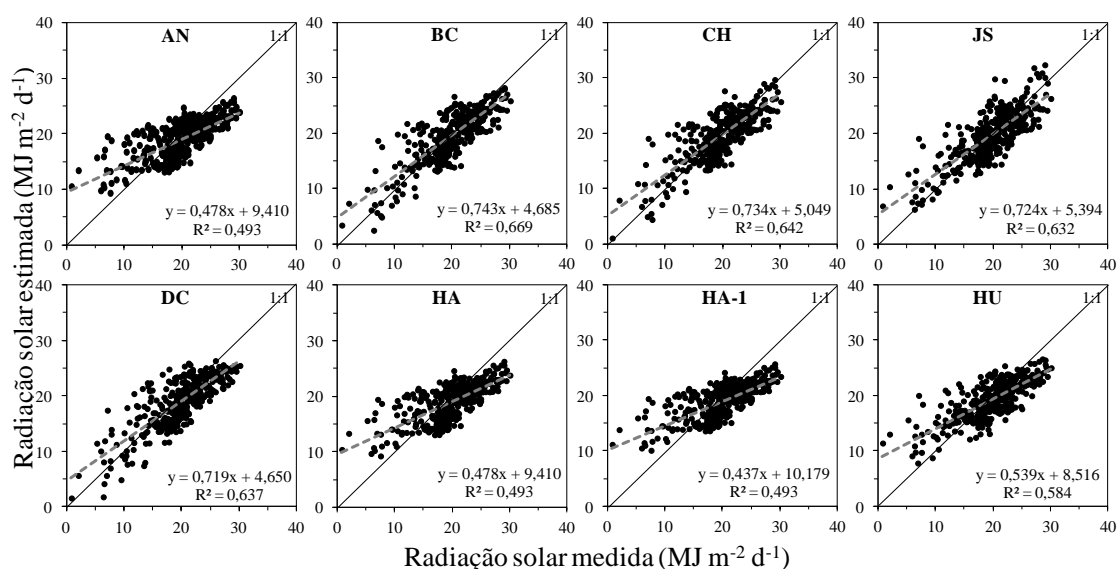


**Figura 6.** Comparação entre a radiação solar incidente diária medida e a estimada em Patrocínio.



**Figura 7.** Comparação entre a radiação solar incidente diária medida e a estimada em Sacramento.

A relação entre  $R_s$  e  $\Delta T$  nos modelos do grupo I foi menos afetada pela inclusão de dados de chuva em Uberlândia (Figura 8), onde  $R^2$  foi diminuído em apenas 3%. Nesse local, também se observou a maior diferença entre os modelos do grupo II com a adição de dados de chuva. Aqui o  $R^2$  desses modelos foi 9% superior com a inclusão de dados de chuva.



**Figura 8.** Comparação entre a radiação solar incidente diária medida e a estimada em Uberlândia.

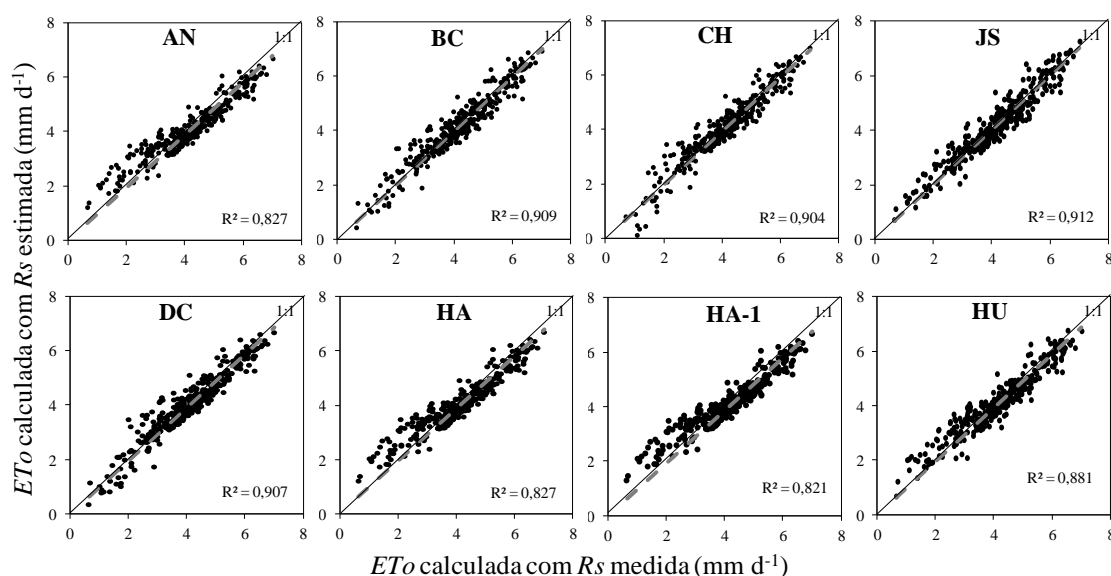
Com base nesses resultados, verifica-se que os dados de chuva, em geral, aumentam a precisão dos modelos do grupo II e diminuem a dos modelos do grupo I. No entanto, os modelos do grupo I, em sua grande maioria, estimaram  $R_s$  com maior precisão, em comparação com os modelos do grupo II.

Um fator a considerar é que os modelos avaliados foram calibrados com dados de temperatura máxima e mínima do ar de apenas um ano e isso pode influenciar o desempenho desses modelos em caso de ocorrência de um ano atípico, quer seja nas suas calibrações ou avaliações. No entanto, alguns desses modelos, como o de Bristow e Campbell, foram propostos com a calibração de seus coeficientes feita com apenas um ano de estudo. Ademais, os valores dos coeficientes aqui obtidos estão próximos aos encontrados em literaturas com desempenhos também semelhantes.



### 4.3 Impacto da estimativa da radiação solar incidente diária na *ETo*

Confirmada a diferença de precisão dos, será que estas produzem resultados significativos na *ETo* a ponto de comprometer o dimensionamento e gestão de sistemas de irrigação? A comparação dos resultados mostraram que esse desempenho não foi muito afetado pelo desempenho dos modelos de estimativa da *Rs*, seguindo, em geral, a mesma tendência, conforme se observa nas Figuras 9 a 14. Bandyopadhyay et al. (2008), na Índia, encontraram resultados semelhantes. Em todos locais e modelos, o  $R^2$  foi superior a 0,70. Esses resultados foram superiores aos obtidos por Conceição (2010), em Jales, SP, com a *ETo* calculada com o método de Hargreaves a partir de dados de *Rs* estimada pelos modelos HA e BC, comparadas com a calculada pelo método de Penman-Monteith, e inferiores aos obtidos por Abraha e Savage (2008), na África do Sul. Jabloun e Sahli (2008), na Tunísia, obtiveram  $R^2$  de 0,95 com *Rs* estimada pelo modelo de Hargreaves.

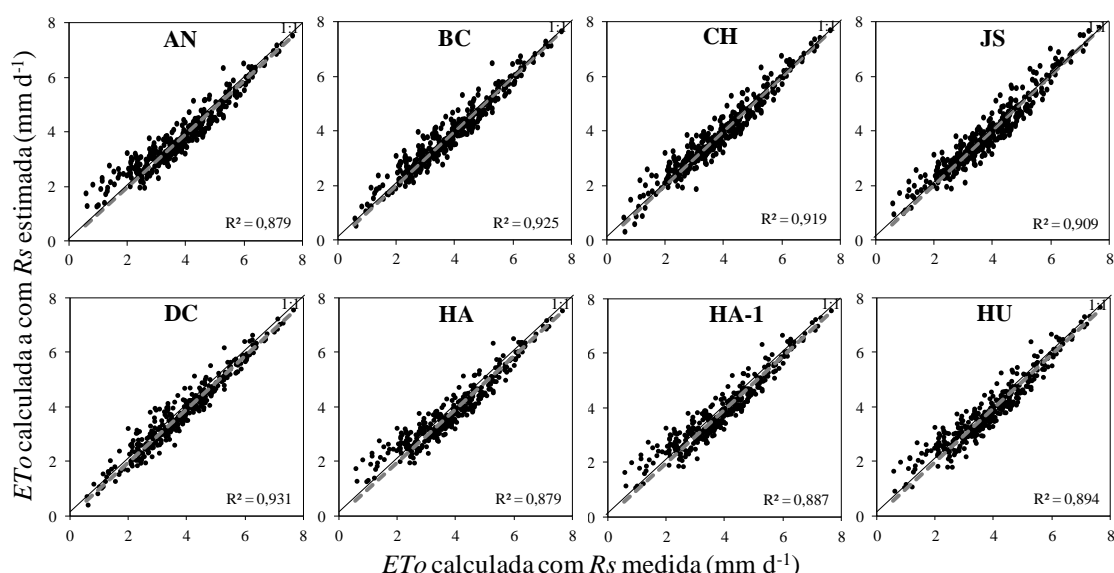


**Figura 9.** Comparação entre a *ETo* com dados de *Rs* medida e com dados de *Rs* estimada em Araxá.

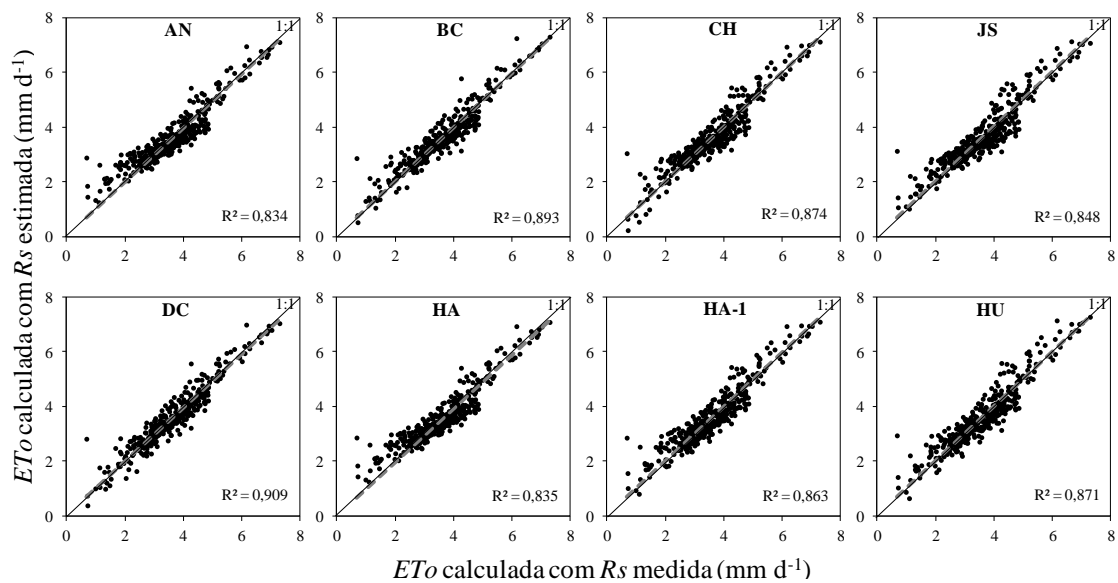
O desempenho dos modelos de estimativa de *Rs* na *ETo* pode ser explicado em função desta ser a principal fonte de energia para o processo evapotranspirativo e, consequentemente, o elemento meteorológico que mais interfere nesse processo, pois segundo Bois, et al. (2008), ela a governa fortemente. Além disso, a radiação solar afeta todos os outros elementos, conforme relata Pereira et al. (2003). 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  $ET_o$ , (YIN et al.; 2008). Além disso, conforme estudos feitos por Lemos Filho (2010), em Minas Gerais, os elementos meteorológicos possuem grande variabilidade espacial. Portanto, na falta de dados de  $R_s$ , é preferível estimá-la por modelos empíricos calibrados, do que dispor de modelos mais simples para cálculo da  $ET_o$ , pois os resultados são mais confiáveis.

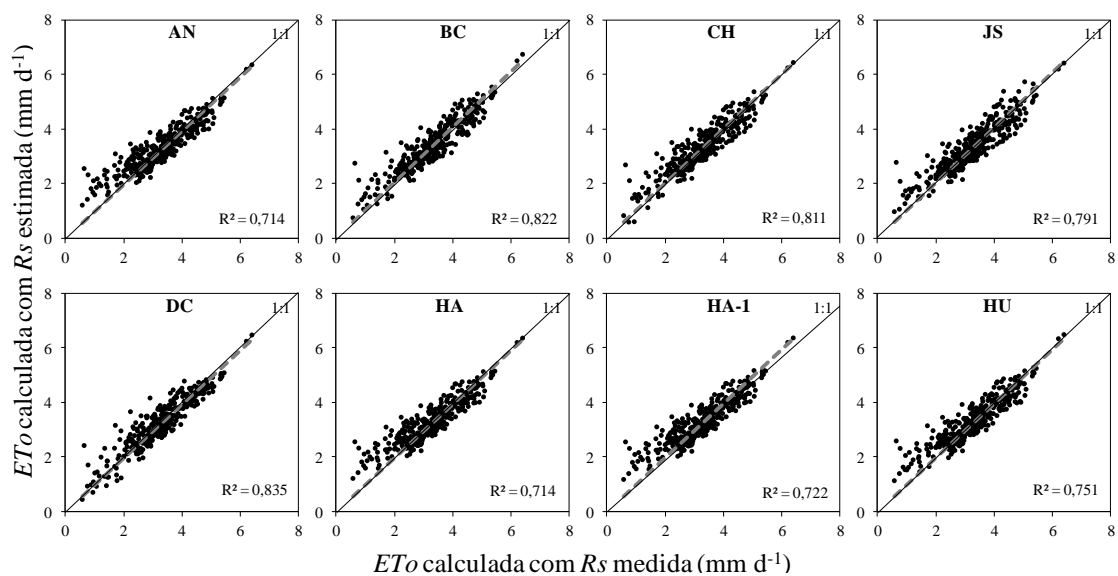
Comparando as Figuras 9 a 14 com as Figuras 3 a 8, nota-se que as estimativas de  $ET_o$  seguiram o mesmo padrão das radiações estimadas, ou seja, todos tenderam em superestimar os menores valores e subestimar os acima da média, confirmando a dependência do processo de evapotranspiração à radiação solar, conforme relatado por Bandyopadhyay et al. (2008), e justifica a afirmação de Lemos Filho (2010) da necessidade de medir ou estimá-la com precisão.



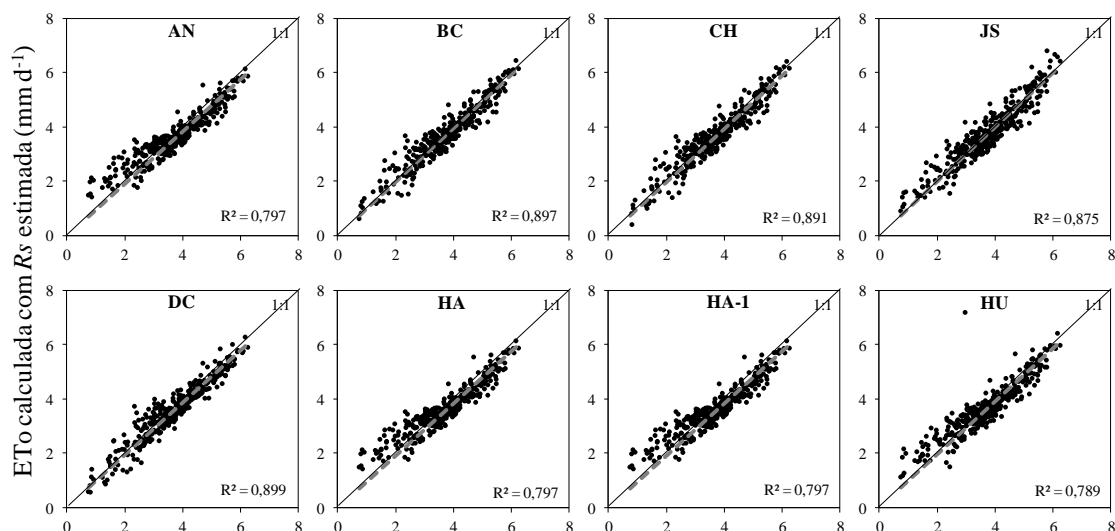
**Figura 10.** Comparação entre a  $ET_o$  com dados de  $R_s$  medida e com dados de  $R_s$  estimada em Conceição das Alagoas.



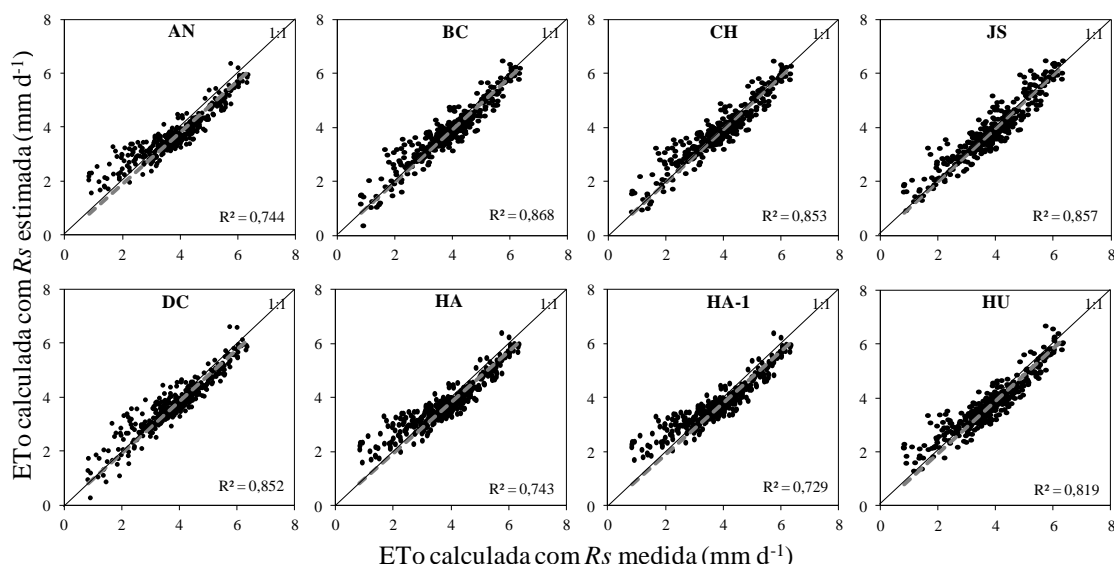
**Figura 11.** Comparação entre a  $ETo$  com dados de  $R_s$  medida e com dados de  $R_s$  estimada em Ituiutaba.



**Figura 12.** Comparação entre a  $ETo$  com dados de  $R_s$  medida e com dados de  $R_s$  estimada em Patrocínio.



**Figura 13.** Comparação entre a  $ET_o$  com dados de  $R_s$  medida e com dados de  $R_s$  estimada em Sacramento.

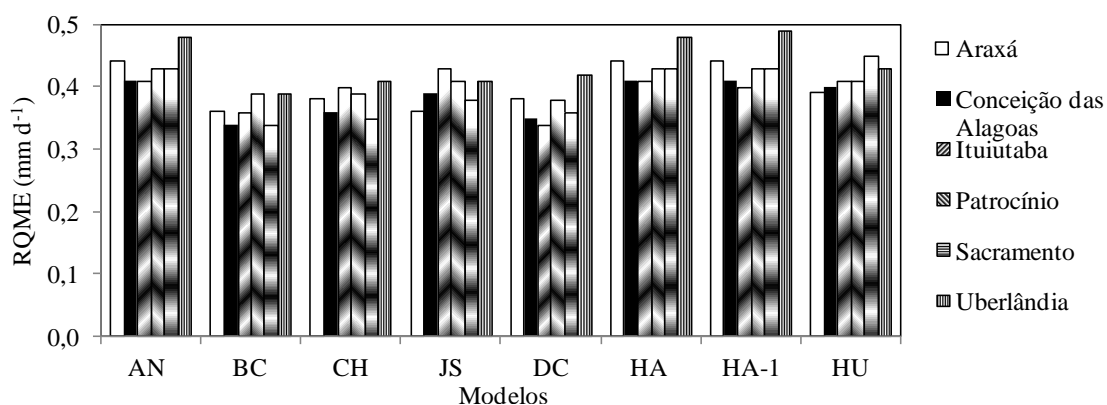


**Figura 14.** Comparação entre a  $ET_o$  com dados de  $R_s$  medida e com dados de  $R_s$  estimada em Uberlândia.

No entanto, mesmo seguindo o mesmo padrão de tendência, os desempenhos da  $ET_o$  foram consideravelmente melhores. Conceição das Alagoas apresentou os maiores  $R^2$ , todos superiores a 0,87. Nesse local, o  $R^2$  dos modelos de estimativa de  $R_s$  variaram de 0,60 a 0,72. O pior  $R^2$  ocorreu em Patrocínio, mas ainda assim o menor valor foi superior a 0,70, enquanto que o da  $R_s$  nesse local foi inferior a 0,55. Em Uberlândia, onde o modelo HA teve o pior desempenho com  $R^2$  de apenas 0,49, a  $ET_o$  calculada apresentou  $R^2$  superior a 0,74. Esses resultados podem ser explicados, segundo Righi et

al. (1998), em função do saldo de radiação ( $R_n$ ) utilizado para o cálculo da  $ET_o$ , ser menos sensível à variação da temperatura.

Os valores de  $RQME$ , expressos na Figura 15, confirmam o bom desempenho das  $R_s$  no cálculo da  $ET_o$ . Estes, foram sempre inferior a  $0,5\text{mm d}^{-1}$ , independente do local e modelo. Esses valores estão próximos aos obtidos em outros estudos para diferentes locais (ANNANDALE et al., 2002; EL NESR et al., 2011; JABLOUN; SAHLI, 2008). Isso significa que os valores estimados de  $R_s$  resultam, em média, em  $ET_o$  no máximo  $0,5\text{ mm d}^{-1}$ , superiores ou inferiores à calculada com a medida. Dessa forma, nota-se, que apesar da  $ET_o$  calculada a partir de dados de  $R_s$  estimada com precisão razoável, os resultados são relativamente confiáveis para a gestão e dimensionamento de sistemas de irrigação.



**Figura 15.** Raiz quadrada média do erro ( $RQME$ ) entre a  $ET_o$  com  $R_s$  estimada e  $ET_o$  com  $R_s$  medida em  $\text{mm d}^{-1}$ .

Comparando os valores de  $RQME$  da  $ET_o$  calculada com a  $R_s$  estimada por cada modelo, com a obtida com dados medidos, constatou-se que essas diferenças foram sempre inferiores a 15% (Tabela 5). Além disso, embora os modelos do grupo I tenham sido mais eficientes que os do grupo II, as diferenças da  $RQME$  entre esses dois grupos não superaram  $0,10\text{mm d}^{-1}$ . Conceição (2010) encontrou resultados semelhantes em Jales, SP, comprovando que quaisquer desses modelos de estimativas produzem resultados relativamente precisos e eficientes.

**Tabela 5.** Representação percentual da raiz quadrada do quadrado médio do erro (*RQME*) em função da média diária anual da *ETo* calculada com *Rs* medida (*ETo<sub>m</sub>*) em cada local.

Modelos	Cidades		Araxá		Conceição das Alagoas		Ituiutaba	
			RQME	ETo <sub>m</sub>	RQME	ETo <sub>m</sub>	RQME	ETo <sub>m</sub>
Annandale			0,44mm d <sup>-1</sup>	10,1%	0,41mm d <sup>-1</sup>	10,7%	0,41mm d <sup>-1</sup>	11,5%
Bristow e Campbell			0,36mm d <sup>-1</sup>	8,7%	0,34mm d <sup>-1</sup>	8,9%	0,36mm d <sup>-1</sup>	10,1%
Chen			0,38mm d <sup>-1</sup>	9,1%	0,36mm d <sup>-1</sup>	9,4%	0,40mm d <sup>-1</sup>	11,2%
De Jong e Stewart			0,36mm d <sup>-1</sup>	8,7%	0,39mm d <sup>-1</sup>	10,2%	0,43mm d <sup>-1</sup>	12,0%
Donatelli e Campbell			0,38mm d <sup>-1</sup>	9,1%	0,35mm d <sup>-1</sup>	9,2%	0,34mm d <sup>-1</sup>	9,5%
Hargreaves			0,44mm d <sup>-1</sup>	10,1%	0,41mm d <sup>-1</sup>	10,7%	0,41mm d <sup>-1</sup>	11,5%
Hargreaves modificado			0,44mm d <sup>-1</sup>	10,1%	0,41mm d <sup>-1</sup>	10,7%	0,40mm d <sup>-1</sup>	11,2%
Hunt			0,39mm d <sup>-1</sup>	9,4%	0,40mm d <sup>-1</sup>	10,5%	0,41mm d <sup>-1</sup>	11,5%

Modelos	Cidades		Patrocínio		Sacramento		Uberlândia	
			RQME	ETo <sub>m</sub>	RQME	ETo <sub>m</sub>	RQME	ETo <sub>m</sub>
Annandale			0,43mm d <sup>-1</sup>	13,1%	0,43mm d <sup>-1</sup>	11,6%	0,48mm d <sup>-1</sup>	12,5%
Bristow e Campbell			0,39mm d <sup>-1</sup>	11,9%	0,34mm d <sup>-1</sup>	9,2%	0,39mm d <sup>-1</sup>	10,1%
Chen			0,39mm d <sup>-1</sup>	11,9%	0,35mm d <sup>-1</sup>	9,4%	0,41mm d <sup>-1</sup>	10,6%
De Jong e Stewart			0,41mm d <sup>-1</sup>	12,5%	0,38mm d <sup>-1</sup>	10,2%	0,41mm d <sup>-1</sup>	10,6%
Donatelli e Campbell			0,38mm d <sup>-1</sup>	11,6%	0,36mm d <sup>-1</sup>	9,7%	0,42mm d <sup>-1</sup>	10,9%
Hargreaves			0,43mm d <sup>-1</sup>	13,1%	0,43mm d <sup>-1</sup>	11,6%	0,48mm d <sup>-1</sup>	12,5%
Hargreaves modificado			0,43mm d <sup>-1</sup>	13,1%	0,43mm d <sup>-1</sup>	11,6%	0,49mm d <sup>-1</sup>	12,7%
Hunt			0,41mm d <sup>-1</sup>	12,5%	0,45mm d <sup>-1</sup>	12,1%	0,43mm d <sup>-1</sup>	11,2%

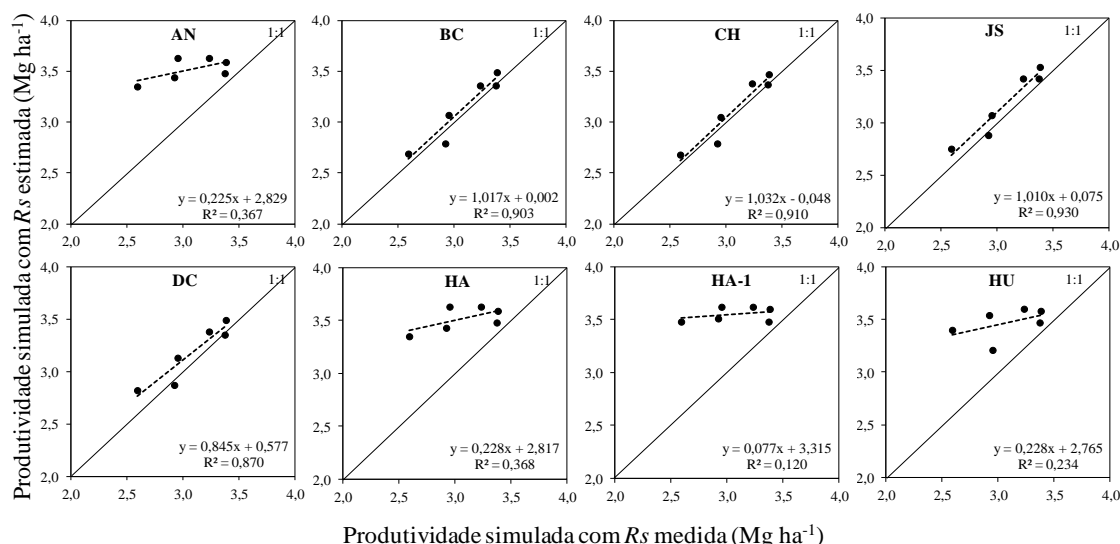
#### 4.4 Impacto da estimativa da radiação solar incidente diária na simulação de produtividade

Na simulação de produtividade, a precisão e eficiência dos modelos foram diferentes dependendo da relação estabelecida entre *Rs* e *ΔT* (Figura 16). No Triângulo Mineiro, quaisquer dos modelos do grupo I são confiáveis para serem aplicados na simulação produtiva, independentemente do local, com *R*<sup>2</sup> superior a 0,85. Para três locais na Inglaterra, Rivington et al. (2002) encontraram resultados semelhantes na simulação de produtividade da cevada de primavera durante treze anos e afirmaram que o modelo DC calibrado forneceu valores aceitáveis.

Conforme se observa na Tabela 6, a maior diferença entre a simulação de produtividade entre os modelos do grupo I, foi obtida com o de DC, na cidade de Ituiutaba, super estimando-a em 0,23Mg ha<sup>-1</sup>. Nota-se também que a correção proposta por Donatelli e Campbell (1998) ao modelo BC, para reduzir os efeitos sazonais associados ao verão, em geral, não melhorou as simulações de produtividade na região, contrariando os resultados obtidos por Bellocchi et al. (2003) em vinte locais distribuídos em diferentes latitudes. Segundo esses autores, as diferenças nas simulações de produtividade com *Rs* estimada por esses dois modelos aumentam em latitudes mais elevadas.

Já nos modelos do grupo II, o  $R^2$  em função do local não superou 0,37, sendo que o modelo HA-1 teve o pior resultado. Nesse grupo de modelos, apenas em Araxá e Patrocínio as diferenças entre as simulações não superaram  $0,22 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Em Ituiutaba, o modelo HA-1 apresentou o pior resultado superestimando a produtividade em  $0,89 \text{ Mg ha}^{-1}$ . O baixo desempenho desse grupo de modelos provavelmente decorre da forte tendência destes em superestimar os valores mais baixos de  $R_s$ , principalmente os inferiores a  $5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ , associados à fisiologia da cultura da soja. Em Araxá e Patrocínio, onde esses modelos tiveram desempenho próximo dos modelos do grupo I, não ocorreu nenhum dia com medições inferiores a  $5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  durante o ciclo de simulação da cultura, enquanto que as demais localidades apresentaram pelo menos um dia, porém as estimativas mínimas de  $R_s$  sempre superaram  $10 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ . Dessa forma, as diferenças nas simulações de produtividade entre os modelos do grupo I e do grupo II nos locais com baixo nível de valores medidos pode ser explicada em função da soja ser uma planta C3, menos eficiente no aproveitamento da energia solar. Segundo Casaroli et al. (2007), a disponibilidade e aproveitamento da radiação solar pela cultura de soja são fatores determinantes na produtividade final de grãos. Assim, em função dos modelos do grupo II terem apresentado maior tendência em superestimar os menores valores de  $R_s$ , também o apresentaram nos locais com baixos valores medidos durante o ciclo de simulação da cultura. Porém, Abraha e Savage (2008), em dois locais na África do Sul, não encontraram diferenças significativas na simulação de matéria seca do milho com a  $R_s$  medida e estimada pelos modelos BC, CD, HA-1 e HU.

Observa-se ainda na Figura 16, ao analisar a reta de regressão linear com a reta de proporção 1:1 que, independente do local, todos os modelos tenderam em superestimar a produtividade. Analisando cada ponto no gráfico e comparando-os com as diferenças entre a produtividade simulada com  $R_s$  medida e a estimada, expressos na Tabela 6, nota-se que os modelos do grupo II superestimaram as produtividades em todos os locais, variando de  $0,10$  a  $0,89 \text{ Mg ha}^{-1}$ , ou seja, de 3 a 34%, respectivamente. Já os modelos do grupo I subestimaram a produtividade em Conceição das Alagoas; foram praticamente estáveis em Araxá; e superestimaram nos demais locais. Nesse grupo de modelos, as diferenças entre a produtividade simulada variaram de  $-0,13$  a  $0,23 \text{ Mg ha}^{-1}$ , o que representa uma sub e sobre estimativa inferiores a 5 e 9%, respectivamente.



**Figura 16.** Comparação entre a produtividade simulada com dados de  $R_s$  medida e com dados de  $R_s$  estimada na região do Triângulo Mineiro.

**Tabela 6.** Comparação entre a produtividade simulada com a radiação solar medida e a produtividade simulada com a radiação estimada pelos modelos estudados.

Modelos	Cidades											
	Araxá		Conc. das alagoas		Ituiutaba		Patrocínio		Sacramento		Uberlândia	
Medida	3,37*	---	2,92	---	2,59	---	3,38	---	3,23	---	2,95	---
AN	3,48	+ 0,11**	3,44	+ 0,52	3,35	+ 0,76	3,59	+ 0,21	3,63	+ 0,40	3,63	+ 0,68
BC	3,36	- 0,01	2,79	- 0,13	2,69	+ 0,10	3,49	+ 0,11	3,36	+ 0,13	3,07	+ 0,12
CH	3,37	0,00	2,79	- 0,13	2,68	+ 0,09	3,47	+ 0,09	3,38	+ 0,15	3,05	+ 0,10
JS	3,42	+ 0,05	2,88	- 0,04	2,75	+ 0,16	3,53	+ 0,15	3,42	+ 0,19	3,07	+ 0,12
DC	3,35	- 0,02	2,87	- 0,05	2,82	+ 0,23	3,49	+ 0,11	3,38	+ 0,15	3,13	+ 0,18
HA	3,48	+ 0,11	3,43	+ 0,51	3,35	+ 0,76	3,59	+ 0,21	3,63	+ 0,40	3,63	+ 0,68
HA-1	3,48	+ 0,11	3,51	+ 0,59	3,48	+ 0,89	3,60	+ 0,22	3,62	+ 0,39	3,62	+ 0,67
HU	3,47	+ 0,10	3,54	+ 0,62	3,40	+ 0,81	3,58	+ 0,20	3,60	+ 0,37	3,21	+ 0,26

\* Produtividade simulada ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ); \*\* Diferença entre a produtividade estimada com a radiação solar medida e a radiação solar estimada pelos modelos: AN, Annandale; BC, Bristow e Campbell; CH, Chen; JS, De Jong e Stewart; DC, Donatelli e Campbell; LI, Li; HA, Hargreaves; H1, Hunt modelo 1, e; H2, Hunt modelo 2.

De maneira geral, o modelo CH foi o que apresentou as melhores estimativas de produtividade, sendo superado apenas em Conceição das Alagoas pelos modelos JS e DC, porém as diferenças não superaram 0,09 e 0,08  $\text{Mg ha}^{-1}$ , respectivamente, sendo, portanto, o modelo mais indicado para estimar a  $R_s$  e aplicá-la em modelos de simulação de produtividade, na região do Triângulo Mineiro.



## 5 CONCLUSÕES

Conclui-se que, na região do Triângulo Mineiro: (a) maior variação nos valores dos coeficientes foi verificada nos modelos com maior número de coeficientes, tornando-os mais responsivos à calibração, porém todos tenderam em superestimar os valores de  $R_s$  inferiores à média e a subestimar os acima desta, sendo que nos modelos do grupo II, essas tendências foram mais intensas, principalmente para os valores mais baixos; (b) os modelos do grupo I foram mais precisos em estimar  $R_s$ , com valores de  $RQME$  e  $R^2$  variando de 2,54 a 3,30 e 0,60 a 0,74, respectivamente; (c) As estimativas da  $ET_o$  apresentaram  $R^2$  acima de 0,70 e  $RQME$  inferior a 0,5mm d<sup>-1</sup>, para todos os modelos; (d) simulações de produtividade são mais precisas com  $R_s$  estimada pelos modelos do grupo I, independentemente do local, com  $R^2$  superior a 0,86, apresentando estimativas de produtividades confiáveis tanto para o produtor, quanto para auxílio à previsão de safras agrícolas com sobre ou sub estimativas máximas de 0,23 ou 0,13Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- 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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192307002626>>. Acesso em: 16 maio 2011.
- ALLEN, et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p.
- ALLEN, R. G. Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 2, n. 2, p. 56-67, 1997. Disponível em: <<http://link.aip.org/link/?QHE/2/56/1>>. Acesso em: 16 maio 2011.
- 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. Disponível em: <<http://journals.tubitak.gov.tr/physics/issues/fiz-11-35-1/fiz-35-1-7-0912-20.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 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. Disponível em: <[http://www.engg.uaeu.ac.ae/ejer/issues/V11/pdf\\_iss1\\_11/p5\\_MODELLING\\_OF\\_GLOBAL.pdf](http://www.engg.uaeu.ac.ae/ejer/issues/V11/pdf_iss1_11/p5_MODELLING_OF_GLOBAL.pdf)>. Acesso em: 22 ago. 2011.
- ANNANDALE, J. G.; et al. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. **Irrigation Science**, Frankfurt am Main, 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.
- 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. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/aj/articles/96/2/391>>. Acesso em: 22 ago. 2011.
- 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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192308001822>>. Acesso em: 16 maio 2011.

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.

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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192307002924>>. Acesso em: 16 maio 2011.

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. 74-80, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n1/v14n01a10.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.31, n. 2, p.159-166, 1984. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168192384900170>>. Acesso em: 16 maio 2011.

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. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v15n8/11.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

CASAROLI, D.; et al. Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja-uma revisão. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 14, n. 2, p. 102-120, 2007. Disponível em: <<http://revistaseletronicas.pucrs.br/ojs/index.php/fzva/article/viewFile/2502/1961>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

CHALLINOR, J. A.; et al. Crops and climate change: progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation. **Journal of Experimental Botany**, Oxyford, v. 60, n. 10, p. 2775-2789, 2009. Disponível em: <<http://jxb.oxfordjournals.org/content/60/10/2775.full.pdf+html>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

CHEN, R. S.; et al. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, Belton, v. 45, n. 11-12, p. 1759-1769, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040300270X>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em:  
<<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v30n4/06.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

DE JONG, R.; STEWART, D. W. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 63, p. 509-518, 1993. Disponível em:  
<<http://pubs.aic.ca/doi/pdf/10.4141/cjps93-068>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

DONATELLI, M.; BELLOCCHI, G. Estimate of daily global solar radiation: new developments in the software RadEst3.00, 2001, Florence. **Proceedings...** Florence: Second International Symposium Modelling Cropping Systems, 2001.

DONATELLI, M.; CAMPBELL, G. S. A simple model to estimate global solar radiation, 1998, Nitra. **Proceedings...** Nitra, Slovak Republic: Fifth ESA Congress, v. 2, Nitra, Slovak Republic, The Slovak Agriculture University, 1998.

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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809503001170>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. <[http://king-saud.academia.edu/MohammadElNesr/Papers/992616/Modified\\_Hargreaves\\_Method\\_a\\_s\\_an\\_Alternative\\_to\\_the\\_Penman-monteith\\_Method\\_in\\_the\\_Kingdom\\_of\\_Saudi\\_Arabia](http://king-saud.academia.edu/MohammadElNesr/Papers/992616/Modified_Hargreaves_Method_a_s_an_Alternative_to_the_Penman-monteith_Method_in_the_Kingdom_of_Saudi_Arabia)>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192308001007>>. Acesso em: 16 maio 2011.

FRITZSONS, E. MANTOVANI, L. E. AGUIAR, A. V. Relação entre altitude e temperatura: uma contribuição ao zoneamento climático no Estado de Paraná. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenau, v. 10, n. 1, p. 49-64, 2008. Disponível em:  
<<http://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/902/681>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em:  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X1998000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1998000100002&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 22 ago. 2011.

GOODIN, D. G.; et al. Estimating solar irradiance for crop modelling using daily air temperature data. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 5, p. 845-851, 1999. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/aj/pdfs/91/5/845>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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.

HIGASHIDE, T. Prediction of Tomato Yield on the Basis of Solar Radiation Before Anthesis under Warm Greenhouse Conditions. **HortScience**, Alexandria, v. 44, n. 7, p. 1874-1878, 2009. Disponível em: <<http://hortsci.ashspublications.org/content/44/7/1874.full.pdf+html?sid=a1514ce6-6677-4970-bbac-4e7ecdb902c7>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

HOOK, J. E.; MCCLENDON, R. W. Estimation of solar radiation data from long-term meteorological records. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 4, p. 739-742, 1992. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/aj/pdfs/84/4/AJ0840040739>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

HUNT, L. A.; KUCHAR, L.; SWANTON, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 91, n. 3-4, p. 293-300, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192398000550>>. Acesso em: 16 maio 2011.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data Application to Tunisia. **Agricultural Water Management**, Colombo, v. 95, n. 6, p. 707-715, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377408000243>>. Acesso em: 16 maio 2011.

JACOVIDES, C. P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, Colombo, v.27, n. 3-4, p.365-371, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378377495011529>>. Acesso em: 16 maio 2011.

KLERING, E.; et. al. Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 5, p. 549-558, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v43n5/a01v43n5.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

KUNZ, J. H.; et al. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/pab/v42n11/v42n11a01.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v14n12/07.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

LI, D. H. W.; LAM, J. C. An analysis of climatic variables and design implications. **Architectural Science Review**, Sydney, v. 42, n. 1, p. 15-25, 1999. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00038628.1999.9696844#preview>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

LI, H.; et al. Estimating daily global solar radiation by day of year in China. **Applied Energy**, Stockholm, v. 87, n. 10, p. 3011-3017, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910000929>>. Acesso em 22 ago. 2011.

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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192300001738>>. Acesso em: 16 maio 2011.

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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377409000742>>. Acesso em: 16 maio 2011.

LIU, X.; et al. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v.149, n.9, p.1433-1446, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192309000823>>. Acesso em: 16 maio 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. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/aj/articles/94/4/723?highlight=YXJ0aWNsZV92b2x1bWU9OTQmcT0oaXNzdWU6NCkmYXJ0aWNsZV9maXJzdHBhZ2U9NzIzJnE9KGpvdXJuYWw6YWopJmxlbj0xMCZzdGFydD0xJnN0ZW09ZmFsc2Umc29ydD0%3D>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

MENGES, H. O.; ERTEKIN, C.; SONMETE, M. H. Evaluation of global solar radiation for Konya, Turkey. **Energy Conversion and Management**, Belton v. 47, n. 18-19, p. 3149-3173, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890406000586>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

MEZA, F.; VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. **Agricultural Forest Meteorology**, New Haven, v. 100, n. 2-3, p. 231-241, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192399000908>>. Acesso em: 16 maio 2011.

ORTIZ, B. V.; et al. Adapting the CROPGRO-Cotton model to simulate Cotton biomass and yield under southern root-knot nematode parasitism. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 52, n. 6, p. 2129-2140, 2009. Disponível em: <[http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?search=1&JID=3&AID=29201&CID=t2009&v=52&i=6&T=2&urlRedirect=\[anywhere=&keyword=&abstract=&title=&author=on&references=&docnumber=&journals=All&searchstring=ORTIZ&pg=&allwords=&exactphrase=ORTIZ&OneWord=&Action=Go&Post=Y&qu=\]&redirType=newresults.asp](http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?search=1&JID=3&AID=29201&CID=t2009&v=52&i=6&T=2&urlRedirect=[anywhere=&keyword=&abstract=&title=&author=on&references=&docnumber=&journals=All&searchstring=ORTIZ&pg=&allwords=&exactphrase=ORTIZ&OneWord=&Action=Go&Post=Y&qu=]&redirType=newresults.asp)>. Acesso em: 22 ago. 2011.

PEREIRA, A. B. VILLA NOVA, N. A. GALVANI, E. Estimation of global solar radiation flux density in Brazil from a single measurement at solar noon. **Biosystems Engineering**, Harpenden, v. 86, n. 1, p. 27-34, 2003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511003000813>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

PEREIRA, R. A.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Departamento de Ciências Exatas, Esalq-USP, Piracicaba, SP, 2007, 192p.

PINKER, R. T.; FROUIN, R.; LI, Z. A review of satellite methods to derive surface shortwave irradiance. **Remote sensing of environment**, St. Paul, v. 51, n. 1, p. 108-124, 1995. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442579400069Y>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192303002740>>. Acesso em: 16 maio 2011.

RICHARDSON, C. W. Weather simulation for crop management models. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 28, n. 5, p. 1602-1606, 1985. Disponível em: <[http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32484&t=2&redir=aid=32484&redir=\[volume=28&issue=5&conf=t&orgconf=t1985\]&redirType=toc\\_journals.asp&redirType=toc\\_journals.asp](http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=32484&t=2&redir=aid=32484&redir=[volume=28&issue=5&conf=t&orgconf=t1985]&redirType=toc_journals.asp&redirType=toc_journals.asp)>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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...**

Brasília: CBM, 1998. Disponível em: <<http://www.cbmet.com/cbm-files/13-628176e4c2b09bc3ffe9e9eb1e93cf82.pdf>>. Acesso em: 15 jun. 2011.

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. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X0500123X>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

RIVINGTON, M; MATTHEWS, K. B.; BUCHAN, K. A comparison of methods for providing solar radiation data to crop models and decision support systems, 2002, Lugano, Switzerland. **Proceeding...** Lugano: Intituto Environmental Modelling and Software Society, v. 3, p. 193-198, 2002.

SETIYONO, T. D.; et al. Simulation of soybean growth and yield in near-optimal growth conditions. **Field Crops Research**, Warwick, v. 119, n. 1, p. 161-174, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429010001760>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

SHRESTHA, N.; et al. Yield response of sugar beets to water stress under Western European conditions. **Agricultural water management**, Colombo, v. 97, n. 2, p. 346-350, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377409002959>>. Acesso em: 18 maio 2011.

SOLTANI, A.; MEINKE, H.; DE VOIL, P. Assessing linear interpolation to generate daily radiation and temperature data for use in crop simulations. **European journal of agronomy**, Córdoba, v. 21, n. 2, p. 133-148, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030103000443>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/060306.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

STEIDLE NETO, A. J.; et al. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 626-631, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v12n6/v12n06a09.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

THORNTON, P. E.; RUNNING, S. W. An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity, and precipitation.



**Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 93, n. 4, p. 211-228, 1999.  
Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192398001269>>. Acesso em: 16 maio 2011.

TRNKA, M.; et al. Effect of Estimated Daily Global Solar Radiation Data on the Results of Crop Growth Models. **Sensors**, Basel, v. 7, n. 10, p. 2330-2362, 2007.  
Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/7/10/2330>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

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. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192305000961>>. Acesso em: 16 maio 2011.

WEISS, A.; et al. Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 6, p. 1321-1326, 2001. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/search?search%5B-3%5D=&searchType%5B-3%5D=Any&search%5B-2%5D=&searchFields%5B-2%5D%5BAuthor%5D=Author&searchType%5B-2%5D=Phrase&search%5B-1%5D=&searchFields%5B-1%5D%5BTitle%5D=Title&searchType%5B-1%5D=Phrase&volume=93&issue=6&year=&first-page=1321&search%5B0%5D=>>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

WEISS, A.; HAYS, C. J. Simulation of daily solar irradiance. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 123, n. 3-4, p. 187-199, 2004. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192303002946>>. Acesso em: 16 maio 2011.

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.  
Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890407001100>>. Acesso em: 22 ago. 2011.

WU, W.; et al. Evaluating the accuracy of VEMAP daily weather data for application in crop simulations on a regional scale. **European journal of agronomy**, Córdoba, v. 32, n. 3 p. 187-194, 2010. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S116103010900104X>>. Acesso em: 22 ago. 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. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377407002181>>. Acesso em: 18 maio 2011.