



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**N.º de ordem: MET-UFAL-MS-092.**

**CÍCERO MANOEL DOS SANTOS**

**IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL COM DIFERENTES MODELOS PARA ALAGOAS**

**Maceió – AL  
Fevereiro/2012**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**N.º de ordem: MET-UFAL-MS-092.**

**CÍCERO MANOEL DOS SANTOS**

**IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL COM DIFERENTES MODELOS PARA ALAGOAS**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, para obtenção do título de **Mestre em Meteorologia** – Área de concentração: **Processos de Superfície Terrestre**.

Orientador: Prof. Dr. José Leonaldo de Souza

**Maceió – AL  
Fevereiro/2012**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Fabiana Camargo dos Santos**

S237i Santos, Cícero Manoel dos.

Irradiação solar global com diferentes modelos para Alagoas / Cícero Manoel dos Santos. -- 2012.

94 f. : il.

Orientador: José Leonaldo de Souza.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2012.

Bibliografia: f. 89-94.

1. Irradiação solar global. 2. Irradiação solar – Alagoas. 3. Irradiação solar - Medição - Modelos empíricos. 4. Modelagem. I. Título.

CDU: 551.521.33



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**

**CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO**

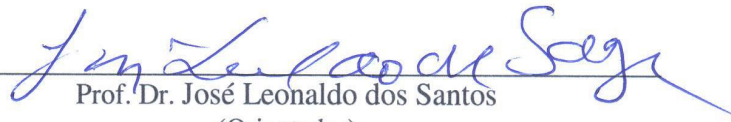
**N.º de ordem: MET-UFAL-MS-092.**

**“IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL COM DIFERENTES MODELOS PARA ALAGOAS”**

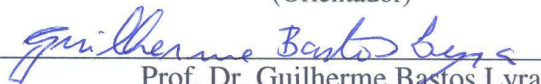
***Cícero Manoel dos Santos***

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:



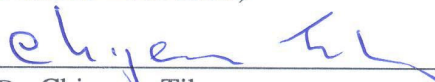
Prof. Dr. José Leonaldo dos Santos  
(Orientador)



Prof. Dr. Guilherme Bastos Lyra  
(Membro Interno – CECA)



Prof.ª Dr.ª Rosilene Mendonça Nicácio  
(Membro Interno – IGDEMA)



Prof. Dr. Chigueru Tiba  
(Membro Externo – UFPE)

**Fevereiro/2012**

Ao meu Orientador e Professor

Dr. José Leonaldo de Souza, **OFEREÇO**.

Em especial, a minha mãe (Dona Josefa), meus irmãos (Rosinaldo, Ginaldo e Flávio), minhas irmãs (Rosângela, Rosivânia, Rosinete, Lucinelma), minha cunhada (Novinha), minha namorada (Vânira), e demais familiares, **DEDICO**.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, por permitir a consolidação de mais uma fase de minha vida;

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. José Leonaldo de Souza pela orientação, oportunidade, conhecimento e amizade durante o curso de mestrado, sem o qual nada disto poderia ter se realizado;

Ao programa de Pós – Graduação em Meteorologia, professores: Fredy, Humberto, Marcos Moura, Maringolo, Molion, Natália, Roberto Lyra e Vlademir. Em especial aos professores: Dr. Manoel Toledo (em memória) e Dr<sup>a</sup>. Maria Luciene;

Aos professores Tiba, Guilherme e Rosilene, por fazerem parte da banca examinadora;

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Guilherme Bastos pela contribuição no desenvolver da pesquisa;

Ao Prof<sup>o</sup>. Dr. Juan Ceballos pelos conhecimentos compartilhados e contribuição significativa;

Ao Msc. Ricardo Araújo pelas dicas e auxílios quando precisei;

Aos amigos e colegas de laboratório: Anthony, Franklin, Marshall, Maurício, Renato e Valesca, pelos conhecimentos e “resenhas”, compartilhados ao longo de dois anos de convivência;

Aos colegas e amigos de turma do curso de Mestrado: Anderlan, Áliton, Cássia, Daniel, Deydila, Diego, Diogo, Fabiano, Gualberto, Márcio, Mikael, Thais e Vinicius, pelo companheirismo e momentos de descontrações (quando encontrava tempo);

Aos meus amigos e colegas: Carlindo, Iracema, Josias, Pedro Junior, Wilson... Que tantos momentos de felicidades e tristezas foram (...serão...) compartilhados;

Ao Ketson pelos conhecimentos de programação compartilhados;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a ELETROBRÁS por apoios financiamento;

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta, meus sinceros agradecimentos.

*“O sábio que se mostra orgulhoso e pedante revela que não sabe honrar a ciência.”*

*Alfredo Guimarães Chaves*

*“Sempre que novas experiências concordam com as previsões, a teoria sobrevive e a nossa confiança nela aumenta, mas, se uma nova observação surge em desacordo, abandona-se ou modifica-se a teoria. Pelo menos é o que se supõe acontecer, mas pode sempre pôr-se em dívida a competência de quem efetuou a observação.”*

*Stephen Hawking*

## RESUMO

A irradiação solar global ( $H_g$ ) é variável de grande importância em diversas áreas do conhecimento: Agricultura, Engenharia, Climatologia e Energia Renováveis. A quantidade total de  $H_g$  que incide na superfície terrestre pode ser contabilizada diretamente ou indiretamente. Diretamente é obtida a partir de medidas realizadas com instrumentos operacionais (piranômetros) e indiretamente por estimativa, em geral, utilizando-se modelos empíricos. Nesse trabalho, foram utilizados dez modelos empíricos (nove baseados na temperatura do ar e um na duração do brilho solar) para estimar a irradiação solar global em oito locais de Alagoas - Brasil, em escala horária, diária e mensal. Para os modelos baseados na temperatura do ar, dois regimes (amplitudes térmicas do ar) de temperatura ( $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ ) foram avaliados para verificar a influência deles nos modelos. Foram utilizados dados de temperatura do ar, duração do brilho solar ( $n$ ) e irradiação solar global ( $H_g$ ), no período de setembro de 2007 a dezembro de 2008 para ajuste dos modelos, e para validação a utilização de dados de 2009. As irradiações solar global ( $H_g$ ) ( $MJm^{-2}$ ) foram calculadas a partir das integrações das irradiâncias solar global ( $R_g$ ) ( $Wm^{-2}$ ). Em termo da irradiação solar global média horária mensal ( $H_g^h$ ), os coeficientes dos modelos mostraram ser dependentes do local de estudo. Os coeficientes gerados com dados diários e médias mensais não mostraram diferença para  $\Delta T_1$  ou  $\Delta T_2$ . Para o modelo baseado na duração do brilho solar ( $n$ ), os coeficientes ajustados são específicos para a estimativa diária e mensal. Na estimativa horária, o modelo de Hargreaves & Samani (modelo 6) e os modificados de Hargreaves & Samani (modelos 7, 8 e 9) estimaram melhor a irradiação solar global média horária mensal ( $H_g^h$ ), em todos locais analisados. Na estimativa diária, o modelo de Bristow & Campbell (modelo 1) foi mais preciso que o modelo 6. Porém, o modelo 6 resultou com valor médio do desvio padrão da população de desvios (dpp) de 2,60, 2,79 e 2,79  $MJm^{-2}$  para os locais situados no Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata, respectivamente. Mensalmente, o modelo 1 foi mais preciso que o modelo 6. O modelo baseado na duração do brilho solar estimou melhor a irradiação solar global diária ( $H_g^d$ ) e a irradiação solar global média diária mensal ( $H_g^m$ ), que os baseados na temperatura do ar, indicando baixos (dpp) e elevados coeficientes de concordâncias (d).

**Palavras-chave:** Irradiação solar global. Modelos Empíricos. Modelagem.



## ABSTRACT

The global solar irradiation ( $H_g$ ) is variable major in several subject areas: Agriculture, Engineering, Climate and Renewable Energy. The total amount of incident  $H_g$  on the earth's surface can be accounted directly or indirectly. Directly is obtained from measurements made with operational instruments (pyranometers) and indirectly by estimating, by using empirical models. In this work, ten empirical models are used (nine based on air temperature and one in the sunshine duration) to estimate the global solar irradiation in eight sites from Alagoas - Brazil, in scale hourly, daily and monthly. For models based on air temperature, two temperature regimes (air thermal amplitudes) ( $\Delta T_1$  and  $\Delta T_2$ ) were evaluated to verify the influence on the models. Have been used air temperature, sunshine duration ( $n$ ) and global solar irradiation ( $H_g$ ) data, from September 2007 to December 2008 for fit of the models, and to validate the use data in 2009. The global solar irradiations ( $H_g$ ) ( $MJm^{-2}$ ) were calculated from the integrations of the global solar irradiance ( $R_g$ ) ( $Wm^{-2}$ ). In terms of global solar irradiation hourly average monthly ( $H_g^h$ ), the coefficients of the models shown to be dependent on the study site. The coefficients generated with daily data and monthly averages showed no difference to  $\Delta T_1$  or  $\Delta T_2$ . For the model based on the sunshine duration ( $n$ ), the adjusted coefficients are specific to the estimated daily and monthly. In estimating hourly, the Hargreaves & Samani model (model 6) and the modified Hargreaves & Samani (models 7, 8 and 9) estimated the best monthly hourly global solar irradiation average ( $H_g^h$ ) in all sites analyzed. In the daily estimate, the Bristow & Campbell model (model 1) was more accurate than the model 6. However, the model 6 resulted with an average value of the population standard deviation of deviations (dpp) of 2,60, 2,79 and 2,79  $MJm^{-2}$  for sites in the regions of the interior (Sertão), Hinterland (Agreste) and Coastal (Litoral) / Humid Area (Zona da Mata), respectively. Each month, the model 1 was more accurate than the model 6. The model based on the sunshine duration estimated the best daily global solar irradiation ( $H_g^d$ ) and monthly daily global solar irradiation average ( $H_g^m$ ), those based on air temperature, indicating low (dpp) and high coefficients of agreement (d).

**Keywords:** Global Solar Irradiation. Empirical Models. Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> – Distribuição espacial das estações meteorológicas em Alagoas (adaptado de Tiba <i>et. al.</i> , 2010). Lat = Latitude e Long = Longitude.....	25
<b>Figura 2</b> – Variação anual da irradiação solar global média horária mensal observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.....	54
<b>Figura 3</b> – Desvio padrão da população de desvios (dpp) entre a irradiação solar observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.....	55
<b>Figura 4</b> – Variação da irradiação solar média horária mensal no topo da atmosfera ( $H_o^h$ ), observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.....	59
<b>Figura 5</b> – Desvio Padrão da população de desvios (dpp) entre a irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) no ano de 2009, para os modelos empíricos, com base nos dois regimes de temperatura adotados ( $\Delta T_1$ e $\Delta T_2$ ), para locais de Alagoas.....	62
<b>Figura 6</b> – Relação entre a irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram, para locais de Alagoas. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.....	65
<b>Figura 7</b> – Variação da irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram, para locais de Alagoas em 2009.....	68
<b>Figura 8</b> – Histograma de frequência média da transmitância atmosférica global, com os anos de 2008, 2009 e 2010, para as regiões do Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata. Em que, N. = Nublado; N.T.P.N. = Nublado Tendendo a Parcialmente Nublado; P.N. = Parcialmente Nublado; P.N.T.L. = Parcialmente Nublado Tendendo a Limpo; L. = Limpo.....	72

<b>Figura 9</b> – Desvio padrão da população de desvios (dpp) e o coeficiente de correlação das entre a média mensal diária da irradiação solar global observada ( $H_g^m$ ) e estimada ( $H_{ge}^m$ ) no ano de 2009, para os modelos empíricos, com base na amplitude térmica, para locais de Alagoas.....	73
<b>Figura 10</b> – Variação da irradiação solar global média diária mensal observada ( $H_g^m$ ) e estimada ( $H_{ge}^m$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.....	75
<b>Figura 11</b> – Relação entre a irradiação solar global média diária mensal observada ( $H_g^m$ ) e estimada ( $H_{ge}^m$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.....	77
<b>Figura 12</b> – Relação entre a irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelo modelo de Ångström & Prescott, em a) Água Branca, c) Pão de Açúcar, e) Palmeira dos Índios. A variação anual entre ( $H_g^d$ ) e ( $H_{ge}^d$ ) é mostrada em b) Água Branca, d) Pão de Açúcar, f) Palmeira dos Índios. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.....	81
<b>Figura 13</b> – Relação entre a irradiação solar global média mensal diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelo modelo de Ångström & Prescott, em a) Água Branca, c) Pão de Açúcar, e) Palmeira dos Índios. A variação anual entre ( $H_g^d$ ) e ( $H_{ge}^d$ ) é mostrada em b) Água Branca, d) Pão de Açúcar, f) Palmeira dos Índios. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.....	83

## LISTA DE TABELAS

Pág.

<b>Tabela 1</b> – Localização das Estações Meteorológicas Automáticas instaladas em Alagoas.....	25
<b>Tabela 2</b> – Classificação climática das regiões em estudo (Segundo a metodologia de Thornthwaite – Mather, 1955). Em que é $\bar{P}$ a precipitação média anual e $\bar{T}$ a temperatura do ar média anual.....	26
<b>Tabela 3</b> – Características principais de operação do piranômetro e do sensor temperatura do ar.....	27
<b>Tabela 4</b> – Modelos e os coeficientes que foram ajustados.....	36
<b>Tabela 5</b> – Coeficientes mensais (Coef.) e média dos desvios padrões ( $\overline{DP}$ ) dos modelos, para locais de Alagoas, com uso de $\Delta T_1$ .....	41
<b>Tabela 6</b> – Coeficientes diários e desvios padrões (DP) dos modelos, para locais de Alagoas, com uso de $\Delta T_1$ nos modelos (6, 7, 8 e 9) e $\Delta T_2$ nos modelos (1, 2, 3, 4 e 5).....	46
<b>Tabela 7</b> – Coeficientes médios diários mensais e desvios padrões (DP) dos modelos, para locais de Alagoas, com uso de $\Delta T_1$ nos modelos (6, 7, 8 e 9) e $\Delta T_2$ nos modelos (1, 2, 3, 4 e 5).....	50
<b>Tabela 8</b> – Coeficientes diários e mensais com seus respectivos desvio padrão da calibração para o modelo de Ångström & Prescott para as regiões de Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios, no ano de 2009.....	79
<b>Tabela 9</b> - Desempenho dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar global média horária mensal em cada local e seus indicativos estatísticos (média geral do desvio padrão da população de desvios $\langle ddp \rangle$ , do coeficiente de correlação média geral $\langle r \rangle$ e do índice de concordância médio geral $\langle d \rangle$ ).....	86
<b>Tabela 10</b> - Desempenho dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar global diária em cada local e seus indicativos estatísticos (desvio padrão da população de desvios (ddp), coeficiente de correlação (r) e índice de concordância (d)).....	86

**Tabela 11** - Desempenho dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar global média diária mensal em cada local e seus indicativos estatísticos (desvio padrão da população de desvios (ddp), coeficiente de correlação (r) e índice de concordância (d))..... 86

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ddp</b>	Diferença de potencial elétrico
<b>dpp</b>	Desvio padrão da população de desvios
<b>DSA</b>	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
<b>FAO</b>	<i>Food and Agriculture Organization (Organização de Alimentos e Agricultura)</i>
<b>HN</b>	Hemisfério Norte
<b>HS</b>	Hemisfério Sul
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>INPE</b>	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<b>med</b>	Média dos desvios
<b>RNA's</b>	Redes Neurais Artificiais

## LISTA DE SÍMBOLOS

$R_g$	Irradiância solar global ( $W/m^{-2}$ )
$R_g^d$	Irradiância solar global diária ( $W/m^{-2}$ )
$R_d$	Irradiância solar difusa ( $W/m^{-2}$ )
$R_D$	Irradiância solar direta ( $W/m^{-2}$ )
$R_o$	Irradiância solar horária no topo da atmosfera ( $W/m^{-2}$ )
$I_g^h$	Irradiância solar horária ( $W/m^{-2}$ )
$\bar{e}_i$	Média dos valores estimados ( $MJm^{-2}$ )
$\bar{o}_i$	Média dos valores observados ( $MJm^{-2}$ )
$\Delta T_1$ e $\Delta T_2$	Regimes de temperatura ( $^{\circ}C$ )
$\Delta T_m$	Média da amplitude térmica mensal ( $^{\circ}C$ )
$\cos \theta_z$	Cosseno do ângulo zenital solar ( $^{\circ}$ )
$H_0^g$	Irradiação solar global média horária mensal no topo da atmosfera ( $MJm^{-2}$ )
$H_g^h$	Irradiação solar global média horária mensal ( $MJm^{-2}$ )
$h_g^h$	Irradiação solar horária ( $MJm^{-2}$ )
$H_g$	Irradiação solar global ( $MJm^{-2}$ )
$H_g^d$	Irradiação solar global diária ( $MJm^{-2}$ )
$H_{ge}^h$	Irradiação solar global média horária mensal estimada ( $MJm^{-2}$ )
$H_{ge}^d$	Irradiação solar global diária estimada ( $MJm^{-2}$ )
$H_{ge}^m$	Irradiação solar global média diária mensal estimada ( $MJm^{-2}$ )
$H_g^m$	Irradiação solar global média diária mensal ( $MJm^{-2}$ )
$k_t^d$	Transmitância Atmosférica
$\bar{P}$	Média dos desvios ( $MJm^{-2}$ )
$d_n$	Número de dias do ano
$e_i$	Valores estimados ( $MJm^{-2}$ )
$l_i$	Longitude local ( $^{\circ}$ )
$l_p$	Longitude padrão (Meridiano de $45^{\circ}$ ).
$o_i$	Valores observados ( $MJm^{-2}$ )
$E_0$	Fator de correção da excentricidade da órbita terrestre

<b><i>h</i></b>	Hora local padrão
<b><i>n</i></b>	Duração do brilho solar diário (horas)
<b><i>S<sub>0</sub></i></b>	Constante solar (W/m <sup>2</sup> )
<b><i>β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub> e β<sub>3</sub></i></b>	Coefficientes empíricos
<b><i>M</i></b>	Hora ao meio dia
<b><i>N</i></b>	Fotoperíodo (horas)
<b><i>N'</i></b>	Número de dados
<b><i>P</i></b>	Desvio entre os valores observados e estimados (MJm <sup>-2</sup> )
<b><i>δ</i></b>	Declinação solar
<b><i>ω</i></b>	Ângulo horário solar (°)
<b><i>φ</i></b>	Latitude local (°)
<b><i>CO<sub>2</sub></i></b>	Gás Carbônico
<b><i>N<sub>2</sub></i></b>	Gás Nitrogênio
<b><i>O<sub>3</sub></i></b>	Gás Ozônio
<b><i>O<sub>2</sub></i></b>	Gás Oxigênio
<b><i>t<sub>0</sub></i></b>	Hora inicial
<b><i>t<sub>f</sub></i></b>	Hora final



## SUMÁRIO

	Pág.
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1 Radiação solar e aplicações.....	19
2.2 Modelagem da irradiação solar global.....	21
2.3 Estimativa da irradiação solar global.....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>25</b>
3.1 Locais e dados.....	25
3.2 Descrição dos dados.....	27
3.3 Base de dados da irradiação solar global (horária, diária e mensal), temperatura do ar (horária, diária e mensal) e duração do brilho solar diária (diária e mensal).....	29
3.4 Irradiância solar global horária no topo da atmosfera ( $R_0$ ).....	30
3.5 Modelos empíricos baseados na temperatura do ar.....	31
3.5.1 Modelo 1 – Bristow & Campbell (1984).....	32
3.5.2 Modelo 2 – Meza & Varas (2000).....	32
3.5.3 Modelo 3 – Donatelli & Campbell (1998).....	32
3.5.4 Modelo 4 – Weiss <i>et al.</i> , (2001).....	33
3.5.5 Modelo 5 – Abraha & Savage (2008).....	33
3.5.6 Modelo 6 – Hargreaves & Samani (1982).....	33
3.5.7 Modelo 7 – Annandale <i>et al.</i> , (2002).....	34
3.5.8 Modelo 8 – Hargreaves <i>et al.</i> , (1985).....	34
3.5.9 Modelo 9 – Hunt <i>et al.</i> , (1998).....	34
3.6 Modelo empírico baseado na duração do brilho solar [Modelo 10 – Ångström & Prescott (1940)].....	35
3.7 Ajuste dos modelos.....	35
3.8 Regime de temperatura.....	36
3.9 Análise da qualidade dos dados.....	37
3.10 Avaliação de desempenho dos modelos.....	37
3.10.1 Média dos desvios (med).....	38
3.10.2 Desvio padrão da população de desvios (dpp).....	38
3.10.3 Índice de concordância de Willmott (d).....	38

3.10.4	Coefficiente de correlação.....	39
3.10.5	Teste – t.....	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
4.1	Coefficientes locais para estimativa da irradiação solar global média horária mensal.....	40
4.2	Coefficientes locais para estimativa da irradiação solar global diária.....	45
4.3	Coefficientes locais para estimativa da irradiação solar global média diária mensal.....	49
4.4	Desempenho dos modelos de irradiação solar global baseados na temperatura do ar.....	53
4.4.1	Estimativa da irradiação solar global média horária mensal.....	53
4.4.2	Estimativa da irradiação solar global diária.....	60
4.4.3	Estimativa da irradiação solar global média diária mensal.....	70
4.5	Coefficientes para irradiação solar global diária e média mensal diária do modelo de Ångström & Prescott.....	78
4.5.1	Estimativa da irradiação solar global diária.....	80
4.5.2	Estimativa da irradiação solar global média diária mensal.....	82
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A radiação eletromagnética emitida pelo sol é a fonte de energia que determina o clima da Terra, sendo também uma das mais importante e promissora fonte de energia renovável. A energia solar é de extrema importância para diversas aplicações, com destaque para os estudos climáticos, construção civil, arquitetura (aquecimento e iluminação natural de ambientes), agricultura e floresta (disponibilidade hídrica e produtividade), meio ambiente e utilização prática dos recursos energéticos renováveis (Tymvios *et al.*, 2005; Espinel, 2010). O total energético que chega até a superfície terrestre, por unidade de área e por unidade de tempo (densidade de fluxo), é definida como irradiância solar global ( $R_g$ ), que é a soma da irradiância solar direta ( $R_D$ ) e a irradiância solar difusa ( $R_d$ ). A irradiância solar direta é a contabilização da energia na mesma direção da incidência solar. A irradiância solar difusa é proveniente do espalhamento da radiação solar promovidos dos constituintes atmosféricos em todas as direções.

A  $R_g$  que chega a superfície da terra pode ser medida por diferentes instrumentos denominados de radiômetros – instalados - em estações (meteorológicas ou solarimétricas) de superfície. Quando na região de estudo, não existe uma estação meteorológica com instrumentos destinados para medir as componentes da irradiância solar (global, direta e difusa) [ocasionado pelo elevado custo de manutenção e calibração dos instrumentos], mas possuem sensores de medidas de outras variáveis, tais como temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão de vapor, precipitação e entre outros, a solução para o conhecimento da quantidade de energia que chega à superfície terrestre é o uso de modelos estimativos. Uma dessas formas é a utilização de modelos empíricos, teoricamente aplicáveis em regiões com diferentes zonas climáticas, para estima a radiação solar em superfícies horizontais e inclinadas.

Em algumas regiões de Alagoas, modelos empíricos que fazem o uso de dados meteorológicos, como temperatura do ar, por exemplo, ainda não foram avaliados para qualificar e quantificar o grau da confiabilidade de estimativa ou se são aplicáveis. Apenas na região de Maceió realizaram-se avaliações preliminares com alguns modelos empíricos, utilizando dados climáticos de três anos, sendo observadas boas estimativas (Nicácio, 2002) e análise horária, diária e mensal da evolução temporal da irradiação solar global incidente em uma superfície horizontal (Souza *et al.*, 2005).

Diante das considerações, o presente trabalho objetiva:

**Geral:**

- Estimar a irradiação solar global em diferentes locais de Alagoas - Brasil, com o uso de modelos empíricos que utilizam dados de temperatura do ar (máxima e mínima) e duração do brilho solar, como variável de entrada.

**Específicos:**

- I. Verificar a influencia de dois métodos de amplitudes térmicas na calibração dos coeficientes de modelos empíricos;
- II. Determinar os coeficientes de modelos empíricos da irradiação solar em função da temperatura do ar, em oito locais de Alagoas em escala horária, diária e mensal;
- III. Determinar os coeficientes do modelo de Ångström-Prescott, em escala diária e mensal, para estimar a irradiação solar global nas regiões de Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios;
- IV. Avaliar o desempenho de cada modelo, com melhor indicação de aplicação para cada local.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Radiação solar e aplicações

A fonte de energia que impulsiona o clima na terra e as atividades humanas advém da radiação eletromagnética emitida pelo Sol, sendo gerada a partir de reações termo-nucleares (Brown, 1988) em que milhões de toneladas de hidrogênios são convertidos em gás hélio a cada segundo, com liberação de calor e radiação eletromagnética. A radiação eletromagnética solar [incluindo a luz visível ( $0,40 \leq \lambda < 0,76 \mu\text{m}$ ), infravermelho ( $0,76 \leq \lambda \leq 4,00 \mu\text{m}$ ) e a radiação ultravioleta ( $0,10 \leq \lambda < 0,40 \mu\text{m}$ )] é transmitida para o espaço em todas as direções e somente uma pequena fração chega ao topo da atmosfera terrestre, que varia ao longo do ano. Parte da radiação que chega ao topo da atmosfera atinge a superfície devido à transmitância atmosférica, descontada uma pequena fração daquela que é polarizada ao interagir com partículas da atmosfera (Kabelac & Drake, 1992). A constante solar, que é a radiação solar que chega perpendicularmente ao topo da atmosfera (considerando a distância média Terra-Sol) em uma área de um metro quadrado por segundo, é aproximadamente  $1367 \text{ Wm}^{-2}$ .

Cerca de 30% da radiação solar total que chega ao topo da atmosfera são todas absorvidas ou espalhadas pelos constituintes atmosféricos. A absorção da radiação pela atmosfera ocorre, em grande parte, na zona do ultravioleta, pelo ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono em bandas no infravermelho. Há absorção quase completa de radiação de ondas curtas (UV), em comprimento de onda abaixo de  $0,29 \mu\text{m}$ . O espalhamento da radiação que passa através da atmosfera é causado pela interação da radiação com as moléculas do ar, da água (vapor e gotas) e da poeira. O grau de dispersão que ocorre é uma função do número e tamanho de partículas e do comprimento de onda por meio do qual deve passar a radiação (Duffie *et al.*, 2006). A fração da energia solar que chega a Terra (topo da atmosfera e superfície) de todas as direções por unidade de área e por unidade de tempo é definida como irradiância ( $\text{Js}^{-1} \text{ m}^{-2} = \text{Wm}^{-2}$ ). Quando esta energia é integrada em um intervalo de tempo específico, defini-se irradiação solar ( $\text{MJm}^{-2}$ ).

A radiação solar, na superfície terrestre, pode ser dividida em duas componentes: direta e difusa. A densidade de fluxo correspondente as componentes da radiação solar é denominada de  $R_D$  e  $R_d$ , e a soma dos fluxos é definido como  $R_g$  (Iqbal, 1983). A  $R_D$  é parte da global que atinge o nível do solo interagindo diretamente com a atmosfera, ou seja, ela é emitida para a superfície da terra com o mesmo ângulo que foi incidente. Esta alcança a superfície terrestre em feixes aproximadamente paralelos, comprovando ao olhar diretamente para o disco solar, regida pela lei de Beer – Bouguer – Lambert. A componente da  $R_D$  pode

ser medida diretamente ou indiretamente. No método direto utiliza-se um pireliômetro, instrumento com pequena abertura cônica ligeiramente maior que o ângulo sólido subtendido pelo disco solar. Indiretamente a  $R_D$  pode ser obtida a partir da diferença entre  $R_g$  e  $R_d$ .

A  $R_d$  é aquela emitida pelo sol e possuem sua direção alterada por espalhamento na atmosfera terrestre. Os espalhamentos são caracterizados por dois tipos, o de Rayleigh e o de Mie. Quando o tamanho da partícula é menor que um décimo do comprimento de onda da luz caracteriza o espalhamento de Rayleigh. Já quando o tamanho da partícula for maior que o comprimento de onda da luz tem-se o de Mie (Iqbal, 1983). A energia total da  $R_D$  e consequentemente  $R_g$ , tendem a diminuir quando a massa do ar aumenta, contudo aumentando a componente  $R_d$  na superfície da terra. A  $R_d$  é medida indiretamente por um piranômetro equipado com um dispositivo que oculta a  $R_D$  do disco solar, conhecido como anel de sombreamento. Este anteparo, também impede parcialmente à  $R_d$ , introduz um erro sistemático nas determinações, o que exige a aplicação de certo fator de correção para compensá-lo. Diretamente a  $R_d$  pode ser obtida a partir da diferença entre a  $R_g$  e a  $R_D$ .

A  $R_g$  é a energia recebida por um ângulo de  $2\pi$  esferorradianos sobre uma superfície horizontal, esta pode ser medida por meio de um piranômetro, pertencente à classe dos radiômetros. O conhecimento preciso de medidas confiáveis em uma determinada região é de fundamental importância, tanto para a aplicação na agricultura e seus derivados, quanto para a conversão de energia solar em elétrica para residências, centros comerciais, entre outros. Na agricultura, a radiação solar é o um dos fatores responsáveis pelo processo de evapotranspiração (ET), ou seja, a evaporação de água do solo e das plantas para a atmosfera na forma de vapor. Apenas 5% da  $R_g$  incidente são utilizadas para a realização da fotossíntese, absorvida pela clorofila, para o crescimento das plantas (influenciando no fotoperíodo, germinação de sementes, controle de floração e coloração de frutos), [elaborada pela Comissão Holandesa de Irradiação Vegetal – 1953] (Mota, 1989).

Na área de fontes de energias renovável, seu conhecimento é de extrema importância para o processo de conversão direta de energia solar em elétrica, através do efeito fotovoltaico, que consiste na geração de uma diferença de potencial (ddp) elétrico por interação de um fluxo de energia radiante com a matéria. Ou seja, a célula fotovoltaica ou solar trabalha segundo o princípio de que fótons incidentes colidem com os átomos de certos materiais (por exemplo, silício, selênio e óxido de cobre) provocando deslocamento dos elétrons carregados negativamente. Se estes elétrons podem ser capturados antes de retornarem a seus orbitais atômicos, podem ser aproveitados, livres, como corrente elétrica.

As lacunas criadas quando os elétrons se deslocam, são cargas positivas, e conduzem a corrente elétrica (Cometta, 1978).

A melhor maneira de saber a quantidade energética da  $R_g$  incidente em uma superfície é a instalação de um rede de piranômetros e cuidar dia-a-dia da manutenção e aquisição de dados, que é um exercício muito caro (El – Sebaii & Trabea, 2005). A quantidade de estações meteorológicas que medem a irradiância solar global diária ( $R_g^d$ ) é bastante pequena, quando se leva em comparação as estações destinadas a medir outras variáveis meteorológicas, principalmente, a temperatura do ar e a precipitação. Nos Estados Unidos a proporção entre as estações de observações de irradiância e as que observam a temperatura do ar não é maior que 1:100, e globalmente a relação pode ser tão baixa quanto 1:500 (Thornton & Running, 1999). Também, mundialmente o número de estações destinadas a observar  $R_g^d$ , por sua vez, acredita-se que a proporção entre as observações da  $R_g^d$  com a temperatura não tenha alterado muito. Assim como a relação entre a  $R_g^d$  e as outras variáveis meteorológicas. No Brasil, Tiba *et al.*, (2001) fizeram um levantamento das informações solarimétricas terrestres existentes, e identificaram para a maioria das localidades brasileira a escassez de informações solarimétricas, justificado tanto pelos altos custos de aquisição e manutenção dos equipamentos (Radiômetros - Pireliômetro e Piranômetro, por exemplo), como também pela ampla extensão territorial brasileira.

Apesar de sua importância, a  $R_g$  é pouca medida devido ao custo de manutenção e requisitos de calibração contínuos nas estações. Contudo, outras variáveis meteorológicas (umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do vento, pressão de vapor d'água, e principalmente, temperatura do ar) são observadas continuamente em muitas regiões, quando comparada com  $R_g$ . Na tentativa de suprimir a ausência e corrigir falhas de dados de  $R_g$ , vários modelos empíricos têm sido desenvolvidos e utilizados para estimar com boa acurácia a irradiação solar global ( $H_g$ ) em vários graus de integração (horário, diário, mensal ou anual) que incide em superfície de uma dada região. Em geral, os modelos empíricos necessitam como dados de entrada outras variáveis meteorológicas medidas nas estações, como as que já foram mencionadas anteriormente.

## **2.2 Modelagem da irradiação solar global**

Modelos empíricos são aqueles baseados em dados observados, não sendo fundamentados, principalmente, em princípios físicos. Existem diversos modelos disponíveis para estimar  $H_g$ , que variam em sofisticação, desde as mais simples (formulações empíricas com base no tempo ou dados de clima facilmente medidos) as complexas (esquemas de

transferência atmosférica radiativa que, explicitamente, levam em consideração a absorção e o espelhamento de feixe solar na atmosfera). Os modelos mais complexos são capazes de estimar com boa precisão a radiação solar incidente em uma superfície (Goodin *et al.*, 1999). No entanto, eles tendem ser demasiadamente complicados devido à necessidade de dados do local específico que não estão disponíveis em algumas posições geográficas.

Segundo Wong *et al.*, (2001), existem duas categorias de modelos de  $H_g$ : os modelos paramétricos e os de decomposição. Os modelos paramétricos requerem informações detalhadas das condições atmosféricas - variáveis meteorológicas frequentemente utilizadas como indicadores do tipo, quantidade e distribuição de nuvens, ou outras observações (radiação solar fracionada, turbidez atmosférica e da quantidade de água precipitável). Os modelos de decomposição usam informações sobre a  $H_g$  para prever a quantidade incidente. Contudo, com um estudo mais detalhado, Tymvios *et al.*, (2005) identificaram a partir de um levantamento literário, a existência de três metodologias distintas para a estimativa da  $H_g$ ; a primeira metodologia compreende os complexos modelos de transferência radiativa, baseados em processos físicos. Esta abordagem leva em consideração as interações físicas entre a radiação solar e a atmosfera terrestre, como o espalhamento de Rayleigh, absorção radiativa pelo ozônio e vapor de água, temperatura do ar, entre outros. A segunda metodologia é bastante simples e explora as relações empíricas entre a quantidade de  $H_g$  sobre uma superfície horizontal na terra e no topo da atmosfera. A terceira metodologia (foi recentemente introduzida) emprega a técnicas de inteligência artificial como redes neurais artificiais (RNA). A técnica de RNA é amplamente aceita como abordagem computacional que oferece forma alternativa de modelagem com mapeamentos complexos.

Em estudos recentes, Mubiru & Banda (2008) apresentaram uma classificação mais ampla das metodologias existentes para estimar  $H_g$ , correspondente aos seguintes grupos de modelos; os analíticos, os estocásticos, os empíricos e os de RNA's. Os modelos analíticos são baseados em conhecimentos das leis que governam um fenômeno em estudo (equações diferenciais ou expressões parametrizadas são empregadas). Nas previsões de  $H_g$ , esses modelos consideram a interação física entre a radiação solar e a atmosfera terrestre. Os modelos estocásticos, segundo o autor, são modelos auto-regressivos e, são essencialmente modelos lineares e incapazes de simular adequadamente a natureza não-linear e dinâmica. Já os modelos empíricos exploram relações empíricas entre a irradiação solar global e as variáveis meteorológicas existentes. Os modelos de RNA's empregam técnicas de inteligência artificial e são orientados a dados. Inicialmente, as RNA's são usadas para aprender o comportamento de um sistema, memorizá-lo e, posteriormente, utilizadas para estimar.



Os modelos empíricos de predição de  $H_g$  são ferramentas valiosas que podem ser usados para modelar e investigar a quantidade energética que tende a incidir em superfície terrestre. O método mais utilizado foi o proposto por Ångström (1924) e, que indica uma relação linear para a razão da  $H_g$  média diária e a irradiação solar no topo da atmosfera com a razão de insolação (razão entre duração do brilho solar com o fotoperíodo). Outros modelos baseados na temperatura do ar, os modelos de Bristow & Campbell (1984) e Hargreaves & Samani (1982) são citados frequentemente.

### 2.2.1 Estimativa da irradiação solar global

Diversos modelos (Ångström, 1924; Prescott, 1940; Bristow & Campbell, 1984; Hargreaves & Samani, 1982; Allen, 1995) são encontrados na literatura propostos para estimar a  $H_g$ , baseados em variáveis meteorológicas. Borges *et al.*, (2010) estimaram a  $H_g$  para a região de Cruz das Almas – BA, utilizando três modelos empíricos (Hargreaves & Samani, 1982; Thornton & Running, 1999; Weiss *et al.*, 2001), mantendo fixos os coeficientes originais. Os autores observaram que a melhor estimativa foi observada para modelo de Hargreaves & Samani, seguido de Thornton & Running. O modelo de Weiss *et al.*, (2001) revelou-se inadequado para estimativa de  $H_g$ , indicando altos valores para o erro absoluto. Para Borges *et al.*, (2010) a região de Cruz das Almas pode ter significativa influência dos padrões de tempo (nebulosidade e precipitação), que influencia a amplitude térmica do ar. Sporkas & Forcella (2006) estimaram a  $H_g$  horária para 18 locais distribuídos nos Estados Unidos, Canadá, México e Austrália, mediante a formulação de um modelo físico baseado na transmissividade atmosférica, massa óptica, pressão atmosférica, entre outros. Obtiveram bons resultados, com correlações variando de 82,3% a 97,7% e  $d$  de Willmott entre 0,93 – 0,94. Para os autores, o modelo utilizado é mais útil que outros existentes na literatura, pois, não requer ajuste por não possuir coeficientes empíricos a serem determinados.

Siqueira *et al.*, (2007) propuseram o uso de RNA's para estimar a irradiação solar global diária ( $H_g^d$ ) em locais do Sertão de Pernambuco – Brasil. A RNA foi treinada com dados de precipitação, temperatura do ar e informações geodésicas dos locais. Segundo os autores, o modelo foi capaz de estimar satisfatoriamente  $H_g^d$ , indicando erros menores que 20%. Li *et al.*, (2010), também propuseram um modelo trigonométrico em conjunto com uma onda senoidal e cosseno para estimar a  $H_g^d$  na China, necessitando do dia do ano como parâmetro de entrada. Segundo os autores, o modelo estimou com excelentes resultados (correlação variando de 0,77 a 0,98). Quando aplicado em Maceió - AL, os modelos baseados no dia do ano apresentaram resultados insatisfatórios, observou-se correlação de 60%,

indicando a ineficiência de estimar em diferentes locais (Santos *et al.*, 2011). Na Alemanha, Iziomon & Mayer (2001) analisaram o desempenho de modelos na estimativa da irradiação solar diária em planície e montanha de pastagem em quatro locais distintos. Com variável de entrada a temperatura e a umidade relativa do ar, principalmente, os modelos empíricos mostraram resultados bastante satisfatórios e condizentes com os medidos (erros de 0,25 a 0,60%). Na China, Chen *et al.*, (2004) estimaram a  $H_g$  diária, utilizando 5 modelos diferentes, sendo 2 baseados na duração do brilho solar e os demais na temperatura do ar. Os modelos com base na duração do brilho solar foram mais precisos que os outros. Com modificações, os modelos que requerem dados de temperatura do ar apresentaram resultados satisfatórios.

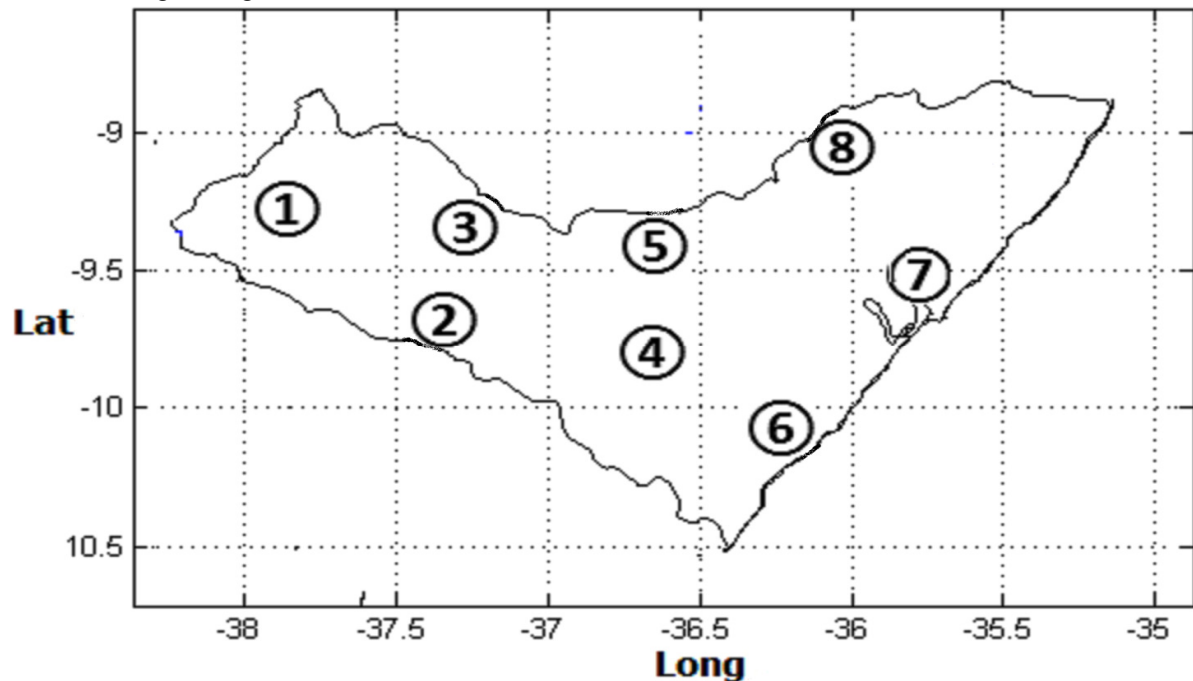
Em Jeddah – Arábia Saudita, El – Sebaï *et al.*, (2010) buscaram desenvolver correlações empíricas para estimar  $H_g$  mensal sobre superfícies horizontais, utilizando dados meteorológicos disponíveis. Para o cálculo da  $H_g$  mensal utilizaram modelos isotrópicos (suas propriedades não variam com a direção) e anisotrópicos (é a característica em que certa propriedade física varia com a direção). Os autores verificaram que o modelo isotrópico (Liu & Jordan) pode ser utilizado para estimar  $H_g$  mensal em Jeddah com boa precisão (com coeficiente de determinação variando de 0,92 a 0,99). Baseando-se em dois modelos empíricos, Chineke (2008), estimou a  $H_g$  mensal para duas regiões da Nigéria. Segundo os autores os resultados obtidos foram satisfatórios e irá contribuir de forma significativa para o desenvolvimento energético do país, em que o consumo de eletricidade *per capita*, na Nigéria, é inferior a 1%. Maghrabi (2009) desenvolveu um modelo empírico para estimar a  $H_g$  mensal em Tabouk – Arábia Saudita. Como variável de entrada o modelo requer dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, vapor d'água e duração do brilho solar. O modelo apresentou bons resultados (erros de 0,1 a 3,23 kWhm<sup>-2</sup>), podendo ser usado para estimar a  $H_g$  mensal em Tabouk com alta precisão e em outros lugares com clima semelhante. Os modelos empíricos são bons, quando seus coeficientes são ajustados com dados locais.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Locais e dados

O presente trabalho foi desenvolvido a partir do uso de dados meteorológicos observados no período de setembro de 2007 a dezembro de 2009, em oito Estações Meteorológicas Automáticas instaladas em diversos locais de Alagoas (Figura 1), abrangendo as diferentes regiões climáticas do estado. As localizações pontuais das estações podem ser verificadas na Tabela 1, onde são mostradas suas coordenadas geodésicas.

**Figura 1** - Distribuição espacial das estações meteorológicas em Alagoas (adaptado de Tiba *et al.*, 2010). Lat = Latitude e Long = Longitude.



Fonte: (Tiba *et al.*, 2010)

**Tabela 1** - Localização das Estações Meteorológicas Automáticas instaladas em Alagoas.

Estações	Latitude	Longitude	Altitude (m)
(1) Água Branca	9°15'15,0"S	37°56'15,0"W	593,0
(2) Pão de Açúcar	9°44'48,1"S	37°26'15,1"W	46,0
(3) Santana do Ipanema	9°22'30,7"S	37°13'53,6"W	279,4
(4) Arapiraca	9°47'54,8"S	37°36'23,4"W	239,0
(5) Palmeira dos Índios	9°24'19,9"S	36°39'22,7"W	328,0
(6) Coruripe	9°28'29,1"S	35°49'43,6"W	108,7
(7) Maceió	10°01'29,1"S	36°16'29,1"W	127,0
(8) São José da Laje	8°58'01,2"S	36°03'48,0"W	344,7

Fonte: (Tiba *et al.*, 2009)

O estado de Alagoas é dividido basicamente em seis regiões microclimáticas: Litoral, Zona da Mata, Agreste, Sertão, Sertão do São Francisco e Baixo São Francisco (Silva, 2007). No presente estudo, consideraram-se três grandes regiões climáticas: Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata. Na região do Sertão estão localizadas as estações: Água Branca, Pão de Açúcar e Santana do Ipanema, no Agreste: Arapiraca e Palmeira dos Índios e no do Litoral/Zona da Mata: Maceió, Coruripe e São José da Laje, caracterizadas pelos climas (Tabela 2).

**Tabela 2** – Classificação climática das regiões em estudo (Segundo a metodologia de Thornthwaite – Mather, 1955). Em que é  $\bar{P}$  a precipitação média anual e  $\bar{T}$  a temperatura do ar média anual.

<b>Locais</b>	<b>Tipo</b>	<b>Caracterização</b>	<b><math>\bar{P}</math> (mm)</b>	<b><math>\bar{T}</math> (°C)</b>
<b>Água Branca</b>	C1A'sw	Subúmido seco, Megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e excesso de água no inverno.	1051,4	23,7
<b>Pão de Açúcar</b>	DA's2d	Semiárido, Megatérmico, com grande deficiência de água no verão e excesso de água nulo no inverno.	571,87	27,6
<b>Santana do Ipanema</b>	DA's2d	Semiárido, Megatérmico, com grande deficiência de água no verão e excesso de água nulo no inverno.	754,7	25,5
<b>Arapiraca</b>	C1A's2w	Subúmido seco, Megatérmico, com grande deficiência de água no verão e excesso de água moderada no inverno.	1050,0	24,6
<b>Palmeira dos Índios</b>	DA's2d	Semiárido, Megatérmico, com grande deficiência de água no verão e excesso de água nulo no inverno.	869,6	25,3
<b>Maceió</b>	B1A'sw2	Úmido, Megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno.	1817,6	25,4
<b>Coruripe</b>	C2A'sw2	Subúmido, Megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno.	1563,1	26,1
<b>São José da Laje</b>	C2A'sw2	Subúmido, Megatérmico, com deficiência de água moderada no verão e grande excesso de água no inverno.	1248,9	24,8

Fonte: (Autor, 2012)

Os dados de (irradiação solar global ( $H_g$ ) e temperatura do ar máxima e mínima utilizados neste estudo foram para o período de setembro de 2007 a dezembro de 2009, medidos por sensores automáticos com as características expressas na Tabela 3. A duração do brilho solar diário ( $n$ ) foi medida no período de janeiro de 2007 a dezembro 2009 em estações meteorológicas convencionais pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, localizadas em Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios.

**Tabela 3** - Características principais de operação do piranômetro e do sensor temperatura do ar.

	<b>Irradiância solar</b>	<b>Temperatura do ar</b>
<b>Sensor - Marca</b>	Piranômetro - Eppley	Sensor HMP45C – Vaisala Inc.
<b>Sensibilidade</b>	11 $\mu$ volts/ $Wm^{-2}$	-----
<b>Dependência à temperatura</b>	$\pm 1,5\%$ ( $-20^{\circ}C$ a $+40^{\circ}C$ )	-----
<b>Linearidade</b>	$\pm 1,0\%$ , ( $0 - 1400 Wm^{-2}$ )	-----
<b>Resposta Cosseno</b>	$\pm 2,0\%$ ( $0 < \theta_z < 70^{\circ}$ )	-----
	$\pm 5,0\%$ ( $70 < \theta_z < 80^{\circ}$ )	
<b>Faixa de medida</b>	(285 – 2800 nm)	( $-40^{\circ}C$ a $+60^{\circ}C$ )
<b>Acurácia</b>	-----	$\pm 0,20^{\circ}C$ ( $20^{\circ}C$ )
		$\pm 0,50^{\circ}C$ ( $-40^{\circ}C$ )

Fonte: (Tiba *et al.*, 2009)

Na aquisição e armazenamento dos dados de irradiância solar e temperatura do ar foi utilizado um Datalogger da Campbell modelo CR1000, programado para capturar informações a cada segundo e gravar médias a cada minuto. Os dados armazenados são transferidos para um microcomputador utilizando-se uma interface e um software da Campbellsci. Posteriormente, os dados foram armazenados em planilhas eletrônicas, separadas mensalmente, totalizando 224 arquivos. Os dados de irradiância solar global ( $R_g$ ) inferiores a  $5 Wm^{-2}$  foram excluídos, para garantir a confiabilidade das medidas.

### 3.2 Descrição dos dados

Os dados foram verificados e os valores duvidosos removidos. Falhas relacionadas com período de calibração dos sensores (mau funcionamento do sistema de aquisição de dados, entre outros) que geraram inconsistências foram removidas do banco de dados. Para a estação de Água Branca foram excluídos (da  $R_g$  e da temperatura do ar) nos dias 24 a 28 de outubro de 2009, totalizando 5 dias (0,59%). As falhas para este período foram ocasionadas

pela manutenção da estação. Para os anos de 2007 e 2008 não se verificou nenhum dia com dados inconsistente. Na estação de Pão de Açúcar, para a  $R_g$  e temperatura do ar, foram excluídos os 12 primeiros dias do mês de setembro de 2007 e nos dias 24 a 31 de janeiro de 2009, com total de 20 dias (2,35%) para 2009. A estação de Santana do Ipanema não apresentou dados duvidosos ou tendenciosos, por isso, não houve exclusão.

A estação de Arapiraca mostrou falhas nos dias 29, 30 e 31 de dezembro de 2008. Em 2007 não se identificaram problemas, porém, em 2009 observaram-se falhas para os dias 18 e 19 de agosto, totalizando 5 dias (0,59%). Por outro lado, removeram-se da estação de Palmeira dos Índios os 12 primeiros dias do mês de setembro de 2007, de 17 a 28 de fevereiro de 2008, e para 2009 os dias 10, 11 e 25 de Maio, 28 a 31 de agosto e do primeiro ao oitavo dia do mês de setembro. Os totais de 39 dias com falhas observados para a estação de Palmeira dos Índios correspondem a 4,58% dos 852 dias possíveis. As falhas verificadas para setembro de 2007, em Palmeira dos Índios, ocasionaram-se por ser o primeiro mês de medida, correspondendo ao período de ajustes dos sensores.

Na estação de Maceió não foi verificado falhas para o ano de 2007, porém, houveram falhas para os dias 20 de março de 2008, 2 de março e 22 de abril de 2009, somando 3 dias. A estação de Coruripe mostrou dados duvidosos para todo o mês de setembro de 2007, 9 de maio de 2008, 3 de fevereiro, 25 de maio e todo mês de novembro de 2009, totalizando 64 dias (7,51%) dos dados. Em São José da Laje não observaram-se dados duvidosos para o ano de 2007, diferente de 2008 onde se observou falha para o dia 01 de julho, em 2009 os dados duvidosos foram verificados nos dias 14 a 23 de janeiro, e de 10 de junho a 05 de julho, totalizando 37 dias (4,34%) de todo total.

Os dados de duração do brilho solar diário ( $n$ ) não apresentaram nenhum valor tendencioso, por isso, não houve eliminação. Para diminuir a quantidade de dados de  $R_g$  com falhas, para o ano de 2009, nas estações de Coruripe e São José da Laje, substituições foram realizadas. Para isso utilizou-se dados de  $R_g$  extraídos de imagem do satélite GOES 12, geradas pelo modelo GL1.2 (Ceballos et al., 2004). Os dados de  $R_g$  foram fornecidos pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DSA, associada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Antes de serem utilizados, os dados foram ajustados com os anos de 2007 e 2008 observados nas estações, com os ajustes os eventuais erros dos dados a serem utilizados foram minimizados.

### 3.3 Base de dados da irradiação solar global (horária, diária e mensal), temperatura do ar (horária, diária e mensal) e duração do brilho solar diária (diária e mensal)

As integrações da irradiação solar global horária, diária e mensal, a partir da irradiância solar, obedeceram à metodologias semelhantes adotadas por Gomes (2006) para a Irradiância solar, sendo:

#### Irradiação solar global média horária mensal:

$$H_g^h = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_m} h_g^h \quad (1)$$

em que:

$$h_g^h = \int_{t_o}^{t_f} I_g^h(t) dt \quad (2)$$

sendo:  $N_m$  é o número de dias do mês  $m$  para a hora em análise,  $h_g^h$  a irradiação solar global horária,  $t_o$  é a hora inicial e  $t_f$  é a hora final.

#### Irradiação solar global diária:

$$H_g^d = \int_{t_o}^{t_f} I_g^h(t) dt \quad (3)$$

em que:  $t_o = 06h00min$  da manhã e  $t_f = 16h59min$  da tarde.

#### Irradiação solar global média diária mensal:

$$H_g^m = \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} H_g^d \quad (4)$$

em que:  $N_m$  é o número de dias do mês  $m$ .

A irradiação solar global média horária mensal ( $H_g^h$ ) ( $MJm^{-2}$ ) foi calculada a partir da média de todos os valores horários da irradiância solar global horária ( $I_g^h$ ) ( $Wm^{-2}$ ). Para um dia completo foi considerado onze valores horários integrados de  $I_g^h$ , ou seja, valores compreendidos entre 06h00min às 16h59min. Em seguida tirou-se a média mensal de cada hora, por exemplo, para a primeira hora do dia (de 06h00min a 06h59min), somando todos os valores registrados ao longo do mês, dividindo os totais acumulados pela quantidade de dias anotados. A irradiação solar global diária ( $H_g^d$ ) ( $MJm^{-2}$ ) foi calculada a partir da integração diária da  $I_g^h$  ( $Wm^{-2}$ ) (média a cada minuto). Padronizando, adotaram-se para a integração diária da  $R_g$  valores compreendidos entre 06h00min às 16h59min. Pois, fora deste intervalo, pouca irradiância foi verificada em todas as estações ao longo do ano. Ou seja, a energia desconsiderada era pouco significativa em relação aos totais integrados.

A irradiação solar global média diária mensal ( $H_g^m$ ) ( $MJm^{-2}$ ) foi calculada a partir da média de todos os dias existentes em cada mês. Por exemplo, o mês de janeiro possui trinta e um dias, somaram-se os valores de todas as irradiações e em seguida dividia-se por 31 (total de dias do mês ou de dados existentes naquele mês). Esse procedimento foi adotado para todos os meses de todas as estações analisadas.

Para a temperatura do ar diária considerou-se a máxima e mínima observada no mesmo período do dia considerado para  $H_g^d$ , ou seja, valores de máximo e mínimo compreendidos entre 06h00min às 16h59min. Para a temperatura do ar mensal, considerou-se a média mensal dos valores máximos e mínimos, verificados diariamente. Na aplicação dos dados horários foi considerada para a temperatura do ar, a média horária mensal dos valores máximos e mínimos observados no intervalo de uma hora. O procedimento horário para a temperatura do ar assemelha-se com o adotado na obtenção de  $H_g^h$ .

Os dados de duração do brilho solar diário ( $n$ ) foram utilizados sem nenhuma mudança. Para a estimativa da  $H_g^d$ , utilizaram-se os valores observados pelo heliográfico. Na estimativa da  $H_g^m$  foram utilizados os valores médios mensais da insolação correspondente ao mês de estudo.

### 3.4 Irradiância solar global horária no topo da atmosfera ( $R_o$ )

A irradiância solar global horária no topo da atmosfera ( $R_o$ ) foi calculada conforme as equações abaixo, definidas por Iqbal (1983):

$$R_o = S_o E_o \cos \theta_z \quad (5)$$

em que  $S_o$  é a constante solar ( $S_o = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ ),  $E_o$  é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre e  $\cos \theta_z$  é o cosseno do ângulo zenital solar, sendo as expressões definidas por, respectivamente,

$$E_o = 1 + 0,033 \cos \left[ \frac{2\pi d_n}{365} \right] \quad (6)$$

$$\cos \theta_z = \text{seno} \phi \text{seno} \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (7)$$

em que  $d_n$  é o número de dias do ano, para 1º de janeiro,  $d_n = 1$  e para 31 de dezembro,  $d_n = 365$ ,  $\phi$  é latitude local,  $\delta$  é a declinação solar e  $\omega$  é o ângulo horário solar, sendo definidas por, respectivamente,



$$\delta = 23,45 \operatorname{seno} \left( \frac{360}{365} (d_n + 284) \right) \quad (8)$$

$$\omega = 15(h - M) + (l_i - l_p) \quad (9)$$

em que,  $h$  é a hora local padrão,  $M$  a hora ao meio dia,  $l_i$  é a longitude local e  $l_p$  a longitude padrão (Meridiano de 45°).

O fotoperíodo ( $N$ ), em horas, usada no modelo de Ångström & Prescott é definida pela seguinte expressão:

$$N = \frac{2}{15^\circ} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10)$$

Para calcular a  $R_g$  horária no topo da atmosfera, foi criado um arquivo padrão com extensão (.xls) contendo planilhas eletrônicas com as equações acima inseridas. Além de estimar valores esperados da irradiância solar global horária no topo da atmosfera ( $R_0$ ), foi elaborado uma planilha na qual a integração diária para encontrar  $H_0^g$  (irradiação solar global diária no topo da atmosfera) [ $\text{MJm}^{-2}$ ] fosse realizada. Para facilitar a estimativa de  $R_g$ , basta entrar com o valor da latitude local (em graus) (positivo no hemisfério Norte (HN), negativa no Hemisfério Sul (HS)), que serão gerados, a partir de cálculos intrínsecos, os valores esperados para todo o ano (valores horários no intervalo horário de 05h00min a 18h59min).

### 3.5 Modelos empíricos baseados na temperatura do ar

De acordo com Paulescu *et al.*, (2010) os modelos empíricos utilizados para estimar a irradiação solar global, que faz o uso de temperatura do ar, podem ser separados em duas classes: Primeiro e Segunda. Os modelos de primeira classe são os que levam em conta a temperatura do ar e outras variáveis meteorológicas inseridas (precipitação, umidade relativa do ar, duração do brilho solar, pressão de vapor d'água), para aumentar a qualidade de previsão. Já os modelos de segunda classe utilizam somente a temperatura do ar como variável de entrada. Os modelos que foram avaliados nos locais de Alagoas pertencem à segunda classe, que serão descritos a seguir.

### 3.5.1 Modelo 1 – Bristow & Campbell (1984)

O calor sensível é responsável pela variação da temperatura do ar, assim, é possível obter uma relação matemática entre as diferenças de temperatura e a radiação solar, pois a temperatura é um reflexo do balanço de radiação na superfície terrestre. Essa concepção foi utilizada para se encontrar uma relação entre o calor sensível, calor latente e a razão de Bowen. Usando este argumento, Bristow & Campbell (1984) sugeriram uma relação para a irradiação solar global diária ( $H_g^d$ ), como função da irradiação solar diária no topo da atmosfera ( $H_o^g$ ) e a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas do ar ( $\Delta T(^{\circ}C)$ ), conforme expressão 10,

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \beta_1 \left[ 1 - \exp\left(-\beta_2 (\Delta T)^{\beta_3}\right) \right] \quad (11)$$

em que,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  são coeficientes que possuem significado físico. O coeficiente  $\beta_1$ , representa a máxima transmitância (característica da área de estudo) para céu claro, variando com a elevação e os constituintes do ar. Já os outros ( $\beta_2$  e  $\beta_3$ ) determinam como o coeficiente  $\beta_1$  varia com o aumento do  $\Delta T$ , alternando entre ambientes úmidos e áridos.

### 3.5.2 Modelo 2 – Meza & Varas (2000)

Meza & Varas (2000) adaptaram o modelo original de Bristow & Campbell (1984), fixando os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_3$  para fazer a estimativa da irradiação solar global no Chile. O modelo modificado necessita apenas da calibração do coeficiente  $\beta_2$ , já que  $\beta_1$  (0,75) e  $\beta_3$  (2,00) são fixos. A modificação é expressa da seguinte forma:

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = 0,75 \left[ 1 - \exp\left(-\beta_2 (\Delta T)^2\right) \right] \quad (12)$$

### 3.5.3 Modelo 3 – Donatelli & Campbell (1998)

Donatelli & Campbell (1998) modificaram o modelo de Bristow & Campbell (1984), introduzindo a média mensal da amplitude térmica ( $\Delta T_m$ ),

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \beta_1 \left[ 1 - \exp\left(-\beta_2 \frac{(\Delta T)^{\beta_3}}{(\Delta T_m)}\right) \right] \quad (13)$$

### 3.5.4 Modelo 4 – Weiss *et al.*, (2001)

Weiss *et al.*, (2001) modificaram o modelo original de Bristow & Campbell (1984) inserindo irradiação solar global diária no topo da atmosfera ( $H_o^g$ ) em curto prazo, destinado a atuar como um fator de escala que permite o regime de temperatura ( $\Delta T$ ) acomodar uma maior variedade de valores para a irradiação solar global diária ( $H_g^d$ ). Além do acréscimo do  $H_o^g$ , os autores fixaram valores para os coeficientes  $\beta_1$  (0,75) e  $\beta_3$  (2,00), concordando com a adaptação de Meza e Varas (2000) e necessitando apenas de ajustamento para o coeficiente  $\beta_2$ ,

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = 0,75 \left[ 1 - \exp \left( -\beta_2 \frac{(\Delta T)^2}{(H_o^g)} \right) \right] \quad (14)$$

### 3.5.5 Modelo 5 – Abraha & Savage (2008)

Abraha & Savage (2008) ajustaram o modelo de Bristow & Campbell (1984), fixando valores para os coeficientes  $\beta_1$  (0,75) e  $\beta_3$  (2,00), inserindo a média da amplitude térmica mensal ( $\Delta T_m$ ) na exponencial. O modelo modificado requer a calibração do coeficiente  $\beta_2$ ,

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = 0,75 \left[ 1 - \exp \left( -\beta_2 \frac{(\Delta T)^2}{(\Delta T_m)} \right) \right] \quad (15)$$

### 3.5.6 Modelo 6 – Hargreaves & Samani (1982)

Comparado com um dia de céu claro, a cobertura de nuvens geralmente diminui a temperatura máxima do ar devido à menor intensidade de radiação solar aumenta a temperatura mínima do ar devido ao aumento das emissões para baixo e reflexão da radiação de onda longa por nuvens durante a noite, Allen (1997). Baseada na suposição de que a diferença entre a temperatura diária do ar máxima e mínima fornece uma indicação geral de nebulosidade, Hargreaves & Samani (1982) propuseram a estimativa de  $H_g^d$  em função da  $H_o^g$  e da diferença entre a temperatura do ar máxima e mínima diária ( $\Delta T(^{\circ}C)$ ),

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

em que  $\beta_1$  é o coeficiente a ser determinado. Inicialmente, os autores indicaram para o coeficiente  $\beta_1$  valores de 0,17 e 0,16 para regiões de climas áridos e semiáridos,

respectivamente. Posteriormente, foi recomendado o uso de  $\beta_1 = 0,16$  para região do interior (locais não costeiros que não recebem influência de grandes corpos de água (oceano)) e  $\beta_1 = 0,19$  para região litorânea (Locais costeiros – com grande influência de massa de água oceânica). Nos locais de Alagoas os coeficientes utilizados serão os ajustados com dados locais.

### 3.5.7 Modelo 7 – Annandale *et al.*, (2002)

Annandale *et al.*, (2002) introduziram o efeito da altitude, na forma multiplicativa no modelo de Hargreaves & Samani (1982).

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \beta_1 \left(1 + 2,7 \times 10^{-5} \times \text{Altitude}\right) (\Delta T)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Altitude é um coeficiente de entrada ligada a uma estação meteorológica particular. Segundo os autores, a necessidade de uma correção de elevação do modelo de Hargreaves & Samani (1982) foi indicada por Allen (1997) para nove localidades da América do Norte.

### 3.5.8 Modelo 8 – Hargreaves *et al.*, (1985)

Hargreaves *et al.*, (1985) ajustaram o modelo original de Hargreaves & Samani (1982) para melhorar seu desempenho. Para isso, propuseram coeficientes ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ), conforme expresso na equação 18,

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \left( \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} + \beta_2 \right) \quad (18)$$

### 3.5.9 Modelo 9 – Hunt *et al.*, (1998)

Hunt *et al.*, (1998) mencionaram uma modificação no modelo 6 de Hargreaves & Samani (1982). Foi inserido o Coeficiente  $\beta_2$  dividido por  $H_o^g$  de forma aditiva, que exprime a diferença entre os modelo 8 e 9, a nova expressão é mostrada da seguinte forma:

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \beta_1 (\Delta T)^{\frac{1}{2}} + \frac{\beta_2}{H_o^g} \quad (19)$$

### 3.6 Modelo empírico baseado na duração do brilho solar [Modelo 10 – Ångström & Prescott (1940)]

Ångström (1924) sugeriu uma relação linear entre a radiação solar global média diária esperada em um dia completamente claro e a insolação solar média diária com a duração máxima possível do dia para estimar a irradiação solar global diária. Prescott (1940) melhorou o modelo para a expressão seguinte,

$$\frac{H_g^d}{H_o^g} = \left( \beta_1 + \beta_2 \frac{n}{N} \right) \quad (20)$$

em que,  $n$  é a duração do brilho solar diário em horas,  $N$  o fotoperíodo em horas,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes a serem determinados para cada local. O coeficiente  $\beta_1$  pode ser interpretado fisicamente como a fração da radiação que atinge a terra durante um dia completamente nublado, dependendo do tipo da espessura das nuvens predominantes (Ångström, 1956). Sendo a soma de  $\beta_1$  e  $\beta_2$  é considerada como a fração potencial da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera. Desse modo, os valores da soma de  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são influenciados pelo comprimento ótico e composição atmosférica.

### 3.7 Ajuste dos modelos

Para obtenção dos coeficientes dos modelos ajustados, foram utilizados os dados de 2007 e 2008, e para validação foram usados os dados de 2009. As análises dos modelos baseados na amplitude térmica foram divididas em três escalas: horária, diária e mensal. Para o modelo baseado na duração do brilho solar diário ( $n$ ), foram divididas em escalas: diária e mensal. Ressalta-se que o critério de escolha dos dados para o ajuste dos coeficientes e validação dos modelos assemelha-se com os existentes na literatura (Chineke, 2008; Li H *et al.*, 2010; Mubiru & Banda, 2008; Liu & Scott, 2001), onde a primeira parcela dos dados são utilizados para ajustar e a segunda para avaliação do desempenho.

No ajuste dos coeficientes foi elaborado um programa tendo os modelos e as condições de contornos necessárias nele inseridas. Inicialmente, o programa faz a leitura dos dados de entrada: transmitância atmosférica (que é a razão entre a irradiação solar global e a irradiação solar global no topo da atmosfera) e amplitude térmica (que é a diferença entre a temperatura máxima e a mínima em um período de tempo definido). Para o modelo de Ångström & Prescott, considera-se a razão estabelecida entre a duração do brilho solar diário e o fotoperíodo. Com base em um programa estatístico, valores iniciais aproximado dos

possíveis coeficientes são gerados. Em seguida os coeficientes gerados a partir do valor inicial são inseridos no algoritmo. Com a entrada das informações necessárias, o programa é acionado para assim gerar os reais coeficientes esperados de cada modelo para cada estação. Como resultado final, o programa cria um arquivo com extensão (.txt) contendo os coeficientes de cada modelo.

O programa foi desenvolvido para processar os dados de cada estação separadamente, e gerar, simultaneamente, os coeficientes dos modelos nele inserido, salvando em arquivos separados. Para minimizar a soma dos erros quadrados, foi utilizada uma regressão linear simples. Por fim, os coeficientes gerados foram inseridos nos modelos, e em seguida a estimativa foi realizada. Os valores estimados foram comparados com os observados em planilhas eletrônicas. A estatística foi desenvolvida com a geração dos gráficos por intermédio do programa estatístico Origin6.0<sup>®</sup>. Os coeficientes dos dez modelos foram obtidos com aplicação da técnica estatística denominada de método dos mínimos quadrados (Hoffmann & Vieira, 1977; Spiegel, 1978; David *et al.*, 2008). A Tabela 4 resume os modelos e a quantidade de coeficientes que foram ajustados.

**Tabela 4** - Modelos e os coeficientes que foram ajustados.

Modelos		Coeficientes
1 – Bristow & Campbell (1984)		$\beta_1, \beta_2$ e $\beta_3$
2 – Meza & Varas (2000)	Modelo de Bristow & Campbell e os modificados	$\beta_2$
3 – Donatelli & Campbell (1998)		$\beta_1, \beta_2$ e $\beta_3$
4 – Weiss <i>et al.</i> , (2001)		$\beta_2$
5 – Abraha & Savage (2008)		$\beta_2$
6 – Hargreaves & Samani (1982)		Modelo de
7 – Annandale <i>et al.</i> , (2002)	Hargreaves &	$\beta_1$
8 – Hargreaves <i>et al.</i> , (1985)	Samani e os	$\beta_1$ e $\beta_2$
9 – Hunt <i>et al.</i> , (1998)	adaptados	$\beta_1$ e $\beta_2$
10 – Ångström & Prescott (1940)		$\beta_1$ e $\beta_2$

Fonte: (Autor, 2012)

### 3.8 Regime de temperatura

A amplitude é a medida descritiva numérica mais simples para a variação em um conjunto de dados, sendo igual à diferença entre o maior e o menor valor em uma amostra de dados. Existem dois regimes de temperatura distintos, o primeiro calcula o intervalo de

temperatura de forma simples (Hargreaves & Samani, 1982) e o segundo calcula a faixa de temperatura mais complexa (Bristow & Campbell, 1984), respectivamente dada pelas seguintes expressões:

$$\Delta T_1(i) = T_{\max}(i) - T_{\min}(i) \quad (21)$$

$$\Delta T_2(i) = T_{\max}(i) - \frac{[T_{\min}(i) + T_{\min}(i+1)]}{2} \quad (22)$$

em que,  $\Delta T_1(i)$  e  $\Delta T_2(i)$  são a variação diurna da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) do dia ( $i$ );  $T_{\max}(i)$  é a temperatura máxima do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) do dia ( $i$ );  $T_{\min}(i)$  e  $T_{\min}(i+1)$  são as temperaturas mínima do ar do dia atual e do dia posterior, respectivamente. Os modelos foram avaliados com os dois regimes de temperatura (equações 21 e 22), para verificar o melhor ajuste no seu desempenho. Ressalta-se que na avaliação irradiação solar global média horária mensal levou-se em consideração o uso de  $\Delta T_1(i)$ , pela simplicidade.

### 3.9 Análise da qualidade dos dados

Para garantir a qualidade dos dados em análise, levou-se em consideração o critério da filtragem adotada por Ceballos et al., (2010), em que:

- O valor de irradiação média no dia deve estar no intervalo:  $[2,59 - 34,56](\text{MJm}^{-2})$ ;
- A diferença entre o valor observado e o estimado no dia deve ser  $|\text{Observado} - \text{Estimado}| < 8,64(\text{MJm}^{-2})$ ;
- Aplicados os dois filtros anteriores, o número de pares (Observados, Estimados) restantes no mês deve não ser inferior a 15.

### 3.10 Avaliação de desempenho dos modelos

Para a verificação do desempenho dos modelos, tanto para a estimativa da irradiação solar global diária e média diária mensal, quanto para a média horária mensal, foram utilizados alguns índices estatísticos para medidas de erros e avaliação de variação, tais como: média dos desvios (med) (Ceballos et al., 2010), desvio padrão da população de desvios (dpp) (Ceballos et al., 2010), coeficiente de correlação (r) (David et al. 2008), índice de concordância de Willmott (d) (Willmott, 1981; Souza & Escobedo, 1995) e o Teste-t estatístico (David et al., 2008), descritos abaixo:

### 3.10.1 Média dos desvios (med)

O indicativo med (equação 23) representa a média dos desvios e fornece informações quanto ao desempenho do modelo. Um valor positivo para med mostra uma superestimativa, enquanto um valor negativo representa uma subestimativa. Quanto menor o valor absoluto de med, melhor será o desempenho do modelo testado.

$$med = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} (e_i - o_i) \quad (23)$$

em que:  $e_i$  representa os valores estimados,  $o_i$  os valores observados e  $N'$  o número de dados.

### 3.10.2 Desvio padrão da população de desvios (dpp)

O dpp (equação 24) que é o desvio padrão da população de desvios mede a dispersão média em torno do valor médio, ou seja, informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo. O dpp ajuda a conhecer como o conjunto de desvios se concentra ou se distribui em torno de uma média aritmética. Sendo sempre um valor que está na mesma unidade dos dados originais da amostra. O dpp, sempre apresentara valores positivos, embora possa mostrar valor igual a zero caso exista nenhuma variação. Quanto menor o valor de dpp, melhor será a avaliação do desempenho do modelo.

$$dpp = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N'} (P - \bar{P})^2}{(N' - 1)}} \quad (24)$$

em que:  $P$  é o desvio entre os valores observados e estimados,  $\bar{P}$  é a média dos desvios e  $N'$  o número de dados.

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

O índice de concordância (d) de Willmott (1981), utilizado no trabalho de Souza & Escobedo (1995), expressa a exatidão entre os valores observados e os estimados. O índice (d) varia de 0,0 a 1,0, onde um valor calculado de 1 indica concordância perfeita entre os dados observados e estimados, e 0,0 representa nenhuma concordância.



$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N'} (e_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^{N'} (|e_i - \bar{e}_i| + |o_i - \bar{o}_i|)^2} \quad (25)$$

em que:  $e_i$  representa os valores estimados,  $o_i$  os valores observados,  $\bar{e}_i$  a média dos valores estimados,  $\bar{o}_i$  a média dos valores observados e  $N'$  o número de dados.

### 3.10.4 Coeficiente de correlação

O coeficiente de correlação ( $r$ ) (equação 26) mede a força relativa de uma relação linear entre duas variáveis numéricas. Os valores para ( $r$ ) vão desde -1, para uma correlação negativa perfeita, até +1, para uma correlação positiva perfeita. Perfeita significa dizer que, se os pontos fossem desenhados em um gráfico de dispersão, todos esses pontos poderiam ser ligados por uma linha reta, como pontuou David *et al.*, (2008). Na prática, a quantidade  $R^2$ , por vezes denominado de coeficiente de determinação, situa-se entre 0 e 1.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N'} (e_i - \bar{e}_i)(o_i - \bar{o}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N'} (e_i - \bar{e}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{N'} (o_i - \bar{o}_i)^2}} \quad (26)$$

em que:  $e_i$  representa os valores estimados,  $o_i$  os valores observados,  $\bar{e}_i$  a média dos valores estimados,  $\bar{o}_i$  a média dos valores observados e  $N'$  o número de dados.

### 3.10.5 Teste - t

O Teste – t permite que modelos sejam comparados e, ao mesmo tempo indica se a estimativa é significativa ou não. Para determinar se um modelo é estatisticamente significativo, o valor absoluto do t calculado deve ser menor que o valor t crítico, obtido a partir de padrão de quadros estatísticos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Coeficientes locais para estimativa da irradiação solar global média horária mensal

Os coeficientes gerados pelos modelos que tiveram melhor ajuste (Tabela 5), pelo uso da média horária mensal da temperatura do ar ( $\Delta T_1$ ), mostraram ser dependentes da região de estudo. O efeito do regime de temperatura foi um pouco elevado para o coeficiente  $\beta_2$  dos modelos 2, 4 e 5. Maiores valores de  $\beta_2$  foram encontrados para o modelo 4 apresentando máximo de 3,92 para o mês de novembro e mínimo de 1,53 no mês de maio. Por sua vez, foram encontrados para os modelos 2 e 5, variações de  $\beta_2$  entre 0,48 e 1,54.

Nas demais regiões estudadas, os modelos modificados 2, 4 e 5, a partir da calibração, apresentaram coeficientes em intervalos próximos aos encontrados para a região de Água Branca, mostrando, em termos da média horária mensal, não serem dependentes da altitude e do clima, observados nos padrões dos coeficientes ajustados. O regime de temperatura adotado não teve efeito significativo sobre a calibração do modelo 6. Os valores encontrados para  $\beta_1$  do modelo 6, gerou grandes variações no decorrer dos meses (43,24%), apresentando um valor mínimo (0,37) para maio e máximo (0,53) em novembro, não mostrando um padrão anual. Apesar da região de Água Branca ser localizada em uma altitude aproximadamente, 11 vezes maior que a de Pão de Açúcar, o coeficiente  $\beta_1$  não indicou ser dependente da altitude. Os coeficientes encontrados para modelo 7, que possuem a altitude como fator de correção, não diferiram para o modelo 6. Os valores  $\beta_1$  e  $\beta_2$  dos modelos 8 e 9, para as regiões de Água Branca e Pão de Açúcar, mostraram não ser influenciados pela altitude e tão pouco pelo regime de temperatura adotado. Para o coeficiente  $\beta_1$ , foram encontrados valor máximo de 0,70 no mês de novembro na região de Água Branca e mínimo de 0,03 para o mês de Maio. O valor de  $\beta_2 = -0,01$  no mês de Fevereiro para a região de Água Branca, foi o menor encontrado para o modelo 9.

Ajustado o modelo 8 para a região de Mossoró, Melo (2009) identificou que os coeficientes gerados variaram durante o ano, com máximo de ( $\beta_1 = 0,214$ ) no mês de abril e mínimo de ( $\beta_1 = 0,007$ ) para novembro, indicando que não houve nenhum padrão nos coeficientes gerados. O modelo de Allen (1995), modificado do original de Hargreaves & Samani (1982), produziu em Mossoró valores de  $\beta_1$  em um intervalo distinto dos encontrados para as regiões de Alagoas. O coeficiente  $\beta_1$  encontrados para o modelo 6 nas regiões de Água Branca, Pão de Açúcar, Santana de Ipanema, Palmeiras dos Índios, Arapiraca, Maceió e Coruripe não apresentou nenhum padrão para a estação chuvosa (abril a agosto) nem para a estação seca (setembro a março). Dentre os valores encontrados, o mês de fevereiro para a

região de Coruripe possui o menor coeficiente e o mês de novembro para a região de Maceió o maior valor, para a estação seca.

**Tabela 5** - Coeficientes mensais (Coef.) e média dos desvios padrões ( $\overline{DP}$ ) dos modelos, para locais de Alagoas, com uso de  $\Delta T_1$ .

<b>Água Branca</b>									
<b>Modelos</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Mês\ Coef.</b>	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,71	2,54	1,09	0,46	0,46	0,38	0,11	0,48	-0,05
<b>Fevereiro</b>	0,64	2,15	0,91	0,44	0,44	0,41	0,03	0,45	-0,01
<b>Março</b>	0,78	2,91	1,09	0,48	0,47	0,46	0,03	0,48	0,00
<b>Abril</b>	1,02	3,37	1,26	0,50	0,49	0,05	0,50	0,46	0,10
<b>Mai</b>	0,48	1,53	0,57	0,37	0,36	0,03	0,37	0,33	0,08
<b>Junho</b>	0,60	1,76	0,66	0,40	0,39	0,12	0,30	0,38	0,06
<b>Julho</b>	0,60	1,82	0,67	0,41	0,40	0,24	0,18	0,39	0,05
<b>Agosto</b>	0,53	1,74	0,65	0,40	0,39	0,27	0,14	0,38	0,04
<b>Setembro</b>	0,85	3,05	1,17	0,46	0,45	0,09	0,44	0,44	0,06
<b>Outubro</b>	0,75	2,80	1,07	0,46	0,45	0,31	0,17	0,42	0,12
<b>Novembro</b>	0,96	3,92	1,55	0,53	0,52	0,70	-0,21	0,50	0,10
<b>Dezembro</b>	0,66	2,42	1,00	0,46	0,46	0,63	-0,20	0,44	0,08
<b>(<math>\overline{DP}</math>) (<math>\pm</math>)</b>	0,08	0,36	0,11	0,02	0,02	0,13	0,15	0,02	0,05

<b>Pão de Açúcar</b>									
<b>Modelos</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Mês\ Coef.</b>	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,86	4,16	1,35	0,50	0,49	0,34	0,19	0,51	-0,06
<b>Fevereiro</b>	0,71	2,92	1,10	0,47	0,47	0,42	0,07	0,49	-0,05
<b>Março</b>	0,81	3,11	1,33	0,49	0,48	0,28	0,27	0,48	0,03
<b>Abril</b>	0,91	2,80	1,34	0,51	0,51	0,39	0,15	0,46	0,14
<b>Mai</b>	0,69	1,73	0,86	0,43	0,43	0,16	0,31	0,39	0,10
<b>Junho</b>	0,97	2,34	1,21	0,50	0,50	0,24	0,29	0,46	0,09
<b>Julho</b>	0,74	1,90	1,00	0,47	0,47	0,27	0,23	0,45	0,05
<b>Agosto</b>	0,68	1,93	0,97	0,46	0,46	0,38	0,10	0,44	0,06
<b>Setembro</b>	1,11	4,23	1,59	0,50	0,49	0,19	0,37	0,46	0,11
<b>Outubro</b>	0,97	4,26	1,51	0,50	0,50	0,39	0,15	0,44	0,22
<b>Novembro</b>	1,36	6,17	2,23	0,51	0,51	0,21	0,38	0,45	0,22
<b>Dezembro</b>	0,73	3,25	1,18	0,48	0,48	0,27	0,27	0,45	0,09
<b>(<math>\overline{DP}</math>) (<math>\pm</math>)</b>	0,13	0,59	0,19	0,02	0,02	0,17	0,20	0,03	0,06

Fonte: (Autor, 2012)

Continuação Tabela 5

<b>Santana do Ipanema</b>									
<b>Modelos</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Mês\ Coef.</b>	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,31	1,25	0,72	0,40	0,40	0,75	-0,54	0,39	0,03
<b>Fevereiro</b>	0,29	1,07	0,65	0,38	0,38	0,46	-0,12	0,36	0,07
<b>Março</b>	0,37	1,43	0,78	0,41	0,41	0,34	0,11	0,38	0,10
<b>Abril</b>	0,43	1,51	0,84	0,42	0,41	-0,42	1,16	0,36	0,16
<b>Mai</b>	0,31	0,86	0,52	0,35	0,34	-0,22	0,74	0,29	0,14
<b>Junho</b>	0,33	0,84	0,59	0,37	0,37	-0,18	0,74	0,32	0,12
<b>Julho</b>	0,32	0,82	0,58	0,37	0,37	-0,02	0,54	0,33	0,08
<b>Agosto</b>	0,28	0,81	0,54	0,36	0,35	-0,04	0,56	0,32	0,10
<b>Setembro</b>	0,40	1,61	0,84	0,40	0,40	-0,15	0,79	0,35	0,15
<b>Outubro</b>	0,31	1,19	0,72	0,40	0,40	0,73	-0,51	0,34	0,21
<b>Novembro</b>	0,35	1,53	0,87	0,44	0,44	1,48	-1,62	0,37	0,28
<b>Dezembro</b>	0,34	1,36	0,74	0,41	0,41	1,18	-1,14	0,38	0,11
<b>(<math>\overline{DP}</math>) (<math>\pm</math>)</b>	0,05	0,19	0,09	0,02	0,02	0,23	0,34	0,03	0,07
<b>Palmeira dos Índios</b>									
<b>Modelos</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Mês\ Coef.</b>	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,72	2,95	1,12	0,48	0,48	0,46	0,03	0,48	0,02
<b>Fevereiro</b>	0,52	1,75	0,69	0,39	0,38	0,68	-0,34	0,38	0,02
<b>Março</b>	0,71	3,04	1,08	0,48	0,48	0,31	0,22	0,47	0,02
<b>Abril</b>	0,83	3,14	1,18	0,51	0,50	0,85	-0,41	0,45	0,14
<b>Mai</b>	0,66	1,66	0,78	0,41	0,41	-0,23	0,70	0,35	0,13
<b>Junho</b>	0,73	1,75	0,86	0,44	0,44	0,05	0,43	0,40	0,09
<b>Julho</b>	0,68	1,66	0,87	0,44	0,44	0,16	0,32	0,41	0,07
<b>Agosto</b>	0,88	1,94	1,07	0,47	0,46	-0,13	0,66	0,29	0,40
<b>Setembro</b>	1,02	3,36	1,09	0,48	0,48	0,32	0,17	0,42	0,15
<b>Outubro</b>	0,94	3,46	1,35	0,52	0,52	0,55	-0,03	0,40	0,38
<b>Novembro</b>	1,24	4,88	1,80	0,56	0,56	0,40	0,19	0,44	0,40
<b>Dezembro</b>	0,78	3,02	1,19	0,49	0,49	0,17	0,40	0,43	0,22
<b>(<math>\overline{DP}</math>) (<math>\pm</math>)</b>	0,13	0,47	0,17	0,03	0,03	0,32	0,38	0,03	0,07

Fonte: (Autor, 2012)

Continuação Tabela 5

<b>Arapiraca</b>									
<b>Modelos</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Mês\ Coef.</b>	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,60	2,68	0,99	0,45	0,45	0,23	0,29	0,46	-0,04
<b>Fevereiro</b>	0,53	2,24	0,85	0,43	0,43	0,21	0,29	0,44	-0,03
<b>Março</b>	0,64	2,58	0,99	0,46	0,46	0,53	-0,09	0,46	-0,01
<b>Abril</b>	0,70	2,36	1,06	0,48	0,48	1,08	-0,73	0,43	0,15
<b>Mai</b>	0,67	1,61	0,82	0,42	0,42	-0,07	0,55	0,35	0,16
<b>Junho</b>	0,68	1,65	0,94	0,45	0,45	0,47	-0,01	0,38	0,13
<b>Julho</b>	0,51	1,19	0,79	0,41	0,41	0,02	0,50	0,38	0,08
<b>Agosto</b>	0,52	1,40	0,78	0,42	0,42	0,43	-0,02	0,36	0,14
<b>Setembro</b>	0,58	2,10	0,94	0,46	0,46	1,28	-1,04	0,34	0,34
<b>Outubro</b>	0,51	1,55	0,91	0,47	0,47	2,43	-2,63	0,21	0,87
<b>Novembro</b>	0,50	2,38	0,98	0,45	0,45	0,56	-0,15	0,38	0,25
<b>Dezembro</b>	0,47	1,65	0,85	0,44	0,44	1,30	-1,17	0,33	0,41
<b>&lt;DP&gt; (<math>\pm</math>)</b>	<i>0,08</i>	<i>0,33</i>	<i>0,13</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,38</i>	<i>0,48</i>	<i>0,03</i>	<i>0,08</i>

<b>Maceió</b>									
<b>Modelos</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		<b>9</b>	
<b>Mês\ Coef.</b>	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,94	4,16	1,35	0,52	0,51	0,50	0,03	0,52	-0,01
<b>Fevereiro</b>	0,84	3,42	1,20	0,49	0,49	0,47	0,02	0,49	0,02
<b>Março</b>	0,91	3,60	1,21	0,49	0,49	0,39	0,12	0,44	0,15
<b>Abril</b>	1,17	3,56	1,56	0,55	0,55	0,65	-0,11	0,41	0,35
<b>Mai</b>	0,79	1,94	0,92	0,45	0,45	-0,55	1,09	0,32	0,26
<b>Junho</b>	0,90	1,90	1,10	0,48	0,48	0,09	0,44	0,35	0,24
<b>Julho</b>	0,84	1,96	1,07	0,47	0,47	-0,13	0,68	0,38	0,17
<b>Agosto</b>	0,72	1,86	0,97	0,46	0,46	0,55	-0,11	0,36	0,23
<b>Setembro</b>	0,93	3,81	1,24	0,52	0,52	0,90	-0,45	0,41	0,28
<b>Outubro</b>	0,73	3,02	1,10	0,51	0,51	1,41	-1,11	0,38	0,39
<b>Novembro</b>	1,05	5,22	1,49	0,56	0,56	1,02	-0,55	0,47	0,29
<b>Dezembro</b>	0,92	3,94	1,33	0,53	0,53	0,95	-0,51	0,48	0,17
<b>&lt;DP&gt; (<math>\pm</math>)</b>	<i>0,15</i>	<i>0,59</i>	<i>0,20</i>	<i>0,03</i>	<i>0,03</i>	<i>0,29</i>	<i>0,34</i>	<i>0,04</i>	<i>0,07</i>

Fonte: (Autor, 2012)

Continuação Tabela 5

Coruripe									
Modelos	2	4	5	6	7	8		9	
Mês\ Coef.	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Janeiro</b>	0,47	1,88	0,88	0,42	0,41	0,35	0,09	0,40	0,05
<b>Fevereiro</b>	0,37	1,40	1,06	0,31	0,31	0,05	0,46	0,28	0,12
<b>Março</b>	0,60	2,64	0,98	0,43	0,43	-0,16	0,77	0,33	0,33
<b>Abril</b>	0,82	2,76	1,17	0,50	0,50	0,83	-0,39	0,40	0,24
<b>Mai</b>	0,68	1,56	0,86	0,44	0,43	0,54	-0,12	0,33	0,20
<b>Junho</b>	0,66	1,63	0,95	0,47	0,47	1,33	-1,04	0,35	0,20
<b>Julho</b>	0,50	1,25	0,81	0,43	0,43	0,66	-0,30	0,36	0,12
<b>Agosto</b>	--	--	--	--	--	--	--	--	--
<b>Setembro</b>	0,55	2,12	0,99	0,44	0,44	0,34	0,13	0,36	0,22
<b>Outubro</b>	0,49	1,52	0,74	0,40	0,40	0,64	-0,30	0,32	0,25
<b>Novembro</b>	0,65	3,60	1,24	0,48	0,48	0,60	-0,17	0,40	0,29
<b>Dezembro</b>	0,48	2,03	0,94	0,44	0,44	0,63	-0,26	0,39	0,18
<b>&lt;DP&gt; (<math>\pm</math>)</b>	0,09	0,37	0,14	0,03	0,03	0,25	0,31	0,03	0,08

Fonte: (Autor, 2012)

Os coeficientes gerados dos modelos 7, 8 e 9 modificados do modelo original de Hargreaves & Samani (1982) não apresentaram um padrão específico. O coeficiente  $\beta_1$  do modelo 7 foi diferente entre as regiões climáticas do Sertão, Agreste e Litorânea/Zona da Mata. Encontrou-se uma diferença de 45,35% entre o máximo de 0,56 no mês de novembro para a região de Maceió e o mínimo de 0,31 no mês de fevereiro para a região de Coruripe. Os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  dos modelos 8 e 9 apresentaram valores com discrepâncias entre alguns regiões. Para as regiões de Coruripe, Palmeira dos Índios e Santana do Ipanema  $\beta_1$  e  $\beta_2$  do modelo 9 foram positivos. Já para o modelo 8, apenas para região de Pão de Açúcar os valores gerados foram positivos variando de 0,164 a 0,388 para  $\beta_1$  e 0,068 a 0,384 em  $\beta_2$ . Por sua vez, o coeficiente  $\beta_2$  dos modelos 8 e 9 foi o que mais apresentou um padrão negativo, principalmente para a estação seca, mostrando influência do local de observação. Foram encontrados valores negativos para  $\beta_1$  do modelo 8 com maior frequência, no mês de maio, nas regiões de Palmeira dos Índios, Arapiraca, Santana do Ipanema e Maceió, mostrando não ser afetado pelo clima da região. De maneira geral, todos os coeficientes gerados a partir da média horária mensal, não apresentaram nenhum padrão anual para as regiões estudadas. Tais divergências podem ser explicadas pelas variações locais e sazonais da nebulosidade, que decorre das alterações periódicas da dinâmica atmosférica (Almorox *et al.*, 2005).

## 4.2 Coeficientes locais para estimativa da irradiação solar global diária

Na calibração dos coeficientes dos modelos para estimar a  $H_g^d$ , utilizou-se duas metodologias distintas para o regime de temperatura. A proposta por Bristow & Campbell (1984), para ser usada em seu modelo original, e a utilizada no modelo original de Hargreaves & Samani (1982). Os valores dos coeficientes diários (Tabela 6) gerados a partir dos nove modelos para as regiões de Água Branca, Pão de Açúcar, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Arapiraca, São José da Laje, Maceió e Coruripe, não mostraram muitas diferenças pelo uso de  $\Delta T_1$  ou  $\Delta T_2$ , indicando que o uso diferente do  $\Delta T$  não influencia nos resultados finais, concordando com Liu X *et al.*, (2009). Isto é explicado pelo fato dessas regiões serem de clima tropical, onde não é comum advecção de grande escala, conforme pontuou Bristow & Campbell (1984). Chen *et al.*, (2004) identificaram a partir de 48 estações na china que o modelo original de Bristow & Campbell estima melhor em regiões de baixa latitude que em alta.

Os valores dos coeficientes gerados para as regiões estudadas são diferentes dos encontrados por Liu X *et al.*, (2009) para a província de Haerbin, na China, indicando a necessidade de calibração desses modelos com dados locais. Os coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$  do modelo 1, não apresentaram nenhum padrão dentre as regiões, como pode ser visto na Tabela 6. O coeficiente  $\beta_2$  foi mais afetado que  $\beta_1$  e  $\beta_3$ . O coeficiente  $\beta_1$  variou de 0,58 a 0,89, apresentando maiores valores para as regiões mais afastadas do litoral. Contudo, utilizando  $\Delta T_1$  foi verificado valores de 0,70 e 0,60, para as estações de Maceió e Palmeira dos Índios, respectivamente. O coeficiente  $\beta_3$  apresentou uma amplitude maior, compreendido no intervalo de 2,52 e 1,10, com maiores elevações para as regiões localizadas no litoral (Maceió e Coruripe), de acordo com a Tabela 6, representado sua dependência com as condições de nebulosidade local. Para o modelo 3, modificado do modelo original de Bristow & Campbell (1984), é possível notar que os valores encontrados para  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , são idênticos ao do modelo original para todas regiões. Isto implica dizer que a modificação não representou melhora na calibração do modelo, ou seja, a adaptação feita no modelo 3 com o uso de  $\Delta T_m$  não derivou em melhor resultado.

O coeficiente  $\beta_2$  dos modelos 2, 4 e 5 apresentaram valores distintos entre os locais, possuindo intervalo menor. O modelo 2 indicou valores para  $\beta_2$  variando de 0,012 a 0,024 e os modelos 4 e 5 variaram de 0,41 a 0,82 e 0,12 a 0,19, respectivamente. Quando os coeficientes do modelo são reduzidos do modelo original de Bristow & Campbell (1984), ou seja,  $\beta_1$  e  $\beta_3$  são fixos, enquanto o coeficiente  $\beta_2$  é ajustado (no caso dos modelos 2, 4 e 5) os valores

**Tabela 6** – Coeficientes diários e desvios padrões (DP) dos modelos, para locais de Alagoas, com uso de  $\Delta\Gamma_1$  nos modelos (6, 7, 8 e 9) e  $\Delta\Gamma_2$  nos modelos (1, 2, 3, 4 e 5).

Modelos	Água Branca						Pão de Açúcar					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,89	0,08	1,16	$\pm 0,113$	$\pm 0,011$	$\pm 0,154$	0,84	0,08	1,20	$\pm 0,077$	$\pm 0,016$	$\pm 0,165$
2	--	0,02	--	--	$\pm 0,0004$	--	--	0,02	--	--	$\pm 0,0003$	--
3	0,89	0,08	1,16	$\pm 0,113$	$\pm 0,011$	$\pm 0,154$	0,84	0,08	1,20	$\pm 0,077$	$\pm 0,016$	$\pm 0,165$
4	--	0,64	--	--	$\pm 0,012$	--	--	0,60	--	--	$\pm 0,012$	--
5	--	0,17	--	--	$\pm 0,003$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,004$	--
6	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,001$	--	--
7	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,001$	--	--
8	0,25	-0,19	--	$\pm 0,009$	$\pm 0,029$	--	0,22	-0,10	--	$\pm 0,010$	$\pm 0,032$	--
9	0,22	-3,40	--	$\pm 0,006$	$\pm 0,663$	--	0,20	-0,89	--	$\pm 0,006$	$\pm 0,701$	--

Modelos	Santana do Ipanema						Palmeira dos Índios					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,84	0,08	1,10	$\pm 0,088$	$\pm 0,014$	$\pm 0,151$	0,60	0,05	1,86	$\pm 0,018$	$\pm 0,025$	$\pm 0,291$
2	--	0,012	--	--	$\pm 0,0002$	--	--	0,02	--	--	$\pm 0,0007$	--
3	0,84	0,08	1,10	$\pm 0,088$	$\pm 0,014$	$\pm 0,151$	0,60	0,05	1,86	$\pm 0,018$	$\pm 0,025$	$\pm 0,291$
4	--	0,40	--	--	$\pm 0,007$	--	--	0,70	--	--	$\pm 0,006$	--
5	--	0,14	--	--	$\pm 0,003$	--	--	0,17	--	--	$\pm 0,003$	--
6	0,17	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,002$	--	--
7	0,17	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,18	--	--	$\pm 0,002$	--	--
8	0,96	-0,10	--	$\pm 0,007$	$\pm 0,027$	--	0,19	-0,003	--	$\pm 0,018$	$\pm 0,052$	--
9	0,17	-0,93	--	$\pm 0,005$	$\pm 0,607$	--	0,17	-1,26	--	$\pm 0,011$	$\pm 1,166$	--

Fonte: (Autor, 2012)



Continuação da Tabela 6

Modelos	Arapiraca						Maceió					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,76	0,08	1,24	$\pm 0,084$	$\pm 0,020$	$\pm 0,206$	0,70	0,02	2,11	$\pm 0,023$	$\pm 0,006$	$\pm 0,176$
2	--	0,02	--	--	$\pm 0,0003$	--	--	0,02	--	--	$\pm 0,0004$	--
3	0,76	0,08	1,24	$\pm 0,084$	$\pm 0,020$	$\pm 0,206$	0,70	0,02	2,11	$\pm 0,023$	$\pm 0,006$	$\pm 0,176$
4	--	0,63	--	--	$\pm 0,011$	--	--	0,84	--	--	$\pm 0,013$	--
5	--	0,16	--	--	$\pm 0,003$	--	--	0,18	--	--	$\pm 0,003$	--
6	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,20	--	--	$\pm 0,001$	--	--
7	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,20	--	--	$\pm 0,001$	--	--
8	0,22	-0,11	--	$\pm 0,011$	$\pm 0,034$	--	0,30	-0,29	--	$\pm 0,012$	$\pm 0,035$	--
9	0,20	-1,42	--	$\pm 0,007$	$\pm 0,753$	--	0,25	-5,00	--	$\pm 0,007$	$\pm 0,768$	--

Modelos	Coruripe						São José da Laje					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,58	0,02	2,50	$\pm 0,008$	$\pm 0,007$	$\pm 0,299$	0,77	0,07	1,17	$\pm 0,105$	$\pm 0,012$	$\pm 0,169$
2	--	0,02	--	--	$\pm 0,0004$	--	--	0,01	--	--	$\pm 0,0002$	--
3	0,58	0,02	2,51	$\pm 0,008$	$\pm 0,007$	$\pm 0,299$	0,77	0,07	1,17	$\pm 0,105$	$\pm 0,012$	$\pm 0,169$
4	--	0,61	--	--	$\pm 0,014$	--	--	0,42	--	--	$\pm 0,007$	--
5	--	0,16	--	--	$\pm 0,004$	--	--	0,12	--	--	$\pm 0,002$	--
6	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,16	--	--	$\pm 0,001$	--	--
7	0,17	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,16	--	--	$\pm 0,001$	--	--
8	0,14	-0,11	--	$\pm 0,013$	$\pm 0,039$	--	0,20	-0,14	--	$\pm 0,008$	$\pm 0,026$	--
9	0,15	-3,14	--	$\pm 0,008$	$\pm 0,846$	--	0,18	-2,2	--	$\pm 0,005$	$\pm 0,629$	--

Fonte: (Autor, 2012)

encontrados para  $\beta_2$  discordam muito dos verificados nos modelos 1 e 3. Estas discrepâncias no ajuste dos modelos, também foram observadas por Liu X *et al.*, (2009) para a província de Haerbin – China. Desse modo, a prática de fixar um valor  $\beta_1$  e  $\beta_3$ , nos modelos de Meza & Varas (2000), Weiss *et al.*, (2001) e Abraha & Savage (2008), ocasionou consequências inesperadas no mesmo local.

Bristow & Campbell (1984) encontraram valores para  $\beta_1$  variando de 0,70 a 0,77,  $\beta_2$  variando de 0,004 a 0,01 e  $\beta_3$  um valor fixo de 2,4, nas regiões avaliadas. Para o presente estudo encontrou-se valores distintos dos identificados pelo autor, para  $\beta_1$  verificou-se variação de 0,58 a 0,89,  $\beta_2$  de 0,02 a 0,08 e  $\beta_3$  não apresentou um valor padrão fixo, alterou de 1,10 a 2,52. Weiss *et al.*, (2001) propuseram valores fixos de 0,75, -0,226 e 2 para os coeficientes  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , respectivamente. Dos coeficientes ajustados para nossa região, nenhum local apresentou valores iguais ao proposto por estes autores. Meza & Varas (2000) utilizaram os valores de 0,70 para  $\beta_1$  e 2,4 para  $\beta_3$ , proposto por Bristow & Campbell (1984), e ajustaram o coeficiente  $\beta_2$  para 21 regiões do Chile, encontrando para  $\beta_2$  valores compreendidos entre 0,002 e 0,02, diferentemente dos verificados por Bristow & Campbell (1984), e das regiões de Alagoas. No modelo original de Bristow & Campbell (1984), os valores de  $\beta_2$  (0,02 – 0,08) e  $\beta_3$  (1,10 – 2,52), diferem em grande parte dos encontrados por Goodin *et al.*, (1999), que identificaram  $\beta_2$  (0,004 – 0,12) e  $\beta_3$  (1,67 – 2,55) para Kansas - Estados Unidos.

Hargreaves & Samani (1982), Allen *et al.*, (1998) e Annandale *et al.*, (2002) propuseram valores fixos de  $\beta_1 = 16$  para regiões no interior e  $\beta_1 = 0,19$  para regiões costeiras. Hargreaves & Samani (1982) definem regiões no interior como sendo todos os padrões climáticos dominados por uma grande massa de ar continental, enquanto regiões costeiras são locais próximos a um grande corpo de água. Para regiões costeiras, têm-se Maceió e Coruripe, as quais não apresentaram os mesmos valores citados acima. Em Maceió, encontra-se um valor acima dos propostos, já para Coruripe, o valor encontrado foi inferior aos recomendados. A região de Pão de Açúcar fica localizada a margem da bacia do rio São Francisco, sendo encontrado o um valor de  $\beta_1 = 0,19$ . Dentre os valores encontrados nota-se que não existe nenhum padrão correspondente aos valores propostos pelos autores. Para  $\beta_1$  teve valores com variações de 0,16 a 0,20. Diferentemente dos valores encontrados por Liu X *et al.*, (2009) para a província de Haerbin - China, que identificaram  $\beta_1$ , variando entre 0,135 e 0,166, indicando a necessidade de calibração desse modelo com dados locais. Ball *et al.*, (2004) também relataram uma grande variação nos valores de  $\beta_1$  (0,13 – 0,17) em 13 locais

dos Estados Unidos. Desse modo, a hipótese de utilizar  $\beta_1$  fixo no modelo original de Hargreaves & Samani (1982) tem que ser avaliada cuidadosamente.

No modelo original de Hargreaves & Samani (1982) (modelo 6) e nas modificações (modelos 7, 8 e 9), a forma diferente no  $\Delta T$  não teve efeito significativo sobre o coeficiente  $\beta_1$ . Principalmente sobre o modelo original de Hargreaves & Samani (1982) e aquele adaptado com o acréscimo da altitude (Annandale *et al.*, 2002). Assim, tem-se uso tanto no formato simples ( $\Delta T_1$ ) ou a forma mais complexa ( $\Delta T_2$ ). O coeficiente  $\beta_2$  dos modelos 8 e 9 mostrou-se mais sensível com os diferentes modelos de  $\Delta T$  que  $\beta_1$ . A calibração dos modelos com o regime de temperatura  $\Delta T_2$ , resultou em maiores valores (em módulo) para  $\beta_2$ , enquanto para o regime de temperatura  $\Delta T_1$ , menores valores (em módulo), foram verificados. Os valores obtidos para o coeficiente  $\beta_1$  não apresentaram discrepâncias. É notável que  $\beta_1$  médio do modelo 8 (0,31) foi maior que para o do modelo 9 (0,19), e nenhuma tendência diferente para o coeficiente  $\beta_2$ . Além disso, os valores de  $\beta_2$  do modelo 8 e 9 são em sua maioria negativos. Chen *et al.*, (2004), em 48 estações na china, destacou que o coeficiente  $\beta_1$  do modelo 8 variou de 0,10 a 0,29, com média de 0,19, enquanto o coeficiente  $\beta_2$  variou de -0,41 até 0,24 com média de 0,13.

De formar geral, o regime de temperatura  $\Delta T_1$  usado originalmente no modelo de Hargreaves & Samani (modelo 6), produziu uma maior precisão na calibração e ajuste (não tão grande quanto os obtidos com  $\Delta T_2$ ) dos modelos nos locais estudados. A calibração dos modelos com o uso do regime de temperatura  $\Delta T_2$ , não apresentou diferença significativa na metodologia adotada no trabalho de Hargreaves & Samani ( $\Delta T_1$ ). Assim, neste estudo, considerou-se padrão o regime de temperatura  $\Delta T_1$  para o modelo original de Hargreaves & Samani e suas modificações e  $\Delta T_2$  para o modelo original de Bristow & Campbell e as adaptações.

### **4.3 Coeficientes locais para estimativa da irradiação solar global média diária mensal**

Os valores dos coeficientes e dos desvios padrões para a  $H_g^m$ , gerados a partir dos nove modelos para as regiões de Alagoas são mostrados na Tabela 7. Os coeficientes mostraram não serem dependentes do regime de temperatura adotado. Apenas os coeficientes do modelo original de Bristow & Campbell e dos modelos modificados indicaram maiores diferenças entre o regime de temperatura adotado, para alguns locais. Contudo, em termos estatísticos percebe-se que a diferença entre os coeficientes torna-se insignificante, enquanto

**Tabela 7** – Coeficientes médios diários mensais e desvios padrões (DP) dos modelos, para locais de Alagoas, com uso de  $\Delta\Gamma_1$  nos modelos (6, 7, 8 e 9) e  $\Delta\Gamma_2$  nos modelos (1, 2, 3, 4 e 5).

Modelos	Água Branca						Pão de Açúcar					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,65	0,05	1,72	$\pm 0,045$	$\pm 0,050$	$\pm 0,610$	0,68	0,04	1,76	$\pm 0,036$	$\pm 0,039$	$\pm 0,549$
2	--	0,02	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,017	--	--	$\pm 0,0007$	--
3	0,65	0,05	1,72	$\pm 0,045$	$\pm 0,050$	$\pm 0,610$	0,68	0,04	1,76	$\pm 0,036$	$\pm 0,039$	$\pm 0,549$
4	--	0,63	--	--	$\pm 0,012$	--	--	0,56	--	--	$\pm 0,010$	--
5	--	0,17	--	--	$\pm 0,003$	--	--	0,17	--	--	$\pm 0,007$	--
6	0,18	--	--	$\pm 0,003$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,001$	--	--
7	0,18	--	--	$\pm 0,003$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,001$	--	--
8	0,18	-0,01	--	$\pm 0,027$	$\pm 0,082$	--	0,18	-0,03	--	$\pm 0,018$	$\pm 0,059$	--
9	0,19	-0,61	--	$\pm 0,015$	$\pm 1,602$	--	0,18	-0,67	--	$\pm 0,007$	$\pm 0,878$	--

Modelos	Santana do Ipanema						Palmeira dos Índios					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,72	0,11	1,07	$\pm 0,225$	$\pm 0,161$	$\pm 0,902$	0,57	0,003	3,47	$\pm 0,029$	$\pm 0,026$	$\pm 4,625$
2	--	0,01	--	--	$\pm 0,0008$	--	--	0,02	--	--	$\pm 0,002$	--
3	0,72	0,11	1,07	$\pm 0,225$	$\pm 0,161$	$\pm 0,902$	0,57	0,003	3,47	$\pm 0,029$	$\pm 0,026$	$\pm 4,625$
4	--	0,40	--	--	$\pm 0,020$	--	--	0,69	--	--	$\pm 0,066$	--
5	--	0,14	--	--	$\pm 0,010$	--	--	0,17	--	--	$\pm 0,019$	--
6	0,16	--	--	$\pm 0,002$	--	--	0,19	--	--	$\pm 0,007$	--	--
7	0,16	--	--	$\pm 0,002$	--	--	0,18	--	--	$\pm 0,007$	--	--
8	0,14	-0,08	--	$\pm 0,020$	$\pm 0,071$	--	0,12	-0,19	--	$\pm 0,070$	$\pm 0,202$	--
9	0,15	-1,37	--	$\pm 0,011$	$\pm 1,343$	--	0,16	-2,93	--	$\pm 0,036$	$\pm 3,598$	--

Fonte: (Autor, 2012)

Continuação Tabela 7

Modelos	Arapiraca						Maceió					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,73	0,01	1,06	$\pm 0,375$	$\pm 0,139$	$\pm 0,982$	0,70	0,03	1,98	$\pm 0,149$	$\pm 0,046$	$\pm 1,091$
2	--	0,02	--	--	$\pm 0,0008$	--	--	0,02	--	--	$\pm 0,0006$	--
3	0,73	0,01	1,06	$\pm 0,375$	$\pm 0,139$	$\pm 0,982$	0,70	0,03	1,98	$\pm 0,149$	$\pm 0,046$	$\pm 1,091$
4	--	0,60	--	--	$\pm 0,020$	--	--	0,78	--	--	$\pm 0,021$	--
5	--	0,15	--	--	$\pm 0,007$	--	--	0,18	--	--	$\pm 0,004$	--
6	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,20	--	--	$\pm 0,003$	--	--
7	0,18	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,20	--	--	$\pm 0,003$	--	--
8	0,18	-0,003	--	$\pm 0,022$	$\pm 0,065$	--	0,31	-0,32	--	$\pm 0,036$	$\pm 0,102$	--
9	0,18	-0,21	--	$\pm 0,009$	$\pm 0,994$	--	0,24	-3,97	--	$\pm 0,016$	$\pm 1,545$	--

Modelos	Coruripe						São José da Laje					
	Coeficientes			DP			Coeficientes			DP		
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
1	0,56	0,06	1,9	$\pm 0,025$	$\pm 0,226$	$\pm 2,10$	2,7	0,05	0,61	$\pm 72,067$	$\pm 1,260$	$\pm 1,924$
2	--	0,02	--	--	$\pm 0,001$	--	--	0,02	--	--	$\pm 0,0008$	--
3	0,56	0,06	1,91	$\pm 0,025$	$\pm 0,226$	$\pm 2,10$	2,70	0,05	0,61	$\pm 72,067$	$\pm 1,260$	$\pm 1,924$
4	--	0,58	--	--	$\pm 0,048$	--	--	0,40	--	--	$\pm 0,019$	--
5	--	0,15	--	--	$\pm 0,015$	--	--	0,10	--	--	$\pm 0,008$	--
6	0,18	--	--	$\pm 0,004$	--	--	0,16	--	--	$\pm 0,002$	--	--
7	0,18	--	--	$\pm 0,004$	--	--	0,15	--	--	$\pm 0,002$	--	--
8	0,06	-0,35	--	$\pm 0,033$	$\pm 0,099$	--	0,17	-0,05	--	$\pm 0,027$	$\pm 0,087$	--
9	0,13	-4,80	--	$\pm 0,021$	$\pm 2,195$	--	0,16	-0,47	--	$\pm 0,015$	$\pm 1,626$	--

Fonte: (Autor, 2012)

os valores de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , do modelo 1 diminui, o coeficiente  $\beta_3$  aumenta, corrigindo as eventuais falhas de calibração que possam ocorrer.

Meza & Varas (2000) pontuaram que o modelo de Bristow & Campbell (modelo 1) é definido para estimar dados diários e não tem nenhuma extrapolação evidente aos valores médios mensais. Por esta razão, espera-se que um novo conjunto de coeficientes seja encontrado, quando o modelo for aplicado aos dados médios mensais. O coeficiente  $\beta_1$  (2,70), para região de São José da Laje, foi o mais afetado, pois indicou valor fora dos padrões esperados. Os dados foram reverificados, mas nenhum erro foi identificado. Não foi observado nenhum padrão para as regiões do Sertão, Agreste e Zona da Mata/Litoral para os coeficientes gerados. Os valores de  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , para a região de Palmeira dos Índios, mostraram valores de 0,003 e 3,47, respectivamente. Para o modelo 3 foram encontrados os mesmos valores para  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ . Por outro lado, o coeficiente  $\beta_2$  dos modelos 2, 4 e 5 mostraram não serem afetados pelo uso do regime de temperatura. Contudo, o uso do regime de temperatura  $\Delta T_1$  gerou maiores valores de  $\beta_2$ , já  $\Delta T_2$  menores valores. Apenas na região de Água Branca, o coeficiente  $\beta_2$  do modelo 4 foi influenciado pelo regime de temperatura adotado, ( $\beta_2 = 0,64$  com  $\Delta T_1$  e  $\beta_2 = 0,17$  com  $\Delta T_2$ ).

Os valores de  $\beta_1$  do modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6), não apresentou nenhum padrão para as regiões do Sertão, Agreste e Zona da Mata/Litoral. A região de São José da Laje (Zona da Mata) obteve o menor valor para  $\beta_1$  (0,16) e Maceió (Litoral) o maior para  $\beta_1$  (0,20). Apenas o valor de  $\beta_1$  para a região de Maceió concordou com o proposto por Hargreaves & Samani (1982). O coeficiente  $\beta_1$  dos modelos 6 e 7 não apresentou influência da amplitude de temperatura adotado, valores iguais foram encontrados para  $\beta_1$  com o uso de  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ . O modelo 7, que contém a altitude do local como meio de correção, não apresentou melhora significativa na calibração. Os valores obtidos para o coeficiente  $\beta_1$  do modelo 6, são maiores que o do modelo 7, correspondendo a uma variação média de 0,50 – 21,10%. Os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  dos modelos 8 e 9 foram poucos afetados pelo regime de temperatura adotado. Em geral, o uso de  $\Delta T_1$  na calibração dos modelos gerou menores valores para  $\beta_1$ , que o uso de  $\Delta T_2$ . Maiores valores de  $\beta_1$  foram encontrados para o modelo 9, contudo, o coeficiente  $\beta_1$  do modelo 8, apresentou máximo de 0,31. O coeficiente  $\beta_2$  dos modelos 8 e 9, não apresentou nenhuma tendência ou padrão, apresentando valores negativos para alguns locais e positivos para outros.

#### 4.4 Desempenho dos modelos de irradiação solar global baseados temperatura do ar

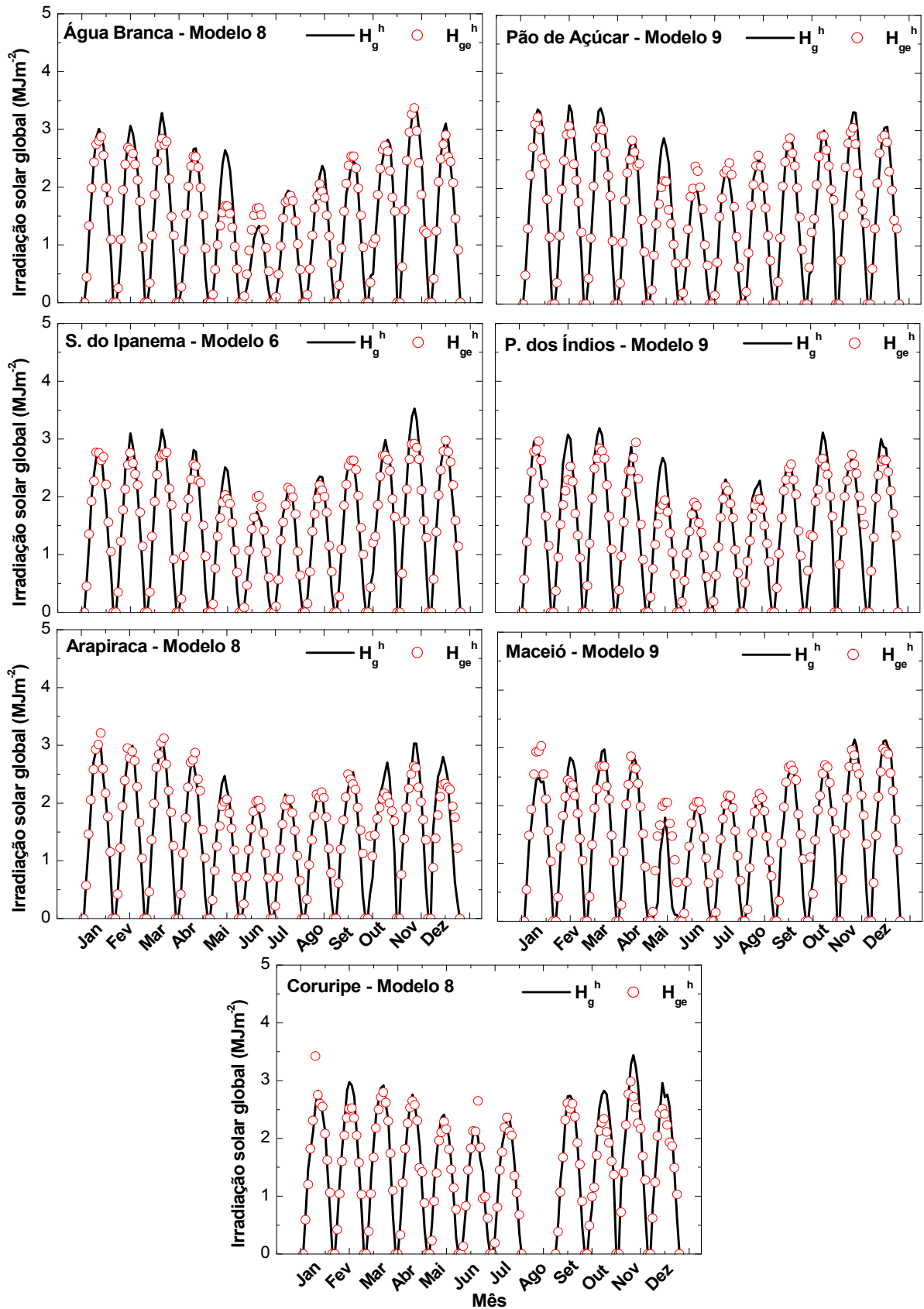
Os resultados obtidos, com a estimativa da  $H_g$  são apresentados na forma de Figuras e Tabelas. Na medida do possível, obedecendo à sequência lógica descrita na metodologia. As análises estatísticas, entre os valores observados da  $H_g$  e os estimados com os modelos empíricos baseados na amplitude térmica, são sequenciadas em termos da média horária mensal, total diária e média diária mensal. Desse modo, a discussão dos resultados obtidos, sempre será apresentada, levando-se em consideração a análise inicial para as estações situadas no Sertão Alagoano (Água Branca, Pão de Açúcar e Santana do Ipanema), Agreste do estado de Alagoas (Arapiraca e Palmeira dos Índios), Litoral Alagoano (Maceió e Coruripe) e Zona da Mata (São José da Laje). Para a análise entre os valores observados da  $H_g$  e os estimados com o modelo empírico que leva consideração a duração do brilho solar diário, também será obedecido à sequência em termo do total diária e da média diária mensal. Assim, a discussão dos resultados será mostrada, sequencialmente, para as estações localizadas no Sertão Alagoano (Água Branca e Pão de Açúcar) e Agreste (Palmeira dos Índios).

##### 4.4.1 Estimativa da irradiação solar global média horária mensal

A Figura 2 mostra a variação anual da irradiação solar global média horária mensal observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos, que melhor estimaram nas regiões de Água Branca, Pão de Açúcar, Santana do Ipanema, Palmeira dos Índios, Arapiraca, Maceió e Coruripe. Observa-se uma grande semelhança entre a distribuição das curvas da variação anual de  $H_g^h$  e  $H_{ge}^h$  em todas as regiões. Menores picos de irradiações solar global são observados para os meses compreendidos entre maio e setembro. Isto é ocasionado pela mudança de posição do sol durante o ano. Tanto no período seco quanto no período chuvoso nos locais de estudo, existe considerável simetria das curvas caracterizada pelo ciclo anual do sol, já identificada por Whillier [apud (Melo, 2009)].

O desvio padrão da população de desvios (dpp) entre  $H_g^h$  e  $H_{ge}^h$  com a aplicação de diferentes modelos empíricos é mostrado na Figura 3. Para as localidades em estudo observa-se que os menores valores de dpp são verificados para a estação chuvosa e picos maiores para o período seco. Em média a região de água Branca apresentou menores dpp ( $0,23 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Palmeira dos Índios maiores ( $0,29 \text{ MJm}^{-2}$ ). O mês de novembro mostrou com maior frequência maiores valores de dpp ( $0,30 - 0,42 \text{ MJm}^{-2}$ ), com junho ( $0,12$  a  $0,28 \text{ MJm}^{-2}$ ) e julho ( $0,12$  a  $0,18 \text{ MJm}^{-2}$ ) menores índices. É importante salientar que bons coeficientes de correlação encontrados não indicam, necessariamente, boa precisão do modelo em estimar,

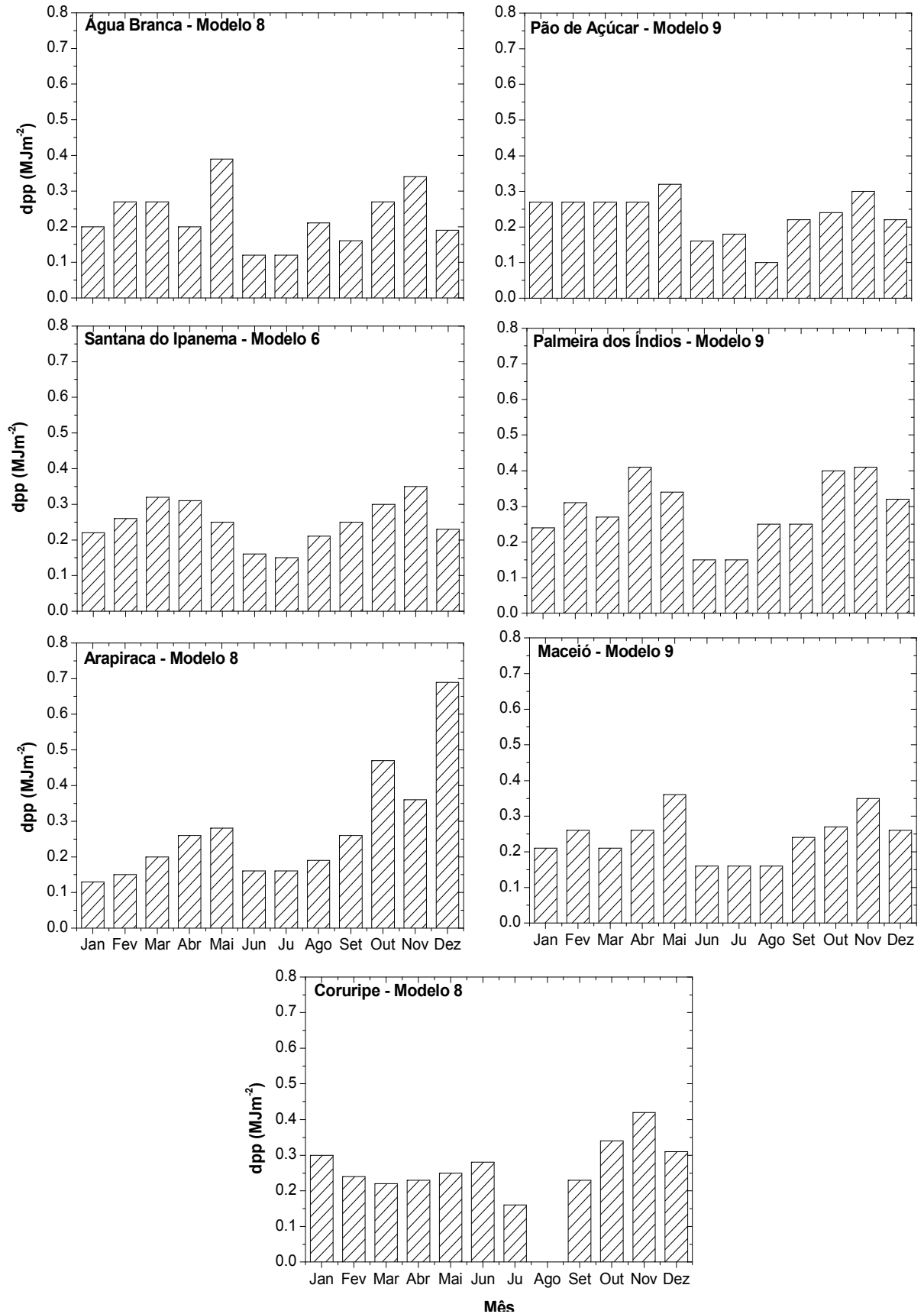
**Figura 2** - Variação anual da irradiação solar global média horária mensal observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.



Fonte: (Autor, 2012)



**Figura 3** - Desvio padrão da população de desvios (dpp) entre a irradiação solar observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.



Fonte: (Autor, 2012)

como pontuou Willmontt (1982).

Na Figura 2 nota-se que a evolução diária da  $H_{ge}^h$  e  $H_g^h$  apresenta uma variação quase simétrica do nascer do sol até o meio dia, e do meio dia até ao pôr-do-sol. Segundo Spokas & Forcela (2006), este aspecto está ligado a variação diária da radiação com o ângulo de incidência. No período da tarde, as energias médias horárias são menores que as da manhã, e isto se deve à diminuição da irradiância solar direta devido ao aumento da nebulosidade durante o dia, a qual vai se acumulando no período da tarde, como pontuou Gomes (2006). A evolução diária começa às 6h00 com valores médios próximos de  $0,5 \text{ MJm}^{-2}$ , cresce até às 12h, atingindo o máximo de aproximadamente  $3,50 \text{ MJm}^{-2}$ , decrescendo a seguir, até o nível de zero energia, às 18h00.

Na região de Água Branca, todos os modelos apresentaram boas estimativas da  $H_{ge}^h$ , com melhor desempenho para modelo 8 que subestimou  $H_g^h$  para os meses de Maio, Agosto e Novembro, com valores de  $-0,45 \text{ MJm}^{-2}$ ,  $-0,11 \text{ MJm}^{-2}$  e  $-0,09 \text{ MJm}^{-2}$  para a média dos desvios (med), respectivamente. A superestimava de  $H_g^h$ , com base no med, foi verificada para os meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Abril, Junho, Julho, Setembro, Outubro e Dezembro, com mínimo de 0,00 (nulo) para o mês de Fevereiro e máximo de  $0,32 \text{ MJm}^{-2}$  para o mês de Junho. Para a estação de Água Branca, todos os modelos analisados indicaram bons índices estatísticos para  $H_{ge}^h$ . O modelo 8 indicou índice de concordância (d) variando entre 0,91 a 1,00, coeficiente de correlação (r) entre 0,94 a 0,99 e desvio padrão da população de desvios (dpp) entre 0,12 e  $0,34 \text{ MJm}^{-2}$ . O teste t mostrou que não houve diferença significativa ( $t = 0,116 < t_{0,05}$ ).

Em Arapiraca todos os modelos desempenharam bons ajustes entre a irradiação solar observada e estimada, sendo que o modelo 8 foi quem mostrou melhor eficiência em estimar  $H_g^h$ . Os coeficientes de correlação entre  $H_g^h$  e  $H_{ge}^h$  variaram entre 0,96 a 0,98, apresentando valores de d compreendidos entre 0,94 a 0,99. No período chuvoso foi identificado para med valor máximo de  $0,30 \text{ MJm}^{-2}$  e mínimo absoluto de  $0,01 \text{ MJm}^{-2}$ , com dpp variando de 0,10 a  $0,32 \text{ MJm}^{-2}$ . De maneira geral, o modelo teve tendência de superestimar os valores observados. Nos meses de Janeiro, Fevereiro, Março e Maio houve subestimativa. O teste t indicou não haver diferença significativa ( $t = 1,013 < t_{0,05}$ ), confirmando as boas estimativas de ( $H_{ge}^h$ ) para todos os meses em análise.

O modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) determinou com boa precisão a  $H_g$  para a região de Santana do Ipanema. Observa-se boa proximidade entre o estimado e o observado, encontrando coeficientes de correlações compreendidos entre 0,94 a 0,99 e valores absolutos da média dos desvios (med) de 0,05 a  $0,17 \text{ MJm}^{-2}$  para Santana do Ipanema. Os

coeficientes estatísticos para todo o período estudado apresentaram baixos valores de (dpp), variando de  $0,15 \text{ MJm}^{-2}$  em Julho a  $0,35 \text{ MJm}^{-2}$  em Novembro. De acordo com teste t, as médias não apresentaram diferenças significativas. Em geral, os coeficientes de concordância obtidos com o uso do modelo 6 ficaram compreendidos entre 0,90 a 0,99, mostrando um bom desempenho do modelo na estimativa de  $H_g^h$ . Estes índices concordam com os encontrados por Kaplanis & Kaplani (2010), que verificaram desvios relativos variando de 0,20 a 12,80%, entre a  $H_g^h$  e  $H_{ge}^h$ , com uso de 3 modelos distintos para a Grécia.

O modelo 9 melhor estimou  $H_g^h$ , para as regiões de Palmeira dos Índios, Maceió e Pão de Açúcar, esta última já discutida anteriormente. Na região de Palmeira dos Índios o modelo superestimou nos meses de janeiro, abril, junho, setembro e novembro, não apresentando nenhum padrão para estação seca ou chuvosa. Para Maceió o modelo superestimou a irradiação para o período chuvoso (Abril a Agosto) e subestimou para os meses de Fevereiro, Março e Dezembro. Os med's e os dpp's foram para a maioria dos meses em ambos locais, indicando a precisão do modelo em estimar a irradiação. Segundo Spokas & Forcela (2006) a superestimava da  $H_g$  para dias secos e úmidos são afetadas através da influência na cobertura de nuvens. Isto se atribui aos dias parcialmente nublados sem precipitação, contaminação do ar (aerossóis e poeira).

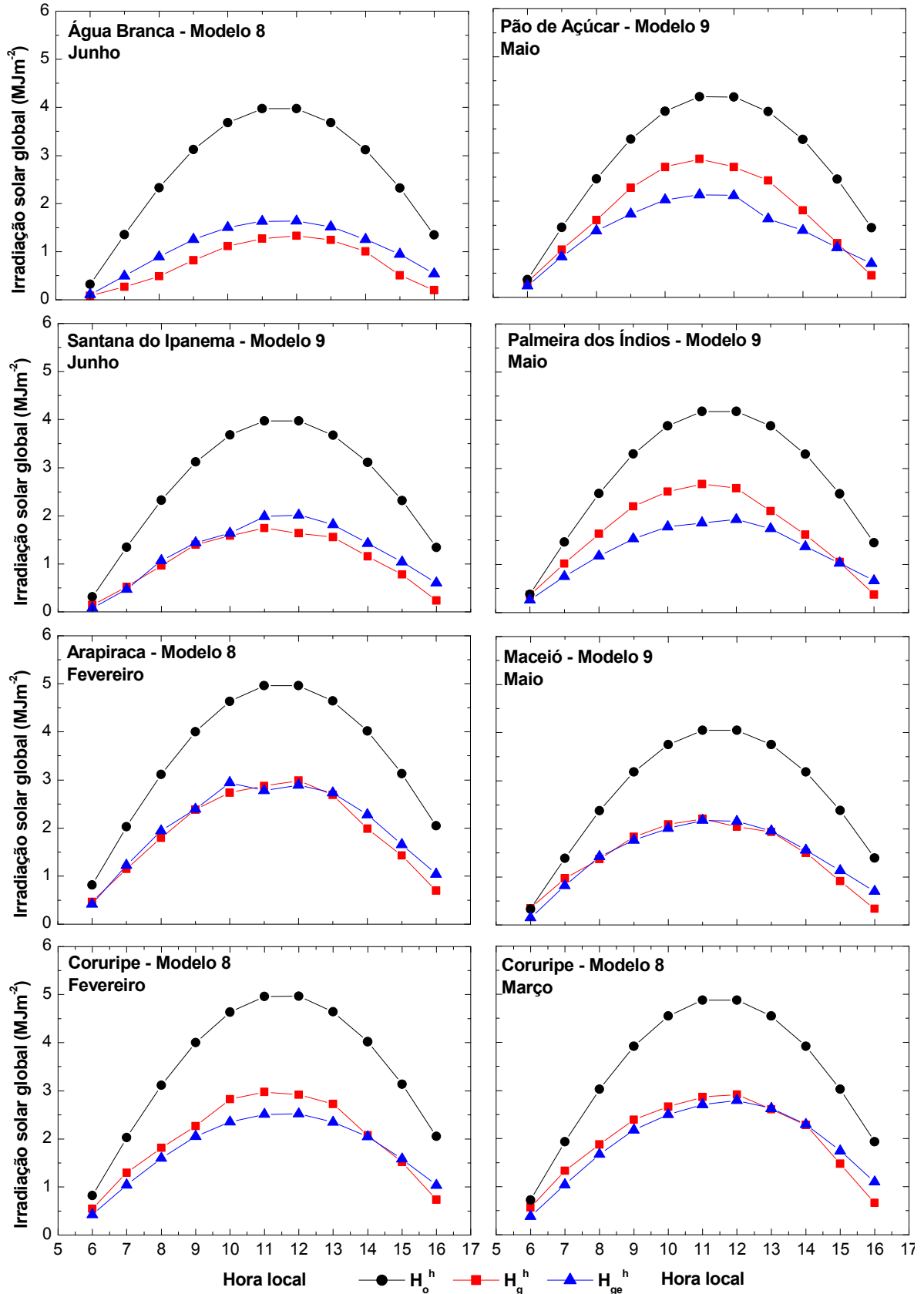
Os índices de concordância (d) entre a  $H_{ge}^h$  e  $H_g^h$  ficaram compreendidos entre 0,87 a 0,99 e 0,84 a 0,99 para Palmeira dos Índios e Maceió, com r variando de 0,85 a 0,98, respectivamente. O dpp apresentou amplitudes de  $0,19 \text{ MJm}^{-2}$  e  $0,26 \text{ MJm}^{-2}$  para Maceió e Palmeira dos Índios, respectivamente. Maiores picos entre a irradiação observada e estimada foram observados para os meses de Março e Outubro em Palmeira dos Índios, ambos com  $H_g^h$  e  $H_{ge}^h$  próximos de  $3,2 \text{ MJm}^{-2}$ . O modelo mostrou concordância entre os valores observados e medidos, representando a eficiência de estimar valores de  $H_g^h$  com bons ajustes. O teste t avaliado para o nível de significância de 5% indicou que os dados estimados pelo modelo 9 para Palmeira dos Índios ( $t = -0,98 < t_{0,05}$ ) e Maceió ( $t = 1,24 < t_{0,05}$ ) não diferem estatisticamente dos observados.

Na região de Coruripe, o modelo 8, foi o que melhor estimou valores de  $H_g^h$ . Sendo encontrado coeficientes de correlação acima de 0,90, com máximo de 0,98 para os meses de Fevereiro e Julho. Para índice de concordância de Willmott foram encontrados elevados valores compreendidos entre 0,90 a 0,99, com média anual de 0,96. Para a média dos desvios e o desvio padrão da população de desvios foi verificado valor média anual de  $-0,06 \text{ MJm}^{-2}$  e  $0,26 \text{ MJm}^{-2}$ , respectivamente. Todavia, o teste t mostrou existir diferença significativa para a estimativa ( $t > t_{0,05}$ ).

A Figura 4 mostra a variação da irradiação solar média horária mensal no topo da atmosfera ( $H_o^h$ ),  $H_g^h$  e  $H_{ge}^h$  por diferentes modelos empíricos, para o ano de 2009, em diversos locais de Alagoas. Na estação de Água Branca, o modelo 8 superestimou para todos valores da  $H_g^h$  no mês de Junho. Em geral, os modelos superestimam a irradiação no início da manhã e no final da tarde (pontos com valores altos de radiação) e subestimam perto do meio-dia (pontos com valores de radiação baixo). Spokas & Forcela (2006) destacaram que quando há diferença significativa no desempenho de modelos em locais com elevadas atitudes, a explicação mais coerente é que a massa de ar, água precipitável e a turbidez em locais altos são relativamente pequenas em comparação com locais de baixa altitude e, portanto, a transmitância radiativa é relativamente alta. Isto indica que a dispersão atmosférica é uma incerteza nesses casos necessitando de melhorias da modelagem nos locais com a inclusão do fator elevação. Altitudes mais elevadas têm menos coluna atmosférica para a radiação solar atravessar (Spokas & Forcela, 2006).

O modelo original de Bristow & Campbell (modelo 1) e suas adaptações demonstraram desempenhos na estimativa da  $H_g^h$  abaixo do modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) e suas modificações. Isto pode ser explicado pelos altos valores encontrado para os coeficientes ( $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ ) e seus respectivos desvios padrões. Na região de Santana do Ipanema observou-se, para o mês de novembro, dpp iguais a 0,64 MJm<sup>-2</sup> e 0,43 MJm<sup>-2</sup>, para os modelos 1 e 2, respectivamente. O modelo 4 indicou para a região de Coruripe nos meses de Fevereiro e Outubro, valores para dpp e r iguais a 0,66 MJm<sup>-2</sup> e 0,71, 0,61 MJm<sup>-2</sup> e 0,71, respectivamente. Na região de Água Branca verificou-se para o mês de Novembro dpp = 0,47 MJm<sup>-2</sup>, com o modelo 1. O modelo 3, modificado de Bristow & Campbell (modelo 1), demonstrou as piores estimativas da irradiação solar, por exemplo, no mês de Outubro foi verificado dpp de 0,64 MJm<sup>-2</sup> e r de 0,55 em Arapiraca. O mês de Dezembro indicou dpp igual a 0,72 MJm<sup>-2</sup> e r de 0,60. Em Água Branca o modelo 3 mostrou dpp de 0,58 MJm<sup>-2</sup> para o mês de Novembro. Na região do Sertão os modelos 1, 2, 3, 4 e 5 indicaram dpp médios de 0,24, 0,25, 0,27, 0,35 e 0,26 MJm<sup>-2</sup>, respectivamente. Já para a região do Agreste observou-se para os modelos 1, 2, 3, 4 e 5, valores médios de dpp iguais 0,30, 0,26, 0,38, 0,32 e 0,25 MJm<sup>-2</sup>, respectivamente.

**Figura 4** - Variação da irradiação solar média horária mensal no topo da atmosfera ( $H_o^h$ ), observada ( $H_g^h$ ) e estimada ( $H_{ge}^h$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.



Fonte: (Autor, 2012)

Na região do Litoral verificou-se dpp médios de 0,59, 0,26, 0,74, 0,38 e 0,25 MJm<sup>-2</sup>, respectivamente para os modelos 1, 2, 3, 4 e 5.

Kaplanis & Kaplani (2007) propuseram um modelo empírico para prevê a média esperada da irradiância horária em qualquer dia com uma única medida de radiação de manhã. A partir da dinâmica do modelo proposto, os autores identificaram um comportamento muito bom, proporcionando valores previstos com uma precisão muito boa, concordando com os resultados obtidos nos locais de Alagoas. É importante destacar que a irradiância solar horária é determinada não só pela variação diurna da radiação solar extraterrestre, mas também pela variação diurna da transmitância (ou seja, baixa transmitância no início da manhã e final da tarde, enquanto transmitância alta perto do meio-dia), como destacou Yang *et al.*, (2006).

Muito embora tenham sido propostos para estimar a radiação solar diária ou mensal, alguns destes modelos foram capazes de estimar razoavelmente a irradiação solar global média horária mensal. Observou-se que ao simularem a irradiação ocorreram subestimações e superestimações, principalmente no período chuvoso. A razão para a superestimativa é devido ao aumento da reflexão da radiação solar a partir de cobertura de nuvens ou um papel decrescente de dispersão atmosférica devido ao menor ângulo de declinação solar, verificado por Spokas & Forcela (2006). Os resultados de bons desempenhos dos modelos para irradiação solar global média horária mensal encontrada para Alagoas se assemelham aos resultados de outros autores, como por exemplo, Kaplanis (2006) que utilizou apenas uma medida de manhã e Yang *et al.*, (2006) com o uso do fator de transmitância atmosférica.

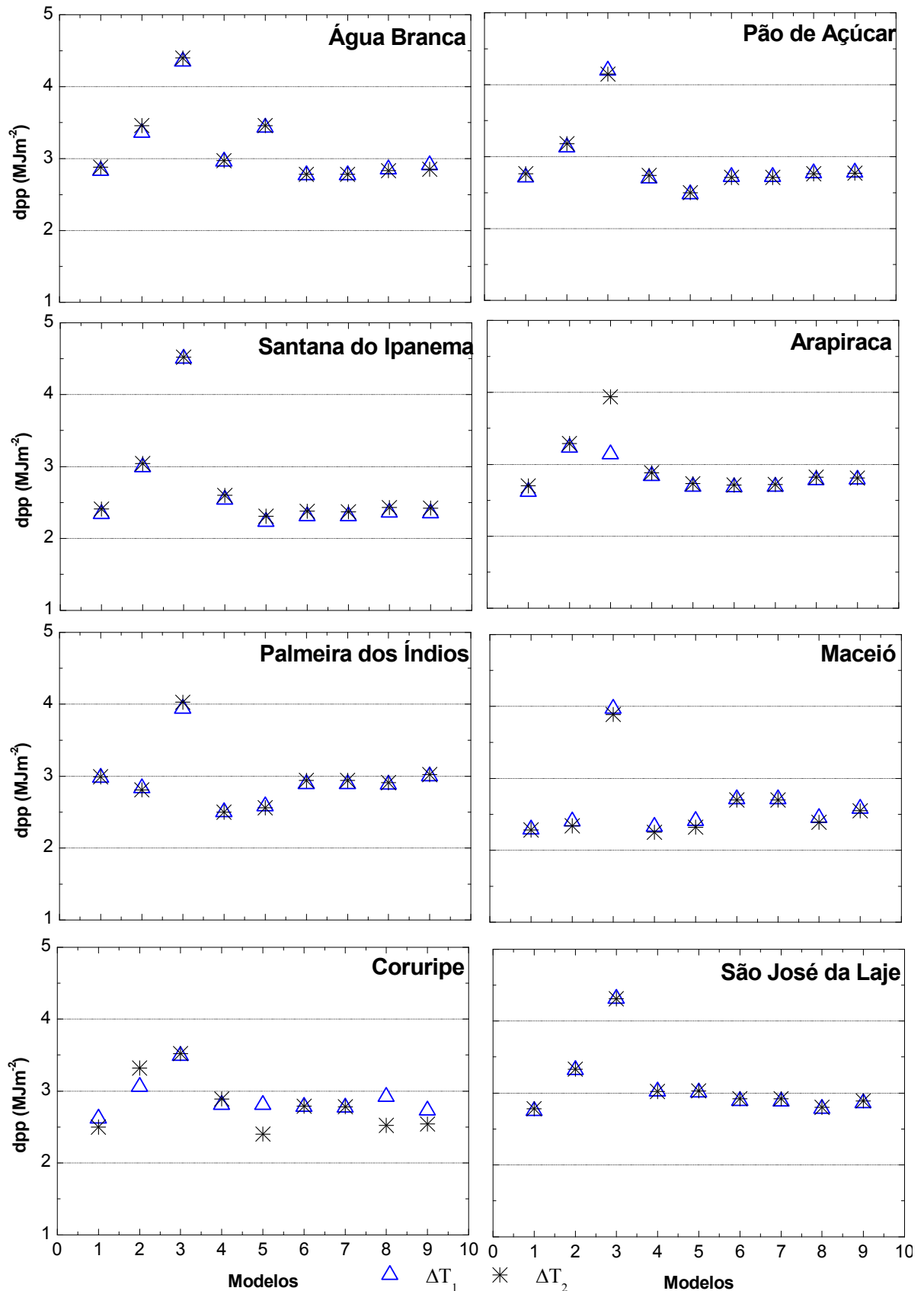
#### 4.4.2 Estimativa da irradiação solar global diária

A Figura 5 mostra a comparação do dpp entre  $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$  para  $(H_g^d)$  e  $(H_{ge}^d)$ , com o uso dos modelos empíricos. Os índices obtidos indicam que os regimes de temperatura utilizados não dependem da altitude do local, discordando dos resultados obtidos por Liu X *et al.*, (2009) para a província de Haerbin, China. Isto se justifica pela grande variação da altitude na China (3 a 2295 m) mostrada pelos autores, diferente das estações de Alagoas que apresenta altitude mínima de 30 m para Pão de Açúcar e máxima de 593 m para Água Branca, indicando uma diferença inferior de 74,16% entre as altitudes máximas de Alagoas e China. Na região do Sertão, menores valores de dpp foram verificados para Santana do Ipanema, semelhanças de dpp foram observadas entre Água Branca e Pão de Açúcar. Em Arapiraca, São José da Laje e Santana do Ipanema o regime de temperatura ( $\Delta T_1$ ) possui dpp consistentemente inferior ao  $\Delta T_2$  para todos os modelos avaliados. O dpp médio para  $\Delta T_1$  (2,86 MJm<sup>-2</sup>) foi 0,54% inferior ao de  $\Delta T_2$  (2,88 MJm<sup>-2</sup>), mostrando semelhança entre os

regimes de temperatura. Em suma, o uso de  $\Delta T_1$  ou  $\Delta T_2$  não interferiu significativamente nos resultados obtidos. Os resultados mostram que a maioria dos modelos avaliados foram, em geral, capazes de estimar adequadamente a  $H_g^d$  para locais de Alagoas. Em geral o modelo 1 apresentou melhor desempenho com  $dpp = 2,28 \text{ MJm}^{-2}$  e  $med = -0,68 \text{ MJm}^{-2}$  para Maceió. O pior resultado foi verificado com o modelo 3, com  $dpp = 4,52 \text{ MJm}^{-2}$  e  $med = -16,95 \text{ MJm}^{-2}$ , para Santana do Ipanema.

Na prática, a fixação de coeficientes iniciais destinados a calibração diminuiu significativamente o desempenho do modelo. No Sertão os modelos 2, 4 e 5 com fixação de coeficientes mostraram uma média para  $dpp$  de  $2,92 \text{ MJm}^{-2}$  e  $med$  de  $0,64 \text{ MJm}^{-2}$ . Maior aumento de  $dpp$  foi verificado para São José da Laje e Arapiraca. Na região do Agreste os modelos 1, 2, 4 e 5 apresentaram  $dpp$  médio de  $2,81 \text{ MJm}^{-2}$  e  $med$  de  $0,18 \text{ MJm}^{-2}$ , como mínimo observado para Palmeira dos Índios com  $dpp$  e  $med$  médio de  $2,72$  e  $-0,62 \text{ MJm}^{-2}$ , respectivamente. O modelo 3 apresentou altos valores para o erro da medida, e não foi considerado na comparação com outros modelos. A redução do número de coeficientes sugeridos em alguns dos modelos teve um efeito maior nos locais de São José da Laje e Água Branca, com efeito relativo menor em Maceió e Coruripe. O desempenho do modelo 2 foi menor, em comparação com os correspondentes modelos 4 e 5 na maioria das áreas, com a fixação de  $\beta_1$  (0,75) e  $\beta_3$  (2). As modificações realizadas no modelo original de Bristow & Campbell (modelo1) não foram muito eficazes e produziram pouca ou nenhuma melhora na estimativa. Apenas o modelo 4 apresentou melhor desempenho que o original (modelo1). Isto foi observado para a estação de Palmeira dos Índios. Nas estações de Água Branca, Pão de Açúcar, Arapiraca e Maceió, o modelo 4 apresentou  $dpp$  de  $2,97$ ,  $2,74$ ,  $2,88$  e  $2,25 \text{ MJm}^{-2}$ , próximo do modelo original de Bristow & Campbell, com  $dpp$  médio de  $2,66 \text{ MJm}^{-2}$ . Por isso, recomenda-se o uso do modelo original de Bristow & Campbell em vez dos modificados, baseado na indicação de elevados erros estatísticos (por exemplo, o modelo 3, que apresentou  $dpp$  médio de  $3,96 \text{ MJm}^{-2}$ ), concordando com Liu X *et al.*, (2009), que comparou 9 modelos modificados do original de Bristow & Campbell, relatando o desempenho superior do modelo original do que as modificações de Meza & Varas (2000), Donatelli & Campbell (1998), Abraha & Savage (2008), Goodin *et al.*, (1999) e Weiss *et al.*, (2001). Em geral, os modelos modificados do original de Bristow & Campbell, subestimaram a irradiação nos locais de Palmeira dos Índios, Maceió e São José da Laje, e superestimaram a medida nas demais localidades.

**Figura 5** – Desvio Padrão da população de desvios (dpp) entre a irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) no ano de 2009, para os modelos empíricos, com base nos dois regimes de temperatura adotados ( $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ ), para locais de Alagoas.



Fonte: (Autor, 2012)



A maior subestimativa ocorreu com a aplicação do modelo 3, que subestimou em todas as regiões. A fixação de alguns coeficientes e modificações não rendeu melhora significativa.

O melhor desempenho dos modelos modificados do original de Bristow & Campbell, foi o modelo 4, quando compara-se as observações de  $H_g^d$  com a estimada pelo modelo, o  $R^2$  explica de 71 % até 84 %, nas três regiões (Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata). Liu X *et al.*, (2009) pontuaram que as modificações feitas no modelo original de Bristow & Campbell não causou melhora nas estimativas de  $H_g^d$  e  $H_0^d$  sozinho já incluem os efeitos sazonais da radiação solar. O modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) e o modelo 7 (Annandale *et al.*, 2002) apresentaram dpp médio, basicamente, com a mesma amplitude para a região do Sertão (2,60 MJm<sup>-2</sup>), para a área do Agreste (2,79 MJm<sup>-2</sup>) e para os locais do Litoral/Zona da Mata (2,79 MJm<sup>-2</sup>), indicando que a correção com altitude no modelo não melhorou seu desempenho com relação ao original. O modelo adaptado por Hargreaves *et al.*, (1985) (modelo 8) foi levemente mais preciso que o modelo adaptado por Hunt *et al.*, (1998) (modelo 9), na maioria dos locais, exceto em Coruripe, onde encontraram-se para dpp valores de 2,92 e 2,73 MJm<sup>-2</sup>, respectivamente.

O modelo 6 estimou melhor que os modificados, e resultou em um dpp médio de 2,60, 2,79 e 2,79 MJm<sup>-2</sup> para as regiões do Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata, respectivamente. Nota-se semelhança entre os erros nessas últimas regiões. As regressões geradas a partir do modelo 6, explicam a variação de  $H_g^d$  entre 66 a 79%, nos locais estudados. O modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) e suas adaptações subestimaram as medidas de  $H_g^d$  para Palmeira dos Índios, Maceió e São José da Laje e superestimaram para as demais localidades. Os modelos 8 e 9 subestimaram  $H_g^d$  para a Coruripe e Pão de Açúcar, a subestimativa foi somente para o modelo 9.

Em suma, o modelo original de Bristow & Campbell (modelo 1) foi mais preciso que o modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6). As estimativas também concordam com Supit & Kappel (1998) que encontraram bom ajuste, em locais na Europa, para modelos empíricos que possuem o regime de temperatura como coeficiente de entrada. Por outro lado, Bandyopadhyay *et al.*, (2008), indicaram que o modelo original de Hargreaves e a adaptação de Allen apresentaram bons resultados para cidades na Índia, mostrando sua viabilidade para aplicação na estimativa da evapotranspiração de culturas agrícolas, como destaca o boletim da FAO – 56, que aconselha o uso do modelo adaptado por Allen *et al.*, (1998) quando os dados de irradiação solar global estão faltosos ou de integridade duvidosa.

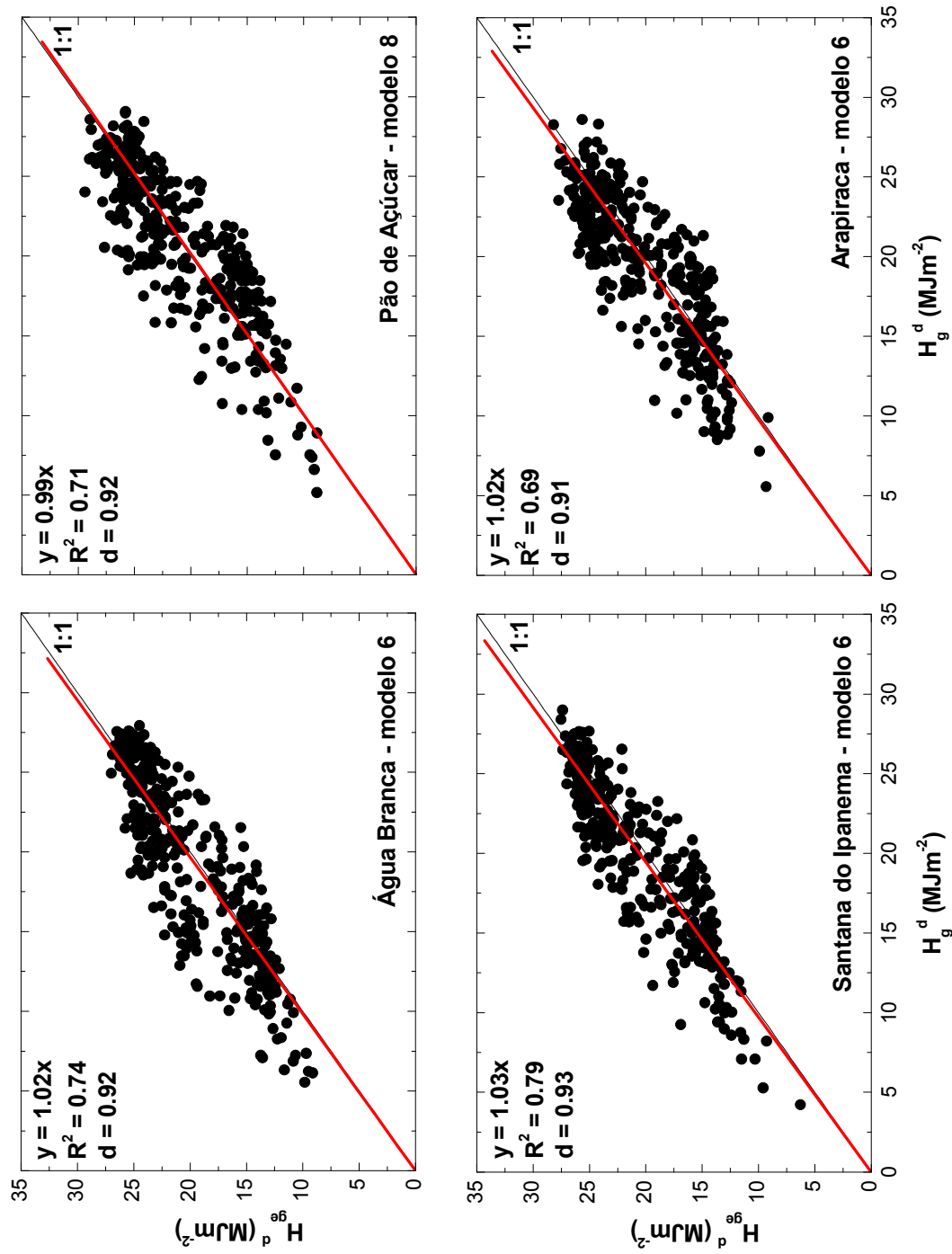
Comparando as séries de  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  pelo teste t nota-se diferença significativa a 5%, porém os indicativos estatísticos de comparação de modelos d, r, dpp e med indicaram bom

desempenho destes na estimativa  $H_g^d$ . A Figura 6 mostra a relação entre a  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  por diferentes modelos empíricos, para locais de Alagoas no ano de 2009. É possível perceber, a existência de uma boa linearidade, entre os valores observados e as estimativas. Observe-se uma aglomeração linear acentuada para valores de irradiação maiores que  $23,0 \text{ MJm}^{-2}$  e menores que  $15,0 \text{ MJm}^{-2}$ , em grande parte das regiões. Dispersão acentuada é notada para valores de irradiação compreendidos no intervalo de  $15,0$  a  $23,0 \text{ MJm}^{-2}$ . Isto é explicado pelas condições atmosféricas, por exemplo, para o dia parcialmente nublado há maior dispersão, devido ao espalhamento da radiação pelas nuvens, aerossóis, vapor d'água e entre outros.

Observando os índices estatísticos dos modelos obtidos na região de Água Branca, nota-se que os modelos 6 e 7 estimaram com melhor precisão. Quando os indicativos estatísticos entre os modelos 6 e 7 indicarem flutuações similares, levaram-se em considerações os resultados obtidos pelo modelo original (modelo 6). O  $r$  e o índice  $d$  entre a irradiação observada e estimada foram de 86,0 e 92,0%, respectivamente. Para Água Branca, por exemplo, a regressão linear encontrada para o modelo 6 estima a  $H_g^d$  com  $R^2$  igual a 0,74. Todos os modelos tenderam a superestimar os dados observados. Por sua vez, encontrou-se para o modelo 6 med de  $0,73 \text{ MJm}^{-2}$  e dpp de  $2,77 \text{ MJm}^{-2}$ . Os valores dos índices estatísticos da região de Pão de Açúcar apontaram que o modelo 8 estima com melhor precisão para a irradiação solar global diária que os outros. Os coeficientes  $r$  e  $d$  indicaram resultados entre a  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  em Pão de Açúcar, com  $r = 0,84$  e  $d = 0,92$ , respectivamente. O med e dpp foram de  $-0,01$  e  $2,77 \text{ MJm}^{-2}$ , respectivamente. Quanto mais próximos de zero estiverem os valores de med e dpp, melhor o desempenho do modelo em estimar. O modelo subestimou os valores observados. O coeficiente de determinação da regressão linear foi de 0,71, que explica 71,0% da irradiação solar global diária gerada.

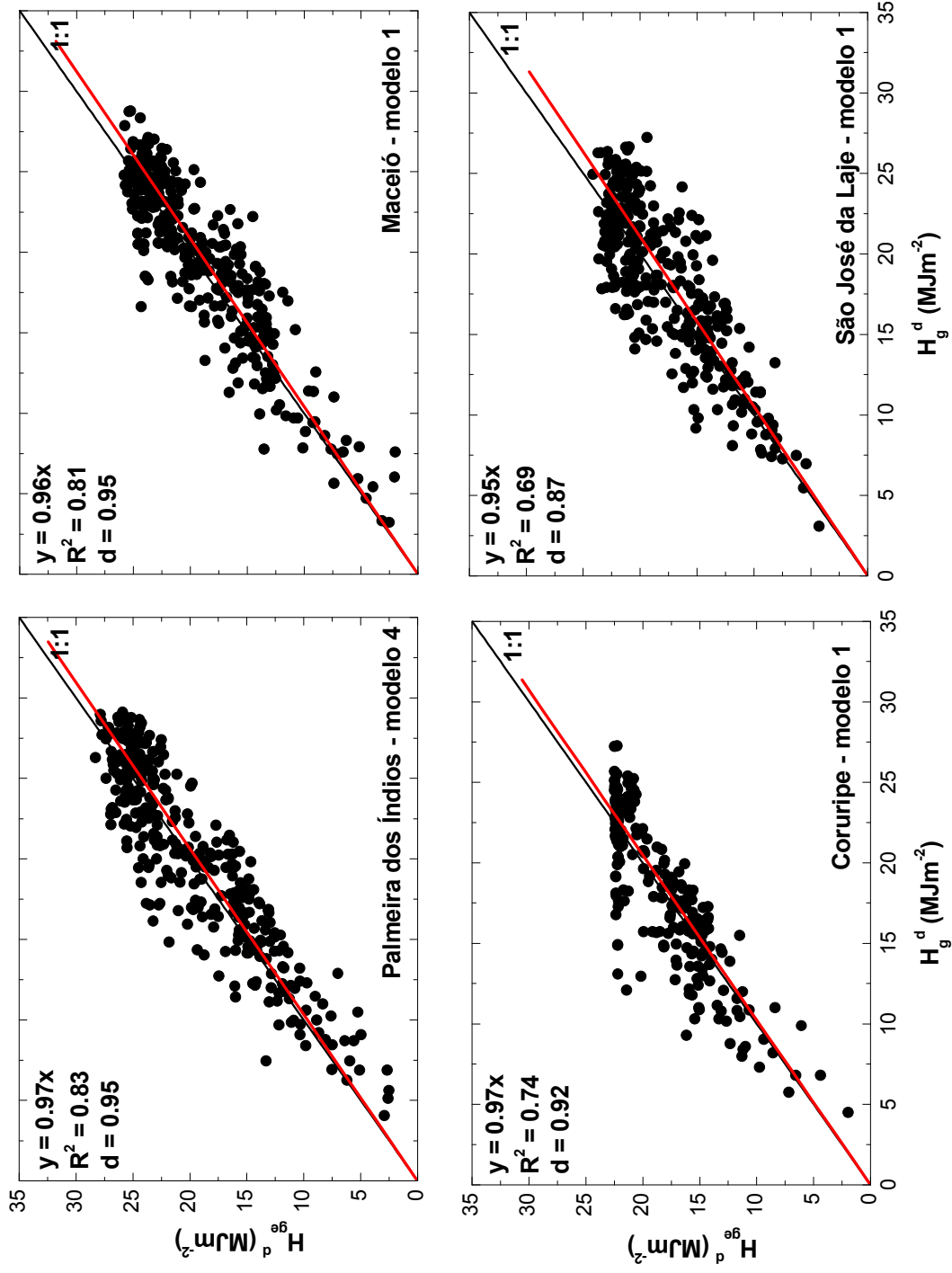
O resultado estatístico (Figura 5) e a representação gráfica (Figura 6) demonstram o desempenho do modelo 4 para a região de Palmeira dos Índios. Todos os modelos subestimaram os valores observados, a maior subestimação foi para o modelo 3, que indicou para med =  $-14,09 \text{ MJm}^{-2}$  e dpp =  $4,03 \text{ MJm}^{-2}$  (boa correlação foi encontrada), mas os elevados erros encontrados mostram a ineficiência do modelo em estimar  $H_g^d$ . O  $r$  obtido entre a  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  pelo modelo 4 foi de 98,0%, indicando que o modelo acompanhou bem a variabilidade de  $H_g^d$ . O modelo apresentou bons resultados, com med e dpp iguais a  $-0,54$  e  $2,50 \text{ MJm}^{-2}$ , respectivamente.

**Figura 6** – Relação entre a irradiação solar global diária observada ( $H_g^o$ ) e estimada ( $H_g^d$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram, para locais de Alagoas. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.



Fonte: (Autor, 2012)

Continuação da Figura 6



Fonte: (Autor, 2012)

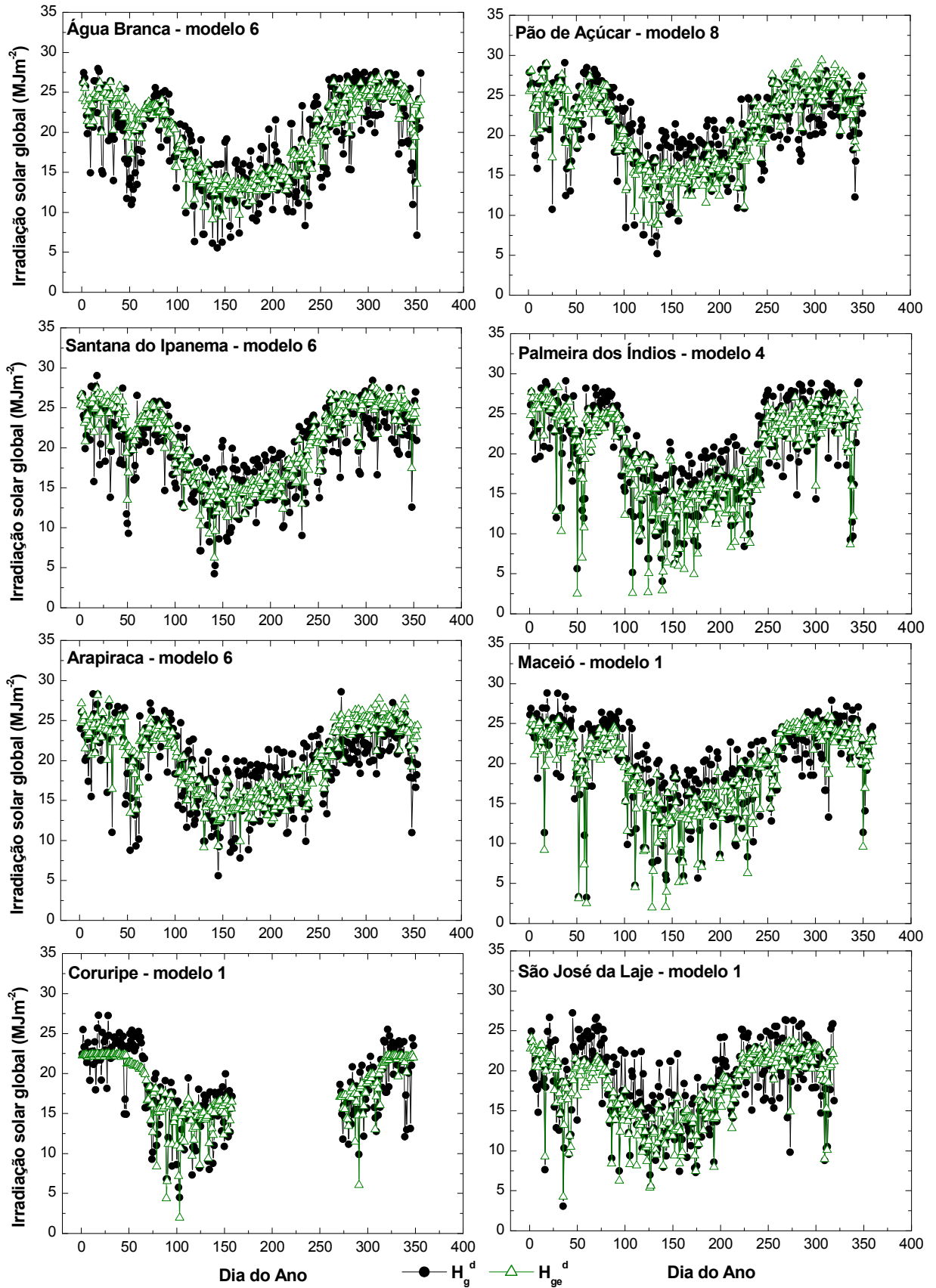
O  $R^2$  encontrado explica 83,0 % de irradiação estimada. O índice  $d$  variou entre 79,0 % a 95,0 %. Este máximo corresponde ao resultado obtido pelo uso do modelo 4. A partir do índice de concordância ( $d = 0,95$ ) nota-se que o modelo estima  $H_g^d$  com ótima precisão. O modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) estimou a  $H_g$  com melhores índices estatísticos para as regiões de Santana do Ipanema e Arapiraca. O modelo 7, adaptado do original de Hargreaves & Samani (modelo 6), apresentou índices semelhantes ao original. Para Santana do Ipanema, o modelo superestimou as medidas, com  $r$  e  $d$  iguais a 0,89 e 0,93, respectivamente. Foram observados baixos  $med$  ( $0,81 \text{ MJm}^{-2}$ ) e  $dpp$  ( $2,31 \text{ MJm}^{-2}$ ), significando que a  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  estão bem correlacionadas. A regressão linear gerada explica 79,0%, pelo coeficiente de determinação ( $R^2=0,79$ ).

O modelo 6 apresentou boa precisão ao estimar  $H_g^d$  para a região de Arapiraca, com  $r$  e  $R^2$  correspondentes a 0,84 e 0,69, respectivamente. Foram encontrados baixos valores para  $med$  ( $0,71 \text{ MJm}^{-2}$ ) e  $dpp$  ( $2,68 \text{ MJm}^{-2}$ ) em Arapiraca, que indica uma boa proximidade entre a irradiação observada e estimada. O modelo superestimou as medidas, indicando índice de Willmott igual 0,91, isso comprova a eficiência do modelo em prever a  $H_g^d$ . O valor de  $d$  (0,87) para a região da Zona da Mata ficou abaixo do identificado para Arapiraca.

O desempenho estatístico entre todos os modelos avaliados indicam que o modelo original de Bristow & Campbell (modelo 1) estimou com bons ajustes a  $H_g^d$  para a Coruripe, Maceió e São José da Laje. Comparando os erros obtidos, observam-se baixos valores para  $med$  ( $-0,09 \text{ MJm}^{-2}$ ) e  $dpp$  ( $2,50 \text{ MJm}^{-2}$ ), com considerável correlação ( $r = 0,86$ ) e concordância ( $d = 0,92$ ), em Coruripe. Na estação de Coruripe, a regressão linear encontrada, estima a  $H_g^d$  com  $R^2 = 0,74$ . É possível observar na Figura 5, que o modelo não estimou valores acima de  $22,5 \text{ MJm}^{-2}$ . Isto se atribui a amplitude térmica da estação não apresentar grandes valores. O  $r$  entre a  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  foi de 0,90 para Maceió e 0,83 para São José da Laje. Para Maceió e São José da Laje, o  $dpp$  apresentou 2,28 e  $2,78 \text{ MJm}^{-2}$ , e elevada concordância com valores de  $d$  iguais 0,95 e 0,90, respectivamente. Mostrando que o modelo acompanhou bem a variabilidade diária da irradiação solar global. O modelo original de Bristow & Campbell (modelo 1), subestimou as medidas em ambos locais, com  $med$  de  $-0,68 \text{ MJm}^{-2}$  em Maceió e  $-0,64 \text{ MJm}^{-2}$  para São José da Laje.

A variação da  $H_g^d$  (observada e estimada pelos modelos) que desempenharam melhores estimativas é apresentada na Figura 7. É notório o acompanhamento entre as energias estimadas e observadas, com subestimativas, superestimativas pontuais.

**Figura 7** – Variação da irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram, para locais de Alagoas em 2009.



Fonte: (Autor, 2012)

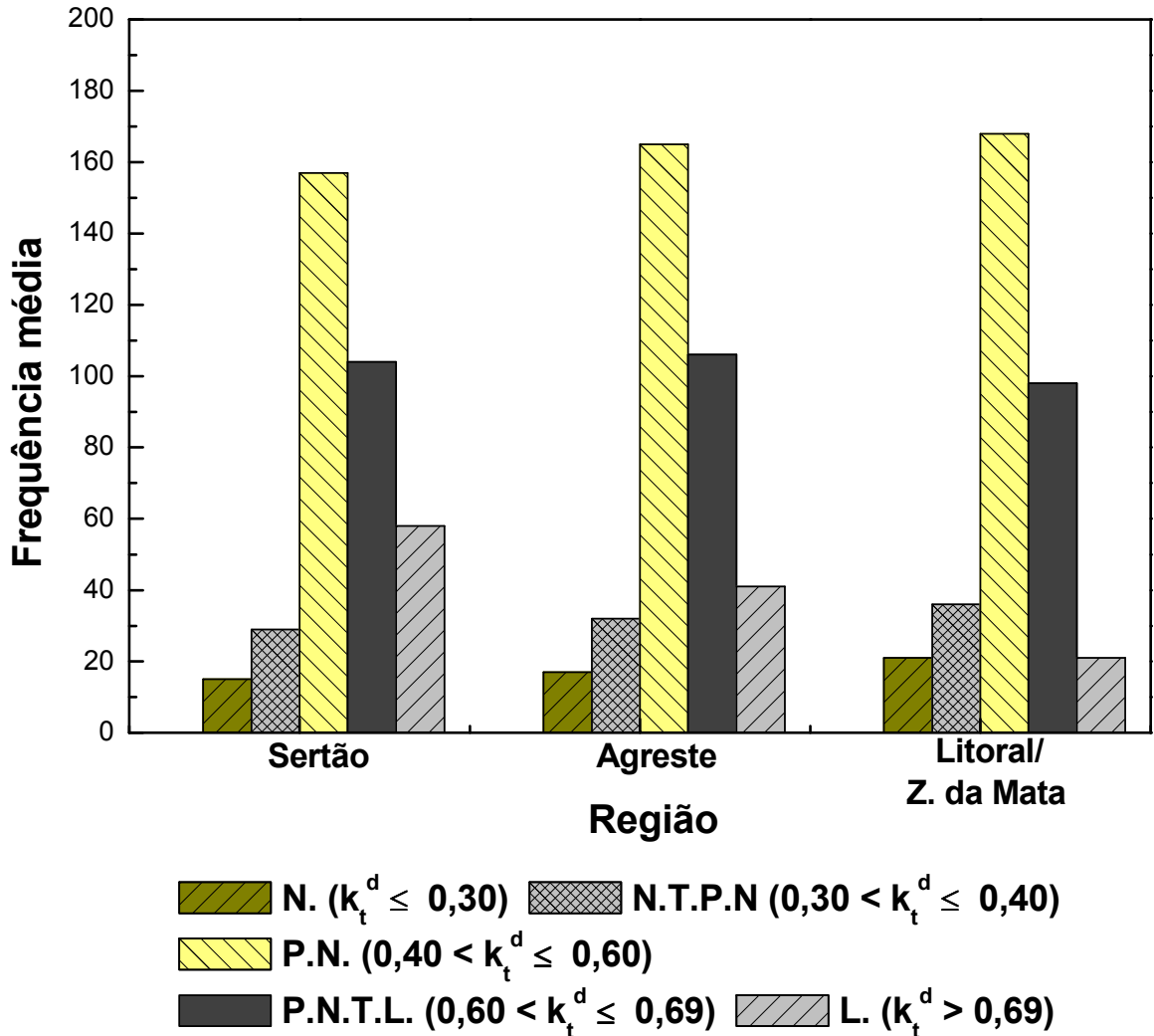
As variações das irradiações são para a estação seca (maiores valores) e chuvosa (menores valores), influenciada pela declinação solar negativa (no hemisfério sul) com menor inclinação dos raios solares para os locais estudados (menores latitudes intertropicais sul). As curvas obtidas são basicamente iguais ao longo do ano, em todos os locais, mostrando flutuações para dias compreendidos nos meses de janeiro e fevereiro, possivelmente ocasionado pela ocorrência de bastante precipitação em todo estado de Alagoas. Entre os meses de (janeiro e fevereiro), por exemplo, ocorreu uma precipitação total de 244,34 mm e 75,19 mm para Coruripe (Litoral) e Arapiraca (Agreste), respectivamente. Isto explica o decaimento da radiação durante este período observado na Figura 7.

A Figura 8 mostra o histograma de frequência média da transmitância atmosférica global diária, no ano de 2009 para as regiões do Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata. Nicácio (2002) pontuou que a análise de  $K_t^d$  pode ser utilizada para estabelecer o grau de cobertura do céu, propiciando um indicativo da porcentagem de dias limpos, parcialmente nublados e nublados. Para caracterização das condições atmosféricas foi considerado dias nublados com ( $k_t^d \leq 0,30$ ), dias nublados tendendo a parcialmente nublados ( $0,30 < k_t^d \leq 0,40$ ), dias parcialmente nublados ( $0,40 < k_t^d \leq 0,60$ ), dias parcialmente nublados tendendo a limpos ( $0,60 < k_t^d \leq 0,69$ ) e dias limpos com o intervalo de ( $0,69 > k_t^d$ ). Observa-se que as maiores frequências da transmitância atmosférica global foram verificadas para dias parcialmente nublados e limpos nas três regiões. A região do Sertão apresentou maiores quantidades de valores para a frequência de dias limpos e parcialmente nublados, seguido do Agreste e Litoral/Zona da Mata.

Utilizando a classificação de cobertura do céu (nebulosidade) empregada na Figura 8, observa-se para a região do Sertão valor médio de 15 dias nublados ( $k_t^d \leq 0,30$ ), 29 dias nublados tendendo a parcialmente nublados ( $0,30 < k_t^d \leq 0,40$ ), 157 dias parcialmente nublados ( $0,40 < k_t^d \leq 0,60$ ), 104 dias parcialmente nublados tendendo a limpos ( $0,60 < k_t^d \leq 0,69$ ) e 58 limpos ( $k_t^d > 0,69$ ) totalizando 363 dias. A região do Agreste apresentou número de dias para os intervalos da transmitância atmosférica semelhante ao Sertão, sendo 17 dias (5%) para condições nubladas ( $k_t^d \leq 0,30$ ), 32 dias (9%) nublados tendendo a parcialmente nublados ( $0,30 < k_t^d \leq 0,40$ ), 165 dias (46%) parcialmente nublados ( $0,40 < k_t^d \leq 0,60$ ), 106 dias (29%) parcialmente nublados tendendo a limpos ( $0,60 < k_t^d \leq 0,69$ ) e 41 dias (11%) de céu limpos ( $0,69 > k_t^d$ ), com um total de 361 dias. Para a região do Litoral/Zona da Mata, foram verificados dados para 345 dias, dos quais 6% correspondem aos dias nublados, 10% dias nublados tendendo a parcialmente nublados, 49% dias parcialmente nublados, 28% dias parcialmente nublados tendendo a limpos e 6% dias limpos. Houve uma redução de dias

limpos na região do Litoral/Zona da Mata, quando comparado com as demais, justificado pela proximidade com o oceano, onde existe a formação de nuvens convectivas com maior frequência, principalmente na estação chuvosa (Abril à Agosto)

**Figura 8** – Histograma de frequência média da transmitância atmosférica global, com os anos de 2008, 2009 e 2010, para as regiões do Sertão, Agreste e Litoral/Zona da Mata. Em que, N. = Nublado; N.T.P.N. = Nublado Tendendo a Parcialmente Nublado; P.N. = Parcialmente Nublado; P.N.T.L. = Parcialmente Nublado Tendendo a Limpo; L. = Limpo.



Fonte: (Autor, 2012)

#### 4.4.3 Estimativa da irradiação solar global média diária mensal

Os modelos avaliados estimaram com boa precisão a  $H_g^m$  em Alagoas. Em geral, o modelo 1 apresentou melhor desempenho, seguido do modelo 6. Os piores resultados foram verificados com a aplicação do modelo 3 (em todas as estações) e do modelo 8, que apresentou elevados valores para med e dpp nas estações de Palmeira dos Índios e Coruripe. As adaptações e a fixação de coeficientes iniciais destinados à calibração não melhorou



significativamente o desempenho dos modelos na estimativa de  $H_g^m$ . As adaptações efetuadas no modelo original de Bristow & Campbell foram, em geral, não muito eficazes e produziram pouca ou nenhuma melhora na estimativa de  $H_g^m$ . Sendo assim, o uso do modelo original sem modificação, torna-se mais conveniente. Em geral, os modelos 1 e 3, tenderam a subestimar, já o 2 a superestimar a irradiação. Por outro lado, o modelo 4 subestimou em Pão de Açúcar, Palmeira dos Índios, Maceió e São José da Laje, superestimando nas demais estações. Enquanto o modelo 5 superestimou para as regiões do Sertão e Agreste, e subestimou para o Litoral/Zona da Mata. A maior subestimativa, (com base nas adaptações do modelo 1) ocorreu para a estação de Santana do Ipanema, com  $-16,37 \text{ MJm}^{-2}$  de med ( modelo 3).

O modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) e a adaptação de Annandale *et al.*, (2007) apresentaram índices estatísticos na mesma magnitude, indicando que não houve melhora no desempenho do modelo com a inclusão da altitude como fator correção. Os modelos 8 e 9 não tiveram melhores índices estatísticos com relação ao modelo 6, como se esperava. O modelo 8, por exemplo, verificou-se em (Palmeira dos Índios e Coruripe), valores para med ( $-14,33$  e  $2,46 \text{ MJm}^{-2}$ ) e dpp ( $-24,88$  e  $3,53 \text{ MJm}^{-2}$ ), respectivamente. Enquanto o modelo 6 indicou dpp de  $1,23$  e  $2,43 \text{ MJm}^{-2}$ , para Palmeira dos Índios e Coruripe, respectivamente. A estimativa da  $H_g^m$  gerou valores de dpp menores que os observados para a estimativa da  $H_g^d$ . O modelo original de Hargreaves & Samani (modelo 6) subestimou as medidas para Palmeira dos Índios, Maceió e São José da Laje, superestimando para os demais locais. A maior subestimativa, (com base nos modelos modificados do modelo 6) ocorreu com o uso do modelo 8 para a região de Coruripe, seguido de Palmeira dos Índios. Em suma o modelo original de Bristow & Campbell (modelo 1) foi mais preciso que o original de Hargreaves & Samani (modelo 6).

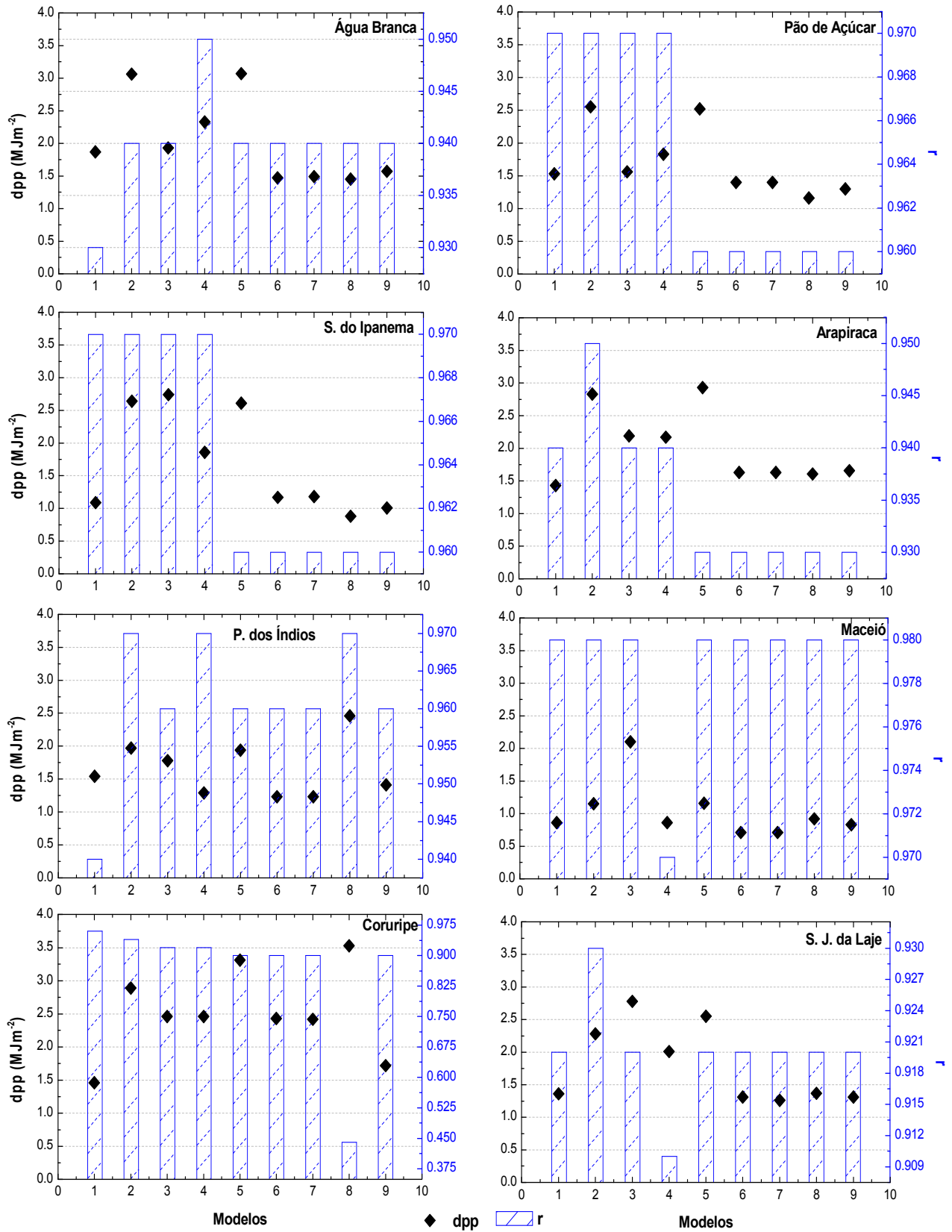
A Figura 9 mostra o dpp e o r entre  $H_g^m$  e  $H_{ge}^m$  no ano de 2009, para os modelos empíricos. Como os regimes de temperatura adotados não influenciaram significativamente na calibração dos modelos, como foi observado para a estimativa horária e diária, levou-se em consideração  $\Delta T_1$  para o modelo de Hargreaves & Samani e suas modificações, e  $\Delta T_2$  para o modelo de Bristow & Campbell e suas adaptações. Em Água Branca verificou-se correlação variando de 93,0 a 95,0%, sendo este ultimo encontrado com o modelo 4. Com elevado r apresentado, o modelo 4 também mostrou bom dpp de  $2,33 \text{ MJm}^{-2}$ . Contudo, dentre as modificações, o modelo 8 foi o que melhor estimou  $H_g^m$  para Água Branca, com correlação e índice d de 0,94 e 0,97, respectivamente. O modelo superestimou os valores observados (med =  $0,01 \text{ MJm}^{-2}$ ) e apresentando dpp de  $1,45 \text{ MJm}^{-2}$ . Apesar do bom desempenho do modelo 8, (Hargreaves & Samani) estimou bem, indicando índices estatísticos com mesmo intervalo

observado para o modelo 8. Em Água Branca, esse modelo superestimou ( $\text{med} = 0,43 \text{ MJm}^{-2}$ ), com  $r$  e índice  $d$  correspondentes a 0,94 e 0,96, respectivamente. O desvio padrão observado, indicou valor de  $1,47 \text{ MJm}^{-2}$ . O teste  $t$  mostrou que os dados observados e os estimados (modelo 8) não são significativamente diferentes.

Os indicativos estatísticos aponta que o modelo 1 estimou com melhor ajuste a  $H_g^m$  em Pão de Açúcar, Santana do Ipanema, Arapiraca e Coruripe. Em geral, o modelo 1 subestimou para Pão de Açúcar ( $\text{med} = -0,09 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Coruripe ( $\text{med} = -0,85 \text{ MJm}^{-2}$ ), superestimado para Santana do Ipanema ( $\text{med} = 0,43 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Arapiraca ( $\text{med} = 0,23 \text{ MJm}^{-2}$ ). O dpp apresentou baixos valores, sendo 1,53, 1,09, 1,43 e 1,46  $\text{MJm}^{-2}$ , para Pão de Açúcar, Santana do Ipanema, Arapiraca e Coruripe, respectivamente. O  $r$  e o índice  $d$  confirmam o bom desempenho do modelo 1 nas estações citadas no parágrafo anterior. A região de Pão de Açúcar teve  $r$  e  $d$  iguais a 0,97 e 0,96, respectivamente. Considerando a estimativa com ótima precisão. Os modelos 4 e 8 também estimaram com boa precisão os valores de  $H_g^m$  para a região de Pão de Açúcar. Contudo, o desempenho do modelo 1 foi estatisticamente superior. Os modelos 4 e 8 subestimaram os valores de  $H_g^m$ , e mostraram os seguintes índices  $r$  e  $d$ : modelo 4 com  $r = 0,97$  e  $d = 0,95$ ; modelo 8 com  $r = 0,96$  e  $d = 0,91$ . Em Santana do Ipanema verificou-se  $r$  e  $d$  correspondente a 0,97 e 0,98, respectivamente. Na região de Arapiraca identificaram-se  $r = 0,94$  e  $d = 0,96$  e Coruripe a correlação verificada foi de 0,96. O teste  $t$  avaliado para o nível de 0,05 de significância indicou que os dados estimados para Santana do Ipanema, Arapiraca e Coruripe não diferem estatisticamente dos observados. Enquanto para a estação de Pão de Açúcar o  $t$  calculado foi maior (em módulo) que o valor crítico de  $t$ . Quando foi levado em consideração nível de significância de 1%, não houve diferença significativa ( $t < t_{0,05}$ ), pois o  $t$  calculado foi menor que o crítico.

Na região de Palmeira dos Índios o  $r$  variou de 0,94 a 0,97. O valor mínimo de  $r$  foi observado para o modelo 1, com o máximo para os modelos 2, 4 e 8. O modelo 4 mostrou bons índices estatísticos, ( $\text{dpp} = 1,29 \text{ MJm}^{-2}$ ;  $d = 0,98$ ), com a tendência de subestimar ( $\text{med} = -0,10 \text{ MJm}^{-2}$ ). Apesar dos bons índices estatísticos apresentados pelo modelo 4, a melhor estimativa de  $H_g^m$  para a região de Palmeira dos Índios foi verificado com o modelo 6, Este subestimou os dados observados ( $\text{med} = -0,44 \text{ MJm}^{-2}$ ), como dpp e o índice  $d$  correspondente a  $1,23 \text{ MJm}^{-2}$  e 0,97, respectivamente. O teste  $t$  indicou não existir diferença significativa para o nível de significância de 5% ( $t = 0,92 < t_{0,05}$ ) na estimativa de  $H_g^m$ .

**Figura 9** – Desvio padrão da população de desvios (dpp) e o coeficiente de correlação (r) entre a média mensal diária da irradiação solar global observada ( $H_g^m$ ) e estimada ( $H_{ge}^m$ ) no ano de 2009, para os modelos empíricos, com base na amplitude térmica, para locais de Alagoas.



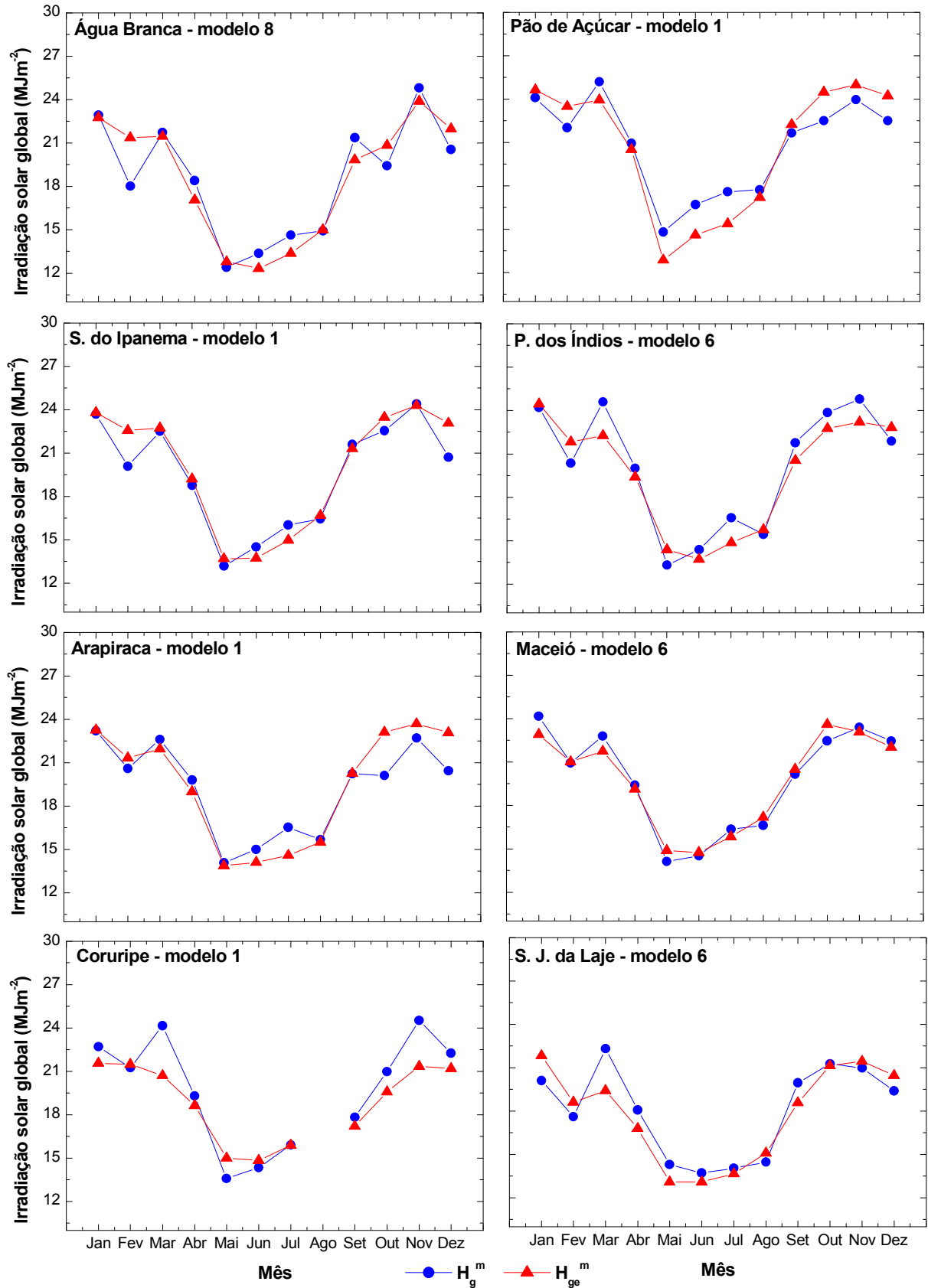
Fonte: (Autor, 2012)

Os modelos 6 e 7 estimaram  $H_g^m$  para a região de Maceió com melhores índices estatísticos. Basicamente, os modelos, apresentaram os mesmos índices estatísticos, diferenciando apenas no fato do modelo 6 tender a subestimar med igual  $-0,06 \text{ MJm}^{-2}$ . Enquanto o modelo 7 superestimou os dados observados (med =  $0,01 \text{ MJm}^{-2}$ ), encontrando para dpp, r e d respectivamente,  $0,71 \text{ MJm}^{-2}$ ,  $0,98$  e  $0,99$ . Indicando a eficiência do modelo na estimativa e que a adaptação no modelo original não melhorou o desempenho. O modelo não diferiu estatisticamente para o nível de significância de 5 %. Na região de São José da Laje, os modelos 1 e 6 estimaram  $H_g^m$  com pequenos índices estatísticos. Encontrando menor erro com a aplicação do modelo 6, com  $1,31 \text{ MJm}^{-2}$  para o dpp. Ambos subestimaram os observados, porém o modelo 6 apresentou med igual a  $-0,25 \text{ MJm}^{-2}$  (em modulo) inferior ao modelo 1, que demonstrou med igual a  $-0,56 \text{ MJm}^{-2}$ . Os r e d foram  $(0,92$  e  $0,95)$  e  $(0,92$  e  $0,96)$ , para os modelos 1 e 6, respectivamente. O teste t indicou que houve diferença significativa com o uso do modelo 6,

A variação da  $H_g^m$  e  $H_{ge}^m$  por diferentes modelos empíricos para locais de Alagoas é representada na Figura 10. Observa-se uma variação quase periódica ao longo do ano, com pico máximo para a estação seca e pico mínimo na estação chuvosa. Ocasionalmente pelo fluxo menor de energia que chega a superfície devido à formação mais frequente de nuvens convectiva no período chuvoso, que tende a refletir maior radiação para a atmosfera. O diferencial energético entre os dados observados e estimados mostram para a região Água Branca, que o modelo 8 subestimou em Janeiro ( $-0,96 \text{ MJm}^{-2}$ ), Março ( $0,78 \text{ MJm}^{-2}$ ), Abril ( $0,56 \text{ MJm}^{-2}$ ), Junho ( $0,59 \text{ MJm}^{-2}$ ), Julho ( $0,75 \text{ MJm}^{-2}$ ), Setembro ( $0,58 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Novembro ( $0,28 \text{ MJm}^{-2}$ ), e superestimou Fevereiro ( $4,41 \text{ MJm}^{-2}$ ), Maio ( $0,87 \text{ MJm}^{-2}$ ), Agosto ( $0,72 \text{ MJm}^{-2}$ ), Outubro ( $2,43 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Dezembro ( $2,52 \text{ MJm}^{-2}$ ). Na estação de Pão de Açúcar, o modelo 1 superestimou nos meses de Janeiro ( $0,54 \text{ MJm}^{-2}$ ), Fevereiro ( $1,48 \text{ MJm}^{-2}$ ), Setembro ( $0,57 \text{ MJm}^{-2}$ ), Outubro ( $1,98 \text{ MJm}^{-2}$ ), Novembro ( $1,03 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Dezembro ( $1,73 \text{ MJm}^{-2}$ ), com subestimativa em Março ( $1,27 \text{ MJm}^{-2}$ ), Abril ( $0,41 \text{ MJm}^{-2}$ ), Maio ( $1,94 \text{ MJm}^{-2}$ ), Junho ( $2,10 \text{ MJm}^{-2}$ ), Julho ( $2,20 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Agosto ( $0,52 \text{ MJm}^{-2}$ ).

Na estação de Santana do Ipanema, o modelo 1 subestimou os valores observados nos meses de Junho ( $0,79 \text{ MJm}^{-2}$ ), Julho ( $1,07 \text{ MJm}^{-2}$ ), Setembro ( $0,29 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Novembro ( $0,12 \text{ MJm}^{-2}$ ), superestimando nos demais, com média de  $0,92 \text{ MJm}^{-2}$ . Maior superestimativa foi verificada para Fevereiro ( $2,49 \text{ MJm}^{-2}$ ), com mínima de  $0,13 \text{ MJm}^{-2}$  em Janeiro. A região de Arapiraca apresentou valores subestimados para os meses compreendidos na estação chuvosa (Abril, Maio, Junho, Julho e Agosto) e em Março. Ocorrendo superestimativa para os meses

**Figura 10** - Variação da irradiação solar global média diária mensal observada ( $H_g^m$ ) e estimada ( $H_{ge}^m$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas.



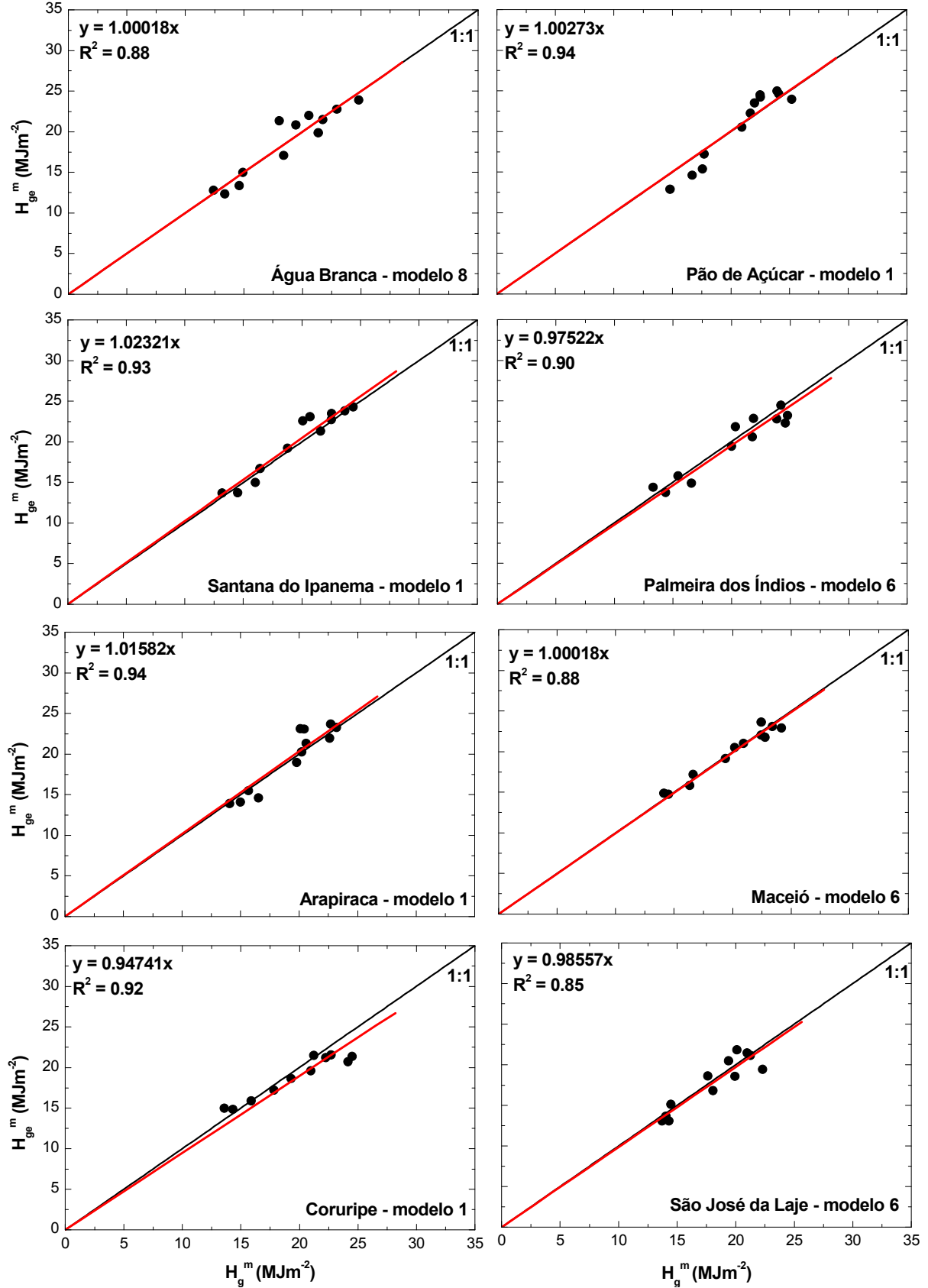
Fonte: (Autor, 2012)

da estação seca (Janeiro, Fevereiro, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro). Em média, ocorreu superestimativa de  $1,25 \text{ MJm}^{-2}$  e subestimativa de  $0,78 \text{ MJm}^{-2}$ . Na região de Palmeira dos Índios observa-se subestimativa nos meses de Janeiro  $0,19 \text{ MJm}^{-2}$ , Março ( $2,72 \text{ MJm}^{-2}$ ), Abril ( $0,95 \text{ MJm}^{-2}$ ), Junho ( $0,90 \text{ MJm}^{-2}$ ), Julho ( $1,99 \text{ MJm}^{-2}$ ), Setembro ( $1,60 \text{ MJm}^{-2}$ ), Outubro ( $1,51 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Novembro ( $2,00 \text{ MJm}^{-2}$ ), e superestimativa nos meses de Fevereiro ( $1,08 \text{ MJm}^{-2}$ ), Maio ( $0,80 \text{ MJm}^{-2}$ ), Agosto ( $0,03 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Dezembro ( $0,55 \text{ MJm}^{-2}$ ). Em geral, a estação de Maceió tendeu a superestimar nos meses de Fevereiro ( $0,09 \text{ MJm}^{-2}$ ), Maio ( $0,73 \text{ MJm}^{-2}$ ), Junho ( $0,53 \text{ MJm}^{-2}$ ), Agosto ( $0,57 \text{ MJm}^{-2}$ ), Setembro ( $0,34 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Outubro ( $1,15 \text{ MJm}^{-2}$ ), e subestimar em Janeiro ( $1,26 \text{ MJm}^{-2}$ ), Março ( $1,04 \text{ MJm}^{-2}$ ), Abril ( $0,27 \text{ MJm}^{-2}$ ), Julho ( $0,23 \text{ MJm}^{-2}$ ), Novembro ( $0,30 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Dezembro ( $0,40 \text{ MJm}^{-2}$ ).

A diferença mensal entre os dados observados e estimados pelo modelo 1 na região de Coruripe, mostra ocorrer superestimativa nos meses de Fevereiro ( $0,23 \text{ MJm}^{-2}$ ), Maio ( $1,44 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Junho ( $0,51 \text{ MJm}^{-2}$ ), e subestimativa nos demais. Os maiores valores subestimados foram verificados para os meses de Março ( $3,45 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Novembro ( $3,18 \text{ MJm}^{-2}$ ). Os dados do mês de Agosto apresentaram falhas, por isso não foram computados. Na região de São José da Laje os dados superestimaram para os meses de Janeiro ( $1,59 \text{ MJm}^{-2}$ ), Fevereiro ( $0,62 \text{ MJm}^{-2}$ ), Agosto ( $0,22 \text{ MJm}^{-2}$ ), Novembro ( $0,30 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Dezembro ( $0,86 \text{ MJm}^{-2}$ ). Enquanto ocorreu subestimativa em Março ( $3,17 \text{ MJm}^{-2}$ ), Abril ( $1,62 \text{ MJm}^{-2}$ ), Maio ( $1,68 \text{ MJm}^{-2}$ ), Junho ( $1,07 \text{ MJm}^{-2}$ ), Julho ( $0,76 \text{ MJm}^{-2}$ ), Setembro ( $1,71 \text{ MJm}^{-2}$ ) e Outubro ( $0,34 \text{ MJm}^{-2}$ ).

A relação entre  $H_g^m$  e  $H_{ge}^m$  é mostrada na Figura 11. Observa-se boa linearidade entre os dados observados e estimados para a maioria dos locais. Para a região de Água Branca o coeficiente de determinação igual a 0,88 explica 88% da variação de  $H_g^m$  por  $H_{ge}^m$ . As estações de Pão de Açúcar e Arapiraca indicaram o mesmo valor para o coeficiente de determinação, sendo igual a 0,94. O elevado  $R^2$  mostra a qualidade do ajuste da regressão, indicando que 94% da variação de  $H_g^m$  é explicada por  $H_{ge}^m$ . A regressão linear gerada para a estação de Santana do Ipanema é explicada pelo elevado coeficiente de determinação  $R^2$  (0,93) encontrado. Para Palmeira dos Índios,  $R^2$  explica 90% da regressão gerada. Na região de São José da Laje,  $R^2$  apresentou valor de 0,85, que tende a explicar 85,0% da variação de  $H_g^m$ . Na a região de Coruripe, a regressão linear gerada para o modelo original de Bristow & Campbell (modelo 1), pode explicar  $H_g^m$  com  $R^2$  igual a 0,92. O elevado coeficiente de determinação indica a qualidade do ajuste. O maior valor para  $R^2$  foi verificado para a região de Maceió, com o uso do modelo 6. O  $R^2$  igual a (0,96) indica que 96,0% da variação de  $H_g^m$  é explicada por  $H_{ge}^m$ .

**Figura 11** - Relação entre a irradiação solar global média diária mensal observada ( $H_g^m$ ) e estimada ( $H_{ge}^m$ ) pelos modelos empíricos que melhor estimaram nos locais de Alagoas. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.



Fonte: (Autor, 2012)

#### 4.5 Coeficientes para irradiação solar global diária e média mensal diária do modelo de Ångström & Prescott

Os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  (diário e mensal) para as regiões de Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios são apresentados na Tabela 8.  $\beta_1$  diário indicou valor mínimo de 0,285 em Água Branca e máximo de 0,366 em Pão de Açúcar, com  $\beta_1 = 0,325$  em Palmeira dos Índios. O coeficiente  $\beta_2$  apresentou uma amplitude de 0,069, oriundo da diferença entre o máximo ( $\beta_2 = 0,456$ ) em Água Branca e mínimo ( $\beta_2 = 0,387$ ) em Pão de Açúcar, diferente dos obtidos por outros autores (Tymvios *et al.*, 2005; Liu X *et al.*, 2009; Podestá *et al.*, 2004). Na região de Água Branca foi verificado  $\beta_1 + \beta_2 = 0,74$ , em Pão de Açúcar  $\beta_1 + \beta_2 = 0,75$  e em Palmeira dos Índios a soma foi de  $\beta_1 + \beta_2 = 0,73$ . Estes valores próximos são justificados pelo fato dos locais estudados serem localizados na faixa tropical, em que a fração potencial da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera ( $\beta_1 + \beta_2$ ) para céu claro na maioria da regiões tropicais, apresentam valores entre 0,68 e 0,75 (Akpabio & Etuk, 2003), indicando similaridade na interpretação física, onde os fatores atmosféricos tendem a influenciar os coeficientes, principalmente  $\beta_1$ . Já para as regiões situadas nos trópicos úmidos  $\beta_1 + \beta_2$  indica valores entre 0,67 – 0,70. Os desvios padrões para os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  variaram de acordo com os locais. Em termo diário os desvios padrões para os coeficientes indicaram valor médio para  $\beta_1$  de  $\pm 0,006$  e  $\beta_2$  de  $\pm 0,010$ , sendo encontrados maiores valores mensalmente, mostrando nenhum padrão para os desvios em Água Branca ( $\beta_1 = \pm 0,043$  e  $\beta_2 = \pm 0,070$ ), Pão de Açúcar ( $\beta_1 = \pm 0,042$  e  $\beta_2 = \pm 0,066$ ) e Palmeira dos Índios ( $\beta_1 = \pm 0,029$  e  $\beta_2 = \pm 0,046$ ). Explicado pela grande distância entre as localizações das estações, sendo a mínima entre Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios (77,0 km) e máxima entre Água Branca e Palmeira dos Índios (144,6 km).

**Tabela 8** - Coeficientes diários e mensais com seus respectivos desvio padrão da calibração para o modelo de Ångström & Prescott para as regiões de Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios, no ano de 2009.

		Coeficientes		Desvios Padrões	
		$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Diário</b>	<b>Água Branca</b>	0,285	0,456	$\pm 0,006$	$\pm 0,010$
	<b>Pão de Açúcar</b>	0,366	0,387	$\pm 0,007$	$\pm 0,011$
	<b>Palmeira dos Índios</b>	0,325	0,405	$\pm 0,005$	$\pm 0,008$
		$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>Mensal</b>	<b>Água Branca</b>	0,240	0,512	$\pm 0,043$	$\pm 0,070$
	<b>Pão de Açúcar</b>	0,400	0,325	$\pm 0,042$	$\pm 0,066$
	<b>Palmeira dos Índios</b>	0,277	0,469	$\pm 0,029$	$\pm 0,046$

Fonte: (Autor, 2012)



A soma de  $\beta_1 + \beta_2$  é considerada como a fração potencial da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera. Ao atingir a superfície da terra, a radiação é espalhada pela interação com as moléculas do ar, da água (vapor d'água e gotas) e poeira. Assim, os valores de  $\beta_1 + \beta_2$  são influenciados pelo comprimento ótico e composição atmosférica. A soma dos coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  foram de 0,74; 0,75 e 0,73, respectivamente para as localidades de Água Branca Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios. Mostrando similaridade na interpretação física, onde os fatores atmosféricos tendem a influenciar os coeficientes, principalmente  $\beta_1$ . Diferentemente dos resultados que foram encontrados para locais na República Árabe do Lêmen, onde os valores de  $\beta_1 + \beta_2$  foram encontrados no intervalo de 0,69 a 0,71 (Khogali *et al.*, 1983). Em 11 estações da Venezuela, Almorox *et al.*, (2008) encontraram uma variabilidade muito grande de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ . O coeficiente  $\beta_1$  variou de 0,253 a 0,338, enquanto  $\beta_2$  de 0,215 - 0,376, com média geral de 0,292; 0,295 e 0,587, respectivamente para  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_1 + \beta_2$ . Observa-se que o índice de claridade máxima ( $\beta_1 + \beta_2$ ) para Venezuela foi muito baixo, quando comparados aos obtidos para os locais de Alagoas. Isto pode ser explicado pelas diferenças climáticas entre as regiões. Almorox *et. al.* (2008) propuseram o uso da média de  $\beta_1$  (0,26) e  $\beta_2$  (0,34) como coeficientes fixos, para toda Venezuela, onde não tenha dados de irradiação.

Os coeficientes mensais foram diferentes dos diários, em geral para Água Branca e Palmeira dos Índios,  $\beta_1$  diminuiu em média 15,25 % enquanto  $\beta_2$  aumentou 14,04 %. Diferentemente do ocorrido para Pão de Açúcar, que mostrou maiores valores  $\beta_1$  (0,400) e menores de  $\beta_2$  (0,325), com 9,29 % e 17,48 %, de aumento e redução, respectivamente. O coeficiente  $\beta_1$  foi mais afetado pela posição geográfica e altitude que  $\beta_2$ , concordando com Chen *et al.*, (2006) para locais da China. El-Sebaii & Trabea (2005) verificaram, para regiões no Egito, que os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  não variaram com a latitude ou altitude de maneira sistemática, no entanto, os valores da soma de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , (que representa o índice de claridade máxima), foram iguais aos observados nos locais de Alagoas. Os coeficientes encontrados para os locais de Alagoas em termos diários e mensais diferem dos indicados pelo Ångström (1924) (que sugeriu valores de 0,20 e 0,50 para  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , respectivamente), concordando com Chineke (2008) para Owerri na Nigéria, que comprova a necessidade da calibração dos coeficientes do modelo nos locais de estudo. Liu X *et al.*, (2009) pontuaram que ao utilizar dados mensais para a calibração dos modelos empíricos, uma variação grande pode ser esperada nos coeficientes se a série de dados não for muito grande, e que os coeficientes ajustados com dados mensais podem ser satisfatoriamente aplicados em escala menor (diária) para estimar a irradiação solar global. Em geral, a diferença média entre os coeficientes em escala diária e mensais nos locais estudados foram de 6,43 % para  $\beta_1$  e - 4,44 % para  $\beta_2$ .

Martínez - Lozano *et al.*, (1984) relataram que a variabilidade dos coeficientes do modelo de Ångström-Prescott é geralmente relacionada com a localização geográfica do local e das condições atmosféricas (altitude, latitude, teor de água vapor, albedo, nível de poluição e entre outros). Esses fatores podem fornecer uma explicação satisfatória para a variação de  $\beta_1$  e  $\beta_2$  entre diferentes locais, mas não justificam variações para o mesmo local (Liu, X. *et. al*, 2009).

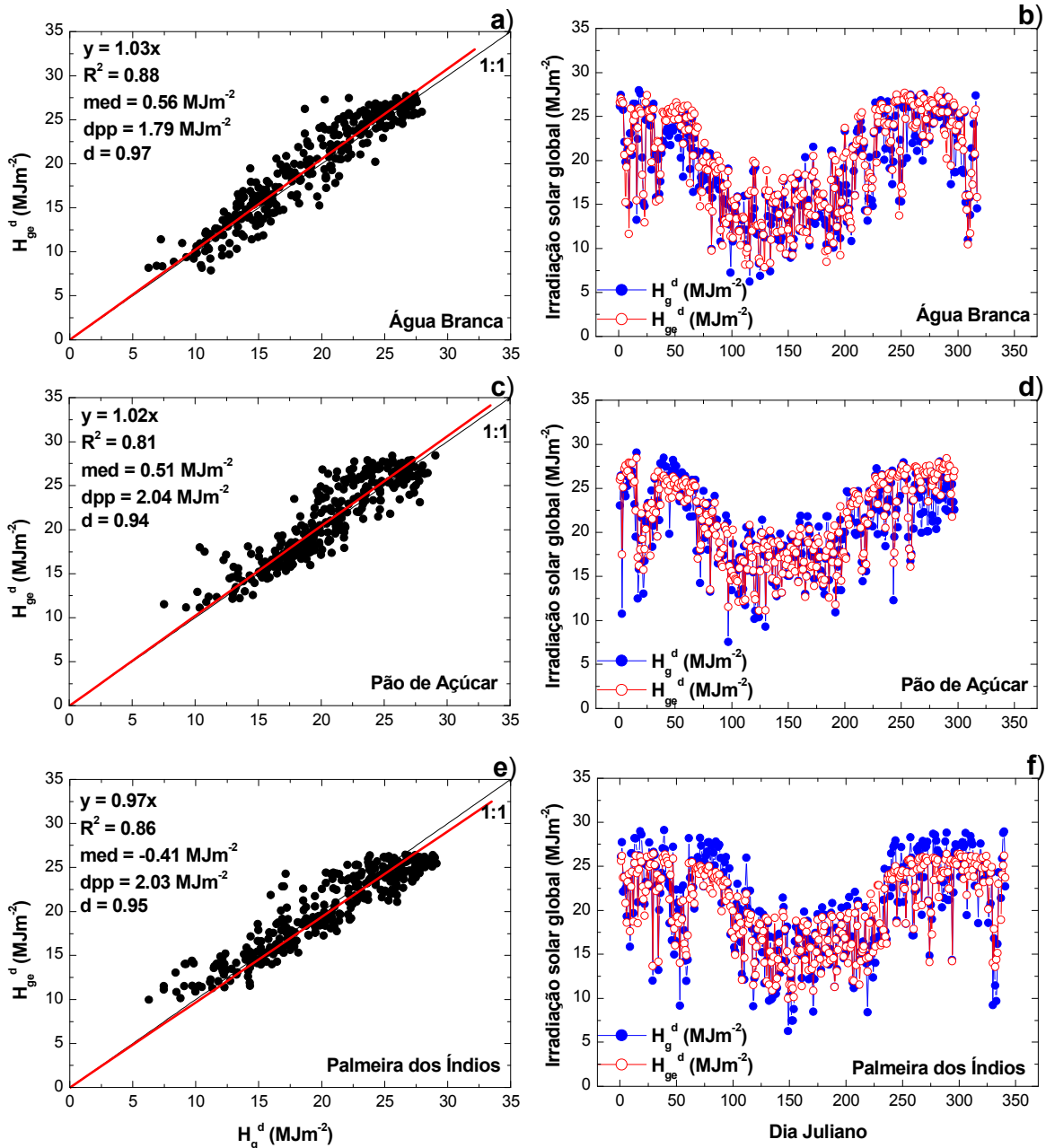
#### 4.5.1 Estimativa da irradiação solar global diária

A relação entre  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$ , a variação anual e os índices estatísticos entre  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  com o modelo de Ångström – Prescott são mostradas na Figura 12, a reta que divide o quadrante em duas partes iguais é a ideal para comparação (1:1). Observa-se para os locais ajustes lineares entre os dados observados e estimados (Figura 12 a, c, e). Apesar da exclusão de dados duvidosos, obedecendo ao critério adotado na metodologia, é evidente que alguns pontos da regressão na Figura 12 (a, c, e) estão fora da linha de tendência principal. Isto é inevitável considerando a quantidade de dados utilizados, onde pode-se atribuir estas divergências a erros de medidas ou estimativas, contudo a quantidade de pontos dispersos não interferi na tendência geral dos dados, como pontuou (Liu X *et al.*, 2009) para a bacia do rio Amarelo na China. Os  $R^2$ , para Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios foram 0,88, 0,81 e 0,86, respectivamente, com uma média de 0,85. Mostrando que a regressão gerada explica, em média, 85,0 % da  $H_g^d$  esperada, concordando com Meza & Varas (2000), que encontraram  $R^2$  igual a 0,85, a partir do uso do modelo de Ångström – Prescott. Pode-se concluir então, que a simples correlação de Ångström-Prescott pode ser aplicada para estimar  $H_g^d$ , sobre uma superfície horizontal.

Os valores para d de Willmontt ente os dados observados e estimados foram elevados, mostrando em Água Branca de  $d = 0,97$ , em Pão de Açúcar de  $d = 0,94$  e em Palmeira dos Índios de  $d = 0,95$ , com concordância média de 95,0% entre os locais. Os indicativos estatísticos mostram que o modelo superestima ( $med > 0$ ) para Água Branca (3%) e Pão de Açúcar (2%), com dpp de 1,79 e 2,03  $MJm^{-2}$ , respectivamente. O resultado é considerado muito bom quando compara-se os indicativos estatísticos da validação. Na região de Palmeira dos Índios o modelo estimou a  $H_g^d$  com dispersão de dpp igual a 2,03  $MJm^{-2}$ , subestimando ( $med < 0$ ) os dados observados em 3%. De acordo com Brinsfield *et al.*, (1984) os dados estimados têm a tendência de subestimar em dias com pouca nebulosidade e superestimar em dias de grande nebulosidade. Em geral, o modelo de Ångström – Prescott estimou com boa precisão a  $H_g^d$  nos locais de Alagoas, mostrando altos valores para o índice d e baixos valores para med e dpp. O valor médio para med (em modulo) e dpp, foram respectivamente, 0,22

$\text{MJm}^{-2}$  e  $1,95 \text{ MJm}^{-2}$ , indicando que o modelo é adequado para estimar a  $H_g^d$  nos locais estudados, em que,  $H_g^d$  está bem correlacionada com  $H_{ge}^d$ . O valor de dpp e d para Pão de Açúcar não diferem muito daqueles verificados para Palmeira dos Índios (com diferença de

**Figura 12** – Relação entre a irradiação solar global diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelo modelo de Ångström & Prescott, em a) Água Branca, c) Pão de Açúcar, e) Palmeira dos Índios. A variação anual entre ( $H_g^d$ ) e ( $H_{ge}^d$ ) é mostrada em b) Água Branca, d) Pão de Açúcar, f) Palmeira dos Índios. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.



Fonte: (Autor, 2012)

1,05 % para d e 0,995% para dpp), apontando que a relação do desvio padrão de previsão encontrado para Água Branca é em média 12,04% mais baixo, enquanto d indicou ser em média 2,57% mais alto. A razão para esses erros maiores em Pão de açúcar e Palmeira dos

Índios podem está relacionado com a semelhança de clima, que é diferente do clima de Água Branca. Em geral, o valor de med para Água Branca foi maior 8,928% (em modulo) que o de Pão de Açúcar e 26,78% que o de Palmeira dos Índios.

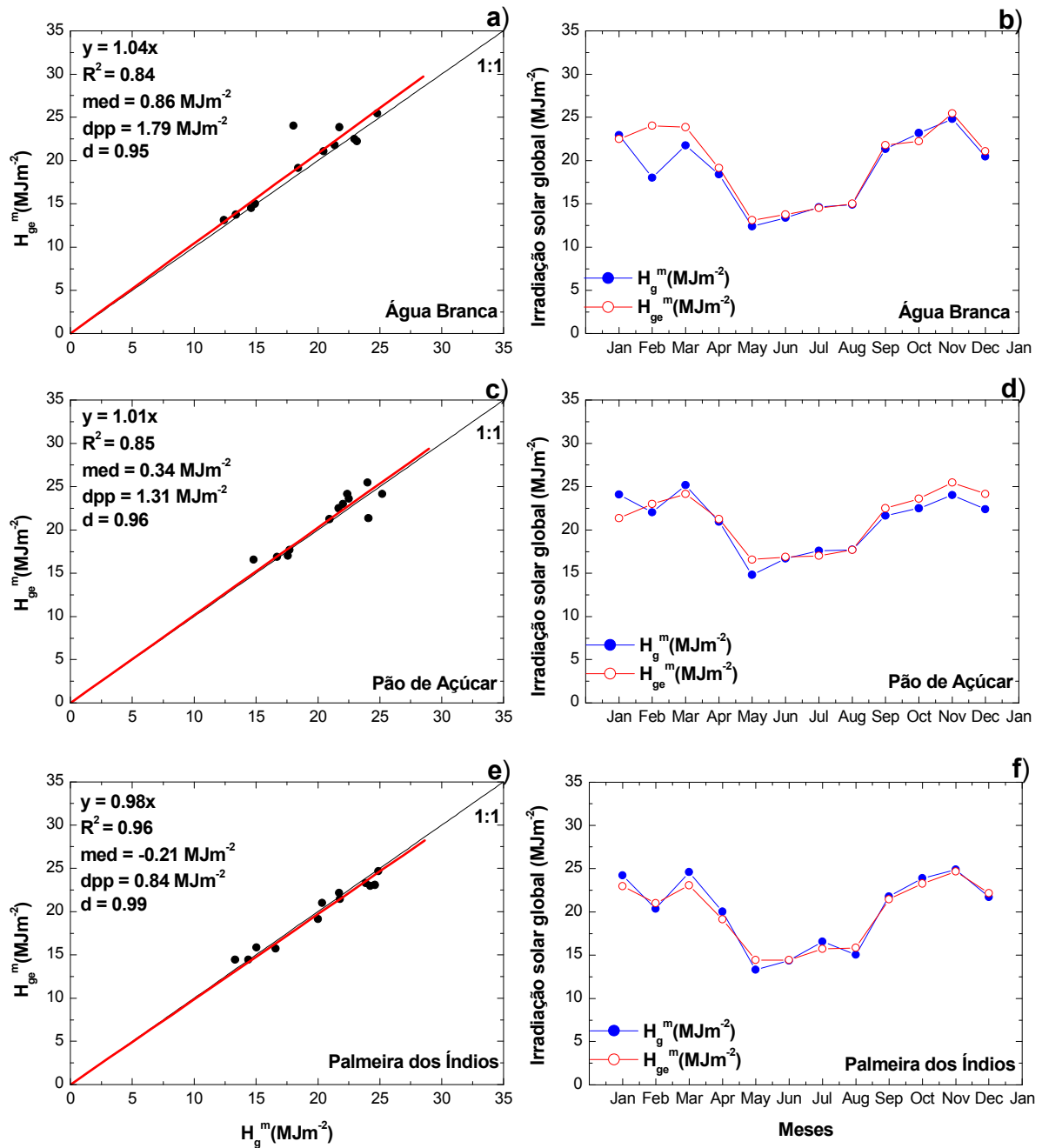
Na região de Água Branca o valor máximo de  $H_g^d$  (27,94  $MJm^{-2}$ ) foi verificado para o dia Juliano 18 e mínimo ( $H_g^d = 6,33 MJm^{-2}$ ) para o dia Juliano 121 (Figura 1 b). Por outro lado, a estação de Pão de Açúcar mostrou máximo ( $H_g^d = 29,08 MJm^{-2}$ ) para o dia Juliano 47 e mínimo ( $H_g^d = 7,39 MJm^{-2}$ ) para o dia Juliano 121 (Figura 1 d). Entre as regiões, Palmeira dos Índios apresentou a maior amplitude anual de  $H_g^d$  (22,85  $MJm^{-2}$ ), mínimo de  $H_g^d = 6,27 MJm^{-2}$  verificado para o dia Juliano 158 e máximo  $H_g^d = 29,12 MJm^{-2}$  no dia Juliano 39 (Figura 1 f). A evolução anual mostra que as estimativas estão bem ajustadas com as observadas, variando ao longo do ano, com uma periodicidade característica, os maiores valores de  $H_g^d$  ocorrem na primavera e verão (menor nebulosidade), e os menores no outono e inverno (maior nebulosidade).

#### 4.5.2 Estimativa da irradiação solar global média mensal diária

A relação entre  $H_g^m$  e  $H_{ge}^d$ , a variação anual e os índices estatísticos entre  $H_g^d$  e  $H_{ge}^d$  com o modelo de Ångström – Prescott são mostradas na Figura 13, a reta que divide o quadrante em duas partes iguais é a ideal para comparação (1:1). Para as estações de Água Branca e Pão de Açúcar, o  $R^2$  explica em média 85% da irradiação esperada, valor médio também foi encontrado com dados diários. O elevado  $R^2$  (0,96) encontrado para a região de Palmeira dos Índios, mostra que a  $H_g^m$  está bem correlacionada com a estimada, e que 96,0% da variação da irradiação solar foi contabilizada pelo utilização do modelo. Em suma, as estimativas concordam com Liu X *et al.*, (2009), que verificaram  $R^2$  variando de 0,31 – 0,91, com média de 64,0%, em trechos da Bacia do Rio Amarelo localizado na China.

Na região de Água Branca o modelo superestimou (em 4%) os dados observados, com med, dpp e d sendo 0,86, 1,79  $MJm^{-2}$  e 95,0%, respectivamente. Os valores obtidos para med em alguns casos são positivos e negativos em outros, indicando que o modelo estima valores abaixo ou acima dos dados observados. Para região de Pão de Açúcar o modelo apresentou pouca dispersão (dpp = 1,31  $MJm^{-2}$ ), superestimando as medidas em 1%, que quantifica (0,34  $MJm^{-2}$ ), com uma precisão d de 96,0%. Liu X *et al.*, (2009) destacou que melhor ajuste para o modelo de Ångström – Prescott pode ser obtido usando dados diários.

**Figura 13** – Relação entre a irradiação solar global média mensal diária observada ( $H_g^d$ ) e estimada ( $H_{ge}^d$ ) pelo modelo de Ångström & Prescott, em a) Água Branca, c) Pão de Açúcar, e) Palmeira dos Índios. A variação anual entre ( $H_g^m$ ) e ( $H_{ge}^m$ ) é mostrada em b) Água Branca, d) Pão de Açúcar, f) Palmeira dos Índios. A linha diagonal continua representa a reta 1:1.



Fonte: (Autor, 2012)

Porém, nossos resultados mostraram que o modelo usando dados mensais é melhor ajustado. O indicativo estatístico dpp mostra que o modelo causou dispersão dos dados medidos de  $0,84 \text{ MJm}^{-2}$  para a região de Palmeira dos Índios, isso mostra a irradiação solar estimada se aproxima muito da observada, com  $d$  igual a  $99,0\%$ . O modelo subestimou em  $2\%$  ( $med < 0$ ) os dados observados, apontando bom desempenho em estimar da  $H_g^m$ . Maior diferença de dpp ( $0,95 \text{ MJm}^{-2}$ ) verificou-se entre Água Branca e Palmeira dos Índios. O ajuste obtido para a

estimativa mensal foi tão bom quanto encontrado com os dados diários, indicando um resultado aceitável e comparável com o alcançado por Ångström & Prescott (1940); Supit & Van Kappel (1998), isto é justificado pelo fato das estimativas não apresentarem diferença significativa quando comparadas com os dados observados. O valor médio de dpp e d entre os locais foram  $1,31 \text{ MJm}^{-2}$  e  $0,97$ , respectivamente, sendo d mais elevado e dpp menos elevado para a região de Palmeira dos Índios que Água Branca e Pão de Açúcar.

Na Figura 13 (b, d e f) observa-se que  $H_{ge}^m$  aproxima-se bastante dos dados observados, subestimado em alguns meses e superestimando em outros. Na região de Água Branca o modelo subestimou nos meses de Janeiro, Julho e Outubro, superestimando nos demais. Maior valor de irradiação é observado para o mês de Novembro ( $24,79 \text{ MJm}^{-2}$ ) e menor para Maio ( $12,41 \text{ MJm}^{-2}$ ), representando uma amplitude anual de  $12,38 \text{ MJm}^{-2}$ . Na estação de Pão de Açúcar houve superestimativa nos meses de Fevereiro, Abril, Maio, Junho, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro. Por outro lado, o modelo tendeu a subestimar em Janeiro, Março, Julho e Agosto. Indicando pico máximo  $25,19 \text{ MJm}^{-2}$  para o mês de Março e mínima de  $14,80 \text{ MJm}^{-2}$  em Maio, caracterizando período seco e chuvoso, respectivamente. O valor da amplitude de  $H_g^m$  registrado em Pão de Açúcar foi  $10,39 \text{ MJm}^{-2}$ . Na região de Palmeira dos Índios a irradiação solar global mostrou uma amplitude anual  $11,58 \text{ MJm}^{-2}$ , com máxima  $24,90 \text{ MJm}^{-2}$  e mínima  $13,32 \text{ MJm}^{-2}$ , nos meses de Novembro e Maio, respectivamente. O modelo subestimou nos meses de Janeiro, Março Abril, Julho, Setembro, Outubro e Novembro, superestimando nos demais.

Em geral, os meses compreendidos no verão e na primavera, estações com menor nível de nebulosidade, possuem picos energéticos maiores, e por essa razão, menores picos energéticos são verificados para os meses pertencentes às estações de outono e inverno. Percentualmente, os meses de Janeiro, Fevereiro, Março, Setembro, Outubro, Novembro e Dezembro foram os mais energéticos, enquanto que os meses de Abril, Maio, Junho, Julho e Agosto os menos energéticos. Em média o maior valor de d entre  $H_g^m$  e  $H_{ge}^m$  ocorre para os meses de Junho, Julho e Agosto, onde as diferenças de energia são inferiores a 2,41%. Enquanto os menores valores de d entre a relação de  $H_g^m$  e  $H_{ge}^m$  ocorrem nos meses de Janeiro, Março e Maio, que são observadas diferenças de 6,63%, 6,53% e 7,88%, respectivamente.

O resumo dos desempenhos dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar para cada local, na escala horária, diária e mensal estão expressos nas Tabelas 9, 10 e 11, onde se observa seus respectivos indicativos estatísticos.

**Tabela 9** - Desempenho dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar global média horária mensal em cada local e seus indicativos estatísticos (média geral do desvio padrão da população de desvios  $\langle ddp \rangle$ , do coeficiente de correlação média geral  $\langle r \rangle$  e do índice de concordância médio geral  $\langle d \rangle$ ).

<b>Irradiação solar global média horária mensal</b>				
<b>Locais</b>	<b>Modelos</b>	<b><math>\langle ddp \rangle</math> (MJm<sup>-2</sup>)</b>	<b><math>\langle r \rangle</math> (%)</b>	<b><math>\langle d \rangle</math> (%)</b>
Água Branca	8	0,23	97,00	97,00
Pão de Açúcar	9	0,24	97,00	98,00
Santana do Ipanema	6	0,25	96,00	97,00
Palmeira dos Índios	9	0,29	95,00	95,00
Arapiraca	8	0,28	93,00	94,00
Maceió	9	0,24	95,00	96,00
Coruripe	8	0,26	95,00	96,00

Fonte: (Autor, 2012)

**Tabela 10** - Desempenho dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar global diária em cada local e seus indicativos estatísticos (desvio padrão da população de desvios (ddp), coeficiente de correlação (r) e índice de concordância (d)).

<b>Irradiação solar global diária</b>				
<b>Locais</b>	<b>Modelos</b>	<b>dpp (MJm<sup>-2</sup>)</b>	<b>r (%)</b>	<b>d (%)</b>
Água Branca	10	1,79	93,81	97,00
Pão de Açúcar	10	2,04	90,00	94,00
Santana do Ipanema	6	2,31	88,88	93,00
Palmeira dos Índios	10	2,03	92,74	95,00
Arapiraca	6	2,68	83,07	91,00
Maceió	1	2,28	90,00	95,00
Coruripe	1	2,50	86,02	92,00
São José da Laje	1	2,78	83,07	87,00

Fonte: (Autor, 2012)

**Tabela 11** - Desempenho dos modelos que melhor estimaram a irradiação solar global média diária mensal em cada local e seus indicativos estatísticos (desvio padrão da população de desvios (ddp), coeficiente de correlação (r) e índice de concordância (d)).

<b>Irradiação solar global média mensal diária</b>				
<b>Locais</b>	<b>Modelos</b>	<b>dpp (MJm-2)</b>	<b>r (%)</b>	<b>d (%)</b>
Água Branca	10	1,79	91,65	95,00
Pão de Açúcar	10	1,31	92,20	96,00
Santana do Ipanema	1	1,09	96,44	98,00
Palmeira dos Índios	10	0,84	97,98	99,00
Arapiraca	1	1,43	96,95	96,00
Maceió	6	0,71	93,81	99,00
Coruripe	1	1,46	95,92	92,00
São José da Laje	6	1,31	92,20	96,00

Fonte: (Autor, 2012)

## 5 CONCLUSÕES

A estimativa da irradiação solar global média horária mensal é mais adequada com a amplitude térmica do ar na forma mais simples (diferença entre a temperatura do ar máxima e mínima), devido às pequenas oscilações da temperatura do ar no intervalo horário. Nas escalas diárias e mensais, as duas formas diferentes de amplitudes térmicas do ar ( $\Delta T_1$  e  $\Delta T_2$ ) não mostraram diferenças entre os coeficientes gerados. O desempenho dos modelos com o uso de  $\Delta T_1$  não difere estatisticamente quando comparado com os resultados obtidos com  $\Delta T_2$ , indicando basicamente os mesmos padrões, sugerindo-se a utilização de  $\Delta T_1$  por ser mais simples.

Os coeficientes gerados, para estimativa a irradiação solar global, são diferentes entre todas as regiões, mostrando a necessidade de calibração com dados locais. Simplificações do modelo de Bristow & Campbell (modelo 1), pela fixação de  $\beta_1$  e  $\beta_3$  devem ser evitadas sempre que possível. O modelo 3 (derivado do modelo de Bristow & Campbell) foi o que indicou piores estimativas nas escalas diárias e mensais nos oito locais analisados. Apesar dos modelos modificados de Hargreaves & Samani apresentarem menores desvios, todos os modelos estimaram a irradiação solar global média horária mensal com bons indicativos estatísticos. Recomenda-se o uso do modelo 6 (Hargreaves & Samani) e suas modificações em Alagoas na estimativa horária, pois não apresentaram diferenças significativas.

Nas regiões do Sertão e Agreste, o modelo original de Hargreaves & Samani estima com melhor precisão a irradiação solar global diária. Para as regiões do Litoral e Zona da Mata, o modelo de Bristow & Campbell teve melhor desempenho. Recomenda-se para o Sertão e Agreste o uso do modelo original de Hargreaves & Samani com as calibrações locais, e para o Litoral e Zona da Mata o modelo original de Bristow & Campbell, mostrando que as modificações não apresentaram resultados estatisticamente superiores. Não ocorreu diferença significativa na estimativa da irradiação solar global média diária mensal. Em geral, para as regiões do Sertão e Agreste, o modelo original de Bristow & Campbell estima com melhor precisão a irradiação solar global média diária mensal. Para o Litoral e a Zona da Mata o modelo original de Hargreaves & Samani estimou com melhores indicativos estatísticos.

Os coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  do modelo de Ångström & Prescott são característicos de cada local, não possuindo o mesmo padrão tanto em escala diária quanto em mensal. Porém, mostraram o mesmo valor para a fração potencial da irradiação solar que chega ao topo da atmosfera ( $\beta_1 + \beta_2 = 0,74$ ), indicando semelhante no grau de nebulosidade. Apesar de ocorrer diferença significativa para 5%, a estimativa da irradiação solar global diária com o modelo



acompanhou bem os dados observados, nos três locais, com ótimos índices estatísticos. A estimativa da irradiação solar global média diária mensal não apresentou diferença significativa para 1%, comprovado pelos bons índices estatísticos verificados. Em geral, os modelos estimaram a irradiação solar global horária, diária e mensal com boa precisão. Em Água Branca, Pão de Açúcar e Palmeira dos Índios, o desempenho do modelo de Ångström & Prescott foi levemente superior que os modelos baseados na temperatura do ar. A partir dos resultados observa-se a eficiência dos modelos empíricos, baseados na temperatura do ar e duração do brilho solar, em estimar a irradiação solar global em Alagoas, principalmente, os modelos nas versões originais com calibrações locais.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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**, v. 148, p. 401–416, 2008.

AKPABIO, L. E.; ETUK, S. E. Relationship between global solar radiation and sunshine duration for Onne, Nigeria. **Turkey Journal Physics**, v.27, p.161-167, 2003.

ALLEN, R. Evaluation of procedures of estimating mean solar radiation from air temperature. **FAO**, Rome, 1995.

\_\_\_\_\_; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO** Irrigation And Drainage Paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 1998, 300p.

\_\_\_\_\_. Self – Calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.2, N° 2, p. 56 – 67, 1997.

ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of global solar radiation in Venezuela. **Interciencia**, vol. 33, n.4, Apr 2008.

\_\_\_\_\_; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of monthly Ångström – Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain. **Renewable Energy**, v. 30 p. 931 – 936, 2005.

ÅNGSTRÖM, A. On the computation of global radiation from records of sunshine. **Arkiv För Geofysik**, v.2, 22, p. 471, 1956.

\_\_\_\_\_. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. v.50, p.121, 1924.

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

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

BANDYOPADHYAY, A.; BHADRA, A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes. **Agricultural Forest Meteorology, Amsterdam**, v. 148, n. 11, p. 1707 – 1718, 2008.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n. 1, p.74 – 80, 2010.

BRINSFIELD, R.; YARAMANOGLU, M.; WHEATON, F. Round level solar radiation prediction model including cloud cover effects. **Solar Energy**, v.33, p.493 – 499, 1984.

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.159–166, 1984.

BROWN, E. W. **An Introduction to solar energy**. 1988, Disponível em: <<http://www.ccs.neu.edu/home/feneric/solar.html>>. Acesso em: 05/10/2010.

CEBALLOS, J. C.; RODRIGUES, M. L.; OLIVEIRA, L. M. **Desempenho do modelo GL versão 1,2 época: Outubro 2010 – Dezembro 2010**, Relatório Técnico 01/11 - RST-DSA.

\_\_\_\_\_; BOTTINO, M. J.; SOUZA, J. M. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. **Journal of Geophysical Research**, v.109, p.1-14, D02211, doi: 10.1029/2003JD003531, 2004.

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

\_\_\_\_\_; SHIHUA, L.; ERSI, K.; JIANPING, Y.; XIBIN, J. Estimating daily global radiation using two types of revised models in china. **Energy Conversion and Management**, v.47, p.865 – 878, 2006.

CHINEKE, T., C. Equations for estimating global solar radiation in data sparse regions. **Renewable Energy**, v.33, p.827 – 831, 2008.

COMETTA, E. **Energia solar: utilização e empregos práticos**. Editora hemus – São Paulo, 1978, 127 páginas. Tradução e adaptação: Noberto de Paula Lima.

DAVID, M. L.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: Teoria e Aplicações**. Editora LTC, 5 ° edição, 2008. Tradução Teresa Cristina Padilha de Souza, - [Reimpr.] – Rio de Janeiro, LTC, 2011, 752 páginas, + CD-ROM.

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

DUFFIE, J.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York, 2006, 3ª edição, 928 p.

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

\_\_\_\_\_ ; TRABEA, A. A. Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces over Egypt. **Egypt Journal Solids**, v.28, n.1, 2005.

ESPINEL, A. **Opportunities and challenges from the technological economical and policy perspectives**. Spring semester 2010.

GOMES, E. N. **Medidas e modelos de estimativa da radiação direta na incidência**. 112p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2006.

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

HARGREAVES, G.L.; HARGREAVES, G.H; RILEY, J.P. Irrigation water requirement for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drain. Engineering**, v.111, p.265-275, 1985.

\_\_\_\_\_ ; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drain Engineering**, v.108, p.225-230, 1982.

HOFFMAN, R.; VIEIRA, S. **Análise de Regressão: Uma Introdução à Econometria**. 2ª edição, Editora HUCITEC, São Paulo, 1987, 379p.

HUNT, L.A.; KUCHARB, L.; SWANTON, C.J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**. V.91, p. 293–300, 1998.

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

IZIOMON, M. G.; MAYER, H. Performance of solar radiation models – a case study. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.110, p.1 – 11, 2001.

KABELAC, S. E DRAKE, F. D. The Entropy of terrestrial solar radiation. **Solar Energy**, v.48, n.2, p.239-248, 1992.

KAPLANIS, S. N. New methodologies to estimate the hourly global solar radiation: Comparisons with existing models. **Renewable Energy**, v.31, p.781–790, 2006.

\_\_\_\_\_ ; KAPLANI, E. A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation  $I(h_i, n_j)$  values. **Renewable Energy**, v.32, p.1414 – 1425, 2007.

\_\_\_\_\_ ; KAPLANI, E. Stochastic prediction of hourly global solar radiation for Patra, Greece. **Applied Energy**, v.87, p.748–3758, 2010.

KHOLAGI, A.; RAMADAN, M. R. I.; ALI, Z. E. H.; FATTAH, Y.A. Global and diffuse solar irradiance in Yemen (Y.A.R.). **Solar Energy**, v.31, n.1, p. 55, 1983.

LI, H.; MA, W.; LIAN, Y.; WANG, X. Estimating daily global solar radiation by day of year in China. **Applied Energy**, DOI: 10.1016/. 2010,03,028, 2010.

LIU K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Elsevier –Academic press. San Diego – Califórnia, 92101 – 4495, USA, 2º edição, 2002.

LIU, X.; MEI, X.; LI, Y.; WANG, Q.; JESEN, J. R.; ZHANG, Y.; PORTER, J. R. Evaluation of temperature-based global solar radiation models in China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.1433 – 1446, 2009.

\_\_\_\_\_ ; MEI, X.; LI, Y.; WANG, Q.; JESEN, J. R.; ZHANG, Y.; PORTER, J. R. Calibration of the Ångström – Prescott coefficients (a, b) under different time scales and their impacts in estimating global solar radiation in the Yellow River basin. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.697 – 710, 2009.

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

MAGHRABI, A. H. Parameterization of a simple model to estimate monthly global solar radiation based on meteorological variables, and evaluation of existing solar radiation models for Tabouk, Saudi Arabia. **Energy Conversion and Management**, v.50, p.2754 – 2760, 2009.

MARTÍNEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; ONRUBIA, J. E.; DE LA RUBIA, J. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: review and bibliography. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.33, p.109–128, 1984.

MELO, S. B. DE. **Modelagem da irradiação solar global para a região de Mossoró – RN**. 106p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, 2009.

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

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. Ed. Nobel S/A. São Paulo, 1989.

NICÁCIO, R. M. **Radiação solar global e difusa para a região de Maceió – AL: medidas e modelos.** 107p. Dissertação (Mestrado), Instituto de Ciências Atmosféricas, ICAT/UFAL. 2002.

PAULESCU, M.; TULCAN-PAULESCU, E.; STEFU, N. A temperature – based model for global solar irradiance and its application to estimate daily irradiation values. **International Journal of Energy Research.** Doi:10, 1002/cr, 2010.

PODESTÁ, G.P.; NÚÑEZ, L.; VILLANUEVA, C. A.; SKANSI, M. A. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.123, p. 41–53, 2004.

PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. **Transaction of the Royal Society of Science**, V.64, p.114–125, 1940.

SANTOS, C. M.; SOUZA, J. L.; TIBA, C.; MELO, R. O.; SANTOS, K. R. M.; ANJOS, F. A.; SILVA, M. B. P.; GOMES, A. R. A.. Estimativa da irradiação solar global diária por dia do ano na região de Maceió – AL. **Anais do XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – Guarapari/ ES– 18 a 21 de Julho de 2011.**

SILVA, P. R. T. **Radiação Solar Global Mensal para o Estado de Alagoas – Mapeamento.** 112p. Dissertação (Mestrado), Instituto de Ciências Atmosféricas, ICAT/UFAL. 2007.

SIQUEIRA, A. N.; TIBA, C.; FRAINDENRAICH, N. Interpolação espacial da irradiação solar diária, mediante Redes Neurais Artificiais, em locais do Sertão de Pernambuco – Brasil. **Avances em Energías Renovables y Medio Ambiente**, v.11, p.1 – 7, 2007.

SOUZA, J. C.; ESCOBEDO, J, F. Construção de um saldo radiômetro com termopilha de filme fino e avaliação de sua performance. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.10, n.112, p.29-36, 1995.

\_\_\_\_\_; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1203-1220, 2005.

SPIEGEL, M. R. **Probabilidade e Estatística.** Editora McGRAW-HILL, Tradução de Alfredo Alves de Farias. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil (coleção Schaum), 1978, 518p.

SPOKAS, K.; FORCELA, F. Estimating hourly incoming solar radiation from limited meteorological data. **Weed Science**, v.54, p.184 – 189, 2006.

SUPIT, I.; KAPPEL, R. R.A simple method to estimate global radiation. **Solar Energy**, v.63, n.3, p. 147-160, 1998.

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**, v.93, p.211-228, 1999.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, 1955, 104p. (Publications in Climatology, v.8, n.1).

TIBA, C.; FRAINDENRAICH, N.; GROSSI, H.; LYRA, F. **Atlas solarimétrico para localidades brasileira**. Editora Universitária, UFPE, Recife. 2001.

\_\_\_\_\_. **Atlas Solarimétrico de Alagoas: Setembro de 2007 a Agosto de 2008**, Eletrobrás, v. 1, 2009, 64p.

\_\_\_\_\_; Souza, J. L.; Melo, R. O. Rede solarimétrica do Estado de Alagoas. **Anais: III Congresso Brasileiro de Energia Solar – Belém, 21 a 24 de Setembro de 2010**.

TYMVIOS, F. S.; JACOVIDES, C. P.; MICHAELIDES, S. C. Comparative study of Ångström's and artificial neural network's methodologies in estimating global solar radiation. **Solar Energy**, v.78, p.752 – 762, 2005.

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

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

WONG, L. T.; CHOW, W. K. Solar Radiation Model. **Applied Energy**, v.69, p.191 – 224, 2001.

YANG, K.; KOIKE, T.; YE, B. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.137, p.43–55, 2006.