

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO RadEst3.0 PARA  
ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM FUNÇÃO DE  
MEDIDAS DE TEMPERATURAS DO AR MÁXIMA E MÍNIMA**

**MELANIA INÊS VALIATI**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Irrigação e Drenagem.

**BOTUCATU-SP**

**Janeiro – 2005**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU**

**CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO RadEst3.0 PARA  
ESTIMATIVA DA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM FUNÇÃO DE  
MEDIDAS DE TEMPERATURAS DO AR MÁXIMA E MÍNIMA**

**MELANIA INÊS VALIATI**

**Orientador: Prof. Dr. Raimundo Leite Cruz**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração em Irrigação e Drenagem.

**BOTUCATU-SP**

**Janeiro – 2005**

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Raimundo Leite Cruz pela amizade, incentivo, orientação e acima de tudo confiança, muito obrigada.

Ao Professor João Francisco Escobedo, minha admiração e gratidão pela confiança, incentivo, apoio e amizade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Irrigação e Drenagem da FCA/UNESP, pela oportunidade da realização do meu doutorado.

A CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo incentivo financeiro concedido por meio da bolsa.

Aos funcionários da UNESP que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação profissional.

A minha madrasta, Elsa Vaz pelo carinho e amor que dedica ao meu pai e à minha família.

Ao meu amigo Emerson Galvani que foi sempre quem me apoiou, principalmente no início e final do meu doutorado, e sempre esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis dessa caminhada, somente tenho a dizer o quanto o admiro e o respeito como profissional e pessoa e dizer que serei eternamente grata por tudo.

À amiga de apartamento, Nilda Braga de Lacerda pelos três anos de convivência e amizade.

A Maritaneia e Mariléia sei que foi pouco tempo em que moramos juntas, mas saibam que as admiro e respeito como profissionais e amigas, obrigada pelos momentos felizes em que passamos juntas.

A Solenir, minha amiga de trabalho em Campo Mourão, obrigada pela força e recepção quando das minhas idas e vindas de Botucatu e depois quando vim definitivamente e pelas cervejadas e noitadas de descontração, valeu companheira.

A dona Garotinha, pelas muitas vezes que se fez de mãe e me fez suprir um pouco a saudade da minha, muito obrigado0.

Aos amigos Marcelo Augusto de Aguiar e Silva e Raul Martinez, pelos conhecimentos passados, pela grande amizade e pelas palavras de incentivo.

Aos colegas de pós-graduação Alexandre Dal Pai, Glauco Rolim, Hildeu Ferreira de Assunção, Idelina de Assunção, Valéria de Almeida Frisina, Juliana Barilli, Vânia Maria Zero, Márcio Maggi, Lauter e Maryzélia pela amizade e troca de conhecimentos, obrigada.

Em especial ao amigo Eduardo Nardini Gomes pela colaboração durante todo o meu trabalho, pela confiança, força e amizade.

A minha família gostaria que soubessem que é muito bom fazer parte dessa família. A vocês que sempre estiveram de braços abertos para me ajudar financeiramente e psicologicamente, só tenho a dizer que, Deus foi sábio quando escolheu de qual família seria membro, pois essa é a melhor família do Mundo.

Ao meu pai Albino Valiati e minha mãe Lídia Scapin Valiati, gostaria que soubessem, que sou a pessoa mais feliz do mundo por ter pais tão maravilhosos quanto vocês. Meu pai, homem sábio que sabe ser enérgico quando necessário e amoroso ao mesmo tempo obrigada por tudo. A minha mãe, minha amiga e companheira mulher grandiosa, mulher como todas as mães, de amor incondicional, só tenho a lhe agradecer por todos os ensinamentos, por ter me tornado a mulher que sou hoje, saiba onde estiver que a Amo Muito e que a Senhora me faz muita falta. A vocês dois só tenho que agradecer pela minha vida.

Ao Seu Joaquim e Dona Ester, obrigada por fazerem me sentir da família, pelo amor e carinho, pois para mim vocês são como os meus pais.

A todos e a Deus o meu muito obrigada, por acreditarem em mim e por sonharem comigo.

**DEDICO**

## OFEREÇO

Dizem que ao nascermos temos um “Anjo da Guarda” que nos acompanha por toda a vida. Eu, pois tive o privilégio de durante a minha longa caminhada ter encontrado outro “Anjo” em minha vida, ao meu noivo meu novo “Anjo”, Natanael Moraes pela compreensão, amor, carinho e confiança durante este período, ofereço esta conquista.

## SUMÁRIO

1 RESUMO .....	1
2 SUMMARY .....	2
3 INTRODUÇÃO.....	3
4 REVISÃO DE LITERATURA .....	6
4.1 Irradiação solar global.....	6
4.2 Estimativa da irradiação solar global. ....	8
4.3 índice de claridade ( $K_t$ ) .....	15
4.4 Precipitação e temperatura do ar .....	17
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
5.1 Localização da área experimental .....	19
5.2 Instrumentos e métodos de medidas .....	20
5.3 Apresentação descritiva da ferramenta computacional RadEst3.0 .....	20
5.4 Modelos utilizados para a estimativa da irradiação solar global.....	23
5.4.1 Modelo de Bristow e Campbell (BC):.....	25
5.4.2 Modelo de Campbell e Donatelli (CD): .....	25
5.4.3 Modelo de Donatelli e Belocchi (DB):.....	25
5.4.4 Modelo Modular DCBB (DCBB) .....	26
5.5 Calibração dos modelos .....	27
5.6 Validação dos modelos e análise estatística.....	27
5.6.1 Coeficiente de determinação ( $R^2$ ):.....	27
5.6.2 Coeficiente de variação (CV); .....	28
5.6.3 Raiz quadrada do erro médio (RMSE): .....	28
5.6.4 Desvio das médias .....	29
5.6.5 Índice de concordância de Willmott (d); .....	29
5.6.6 Índice de confiança ou desempenho (c). .....	30
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
6.1 Cálculo dos parâmetros dos modelos. ....	32
6.2 Calibração dos modelos. ....	36

6.2 Validação dos modelos	36
6.3 Correlação entre valores medidos e estimados para os anos de validação dos modelos.....	41
7 CONCLUSÕES.....	47
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	48

## 1 RESUMO

Para a realização desse estudo utilizou-se uma base de dados de 10 anos obtidos junto ao Departamento de Engenharia Rural – Setor de Irrigação e Drenagem da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu-SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude de 22°51'S; longitude de 48°26'W e altitude 786m na cidade de Botucatu, Estado de São Paulo. O presente trabalho teve como objetivo a calibração e estimativa da irradiação solar global diária em Botucatu, SP, utilizando medidas de temperaturas do ar máxima e mínima por meio do programa RadEst3.0. Esse faz a utilização de quatro modelos para tal estimativa que são: Bristow-Campbell (BC); Campbell-Donatelli (CD); Donatelli-Belochi (DB) e Modular DCBB (DCBB). Pelos resultados podemos concluir que: as modificações aplicadas aos modelos de DB e DCBB, contabilizando o efeito sazonal da variação de temperatura, e utilizando uma função trigonométrica específica para regiões tropicais, contribuíram para o alcance dos melhores resultados. Deve-se, no entanto salientar que todos os modelos propostos são adequados para a estimativa da irradiação solar global, e seu uso depende do grau de precisão que se deseja atingir e da disponibilidade de medidas das temperaturas do ar máxima e mínima. Mas, para a obtenção de melhores resultados deve-se realizar a calibração dos modelos para a região em estudo.

**Palavras-chave:** irradiação solar global, modelagem, temperaturas do ar máxima e mínima.

**RadEst3.0 MODEL AND VALIDATION TO THE GLOBAL SOLAR IRRADIATION ESTIMATE THROUGHOUT MAXIMUM AND MINIMAL AIR TEMPERATURE MEASURES**, Botucatu,, 2005. 65p. Tese (Doutorado em agronomia – Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo.

**Author:** Melania Inês Valiati

**Adviser:** Raimundo Leite Cruz

## **2 SUMMARY**

For the composition of this paper it was used 10 year database from Rural Engineering Department – Irrigation and Draining Sector of Paulista State University's Agronomical Science College, Botucatu-SP campus, with the following geographic coordinates: latitude  $22^{\circ}51'S$ ; longitude  $48^{\circ}26'W$  and altitude 786m in Botucatu City, São Paulo State. This paper focused the daily global solar irradiation estimate in Botucatu, SP, using air temperature (maximum and minimum) by RadEst3.0 program. This program uses four models for to get these estimates: Bristow-Campbell (BC), Campbell-Donatelli (CD), Donatelli-Belochi (DB) and Modular DCBB (DCBB). By results, it was concluded that the changes applied to the DB and DCBB models, in addition to the effect of the temperature variation, and using a specific trigonometric function to tropical regions, contributed to reach better results. However, it ought to be emphasize that all proposed models are appropriated to the global solar irradiation estimate, and its use depends on the level of precision that has to be reached and the availability of the maximum and minimal air temperatures measures. But, to get best results, the models used to the analised region must be calibrated.

**Key-word:** solar global irradiation, modeling, maximum and minimum air temperature.

### **3 INTRODUÇÃO**

O aproveitamento da energia gerada pelo Sol, inesgotável na escala terrestre de tempo, tanto como fonte de calor quanto de luz, é sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio.

A radiação solar é uma variável climatológica primária sendo responsável pela distribuição da fauna e da flora no planeta, influenciando diretamente as atividades fisiológicas dos seres vivos e os elementos climáticos. Considerando a ausência de outros fatores limitantes, a produção vegetal e animal dependem diretamente da disponibilidade de energia solar. Ela é utilizada para estimativa da evapotranspiração, assim como, para avaliar o crescimento e o rendimento das culturas, bem como para um bom manejo da irrigação.

No Brasil, existem poucas estações de medida de radiação solar incidente. Em algumas, os dados são pouco consistentes, em outras a existência de um só equipamento tem levado a ocorrência de períodos com falhas.

No contexto mundial conta-se com poucas medidas de radiação solar, sendo ainda mais acentuado o problema nos países em desenvolvimento. Isso ocorre devido ao elevado custo para a aquisição dos equipamentos de medida, que em geral são importados, bem como para a manutenção e exigência de manejo dos instrumentos, os quais requerem contínuas calibrações para obtenção de informações confiáveis.

Em países como China, Argentina, Brasil, Índia, México, Uruguai, Paraguai e outros, a disponibilidade de registros de radiação diária é menor que os de insolação e que por sua vez é muito menor com respeito a medidas de temperatura do ar e precipitação pluviométrica. A demanda de dados de radiação solar nas últimas décadas tem tido um aumento com a intenção de melhorar a precisão em diversos cálculos de caráter climático, agrícola e hidrológico. Isso explica o aumento de métodos e equações para a sua estimativa que dependem de variáveis primárias disponíveis.

Em uma região com medidas de brilho de sol, precipitação pluviométrica, umidade relativa e temperatura do ar de várias décadas podem-se fazer uso de equações para reconstruir largas séries de irradiação solar global, que por alguma falha nos equipamentos ou por qualquer outro motivo tenha deixado de ser efetuado suas medidas, fazendo assim a reconstrução histórica das séries climatológicas. Existem vários métodos de estimativa da irradiação solar global, entre eles pode-se citar o modelo de Angstrom (1924) modificado por Prescott (1940), que utiliza medidas de insolação; o de Glover e McCulloch (1958), que incluíram o efeito da latitude. Porém, temperaturas do ar máxima e mínima devido sua maior disponibilidade de medidas, vem sendo utilizada em vários modelos entre eles o de Bristow e Campbell (1984) e o de Campbell e Donatelli (1998).

Com a estimativa da irradiação solar global por meio de modelos, utilizando-se dados de temperatura do ar, pode-se fazer a estimativa da evapotranspiração potencial e conseqüentemente da evapotranspiração da cultura, as quais são utilizadas para a realização do balanço hídrico, possibilitando um bom manejo de irrigação. Esses métodos de estimativas da evapotranspiração são essenciais, considerando-se as dificuldades de instalação e operação dos lisímetros pelos agricultores. Dessa forma, pode-se realizar um manejo adequado da cultura implantada, diminuindo custos e aumentando os lucros.

Sendo assim, é de suma importância a estimativa da irradiação solar global por meio da utilização de elementos meteorológicos alternativos, como por exemplo, a temperatura do ar devido a sua maior disponibilidade de medida. Por esse motivo, o presente trabalho teve como objetivo a calibração e estimativa da irradiação solar global diária em Botucatu, SP, utilizando medidas de temperaturas do ar máxima e mínima por meio do programa RadEst3.0. Esse faz a utilização de quatro modelos para tal

estimativa que são: Bristow-Campbell (1984), Campbell-Donatelli (1998), Donatelli-Belochi (2002) e Modular DCBB (Donatelli-Belochi, 2002).

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Irradiação solar global**

Fatores como turbidez atmosférica, cobertura de nuvens, topografia, tipo de cobertura de superfície, entre outros, interferem na intensidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre. Essa ao atravessar a atmosfera tem parte absorvida pelo vapor de água, dióxido de carbono e ozônio, parte refletida pelas nuvens e parte espalhadas pelas moléculas e partículas do ar. A porção absorvida aumenta a temperatura do ar e, por conseguinte, a emissão de radiação com comprimento de onda acima de  $4\mu\text{m}$  para a superfície da terra e espaço (ESCOBEDO, 1997). Na superfície da terra, o fluxo solar total que incide é chamada de radiação solar global, situa-se no espectro eletromagnético entre  $0,35\mu\text{m}$  à  $4,0\mu\text{m}$ , representando a soma dos fluxos da radiação solar direta e radiação solar difusa, que atinge a superfície terrestre. À parte da radiação solar global que atinge a superfície terrestre sem interagir com a atmosfera é denominada de radiação solar direta, e a radiação solar difusa é a parte da radiação solar global que, difundida ou não seletivamente, atinge a superfície terrestre (IGBAL, 1983). O conhecimento desse fluxo é importantíssimo para o cálculo da evapotranspiração, realização de zoneamento agroclimáticos e estabelecimento/utilização de modelos de crescimento e produção de cultura (FONTANA e OLIVEIRA, 1996).

A radiação solar apresenta importância vital às plantas, sendo

utilizada em inúmeros processos fisiológicos, como no caso da fotossíntese. Através da fotossíntese, as plantas convertem a energia eletromagnética da radiação solar em energia química, ou seja, energia disponível ao seu crescimento. Além disso, a radiação solar é utilizada pelas plantas em inúmeros outros processos vitais relacionados à sua manutenção e desenvolvimento como a evapotranspiração, o fototropismo, o fotoperiodismo, a morfogenia, a formação de pigmentos, etc (ESCOBEDO, 1997).

O número de dados medidos diariamente em estações meteorológicas é pequeno se comparando com o número de dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica. Essa pode ser uma severa limitação para a sua aplicação em modelos agrícolas. A necessidade de se conhecer a radiação solar em local onde não existe medidas cresceu nos últimos anos, expandindo-se de local para regional, continental e global. O cálculo da radiação solar a partir de imagens de satélites nem sempre encontra recursos disponíveis, sendo de utilidade limitada na construção de bancos de dados históricos.

Do ponto de vista agropecuário, a existência e padronização de bases de dados de radiação solar são fundamentais ao planejamento e implementação de atividades das mais diversas, indo, desde a escolha da cultura, planejamento de instalações, implantação e manejo adequado da irrigação até a previsão de colheitas. Nesse caso, a instrumentação se refere não somente à pesquisa laboratorial e de campo, mas também ao próprio desenvolvimento de projetos e sistemas de produção agropecuária, além de controle e aquisição de dados. Sendo, dessa forma, de suma importância à existência de uma série confiável de dados medidos, pois a partir de análises estatísticas desses dados é possível extrapolar e fazer projeções futuras (HERRERO, 1993).

Ainda com a disponibilidade e finalidade de equipamentos, a acessibilidade dos resultados é condicionada pela ferramenta empregada para o manejo dos dados. A facilidade de uso, própria de informação digital, pode ser fortemente comprometida pela falta de planejamento adequado da aquisição dos dados ou pela ausência de ferramenta completa para processamento dos mesmos. (ARIZA et al., 1993)

## 4.2 Estimativa da irradiação solar global

A irradiação solar global é um elemento meteorológico importante para o cálculo da evapotranspiração, realização de zoneamentos agroclimáticos e estabelecimento/utilização de modelos de crescimento, produção de culturas e para um manejo adequado de irrigação. Devido a essas múltiplas aplicações, é altamente desejável medir a irradiação solar global por meio de aparelhos confiáveis e para maior número possível de localidades. Infelizmente, porém, devido ao alto custo dos equipamentos necessários, essas medidas não estão disponíveis em grande número no Brasil. Apenas parte das Estações Climatológicas Principais possuem aparelhos que registram a irradiância solar, e, mesmo assim, deixam a desejar no que se refere à manutenção e à calibração periódica (VIANELLO e ALVES, 2000)

Para um manejo racional de irrigação, torna-se necessário o estudo do comportamento dos elementos meteorológicos, particularmente aqueles que direta ou indiretamente afetam o suprimento de água pelas culturas, como por exemplo, da radiação solar. Considerando as dificuldades de instalação e operacionalização de lisímetros por parte dos agricultores, têm-se recorrido a métodos estimativos para quantificar as necessidades hídricas das culturas. Dentre esses métodos, destaca-se o do balanço de energia, obtido em função dos componentes do balanço de radiação e de gradientes verticais da temperatura do ar e da tensão de vapor de água.

Silva et al., (2003) em estudo realizado na cidade de Santa Maria, RS, utilizaram a irradiação solar global estimada para a utilização de painéis fotovoltaicos no acionamento de um conjunto motobomba para acionar um sistema de irrigação por gotejamento. A determinação dessa variável solar se faz necessária para verificar qual a potência solar fornecida ao arranjo fotovoltaico para o acionamento do conjunto motobomba. Esses autores concluíram que a irradiação solar global estimada para o mês de janeiro foi de  $178 \text{ W m}^{-2}$ , podendo suprir uma bomba de 0,5CV a 5CV fornecendo vazões de  $74 \text{ m}^3$  a  $745 \text{ m}^3$ , respectivamente. Verificaram uma vazão diária de  $5 \text{ m}^3$  a  $15 \text{ m}^3$  em relação a irradiação solar global incidente no painel solar para o dia 1/1/2000 com 12,5 horas de insolação.

Segundo Ayoade (1986), apesar dos recentes avanços tecnológicos e científicos, o clima é ainda a variável mais importante na produção agrícola. O fator

climático afeta a agricultura e determina a adequação dos suprimentos alimentícios de dois modos principais. Um é por meio dos imprevistos climáticos para as lavouras e outro é pelo controle exercido pelo clima sobre o tipo de agricultura praticável ou viável numa determinada região. Os elementos climáticos, como por exemplo, temperatura e umidade do ar e radiação solar, exercem influência sobre todos os estágios da cadeia de produção agrícola, incluindo a preparação da terra, a semeadura, o crescimento das culturas, a colheita, o armazenamento, o transporte e a comercialização.

Apesar de sua importância, mundialmente conta-se com poucas medidas de radiação solar, ficando pior o problema dos países em desenvolvimento, devido ao alto custo e exigência de manejo dos instrumentos, os quais requerem contínuas calibrações para obtenção de informações confiáveis. No Brasil, existem poucas estações de medida de radiação solar incidente, em algumas os dados são pouco consistentes; em outras a existência de um só equipamento tem levado à ocorrência de período com falhas.

Segundo a recomendação da OMM (Organização Meteorológica Mundial) o ideal seria um espaçamento mínimo de 150Km entre as estações aerológica. No Brasil, além de estarmos longe de atender a tal recomendação, estações meteorológicas de várias instituições ou departamentos (como as do INMET- Instituto Nacional de Meteorologia e DAEE- Departamento de Água e Energia Elétrica), com rica série temporal vem sendo desativadas devido a falta de recursos financeiros para a manutenção dos equipamentos e de técnicos nas mesmas (GALINA e VERONA, 2004). Segundo o programa de Vigilância Meteorológica Mundial (VMM) existem operando cerca de 20 estações de radiossondagem e cerca de 180 estações de superfície, número insuficiente em vista da extensão territorial do país (SENTELHAS et al., 2000).

Para realizar um correto aproveitamento da energia solar, é necessário dispor de uma base de dados local de radiação, sendo a modelagem uma componente importante a ser validada a partir dessa base de dados (VAZQUEZ, 1993). Um determinado tipo de dado é requerido para cada aplicação, quando não se conhece algum desses, é necessário recorrer a valores estimados por modelos (CAÑADA et al., 1994).

O aumento e refinamento dos sistemas de modelagem implicam numa crescente demanda por precisão de dados (JAIN et al., 1988). Referindo-se a países do primeiro mundo, GIACOMELLI (1996) afirma que a agricultura automatizada, em

menos de uma década, terá acesso a bases de dados extensas. Dessa forma, aumentando a habilidade para avaliar e responder as informações de ordem técnica e empresarial, o que irá certamente incrementar as possibilidades de obtenção de produtos agrícolas de melhor qualidade.

Para Malheiros et al., (1993), as dificuldades em infra-estrutura de levantamento de dados e o caráter fundamental das informações sobre a irradiação solar diária justificam o estabelecimento de metodologias que permitam estimá-la de forma mais simples e a custos razoáveis.

Nos Estados Unidos da América, o Departamento de Energia estabeleceu um padrão interno para coleta e ajuste de dados de radiação solar. No Brasil, o estabelecimento de bases de dados de radiação solar, em forma digital, é ainda incipiente, estando limitado pela dificuldade de aquisição do instrumental apropriado e pela ausência de ferramentas que facilitem o processamento das informações. Até nos centros mais desenvolvidos, a armazenagem sistemática desses dados, diretamente na forma digital, é relativamente recente.

Quanto a parte instrumental, a equipe do Laboratório de Radiometria da UNESP de Botucatu tem desenvolvido vários protótipos de equipamentos de medidas de radiação solar visando a independência em relação aos aparelhos importados, que são de alto custo, obtendo-se resultados satisfatórios. ESCOBEDO (1997) desenvolveu nesse laboratório a construção, a calibração e a aplicação agrária de radiômetros solares, bem como realizou a análise de custos em relação aos radiômetros importados (EPPLEY e REBS) chegando, entre outras, as seguintes conclusões: a) os radiômetros solares: piranômetro – detector de radiação global; pireliômetro – detector de radiação direta na incidência normal; saldo radiômetro – detector do balanço de radiação; albedômetro – detector de radiação global e fração da radiação global refletida simultaneamente e piranômetro com anel de sombreamento – detector da radiação difusa, foram projetados e construídos usando termopilhas de filmes com sucesso; b) os fatores de calibração na caracterização dos protótipos apresentaram valores entre  $9,55\mu\text{Vm}^2 \text{W}^{-1}$  à  $40,5\mu\text{Vm}^2 \text{W}^{-1}$ , similares ou com maior sensibilidade que radiômetros produzidos comercialmente; c) quanto a aplicação agrária, os piranômetros com termopilhas de filmes fino, durante 45 dias, mediram com sucesso as irradiâncias solar global, difusa e fração da

global refletida na cultura de alface dentro do ambiente protegido sob condições adversas ambientais de temperatura e umidade relativa do ar; e d) protótipos otimizados apresentam um custo de fabricação médio na faixa de 20% dos importados

Mesmo com a disponibilidade e finalidade de equipamentos, a acessibilidade dos resultados é condicionada pela ferramenta empregada para o manejo dos dados. A facilidade de uso, própria da informação digital, pode ser fortemente comprometida pela falta de planejamento adequado da aquisição dos dados ou pela ausência de ferramenta para processamento dos mesmos.

A realização de software para estações meteorológicas deve cumprir os objetivos de independência do hardware de aquisição, ou seja, flexibilidade de operações sobre os dados, capacidade de configurações da medida e possibilidade de atender as diferentes necessidades utilizando os mesmos sensores. Esses mesmos objetivos podem ser explicitados para o caso de uma estação de radiometria solar. Devendo essa ainda cumprir as exigências de confiabilidade, possibilidade de diversos cálculos e capacidade de fazer frente aos interesses dos diversos tipos de usuários (CAMACHO MARTINEZ e ARANDA LÓPEZ, 1994).

Uma maneira de ampliar as possibilidades de uso e de disponibilizá-las de modo rápido é a forma de redes, a partir de bases de dados locais. A infra-estrutura para constituição de uma rede de dados de radiação solar envolve desde a calibração e manutenção de aparelhos até a coleta e processamento dos dados. Nessa etapa, torna-se fundamental a padronização da base de dados e a capacidade de processamento rápido da informação. É imprescindível a constituição de uma rede de dados para a realização de análises de mesoescala, confecção de mapas de radiação, estudos sinóticos, etc. Outra função importante de tais redes é servir de referência para calibração de sensores de satélites (DURISCH et al., 1995; FREIRE, 1984; TOVAR et al., 1998).

Apesar da diversidade de locais estudados e das técnicas utilizadas nesses trabalhos existem ainda regiões de grande importância agrícola e econômica que carecem de informações de irradiação solar, as quais poderiam ser geradas a partir de equações de estimativas.

Diversos pesquisadores, como por exemplo: MARTINES-LOSANO et al., (1984) que cobrem praticamente todo o Território Nacional; LOPES et al.,

(1971) para o Rio Grande do Sul; OMETTO (1968) para Piracicaba; RICIEIRI et al., (1996) para Botucatu; VALIATI (2001) para Cascavel; TEIXEIRA (1999) para Petrolina; CRIVELLI (1973) para Argentina; GOMEZ et al., (1995) para a Colômbia, utilizaram a metodologia clássica de ANGSTROM (1924) para caracterizar o regime de distribuição de energia solar em suas regiões em estudo, sendo esta equação apresentada a seguir:

$$R_G/R_C = \alpha + (1 - \alpha)r \quad \text{eq 01}$$

sendo:

$R_G$  = irradiação global ( $\text{MJ m}^{-2}$ );

$R_C$  = irradiação total sob atmosfera real em dia completamente limpo ( $\text{MJ m}^{-2}$ );

$r$  = Razão de insolação ( $n/N$ );

$\alpha$  = fração da radiação recebida em um dia completamente nublado pela medição em dia completamente limpo.

Devido a dificuldade na medição de  $R_C$ , a qual deve ser medida em dias de céu limpo, o que não ocorre com frequência em muitas regiões, PRESCOTT (1940) correlacionou a irradiação solar encontrada na superfície da Terra com a encontrada no topo da atmosfera ( $R_o$ ), obtida por meio da seguinte equação:

$$\frac{R_G}{R_o} = a + br \quad \text{eq. 02}$$

em que: “a” e “b” são coeficientes da equação de ANGSTROM (1924).

Pereira et al. (2002) compararam valores estimados de energia solar obtidos em função de apenas uma medida realizada na passagem meridiana do sol e confrontaram estes valores com os medidos por um actinógrafo para a cidade de Ponta Grossa, Paraná, concluindo que esta metodologia proposta mostrou-se eficiente para avaliar os parâmetros empíricos da regressão da equação de ANGSTROM (1924), permitindo a determinação da densidade de fluxo de radiação solar global diária no local em estudo.

Alguns autores tentaram correlacionar a irradiação solar global com fatores geográficos como a latitude e a altitude. GLOVER e MCCULLOCH (1958)

incluíram o efeito da latitude ( $\phi$ ) e apresentaram a seguinte relação, para ( $\phi$ )<60°:

$$\frac{H}{H_o} = 0,29 \cos \Phi + 0,52 \frac{n}{N} \quad \text{eq. 03}$$

onde:

H = irradiação solar global (MJ m<sup>-2</sup>);

H<sub>o</sub>= Radiação solar no topo da atmosfera (MJ m<sup>-2</sup>);

$\phi$  = latitude, em graus;

n= número de horas de brilho solar;

N= número máximo de horas de brilho solar.

O efeito da altitude foi incluído por BENNETT (1965), no seguinte modelo:

$$\frac{H}{H_o} = a_1 + b_1 \frac{n}{N} + c_1 h \quad \text{eq. 04}$$

onde:

h= altitude do local; e;

a, b e c coeficientes determinados a partir dos dados observados.

Os resultados obtidos por meio dessa equação, quando comparados com outros obtidos de equações locais, apresentaram boa concordância, pois o erro relativo anual médio foi inferior a 3,3%.

Considerando-se a existência de dependência linear entre os fatores, LAPERUTA FILHO (1996) utilizou o seguinte modelo:

$$R = a + br + e \quad \text{eq. 05}$$

onde:

a= coeficiente linear;

b= coeficiente angular; e

e= contribuição do acaso.

Das 400 estações climatológicas que fornecem dados ao banco de dados de Postdam-Institut ou Pesquisa de Impacto de Clima, na Alemanha, somente 42 possuem medidas de radiação solar global. Dessas somente 11 têm 30 anos de registros de radiação solar global, mas há alguns dados perdidos devido ao fracasso de equipamentos e outros problemas (OESTERLE, 2001). Esse mesmo autor propôs várias equações e métodos para o cálculo da irradiação solar global, sendo que algumas das aproximações fazem uso de dados meteorológicos básicos (como temperatura do ar e umidade relativa) e radiação no topo da atmosfera. Os melhores métodos mostraram um erro padrão anual médio (RMSE) de aproximadamente  $4\text{MJ m}^{-2}$ .

Segundo Ododo et al., (1995) a maioria das análises de correlação entre a radiação solar na Nigéria e elementos climatológicos envolvem o uso da duração de raio de sol e umidade relativa, como por exemplo, a equação de ANGSTROM (1924) e PRESCOTT (1940). Porém, temperatura do ar também deveria ser considerada como uma importante variável climatológica para a estimativa da irradiação solar global, pois é uma reflexão da duração e intensidade da irradiação solar incidente em uma determinada região. Esses mesmos autores em estudo realizado na Nigéria demonstraram que a temperatura do ar máxima é um elemento climatológico importante para a estimativa da radiação solar global. MAVROMATIS e JAGTAP (2003) realizaram a estimativa da irradiação solar global a partir da temperatura máxima e mínima em diferentes estações meteorológicas, na Flórida, encontraram valores de MBE e RMSE variando de 9,93% a 56,32% e 18,69% a 28,92%, respectivamente.

Segundo Thornton et al., (2000) em estudos realizados nos EUA observaram que a relação entre as estações que medem radiação solar global e as que medem temperatura é de 1:200, e globalmente a relação é de 1:500.

Bristow e Campbell (1984) demonstraram que existe uma relação direta entre a transmissividade e a radiação solar diária, elas variam com a temperatura do ar próximo a superfície. Esse modelo foi usado em numerosos estudos, e foram desenvolvidas melhorias durante os últimos anos. Após esse modelo surgiram os modelos de Campbell e Donatelli (CD), Donatelli e Belocchi (DB) e Modular DCBB (DCBB). Nos modelos de DB e DCBB foi introduzido fator de correção que responde por efeitos de

sazonalidade. Ainda, no modelo de DCBB inclui as características dos três modelos anteriores.

Ferronato et al. (2003) avaliaram os modelos de BRISTOW e CAMPBELL (1984), CAMPBELL e DONATELLI (1998), DONATELLI e BELOCHI (2002) e Modular DCBB (DONATELLI e BELOCHI, 2002) para a estimativa da irradiação solar global, na Paraíba, a partir de dados de temperatura máxima e mínima. Esses autores, concluíram que os modelos avaliados apresentam desempenho satisfatório para a estimativa da irradiação solar global diária. Os modelos que apresentaram maior exatidão e precisão foram os de Donatelli e Bellochi e o Modular DCBB.

Supit et al., (1998) comparando dois métodos de estimativa da radiação solar global, concluíram que o método que utiliza a temperatura do ar máxima pode ser utilizado com boa precisão para a estimativa da irradiação solar global em relação ao uso do método de Angstrom.

Segundo Meza e Varas (2000) os modelos propostos por ALLEN et al., (1998) e BRISTOW e CAMPBELL (1984), os quais utilizam a temperatura do ar máxima e mínima para a estimativa da irradiação solar global possuem boa precisão de estimativa, e podem ser utilizados para complementação de dados na série climatológica no Chile.

### **4.3 Índice de claridade ( $K_t$ )**

As condições do céu (nublado, parcialmente nublado e limpo) são determinadas por meio do índice de claridade ( $K_t$ ) com base nas observações radiométricas. Na condição de céu limpo, as amplitudes da irradiância solar sobre a superfície são atribuídas à concentração de agentes atenuantes na atmosfera com ozônio, vapor de água e aerossóis. Na condição de céu nublado, os fatores atenuantes principais são as nuvens, que combinadas, em tipo, número de camadas e espessura, formam as mais complexas estruturas redutoras da radiação solar (IQBAL, 1983).

Ricieri (1998) determinou uma metodologia para obtenção do tipo de cobertura do céu em função do índice de claridade ( $K_t$ ), para a cidade de Botucatu. Para tanto, usou de comparação gráfica das irradiações global, direta e difusa na incidência

horizontal. Observou que, no intervalo de  $0 < K_t < 0,3$ , as irradiações global e difusa são praticamente iguais e a irradiação direta está próxima de zero, classificando o céu nessas condições como nublado. Para  $0,3 \leq K_t \leq 0,65$ , as irradiações difusa e direta mantêm-se próximas, denominando-se céu parcialmente nublado. Para  $K_t > 0,65$ , a irradiação direta se aproxima da global, enquanto a difusa tende ao mínimo, nessas condições, denomina-se céu limpo. Neste estudo, o autor encontrou o intervalo de  $0 \leq K_t \leq 0,80$ , mostrando que a irradiação solar global incidente na superfície terrestre local é inferior a 80% da irradiação incidente no topo da atmosfera.

Realizando um estudo para a região de Cascavel/PR, com partição anual, VALIATI et al. (1999) concluíram que o índice de claridade mínimo é 0,16 e o máximo é 0,56. DANTAS et al. (1999) estudaram este mesmo fenômeno para duas cidades da Paraíba, verificando para a cidade de Cabaceiras, que o mínimo e o máximo do índice de claridade ocorreram no mês de novembro, estando compreendido entre 0,13 a 0,73; e para a cidade de Belém do Brejo do Cruz, o mínimo ocorreu no mês de setembro (0,11) e o máximo no mês de julho (0,76).

Santos et al. (1983) encontraram para a cidade de Jaboticabal uma transmissividade máxima de 0,75 para a partição anual, já LAPERUTA FILHO (1996) para a cidade de Botucatu, SP, obteve 0,70 para a primavera, 0,72 para o inverno, 0,66 para o outono e 0,65 para o verão.

Assunção e Escobedo (2003) propuseram um algoritmo com o objetivo de identificar a condição instantânea do céu, com 95% de probabilidade, em função do índice de claridade e da massa ótica para a cidade de Botucatu, SP, concluíram que o sol obscurecido é mais evidente no verão (61%) e menos frequente no inverno (33%). O Sol permanece exposto em média durante o verão 38% do tempo, enquanto no inverno pode chegar a 66%. O sol envolto por nuvens aparece com uma frequência em média, inferior a 2%.

#### 4.4 Precipitação pluviométrica e temperatura do ar

Como a precipitação pluviométrica e a temperatura do ar são dados de entrada no software RadEst.3.0, achou-se de grande importância fazer uma breve revisão sobre esses elementos meteorológicos.

O conhecimento da temperatura e da umidade do ar no dossel vegetativo em estudos climatológicos das culturas que se desenvolvem num determinado ambiente é de fundamental importância. A variação desses elementos meteorológicos condiciona, não somente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, mas também a ocorrência de pragas e doenças (HELDWEIN e KRYSCH, 1999).

Segundo Pereira et al., (1997), o ar apresenta maior capacidade de retenção de vapor d'água com o aumento da temperatura, este funciona então, como um reservatório que se expande/contrai com o aumento/decréscimo da temperatura.

A temperatura do ar tem efeitos diretos no crescimento e desenvolvimento dos vegetais, pois esses dependem de faixas adequadas de temperatura para um máximo desenvolvimento (BERNINGER, 1994).

A produção agrícola fica comprometida em algumas épocas do ano devido às temperaturas extremas. Em regiões localizadas em médias e altas latitudes, as baixas temperaturas durante o inverno podem provocar a ocorrência de geadas. Normalmente ocorre a formação de geadas quando a temperatura do solo atinge valores abaixo de 0°C. Em tais oportunidades a camada de ar, especialmente a certa altura do solo, pode acusar temperaturas mais elevadas. Isso porque na superfície do solo a temperatura pode ser até 5°C inferior a temperatura do ar em abrigo meteorológico, dependendo da perda de radiação de onda longa da superfície.

A temperatura do ar tem grande influência na produção final das culturas, pois afeta as fases e os processos fisiológicos como germinação, crescimento, floração, frutificação, e os processos de fotossíntese, respiração, transpiração, atividades enzimáticas, permeabilidade das membranas celulares, absorção de água e de nutrientes e a própria velocidade das reações químicas podendo induzir precocidade ou retardar a produção final (LUCCHESI, 1987).

Os processos biofísicos e bioquímicos que condicionam o metabolismo do seres vivos e, portanto, seus desenvolvimentos, são altamente afetados

pelas condições energéticas do ambiente, mais especificamente do solo e da atmosfera. Pode-se dizer que todos os processos que condicionam o desenvolvimento e crescimento das plantas e animais tem a temperatura como um dos fatores fundamentais. Cada espécie vegetal possui limites ótimos de temperatura para que seu potencial produtivo seja expresso. Abaixo ou acima desse limite, mesmo que haja suprimento adequado de água e nutriente, a produtividade será comprometida. Portanto, o conhecimento da temperatura de uma região é fundamental para o planejamento agrícola (SILVA et al., 2003).

Dentre todos os elementos climáticos a precipitação é um dos que mais influencia a produção agrícola, devido a sua grande variabilidade, tanto em quantidade quanto em duração e tempo de ocorrência. Dela dependem vários ramos da atividade humana, entre eles, o gerenciamento de recursos hídricos para a produção de energia elétrica e para o abastecimento de água. O seu monitoramento na agricultura é um dos principais elementos determinantes do sucesso ou do fracasso de atividades, como o preparo do solo, plantio de culturas, irrigação, colheita e armazenamento.

## **5 Material e Métodos**

### **5.1 Localização da área experimental**

Para a realização deste estudo foi utilizado uma base de dados de 10 anos obtidos junto ao Departamento de Engenharia Rural – Setor de Irrigação e Drenagem da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista, Campus de Botucatu-SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude de 22°51'S; longitude de 48°26'W e altitude 786m na cidade de Botucatu, Estado de São Paulo. O clima para o município de Botucatu, segundo critérios adotados por Köeppen, é do tipo Cwa, caracterizado como clima temperado quente com chuvas no verão e seca no inverno, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C, apresentando temperatura do mês mais quente de 23,9°C e do mês mais frio de 16,5°C, e temperatura média anual de 20,5°C. A precipitação pluviométrica máxima de verão é de 309,6mm e a máxima de inverno de 108,6mm, com média anual de 1533,2mm; sendo esses valores encontrados para o período de 1971 a 1998 (CUNHA et al., 1999).

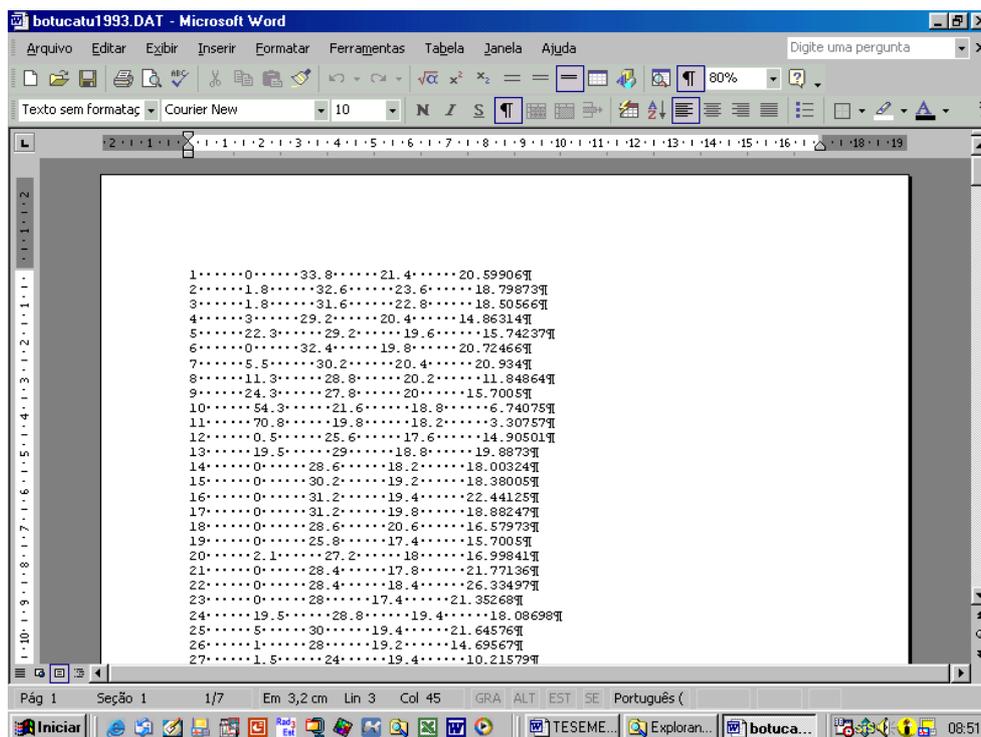
## 5.2 Instrumentos e métodos de medidas

A estação meteorológica está localizada em terreno plano, com boa visão do horizonte. Os dados de irradiância solar global, utilizados nesta pesquisa foram obtidos diariamente durante os dez anos (1993 a 2002). As medidas da irradiância solar global foram obtidas por um actinógrafo (OTA KEIKI SESAKUSHO, JAPÃO). A temperatura do ar foi medida por meio de um termógrafo (Filotecnia Milano, ITÁLIA) e com auxílio de termômetro de máxima e mínima (THERMO SCHNEIDER, ALEMANHA) instalados no abrigo meteorológico. A precipitação foi medida por um pluviômetro (IH). Desses dez anos de dados, sete anos foram utilizados para cálculo dos parâmetros de cada modelo e três anos para a validação dos modelos.

## 5.3 Apresentação descritiva da ferramenta computacional RadEst3.0

Na Figura 01 é apresentado o ambiente principal da ferramenta computacional RadEst3.0. – Global Solar Radiation Estimate. No menu principal são disponibilizadas as opções que se referem à apresentação dos quatro modelos do programa que foram utilizados para a estimativa da irradiação solar global.

O arquivo para ser utilizado pelo programa deve ser do tipo \*.dat, ou seja, dados que não são separados por vírgula e sim por espaço. As variáveis de entrada no software devem estar na seguinte seqüência: dia juliano; precipitação pluviométrica (mm); temperaturas do ar máxima e mínima (°C) e irradiação solar global ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) se disponível, como apresentado na Figura 01.



**Figura 01** Formato de entrada dos dados.

A tela inicial do software é utilizada para a escolha de um dos quatro modelos apresentados, bem como para a entrada de dados. Nela é definida a localização em que foi realizada a estimativa.

Os parâmetros para cada um dos modelos, e os parâmetros de local, podem ser salvos para cada localização selecionando-se o artigo de Parameters/Models no menu principal (Figura 02). Os parâmetros de localização são essencialmente dois: latitude em °C e a transmissividade para dias de céu limpo. A transmissividade de céu limpo é conhecida não ser constante durante o ano em algumas localizações. Neste caso pode ser aproximado o efeito de tal variação usando os modelos de Donatelli-Bellocchi e DCBB pelos parâmetros c1 e c2.

Dois parâmetros adicionais, longitude (°) e a altitude (m), podem ser acrescentados, mas não são usados por qualquer um dos modelos na versão atual de RadEst3. Eles são somente indicativos de localização da região em estudo.

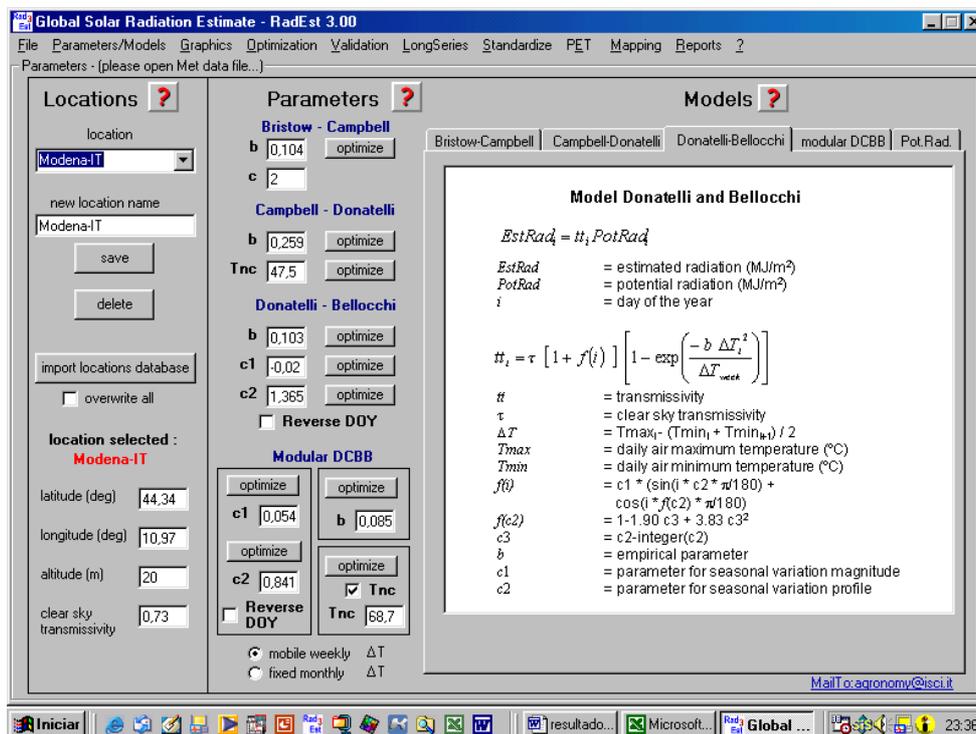


Figura 02 Tela inicial do programa.

Cada parâmetro de localização pode ser editado e salvo, sendo esses, específicos para cada localização. Sempre que a localização é mudada uma advertência alerta sobre a possível inconsistência da localização selecionada atualmente com os dados meteorológicos lidos. Os parâmetros b, c1, c2 e Tnc podem ser repetidamente aperfeiçoados. Todos os parâmetros, como também dados de localização são salvos no banco de dados de localização.

O arquivo de localização pode ser atualizado importando registros de um banco de dados externo que deve ter o mesmo formato. Antes do registro de banco de dados novo, uma cópia do banco de dados atual é feita (RE\_locations.bak). Quando importados registros, se a localização a ser importada existe no banco de dados atual, uma advertência exige confirmação para continuar a atualização. Uma caixa de mensagem resume o número de registros. O mesmo procedimento pode ser usado para ré-importar o arquivo de \*.bak., neste caso, o banco de dados atual de localização se torna o novo arquivo de \*.bak. Quando parâmetros novos estão disponíveis, um arquivo para atualizar o banco de

dados de localizações seguindo o procedimento de importação descrito acima será feito disponível na Internet no RadEst3.0, na página: <http://www.isci.it/tools> (Figura 06).

#### 5.4 Modelos utilizados para a estimativa da irradiação solar global

O programa RadEst3.0 permite estimar a irradiação solar global diária para uma determinada latitude (região). Quatro modelos estão disponíveis para estimar a irradiação solar diária a partir de dados de temperatura do ar, eles incluem e são derivados do modelo proposto por BRISTOW e CAMPBELL (1984). Todos os modelos calculam a transmissividade atmosférica da irradiação solar global baseada na diferença entre as temperaturas do ar máxima e mínima.

O valor da irradiação solar global é estimado como o produto entre a transmissividade e o valor da irradiação solar no topo da atmosfera. Cálculos permitem uma avaliação gráfica das estimativas e computam índices estatísticos para a comparação de modelos/localização. A equação utilizada para a estimativa da irradiação solar global pelos quatro modelos é apresentada abaixo:

$$Rad = t_i PotRad \quad \text{eq. 06}$$

Onde:

Rad= Irradiação solar global estimada ( $\text{MJ m}^{-2}$ );

$t_i$ = Transmitância diária da atmosfera;

PotRad= Irradiação solar no topo da atmosfera ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), calculada usando-se uma rotina geral descrita por Bristow e Campbell (1984), ou seja:

$$PotRad(doy) = 117.5dd2(hs \sin(lat) \sin(dec) + \cos(lat) \cos(dec) \sin(hs)) / \pi \quad \text{eq. 07}$$

onde:

doy= Dia Juliano;

lat= Latitude em radianos;

hs= Ângulo horário em radianos;

dd2 = Fator que responde pela distância do sol;

dec= declinação solar em radianos.

Fator que responde pela distância do sol:

$$dd2 = 1 + 0.0334 \cos(0.01721doy - 0.0552) \quad \text{eq. 08}$$

Declinação solar:

$$dec = \arcsin(0.39785 \sin(4.869 + 0.0172doy + 0.03345(6.224 + 0.0172doy))) \quad \text{eq. 09}$$

Ângulo horário:

$$hs = \arccos(-\tan(dec) \tan(lat)) \quad \text{eq. 10}$$

#### 5.4.1 Modelo de Bristow e Campbell (BC)

Esse foi o primeiro modelo proposto e a partir dele derivaram-se os demais modelos. Ele demonstra que existe uma relação direta entre a temperatura do ar e a transmissividade, sendo, portanto possível à estimativa da irradiação solar global em função da temperatura do ar.

$$tti = \tau \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b\Delta T_i^c}{m\theta h\Delta Tm}\right) \right] \quad \text{eq. 11}$$

onde:

$\tau$ = coeficiente de transmitância em dia de céu claro;

b e c são parâmetros empíricos calculados pelo software.

$$\Delta T_i = T \max_i - \left( \frac{T \min_i + T \min_{i+1}}{2} \right) \quad \text{eq. 12}$$

onde:

Tmax= temperatura máxima diária (°C);

$T_{min}$  = Temperatura mínima diária (°C);

$\Delta T_m$  =  $\Delta T$  média mensal.

#### 5.4.2 Modelo de Campbell e Donatelli (CD)

Este modelo é usado para situações nas quais a temperatura do ar noturna é menor em condição de céu limpo.

$$tti = \tau \left[ 1 - \exp(-bf(T_{avg})\Delta Ti^{2*} f1(T_{min})) \right] \quad \text{eq. 13}$$

onde:

$$f1(T_{min}) = \exp\left(\frac{T_{min}}{T_{nc}}\right) \quad \text{eq. 14}$$

$$f1(T_{avg}) = 0.017 \exp(\exp(-0.053T_{avg})) \quad \text{eq. 15}$$

$$T_{avg} = \frac{T_{max_i} + T_{min_i}}{2} \quad \text{eq. 16}$$

onde:  $T_{nc}$  é parâmetro empírico calculado pelo software.

#### 5.4.3 Modelo de Donatelli e Belocchi (DB)

Esse modelo responde pelo efeito da variação sazonal da transmissividade do céu limpo.

$$tti = \tau \left[ 1 + f(doy) \right] \left[ 1 - \exp\left(\frac{-b\Delta Ti^2}{\Delta T_w}\right) \right] \quad \text{eq. 17}$$

onde:

$$f(doy) = c1 \left[ \text{sen} \left( \frac{ir\pi}{180c2} \right) + \cos \left( \frac{ir\pi}{180f(c2)} \right) \right] \quad \text{eq. 18}$$

$\Delta T_w = \Delta T$  média semanal;

$ir=i$  ou  $ir=(361-i)$ ;

$i$  é o índice diário que corresponde ao dia em questão.

$$c3 = c2 - \text{int eger}(c2) \quad \text{eq. 19}$$

$c1$  e  $c2$  são parâmetros empíricos calculados pelo software.

$$f(c2) = 1 - 1,90c3 + 3,83c3^2 \quad \text{eq. 20}$$

#### 5.4.4 Modelo Modular DCBB (DCBB)

Finalmente, este modelo inclui características dos três modelos anteriores.

$$tti = -\tau \left[ 1 + f(doy) \right] \left[ 1 - \exp \left( \frac{-b\Delta T_i^2 f_2(T \text{ min})}{\Delta T_{avg}} \right) \right] \quad \text{eq. 21}$$

onde:

$$f_2(T \text{ min}) = 1 \quad \text{ou} \quad f_2 = \exp \left( \frac{T \text{ min}}{T_{nc}} \right) \quad \text{eq. 22}$$

$\Delta T_{avg} = \Delta T$  móvel semanal ou  $\Delta T$  fixo mensal.

Os valores dos índices dos modelos devem obedecer aos seguintes limites, para todos os modelos:

$$b > 0,05$$

$$10 < T_{nc} < 110.$$

$$-0,2 < c1 < 0,2$$

$$0 < c2 < 0,5 \quad \text{ou} \quad 1 < c2 < 1,5$$

Deve-se sempre procurar respeitar estes valores, quando isto não é possível o primeiro valor de cada parâmetro é admitido.

## 5.5 Calibração dos modelos

A realização da calibração dos modelos foi feita comparando-se valores medidos e estimados pelo modelo RadEst3.0, para os sete anos em que foram utilizados para o cálculo dos parâmetros empíricos dos modelos.

Esse aferimento foi realizado plotando-se no eixo x os valores estimados e no eixo y os valores medidos para obtenção do coeficiente linear e angular de cada modelo. Após, esses coeficientes foram utilizados para realizar a calibração dos dados estimados pelos modelos para os anos da validação dos modelos.

## 5.6 Validação dos modelos e análise estatística

Dos dez anos de medidas três anos foram utilizados para realizar a validação das equações encontradas. Em seguida foi realizada uma comparação entre os valores estimados e medidos com base nos seguintes índices estatísticos:

### 5.6.1 Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) mede a proporção da variabilidade total da variável dependente que é explicada pelo modelo adotado. Esse coeficiente, porém, tem algumas limitações, sendo que uma delas é de possuir grande influência devido ao tamanho da amostra, no sentido de que o modelo ajustado com amostras pequenas tende a apresentar alto  $R^2$ , para que o resultado seja significativo.

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^N P_i O_i \right)}{\sum_{i=1}^N P_i^2 \sum_{i=1}^N O_i} \quad \text{eq. 23}$$

onde:

$O_i$  = valores medidos em MJ m<sup>-2</sup>;

$P_i$  = valores estimados em MJ m<sup>-2</sup>.

### 5.6.2 Coeficiente de variação (CV)

O coeficiente de variação (CV) é adimensional, sendo zero quando não houver variabilidade entre os dados, ou seja, quando desvio padrão igual a zero, o que ocorre quando todos os valores da amostra são iguais. Quanto menor for o CV, mais homogêneo é o conjunto de dados. Geralmente, um valor  $CV = 0,25$  indicará que o conjunto é razoavelmente homogêneo. Foi usado a classificação de PIMENTEL GOMES (1987), para fazer o estudo desse coeficiente, sendo:

$CV < 10$  -----> baixo

$10 \leq CV < 20$ -----> médio

$20 \leq CV < 30$  ----->alto

$30 \geq CV$ -----> muito alto

$$CV = \frac{RMSE}{\bar{X}} 100 \quad \text{eq. 24}$$

onde:

$\bar{X}$  = média dos valores medidos;

RMSE= Raiz quadrada do erro médio.

### 5.6.3 Raiz quadrada do erro médio (RMSE)

A raiz quadrada do erro médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo a curto prazo. Quanto menor seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. A desvantagem é que bastam

alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude (STONE, 1993).

$$RMSE = 100 \frac{\left( \sum_i^N (P_i - O_i)^2 / N \right)^{1/2}}{\bar{O}} \quad \text{eq. 25}$$

onde:

$O_i$ = valores medidos em MJ m<sup>-2</sup>;

$P_i$ = valores estimados em MJ m<sup>-2</sup>;

$N$ = número de observações em hora;

$\bar{O}$  = valor médio medido em MJ m<sup>-2</sup>.

#### 5.6.4 Desvio das médias (MBE)

O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um indicativo que provê informação no desempenho de um modelo a longo prazo. Um valor positivo indica uma superestimação, enquanto que um valor negativo indica subestimação. Uma desvantagem apresentada é no cancelamento de um valor positivo por um negativo (STONE, 1993)

$$MBE = 100 \frac{\left( \sum_i^N (P_i - O_i) / N \right)}{\bar{O}} \quad \text{eq. 26}$$

onde :

$O_i$ = valores medidos em MJ m<sup>-2</sup>;

$P_i$ = valores estimados em MJ m<sup>-2</sup>;

$N$ = número de observações em hora;

$\bar{O}$  = valor médio medido em MJ m<sup>-2</sup>.

### 5.6.5 Índice de concordância de Willmott (d)

Segundo o autor (Willmott, 1981) o coeficiente “d” foi elaborado a partir do RMSE (a raiz do erro ao quadrado médio) e do MSE (erro quadrado médio), apresentando vantagens como, a não necessidade de testes de significância e algoritmo computacional.

Outra vantagem é que o coeficiente “d” é mais severo que  $R^2$ , com relação a valores extremos, medindo com mais eficiência se os valores estão próximos da reta 1:1 em um gráfico de dispersão entre dados estimados e observados.

Ainda, segundo esse autor, o coeficiente “d” é capaz de discriminar melhor a relação entre duas variáveis quando estas possuem diferenças sistemáticas (proporcionais), como diferenças aditivas constante, o que não acontece com o coeficiente de determinação  $R^2$ , que apenas descreve qual a proporção da variância total dos dados observados, que é explicada pelos dados simulados.

O coeficiente de WILLMOTT (1981) é calculado pela seguinte equação:

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum (O_i - \bar{P}_i)^2}{\sum (|O_i - \bar{P}| + |\bar{P}_i - \bar{P}|)^2} \right] \quad \text{eq. 27}$$

Onde:

$\bar{P}$  = Média dos valores estimados em MJ m<sup>-2</sup>.

$O_i$  = valores medidos em MJ m<sup>-2</sup>;

$P_i$  = valores estimados em MJ m<sup>-2</sup>.

### 5.6.6 Índice de confiança ou desempenho (c)

O índice de confiança ou desempenho indica o desempenho dos métodos, reunindo os índices de precisão (R) e de exatidão (d), sendo expresso pela seguinte equação:

$$c = rd \quad \text{eq. 28}$$

onde:

$r$  = coeficiente de correlação;

$d$  = coeficiente de Willmott.

O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice “ $c$ ”, segundo CAMARGO e SENTELHAS (1997), está apresentado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Critérios de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da irradiação solar global.

Valores de “ $c$ ”	Desempenhos
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

## 6 Resultados e Discussão

### 6.1 Cálculo dos parâmetros dos modelos

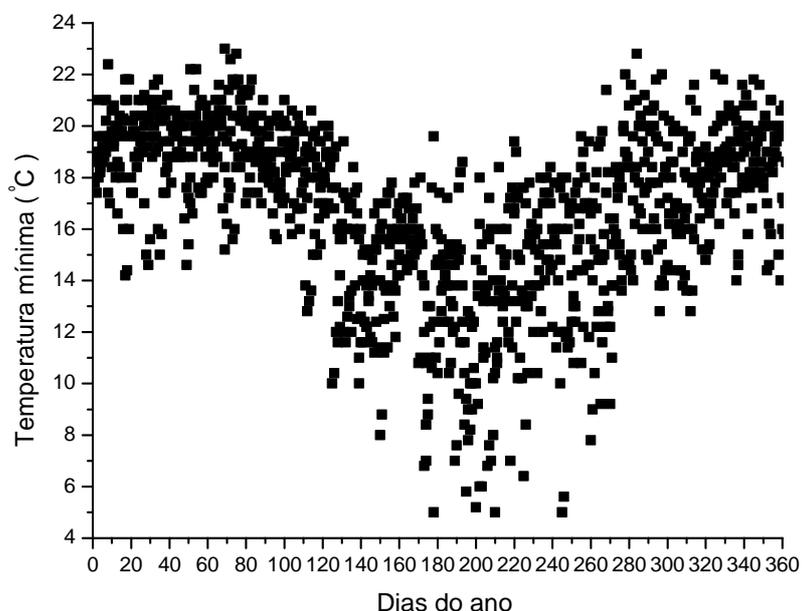
Os resultados obtidos para os coeficientes empíricos dos modelos Bristow e Campbell (BC), Campbell e Donatelli (CD), Donatelli e Bellocchi (DB) e Modular DCBB (DCBB) avaliados, para dados diários, estão expressos na Tabela 02, estando dentro dos limites estabelecidos por esses pesquisadores.

**TABELA 02.** Valores dos coeficientes empíricos dos modelos de estimativa da transmitância atmosférica diária para Botucatu, SP.

Coeficientes	Limites dos coeficientes	BC	CD	DB	DCBB
b	$b > 0,05$	0,136	0,477	0,144	0,112
c	-	2	-	-	-
Tnc	$10 < Tnc < 110$	-	69,1	-	62,6
c1	$-0,2 < c1 < 0,2$	-	-	-0,067	-0,061
c2	$0 < c2 < 0,5$ ou $1 < c2 < 1,5$	-	-	1,125	1,410

Pelos valores de Tnc apresentados nos modelos CD e DCBB, pode-se dizer que existe uma variação acentuada de temperatura do ar. Segundo Bristow-Campbell (1984), Campbell-Donatelli (1998), Donatelli-Belochi (2002), quanto maior Tnc maior a variação da temperatura do ar mínima para a região em estudo (Figura 3). Por essa Figura observar-se que houve uma variação média da temperatura do ar de 4,8°C a 23,6°C.

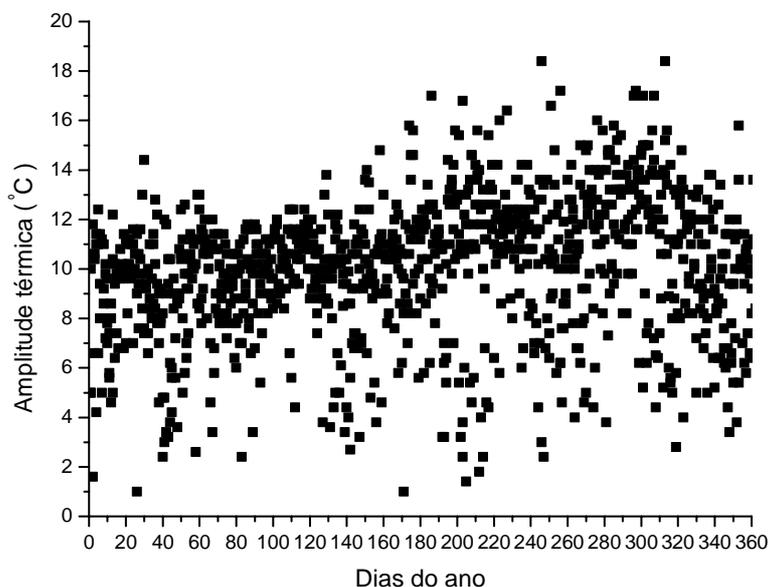
A menor temperatura do ar mínima foi observada para o dia 09/07/1994 (0,2 °C) e maior para o dia 19/08/2001 (23,6°C).



**Figura 3.** Variação média diária dos dez anos de estudo da temperatura do ar mínima (°C)

Quando os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  são diferentes de zero existe uma variação sazonal em relação à temperatura do ar na região. Quando o coeficiente  $c_2$  está próximo do seu valor máximo verifica-se uma grande variação da amplitude térmica. Quanto mais próximos os valores de  $c_1$  e  $c_2$  menor a diferença entre a temperatura do ar máxima e mínima (Bristow-Campbell, 1984; Campbell-Donatelli, 1998; Donatelli-Belochi, 2002),

Como os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  foram diferentes de zero conclui-se que há uma variação sazonal do clima na região em relação à temperatura do ar. Pelo coeficiente  $c_2$  pode-se afirmar que essa variação sazonal faz com que exista uma diferença significativa entre a temperatura do ar máxima e mínima, ou seja, há uma grande variação da amplitude térmica (Figura 4). Quanto mais próximos  $c_1$  e  $c_2$  menor a diferença entre essas duas temperaturas, como a diferença entre os valores desses dois coeficientes é grande portanto, pode-se afirmar que há uma grande variação da amplitude térmica, ficando entre 0,98 à 18,4 °C, como pode ser observado na Figura 4.



**Figura 4.** Variação da amplitude térmica (°C) diária.

O maior coeficiente  $b$  foi observado para o modelo CD e o menor para o modelo DCBB (Tabela 2). Segundo Bristow-Campbell (1984); Campbell-Donatelli (1998) e Donatelli-Belochi (2002), quanto maior o coeficiente  $b$  maior o RMSE e vice versa, o que pode ser comprovado na comparação da Tabela 2 com a Tabela 5. Portanto, como esse coeficiente é um multiplicador da diferença de temperatura ( $\Delta T$ ), quanto maior  $b$  maior a estimativa da irradiação solar global, portanto é maior a diferença entre os valores estimados e medidos (Tabela 4).

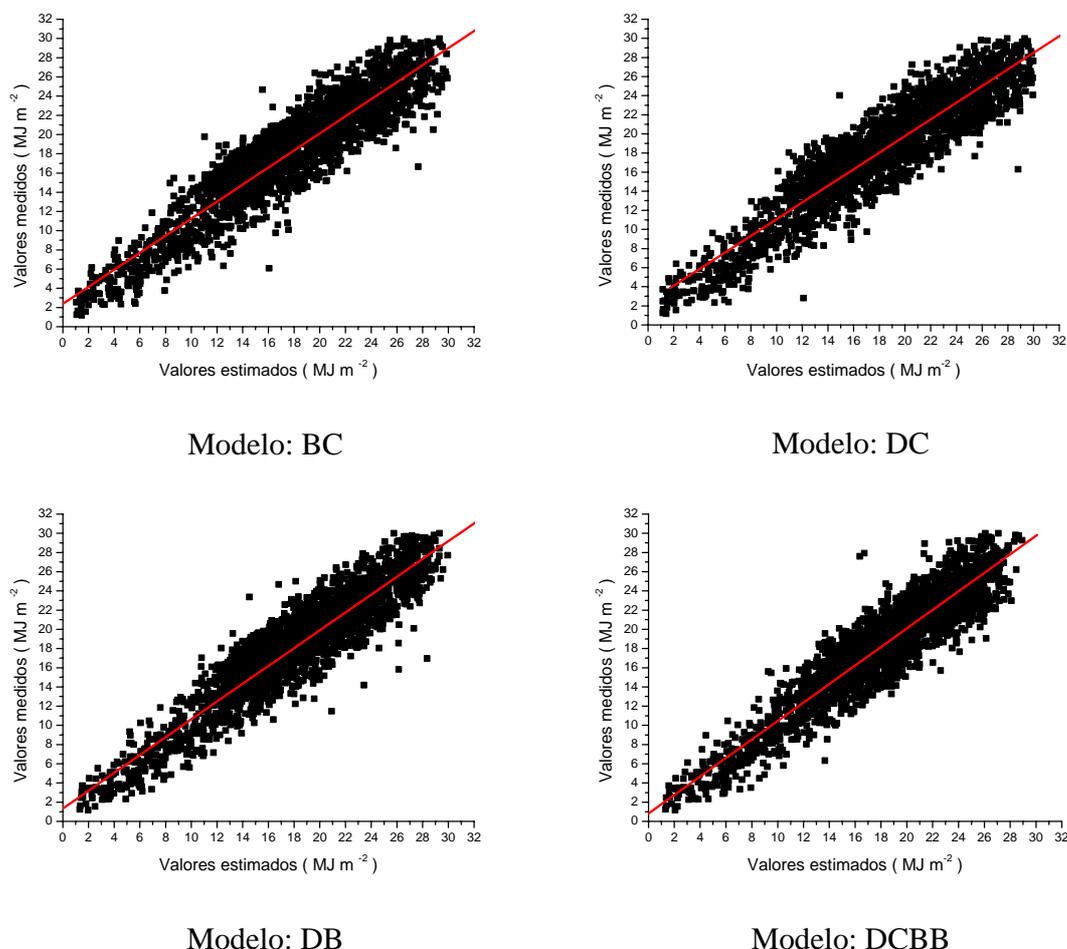
## 6.2 Calibração dos modelos

A Figura 5 mostra as curvas de regressão linear com os valores das densidades de fluxo global estimados no eixo das ordenadas e os valores da irradiação solar global medida no eixo das abscissas, diariamente entre às 6 e 18 horas durante os sete anos utilizados para a realização da calibração dos modelos. Os valores dos coeficientes lineares e angulares, bem como os coeficientes de determinação obtidos da regressão linear, estão

apresentados na Tabela 3. Observa-se pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que todos os modelos tiveram desempenho semelhante, sendo que o maior  $R^2$  foi observado para o modelo DCBB (0,88) e o menor para o modelo CD (0,83). Por meio desse coeficiente pode-se dizer de uma maneira geral que aproximadamente 0,80 da variabilidade dos valores estimados é explicada pelo modelo de ajuste e 0,20 por fatores que não foram considerados.

**Tabela 3.** Valores dos coeficientes lineares (a) e angulares (b) para a calibração dos modelos, BC, CD, DB e DCBB.

Modelos	a	b	$R^2$
BC	2,37	0,89	0,85
CD	2,36	0,87	0,83
DB	1,35	0,93	0,86
DCBB	0,81	0,96	0,88



**Figura 5.** Curvas de regressão linear entre dados medidos e estimados pelos quatro modelos, de irradiação solar global, para cálculo dos coeficientes lineares e angulares para calibração dos modelos, considerando uma série de dados de 1993 a 1999.

### 6.3 Validação dos modelos

Para a realização da validação dos modelos utilizou-se dados de 2000 a 2003, ou seja, dados que não foram utilizados para a estimativa dos coeficientes empíricos, lineares e angulares.

A Tabela 4 apresenta as médias dos valores medidos e estimados pelos quatro modelos para dados totais e para cada ano separadamente. Observa-se que a menor estimativa da irradiação solar global, foi apresentada pelo modelo DCBB e maior pelo modelo CD, tanto para os valores totais como para valores para cada ano. Pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade observa-se que não houve diferença significativa entre as médias dos valores estimados e medidos, para dados totais e para cada ano separadamente.

A menor diferença entre os valores medidos e estimados foi observada para o ano de 2000 e a maior para o ano de 2002. A menor diferença entre os valores medidos e estimados pode estar relacionada ao fato que no ano de 2000 foi observado as menores médias das temperaturas do ar mínima e máxima e também menor precipitação, já no ano de 2002, onde houve maior diferença, observou-se as maiores médias das temperaturas do ar mínima e máxima e maior precipitação.

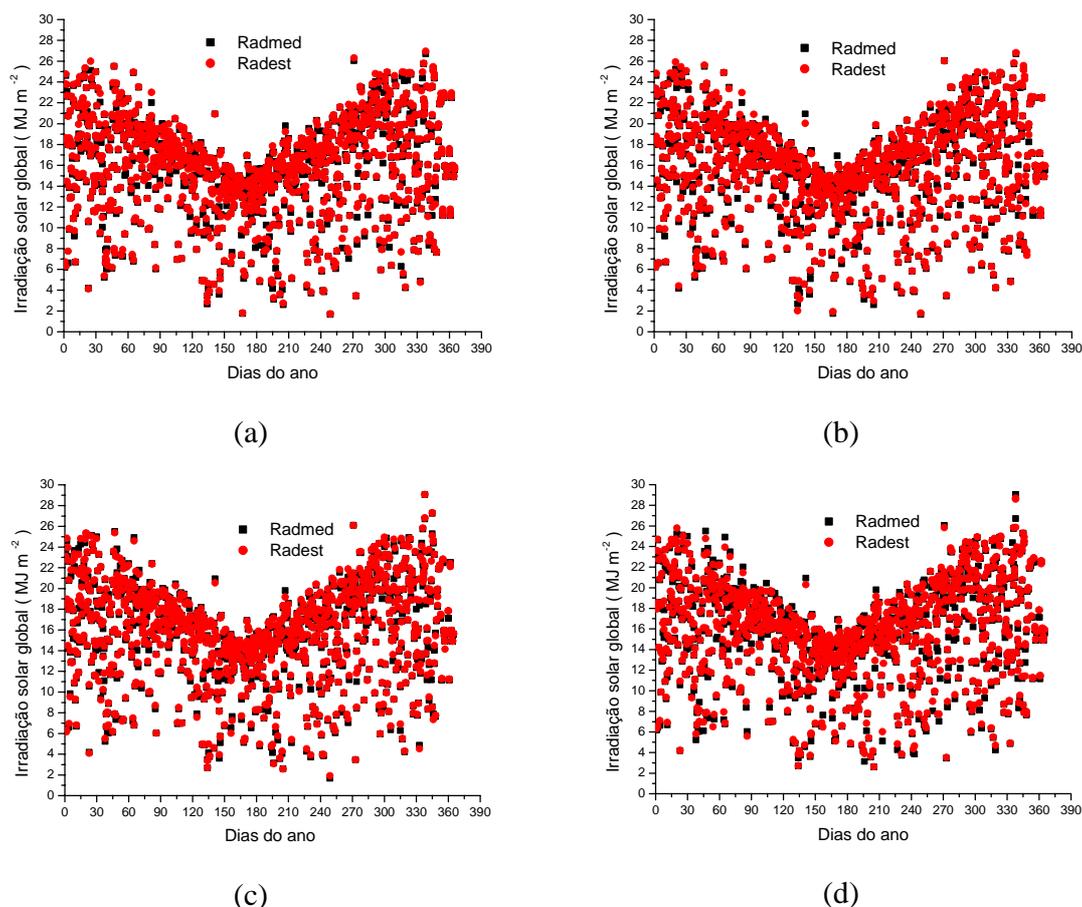
**Tabela 4.** Valores médios da irradiação solar global (Rad) medida e estimada pelos modelos de Bristow e Campbell (BC), Campbell e Donatelli (CD), Donatelli e Bellocchi (DB) e Modular DCBB (DCBB)

Anos	Medidos	BC	CD	DB	DCBB
Total	15,80a	15,93a	15,95a	15,92a	15,91a
2000	16,30a	16,38	16,40a	16,37a	16,35a
2001	15,60a	15,70a	15,76a	15,69a	15,67a
2002	15,50a	15,65a	15,68a	15,60a	15,58a

Letras iguais na linha indicam que não houve diferença significativa a nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, entre os valores medidos e estimados pelos modelos.

Na Figura 6 observam-se os valores totais utilizados para a validação dos modelos (2000 a 2002) medidos e estimados pelos quatro modelos. De uma maneira geral pode-se observar que os dados medidos e estimados seguem uma mesma tendência para todos os modelos. A menor incidência da irradiação solar foi observada no período de inverno, onde também foi observado menor temperatura do ar e precipitação.

Essa menor incidência de irradiação solar global durante o solstício de inverno está relacionada com a declinação solar, pois nesse período o sol situa-se no Hemisfério Norte. Assim, há uma menor incidência da radiação solar, ocorrendo um aumento no equinócio de primavera acentuando-se no solstício de verão, quando o sol encontra-se localizado no Hemisfério Sul, ou seja, no Hemisfério da região em estudo.



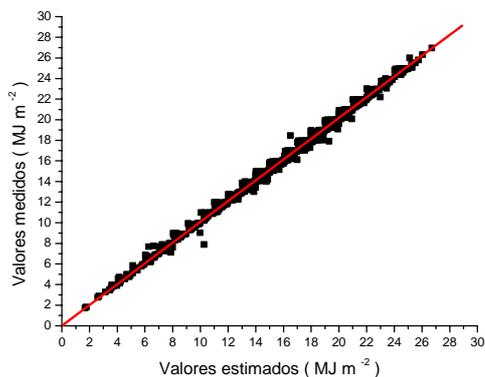
**Figura 6.** Valores médios anuais dos valores medidos e estimados pelos modelos de BC (a), CD (b), DB (c) e Modular DCBB (d).

Pelo coeficiente de determinação observa-se pela Tabela 5 e Figura 7, que os modelos apresentaram um coeficiente de determinação em torno de 0,80. Nesse caso, pode-se dizer de uma maneira geral que aproximadamente 0,80 da variabilidade dos valores estimados é explicada pelo modelo de ajuste e 0,20 por fatores que não foram considerados. Deve-se lembrar que o coeficiente de determinação apenas traz informações

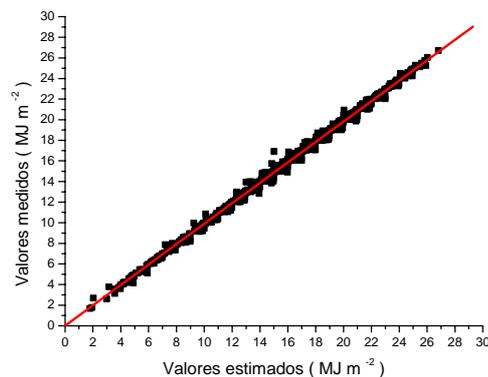
sobre a precisão do modelo matemático obtido, porém nada revela sobre a sua exatidão. Para WILLMOTT (1982) os modelos de irradiância solar que ilustram somente os valores do coeficiente de determinação são insuficientes para fazer distinção significativas entre os modelos. Assim, por meio da determinação do índice de concordância proposto por WILLMOTT et al. (1985), observou-se uma alta exatidão para os modelos de estimativa da irradiação solar global por meio do uso da temperatura do ar máxima e mínima. A maior exatidão foi encontrada para os modelos DB e DCBB (0,99) e a menor para o modelo CD (0,96). Observando-se todos os coeficientes de determinação na Tabela 5 e Figura 7 conclui-se que os modelos BC e CD tiveram o pior desempenho e os modelos DB e DCBB o melhor, podendo esta melhora estar relacionada a inclusão do efeito da sazonalidade em relação a temperatura do ar nesses modelos. FERRONATO (2003), trabalhando com este mesmo programa para a cidade de Santo Antônio do Leverger no MT, encontrou um índice de concordância variando de bom a ótimo.

**Tabela 05.** Índices estatísticos referentes aos resultados de estimativa diária da irradiação solar global para Botucatu, SP.

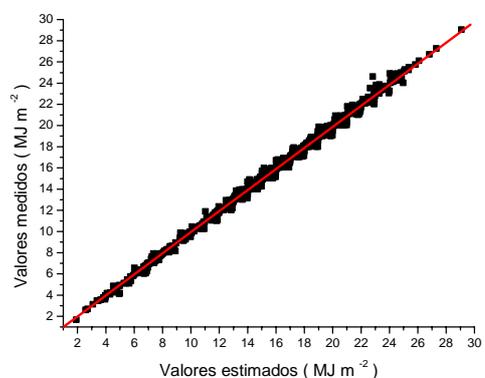
C	BC	CD	DB	DCBB
RMSE (%)	2,14	2,96	1,94	1,64
CV (%)	13,54	18,73	12,28	10,38
R <sup>2</sup>	0,85	0,83	0,86	0,88
MBE	0,92	0,97	0,71	0,79
d	0,97	0,96	0,99	0,99
c	0,89	0,87	0,92	0,93



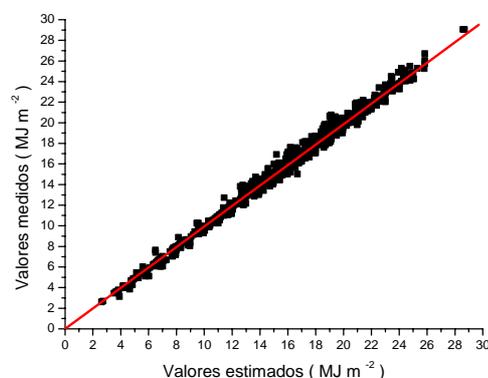
Modelo - BC



Modelo - CD



Modelo - DB



Modelo - DBCC

**Figura 6.** Análise de regressão entre dados medidos e estimados pelos quatro modelos, de irradiação solar global, considerando uma série independente de dados, para Botucatu, SP.

O índice de desempenho  $c$ , dado pelo produto entre  $r$  (coeficiente de correlação, que é a raiz quadrada do coeficiente de determinação) e  $d$  foi maior para o modelo DCBB (0,93) e menor para o modelo CD (0,87). Considerando-se o critério de interpolação da performance de modelos propostos por CAMARGO e SENTELHAS (1997), pode-se classificar o índice de desempenho como sendo ótimo para todos os modelos. Esse mesmo autor trabalhando com avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de SP, Brasil, encontrou para os diferentes modelos estudados um desempenho que variou de muito bom, bom, mediano, sofrível, mau e péssimo. FERRONATO (2003) observou um índice de confiança ou desempenho variando de sofrível a muito bom, para todos os modelos, sendo que os modelos BD e DCBB sobressaíram em relação aos demais.

O CV teve uma menor variação para o modelo CDBB (10,38%) e maior para o modelo BC (18,73%), sendo que todos os modelos foram classificados, segundo PIMENTEL GOMES (1987), como tendo uma variação média. Desta forma pode-se dizer que os dados dos modelos DB e CDBB são mais homogêneos que os dos modelos BC e CD, sendo assim, esses apresentam dados mais dispersos. Esse coeficiente dá uma idéia da precisão dos modelos, ou seja, quanto menor o coeficiente de variação maior será a sua precisão, assim o modelo DCBB é o mais preciso. FERRONATO et al. (2002) trabalhando com este mesmo programa (RadEst3.0), para a cidade de Santo Antônio do Leverger, MT, encontrou um menor coeficiente de variação para o modelo DB (20,90%) e maior para o modelo CD (28,08%).

Foi observado um melhor desempenho para o modelo DCBB (MBE = 0,79% e RMSE = 1,64%) e pior para o modelo CD (MBE = 0,97% e RMSE = 2,96%). Quanto aos valores desses índices estatísticos deve-se lembrar que bastam alguns poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo em sua magnitude (WILLMOTT, 1982).

Os modelos DB e DCBB apresentam desempenho muito parecido frente aos indicativos estatísticos de RMSE, d e c. O modelo CD apresenta maior valor de RMSE e apresenta menor valor dos índices de concordância e desempenho em relação aos demais modelos. Já o modelo BC apresenta valores de RMSE, d e c intermediários. Pelo índice estatístico MBE pode-se dizer que todos os modelos superestimam os valores de irradiação solar global.

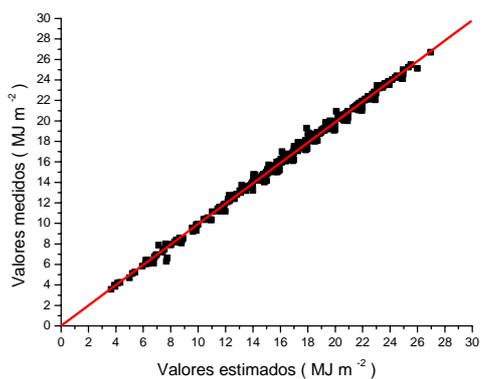
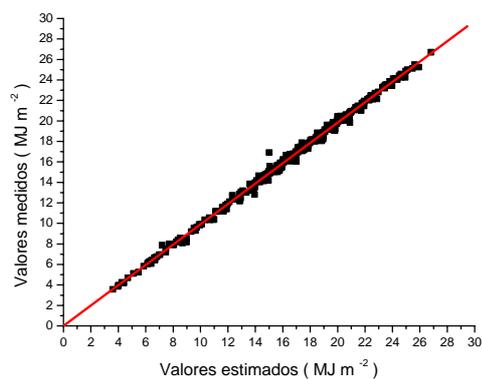
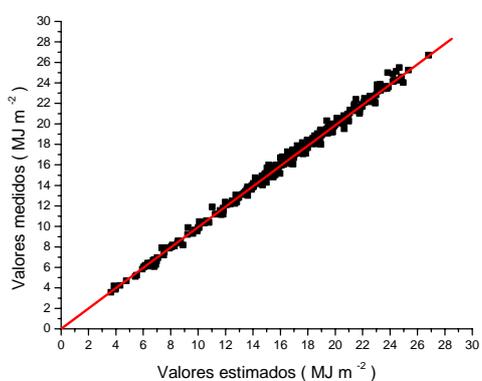
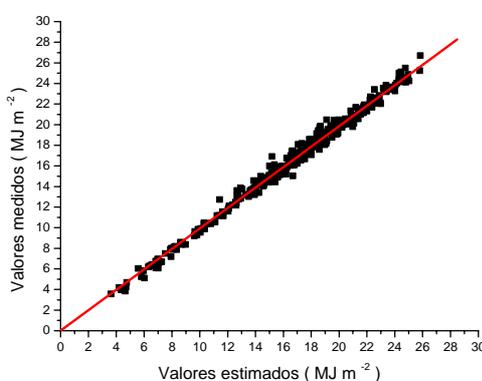
Mavromatis e Jagtap (2003), trabalhando com este mesmo programa para o estado da Flórida, para a estimativa da irradiação solar global, encontrou uma variação para MBE de 9,93% a 56,32% e para RMSE de 18,63% a 28,92%. HALOUANI et al. para o Canadá, calculando a média mensal da irradiação solar global utilizando o modelo de Angstrom (1924) observou uma variação MBE e RMSE de 0,3% a 28,4% e 3,5% a 34,8%, respectivamente, sendo este resultado o inverso do encontrado por FERRONATO (2003), o qual observou que os modelos subestimam a irradiação solar global.

Desse modo, as modificações aplicadas aos modelos de DB e DCBB, contabilizando o efeito sazonal da variação de temperatura, e utilizando uma função

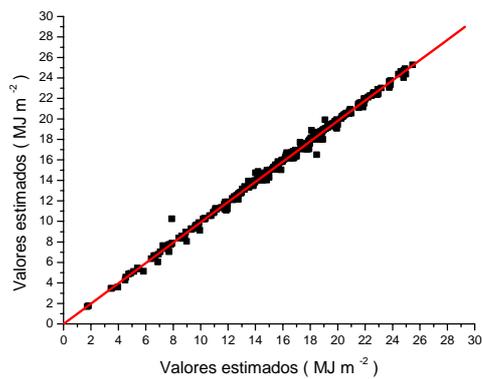
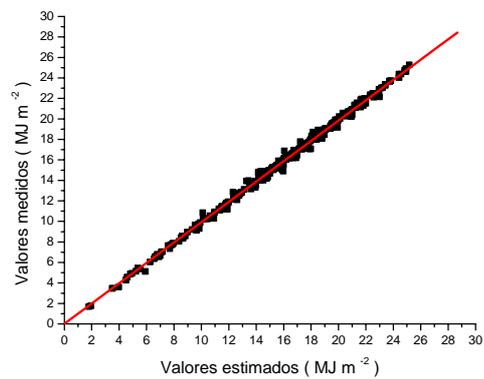
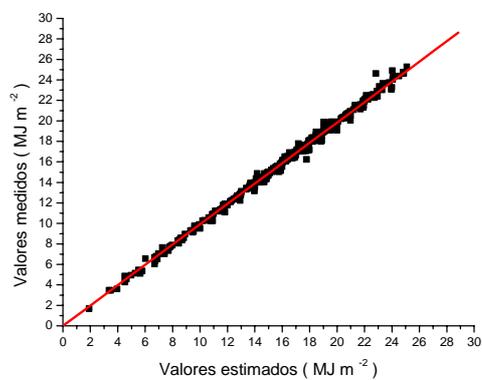
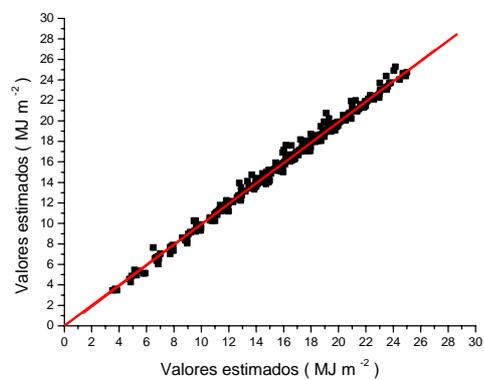
trigonométrica específica para regiões tropicais, contribuíram para o alcance dos melhores resultados. Deve-se, no entanto salientar que todos os modelos propostos são adequados para a estimativa da irradiação solar global, e seu uso depende do grau de precisão que se deseja atingir, e da disponibilidade de medidas das temperaturas do ar máxima e mínima.

#### **6.4 Correlação entre valores medidos e estimados para os anos de validação dos modelos**

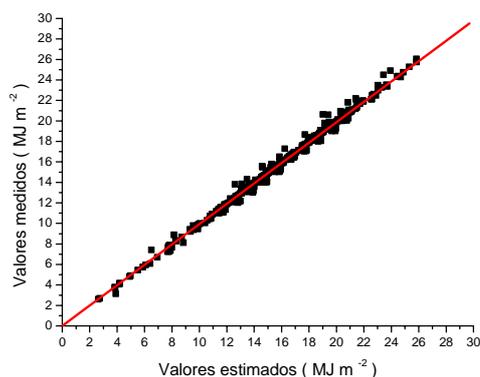
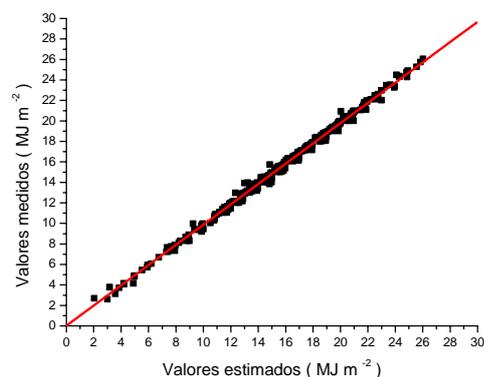
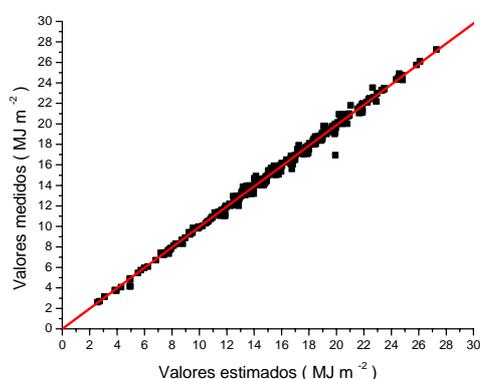
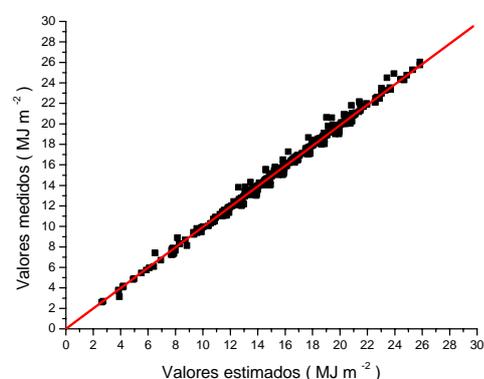
As Figuras 7, 8 e 9 mostram a correlação entre os valores medidos e estimados pelos quatro modelos para os anos de 2000, 2001 e 2002. Pode-se observar, por meio dessas Figuras e pela Tabela 6, que o coeficiente de determinação variou em torno de 0,90 para todos os anos e modelos. Por meio desse coeficiente pode-se dizer que 0,90 da variabilidade dos valores estimados é explicada pelo modelo de ajuste e 0,10 por fatores que não foram considerados.

(a) 2000 – BC -  $R^2 = 0,96$ (b) 2000 – CD -  $R^2 = 0,96$ (c) 2000 – DB -  $R^2 = 0,98$ (d) 2000 – DCBB -  $R^2 = 0,98$ 

**Figura 7.** Análise de regressão entre valores medidos e estimados pelos quatro modelos, de irradiação solar global, para o ano de 2000, para Botucatu, SP.

(e) 2001 – BC -  $R^2 = 0,94$ (f) 2001 – CD-  $R^2 = 0,94$ (l) 2002 – DB -  $R^2 = 0,98$ (m) 2002 – DCBB -  $R^2 = 0,98$ 

**Figura 8.** Análise de regressão entre valores medidos e estimados pelos quatro modelos, de irradiação solar global, para o ano de 2001, para Botucatu, SP.

(g) 2001 – BC-  $R^2=0,94$ (h) 2001 – CD-  $R^2=0,94$ (i) 2002 – DB  $R^2=0,98$ (j) 2002 – DCBB -  $R^2=0,98$ 

**Figura 9.** Análise de regressão entre valores medidos e estimados pelos quatro modelos, de irradiação solar global, para o ano de 2002, para Botucatu, SP.

A Tabela 6 apresenta os índices estatísticos referentes aos resultados de estimativa diária da irradiação solar global para Botucatu, SP, para os anos de 2000, 2001 e 2002. Pelo MBE observa-se que os modelos para todos os anos superestimam a irradiação solar global. Foi observado um melhor desempenho para o modelo DCBB (RMSE = 1,55% e MBE= 0,54%) para o ano de 2000 e pior para o ano de 2002 para o modelo CD (RMSE = 2,95% e MBE= 1,20%).

Pelo CV de variação observa-se uma menor dispersão dos dados para o ano de 2000, sendo, portanto mais homogêneos, e uma maior variação para o ano de 2002. Esse coeficiente, segundo Pimentel Gomes (1987) pode ser classificado como médio para todos os anos.

O índice de desempenho (c) e de correlação (d) foram maiores para

o ano de 2000 e menores para o ano de 2001, ou seja, para o ano de 2000 os modelos apresentaram melhor desempenho e correlação do que para o ano de 2001. O índice c segundo Camargo & Sentelhas (1997) pode ser classificado como ótimo para todos os anos e modelos.

**Tabela 6.** Índices estatísticos referentes aos resultados de estimativa diária da irradiação solar global para Botucatu, SP, para os anos de validação dos modelos.

Ano		2000			
Ind. Estatístico	BC	CD	DB	DCBB	
RMSE (%)	2,08	2,85	2,03	1,55	
CV (%)	12,76	17,48	12,45	9,51	
R <sup>2</sup>	0,97	0,96	0,98	0,98	
MBE	0,82	0,86	0,60	0,54	
d	0,95	0,96	0,99	0,99	
c	0,93	0,94	0,98	0,98	
Ano		2001			
Ind. Estatístico	BC	CD	DB	DCBB	
RMSE (%)	2,20	2,86	2,09	1,60	
CV (%)	14,10	18,33	13,40	10,25	
R <sup>2</sup>	0,95	0,96	0,97	0,98	
MBE	0,99	0,88	0,89	0,77	
d	0,94	0,96	0,98	0,98	
c	0,92	0,94	0,96	0,97	
Ano		2002			
Ind. Estatístico	BC	CD	DB	DCBB	
RMSE (%)	2,16	2,95	2,05	1,90	
CV (%)	13,94	19,03	13,22	12,25	
R <sup>2</sup>	0,96	0,97	0,98	0,98	
MBE	1,17	1,15	0,82	0,75	
d	0,95	0,94	0,98	0,98	
c	0,93	0,95	0,97	0,97	

Fazendo-se uma comparação entre os quatro modelos para os três anos de correlação, pode-se observar que o modelo DCBB teve o melhor desempenho, os modelos CD e BC pior para os anos de 2001, 2002 e 2000, respectivamente. Os modelos DCBB e BD apresentam desempenho muito parecido, assim como os modelos BC e CD, levando-se em conta os indicativos estatísticos RMSE, d e c.

É importante salientar que para o ano de 2000 em que os modelos apresentaram melhor desempenho houve uma menor precipitação pluviométrica (1301,8mm), já para o ano de 2001, quando os modelos tiveram o pior desempenho houve

uma maior precipitação pluviométrica (1583,7mm) e intermediária para o ano de 2002 (1343,1mm). Sendo assim, pode-se dizer que quanto maior a precipitação pluviométrica, menor o desempenho dos modelos e vice-versa.

Portanto, fica comprovado mais uma vez que as modificações aplicadas aos modelos DCBB e DB, levando-se em conta o efeito sazonal da variação da temperatura, contribui para o alcance dos melhores resultados. Como já observado quando da discussão do item 6.3 sobre a validação dos modelos, deve-se salientar que todos os modelos podem ser utilizados para a estimativa da irradiação solar global, sendo que seu uso depende do grau de precisão que se deseja alcançar.

## 7 CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos nesse trabalho podemos concluir que: As modificações aplicadas aos modelos de DB e DCBB, contabilizando o efeito sazonal da variação de temperatura, e utilizando uma função trigonométrica específica para regiões tropicais, contribuíram para o alcance dos melhores resultados. Deve-se, no entanto salientar que todos os modelos propostos são adequados para a estimativa da irradiação solar global, e seu uso depende do grau de precisão que se deseja atingir, e da disponibilidade de medidas das temperaturas do ar máxima e mínima. Mas, para a obtenção de melhores resultados deve-se realizar a calibração dos modelos para a região em estudo.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **Irr. & Drain.** Paper 56. UN-FAO, Rome, Italy, 1998.

ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarty Journal of Royal Meteorological Society.**, s 1, 50. p.121-125, 1924.

ARIZA, F.J., LÓPEZ, R., POLI, J.J., MEROÑO, J. E. Bases de datos georeferenciadas en el dimensionado de instalaciones solares. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 6, 1993, Lisboa. **Anais...**Lisboa: Associação Ibérica de Energia Solar, 1993, p. 372-5.

ASSUNÇÃO, H. F., ESCOBEDO, J. F. Algoritmo para caracterização instantânea das condições de céu. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, v.2. **Anais...**Santa Maria, RS. 2003, p. 729-730.

AYOADE. J. O. **Introdução à climatologia para os Trópicos.** Tradução: Maria Juraci Zani dos Santo, São Paulo: DIFEL, 1986.

BERNINGER, F. Simulated irradiance and temperature estimates as a possible source of bias in the simulation of photosynthesis. **Agricultural and Forest Meteorology**, 71, p. 19-32, 1994

BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.31, p. 159-66, 1984.

CAMACHO MARTÍNEZ, J.A., ARANDA, LÓPEZ, J. Software de adquisición, tratamiento y cálculo para estaciones meteorológicas. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 7, 1994. Vigo. **Anais...** Vigo: Associação Ibérica de Energia Solar, 1994, p. 103-8.

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

CAÑADA, J., PINAZO, J.V., BOSCA, J.V. Analisis de variables radiometricas y meteorológicas em Valencia durante los años 1989, 1990 y 1992. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 7, 1994. Vigo Espana, **Anais...**Vigo Associação Ibérica de Energia Solar, p. 103-8, 1994.

CUNHA, A.R., KLOSOWSKI, E.S., GALVANI, E., ESCOBEDO, J.F., MARTINS, D. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA, 1, 1999, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP-FCA, 1999, p.487-91.

CRIVELLI, S. Solar radiation and solar energy in Argentina. **Proc. Congr.** The Sun in the Service of Mankind. UNESCO. Paris, 1973.

DANTAS, R.T.; CARNEIRO, G. M.; MELO, E. C. de S.; SOARES, D. B. Determinação dos coeficientes da equação de Angstrom para estimativa da irradiação solar global em dois municípios da Paraíba. In – XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. II REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE

AGROMETEOROLOGIA, Santa Catarina, **Anais...** Florianópolis. 1999. p.2399-2403. CD-ROM.

DONATELLI, M.; BELLOCCHI, G. Estimating daily global solar radiation in tropical and temperate sites. **Agr. For. Meteorol.** (submitted), 2002

DURISCH, W., KELLER, J., BULGHERONI, W., KELLER, L., FRICKER, H. Solar irradiation measurements in Jordan and Comparisons with Californian and alpine data. **Applied Energy**, sn, v. 52, 1995, p. 111-24.

ESCOBEDO, J. F. **Radiometria solar com sensores termoeletricos de filme fino: desenvolvimento e aplicao agraria.** Tese (Livre Docente em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Botucatu, São Paulo, 1997. p.151

FERRONATO, A.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; BEZERRA, E. L.; MENDONÇA, M. M. D. D. Estimativa da radiação solar global baseada em medidas de temperatura do ar. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, v.2. **Anais...** Santa Maria, RS. 2003, p. 781-782.

FONTANA, D. C., OLIVEIRA, D. Relação entre radiação solar global e insolação para o Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 87-91, 1996.

FREIRE, I.M. Comunicação de informações tecnológicas para o meio rural. **Ciência e Informação**, nº 1, v. 13, p. 67-71, 1984.

GALINA, M. H., VERONA, J. A. Fontes de observações meteorológicas no Estado de São Paulo. **Estudo Geográficos**, Rio, Claro, 2(1): 107-118, junho- 2004 (ISSN 1678 – 698X). Disponível em < [http:// www.rc.unesp.br/igce/geografia/revista.htm](http://www.rc.unesp.br/igce/geografia/revista.htm)>.

Acesso em : 25 de setembro de 2004.

GIACOMELLI, G. A. Engineering for plant culture systems. In: **Proceedings of the ASAE Symposium, 1, Chicago Illinois**. Automated Agricultures for 21<sup>st</sup> Century, Chicago, p. 443-46, 1996.

GLOVER, J.; MCCULLOCH, J.S.F. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine in high-altitude tropics. **Q.J.R. Meteorol. Soc.**, p.56-60, 1958.

GOMEZ, G.L.; ORLANDO, G. M. Relacion empírica entre la radiacion solar global y el brilho solar en el área de CENICAFÉ. Chinchiná, Caldas. **Centro Nacional de Infestigaciones de café – CENICAFÉ**, Colombia, 46(4), p.205-18, 1995.

HELDWEIN, A.B., KRZYSCH, G. Estimativa da temperatura e da pressão de vapor d'água do ar no topo de uma cultura de batata. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.1,p.101-05, 1999.

HERRERO, M.A. Simulación y análisis de irradiación solar diária em Espana. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 6, 1993. Lisboa, **Anais...Lisboa** Associação Ibérica de Energia Solar, p. 343-8, 1993.

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

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Histórias e Produtos do INMET. Disponível em: [http// www.INMET.br](http://www.INMET.br)> Acesso em15/09/2004.

JAIN, P.C.; JAIN, A.; RATTO C.F. A new model fo obtaining instantaneous global and diffuse radiation from daily values. **Solar Energy**, n.5, v.41, p.397-404, 1988.

LAPERUTA FILHO. **Modelos horários para estimativa da Radiação solar global em Botucatu**- São Paulo. Tese. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agronômicas, *campus* Botucatu. São Paulo, 1996. p.117.

LOPES, N.F.; GOMES, A.S.; MOTTA, F.S.; GARCET, J.R.B.; GOEDERT, C.O.; BORNG, J. Estimativa da radiação solar durante o ciclo vegetativo dos cereais no Rio Grande do Sul. **Boletim Técnico**, Pelotas. Instituto de Pesquisa Agropecuária do Sul, p.32, 1971.

LUCCHESI, A.A. Fatores de produção vegetal. IN: CASTRO, P.R.C. **Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa de Potássio e do Fósforo. p. 1-10, 1987.

MALHEIRO, E.B., BENICASA, M., HODO, J.Y. Radiação solar global diária: uma análise de dados estimados em actinógrafo e piranômetro. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993, Ilhéus, **Anais...** Ilhéus: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1993, p. 904-14.

MARTINEZ-LOZANO, A.A.; TNA, F. ONRUBIA, J.E.; DE LA RUBIA, J. The Historical evolution of the Ångström fórmula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural and Forest Meteorology**, 1984. v.33. p.109-128.

MAVROMATIS, T., JAGTAP, S.S. Estimation of solar radiation from air temperature data for Urban and rural station in Flórida, **Jornal. Agricultural and Forest Meteorology**, submetido para publicação em novembro de 2003. Disponível em: <<http://www.elsevier.com/locate/agrformet>>. Acesso em 25/02/2004

MEZA, F., VARAS, E. Estimation of mean monthly solar global radiations as a function of temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, 100, 2000, p. 231-41.

ODODO, J. C.; SULAIMAN, A. T.; AIDAN, J. YUGUDA, M. M.; OGBU, F.A. The importance of maximum air temperature in the parameterization of solar radiation in Nigeria. **Renewable Energy**, Copyright Elsevier Science Ltd, vol. 6, no. 7, p, 751-63, 1995.. Printed in Great Britan. All rights reserved.

OESTERLE, H. Reconstruction of daily global radiation for past years for use in agricultural models. **Phys. Chem. Earth (B)**, v. 26, n.3, pg. 253-56, 2001.

OMETTO, J.C. **Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida e insolação**. Tese – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros/USP, Piracicaba, 1968. p.64.

PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L. R., SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. Piracicaba, SP. Livraria e Editora Agropecuária, 2002, p. 478.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997, 183p.

PIMENTEL GOMES, F. **Estatística experimental**, 12º, Piracicaba, ed., Livraria Nobel S.A. 1987, 403p.

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

RICIERI, P. R., ESCOBEDO, F. J., MARTINS, D. Relações das radiações solar difusa e global em Botucatu. **Anais: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 1996, Campos do Jordão. Os benefícios das modernas técnicas de previsão de tempo e clima para as atividades sócio-econômicas. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de meteorologia, 1996. p.547-50.

RICIERI, R. P. **Modelos de estimativa e avaliação dos métodos de medida da radiação solar difusa**. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Botucatu, São Paulo, 1998. p.81.

SANTOS, R.; ANDRE, R.G.B.; VOLPE, C.A. Estimativa da Radiação solar global em Jaboticabal, SP. **Científica (São Paulo)**, v.11. p.31-9, 1983..

SENTELHAS, P.C., PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L.R. **Meteorologia Agrícola**, 3º ed., Piracicaba, ESALQ, 2000. (Apostila).

SILVA, J. B. da; FERREIRA, C. C.; LLOPART, M. P. Probabilidade de ocorrência de temperatura média do ar em Pelotas, RS. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA AGROMETEOROLOGIA. vol. 2. **Anais...**, Santa Maria, RS. p. 865-66, 2003.

SILVA, P., SOUZA FILHO, P. S., ROBEIANA, A. D., SPOHR, R. B. Estimativa da radiação solar para acionamento de um conjunto motobomba com tecnologia fotovoltaica. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS DA AGROMETEOROLOGIA. vol. 1. **Anais...**, Santa Maria, RS. p. 431-32, 2003.

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

SUPIT I.; VAN KAKPPEL, R. R. A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, v. 63, p. 147-160, 1998.

TEIXEIRA, A. H. de C. Relação entre a radiação solar global e insolação no município de Petrolina- PE. In – XI CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. II REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA. 1999, Florianópolis.

**Anais...**Florianópolis, p.798-802. CD-ROM.

THORTON, P. E.; HASENAUER. H.; WHITE, M. A. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: an application over complex terrain in Austria. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 104, p. 255-271, 2000.

TOVAR, J.; OLMO, F; J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. One minute global irradiance probability density distributions conditioned to the optical air mass. **Solar Energy**, v. 62, n.6, p.387-93, 1998.

VALIATI, M. I. **Estimativa da irradiação solar global com diferentes partições para a região de Cascavel**. Dissertação – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, 2001 53p.

VALIATI, M. I.; RICIERI, R. P.; SANTOS, R. F. Modelo de Estimativa da irradiação Solar global para região de Cascavel. In: I SIMPÓSIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA, v.2, 2001. Botucatu. **Anais...** Botucatu:UNESP-FCA Gráfica e Editora Tiponic, 1999. p.395 –402.

VAZQUEZ, M. Estudio de la relacion entre la radiacion solar diaria y ciertas variables climatológicas, para Madridi. In.: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 6, 1993, Lisboa Portugal, **Anais...**Lisboa Associação Ibérica de Energia Solar, 1993 p. 349-53.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG. Editora UFV, 2000. p 448.

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