

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS  
SOLARIMÉTRICOS

por

CLAODOMIR ANTONIO MARTINAZZO

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Julho de 2004

MODELOS DE ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR PARA ELABORAÇÃO DE MAPAS  
SOLARIMÉTRICOS

por

CLAODOMIR ANTONIO MARTINAZZO

Graduado em Física e Especialista em Matemática

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Arno Krenzinger

Comissão de Avaliação: Aprovada por:

Prof. Dra. Adriane Prisco Petry – PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira – IPH/UFRGS

Prof. Dr. Mário Henrique Macagnan – UNISINOS

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Agosto de 2004

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Inês e José, à minha noiva Idalice, que souberam compreender minha ausência e ao meu Orientador Professor Arno Krenzinger, pela dedicação, pelas palavras sábias e pela sua compreensão.

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Arno Krenzinger, pela colaboração, amizade, compreensão e sabedoria que conduziu esta dissertação.

A professora Hélia Valério Thibes, pelo “empurrão” e incentivo para que eu cursasse o mestrado.

Ao secretário do PROMEC, Paulo Kutter, pela atenção.

Aos meus pais pelo apoio e compreensão.

Ao engenheiro César W. M. Prieb pela presteza em esclarecer minhas dúvidas.

À direção da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – Campus de Erechim, pelo apoio que permitiu a realização do mestrado.

À FEPAGRO pelo atendimento e fornecimento dos dados climatológicos para que esta pesquisa se realizasse.

A todos aqueles que, de uma forma ou outra, contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

O objetivo fundamental desta dissertação foi desenvolver modelos de estimativa da radiação solar no intuito de complementar a base de dados visando o traçado de mapas de radiação solar para o Rio Grande do Sul.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa na literatura sobre as metodologias desenvolvidas para a estimativa da radiação solar para locais onde inexitem dados medidos desta variável. Foi feito um levantamento das técnicas estatísticas utilizadas na previsão de valores de variáveis. As metodologias pesquisadas foram aplicadas ao banco de dados SAMSON (Solar and Meteorological Surface Observational Network). Entre as variáveis deste banco de dados estão a radiação solar, a umidade relativa, a temperatura, a latitude, a altitude e a nebulosidade.

A metodologia dos modelos de estimativa aplicada neste trabalho baseia-se no Método dos Mínimos Quadrados. Foram realizadas correlações mensais e anuais entre as variáveis acima citadas e seus resultados validados através de validação cruzada.

Resultou apropriada, na disponibilidade de dados climatológicos, a aplicação de modelos com parâmetros mensais de regressão linear múltipla envolvendo as variáveis explicativas: insolação, temperatura média e umidade relativa. Este modelo, entre outros, foi aplicado aos dados do Rio Grande do Sul.

A metodologia acima descrita aplicada aos dados medidos no Rio Grande do Sul, resultou eficaz.

Foram pesquisadas técnicas de interpolação para traçado de mapas e estabelecidas regras para o traçado dos mesmos. Foram utilizados dados periféricos para a Argentina, Uruguai e Santa Catarina. Foram feitos mapas mensais de médias mensais de radiação solar global horizontal diária bem como um mapa da média anual de radiação solar global horizontal diária.

Observou-se que o modelo de Ångström–Prescott apresenta bons resultados quando se dispõe apenas da insolação.

Os mapas serão úteis para a pesquisa e implementação de sistemas empregando Energia Solar no Estado do Rio Grande do Sul.

Finalmente, a principal conclusão é a de que modelos de correlações obtidos com dados de cada mês e produzindo parâmetros mensais são mais adequados do que um único modelo de correlação com parâmetros de validade anual utilizado nas estimativas mensais.

## **ABSTRACT**

The essential purpose of this work is to develop models for estimating solar radiation data for the State of Rio Grande do Sul. The data obtained from these models serve to complement the scarce existing data, allowing the development of reliable solar radiation maps for the State.

A preliminary bibliographic review was made about the methodologies and statistical techniques employed for estimating the solar radiation on sites on which there is no measured data. The investigated methodologies were applied to data from SAMSON (Solar and Meteorological Surface Observational Network), a database of measured meteorological data from the United States. These data include solar radiation, relative humidity, temperature, latitude, altitude and nebulosity.

The methodology adopted in this work is based on the Least Squares Method. Monthly and yearly correlations were made between variables from the SAMSON database and their results were validated employing the Cross-Validation Method.

The analysis of these correlations indicated the models of monthly multiple lineal regression, considering the variables insolation, average temperature and relative humidity, as the most suitable.

This methodology was applied to the measured data of Rio Grande do Sul and was shown to be efficient.

Interpolation techniques were also studied and then were established rules for map tracing. Maps of horizontal monthly averaged daily global solar radiation were developed for the State of Rio Grande do Sul, as well as a map of horizontal yearly averaged daily global solar radiation.

It was observed that the Ångström–Prescott model presents good results when only insolation is available.

The main conclusion is that correlation models obtained using data from each month and generating monthly parameters are more accurate than only one correlation model generating parameters with yearly validity.

The developed maps will be useful for the research and implementation of systems employing Solar Energy in the State of Rio Grande do Sul.

## ÍNDICE

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	001
1.1	JUSTIFICATIVA.....	001
1.2	OBJETIVOS .....	003
1.3	ESCOPO DA DISSERTAÇÃO .....	004
1.4	LEVANTAMENTO HISTÓRICO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE RADIAÇÃO SOLAR .....	004
<b>2.</b>	<b>RADIAÇÃO SOLAR</b> .....	019
2.1	O SOL.....	019
2.2	CONSTANTE SOLAR .....	021
2.3	VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE .....	022
2.4	DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE .....	023
2.5	DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE TERRESTRE	025
2.6	RADIAÇÃO DIRETA, DIFUSA E GLOBAL .....	026
2.7	DEFINIÇÃO DE TERMOS .....	029
2.8	CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR SOBRE UMA SUPERFÍCIE .....	030
2.8.1	<b>Hora Solar</b> .....	031
2.8.2	<b>Ângulo de Nascimento do Sol</b> .....	032
2.8.3	<b>Número de Horas de Brilho de Sol (Insolação)</b> .....	032
2.8.4	<b>Cálculo do Ângulo de Incidência sobre uma Superfície</b> .....	033
2.8.5	<b>Radiação Extraterrestre sobre uma Superfície Horizontal</b> .....	033
2.8.6	<b>Massa de Ar</b> .....	034
2.9	DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS VALORES DE $K_T$ .....	035
2.10	DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO.....	037
2.10.1	<b>Radiação Solar</b> .....	037
2.10.2	<b>Horas de Brilho de Sol – Insolação</b> .....	038
2.10.3	<b>Nebulosidade</b> .....	039
<b>3.0</b>	<b>METODOLOGIA ESTATÍSTICA</b> .....	040
3.1	CORRELAÇÃO LINEAR .....	040

3.1.1	<b>Avaliação Qualitativa de <math>r</math> Quanto à Intensidade</b> .....	042
3.1.2	<b>Pressupostos da Correlação</b> .....	042
3.2	<b>REGRESSÃO LINEAR</b> .....	043
3.2.1	<b>Pressupostos da Regressão</b> .....	044
3.3	<b>ANÁLISE DE RESÍDUOS</b> .....	047
3.4	<b>ERROS ASSOCIADOS À ESTIMATIVA</b> .....	049
3.5	<b>VALIDAÇÃO DO MODELO AJUSTADO</b> .....	051
3.6	<b>AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO AJUSTADO – ANÁLISE DE RESÍDUOS PARA REGRESSÃO LINEAR SIMPLES</b> .....	052
3.7	<b>AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO AJUSTADO – ANÁLISE DE RESÍDUOS PARA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA</b> .....	055
3.8	<b>REPRESENTATIVIDADE TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL</b> .....	056
3.9	<b>SÉRIES TEMPORAIS</b> .....	056
3.9.1	<b>Coefficientes de Autocorrelação</b> .....	057
<b>4.0</b>	<b>CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS</b> .....	061
<b>5.0</b>	<b>MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR</b> .....	067
5.1	<b>MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO PARA MODELAGEM DE SUPERFÍCIES</b> .....	067
5.1.2	<b>ALGORITMOS DE INTERPOLAÇÃO</b> .....	068
5.2	<b>REPRESENTAÇÃO DE MAPAS</b> .....	075
5.2.1	<b>Apresentação em Papel</b> .....	075
5.2.2	<b>Apresentação Digital</b> .....	075
5.3	<b>MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR DESENVOLVIDOS NO BRASIL E RIO GRANDE DO SUL</b> .....	076
5.3.1	<b>Atlas Agroclimático do Rio Grande do Sul</b> .....	076
5.3.2	<b>Mapas da Radiação Solar Diária Total Média Mensal</b> .....	077
5.3.3	<b>Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil</b> .....	078
5.3.4	<b>Atlas de Irradiação Solar do Brasil</b> .....	079
5.3.5	<b>Atlas Solarimétrico do Brasil</b> .....	080
5.3.6	<b>Mapas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET</b> .....	081
5.3.7	<b>SEQMETBR – Laboratório de Energia Solar</b> .....	082
5.4	<b>MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR DESENVOLVIDOS NO MUNDO</b> .....	084

<b>6.0</b>	<b>ANÁLISE DE DADOS</b> .....	087
6.1	ANÁLISE DOS DADOS DO BANCO DE DADOS SAMSON .....	087
6.1.1	<b>Regressão Linear Utilizando o Arquivo “Geral.dat”</b> .....	092
6.1.2	<b>Regressão Linear Simples utilizando os Arquivos Mensais</b> .....	101
6.1.3	<b>Correlação entre <math>\bar{K}_T</math> e Nebulosidade</b> .....	104
6.2	RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE MODELOS PESQUISADOS NA LITERATURA.....	106
6.3	CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTO PARA APLICAÇÃO NO RIO GRANDE DO SUL .....	108
6.4	ANÁLISE DOS DADOS DOS BANCOS DE DADOS DO RIO GRANDE DO SUL.....	108
6.5	ANÁLISE DO DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE $\bar{K}_T$ E $\bar{S}/\bar{S}_o$ MENSAIS .....	121
6.6	TESTES ESTATÍSTICOS .....	122
6.7	REPRESENTATIVIDADE TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA A BASE DE DADOS DA FEPAGRO .....	133
<b>7.0</b>	<b>MAPAS MENSAIS E ANUAIS DE ISO-RADIAÇÃO</b> .....	135
<b>7.1</b>	<b>Traçado dos mapas de radiação solar global horizontal</b> .....	145
<b>8.0</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	161
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	163
	<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTADA</b> .....	169
	<b>ANEXO 1</b> .....	170
	<b>ANEXO 2</b> .....	179

## LISTA DE ABREVIACOES, DEFINIOES E SÍMBOLOS.

### SIGLAS

<i>ASTM</i>	Sociedade Americana de testes e materiais (American Society of Testing and Materials)
<i>BR</i>	Brasil
<i>EMBRAPA</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>ESA</i>	Agência Espacial Européia (European Space Agency)
<i>EUA</i>	Estados Unidos da América
<i>FEPAGRO</i>	Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária
<i>INMET</i>	Instituto Nacional de Meteorologia
<i>IPAGRO</i>	Instituto de Pesquisas Agropecuárias – sigla substituída por FEPAGRO
<i>LABSOLAR</i>	Laboratório de Energia Solar - UFSC
<i>NASA</i>	Agência Espacial Americana (National Aeronautics and Space Administration)
<i>PLPS</i>	Programa de Leitura e Processamento do Banco de Dados SAMSON
<i>RS</i>	Rio Grande do Sul
<i>SAMSON</i>	Rede de Observação de Superfície Solar e Meteorológico (Solar and Meteorological Surface Observational Network)
<i>SARR</i>	Referência Radiométrica Espacial Absoluta (Space Absolute Radiometric Reference)
<i>SOHO</i>	Observatório Heliosférico e Solar (Solar & Heliospheric Observatory)
<i>TSI</i>	Irradiância Solar Total (Total Solar Irradiance)
<i>TSV</i>	Tempo Solar Verdadeiro
<i>UA</i>	Unidade Astronmica
<i>UFPel</i>	Universidade Federal de Pelotas
<i>UFSC</i>	Universidade Federal de Santa Catarina
<i>UV</i>	Ultravioleta
<i>WMO</i>	Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization)
<i>WRC</i>	Centro de Radiação Mundial (The World Radiation Center)
<i>lag</i>	Intervalo constante de tempo – Termo inglês utilizado pelos estatísticos
<i>MAE</i>	Erro Absoluto médio
<i>MBE</i>	Erro de desvio médio
<i>OLADE</i>	Organização Latino Americana de Energia
<i>RMSE</i>	Erro quadrático médio

## ABREVIACOES

<i>Abr</i>	Abril
<i>Ago</i>	Agosto
<i>Dez</i>	Dezembro
<i>Fev</i>	Fevereiro
<i>Jan</i>	Janeiro
<i>Jul</i>	Julho
<i>Jun</i>	Junho
<i>Mai</i>	Maio
<i>Mar</i>	Maro
<i>Nov</i>	Novembro
<i>Out</i>	Outubro
<i>Set</i>	Setembro

## DEFINIOES

<i>p�</i>	Unidade de medida de comprimento correspondente a 0,3048 m
<i>J/m<sup>2</sup></i>	Unidade de medida de energia. Um MJ/m <sup>2</sup> corresponde a 23,88 cal/cm <sup>2</sup> .
<i>langley</i>	Unidade de medida de energia. Corresponde a 1 cal/cm <sup>2</sup> ou 0,04187 MJ/m <sup>2</sup>
<i>W/m<sup>2</sup></i>	Unidade de potência. 1 W corresponde a 1 J/s.

## SÍMBOLOS

$\bar{X}$	Valor médio da distribuio de <i>X</i> .....	[ - ]
$\bar{Y}$	Valor médio da distribuio de <i>Y</i> .....	[ - ]
$\hat{H}$	Radiao Solar global média horizontal estimada na superfície terrestre ...	[Wh/m <sup>2</sup> ]
$\bar{H}_c$	Radiao diária média para céu totalmente claro para um local e m�s em questão .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\hat{Y}_i$	Valor estimado de uma <i>i</i> -ésima variável dependente .....	[ - ]
<i>S</i>	Número de horas de brilho de Sol medidas na superfície terrestre (Insolao) .....	[ h ]
$\bar{S}$	Média de horas de brilho de Sol na superfície terrestre (Insolao) .....	[ h ]
<i>S<sub>o</sub></i>	Número máximo de horas diárias possíveis de brilho de Sol .....	[ h ]
$\bar{S}_o$	Média do número máximo de horas diárias possíveis de brilho de Sol .....	[ h ]

$\bar{K}_T$	Índice de transparência médio mensal .....	[ - ]
$\hat{s}^2$	Variância estimada .....	[ - ]
$\bar{n}$	Número médio de horas mensais de brilho de Sol .....	[ - ]
$\bar{C}$	Décimos de céu obscurecido por nuvens .....	[ - ]
$\bar{S}_r$	É a percentagem diária média mensal possível de horas de brilho de Sol....	[ % ]
$\bar{N}_j$	Comprimento do dia modificado para excluir a fração de horas acima do ângulo zenital solar de 85° .....	[ h ]
$\bar{H}_b$	Radiação direta diária média mensal sobre uma superfície horizontal .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\bar{H}_{bc}$	Radiação direta de céu claro diária potencial média mensal sobre uma superfície horizontal .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$A$	Altitude do observador .....	[ km ]
$a, c_2,$	Estimativa do parâmetro $\alpha$ (intercepto) da equação de regressão .....	[ - ]
$a'$	Constante empírica da equação de Ångström .....	[ - ]
$a_1^*$	Coefficiente para cálculo de transmitância atmosférica para radiação direta levando em consideração a altitude .....	[ - ]
$a_o^*$	Coefficiente para cálculo de transmitância atmosférica para radiação direta levando em consideração a altitude .....	[ - ]
$B$	Fator para cálculo na equação do tempo .....	[ - ]
$b, c_3,$	Estimativa do parâmetro $\beta$ da equação de regressão .....	[ - ]
$b'$	Constante empírica da equação de Ångström .....	[ - ]
$Cov(X,Y)$	Covariância entre $X$ e $Y$ .....	[ - ]
$D'$	É a fração de horas de brilho de Sol .....	[ - ]
$e$	Exponencial .....	[ - ]
$E$	Equação do tempo .....	[ min. ]
$e_i$	Resíduo estimado do $i$ -ésimo par $Y_i$ e $\hat{Y}_i$ .....	[ - ]
$e_p$	Resíduos padronizados .....	[ - ]
$G$	Número de dias com cobertura de neve .....	[ - ]
$G_b$	Irradiância direta .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$G_d$	Irradiância difusa .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$G_o$	Irradiância extraterrestre horizontal .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$G_{on}$	Irradiância extraterrestre normal .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$G_{sc}$	Constante Solar .....	[ W/m <sup>2</sup> ]
$H$	Radiação Solar Horizontal Global na Superfície Terrestre .....	[ W/m <sup>2</sup> ]

$h$	Altitude .....	[m]
$H_0$	Hipótese nula ou probanda .....	[ - ]
$H_1$	Hipótese alternativa .....	[ - ]
$h_i$	Ajuste para a distância do valor de $X$ médio .....	[ - ]
$H_o$	Radiação Solar Horizontal Extraterrestre .....	[W/m <sup>2</sup> ]
$i$	Índice para o número de dados .....	[ - ]
$J$	Porção do número de dias chuvosos do mês em relação ao número de dias do mesmo mês .....	[ - ]
$K^*$	Coeficiente para cálculo de transmitância atmosférica para radiação direta levando em consideração a altitude .....	[ - ]
$L$	Luminosidade. Potência total irradiada pelo Sol .....	[ W ]
$L_{loc}$	Longitude do local em questão .....	[ ° ]
$L_{st}$	Longitude do meridiano padrão para a hora oficial local .....	[ ° ]
$m$	Massa de ar (massa óptica) .....	[ - ]
$m_z$	Massa óptica no caminho vertical .....	[ - ]
$m_r$	Massa óptica relativa .....	[ - ]
$E[X ]$	Valor esperado de uma função.....	[ - ]
$f(x)$	Simboliza uma função .....	[ - ]
$N$	Tamanho da amostra .....	[ - ]
$n$	[ 1 ] $n$ -ésimo dia do ano .....	[ - ]
	[ 2 ] número de elementos de uma série de dados pesquisada .....	[ - ]
$d_n$	$n$ -ésimo dia do ano .....	[ - ]
$R$	Coeficiente de Correlação de Pearson .....	[ - ]
$R$	Umidade Relativa .....	[ % ]
$R^2$	Coeficiente de Determinação de Pearson .....	[ - ]
$r_{hs}$	Coeficiente de correlação cruzada entre irradiação solar global e dados de duração de horas de brilho Sol .....	[ - ]
$RS_i$	Resíduos de <i>Student</i> .....	[ - ]
$S$	[ 1 ] Número de horas de brilho de Sol na superfície terrestre (Insolação) .	[ h ]
	[ 2 ] Desvio padrão amostral .....	[ - ]
$S_o$	Número de horas de brilho de Sol fora da atmosfera terrestre .....	[ h ]
$S_{XY}$	Erro padrão da estimativa .....	[ - ]
$t_c$	Estatística $t$ tabelada (crítico) .....	[ - ]
$t_{calc}$	Estatística $t$ calculada .....	[ - ]

$t_m$	Temperatura média diária .....	[ °C ]
$T_{máx}$	Temperatura média máxima .....	[ - ]
$T_{méd}$	Temperatura média .....	[ °C ]
$\overline{UR}$	Umidade Relativa Média .....	[ % ]
$UR$	Umidade Relativa .....	[ % ]
$w_i$	Fator peso da contribuição da radiação solar medida $H_i$ , de um <i>i-ésimo</i> local .....	[ - ]
$X_i$	Valor observado de uma <i>i-ésima</i> variável independente .....	[ - ]
$Y_i$	Valor observado de uma <i>i-ésima</i> variável dependente .....	[ - ]
$Z$	Comprimento do dia .....	[ h ]
$Z$	Média horária do comprimento do dia .....	[ - ]
$U_i$	Variável aleatória .....	[ - ]
$min$	Valor mínimo .....	[ - ]
$p(z)$	Função de distribuição de probabilidade.....	[ - ]
$D$	Estatística de Durbin-Watson .....	[ - ]
$k$	Unidade de tempo .....	[ dia, ... ]

#### SUBSCRITOS

$b$	Radiação direta
$d$	Radiação difusa
$s$	Radiação espectral
$T$	Plano inclinado
$n$	Plano normal
$i$	Fator de posição geográfica
$j$	Fator correspondente ao mês

#### LETRAS GREGAS

$\phi$	Latitude .....	[ ° ou rad ]
$\beta$	[1] Inclinação verdadeira (populacional) da reta na equação de regressão.....	[ - ]
	[2] Ângulo entre o plano de uma superfície e a horizontal .....	[ ° ]
$\alpha$	[1] Nível de significância .....	[ % ]
	[2] Intercepto verdadeiro (populacional) na equação de regressão .....	[ - ]
$\rho_c$	Albedo de nuvens .....	[ 0,60 ]

$\rho_a$	Albedo do céu sem nuvens .....	[ 0,25 ]
$\gamma$	Ângulo azimutal da superfície .....	[ ° ]
$\alpha_s$	Ângulo da altitude solar.....	[ ° ]
$\gamma_s$	Ângulo de azimute solar .....	[ ° ]
$\theta$	Ângulo de incidência .....	[ ° ]
$\theta_s$	Ângulo de incidência solar .....	[ ° ]
$\omega$	Ângulo horário .....	[ ° ]
$\rho$	[ 1 ] Coeficiente de correlação populacional de Pearson .....	[ - ]
	[ 2 ] Massa específica .....	[ kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Comprimento de Onda .....	[ m ]
$\pi$	Constante $Pi$ .....	$\cong 3,14159$
$\delta$	Declinação Solar .....	[ °, ", ' ]
$\bar{\epsilon}_{Rel}$	Desvio Relativo Médio .....	[ - ]
$\epsilon_{Rel}$	Desvio relativo.....	[ - ]
$\epsilon(\%)$	Diferença percentual .....	[ % ]
$\theta_z$	é o ângulo zênite que é o ângulo entre a vertical e o caminho ótico atravessado pela radiação Solar.....	[ ° ]
$\psi$	Fator de umidade relativa mensal .....	[ - ]
$\psi_{i,j}$	Fator sazonal.....	[ - ]
$\rho$	Proporção mensal de albedo de neve .....	[ - ]
$\tau_d$	Transmitância atmosférica para radiação difusa .....	[ - ]
$\tau_D; \tau_b$	Transmitância atmosférica para radiação direta .....	[ - ]
$\tau_T$	Transmitância atmosférica para radiação global .....	[ - ]
$z(\tau_n)$	Valor de uma variável no $n$ -ésimo tempo, $\tau_n$ .....	[ - ]
$\sigma_X^2$	Variância populacional de uma variável $X$ .....	[ - ]
$\sigma_Y^2$	Variância populacional de uma variável $Y$ .....	[ - ]
$\sigma_z^2$	Variância populacional de uma variável $z$ (Série temporal) .....	[ - ]
$\gamma_k$	Autocovariância .....	[ - ]
$\rho_k$	Autocorrelação .....	[ - ]

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig.</b>	<b>TÍTULO</b>	<b>Pág.</b>
1.1	Acréscimo percentual da intensidade da radiação solar com a altitude. Adaptado de Klein, 1948, <i>apud</i> Becker e Boyd, 1957. Pág. 17. ....	007
2.1	Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico & Solar (SOHO) da Agência Espacial Americana (NASA) e Agência Espacial Européia (ESA). Fonte: NASAa – 11 out. 2003. ....	019
2.2	Foto de manchas solares no Sol obtida pelo SOHO. Fonte: NASAb – 11 out. 2003. ...	021
2.3	Variação da irradiância solar com o tempo entre os anos de 1978 e 2000. A variação tem um período de aproximadamente 11 anos. Na foto, SARR significa Referência Radiométrica Absoluta Espacial. O aumento da irradiância solar coincide com o aumento das manchas solares. Adaptado de NASAc – 11 out. 2003. ....	022
2.4	Variação da radiação solar extraterrestre com o período do ano. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 7. ....	023
2.5	Espectro da radiação eletromagnética. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 148. ....	024
2.6	Curva de irradiância espectral padrão WRC para a distância média Terra-Sol. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 7. ....	024
2.7	Um exemplo dos efeitos do espalhamento Rayleigh e da absorção atmosférica sobre a distribuição espectral da irradiância direta. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 65. ....	026
2.8	A Terra recebe energia através da radiação solar e perde energia através da radiação infravermelha térmica para o espaço. O balanço entre energia ganha e perdida determina a temperatura da Terra. Adaptado de NASAd – acesso em 11 out. 2003. ...	026
2.9	Radiação solar global horizontal média, $\bar{H}$ , em Asheville, Carolina do Norte, EUA, 1961. Fonte: Banco de dados SAMSON – Leste. ....	027
2.10	Coeficientes de autocorrelação para dados de radiação solar global horizontal médio mensal diária ....	028
2.11	Coeficientes de autocorrelação para dados de $\bar{K}_T$ mensal. ....	029
2.12	Ângulo de zênite, ângulo azimutal da superfície ( $\gamma$ ) e ângulo azimutal solar para uma superfície inclinada. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991, pág. 65. ....	030
2.13	Distribuição de frequências dos valores de $\bar{K}_T$ . Pelotas – RS ....	036

2.14	Distribuição generalizada de dias com vários valores de $K_T$ como uma função de $\bar{K}_T$ . Adaptado de Duffie e Beckman, 1991, pág. 78. ....	036
3.1	Diagrama de dispersão correspondente a associação entre $H/H_o$ médio mensal e $S/S_o$ médio mensal para uma amostra de 30 pares de dados do Leste dos EUA – Banco de Dados <i>SAMSON</i> . ....	040
3.2	Distribuição de <i>resíduos versus</i> $X_i$ . A nuvem de pontos não mostra um padrão aparente na relação entre resíduos e valores de $X_i$ . ....	053
3.3	Distribuição de <i>resíduos de Student versus</i> $X_i$ . A nuvem de pontos não mostra um padrão aparente na relação entre <i>resíduos de Student</i> e valores de $X_i$ . ....	053
3.4	A distribuição dos <i>resíduos de Student</i> em função de $X_i$ demonstram um <i>efeito de dispersão</i> que viola a homocedasticidade. ....	054
3.5	Distribuição aproximadamente normal dos <i>resíduos de Student</i> . ....	054
3.6	Distribuição de resíduos ao longo do tempo indicando a Independência de Erros.....	055
3.7	Função de autocorrelação para as 50 primeiras <i>defasagens</i> , para dados de radiação solar média mensal do Leste dos EUA. ....	060
5.1	Modelo variográfico. Adaptado de Landim e Sturaro, 2002. ....	073
5.2	Mapa de isolinhas de radiação solar para o Rio Grande do Sul, mês de Novembro. Adaptado de Kessler e Corbella, 1979. ....	077
5.3	Radiação Solar Incidente na superfície (ly/dia) – Brasil – Média Mensal – Abril. Adaptado de GTES, 1999. ....	078
5.4	Atlas de Irradiação Solar do Brasil. Satélite. Novembro – 1998 – UFSC – INPE. Adaptado de Colle, S. e Pereira, E. B. 1998 ....	079
5.5	Atlas de Solarimétrico do Brasil. Novembro – 2000 – UFPe – CHESF. Adaptado de Tiba <i>et al.</i> , 2000 ....	080
5.6	Imagem do <i>endereço</i> do INMET que apresenta um Atlas de mapas de inúmeras variáveis climatológicas. ....	081
5.7	Clicando-se sobre um ponto os gráficos mostram os valores das variáveis para aquele local.....	083
5.8	Tela exibindo os dados quando o <i>mouse</i> é apontado para um local específico e seu botão direito pressionado.....	083
5.9	Mapa de radiação solar global horizontal média diária para o mês de Julho. EUA. Adaptado de Bennett, I. 1965.....	085
5.10	Mapa do Atlas de Climatologia Solar da OLADE, correspondente ao mês de Novembro para o Brasil, Guiana e Suriname. ....	086

5.11	Mapa de isolinhas de radiação global média mensal em MJ/m <sup>2</sup> .dia. Iraque. Fevereiro. Adaptado de Ahmad, I. <i>et al.</i> 1983.....	086
6.1	Mapa parcial dos EUA. À direita da linha vermelha estão localizadas as estações utilizadas neste trabalho. Adaptado de Grande Enciclopédia Larousse Cultural, 1988.	088
6.2	Tela principal do Programa de Leitura e Processamento do Banco de Dados SAMSON.....	089
6.3	Distribuição dos erros relativos médios para o modelo de Ångström–Prescott para os conjuntos de dados descritos anteriormente no texto. ....	098
6.4	Distribuição aproximadamente normal dos resíduos de Student para a correlação linear simples entre $\bar{K}_T$ e $\bar{S} / \bar{S}_0$ . ....	099
6.5	Distribuição dos <i>resíduos de Student</i> em função da radiação solar global horizontal estimada. Dados mensais. ....	099
6.6	Distribuição dos <i>resíduos de Student</i> em ordem cronológica, indicando violações no pressuposto da <i>independência dos erros</i> . A ordem cronológica indica que as estações de coleta têm suas médias ordenadas mês a mês, a partir de Janeiro. Dados de todo o Leste dos EUA. ....	100
6.7	Distribuição dos coeficientes de autocorrelação para os 50 primeiros <i>resíduos de Student</i> . ....	100
6.8	Resultado da aplicação do Erro Relativo Médio para a equação de Ångström–Prescott calculada com coeficientes mensais e anuais. ....	102
6.9	Distribuição aproximadamente normal dos resíduos de <i>Student</i> para a correlação linear simples entre $\bar{K}_T$ e $\bar{S} / \bar{S}_0$ do mês de Julho.. ....	102
6.10	Distribuição dos <i>Resíduos de Student</i> em função da radiação solar global horizontal estimada para o mês de Julho.. ....	103
6.11	Distribuição dos coeficientes de autocorrelação para os 50 primeiros Resíduos de <i>Student</i> do mês do Julho. ....	104
6.12	Diagrama de dispersão dos pontos entre $K_T$ e nebulosidade. ....	105
6.13	Distribuição de frequências da variável nebulosidade.....	106
6.14	Comparação dos dados de radiação global medidos com dados de radiação solar estimados a partir da nebulosidade. ....	106
6.15	Distribuição das estações e respectivas fontes de dados do Rio Grande do Sul. (Mapa: Projeção cilíndrica equatorial) ....	111
6.16	Distribuição regional da vegetação natural do Rio Grande do Sul. Adaptado de	

Moreira, 2003. ....	115
6.17 Divisão por homogeneidade física do Rio Grande do Sul. Adaptado de Moreira, 2003. ....	116
6.18 Diagrama de dispersão anual dos pares de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ médios mensais para todo o Rio Grande do Sul. ....	122
6.19 Comparação de dados de radiação global medida com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott. Médias mensais – Rio Grande do Sul – 1959-90.....	124
6.20 Desvios percentuais da comparação entre dados medidos e dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott. ....	125
6.21 Distribuição dos <i>Resíduos de Student</i> em função da radiação solar global horizontal estimada. O gráfico mostra que o pressuposto da homocedasticidade não foi violado, ou seja, não existe uma nuvem que apresente um plano de dispersão definido. ....	125
6.22 Comparação de dados de radiação solar global horizontal medida com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott. Médias diárias para o mês de Janeiro - Rio Grande do Sul – 1959-90. ....	126
6.23 Desvios percentuais da comparação entre dados medidos de radiação solar global horizontal e dados estimados de radiação solar global horizontal pela Equação de Ångström–Prescott. Médias mensais para Janeiro - Rio Grande do Sul – 1959-90. ....	127
6.24 Distribuição dos resíduos de <i>Student</i> em função da radiação solar global horizontal estimada, $\hat{H}$ . Médias mensais para Janeiro – Rio Grande do Sul – 1959-90. ....	127
7.1 Distribuição das estações com valores de radiação solar global horizontal medidos, interpolados e estimados. ....	136
7.2 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Janeiro. ....	147
7.3 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Fevereiro. ....	148
7.4 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Março. ....	149
7.5 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Abril. ....	150
7.6 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Maio. ....	151
7.7 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Junho. ....	152

7.8	Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Julho. ....	153
7.9	Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Agosto. ....	154
7.10	Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Setembro. ....	155
7.11	Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Outubro. ....	156
7.12	Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Novembro. ....	157
7.13	Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul. Dezembro. ....	158
7.14	Mapa de radiação solar global horizontal média anual diária para o Rio Grande do Sul.....	159
A2-1	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Alegrete.....	179
A2-2	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Encruzilhada do Sul.....	179
A2-3	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Quaraí.....	180
A2-4	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Santana do Livramento.....	180
A2-5	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para São Borja.....	181
A2-6	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Bagé.....	181
A2-7	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Erechim.....	182
A2-8	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Cruz Alta.....	182
A2-9	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Júlio de Castilhos.....	183
A2-10	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Santa Rosa.....	183
A2-11	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Farroupilha.....	184
A2-12	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Maquiné.....	184
A2-13	Diagrama de dispersão de $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ mensais para Pelotas.....	185

## LISTA DE TABELAS

Tab.	TÍTULO	Pág.
2.1	Dias médios e declinações características (irradiação extraterrestre diária idêntica ao valor médio mensal). .....	033
2.2	Problemas em piranometria de acordo com os tipos de piranômetros, segundo a WMO. Adaptado de WMO, 1961. ....	038
3.1	Avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis .....	042
4.1	Constantes climáticas para uso na Equação 1.2. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991.....	062
4.2	Coeficientes de correlação determinados por Ribeiro, 1980, a partir da Equação de Ångström-Prescott para 23 localidades do Brasil. Adaptada de Assis <i>et al.</i> 1998 .....	063
4.3	Valores mensais dos coeficientes de $a$ e $b$ , coeficientes de determinação $r^2$ , para os meses de janeiro a dezembro. Adaptado de Laperuta e Lunardi, 1998.....	064
4.4	Coordenadas geográficas e coeficientes da equação de Ångström ( $a$ e $b$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, média anual, a partir da insolação, coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o número de observações ( $n$ ) para algumas localidades do Estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90. Adaptada de Fontana e Oliveira, 1996.....	064
4.5	Coeficientes da equação de Ångström ( $a$ e $b$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, média mensal, a partir da insolação; coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o número de observações ( $n$ ) médio para o Estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90. Adaptada de Fontana e Oliveira, 1996. ....	065
4.6	Coeficientes de correlação determinados por Ribeiro, 1980 a partir da Equação de Ångström-Prescott para nove localidades do Estado do Rio Grande do Sul. Adaptada de Assis <i>et al.</i> , 1998.....	066
5.1	Comparação entre métodos de interpolação. Adaptado de Landim, P.M.B. <i>et al.</i> 2002.....	074
6.1	A tabela ilustra parte de um arquivo gerado pelo PLPSAMSON. O primeiro registro contém dados da Estação, como local, Estado, Latitude, Longitude e Altitude. A Segundo registro não existe no Arquivo, apenas ilustra as variáveis gravadas. A partir do terceiro registro observa-se os dados gravados .....	091

6.2	Imagem de parte dos registros do arquivo Geral.dat gerado pelo Módulo II. Respectivamente, a partir da primeira coluna tem-se as variáveis: <i>Mês</i> , <i>Ano</i> , $\bar{H}$ , $\bar{H}_o$ , $\bar{K}_T$ , $(\bar{S}/\bar{S}_o)$ , <i>Altitude</i> , <i>Temperatura de bulbo seco (média mensal)</i> , <i>Latitude (inteiro e décimos)</i> e <i>Nebulosidade (média mensal)</i> . .....	092
6.3	Lista dos modelos de regressão linear simples e múltipla desenvolvidos para o todo o Leste dos EUA Banco de dados SAMSON. ....	094
6.4	Valor (es) anual e mensais dos coeficientes <i>a</i> e <i>b</i> , coeficientes de determinação $r^2$ , <i>desvio relativo médio</i> de estimativa e <i>erro relativo</i> entre estimativa (s) anual e mensais. Estes dados levam em consideração apenas a correlação linear simples entre $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ . ....	103
6.5	Valores anuais e mensais dos coeficientes <i>a</i> e <i>b</i> , coeficientes de determinação $r^2$ , <i>desvio relativo médio</i> de estimativa e <i>erro relativo</i> entre estimativa (s) anual e mensais. Estes dados levam em consideração apenas a correlação linear simples entre $\bar{K}_T$ e nebulosidade. ....	105
6.6	Comparação dos erros de estimativa de alguns modelos desenvolvidos por pesquisadores e aplicados aos dados das estações litorâneas do Leste dos Estados Unidos da América. ....	107
6.7	Relação das estações de coleta de dados disponibilizadas pela FEPAGRO, INMET, UFPel/EMBRAPA/INMET. ....	109
6.8	Valores anuais dos coeficientes <i>a</i> , <i>b<sub>1</sub></i> , <i>b<sub>2</sub></i> , <i>b<sub>3</sub></i> , coeficientes de correlação anuais <i>r</i> , coeficientes de determinação anuais, $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam $\bar{K}_T$ com as outras variáveis. Todos os cálculos foram feitos sobre as médias mensais do ano todo. Fonte dos dados: FEPAGRO. ....	112
6.9	Valores anuais dos coeficientes <i>a</i> , <i>b<sub>1</sub></i> , <i>b<sub>2</sub></i> , <i>b<sub>3</sub></i> , coeficientes de correlação anuais <i>r</i> , coeficientes de determinação anuais, $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam $\bar{K}_T$ com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais do ano todo. Fonte dos dados: FEPAGRO. ....	118
6.10	Distribuições dos erros de validação de acordo com a região, estação e a base de validação. ....	119
6.11	Apresentação de coeficientes estatísticos para o Rio Grande do Sul para os modelos mensais que envolvem as variáveis $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ . (Modelo de Ångström-PreScott) .....	123

6.12	Apresentação de coeficientes estatísticos para o Rio Grande do Sul para os modelos mensais que envolvem as variáveis $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ e Temperatura Média.....	129
6.13	Apresentação de coeficientes estatísticos para o Rio Grande do Sul para os modelos mensais que envolvem as variáveis $\bar{K}_T$ e $\bar{S}/\bar{S}_o$ e Temperatura Média e Umidade Relativa Média. ....	130
6.14	Descrição dos coeficientes de correlação, determinação e coeficientes para a equação de regressão linear múltipla para os dados regionalizados do Rio Grande do Sul. ....	131
6.15	Representatividade temporal dos valores diários, médios mensais, da radiação solar. Para cada local os valores da parte superior, em anos, são calculados e os valores da parte inferior, medidos. ....	133
7.1	Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global horizontal medidas de estações gaúchas da FEPAGRO e UFPel/EMBRAPA. ....	138
7.2	Apresentação das médias mensais e anuais de Insolação solar para as estações gaúchas da FEPAGRO. ....	139
7.3	Apresentação das médias mensais e anuais de Temperatura Média para as estações gaúchas da FEPAGRO. ....	140
7.4	Apresentação das médias mensais e anuais de Umidade Relativa para as estações gaúchas da FEPAGRO. ....	141
7.5	Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar estimada para algumas estações do 8° DISME/INMET – Porto Alegre – RS. ....	142
7.6	Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global de todas as estações e fontes consideradas para o traçados dos mapas de iso-radiação. ....	143
7.7	Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global horizontal estimados de estações gaúchas com dados de insolação medidos pelo 8° DISME/INMET – Porto Alegre. ....	144
7.8	Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global horizontal estimados a partir de variáveis interpoladas. Estas variáveis são: umidade relativa, temperatura média e insolação. Método de interpolação: inverso do quadrado das distâncias. ....	146
A1.1	Valores anuais dos coeficientes $a$ , $b_1$ , $b_2$ , $b_3$ , $b_4$ e $b_5$ , coeficientes de correlação $r$ , coeficientes de determinação anuais, $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Com exceção dos modelos correspondentes aos índices 17 a 21, os	

- modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_0$  com as outras variáveis. Os modelos correspondentes aos índices 17 a 21 correlacionam  $\bar{K}_T$  e com as outras variáveis, com exceção de  $\bar{S}/\bar{S}_0$ . Os coeficientes baseiam-se em médias mensais de todos os meses e de todas as variáveis envolvidas de todo o território Leste dos EUA. .... 170
- A1.2 Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 7200 médias mensais de 20 estações próximas ao mar, do Leste dos EUA localizadas entre as altitudes de 1 a 67m. .... 171
- A1.3 Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 7548 médias mensais de 21 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 2 a 136m, com exceção das estações litorâneas. .... 172
- A1.4 Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 3600 médias mensais de 10 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 2 a 69m, com exceção das estações litorâneas. .... 173
- A1.5 Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 1080 médias mensais de 3 estações do Leste dos EUA, localizadas nas altitudes de 190, 192 e 192m, no Norte do Alabama e no norte do Maine. .... 174
- A1.6 Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram

	realizados sobre 720 médias mensais de 2 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 190 e 192 m, no Norte do Alabama. ....	175
A1.7	Valores anuais dos coeficientes $a$ , $b_1$ , $b_2$ , $b_3$ , $b_4$ , $b_5$ e $b_6$ , coeficientes de correlação anuais $r$ , coeficientes de determinação anuais, $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam $\bar{K}_T$ com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 720 médias mensais de 2 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 377 e 395 m, no Norte de Ohio. ....	176
A1.8	Valores anuais dos coeficientes $a$ , $b_1$ , $b_2$ , $b_3$ , $b_4$ , $b_5$ e $b_6$ , coeficientes de correlação anuais $r$ , coeficientes de determinação anuais, $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam $\bar{K}_T$ com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as Médias Mensais Anuais. Estes cálculos foram realizados sobre 600 médias mensais de 20 estações próximas ao mar, do Leste dos EUA localizadas entre as altitudes de 1 a 67m. Mês de Janeiro. ....	177
A1.9	Valores anuais dos coeficientes $a$ , $b_1$ , $b_2$ , $b_3$ , $b_4$ , $b_5$ e $b_6$ , coeficientes de correlação anuais $r$ , coeficientes de determinação anuais, $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam $\bar{K}_T$ com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as Médias Mensais Anuais. Estes cálculos foram realizados sobre 600 médias mensais de 20 estações próximas ao mar, do Leste dos EUA localizadas entre as altitudes de 1 a 67m. Mês de Julho. ....	178

## 1.0. INTRODUÇÃO

A radiação solar é a energia proveniente do Sol e que fornece luz e calor para o planeta Terra em especial. Dela dependem, para a sobrevivência, praticamente todos os seres vivos. Estimar a radiação disponível na superfície terrestre faz parte da aplicabilidade que os seres humanos querem dar em larga escala para esta energia relativamente limpa e de longa duração (bilhões de anos). Neste capítulo será expresso o porquê deste trabalho, bem como o resultado de um século de pesquisas em estimação de radiação solar.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

A humanidade desde a Revolução Industrial, que iniciou na Inglaterra a partir de 1750, segundo a Larousse Cultural, 1992, vem experimentando avanços tecnológicos que modificam sua forma de viver, pensar e se relacionar uns com os outros e principalmente com o meio ambiente. Todo o avanço tecnológico concebido e executado atualmente está baseado no desenvolvimento do petróleo e seus derivados. No entanto, segundo especialistas, esta fonte de energia é esgotável e um dia, ainda que incerto, o custo de prospecção tornar-se-á tão elevado que o mesmo não poderá mais ser utilizado em larga escala mundial, até que, finalmente, fará parte da história humana.

Levando em consideração este fato a humanidade deve se preparar para mudanças em seus hábitos de consumo energético. Novas fontes de energia deverão ser desenvolvidas, outras aperfeiçoadas ou modificadas. O certo é que a humanidade sofrerá grandes mudanças culturais, como um todo, sendo a principal delas, uma nova forma de cultuar um “velho parceiro”, o Sol. O astro que para inúmeras culturas foi considerado um deus.

O Sol, desde o início da vida, tanto biológica quanto do nosso sistema solar, é a fonte primária de energia. Nele todos os processos vitais do planeta estão baseados, ou seja, é o responsável pela energia que aquece o planeta, pela luz e calor que possibilita a fotossíntese, processo responsável pela produção básica de alimentos, pelo ciclo das chuvas. Em termos da nossa tecnologia atual foi o principal responsável pelo petróleo, uma vez que este tem origem em plantas e animais que sofreram transformações químicas durante milhões de anos após soterramento; é responsável por acumular água nas barragens, através da evaporação e posterior precipitação pluviométrica. Por tudo isso o Sol já tem uma importância vital. Mesmo assim a energia solar não é utilizada com eficiência pela maioria dos países. Isto significa que a energia solar poderia

ser utilizada em sua plenitude através: de sistemas de aquecimento de água que não demandariam espaços cultiváveis, de edifícios inteligentes que poderiam reduzir os gastos com aquecimento, refrigeração e iluminação de ambientes, de fornos solares, da geração de fotoeletricidade, da energia eólica, da utilização da biomassa, entre outros processos.

Essa nova cultura de energia solar poderia suprir uma parcela importante do consumo de energia a nível global, principalmente nos países onde a incidência de energia solar é abundante.

Em diversos países, seus governos têm estimulado programas de pesquisa e implantação de sistemas solares, tanto de aquecimento quanto fotovoltaico, prevendo um futuro não mais baseado no petróleo. No entanto, na maioria dos países, devido aos problemas financeiros e custos relativamente elevados destas novas tecnologias sua implementação é incipiente.

Para que a energia solar possa ser aproveitada com eficiência é necessário que seja estimada, dentro de uma certa margem de segurança, para que sistemas inteiros não entrem em colapso prevendo o comportamento sazonal e geográfico da distribuição da radiação solar.

Como a radiação que chega na superfície terrestre depende de inúmeros fatores climatológicos, faz-se necessário um estudo sistemático de cada uma destas influências. Estes estudos vêm sendo realizados desde o início do século XIX. Muito se sabe e muito ainda, deve ser pesquisado.

Uma das maiores barreiras a uma compreensão mais extensiva do comportamento de todos os elementos atmosféricos e suas influências sobre a radiação que chega à superfície terrestre é a falta de investimentos em uma ampla rede de medições destes elementos. No Brasil assim como a maioria dos países, a deficiência dos recursos financeiros agrava o problema da estimativa do recurso solar.

A medida da irradiação solar é deficiente na maior parte do mundo. Isto se deve às dificuldades financeiras da maioria dos países, tanto para adquirir os equipamentos (piranômetros, piheliômetros, e outros) quanto para sua manutenção que requer assistência especializada devido as características dos sensores. Portanto, dependendo da latitude, altitude e muitos fatores meteorológicos, as intensidades de irradiação solar são medidas somente em um número limitados de locais no mundo inteiro.

Mais comum em estações de coleta do mundo todo, inclusive no Brasil, são as medidas de horas de brilho de Sol diárias, a insolação. A medida da insolação é feita através de heliógrafos, que são aparelhos mais robustos e de pouca manutenção.

Outras variáveis meteorológicas são amplamente disponíveis, como por exemplo, altitude, umidade relativa, latitude, temperatura entre outras.

Levando em consideração as dificuldades impostas pela falta de dados de radiação solar que são necessários para a engenharia solar e civil, muitos pesquisadores estudaram formas de estimar estes valores a partir de dados meteorológicos existentes, e a partir dessas estimações realizaram interpolações para locais onde os dados são inexistentes. Com estes estudos foram traçados mapas de radiação solar. Com ao advento da computação, os mapas em papel estão sendo gradualmente substituídos por mapas digitais. O objetivo destes mapas, tanto em papel quanto digitais é facilitar a leitura das variáveis de interesse a pesquisadores e/ou instaladores de sistemas solares, a fim de que seu dimensionamento seja o mais confiável possível.

Por tudo que foi explanado acima, aclara-se a justificativa desta dissertação.

## 1.2. OBJETIVOS

Esta dissertação apresenta um estudo sobre a disponibilidade da radiação solar, por ser ela uma fonte de energia ampla e ao alcance a todos que desejarem utilizá-la.

- A grande maioria das pesquisas busca uma forma melhor e mais eficiente de realizar uma ação de qualquer natureza. Neste trabalho busca-se uma metodologia mais adequada de previsão de valores de radiação solar. Portanto, esta dissertação tem como principais objetivos:

- desenvolver modelos estatísticos de estimativa de radiação solar;
- elaborar mapas mensais e anual de iso-radiação para o Rio Grande do Sul;

Para atingir estes objetivos, diversas tarefas foram realizadas, constituindo etapas que tiveram também resultados independentes entre as quais destacam-se:

- realizar um levantamento histórico sobre os modelos estatísticos e matemáticos desenvolvidos para estimativa da radiação solar;
- realizar uma pesquisa sobre métodos estatísticos utilizados na estimativa de radiação solar;
- pesquisar trabalhos realizados no mundo sobre estimativa de radiação solar global e geração de mapas de iso-radiação;

Outro objetivo deste trabalho foi determinar se existem influências significativas sobre a radiação solar global incidente na superfície terrestre de acordo com a região e suas particularidades climáticas.

### 1.3. ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho é dividido em 8 capítulos. Este primeiro é uma introdução aos assuntos abordados, onde é apresentado o corpo do texto, é estabelecido e discutido o problema que se deseja estudar bem como os objetivos do trabalho.

No segundo capítulo, tem-se uma descrição de elementos básicos considerados no estudo da radiação solar, formando uma base de conhecimentos necessários para entender a radiação solar, que vão desde a origem da energia até agentes limitantes da mesma ao entrar na atmosfera e atingir a superfície terrestre, bem como os dispositivos utilizados para medi-la assim como a outras variáveis correlacionadas.

O terceiro capítulo é um apanhado sobre os métodos estatísticos e matemáticos empregados na estimativa da radiação solar, ou seja, um levantamento bibliográfico sobre correlação e regressão linear e múltipla, modelos de validação, erros associados aos modelos de previsão.

O quarto capítulo versa sobre trabalhos realizados no mundo, inclusive no Brasil, mostrando que há correlação entre a variável radiação solar e variáveis climatológicas. Relata também trabalhos anteriores no RS bem como os parâmetros utilizados nestes trabalhos e a base temporal (diário, mensal, anual) dos modelos de estimativa.

O quinto capítulo trata da confecção de mapas de distribuição da radiação solar e revê os tipos de interpolação, as técnicas de mapeamento, a apresentação em papel e em computador bem como os mapas existentes no RS e no Brasil.

O sexto capítulo é a apresentação da análise dos resultados da aplicação de diversos modelos estatísticos de estimativa de radiação solar ao banco de dados do Leste dos Estados Unidos da América, SAMSON, e aos dados fornecidos pela FEPAGRO, INMET, UFPE/EMBRAPA, SENSOLAR para o Rio Grande do Sul, Santa Catarina e países limítrofes (Uruguai e Argentina).

O sétimo capítulo apresenta, na forma de mapas, os resultados da aplicação dos modelos estatísticos discutidos no sexto capítulo para o RS. Finalmente, o capítulo 8 descreve as conclusões finais desta dissertação e sugestões para futuros trabalhos.

### 1.4. LEVANTAMENTO HISTÓRICO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE RADIAÇÃO SOLAR

Levando em consideração que este trabalho versa sobre a estimativa da radiação so-

lar, a partir deste momento relata-se um levantamento do que foi desenvolvido em termos de estimativa estatística da radiação solar no mundo todo, em todos os tempos.

Segundo Suehrcke, 2000, Kimball, 1919, foi o primeiro pesquisador a sugerir que a fração de horas de brilho de Sol poderia ser utilizada para estimar a radiação solar.

Segundo Duffie e Beckman, 1991, Ångström foi o primeiro, em 1924, a correlacionar dados de irradiação solar e horas de brilho de Sol:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_c} = a' + b' \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (1.1)$$

onde

$\bar{H}$  = radiação diária média mensal sobre uma superfície horizontal

$\bar{H}_c$  = radiação diária média para céu totalmente claro para um local e mês em questão

$a', b'$  = constantes empíricas

$\bar{S}$  = número médio de horas mensais de brilho de Sol

$\bar{S}_o$  = média mensal do número máximo de horas diárias possíveis de brilho de Sol em um mês em questão (comprimento do dia do dia característico do mês em questão). É calculada pela Equação 2.8.

Na Equação de Ångström  $a' = 0,25$  e  $b' = 0,75$ . Ångström determinou os valores de  $a$  e  $b$  a partir de dados de Estocolmo. Admitiu, apenas 30 anos mais tarde que os valores foram obtidos de médias mensais e que não poderiam ser utilizados com dados diários.

Obviamente a soma de  $a' + b' = 1$  para dias completamente claros. No entanto com os problemas enfrentados pelos registradores de horas de brilho de Sol, listados na seção 2.10.2.,  $\bar{S}/\bar{S}_o$  nunca é igual a 1, e conseqüentemente, para a condição de céu claro e com este tipo de coeficiente, a radiação é subestimada.

Outra dificuldade oferecida pela Equação de Ångström está na incerteza da definição de céu claro e como medir a radiação neste dia.

Em 1940, Prescott citado por Power, 2001, visando eliminar a dificuldade operacional de medição de  $\bar{H}_c$ , substituiu-o por  $\bar{H}_o$ , a radiação solar média sobre uma superfície horizontal extraterrestre.

A fórmula é conhecida como Equação Ångström–Prescott e tomou a forma:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (1.2)$$

onde

as barras indicam valores médios mensais e  $a = 0,22$  e  $b = 0,54$  foram determinados empiricamente por Prescott;  $\bar{S}$  é o número médio de horas de brilho de Sol para um intervalo de tempo determinado, na superfície terrestre;  $\bar{S}_o$  é o número médio de horas de brilho de Sol astronômica, ou seja, fora da atmosfera terrestre, calculado pela Equação 2.8;  $a$  e  $b$  são constantes calculadas por regressão linear e dependem da região. A estatística necessária para o cálculo destes coeficientes é discutida no Capítulo 3 desta dissertação.

A partir de Prescott, 1940, muitos pesquisadores aplicaram-se em desenvolver modelos para estimar a radiação solar difusa, direta e global a partir de horas de brilho de Sol.

Na busca de melhores modelos de correlação entre  $H/H_o$  e variáveis climatológicas, Klein, 1948, citado por Becker e Boyd, 1957, dando continuidade ao trabalho sobre a influência da altitude na radiação solar, de Kimball, 1919, descobriu que a variação da transmissão de radiação pela atmosfera depende da estação do ano e do comprimento do caminho dos raios de Sol (massa de ar). A Figura 1.1 mostra o resultado gráfico de suas conclusões para o dia 21 de dezembro, inverno, para a latitude  $40^\circ$  norte, massa de ar 1,35 e para 21 de junho, verão, massa de ar 2. As equações foram obtidas pelo método dos mínimos quadrados, também discutidos no Capítulo 3 desta dissertação. Os valores para os outros períodos do ano podem ser obtidos aproximadamente por interpolação.

Equação para o verão (%):

$$Y = 2,955 + 4,685(h - 1) - 0,225(h - 1)^2 \quad (1.3)$$

Equação para o inverno (%):

$$Y = 1,414 + 2,922(h - 1) - 0,133(h - 1)^2 \quad (1.4)$$

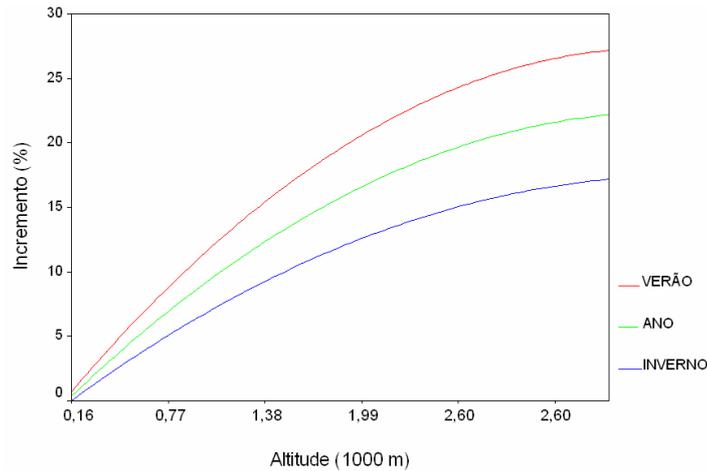
onde

$h$  é a altura em pés e  $Y$  é o acréscimo percentual de radiação com a altitude.

A cobertura de nuvens é um fator muito importante na variação da radiação solar incidente sobre a superfície terrestre. Elas são responsáveis por grande parte dos 35% de radiação solar refletida na atmosfera terrestre, de acordo com Fritz, 1955 citado por Becker e Boyd, 1957.

A transmissão de energia solar através das nuvens depende do tipo de nuvens, da altura e da quantidade de água (vapor ou líquida) dentro das mesmas.

Duffie e Beckman, 1991, atribuem a Page e outros, em 1964, a modificação da Equação de Ångström utilizando a radiação extraterrestre sobre uma superfície horizontal,  $H_o$ , no lugar de radiação de céu claro. Algumas vezes a Equação 1.2 é referenciada como *Equação Ångström-Kimball-Page*, no entanto, por uma questão de precedência, seria, como já citado anteriormente, mais adequado chamá-la de Equação Ångström-PreScott.



**Figura 1.1** Acréscimo percentual da intensidade da radiação solar com a altitude.

Adaptado de Klein, 1948, citado por Becker e Boyd, 1957. Pág. 17.

A relação  $\bar{H}/\bar{H}_o$  é conhecida como índice de transparência da atmosfera ou claridade média mensal ou  $\bar{K}_T$ .

Muitos pesquisadores incluindo Löf, *et al*, 1966 verificaram que os estimadores  $a$  e  $b$  variam com a posição geográfica e com condições climáticas.

A cobertura média mensal de nuvens  $\bar{C}$  é expressa como décimos de céu obscurecido por nuvens. A cobertura de nuvens foi também correlacionada com  $H/H_o$ . Esta correlação tem a forma

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a'' + b''\bar{C} \quad (1.5)$$

A relação 1.6, segundo Ma e Iqbal, 1984, é derivada do estudo de Kimball, H. H, 1919.

Segundo Black, 1956, citado por Ma e Iqbal, 1984, a forma final da correlação entre o  $\bar{K}_T$  mensal e a fração média mensal do céu obstruído pelas nuvens,  $\bar{C}$ , é dada pela Equação 1.6:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = 0,803 - 0,340\bar{C} - 0,458\bar{C}^2; \quad C \leq 0,8 \quad (1.6)$$

Glover e McCulloch, 1958, citados por Ma e Iqbal, 1984, tentando melhorar a correlação entre radiação solar e insolação, incluíram o efeito da latitude e apresentaram a seguinte formulação:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = 0,29 \cos \phi + 0,52 \left( \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right); \quad \phi < 60^\circ \quad (1.7)$$

Liu e Jordan, 1960, citados por Sayigh, 1977, descobriram para locais livres de poeiras e com baixa umidade relativa na atmosfera que a radiação direta e a radiação difusa variam linearmente entre si e ambas são funções da *massa de ar*. Propuseram as seguintes fórmulas, para estes tipos de localidade:

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939\tau_b \quad (1.8)$$

e

$$\tau_d = 0,3840 - 0,4160\tau_T \quad (1.9)$$

onde  $\tau_d$  é o coeficiente de transmissão para radiação difusa sobre uma superfície horizontal,  $H_d/H_o$ , fração da radiação difusa em relação a intensidade extraterrestre da radiação solar. Usaram  $0,1396 \text{ W/cm}^2$  para a radiação extraterrestre.  $\tau_b = H_b/H_o$  é a fração da radiação direta em relação à radiação solar extraterrestre, e  $\tau_T = H/H_o$  é a fração da radiação solar em relação à radiação solar extraterrestre, corresponde ao  $K_T$ .

Bennett, 1965, relatando a confecção de mapas mensais de radiação solar para os Estados Unidos da América, aplicou quatro equações aos dados disponíveis. Estas equações eram aplicadas para locais com algumas peculiaridades, como por exemplo, estações com muitos dias com cobertura de neve, tinham uma equação que levava em consideração a presença da neve: a Equação 1.10. Outra equação utilizada é a Equação Ångström–Prescott (1.2), bem como duas equações que levavam em consideração a cobertura de nuvens, as Equações 1.5 e 1.11.

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b_2 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} + b_5 G \quad (1.10)$$

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b_4 \left( \frac{1 - \bar{C} + \left( \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right)}{2} \right) \quad (1.11)$$

onde  $G$  é o número de dias com cobertura de neve no solo e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  é a percentagem diária média mensal possível de horas de brilho de Sol.

No mesmo trabalho, Bennett, deduziu equações correlacionando a altura da estação  $h$ , em pés, com o coeficiente  $a$  e a altura da estação e o cosseno da latitude com o coeficiente  $b$ .

A Equação 1.2 tomou a forma:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = (201,8 + 0,3658h) + (2,755 - 0,00308h + 3,201 \cos \phi) \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (1.12)$$

A equação mostrou-se válida para estimar a radiação diária média mensal para locais onde havia dados de insolação. No entanto, não se mostrou válida para o conjunto de todas as estações juntas, ou seja, não foi estabelecida uma relação significativa entre os coeficientes  $a$  e  $b$  com a altitude e a latitude de todas as estações.

Outra equação de Bennett, 1965, citada por Sayigh, 1977, escrita para o Hemisfério Norte e uma das utilizadas por Tiba e Fraidenraich, 2000, no *Atlas Solarimétrico do Brasil* relaciona o percentual diário médio mensal de possíveis horas de brilho de Sol,  $\bar{S}/\bar{S}_o$ , com a altitude  $h$ .

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} + c.h \quad (1.13)$$

onde

$h$  é a altitude em pés, e  $a$ ,  $b$  e  $c$  dependem da época (mês) do ano e tiverem valores calculados para Estados Unidos da América (EUA).

Segundo Sayigh, 1977, em 1966, Masson correlacionou a radiação solar global diária  $H$  sobre uma superfície horizontal, em cal/cm<sup>2</sup>, com o número de horas de brilho de Sol por dia,  $S$ :

$$H = 60 + \sqrt{(1406,2S^2 + 7426,6S)} \quad (1.14)$$

Ainda em 1966, Swartman e Ogunlade, ainda citados por Sayigh, 1977, usaram a umidade relativa em três diferentes equações:

$$H = 490.S^{(0,357)}R^{-0,262} \quad (1.15)$$

$$H = 460.e^{0,607(S'-R)} \quad (1.16)$$

e

$$H = 464 + 265S' - 248R \quad (1.17)$$

onde

$R$  é a umidade relativa do ar e  $S'$  é a fração de horas de brilho de Sol tendo como referência, 12 horas. Os autores afirmam que as Equações 1.15 e 1.17 fornecem uma estimativa melhor que as Equações 1.18 e 1.19, baseadas na Equação de Ångström–Prescott.

Em 1967, Bennett derivou 2 conjuntos de equações. As equações para estações do Canadá para Junho e Dezembro respectivamente,

$$H = H_o \left( 311,6 + 4,94 \cdot \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right) \quad (1.18)$$

e

$$H = H_o \left( 194,8 + 7,85 \cdot \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right) \quad (1.19)$$

onde

$H_o$  é igual a 1,98 ly/min e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  é o percentual diário médio mensal de possíveis horas de brilho de Sol.

O segundo conjunto de dados, para os estados Unidos, inclui a altitude da estação  $h$  em pés, para Junho e Dezembro e são, respectivamente,

$$H = H_o \left( 314,0 + 4,22 \cdot \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0144 \cdot h \right) \quad (1.20)$$

e

$$H = H_o \left( 128,1 + 7,20 \cdot \frac{\bar{H}}{H_o} + 0,0144 \cdot h \right) \quad (1.21)$$

Em 1969, Bennett publicou um artigo onde correlacionava a insolação diária com a cobertura do céu total ou cobertura opaca de nuvens e o percentual de brilho de Sol diário médio para 562 estações. Ele concluiu que para a cobertura opaca de nuvens a correlação é muito melhor que a cobertura total do céu.

Em 1971, Reddy citado por Sayigh, 1977, propôs uma fórmula complexa que estimava a radiação solar global diária na superfície da Terra em g.cal/cm<sup>2</sup>/dia:

$$H = K \left( 1 + 0,8 \frac{\bar{S}}{S_o} \right) (1 - 0,2 \cdot J) / R \quad (1.22)$$

onde

$K = (\lambda S_o + \Psi_{i,j} \cos \phi) \cdot 10^2$  em g.cal/cm<sup>2</sup>/dia;  $\phi$  é a latitude do local em graus;  $\lambda = 0,2/(1+0,1\phi)$  o fator de latitude;  $J$  a fração do número de dias chuvosos do mês em relação ao número de dias do mesmo mês;  $R$  é média da umidade relativa por dia no mês;  $\Psi_{i,j}$  é o fator sazonal onde  $i = 1$  (estação no interior),  $2$  (estação costeira) e  $3$  (em morros) e  $j = 1, 2, 3, \dots, 11, 12$  correspondentes aos meses. Para estações em morros (montanhas) considera-se  $K'$  que é  $K' = K + \varepsilon$ , onde  $\varepsilon = 0,5h(12 - S_o) \cdot 10^2$  onde  $h$  é a altura da estação sobre o nível do mar em metros. Ainda em 1971, Reddy publicou uma equação em que levava em consideração a temperatura média diária,  $t_m$ .

$$H = K \left( 0,6 + 0,02 t_m \frac{\bar{S}}{S_o} - 0,04 \sqrt{R} \right) - r(4,3 - \sqrt{t_m}) \quad (1.23)$$

Em 1972, Majumdar *et al.* citado por Sayigh, 1977, derivaram uma fórmula para céu claro e mínima fumaça, vapor e pó. A fórmula levava em consideração o coeficiente de transmissão do vapor de água e o vapor de água contido na atmosfera.

$$H = H_o A^m (T_w)^{(W m_r)^2} \quad (1.24)$$

onde

$T_w$  é o coeficiente de transmissão do vapor de água,  $m_r$  é a massa de ar relativa,  $m$  é a massa de ar absoluta  $= (p/1000)m_r$  onde  $p$  é a pressão atmosférica local em milibars),  $W$  é o vapor de água contido na atmosfera ( $0,16p_w$  cm),  $p_w$  é a pressão do vapor de água na superfície em milibars e  $A$  é um coeficiente independente da altitude ou umidade.

Kettani e Lam, 1974, citado por Sayigh, 1977, usaram a Equação 1.22 na tentativa de desenhar as linhas de iso-radiação para a península arábica.

“Norris, 1968, revisou diversas tentativas para desenvolver a correlação 1.6. Bennett, 1965, comparou correlações de  $\bar{H}/\bar{H}_o$  com  $\bar{C}$ , com  $\bar{S}/\bar{S}_o$  e com a combinação das duas variáveis e encontrou a melhor relação como sendo a Equação 1.2. Cobertura de nuvens são estimadas visualmente e não há necessariamente uma relação direta entre a presença parcial de cobertura de nuvens e radiação solar para um instante particular. Assim não pode ser tão boa a estatística entre  $\bar{H}/\bar{H}_o$  e  $\bar{C}$  como entre  $\bar{H}/\bar{H}_o$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . Muitas avaliações de dados de radiação solar tem sido baseados em correlações da radiação solar com dados de horas de brilho de Sol. Entretanto, Paltridge e Proctor (1976) usando dados de cobertura de nuvens a partir de dados modificados de céu claro para Austrália e derivados de médias mensais de  $\bar{H}_o$  estimaram valores com boa concordância com dados medidos.” [Duffie e Beckman, 1991]

Segundo Sayigh, 1977, Sabbagh *et al.*, em 1973, usaram a média diária mensal de horas de Sol,  $\bar{S}$ , com uma curva arbitrária similar para a curva de radiação e duas constantes arbitrárias: Equação 1.25. Em outra fórmula, consideraram a média horária mensal do comprimento do dia  $\bar{S}_o$  por mês: Equação 1.26.

$$\bar{H} = (A + B \ln n) \bar{S} \quad (1.25)$$

e

$$\bar{H} = (A' + B' \ln n) \bar{S}_o \quad (1.26)$$

onde

$A = 42$ ,  $B = 12$ ,  $A' = 35$ ,  $B' = 11$  e  $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 6, 5, 4, 3, 2, 1$  para os meses 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, respectivamente.

Segundo Sayigh, 1977, em 1975, Sabbagh *et al.*, propuseram uma fórmula geral, apresentada em duas formas, e testada em vários locais.

$$H = 1,53K \exp \left[ \phi \left( \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} - \left( \frac{\bar{R}^{1/3}}{100} \right) - \left( \frac{1}{\bar{T}_{máx}} \right) \right) \right] \quad (1.27)$$

$$H = 1,53K \exp \left[ \phi \left( S' - \left( \frac{\bar{R}^{1/3}}{100} \right) - \left( \frac{1}{\bar{T}_{máx}} \right) \right) \right] \quad (1.28)$$

onde

$\phi$  é a latitude em radianos,  $S'$  é a fração média real de horas de Sol para 12 horas,  $(\bar{S}/\bar{S}_o)$  é a fração das horas de Sol real para o comprimento do dia,  $\bar{R}$  é a umidade relativa média em percentual,  $\bar{T}_{máx}$  a temperatura média máxima e  $K$  o fator de latitude (descrito para a Equação 1.22). Para a maioria das estações testadas pelos autores, a Equação 1.28 forneceu erros de estimativa menores que a Equação 1.27.

De acordo Sayigh, 1977, Hottel, em 1976, apresentou um método para estimar a radiação direta transmitida através da atmosfera limpa que leva em consideração o ângulo de zênite e a altitude para uma atmosfera padrão e para quatro tipos de clima. A transmitância atmosférica para radiação direta  $\tau_b$  é  $G_{bn}/G_{on}$  e é dada na forma

$$\tau_b = a_o + a_1 \exp(-k / \cos \theta_z) \quad (1.29)$$

onde

$a_o$ ,  $a_1$ , e  $k$  para uma atmosfera padrão de 23 km de visibilidade, são encontradas a partir equações  $a_o^*$ ,  $a_1^*$ , e  $k^*$ , determinadas para altitudes menores que 2,5 km por

$$a_o^* = 0,4237 - 0,00821(6 - A)^2 \quad (1.30)$$

$$a_1^* = 0,5055 - 0,00595(6,5 - A)^2 \quad (1.31)$$

$$k^* = 0,2711 - 0,01858(2,5 - A)^2 \quad (1.32)$$

onde

$A$  é a altitude do observador dada em quilômetros. Foram aplicados fatores de correção para  $a_o^*$ ,  $a_1^*$ , e  $k^*$  para tipos climáticos diferentes.

Sayigh, 1977, propôs uma fórmula empírica “*universal*” para radiação solar global, levando em consideração o número de horas de brilho de Sol diárias,  $S$ , a umidade relativa,  $R$ , a temperatura máxima,  $T_{máx}$ .

$$H = H_o e^x \quad (1.33)$$

onde

$$x = \phi \left( \frac{S}{S_d} - \frac{R}{15} - \frac{1}{T_{máx}} \right) \quad (1.34)$$

A amplitude  $H_o$  que depende da latitude,  $\phi$ , do comprimento do dia,  $S_d$ , e da umidade relativa,  $R$ , é dada por:

$$H_o = (1,7 - 0,458\phi) \left( \frac{20S_o}{1 + 0,1\phi} + \psi \cos \phi \right) \quad (1.35)$$

onde

$\psi$  é o fator de umidade relativa mensal. Da Equação 1.35 percebe-se que o fator de umidade relativa para cada mês é diretamente proporcional à radiação solar.

De acordo com Ma e Iqbal, 1984, Riedveld, *et al*, 1978, examinaram diversas publicações de valores de  $a$  e  $b$  e observaram que  $a$  é relacionado linearmente e  $b$  hiperbolicamente com o valor médio apropriado de  $\bar{S}/\bar{S}_o$  segundo as relações

$$a = 0,10 + 0,24 \left( \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right) \quad (1.36)$$

$$b = 0,38 + 0,62 \left( \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right) \quad (1.37)$$

Substituindo as Equações 1.36 e 1.37 na Equação 1.2

$$\frac{\bar{H}}{H_o} = 0,18 + 0,62 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (1.38)$$

Esta equação foi desenvolvida para ser aplicada no mundo todo.

Hay, J. E., 1979, diminuiu a dependência espaço-temporal dos coeficientes da Equação de Ångström-Prescott incorporando os efeitos das múltiplas reflexões da radiação na superfície e nas nuvens. Conseqüentemente requeria as medidas de albedo das nuvens e da superfície. Segundo o autor, os coeficientes  $a$  e  $b$  são, em geral, dependentes do local e são afetados pelas propriedades ópticas da cobertura de nuvens, refletividade da neve e da proporção de massa de ar. Sua nova equação é dependente de vários fatores meteorológicos e é independente do local:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = \left( 0,1572 + 0,5566 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \right) / \left( 1 - \rho \left( \rho_a \left( \frac{\bar{S}}{\bar{S}_j} \right) + \rho_c \left( 1 - \frac{\bar{S}}{\bar{S}_j} \right) \right) \right) \quad (1.39)$$

onde

$\rho$  é a proporção mensal de albedo de neve,  $\rho_a$  é o albedo do céu sem nuvens (fixo em 0,25) e  $\rho_c$  é o albedo de nuvens (fixo em 0,6).  $\bar{S}_j$  é o comprimento médio do dia modificado para excluir a fração de horas acima do ângulo zenital solar de  $85^\circ$ . Isso devido ao fato dos registradores Campbell-Stokes não registrarem quando o ângulo solar for menor que  $5^\circ$ .  $\bar{S}_j$  é dado pela Equação 1.40

$$\bar{S}_j = \left\{ \cos^{-1} \left[ (\cos 85^\circ - \sin \phi \sin \delta) / (\cos \phi \cos \delta) \right] \right\} / 7,5 \quad (1.40)$$

Segundo Power, 2001, poucos autores tem considerado as relações entre duração de horas de brilho de Sol, irradiação observada e o potencial de irradiação direta de céu claro diário. Suehrcke e McCormick, 1989, foram os primeiros a propor uma relação neste sentido que tem a forma:

$$\frac{\bar{H}_b}{\bar{H}_{bc}} = \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (1.41)$$

onde

$\bar{H}_b$  é a radiação direta diária média mensal sobre uma superfície horizontal,  $\bar{H}_{bc}$  é a radiação direta de céu claro diária potencial média mensal sobre uma superfície horizontal.

Suehrcke, 2000, tem sustentado que a relação entre radiação global e duração de horas de brilho de Sol é aproximadamente quadrática e que as Equações lineares 1.1, 1.2 são formas funcionais insatisfatórias. Usou a Equação 1.41 para derivar suas relações não lineares entre radiação global e duração de horas de brilho de Sol.

Şen, 2001a, publicou artigo defendendo uma modificação na forma de calcular os coeficientes  $a$  e  $b$  da Equação de Ångström-Prescott. Segundo o autor a forma tradicional do cálculo estatístico que pressupõe distribuição normal ou aproximadamente normal dos dados implica em inúmeras restrições para que a estimação seja considerada admissível. Segundo Johnston, 1980 citado por Şen, 2001a, há seis suposições restritivas na estimação de parâmetros para a Equação de regressão como usada na Equação de Ångström, que deveriam ser levados em conta antes de qualquer aplicação. Elas estão citadas na sessão 3.3.1.

“Conseqüentemente, o parâmetro de cálculo da Equação de Ångström em engenharia solar permanece sob suspeita. Para evitar estas suposições restritivas, pode ser preferível para provar e preservar somente o cálculo da média aritmética e variância da irradiação solar global e os dados de horas de Sol. Afinal de contas, o cálculo da média aritmética e da variância são parâmetros estatísticos mais significantes para qualquer aplicação (Gordon e Reddy, 1988).” [Şen, 2001a]

Para a Equação de Ångström-Prescott, os coeficientes  $a$  e  $b$  são obtidos pelas equações (Benjamin e Cornell, 1979, citado por Şen, 2001a) a seguir:

$$b = r_{hs} \sqrt{\frac{\text{Var}(\bar{H}/\bar{H}_o)}{\text{Var}(\bar{S}/\bar{S}_o)}} \quad (1.42)$$

e

$$a = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} - r_{hs} \sqrt{\left(\frac{\text{Var}(\bar{H}/\bar{H}_o)}{\text{Var}(\bar{S}/\bar{S}_o)}\right)} \cdot \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (1.43)$$

onde

$r_{hs}$  é o coeficiente de correlação entre irradiação solar global e dados de duração de horas de brilho Sol,  $\text{Var}()$  é a variância do argumento e as sobre barras indicam médias aritméticas durante um intervalo de tempo básico.

Os coeficientes  $a^*$  e  $b^*$  são calculados pelo método proposto por Şen, 2001a, utilizando-se as seguintes equações:

$$b^* = \sqrt{\frac{\text{Var}(\bar{H}/\bar{H}_o)}{\text{Var}(\bar{S}/\bar{S}_o)}} \quad (1.44)$$

e

$$a^* = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} - \sqrt{\left(\frac{\text{Var}(\bar{H}/\bar{H}_o)}{\text{Var}(\bar{S}/\bar{S}_o)}\right)} \cdot \left(\frac{\bar{S}}{\bar{S}_o}\right) \quad (1.45)$$

A conclusão do trabalho de Şen, é que, utilizando-se o que chamou de método irrestrito, há uma suavização das diferenças entre valor estimado e medido da Equação Ångström-Prescott (método restrito), ou seja, no método restrito, se o número de horas de brilho de Sol for maior que a média há uma sub-avaliação da irradiação e se o número de horas de brilho de Sol for menor que a média há uma sobre-avaliação da irradiação. Somente em lugares onde a irradiação solar tem distribuição normal os dois métodos são equivalentes. Ainda, segundo o autor, o método dá melhores resultados se o número de dados for pequeno.

Inúmeros trabalhos de pesquisadores versam sobre as relações entre radiação difusa e radiação direta. Estes trabalhos foram desenvolvidos por Erbs *et al.*, 1982, Iqbal, 1979a, Collares-Pereira e Rabl, 1979, Liu e Jordan, 1960, Hay, 1979, entre outros. Como nesta dissertação está se estudando a radiação solar global horizontal, estes trabalhos não serão comentados extensivamente.

Atualmente, trabalhos vêm sendo realizados utilizando-se a tecnologia moderna de satélites. Segundo Rimóczy-Paál, 1983, Fritz *et al.* 1964, iniciaram as pesquisas de radiação solar com dados de satélite e Hanson, 1967, utilizou dados do satélite Nimbus 2 para obter a média mensal da irradiância superficial para Junho de 1966. Desde então outros pesquisadores como Vonder Haar, T. H. e Ellis, J. S., 1975, Tarpley, J. D., Gautier, C. *et al.*, 1980, Hiser, H. W. e Senn, H. V., 1980 e o próprio Rimóczy-Paál, vêm estudando radiação solar a partir de dados de satélite. No Brasil, recentemente, um trabalho realizado pelo LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina, utilizando dados dos satélites METEOSAT-2, METEOSAT-3 e GOES-8, validados por dados terrestres do INMET, INPE e LABSOLAR, gerou o Atlas de Irradiação Solar do Brasil. O trabalho tem na coordenação e pesquisa principal, respectivamente, os professores Dr. Sérgio Colle e Dr. Enio Bueno Pereira. A exemplo do parágrafo anterior não serão discutidos os métodos abordados nesta área da pesquisa.

Certamente alguns trabalhos ficaram fora desta pesquisa por uma questão de relevância ou de indisponibilidade de fontes de pesquisa, mas com certeza também contribuíram para o desenvolvimento desta área do conhecimento.

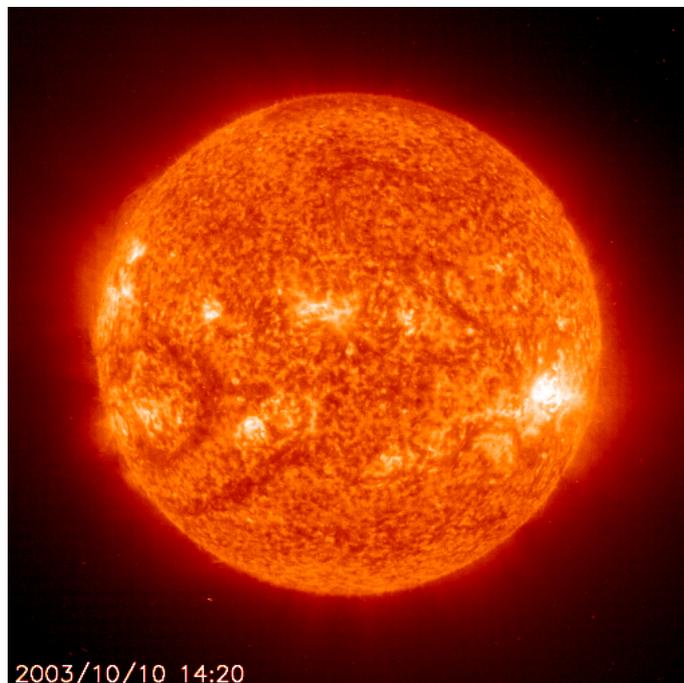
Como se percebe neste relato histórico, inúmeros trabalhos já foram realizados visando a estimativa da radiação solar a partir de dados climatológicos e muito poderá ser feito se o ímpeto pelo conhecimento nesta área for estimulado e continuado.

## 2.0 RADIAÇÃO SOLAR

### 2.1. O SOL

A vida na Terra é possível graças a uma combinação de fatores que juntos permitem ao planeta ter energia suficiente e na medida certa para todos seus fenômenos biológicos e físicos. Essa energia provém da estrela mais próxima chamada Sol. É a radiação solar. A radiação solar mantém a superfície terrestre a uma temperatura confortável, além de fornecer quase toda a energia necessária.

O Sol é uma estrela de porte médio com um diâmetro equatorial de  $1,39 \times 10^9$  m. A Figura 2.1 mostra uma foto do Sol obtida pelo satélite Solar & Heliospheric Observatory (SOHO).



**Figura 2.1** Foto do Sol obtida pelo Observatório Heliosférico & Solar (SOHO) da Agência Espacial Americana (NASA) e Agência Espacial Européia (ESA).

Fonte: NASAa – 11 out. 2003.

O Sol é uma esfera de plasma, constituído de partículas nucleares entre as quais encontram-se, principalmente, os núcleos de hidrogênio (prótons). A fusão nuclear, de acordo com modelos atuais, iniciou-se quando o núcleo solar atingiu altíssima temperatura, aproximadamente  $1,5 \times 10^7$  K. Os núcleos de Hidrogênio atingiram energia suficiente, cerca de 1 keV, para, em uma cadeia de reações, formar núcleos de hélio e liberar, além de neutrinos e raios gama, grande quantidade de energia. Essa cadeia de reações foi proposta, pela primeira vez, por Bethe, citado por Tipler e Llewellyn, 2001 e recebeu o nome de *ciclo próton-próton*.

As reações nucleares que ocorrem no núcleo solar são responsáveis por 90% da energia gerada. O núcleo tem apenas 15% do volume solar, mas tem uma densidade de  $10^5 \text{ kg/m}^3$ . Cerca de 40% da massa solar encontra-se no núcleo. O raio do núcleo é de 0,23 do raio total do Sol.

“A sucessão de processos radioativos e convectivos ocorrem com sucessivas emissões, absorções e reirradiação; a radiação no núcleo solar está na parte do espectro solar correspondente aos raios-X e raios gama, com o comprimento de onda da radiação aumentando com a temperatura que diminui ao longo da distância radial”. [Duffie e Beckman, 1991]

Além do núcleo, radialmente para fora, encontra-se a *zona radioativa*, com 47% do raio solar, onde a densidade diminui radialmente para fora, a partir do núcleo, para  $70 \text{ kg/m}^3$  e a temperatura atinge apenas 130.000K. Na seqüência encontra-se a *zona convectiva* com densidade e temperatura iguais a *zona radioativa*.

A superfície solar é chamada *fotosfera* e aparece formada de grânulos (células de convecção irregular), com dimensões 1000 a 3000 km, tem uma temperatura aproximada de 5000 K e densidade de apenas  $10^{-5} \text{ kg/m}^3$ . A *fotosfera* é a fonte da maior parte da radiação solar. É responsável pela luz que torna o Sol visível.

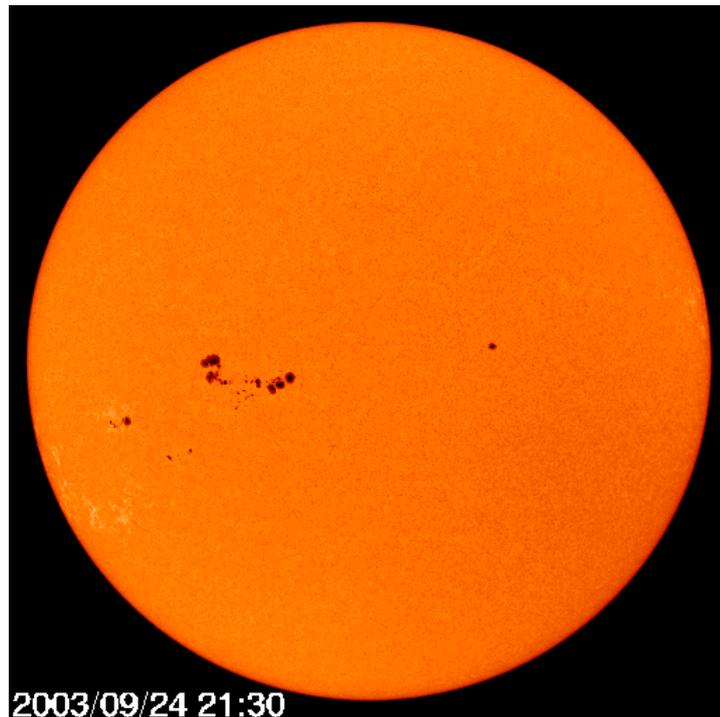
Em seqüência, além da *fotosfera*, encontra-se a *camada de reversão*, a *cromosfera* e finalmente a *coroa solar*. A temperatura da *coroa solar* é da ordem de  $10^6 \text{ K}$  com densidade muito baixa.

Os cientistas ainda debatem o modelo teórico atual do Sol principalmente no tocante a emissão de neutrinos, que são utilizados para estudar o interior do Sol. Além disso, existem fenômenos solares transitórios que ocorrem na superfície solar, e que tem influência sobre o meio ambiente terrestre, tecnologias humanas e que não são totalmente explicados. Esses fenômenos de interesse são chamados *manchas solares*. A Figura 2.2 mostra uma foto de manchas solares obtida pelo satélite SOHO. As *manchas solares*, segundo o modelo solar atual, têm origem nas flutuações do campo magnético solar que é altamente variável devido ao comportamento convectivo da matéria solar. Nestas *manchas solares* a temperatura é menor. Ao mesmo tempo ocorrem violentas explosões solares, chamadas *labaredas*, que enviam para o espaço partículas carregadas além de uma maior quantidade de energia. Fato conhecido é o de que a polaridade magnética do Sol se inverte aproximadamente a cada 11 anos, culminando com um máximo de *manchas solares* e de *labaredas*. Estes fenômenos têm influência sobre o valor da constante solar,  $G_{sc}$ . A constante solar é a quantidade de radiação solar que chega em uma superfície perpendicular aos raios solares, fora da atmosfera terrestre e sua unidade é  $\text{W/m}^2$ . A Figura 2.3 mostra a evolução da constante solar,  $G_{sc}$ , entre os anos de 1978 e 2000. A constante solar será

discutida na seção 2.2.

Segundo Tipler e Llewellyn, 2001, a potência total irradiada pelo Sol ou qualquer outra estrela é conhecida como *luminosidade* e é representada pela letra *L*. A luminosidade do Sol é da ordem de  $3,85 \times 10^{26}$  W. Já a intensidade (potência por unidade de área) irradiada pelo Sol é de aproximadamente  $6,42 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>. Ainda, segundo este autor, a temperatura efetiva da fotosfera é da ordem de 5800 K.

“Irradiância é a quantidade de energia solar radiante que atinge uma unidade de área de superfície numa unidade de tempo”. [Kreith e Kreider, 1978]



**Figura 2.2** Foto de manchas solares no Sol obtida pelo SOHO.

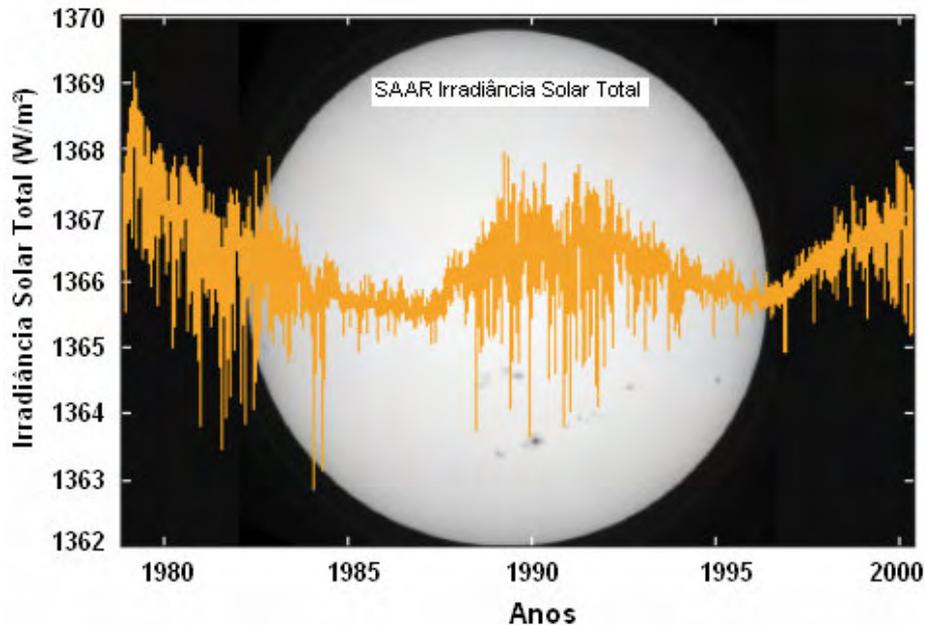
Fonte: NASA – 11 out. 2003

## 2.2.CONSTANTE SOLAR

Como a órbita da Terra em torno do Sol é elíptica, a distância entre o Sol e Terra varia em 1,7%, segundo Duffie e Beckman, 1991. Uma Unidade Astronômica (*UA*) é a distância média entre o Sol e a Terra e equivale a  $1,495 \times 10^{11}$  m.

Devido a distância e a relação espacial entre o Sol e Terra, a quantidade de radiação solar que chega em uma superfície perpendicular aos raios solares, fora da atmosfera terrestre, é quase fixa, e é chamada de constante solar. Seu valor atual, citado por Duffie e Beckman, 1991, é de  $1367$  W/m<sup>2</sup>. A constante solar representa a energia proveniente do Sol, por unidade de tempo

sobre uma unidade de área de superfície perpendicular a direção de propagação da radiação, à distância média entre Sol e Terra ( $UA$ ), fora da atmosfera. Pelo que foi discutido na seção 2.1, a constante solar é um valor médio, pois a emissão de energia solar não é constante com o passar do tempo.



**Figura 2.3** Variação da irradiância solar com o tempo entre os anos de 1978 e 2000. A variação tem um período de aproximadamente 11 anos. Na foto, SARR significa Referência Radiométrica Absoluta Espacial. O aumento da irradiância solar coincide com o aumento das manchas solares. Adaptado de NASAc – 11 out. 2003.

### 2.3. VARIAÇÃO DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE

A emissão de energia por parte do Sol não é constante, como discutido na seção 2.1, havendo períodos de máximas emissões que são sentidas pelo meio intergaláctico, e conseqüentemente pela Terra, onde seus efeitos podem ser sentidos por instalações elétricas e até mesmo danificar sistemas eletrônicos de satélites e prejudicar comunicações de longa distância.

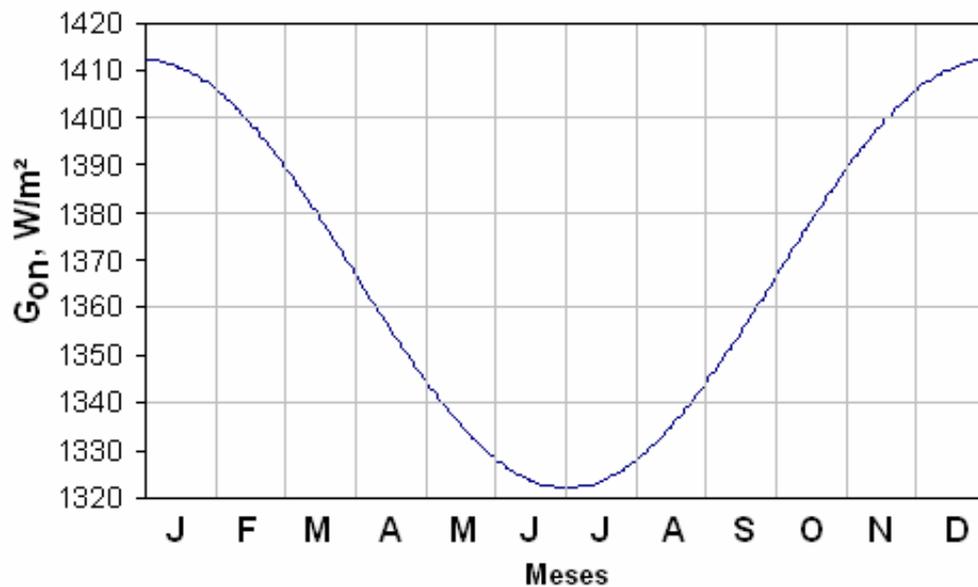
A ocorrência de *manchas solares* e das *labaredas* tem implicação na variação da intensidade de radiação solar que chega a Terra, no entanto, não existe consenso entre os cientistas, quanto ao percentual desta variação. Para a engenharia esta variação não é considerada e a energia emitida é considerada fixa.

Outra fonte de variação da energia que chega a Terra, como foi discutido na seção 2.2, é a distância entre o Sol e a Terra que não é constante devido a excentricidade da órbita

elíptica da Terra, tendo o Sol em um de seus focos. A variação no fluxo de radiação extraterrestre está em  $\pm 3\%$ . A dependência da radiação extraterrestre do período do ano é indicada pela Equação 2.1 e mostrada na Figura 2.4.

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

onde  $G_{on}$  é a radiação extraterrestre, medida sobre um plano perpendicular a radiação no  $n$ -ésimo dia do ano.  $G_{sc}$  é a constante solar.



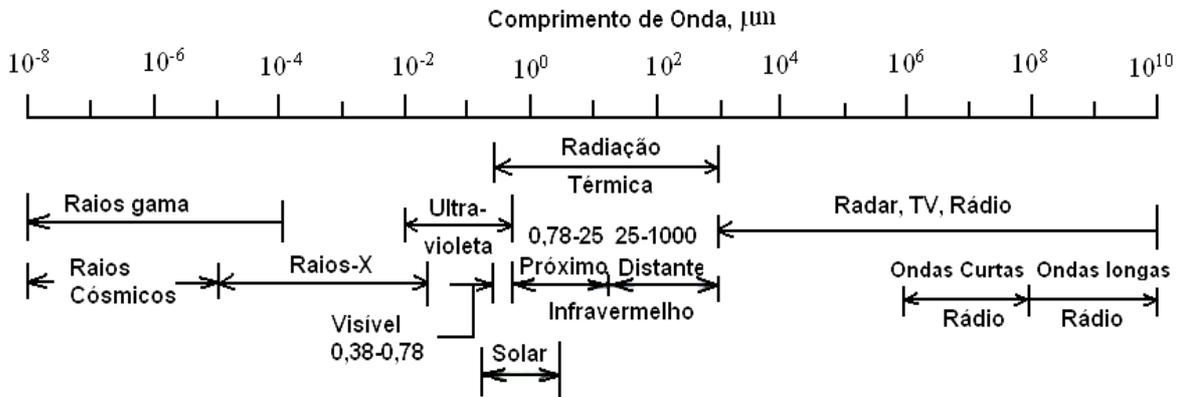
**Figura 2.4** Variação da radiação solar extraterrestre com o período do ano.

Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 7.

## 2.4. DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO EXTRATERRESTRE

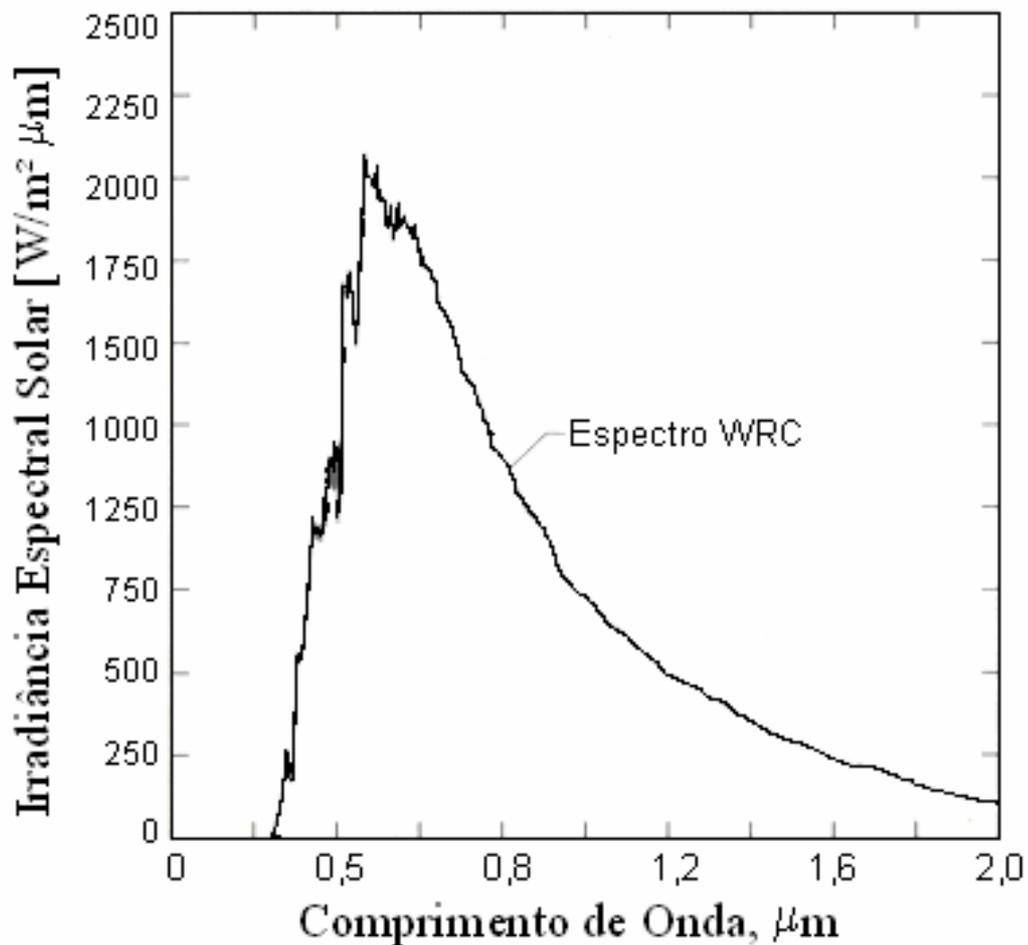
A fotosfera solar emite energia em todos os comprimentos de onda ou frequências, mas principalmente entre 200 e 3000 nanômetros (ou 0,2 - 3 microns). A Figura 2.5 mostra o espectro completo da radiação eletromagnética. O máximo de emissão se verifica no comprimento de onda de 0,48 microns. A Figura 2.6 mostra a curva de irradiância espectral padrão do Centro de Radiação Mundial – World Radiation Center (WRC), para a distância média Terra-Sol, fora da atmosfera terrestre. A distribuição corresponde aproximadamente àquela de um corpo negro a 5770K. Por definição, corpo negro é um perfeito absorvedor de energia. Não

importa o comprimento de onda ou a direção de onde vem, o corpo negro absorve toda a radiação. É um conceito ideal, pois todas as substâncias reais vão refletir alguma radiação. Um corpo negro também é um perfeito emissor de radiação térmica.



**Figura 2.5** Espectro da radiação eletromagnética.

Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 148.



**Figura 2.6** Curva de irradiância espectral padrão WRC para a distância média Terra-Sol. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 7.

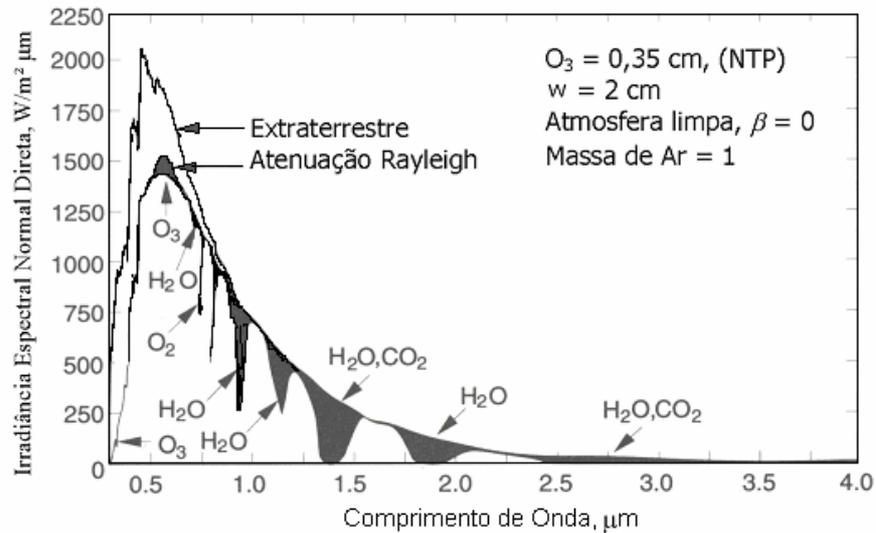
## 2.5. DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO NA SUPERFÍCIE TERRESTRE

Da energia total que incide logo acima da atmosfera terrestre apenas parte chega até a superfície terrestre. Iqbal, 1983, apresenta estudos minuciosos da influência de elementos espalhadores e atenuadores da energia solar, presentes na atmosfera.

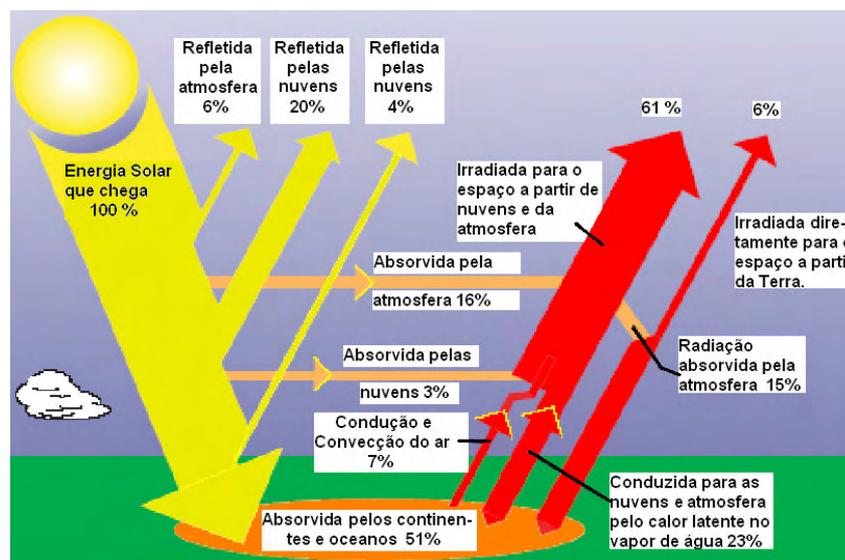
A curva de irradiância na superfície terrestre é diferente da curva mostrada na Figura 2.6, correspondente à irradiância extraterrestre. A radiação solar direta, quando atravessa a atmosfera terrestre sofre espalhamento, absorção e reflexão nos vários elementos constituintes da atmosfera. Como elementos que espalham a radiação solar, encontram-se em grande quantidade na atmosfera terrestre, o nitrogênio e o oxigênio, assim como as moléculas de água e aerossóis, estes últimos variáveis. A parte da radiação solar que é espalhada por estes elementos dá origem à *Radiação Difusa*. O espalhamento depende do número de moléculas que a radiação atravessa e do tamanho das partículas em relação ao comprimento de onda da radiação,  $\lambda$ . O comprimento relativo do caminho que a radiação atravessa é chamado de *massa de ar*.

O vapor de água, alguns gases como o ozônio, dióxido de carbono combinados podem absorver parcela importante de radiação solar. Os aerossóis, já citados, que são partículas em suspensão na atmosfera, são capazes também de absorver radiação. As nuvens têm importante contribuição na diminuição da radiação solar que atinge o solo, pois tem grande poder reflexivo e absorvem radiação solar no infravermelho próximo. A *insolação*, número de horas de brilho de sol, ou seja, número de horas sem que a radiação solar direta seja interceptada por nuvens, é utilizado para estimar a radiação solar, devido a sua importância na quantidade de radiação solar que atinge a superfície. A Figura 2.7 mostra o efeito do espalhamento Rayleigh pelas moléculas de ar e a absorção pelo  $O_3$ ,  $H_2O$  e  $CO_2$  sobre a distribuição espectral da irradiância direta. De acordo com a teoria de espalhamento Rayleigh, o coeficiente de espalhamento varia com  $\lambda^{-4}$ . As moléculas gasosas, principalmente oxigênio e nitrogênio, são os maiores espalhadores de Rayleigh e são os principais espalhadores em uma atmosfera limpa. Já em atmosferas túrbidas, com muitos aerossóis, o espalhamento de Mie é quase tão importante quanto o espalhamento de Rayleigh em comprimentos de ondas no azul e ultravioleta (*UV*), dominante no visível longínquo e infravermelho e para atmosferas altamente poluídas, é dominante em todos os comprimentos de onda. O espalhamento de Mie ocorre quando o tamanho das partículas é tão grande (ou maior) quanto o comprimento de onda da radiação. O espalhamento Rayleigh é significativo somente para comprimentos de ondas pequenos, até  $\lambda = 0,6$ , devido ao tamanho reduzido das moléculas de ar.

A Figura 2.8 mostra um esquema ilustrativo da distribuição da provisão de energia recebida pela Terra proveniente do Sol.



**Figura 2.7** Um exemplo dos efeitos do espalhamento Rayleigh e da absorção atmosférica sobre a distribuição espectral da irradiância direta. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991. Pág. 65.



**Figura 2.8** A Terra recebe energia através da radiação solar e perde energia através da radiação infravermelha térmica para o espaço. O balanço entre energia ganha e perdida determina a temperatura da Terra. Adaptado de NASAc – acesso em 11 out. 2003.

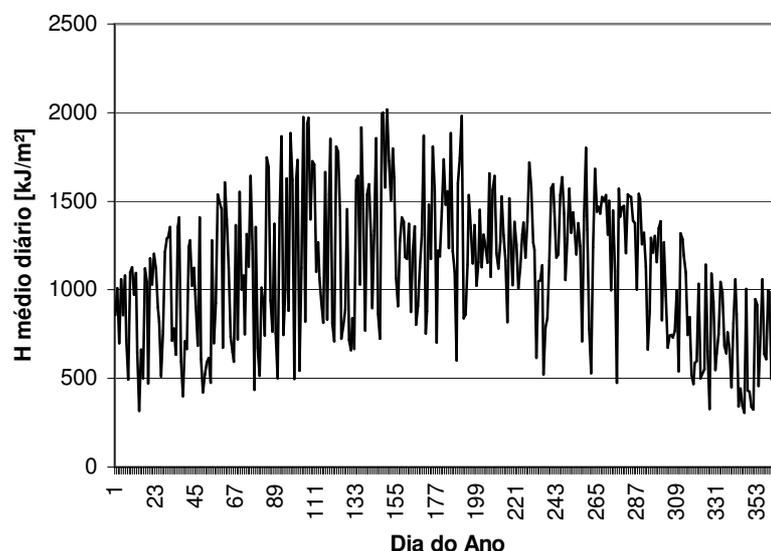
## 2.6. RADIAÇÃO DIRETA, DIFUSA E GLOBAL

*Radiação Direta* é a radiação solar recebida do Sol menos a radiação espalhada, absorvida ou refletida por componentes atmosféricos.

A *Radiação Difusa* é a parcela da radiação solar que é espalhada por componentes atmosféricos. Além disso, da *radiação difusa*, também faz parte o *albedo* que é a parte da radiação refletida pelas superfícies terrestres. O *albedo* depende da *refletância* da superfície. Uma superfície coberta de vegetação é bastante absorvente no visível. Isto é devido à clorofila, que absorve especialmente no azul, laranja e vermelho. No entanto, a clorofila absorve menos no verde, sendo especialmente refletido, dando às plantas sua cor característica. Já no infravermelho próximo, nossos olhos não o percebem, mas as superfícies com cobertura vegetal têm refletância alta. Superfícies minerais têm refletância alta, e algumas (como a neve) refletem a maior parte da radiação solar que chega a elas. A água tem refletância pequena no visível, que vai diminuindo ainda mais com o comprimento de onda, mas aumenta com a diminuição da altura solar e depende do índice de refração da água.

A *radiação solar global* é a soma da *radiação direta* e da *radiação difusa* sobre uma superfície. A medida mais comum de radiação solar é a *radiação solar global* sobre uma superfície horizontal.

A radiação solar global horizontal,  $H$ , tem uma distribuição durante o ano que apresenta tendência sazonal com flutuações diárias superpostas. A Figura 2.9 mostra a distribuição da radiação solar global horizontal média diária para a cidade de Asheville no Estado da Carolina do Norte – Estados Unidos da América – EUA.



**Figura 2.9** Radiação solar global horizontal média diária,  $\bar{H}$ , em Asheville, Carolina do Norte, EUA, 1961. Fonte: Banco de dados SAMSON – Leste.

A tendência determinística pode ser eliminada das seqüências de radiação solar para tornar sua distribuição independente da época do ano. Segundo Mustacchi *et al.* 1979 e Aguiar *et*

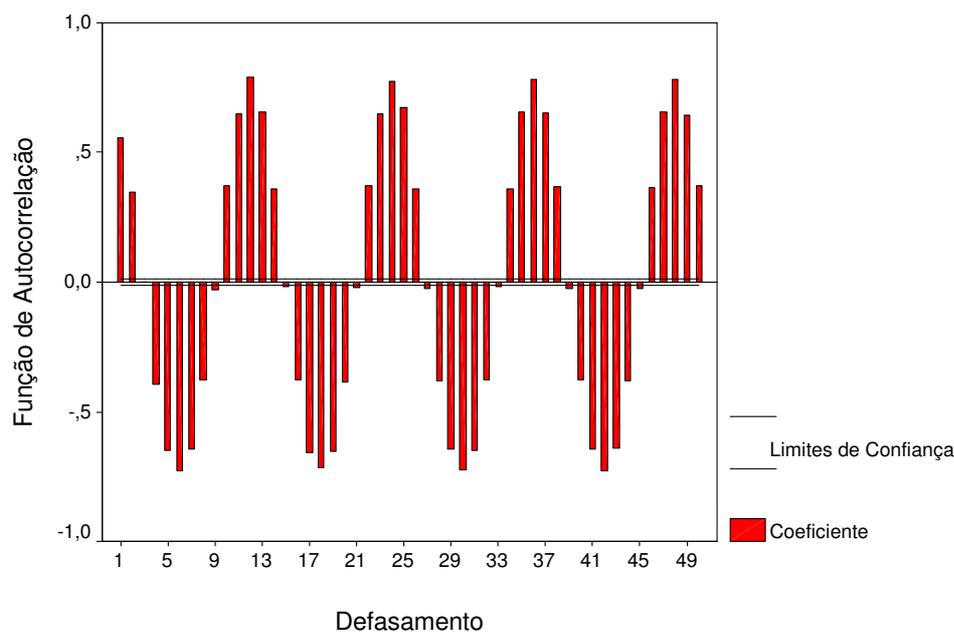
al., 1988, citados por Macagnan, 1989, existem diversas maneiras de diminuir a sazonalidade intrínseca nos dados de radiação solar, entre elas:

1 – Divisão dos dados de radiação solar pelo valor da radiação extraterrestre no mesmo plano, ou seja,  $H/H_o$ , razão também conhecida como  $K_T$ , ou índice de transparência da atmosfera. A Figura 2.10 mostra o gráfico demonstrativo dos coeficientes de autocorrelação para dados de radiação solar global horizontal média mensal. Os dados utilizados para a confecção destes gráficos estão organizados em uma seqüência mensal e pertencem ao banco de dados SAMSON – LESTE. A forma ondulada do gráfico mostra a autocorrelação entre os dados e com isso demonstra a sazonalidade dos dados. Já a Figura 2.11 mostra o gráfico demonstrativo dos coeficientes de autocorrelação para dados de  $\bar{K}_T$  mensal, para a mesma seqüência de dados utilizada na Figura 2.10. Claramente há uma diminuição nos valores dos coeficientes de autocorrelação e conseqüentemente da sazonalidade. A autocorrelação será discutida brevemente na seção 3.11.

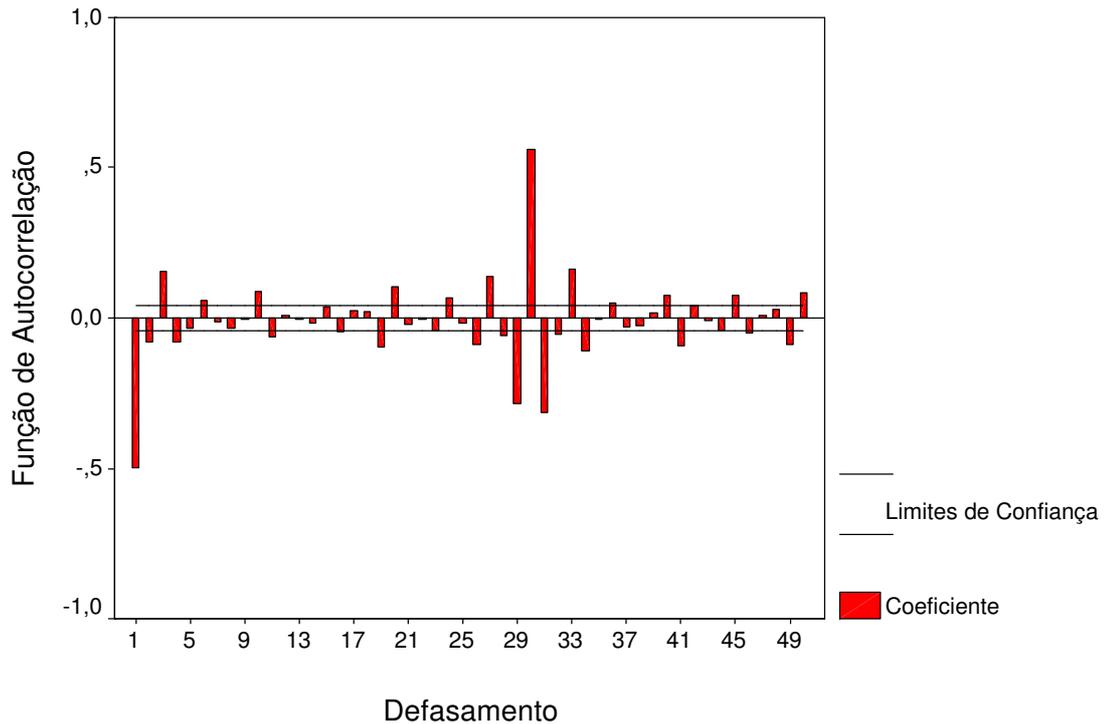
2 – Subtração dos dados de radiação pela harmônica anual (primeira harmônica de sua análise de Fourier).

3 – Subtração de cada dado de radiação do valor obtido fazendo-se a média móvel sobre  $2_{d+1}$  dias centrados naquele ponto.

4 – Subtração ou divisão dos dados de radiação pelo valor da radiação obtido de um modelo físico, o qual considera a radiação extraterrestre e os efeitos de absorção e espalhamento pela atmosfera.



**Figura 2.10** Coeficientes de autocorrelação para dados de radiação solar global horizontal médio mensal.



**Figura 2.11** Coeficientes de autocorrelação para dados de  $\bar{K}_T$  mensal.

## 2.7. DEFINIÇÃO DE TERMOS

Algumas definições dentro de radiação solar são importantes. Entre elas:

**IRRADIÂNCIA** – é a taxa com que a energia radiante incide sobre uma superfície, por unidade de área de superfície. Sua unidade é o  $W/m^2$ . O símbolo  $G$  é utilizado para irradiância com subíndices apropriados para radiação direta ( $b$ ), difusa ( $d$ ) ou espectral( $s$ ).

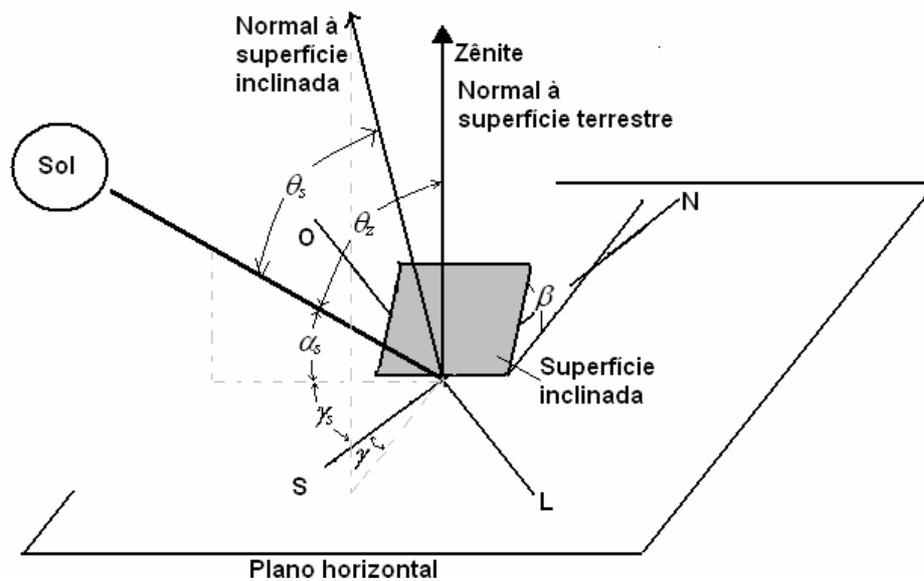
**IRRADIAÇÃO** – É a energia incidente por unidade de área sobre uma superfície. É encontrada por integração da irradiância sobre um tempo especificado, normalmente, hora ou dia. Sua unidade é  $J/m^2$ . O símbolo  $H$  é utilizado para a irradiação em um dia. O símbolo  $I$  é utilizado para uma hora ou outro período escolhido. Os símbolos  $H$  e  $I$  podem representar radiação direta, difusa ou total e superfícies com qualquer orientação.

Os símbolos  $G$ ,  $H$  e  $I$  podem ser utilizados com os seguintes subíndices:  $o$  refere-se a radiação extraterrestre;  $b$  para radiação direta e  $d$  para radiação difusa;  $T$  e  $n$  referem-se, respectivamente, a plano inclinado e a plano normal a direção de propagação. Se nem  $T$  e nem  $n$  aparecerem significa que o plano é horizontal.

## 2.8. CÁLCULO DA RADIAÇÃO SOLAR SOBRE UMA SUPERFÍCIE

Nesta seção serão apresentadas as equações utilizadas para os cálculos de grandezas da radiação solar. Inicialmente algumas definições são importantes.

Segundo Benford e Bock, 1939 citado por Duffie e Beckman, 1991, as relações geométricas entre um plano e qualquer orientação relativa a Terra em qualquer instante e a radiação solar direta incidente, pode ser escrita em termos de alguns ângulos. A Figura 2.12 mostra alguns destes ângulos.



**Figura 2.12** Ângulo de zênite, ângulo azimutal da superfície ( $\gamma$ ) e ângulo azimutal solar para uma superfície inclinada. Adaptado de Duffie e Beckman, 1991, pág. 65.

Os ângulos considerados são os seguintes:

$\phi$  - *Latitude*, posição angular norte ou sul em relação ao Equador, norte positivo;  $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ .

$\delta$  - *Declinação*, posição angular do Sol ao meio-dia solar (quando o Sol está sobre o meridiano local) com relação ao plano do Equador, norte positivo.  $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$ .

$\beta$  - *Inclinação*, ângulo entre o plano de uma superfície em questão e o plano horizontal;  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ .

$\gamma$  - *Ângulo azimutal da superfície*, é o afastamento, em relação ao meridiano local, da projeção normal da superfície no plano horizontal.

$\omega$  - *Ângulo horário*, é o ângulo, medido no pólo celeste, entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol. Vale  $0^\circ$  ao meio dia no tempo solar verdadeiro (TSV) e diminui  $15^\circ$  a cada hora pela manhã e soma  $15^\circ$  a cada hora pela tarde.

$\theta_s$  – *Ângulo de incidência*, é o ângulo entre a radiação direta sobre a superfície e a normal desta superfície.

$\theta_z$  – *Ângulo de zênite*, é o ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície horizontal.

$\alpha_s$  – *Ângulo da altitude solar*, é o ângulo entre a horizontal e a linha do Sol. É o complemento do ângulo de zênite.

$\gamma_s$  – *Ângulo de azimuth solar*, é o ângulo entre a projeção da radiação direta sobre o plano horizontal e a linha que indica o pólo Sul. Deslocamentos a leste do sul são negativos e a oeste, são positivos.

A declinação solar pode ser calculada pela Equação de Cooper, 1969, segundo Duffie e Beckman, 1991.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} (n + 284) \right] \text{ em graus.} \quad (2.2)$$

onde  $n$  é o número do dia do ano.

### 2.8.1. Hora Solar

A hora solar é outra variável importante no cálculo da radiação solar, pois é o tempo especificado em todas as relações envolvendo a posição do Sol em um determinado momento. É o tempo baseado no movimento angular aparente do Sol através do céu, com o meio dia solar sendo o instante em que o Sol cruza o meridiano do observador.

Para converter o horário padrão em hora solar ou *Tempo Solar Verdadeiro*, são necessárias duas correções. A primeira é um fator constante que considera a diferença entre a longitude do meridiano local e a longitude tida como padrão para a hora oficial e considerando que o Sol leva 4 minutos para cruzar  $1^\circ$  de longitude. A segunda correção é a *equação do tempo* que considera a perturbação na taxa de rotação da Terra, a qual afeta o tempo que o Sol cruza o meridiano do observador. A Equação 2.3 é utilizada para o cálculo da *Hora Solar*.

$$\text{Hora Solar} = \text{Hora Oficial} + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (2.3)$$

onde  $L_{st}$  é a longitude do meridiano padrão para a hora oficial local,  $L_{loc}$  é a longitude do local em questão, e as longitudes estão em graus oeste, ou seja,  $0^\circ < L < 360^\circ$ .  $E$  é a equação do tempo

determinado pela Equação 2.4 e dado em minutos.

$$E = 229,18(0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 * \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (2.4)$$

onde  $B$  é dado pela Equação 2.5.

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (2.5)$$

onde  $n$  é o dia do ano. Ver Tabela 2.1.

### 2.8.2. Ângulo de Nascimento do Sol

O *ângulo de nascimento do Sol* é encontrado resolvendo-se a Equação 2.7:

$$\cos \omega_s = \frac{-\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} \quad (2.6)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (2.7)$$

O *ângulo de nascimento do Sol* é igual ao *ângulo do pôr-do-sol*, excetuando-se o sinal.

A Tabela 2.1 relaciona os dias médios (característicos) de cada mês, a declinação característica do mês e o número do dia do mês característico no ano.

### 2.8.3. Número de Horas de Brilho de Sol (Insolação)

O *número de horas de brilho de Sol do dia*,  $S_o$ , é igual a  $2|\omega_s|$  e a Equação fica:

$$S_o = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (2.8)$$

**Tabela 2.1** – Dias médios e declinações características  
(irradiação extraterrestre diária idêntica ao valor médio mensal).

Mês	Dia Característico	Declinação, $\delta$	Dia do Ano, $d_n$
Jan	17	-20,90	17
Fev	16	-13,00	47
Mar	16	-02,40	75
Abr	15	09,40	105
Mai	15	18,80	135
Jun	11	23,10	162
Jul	17	21,20	198
Ago	16	13,50	228
Set	15	02,20	258
Out	15	-09,60	288
Nov	14	-18,90	318
Dez	10	-23,00	344

Adaptado de Duffie e Beckman, 1991, pág. 14.

#### 2.8.4. Cálculo do Ângulo de Incidência sobre uma Superfície

O ângulo de incidência da radiação direta sobre uma superfície pode ser obtido utilizando-se a Equação 2.9 ou a Equação 2.10.

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen } \delta \text{ sen } \phi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \phi \text{ sen } \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \text{ sen } \phi \text{ sen } \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } \gamma \text{ sen } \omega \end{aligned} \quad (2.9)$$

Ou

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \text{sen } \theta_z \text{ sen } \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (2.10)$$

Para superfícies horizontais, o ângulo de incidência é o ângulo de zênite do Sol,  $\theta_z$ .

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \text{sen } \phi \text{ sen } \delta \quad (2.11)$$

#### 2.8.5. Radiação Extraterrestre sobre uma Superfície Horizontal

Em qualquer instante, a radiação solar incidente sobre um plano horizontal extraterrestre é calculada pela Equação 2.12.

$$G_o = G_{sc} \left( 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360d_n}{365} \right) \right) \cos \theta_z \quad (2.12)$$

O cálculo da radiação solar diária,  $H_o$ , é feito por integração da radiação extraterrestre diária sobre uma superfície horizontal. É dada pela Equação 2.13.

$$H_o = \left( \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \right) \times \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360d_n}{365} \right) \times \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (2.13)$$

O cálculo da radiação solar entre dois instantes,  $I_o$ , é feito por integração da radiação extraterrestre diária sobre uma superfície horizontal neste período, resultando na Equação 2.14.

$$I_o = \left( \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \right) \times \left( 1 + 0,033 \cos \frac{360d_n}{365} \right) \times \left( \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi(\Delta \omega_s)}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (2.14)$$

onde

$$\Delta \omega_s = \omega_2 - \omega_1 \quad (2.15)$$

representa o período considerado em ângulo horário.

### 2.8.6. Massa de Ar

Quando a radiação solar atravessa um meio, como a atmosfera, por exemplo, cada molécula atenua energia. A atenuação é função do tipo e do número de moléculas encontradas no caminho de um raio solar. A *massa óptica* ( $m$ ), é a *densidade* ( $\rho$ ) do meio multiplicado pela *distância percorrida* ( $ds$ ) pelo raio, podendo ser encontrada pela Equação 2.16:

$$m = \int_0^{\infty} \rho ds \quad (2.16)$$

A Equação 2.16 aplica-se somente a radiação monocromática, pois a refração depende do comprimento de onda da radiação. O caminho óptico varia com o comprimento de onda.

A massa óptica no caminho vertical é igual a altura  $dz$ , onde  $z$  é a distância ao longo da direção vertical.  $m_z$  é encontrada pela Equação 2.17.

$$m_z = \int_0^{\infty} \rho dz \quad (2.17)$$

A massa óptica relativa,  $m_r$ , é definida como a relação entre o caminho ótico numa trajetória oblíqua e o caminho ótico na direção vertical (direção azimutal). É dada pela Equação 2.18.

$$m_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho ds}{\int_0^{\infty} \rho dz} \quad (2.18)$$

Ignorando a curvatura da Terra e assumindo uma atmosfera não-refrativa e completamente homogênea, a massa óptica relativa, aplicada a todos os constituintes da atmosfera, é dada pela Equação 2.19:

$$m'_z = \sec \theta_z \quad (2.19)$$

O erro nesta Equação, devido à curvatura da Terra e a refração da atmosfera real terem sido desprezadas é 0,25% para  $\theta_z = 60^\circ$  e aumenta para 10% para  $\theta_z = 85^\circ$ .

## 2.9. DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS DOS VALORES DE $K_T$

Liu e Jordan, 1960, citado por Duffie e Beckman, 1991, originalmente definiram a razão entre a radiação Solar na superfície terrestre e a radiação solar extraterrestre como sendo um índice de cobertura de nuvens,  $K_T$ . Posteriormente a variável passou a chamar-se de índice de transparência da atmosfera, ou índice de limpidez (clearness index) ou ainda índice de claridade. Sabe-se que o  $K_T$  muda constantemente durante um dia, um mês, entre estações ou no ano, dependendo das condições atmosféricas que sofrem alterações naturais e da própria ação humana. O  $K_T$  pode ser médio de um mês, de um ano, de um dia ou de uma hora.

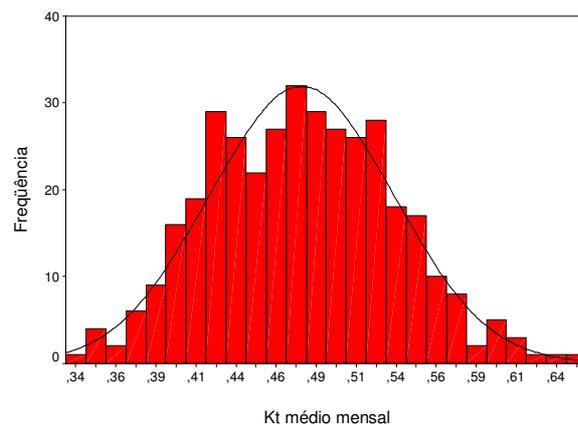
Dias com  $K_T$  muito alto ou muito baixo não ocorrem freqüentemente, no entanto dias com  $K_T$  intermediário são muito mais freqüentes, conforme se observa na Figura 2.13. A curva normal sobre o gráfico tem apenas função de comparação da distribuição medida com a distribuição teórica normal. Se  $\bar{K}_T$  é alto, distribuição será inclinada na direção dos valores mais altos de  $K_T$ , e se baixos a distribuição estará inclinada na direção dos valores menores de  $K_T$ . A distribuição pode ser bimodal.

Liu e Jordan, 1963, citado por Duffie e Beckman, 1991, descobriram que as curvas de distribuição cumulativas são quase idênticas para locais tendo os mesmos valores de  $\bar{K}_T$ ,

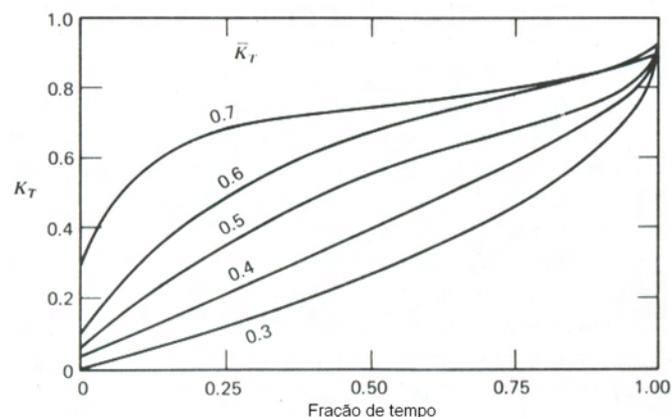
mesmo que estes locais variem bastante em latitude e elevação. Os pesquisadores desenvolveram um conjunto de curvas de distribuições generalizadas de  $K_T$  versus  $f$  que são funções de  $\bar{K}_T$ , o índice de transparência mensal da atmosfera. A Figura 2.14 mostra suas conclusões. Analisando o gráfico pode-se perceber que, por exemplo, se um local tem um  $\bar{K}_T$  de 0,4, 25% dos dias terão  $K_T$  igual ou menor que 0,20. Segundo os autores, a distribuição dos valores de  $K_T$  depende exclusivamente do seu valor médio mensal e não do local ou da época do ano. Partindo deste pressuposto, pode-se concluir que existe uma função universal  $f(K_T, \bar{K}_T)$  válida para qualquer parte do mundo e para qualquer mês do ano.

Em 1981, Bendt *et al.*, utilizando dados de 20 anos de 90 localidades dos Estados Unidos chegaram a resultados parecidos com os de Liu e Jordan.

No entanto, principalmente quando aplicadas a climas tropicais, a universalidade das funções de distribuição de Liu e Jordan foi criticada. Saunier *et al.*, 1987, citado por Knight *et al.*, 1991, propôs uma expressão alternativa para a distribuição para climas tropicais. Knight *et al.*, 1991, fazem uma revisão sobre as distribuições.



**Figura 2.13** Distribuição de frequências dos valores de  $\bar{K}_T$ . Pelotas – RS.



**Figura 14** Distribuição generalizada de dias com vários valores de  $K_T$  como uma função de  $\bar{K}_T$ . Adaptado de Duffie e Beckman, 1991, pág. 78.

## 2.10. DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

Na engenharia solar, inúmeras variáveis solares e climatológicas são utilizadas para cálculos de grandezas convenientes para os mais diversos fins. A seguir, serão descritos algumas grandezas mais importantes e os equipamentos utilizados para sua medição.

### 2.10.1. Radiação Solar

A radiação solar pode ser medida por vários tipos de instrumentos de medida: o *pirheliômetro*, o *piranômetro* e o *actinógrafo*.

O *pirheliômetro* mede basicamente o fluxo de radiação solar direta, com incidência normal. Este equipamento é geralmente acoplado a um sistema seguidor do Sol.

O *piranômetro* mede a radiação solar proveniente de todo o hemisfério celeste, isto é, tanto a radiação difusa quanto a radiação direta, ou seja, a radiação global. Em combinação com um anel de sombra, mede somente a radiação difusa (é necessário somar a parcela de radiação correspondente ao céu encoberto pelo disco de sombra). Quando colocado inclinado mede a radiação global no plano inclinado, incluindo o *albedo*. Os elementos sensores dos piranômetros são normalmente termoeletrônicos, termomecânicos ou fotovoltaicos.

O *actinógrafo* é um instrumento usado para medir a radiação global. Este instrumento é composto de sensores baseados na expansão diferencial de um par bimetálico. Os sensores são conectados a uma pena que, quando de sua expansão, registram o valor instantâneo da radiação solar. Sua precisão encontra-se na faixa de 15 a 20% e é considerado um instrumento de terceira classe.

A maioria dos aparelhos que medem radiação solar nas estações de coleta do Rio Grande do Sul e Brasil são do tipo *actinógrafo* bimetálico instalados a 1,5 m acima do nível do solo.

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia (WMO), os piranômetros são classificados em: piranômetros de primeira, segunda classe e terceira classe.

Os piranômetros estão sujeitos a inúmeros problemas que prejudicam a precisão das medidas. Os problemas mais conhecidos estão na Tabela 2.2, bem como os erros que causam na leitura de cada tipo de piranômetro, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia - WMO. Esta tabela é válida para os equipamentos utilizados pelas estações meteorológicas do Rio Grande do Sul. Os problemas na precisão das medidas registradas se agravam com a falta de

manutenção e calibração conforme instruções dos fabricantes.

Inúmeros trabalhos estão sendo realizados com a utilização de satélites meteorológicos para a estimativa da radiação solar. Os satélites apresentam a vantagem de uma ampla cobertura geográfica com alta resolução espacial e temporal. Os satélites usam radiômetros de varredura no visível e no infravermelho para medir a refletância terrestre e assim estimar a radiação através de modelos físicos ou estatísticos.

**Tabela 2.2** Problemas em piranometria de acordo com os tipos de piranômetros, segundo a WMO. Adaptado de WMO, 1961.

Especificação	Piranômetros		
	1ª Classe	2ª Classe	3ª Classe
Sensibilidade –Zero Offset ( $\text{mWcm}^{-2}$ )	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
Estabilidade do fator de calibração (%)	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$
Erro devido a variação de Temperatura (%)	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$
Seletividade espectral (%)	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 5,0$
Não-linearidade (%)	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
Constante de tempo (máx.)	25 s	60 s	240 s
Resposta co-seno (%)	$\pm 3,0$	$\pm 5-7$	$\pm 10$
Resposta azimutal (%)	$\pm 3,0$	$\pm 5-7$	$\pm 10$
Erro no aparelho de registro	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$	$\pm 3$

### 2.10.2. Horas de Brilho do Sol - Insolação

A insolação é definida como o intervalo de tempo no qual o disco solar não é obstruído por nuvens. A medida da insolação é importante para a caracterização climática de uma determinada região e para a estimativa da radiação solar numa superfície horizontal, onde não existem medidas piranométricas.

Para medir a insolação utilizam-se aparelhos que registram o tempo de brilho de Sol, geralmente em décimos de hora chamados heliógrafos. Basicamente consistem em uma esfera de vidro transparente que concentra a radiação solar em uma fita de papel sensível ao calor. No Rio Grande do Sul, assim como no Brasil, os heliógrafos utilizados são em geral da marca Cambell-Stokes.

O problema com este equipamento é que o papel sensível depende da umidade, e só começa a marcar (queimar) a partir de um certo nível de radiação. Não marca ao amanhecer nem ao entardecer e nem em condições de céu com apenas radiação difusa. Ele começa a marcar a partir de  $70 \text{ W/m}^2$  para um dia completamente limpo e seco (com papel seco) até a partir de  $210 \text{ W/m}^2$  para um dia com umidade relativa alta. Segundo Tiba e Fraidenraich, N., 2000, quando

utilizadas estas medidas para correlações simples com  $K_T$ , o erro associado a estas estimativas é de no mínimo 10%.

No entanto, apesar de todos os erros contidos nestes dados, a insolação é a principal variável utilizada para a estimativa da radiação solar.

### **2.10.3. Nebulosidade**

A nebulosidade é a fração do céu encoberta por nuvens. A medida da nebulosidade é feita normalmente por um técnico que observa o céu a olho nu e calcula esta parcela de cobertura por nuvens. Atualmente existem trabalhos realizados com a utilização de fotografias e imagens que são analisadas por programas de computador para determinar a nebulosidade. Um destes trabalhos foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da UFRGS como tese de doutorado por Rossini, 2002. No entanto o processo não é utilizado em larga escala devido a pouca divulgação da existência destes recursos. Um processo mais abrangente atualmente utilizado é o de utilizar satélites para fotografar as nuvens e obter a nebulosidade, como utilizado por Colle e Pereira, 1998, em seu Atlas de Irradiação Solar do Brasil.

### 3. METODOLOGIA ESTATÍSTICA

#### 3.1. CORRELAÇÃO LINEAR

A estatística é uma ferramenta quando utilizada para analisar dados de uma outra ciência. Como tal, a estatística será utilizada nesta dissertação para determinar o grau das relações entre variáveis, para determinar equações para predição de valores inexistentes para determinados locais que carecem de dados meteorológicos bem como determinar o erro de estimativa associado a estes cálculos.

Esta dissertação versa sobre estimativa da radiação solar, portanto, serão desenvolvidos modelos estatísticos baseados na correlação e regressão linear simples e múltipla, conforme sugere a literatura pesquisada.

A busca por relações entre variáveis que possam sugerir a possibilidade do uso das mesmas para estimar valores de uma destas variáveis é o objetivo principal deste trabalho. Essa relação entre variáveis é chamada de correlação.

Para se avaliar a correlação entre variáveis quantitativas, inicialmente os dados são representados em um gráfico cartesiano de pontos, chamado de diagrama de dispersão ou de pontos. A Figura 3.1 ilustra o diagrama de dispersão e fornece uma análise inicial da associação entre as variáveis escolhidas para determinado estudo.

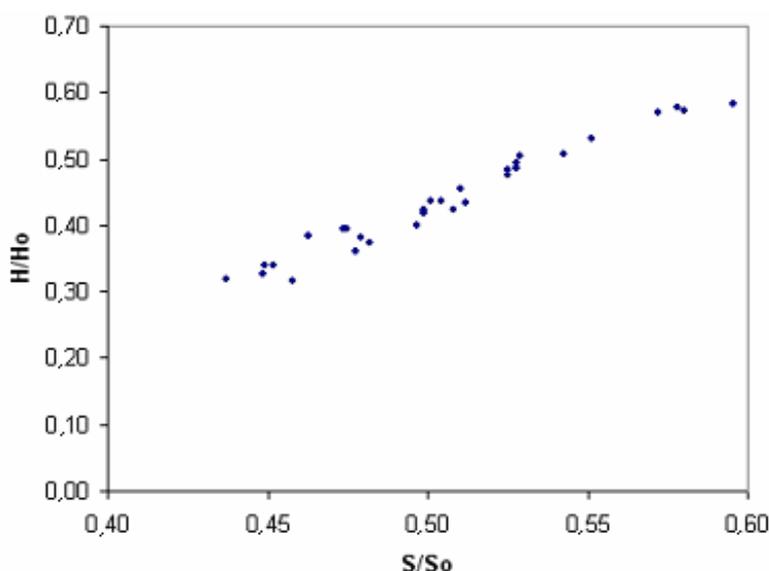


Figura 3.1 Diagrama de dispersão correspondente a associação entre  $H/H_o$  médio mensal e  $S/S_o$  médio mensal para uma amostra de 30 pares de dados do Leste dos EUA – Banco de Dados *SAMSON*.

Como relatado anteriormente, a relação entre duas variáveis é analisada pela correlação. A análise de correlação mede o grau de associação entre duas variáveis.

A força de uma relação entre duas variáveis em uma população é geralmente medida pelo coeficiente de correlação  $\rho$ , também denominado correlação momento-produto, cujos valores abrangem desde -1 para correlação negativa perfeita até +1 para correlação positiva perfeita. Na população, o coeficiente  $\rho$  mede a aderência ou a qualidade do ajuste à verdadeira reta, através da qual procura-se relacionar as variáveis  $X$  e  $Y$ .

O coeficiente de correlação  $r$ , calculado a partir de uma amostra de  $n$  pares de observações de  $X$  e  $Y$ , mede a quantidade de dispersão em torno da equação linear ajustada através dos mínimos quadrados, ou o grau de relação das variáveis, na amostra. O  $r$ , portanto, é uma estimativa do parâmetro  $\rho$ .

O coeficiente de correlação produto-momento  $r$  foi proposto pela primeira vez por Karl Pearson em 1896, e, por este motivo, é também denominado *coeficiente de correlação de Pearson*. O coeficiente de correlação  $r$  é definido como a razão entre a covariação e a raiz quadrada do produto das variações de  $X$  e  $Y$ . Simbolicamente

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2}} \quad (3.1)$$

ou,

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n}} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n}}} \quad (3.2)$$

onde  $X_i$  é o valor da  $i$ -ésima variável independente,  $Y_i$  é o valor da  $i$ -ésima variável dependente,  $\bar{Y}$  e  $\bar{X}$  são, respectivamente, a média de  $Y$  e a média de  $X$  e  $r$  é coeficiente de correlação para uma amostra.

O cálculo do coeficiente  $r$  em uma amostra é uma estimativa da verdadeira associação entre  $X$  e  $Y$  existente na população. Não se tem certeza da existência da associação entre as variáveis na população, pois o estudo foi feito a partir de uma parte da população. O valor obtido poderia ser casual, representando um erro devido à amostragem.

Para testar a existência da correlação na população através de um teste de hipóteses, supõe-se inicialmente que não existe correlação entre  $X$  e  $Y$  e, então,  $\rho = 0$ .

Para avaliar a significância do coeficiente de correlação, geralmente testa-se a hipótese nula de que  $\rho = 0$ , utilizando para tanto a distribuição  $t$ .

### 3.1.1. Avaliação Qualitativa de $r$ Quanto à Intensidade

Conforme descrito por Callegari-Jacques, 2003, uma vez determinada a existência de correlação na população, pode-se avaliá-la qualitativamente quanto à intensidade, usando-se o critério apresentado na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** Avaliação qualitativa do grau de correlação entre duas variáveis

$ r $	A correlação é dita
0,0	Nula
0,0 ┤ 0,3	Fraca
0,3 ┤ 0,6	Regular
0,6 ┤ 0,9	Forte
0,9 ┤ 1,0	Muito forte
1,0	Plena ou perfeita

### 3.1.2. Pressupostos da Correlação

O teste de significância da correlação somente será realizado corretamente se:

(1) Tanto a variável  $X$  quanto a  $Y$  têm distribuição normal.  
 (2) A variância dos valores de  $X$  para cada valor fixo de  $Y$  é sempre a mesma, isto é, o valor de  $\sigma_x^2$  é o mesmo nos vários níveis de  $Y$  (homocedasticidade).

(3) Da mesma forma, a variância dos valores de  $Y$  ( $\sigma_y^2$ ) é a mesma para todos os valores de  $X$ .

O coeficiente de correlação de Pearson é o instrumento mais adequado para medir a associação entre  $X$  e  $Y$ , se os dados satisfazem as pressuposições acima. Caso contrário não há nenhuma garantia de esta seja a medida mais correta da correlação. Por isso a importância de se analisar o gráfico de dispersão dos pontos antes de se efetuar uma análise desta natureza. Se as pressuposições são satisfeitas, a nuvem de pontos apresenta a forma de uma elipse achatada.

O coeficiente de correlação mede uma associação, não uma relação de causa e efeito. Isto quer dizer que a variável independente  $X$  não determina o quanto a variável dependente  $Y$  deve variar, mas sim que as duas variáveis estão variando juntas.

### 3.2. REGRESSÃO LINEAR

Com freqüência, fenômenos físicos ou de qualquer outra natureza, exibem relações entre as variáveis dependente e independente(s). Existem relações não lineares que podem ser linearizadas através de métodos específicos não tratados nesta dissertação.

“Havendo relação entre as variáveis é preciso descobrir se esta é forte ou fraca; estabelecer um modelo que interprete a relação funcional existente entre as variáveis e a partir do modelo usá-lo para fins de predição”. [FONSECA, et alli, 1985]

A análise de regressão consiste em um conjunto de métodos e técnicas para o estabelecimento de fórmulas empíricas que interpretem a relação funcional entre variáveis com boa aproximação.

Sendo  $Y$  a variável dependente espera-se que a mesma seja influenciada por valores de um número finito de variáveis independentes:  $X_1, X_2, \dots, X_n$  e que exista uma função “ $g$ ” que expresse tal dependência, ou seja:

$$Y = g(X_1 + X_2 + \dots + X_n) \quad (3.3)$$

Normalmente torna-se impraticável a utilização de  $n$  variáveis, ou por desconhecimento dos valores de algumas ou pela dificuldade de mensuração e tratamento de outras. Utilizando um número menor de variáveis ( $k$ ) tem-se:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + h(X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_n) \quad (3.4)$$

As influências das variáveis  $X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_n$ , sobre as quais não se tem controle, são consideradas casuais, e associa-se uma variável aleatória  $U$ , obtendo o seguinte modelo de regressão:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + U \quad (3.5)$$

onde  $f(X_1, X_2, \dots, X_k)$  é uma função e  $U$  a parte aleatória.

Sabe-se que pode existir uma relação entre  $k$  variáveis e a variável dependente  $Y$ . É preciso encontrar esta relação entre as variáveis e ainda o tipo de função  $f$ : linear, polinomial, exponencial, logarítmica etc.

Em seqüência é necessário estimar o valor dos diversos parâmetros que aparecem na especificação adotada.

“Quando se utiliza o modelo de regressão com o propósito de fazer previsões, é importante que, as previsões sejam feitas dentro do intervalo relevante da variável independente. Esse intervalo relevante engloba todos os valores de  $X$ , desde o menor até o maior, utilizados no modelo de regressão. Assim, ao prever  $Y$  para um dado valor de  $X$ , pode-se *interpolar* dentro desse intervalo relevante de valores de  $X$ , porém não se pode *extrapolar* além do intervalo de valores de  $X$ ” [Levine, 1998].

### 3.2.1. Pressupostos da Regressão

A aplicação apropriada de um determinado procedimento estatístico depende do bom cumprimento de um conjunto de pressupostos para determinado procedimento.

Os principais **pressupostos de regressão** citados por diversos autores [Levine, D.M et alli, 1998; Anderson, D. R. et alli, 2002; Zekai Şen, 1991] são:

1. **Normalidade:** o modelo de regressão requer que os valores de  $Y$  sejam normalmente distribuídos para cada valor de  $X$ . A análise de regressão é relativamente robusta em relação a afastamentos do pressuposto da normalidade. Enquanto a distribuição dos valores de  $Y_i$  em torno de cada nível de  $X$  não for extremamente diferente de uma distribuição normal, inferências sobre a linha de regressão e sobre coeficientes de regressão não serão seriamente afetadas.

$U_i$  tem distribuição normal. Em resumo:

$$U_i = N(0; \sigma^2) \quad e \quad Y = N(f(x); \sigma^2) \quad (3.6)$$

2. **Homocedasticidade:** requer que as variações em torno da linha de regressão sejam constantes para todos os valores de  $X$ . Isto significa que  $Y$  varia na mesma proporção,

quando  $X$  for um valor baixo e quando  $X$  for um valor elevado. Se houver sérios afastamentos deste pressuposto, podem-se aplicar transformações de dados ou métodos dos mínimos quadrados ponderados.

A covariância entre quaisquer variáveis  $U_i, U_j$  é nula.

$$E[U_i, U_j] = 0 \text{ se } i \neq j; \quad (3.7)$$

A variável  $U_i$  tem variância igual a  $\sigma^2$  para todos os valores de  $X$ , isto é,

$$E[U_i, U_j] = \sigma^2 \text{ se } i=j \quad (3.8)$$

Isto significa que para cada valor de  $X$ ; ( $x_i$ ) tem-se uma variável aleatória  $U_i$ . Com esta hipótese admite-se que as variâncias das variáveis  $U_i$  são iguais a uma constante  $\sigma^2$ .

**3. Independência de Erros:** requer que o erro (a diferença residual entre valores observados e previstos de  $Y$ ) seja independente para cada valor de  $X$ . Esse pressuposto geralmente se refere a dados que são coletados ao longo de um período de tempo. Quando os dados são coletados dessa maneira, os resíduos para um determinado período de tempo são freqüentemente correlacionados como os do período de tempo anterior.

**4. Linearidade:** estabelece que a relação entre as variáveis deve ser linear. Duas variáveis poderiam ser relacionadas de uma maneira não linear, e o coeficiente de correlação linear poderia ser igual a zero, indicando não haver relação. Existem métodos para estudar estas relações não lineares.

**5.** A variável aleatória  $U_i$  tem **média de distribuição condicional** igual a zero, isto é,  $E[U_i] = 0$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ . Isto significa que para todo valor de  $Y$  (por exemplo, irradiação solar global), a média das diferenças entre o valor medido e o valor obtido pela equação de regressão (Eq. 3.2) deve ser zero. Se  $E[U_i] \neq 0$ , os coeficientes da equação de regressão ( $a$  e  $b$ ) são estimativas parciais. Este fato indica também que a linha de tendência do diagrama de dispersão não é linear.

A regressão linear pode ser simples ou múltipla. Se o modelo escolhido for linear simples, Equação 3.9, será necessária a estimação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ . Neste caso será designado por  $a$  e  $b$  os estimadores  $\alpha$  e  $\beta$ . A estimativa do modelo adotado, para um conjunto de  $n$  pares de valores, compondo as estimativas  $a$  e  $b$  terá a forma da Equação 3.10:

$$Y = \alpha + \beta X + U \quad (3.9)$$

$$\widehat{Y} = a + bX \quad (3.10)$$

O gráfico da equação de regressão linear simples estimada é uma linha reta chamada de *reta de regressão estimada*;  $a$  é a interseção da reta em  $Y$  ou coeficiente linear,  $b$  é a inclinação da reta ou coeficiente angular (acréscimo ou decréscimo em  $Y$  para acréscimo ou decréscimo de uma unidade em  $X$ ) e  $\widehat{Y}$  é o valor médio  $Y$  estimado (ou esperado) para um dado valor de  $X$ .

A reta de regressão verdadeira seria obtida se fossem conhecidos os valores de  $X$  e  $Y$  para todos os indivíduos da população. Nesse caso, seriam conhecidas a altura verdadeira da reta (coeficiente linear  $\alpha$ ) e a inclinação verdadeira da reta (o coeficiente de regressão  $\beta$ ).

Normalmente, o mais comum é estudar a regressão entre  $X$  e  $Y$  utilizando uma amostra da população de pontos. São calculados, então,  $a$  e  $b$ , que são as estimativas dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ .

Para a determinação das expressões dos estimadores utiliza-se o método dos mínimos quadrados. O método dos mínimos quadrados é um procedimento que utiliza dados de amostra para calcular uma equação de regressão estimada.

O método dos mínimos quadrados usa os dados da amostra para fornecer os valores de  $a$  e  $b$  que minimizam a *soma dos quadrados dos desvios* entre os valores observados da variável dependente  $Y_i$  e os valores estimados da variável dependente  $\widehat{Y}_i$ . O critério para o método dos mínimos quadrados é dado por (3.11).

$$\min \sum_{i=1}^n (Y_i - \widehat{Y}_i)^2 \quad (3.11)$$

onde

$Y_i$  = valor observado da variável dependente para a  $i$ -ésima observação

$\widehat{Y}_i$  = valor estimado da variável dependente para a  $i$ -ésima observação

O coeficiente  $b$  é calculado da seguinte maneira:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\overline{X}\overline{Y}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\overline{X}^2} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \sum_{i=1}^n Y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n}} \quad (3.12)$$

onde

$n$  é o número de pares amostrais.

O coeficiente linear  $a$  é obtido por

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (3.13)$$

onde  $\bar{Y}$  e  $\bar{X}$  são, respectivamente, a média dos valores da variável independente  $Y$  e a média dos valores da variável dependente  $X$ .

A dependência de  $Y$  em relação a  $X$  é representada pelo coeficiente  $b$ . No entanto, ele é quase sempre determinado com base em uma amostra de dados. Para afirmar que o valor  $b$  representa uma dependência real de  $Y$  em relação a  $X$  e justificar previsões para  $Y$  com base na equação obtida, deve-se realizar um teste de hipótese sobre a existência de regressão na população.

Quando não existe dependência de  $Y$  em relação a  $X$ , o coeficiente de regressão populacional,  $\beta$ , é igual a zero. No entanto, valores de  $b$  obtidos em amostras aleatórias dessa população devem variar, ao acaso, ao redor de zero. A distribuição de  $b$  em torno de zero será gaussiana se a distribuição de  $Y$  for normal. Para testar a hipótese de que  $\beta$  não é zero, determina-se o número crítico de erros padrão permitido para um afastamento não significativo entre  $b$  e  $\beta$  e calcula-se, a seguir, o afastamento observado ( $b - \beta$ ), em unidades de erros padrão ( $t_{calc}$ ). Se o valor calculado de  $t$  exceder o valor crítico, rejeita-se a hipótese de que  $b$  seja um desvio ao acaso de  $\beta = 0$  e conclui-se pela existência de regressão de  $Y$  em relação a  $X$ .

### 3.3. ANÁLISE DE RESÍDUOS

Existe um método gráfico chamado **análise de resíduos** para avaliar a adequação do modelo de regressão que foi ajustado aos dados. O método também permite estudar potenciais violações dos pressupostos do modelo de regressão.

Os valores de erros estimados ( $e_i$ ) ou **resíduos**, são definidos como a diferença entre os valores de ( $Y_i$ ) observados e os valores previstos ( $\hat{Y}_i$ ) da variável dependente para valores dados de  $X_i$ . Portanto, é aplicada a seguinte definição:

O resíduo é igual ao valor observado de  $Y$  menos o valor previsto de  $Y$ .

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad (3.14)$$

A adequação do modelo de regressão ajustado pode ser vista em um gráfico de dispersão de resíduos no eixo vertical e os valores correspondentes aos valores de  $\hat{Y}_i$  da variável dependente ou de  $X_i$  (variável independente) no eixo horizontal. Se o modelo ajustado for apropriado para os dados, *não haverá padrão aparente nesse gráfico de resíduos em relação a  $X_i$ .*

Além dos resíduos também pode-se calcular os resíduos padronizados e os resíduos de Student. Os **resíduos padronizados** representam cada resíduo dividido pelo seu erro padrão. Os **resíduos de Student** (3.15) são resíduos padronizados ajustados para a distância do valor  $X$  médio.

$$RS_i = \frac{e_i}{S_{YX} \sqrt{1-h_i}} \quad (3.15)$$

onde

$$h_i = \frac{1}{n} + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (3.16)$$

e  $S_{XY}$  é o erro padrão da estimativa (Equação 3.22).

Esses resíduos de Student permitem considerar a magnitude dos resíduos em unidades que refletem as variações padronizadas em torno da linha de regressão. Confecciona-se um gráfico dos resíduos de Student em relação à variável independente. Se não houver padrão aparente na distribuição dos pontos o modelo parece adequado aos dados.

Neste estudo das relações entre variáveis meteorológicas é possível prever, assim como observado na literatura, que mais de uma variável tem influência sobre a radiação solar. Para isso a análise de regressão múltipla torna-se relevante e é o estudo de como uma variável dependente  $Y$  é relacionada com duas ou mais variáveis explicativas ou independentes.

Portanto, se o modelo escolhido for de regressão linear múltipla, será necessária a estimação dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ . Neste caso será designado por  $a, b_1, b_2, \dots, b_k$  os estimadores  $\alpha$  e  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ . A estimativa do modelo adotado, para um conjunto de  $k$  conjuntos de valores, compondo as estimativas  $a, b_1, b_2, \dots, b_k$  terá a forma 3.22.

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + U_i \quad (3.17)$$

$$\hat{Y} = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k + U \quad (3.18)$$

Portanto a influência das variáveis independentes sobre a variável dependente segue a forma:

$$E[Y / X_1, X_2, \dots, X_k] = f(x) \quad (3.19)$$

“ $f(x)$  descreve a trajetória média das variações de  $Y$  para uma coleção de valores das variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , enquanto a variável aleatória  $U$  capta as variações decorrentes das medidas, bem como as influências de outras variáveis que foram omitidas no modelo” [FONSECA, et alli, 1985].

Os coeficientes de inclinação  $b_1, b_2, \dots, b_n$  devem ser vistos de seguinte maneira:

$b_1$  é a inclinação de  $\hat{Y}$  em relação à variável  $X_1$ , mantendo-se constante todas as outras variáveis independentes,

$b_2$  é a inclinação de  $\hat{Y}$  em relação à variável  $X_2$ , mantendo-se constante todas as outras variáveis independentes, e assim para todas as outras possíveis variáveis explicativas ou independentes.

### 3.4. ERROS ASSOCIADOS À ESTIMATIVA

O método dos mínimos quadrados é utilizado para desenvolver uma equação a fim de prever valores de  $Y$  a partir de valores de  $X$ . Embora o método dos mínimos quadrados resulte em uma linha que se ajusta aos dados com a quantidade mínima de variação, a equação de regressão não é um método perfeito de previsão, a menos que todos os pontos estejam sobre a linha de regressão. A linha de regressão serve somente como uma previsão aproximada de um valor de  $Y$  para um dado valor de  $X$ .

A performance de métodos de estimação é avaliada através de validação cruzada. Neste procedimento um conjunto de valores observados é comparado com outro conjunto de valores estimados a partir de variáveis explicativas do mesmo local e mesmo intervalo de tempo. Os resultados destas séries de valores observados e estimados podem ser utilizados para validar o método de estimação. Vários critérios podem ser utilizados para validar o método de estimação. Normalmente as equações mais utilizadas para avaliar a precisão de correlações são as formulações 3.23 e 3.24 e são chamados de métodos de comparação.

A seguir estão listados cinco critérios:

a) Erro Padrão da Estimativa

Para medir a variabilidade dos dados reais de  $Y$ , através dos valores previstos de  $Y$  utiliza-se o *erro padrão da estimativa*.

O somatório dos desvios dos valores reais em relação aos valores estimados é zero.

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i) = 0 \quad (3.20)$$

O *Erro Padrão da Estimativa*, dado pelo símbolo  $S_{YX}$ , é definido como:

$$S_{YX} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - 2}} \quad (3.21)$$

onde

$Y_i$  = valor real de  $Y$  para um dado  $X_i$

$\hat{Y}_i$  = valor previsto de  $Y$  para um dado  $X_i$

$n$  = número de pares de observação ( $n > 2$ )

$i$  = índice para o número de dados

O erro padrão da estimativa pode ser obtido pela aplicação da seguinte fórmula:

$$S_{YX} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2 - a \sum_{i=1}^n Y_i - b \sum_{i=1}^n X_i Y_i}{n - 2}} \quad (3.22)$$

b) Erro de Desvio Médio – MBE – “MEAN BIAS ERROR”.

“É uma medida que devido ao fato de que o sinal é mantido, fornece informação sobre a tendência do modelo para, ou subestimar ou superestimar valores”. [Powell, 1983]

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)}{n} \quad (3.23)$$

“Um valor baixo de MBE é desejado. Um valor positivo de MBE indica uma sobre estimação em relação ao valor medido e vice-versa. Uma desvantagem deste teste é que uma sobre estimação de uma medida individual irá cancelar uma sub estimação”. [Ma e Iqbal, 1983]

c) Erro Quadrático Médio –  $RMSE$  – “ROOT MEAN SQUARE ERROR”.

“Descreve o desvio médio absoluto entre um modelo individual e os valores observados.” [Powell, G. L., 1983]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (3.24)$$

“Geralmente quanto menor o valor de  $RMSE$ , mais preciso é o modelo. Contudo, o menor erro acrescido na soma pode produzir um significativo incremento em  $RMSE$ .” [Ma e Iqbal, 1983]

d) Desvio Relativo Médio -  $\bar{\epsilon}_{Rel}$

$$\bar{\epsilon}_{Rel} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|}{n} \quad (3.25)$$

### 3.5. VALIDAÇÃO DO MODELO AJUSTADO

Inicialmente, o processo da validação consiste em aplicar os modelos de regressão desenvolvidos aos dados das variáveis correlacionadas. Numa fase posterior, as equações de cálculo de erros, como  $MBE$ ,  $RMSE$  e  $\bar{\epsilon}_{Rel}$  são aplicadas aos valores estimados  $\hat{Y}_i$  pelos modelos de regressão e aos valores medidos da variável  $Y_i$  em questão. Os valores obtidos da aplicação das equações de erro para cada modelo são comparados. O modelo com menor erro é considerado melhor.

### 3.6. AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO AJUSTADO – ANÁLISE DE RESÍDUOS PARA REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Uma forma de validar um modelo ajustado é analisando os gráficos de resíduos em função de valores de  $X_i$ . Portanto, *análise de resíduos*, é um método gráfico que permite avaliar a adequação do modelo de regressão que foi ajustado aos dados. Também permite estudar potenciais violações dos pressupostos do modelo de regressão.

Os *resíduos*,  $e_i$ , ou erros estimados, Equação 3.18, são definidos como a diferença entre os valores de  $(Y_i)$  observados e os valores previstos  $(\hat{Y}_i)$  da variável dependente para valores dados da variável independente  $X_i$ .

A adequação do modelo ajustado aos dados é observado quando a distribuição dos pontos no gráfico  $e_i$  em função  $X_i$  não mostrar um padrão aparente. Tal distribuição é observada na Figura 3.2, como exemplo. Os dados representados são reais e pertencem a uma análise de regressão para dados de insolação e radiação solar na superfície terrestre e radiação extraterrestre e horas de sol astronômicas para o Leste dos EUA para o mês de Julho entre os anos de 1961 e 1990. No entanto, neste capítulo eles têm apenas efeito ilustrativo.

Segundo Levine, 1998, ao se representar graficamente os resíduos, remove-se a tendência linear de  $X$  com  $Y$ , expondo, desse modo, a falta ou não de ajuste no modelo linear simples.

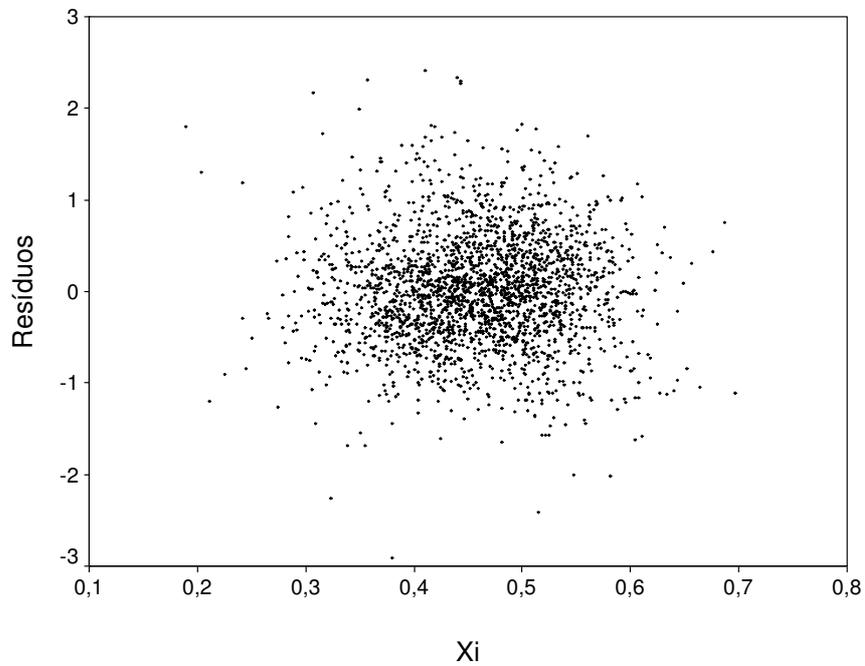
Além dos *resíduos* pode-se calcular os *resíduos padronizados*, Equação 3.26, e os *resíduos de Student*. Os *resíduos padronizados* representam cada resíduo dividido pelo seu erro padrão. Os *resíduos de Student* são resíduos padronizados ajustados para a distância do valor de  $X$  médio.

$$e_p = \frac{e_i}{S_{XY}} \quad (3.26)$$

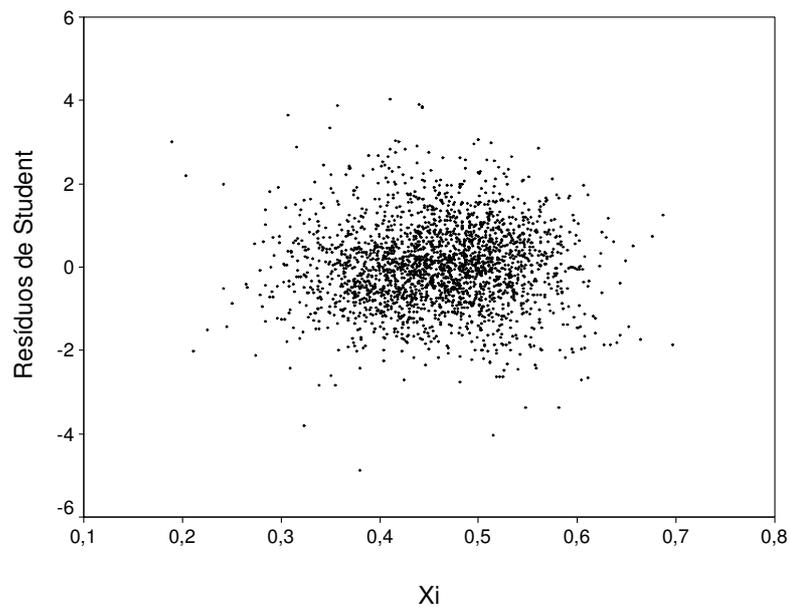
A Figura 3.3 exemplifica uma distribuição de *resíduos de Student* em função de  $X_i$ . Os dados representados são reais e pertencem a análise de regressão para dados de insolação e radiação solar na superfície terrestre e radiação extraterrestre e horas de sol astronômicas para o Leste dos EUA para o mês de Julho entre os anos de 1961 e 1990. No entanto, neste capítulo eles têm apenas efeito ilustrativo.

Outra função dos resíduos de Student é avaliar o pressuposto da homocedasticidade,

ou seja, de que exista uma igual variância para cada nível de  $X$ . A Figura 3.4 ilustra hipoteticamente uma violação da homocedasticidade, o que inviabiliza o uso da regressão linear como modelo de estimação.

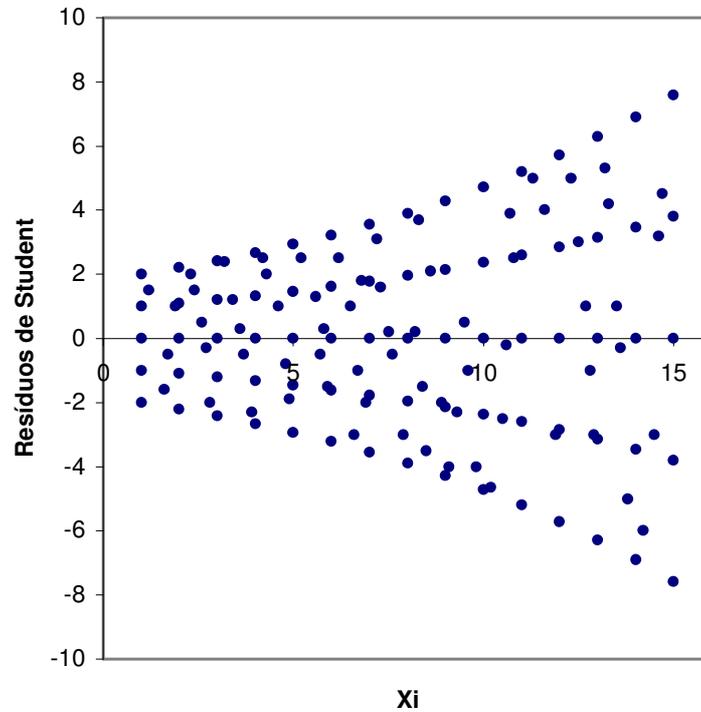


**Figura 3.2** Distribuição de *resíduos versus*  $X_i$ . A nuvem de pontos não mostra um padrão aparente na relação entre resíduos e valores de  $X_i$

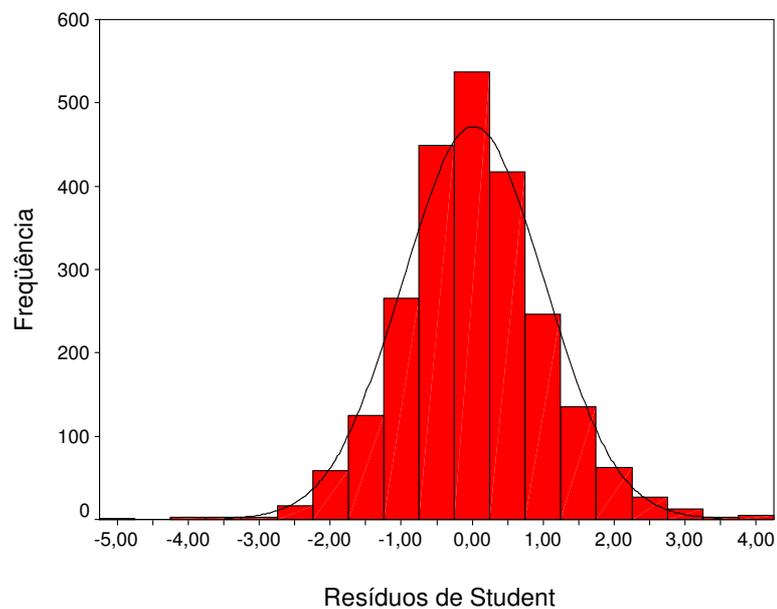


**Figura 3.3** Distribuição de *resíduos de Student versus*  $X_i$ . A nuvem de pontos não mostra um padrão aparente na relação entre *resíduos de Student* e valores de  $X_i$

O pressuposto da normalidade da regressão pode também ser avaliado posicionando-se os resíduos de Student em uma distribuição de frequência e exibindo-se os resultados em um diagrama. A Figura 3.5 mostra um histograma da distribuição de frequências dos resíduos de Student. A exemplo da Figura 3.2 os dados são reais e no momento apenas explicativos.

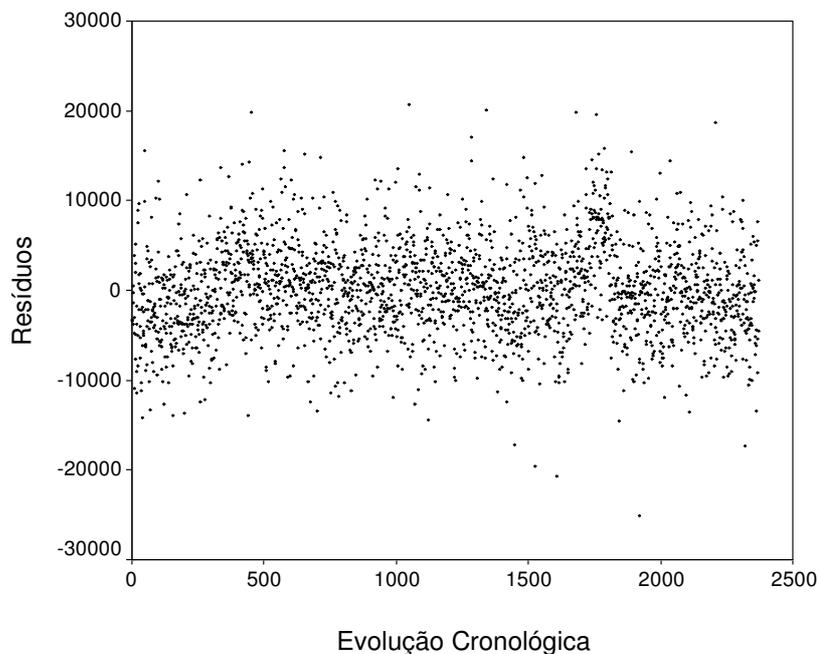


**Figura 3.4** A distribuição dos *resíduos de Student* em função de  $X_i$  demonstram um *efeito de dispersão* que viola a homoscedasticidade.



**Figura 3.5** Distribuição aproximadamente normal dos *resíduos de Student*.

O pressuposto da *Independência dos Erros* pode ser observado em um gráfico de dispersão dos *resíduos ou resíduos padronizados em ordem cronológica*. Se for observada qualquer tendência na distribuição dos pontos o pressuposto foi violado. A Figura 3.6 mostra um gráfico de dispersão onde o pressuposto não foi violado. A exemplo da Figura 3.2 os dados são reais e no momento apenas ilustrativos.



**Figura 3.6** Distribuição de resíduos ao longo do tempo indicando a Independência de Erros.

### 3.7. AVALIAÇÃO DA ADEQUAÇÃO DO MODELO AJUSTADO – ANÁLISE DE RESÍDUOS PARA REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A análise gráfica apresentada em Análise de Resíduos para Regressão Linear Simples tem a mesma aplicação na Regressão Linear múltipla. Os gráficos de resíduos a seguir são importantes quando se analisa um modelo de regressão linear múltipla com duas ou mais variáveis explicativas:

1. Resíduos em relação a  $\hat{Y}_i$ .
2. Resíduos em relação a  $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}$ .
3. Resíduos em relação ao tempo.

A análise da distribuição dos resíduos segue a mesma determinação vista no Item 3.5 e tem clara importância na validação do modelo linear adotado, ou seja, qualquer padrão

aparente na distribuição dos pontos indica violação de um dos pressupostos e novos estudos devem ser realizados.

### 3.8. REPRESENTATIVIDADE TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Para se estabelecer a representatividade temporal dos dados de radiação solar foram analisados os dados de radiação solar global médio mensal provenientes da base de dados da FEPAGRO. Este estudo baseia-se no teorema central do limite onde o índice de confiança ( $z$ ) da média de uma série de  $n$  valores medidos com uma dada incerteza absoluta  $\varepsilon$ , pode ser calculado como

$$n = \left( \frac{z \cdot \sigma}{\varepsilon} \right)^2 \quad (3.7)$$

onde

$z$  = nível de confiança, equivalendo a 1,56 para 90%.

$\varepsilon$  = erro (incerteza) admitido em unidades de energia, MJ/m<sup>2</sup>.

$\sigma$  = desvio padrão dos dados admitido em unidades de energia, MJ/m<sup>2</sup>.

$n$  = número de médias mensais.

No Rio Grande do Sul foram utilizados actinógrafos bimetálicos Fuess para a medida da radiação solar. São conhecidos por apresentarem incertezas associadas às medidas instantâneas que podem chegar a 20 %. A incerteza da totalização da radiação solar diária fica associada a inúmeros fatores tais como: o próprio equipamento, tabulação de dados, metodologia de coleta, último algarismo significativo, experiência do operador, condições de medida adversas, entre outros. Por outro lado para calcular a média mensal são utilizados pelo menos 28 dados diários, sendo que a incerteza no resultado diminui. Estima-se, assim, que a incerteza associada às médias mensais fica estabelecida em cerca de 7,5%. Considerou-se também razoável admitir um nível de confiança de 90%, representando que 90% dos dados estarão na faixa de valores compreendidos dentro de (mais ou menos) 7,5% centrados no valor médio.

### 3.9. SÉRIES TEMPORAIS

Desde o início deste capítulo fez-se uma revisão sobre correlação e regressão entre variáveis. Nesta seção será feita uma breve discussão sobre um grupo importante de séries esta-

tísticas que são as séries temporais.

As séries temporais são conjuntos de dados coletados em intervalos regulares de tempo. São séries ordenadas cronologicamente. As séries temporais são caracterizadas por apresentar o tempo como variável de controle. A variável explicativa ou independente é sempre o tempo. Basicamente, o estudo das séries temporais tem por objetivo a descrição do comportamento dessa variável no tempo. Faz sentido posteriormente procurar explicações para o comportamento da série, em vista dos resultados obtidos. Entretanto, essas explicações não são obtidas com base na variável de controle, o tempo.

No estudo da radiação solar os dados registrados por aparelhos de medição geram séries temporais. As séries temporais podem apresentar *tendência* que é representada por uma reta ou curva suave em torno da qual os valores da série se distribuem. Quando os dados de uma série temporal apresentam variações que se repetem em intervalo de tempo de um ano diz-se que apresentam variações *sazonais* ou *estacionais*. É o caso das medidas utilizadas no estudo da radiação solar. As séries temporais apresentam ainda os *movimentos* ou *variações cíclicas* que são movimentos que se completam em um período de tempo maior que um ano. Existem ainda as *variações irregulares* ou *aleatórias* que ocorrem quando as mudanças nos valores dos dados não apresentam um padrão observável.

O estudo de uma série temporal tem por objetivo a descrição do comportamento dos valores da série. Normalmente utiliza-se um método analítico que procura decompor a série temporal em seus elementos:

- a) tendência
- b) variações sazonais ou estacionais
- c) variações cíclicas
- d) variações irregulares ou aleatórias.

Essa decomposição auxilia a visualização dos movimentos da série e facilita o entendimento sobre seu comportamento futuro. No entanto, no âmbito desta dissertação são sempre necessários os estudos da inter-relação de duas ou mais séries temporais, ou seja, a correlação entre séries, e não entre valores dentro de uma mesma série.

Nesta dissertação não serão aprofundadas as pesquisas em termos de tratamento das séries de radiação solar como séries temporais.

### **3.9.1. Coeficiente de Autocorrelação**

Como comentado anteriormente, dados coletados em seqüências de tempo podem

apresentar autocorrelação, o que viola o pressuposto da *Independência dos Erros*. Nesta seção serão descritas brevemente algumas informações que resultarão especificamente numa análise gráfica da chamada função de autocorrelação que permitirá comparações qualitativas entre séries temporais.

O uso do tempo  $t$  de observações disponíveis a partir de uma série temporal para previsão de algum valor futuro  $t + 1$  pode fornecer a base para (a) planejamento econômico e empresarial, (b) planejamento de produção, (c) controle de inventário e produção, (d) controle e otimização de processos industriais, (e) previsão de valor futuro para uma variável física, como a radiação solar.

Para o uso na previsão, as séries temporais são supostamente observações discretas, e adquiridas em intervalo de tempo iguais.

Segundo Box e Jenkins, 1976, uma série temporal é um conjunto de observações geradas sequencialmente no tempo. Se o conjunto é contínuo, a série temporal é chamada de *contínua*. Se o conjunto é discreto, a série temporal é dita *discreta*. Assim, as observações de uma série temporal discreta, feitas nos tempos  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n$  podem ser descritos como  $z(\tau_1), z(\tau_2), \dots, z(\tau_i), \dots, z(\tau_n)$ . Nesta dissertação serão consideradas apenas as séries temporais discretas onde observações são feitas em algum intervalo fixo  $h$ . Quando se tem  $n$  sucessivos valores de séries disponíveis para análise, escreve-se  $z_1, z_2, \dots, z_t, \dots, z_n$  para denotar observações feitas em intervalos de tempo iguais a  $\tau_0 + h, \tau_0 + 2h, \dots, \tau_0 + th, \dots, \tau_0 + nh$ . Ao se adotar  $\tau_0$  como origem e  $h$  como unidade de tempo, pode-se considerar  $z_t$  como a observação *no tempo*  $t$ .

As séries temporais podem ser classificadas em *determinísticas* e *estatísticas*. Se o valor futuro de uma série temporal for determinado exatamente através de uma função matemática então a série é chamada determinística. Se o valor futuro pode ser descrito somente em termos de distribuição de probabilidade, a série temporal é conhecida como *não determinística* ou simplesmente *série temporal estatística*.

Um fenômeno estatístico que evolui no tempo de acordo com leis probabilísticas é chamado de *processo estocástico*.

Um processo estocástico é considerado estacionário quando suas propriedades não são afetadas por uma mudança na origem de tempo.

Este processo tem uma média constante igual a

$$\mu = E[z_t] = \int_{-\infty}^{\infty} zp(z)dz \quad (3.28)$$

onde  $E[z_t]$  é a média,  $p(z)$  é a função de distribuição de probabilidade e  $z$  valor de uma variável.

A variância é dada por

$$\sigma_z^2 = E[(z_t - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (z - \mu)^2 p(z) dz \quad (3.29)$$

A média  $\mu$  de um processo estocástico pode ser estimada pela média,  $\bar{z}$ , da série temporal

$$\bar{z} = \frac{\sum_{t=1}^n z_t}{n} \quad (3.30)$$

e a variância  $\sigma_z^2$  do processo estocástico, pode ser estimado pela variância da série temporal:

$$\hat{\sigma}_z^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (z_t - \bar{z})^2}{n} \quad (3.31)$$

A suposição da estacionaridade do processo estocástico implica que o conjunto de distribuição de probabilidade  $p(z_t, z_{t+k})$  é o mesmo para todo tempo  $t_1, t_2$ . Pode-se observar a natureza deste conjunto de distribuição confeccionando-se um diagrama de dispersão usando-se pares de valores  $(z_t, z_{t+k})$ , de uma série temporal, separada por um intervalo de tempo, defasagem ou *lag*  $k$  constante. O termo *lag* é muito utilizado pelos estatísticos e significa, portanto, um intervalo constante de tempo ou defasagem.

A covariância entre os valores  $z_t$  e  $z_{t+l}$ , separado por  $k$  intervalos de tempo, é chamado de *autocovariância*,  $\gamma_k$ , a um *lag*  $k$  e é definido como

$$\gamma_k = \text{cov}[z_t, z_{t+l}] = E[(z_t - \mu)(z_{t+l} - \mu)] \quad (3.32)$$

Da mesma forma a *autocorrelação*,  $\rho_k$ , a um *lag*  $k$  é

$$\rho_k = \frac{E[(z_t - \mu)(z_{t+l} - \mu)]}{\sqrt{E[(z_t - \mu)^2]E[(z_{t+l} - \mu)^2]}} = \frac{E[(z_t - \mu)(z_{t+l} - \mu)]}{\sigma_z^2} \quad (3.33)$$

assim, para um processo estacionário, a variância  $\sigma_z^2 = \gamma_0$  é o mesmo, tanto no tempo  $t + k$  quanto no tempo  $t$ .

Então, a autocorrelação no *lag*  $k$  é

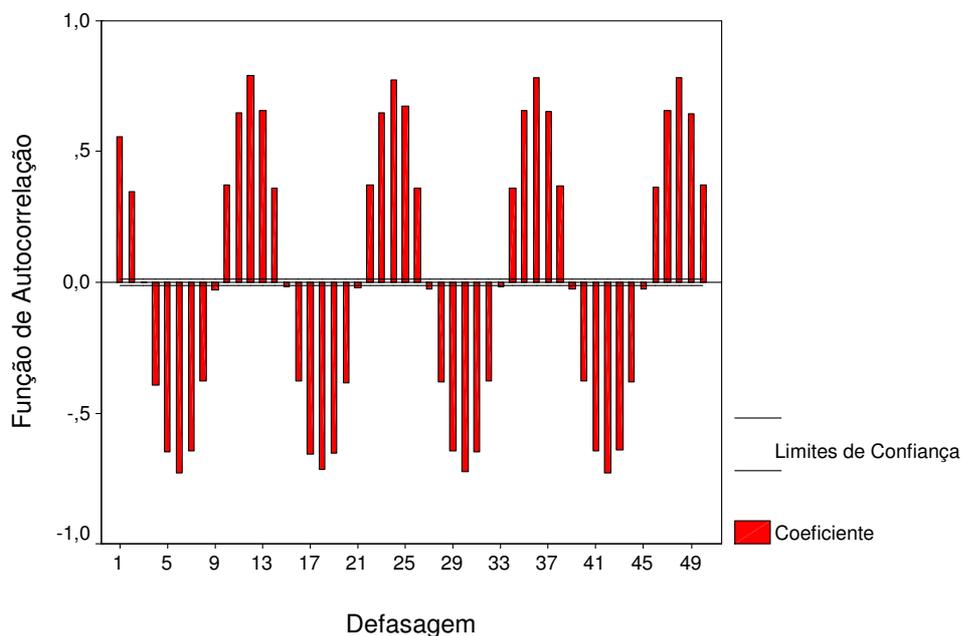
$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\gamma_0} \quad (3.34)$$

o que implica em  $\rho_0 = 1$ .

O gráfico dos coeficientes de autocorrelação  $\rho_k$ , como função do *lag*  $k$  é chamado *função de autocorrelação*  $\{\rho_k\}$  do processo.

Como exemplo de uma função de autocorrelação a Figura 3.7 foi obtida dos dados de radiação solar média mensal para o Leste dos EUA.

Nesta dissertação não haverá um aprofundamento na questão das funções de autocorrelação. O objetivo desta breve descrição é o de mostrar que quanto menores os valores dos coeficientes de autocorrelação, menor é o risco de se comprometer o pressuposto da *independência dos erros*. Por outro lado, se a função de autocorrelação mostrar um gráfico cujos coeficientes se comportam como na Figura 3.7, pode-se supor a existência da sazonalidade, o que compromete o uso do modelo dos mínimos quadrados.



**Figura 3.7** Função de autocorrelação para as 50 primeiras *defasagens*, para dados de radiação solar média mensal do Leste dos EUA.

#### 4. CORRELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS

Como já discutido anteriormente, as variáveis climatológicas podem se correlacionar, apresentando uma relação entre si. Inúmeros estudos realizados por diversos pesquisadores em diversos países têm mostrado as relações entre  $K_T$  e variáveis meteorológicas como a insolação, nebulosidade, umidade relativa do ar, latitude, altitude, albedo e vegetação. Várias combinações destas variáveis foram estudadas e correlações entre as mesmas foram desenvolvidas.

O trabalho pioneiro nesta área deve-se a Ångström, em 1924, que utilizando a Equação 1.1 encontrou os coeficientes  $a' = 0,25$  e  $b' = 0,75$  para Estocolmo a partir de médias mensais.

Em 1940, modificando a Equação de Ångström, Prescott determinou empiricamente o coeficiente  $a$  como 0,22 e  $b$  como 0,54.

Em 1963, Hounam *et al.* citado por Hutchinson, M. F. *et al.* utilizaram a Equação 1.2 sobre 458 valores mensais de 6 estações Australianas com intervalo de dados entre 3 e 6 anos e obtiveram os seguintes coeficientes:  $a = 0,26$  e  $b = 0,50$ .

Em 1965, Bennett, I. ao traçar os mapas mensais de radiação solar diária média mensal para os Estados Unidos utilizou correlações entre  $\bar{K}_T$  e fração de insolação,  $\bar{K}_T$  com fração de insolação e albedo de neve,  $\bar{K}_T$  com fração de insolação e cobertura de nuvens,  $\bar{K}_T$  com fração de insolação juntamente com altitude e cosseno da latitude.

Em 1966, Löff *et al.*, desenvolveram conjuntos de constantes para diversos locais do mundo levando em consideração o clima e a vegetação local. A Tabela 4.1, adaptada de Duffie e Beckman, 1991, mostra estas constantes e os percentuais de horas de brilho de Sol médios desconsiderando o clima e a vegetação presentes na Tabela original.

Pode-se observar na Tabela 4.1 a grande variabilidade dos coeficientes  $a$  e  $b$ . A Tabela corrobora para a afirmação de que cada região apresenta condições naturais diferentes que influenciam no fluxo de energia solar que tinge a superfície terrestre.

Riedveld *et al.* 1978 citado por Ma e Iqbal, 1984, analisaram inúmeros valores de  $a$  e  $b$  de várias regiões do mundo e chegaram a coeficientes para serem utilizados no mundo todo. O coeficiente  $a$  é 0,18 e o  $b$  é 0,62. Estes coeficientes somente poderão ser utilizados para médias de longo prazo.

Diversas pesquisas foram realizadas no Brasil e no Rio Grande do Sul a partir de dados disponíveis vindo a corroborar com a linha de pensadores que utilizam equações empíricas para estimar os valores da radiação solar para locais onde as medidas são inexistentes.

**Tabela 4.1** Constantes climáticas para uso na Equação 1.2.

Adaptado de Duffie e Beckman, 1991.

<b>Local</b>	<b>Insolação (%)</b>	<b><i>a</i></b>	<b><i>b</i></b>
Albuquerque, NM	78	0,41	0,38
Atlanta, GA	59	0,38	0,26
Blue Hill, MA	52	0,22	0,50
Brownsville, TX	62	0,35	0,31
Buenos Aires, Arg.	59	0,26	0,50
Charleston, SC	67	0,48	0,09
Darien, Manchuria	67	0,36	0,23
El Paso, TX	84	0,54	0,20
Ely, NV	77	0,54	0,18
Hamburg, Germany	36	0,22	0,57
Honolulu, HI	65	0,14	0,73
Madison, WI	58	0,30	0,34
Malange, Angola	58	0,34	0,34
Miami, FL	65	0,42	0,22
Nice, France	61	0,17	0,63
Poona, India (Monções)	37	0,30	0,51
Poona, Índia (seca)	81	0,41	0,34
Kisangani, Zaire	48	0,28	0,39
Tamanrasset, Algeria	83	0,30	0,43

Ribeiro, 1980 citado por Assis, *et al.*, 1998, publicou uma Tabela de valores de coeficientes *a* e *b* baseados na Equação 1.2 para 32 localidades do Brasil, sendo 9 pertencentes ao Estado do Rio Grande do Sul. A Tabela 4.2 mostra os valores relativos as estações de coleta de dados brasileiras com exceção das gaúchas. Não determina o período de observação.

Laperuta e Lunardi, 1998, publicaram trabalho com resultados de estimativas de radiação solar para o município de Botucatu, SP. O trabalho foi baseado em dados de radiação solar obtidos por um piranógrafo OTA, modelo 44 e dados de insolação obtidos por um heliógrafo marca Wilh Lambrecht KG Gottingem tipo 1603 para um período de 11 anos. Coordenadas geográficas: latitude: 22°51' S; longitude: 48°26' W e altitude 786 metros. Utilizaram a Equação 1.2 como modelo de regressão. O trabalho demonstrou, conforme Tabela 4.3, que  $K_T$  se correlaciona muito bem com a fração de insolação. O trabalho gerou coeficientes

de regressão linear simples,  $a$  e  $b$ , mensais e horários. Neste trabalho serão apenas apresentados os valores mensais na Tabela 4.3. Os coeficientes horários foram calculados sobre médias mensais para cada hora do dia.

Para o Rio Grande do Sul, Berlato, 1971, correlacionando dados de 17 estações, no período de 1955-1965, pertencentes ao Serviço de Ecologia Agrícola da Secretaria de Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, encontrou valores de  $a$  e  $b$  iguais a 0,23 e 0,46, respectivamente.

**Tabela 4.2** Coeficientes de correlação determinados por Ribeiro, 1980, a partir da Equação de Ångström-PreScott para 23 localidades do Brasil. Adaptada de Assis *et al.* 1998.

Localidade	Latitude (°)	$a$	$b$	$a + b$
Fortaleza, CE	3,72	0,239	0,460	0,70
Barra do Corda, MA	5,50	0,294	0,313	0,61
Brejo da Cruz, PB	6,35	0,300	0,417	0,72
Araruna	6,50	0,296	0,409	0,71
Pombal, PB	6,77	0,286	0,424	0,71
Cajazeiras, PB	6,88	0,291	0,445	0,74
Patos, PB	7,03	0,293	0,430	0,72
João Pessoa, PB	7,12	0,267	0,385	0,65
Teixeira, PB	7,22	0,303	0,414	0,72
Mogéiro, PB	7,30	0,315	0,355	0,67
Monteiro, PB	7,88	0,302	0,419	0,72
Princesa Isabel, PB	8,28	0,282	0,465	0,75
Salvador, BA	13,02	0,239	0,455	0,69
Montes Claros, MG	16,72	0,263	0,387	0,65
Linhares, ES	19,40	0,241	0,233	0,47
Sete Lagoas, MG	19,47	0,244	0,220	0,46
Beo Horizonte, MG	19,93	0,238	0,368	0,61
Viçosa, MG	20,75	0,195	0,275	0,47
Lavras, MG	21,23	0,222	0,277	0,50
Guairá, PR	24,08	0,159	0,337	0,50
Curitiba, PR	25,43	0,173	0,335	0,51
Irati, RS	25,57	0,151	0,358	0,51
Foz do Iguaçu, PR	25,53	0,160	0,333	0,49

**Tabela 4.3** Valores mensais dos coeficientes de  $a$  e  $b$ , coeficientes de determinação  $r^2$ , para os meses de janeiro a dezembro. Botucatu – SP. Adaptado de Laperuta e Lunardi, 1998.

Mês	n	$r^2$	a	b
Janeiro	341	0,82	0,21	0,43
Fevereiro	311	0,84	0,24	0,42
Março	341	0,79	0,24	0,42
Abril	330	0,79	0,24	0,43
Maio	341	0,88	0,22	0,49
Junho	330	0,87	0,24	0,49
Julho	341	0,86	0,22	0,50
Agosto	341	0,84	0,22	0,48
Setembro	330	0,88	0,18	0,52
Outubro	341	0,82	0,21	0,46
Novembro	330	0,86	0,22	0,45
Dezembro	341	0,83	0,22	0,41

Fontana e Oliveira, 1996, publicaram um trabalho sobre a relação entre radiação solar global e insolação para o estado do Rio Grande do Sul utilizando estações da FEPAGRO obtendo os resultados expressos nas Tabelas 4.4 e 4.5.

**Tabela 4.4** Coordenadas geográficas e coeficientes da Equação de Ångström ( $a$  e  $b$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, média anual, a partir da insolação, coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o número de observações (n) para algumas localidades do Estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90. Adaptada de Fontana e Oliveira, 1996.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	a	b	$r^2$	n
Alegrete	29°46'59"	55°46'59"	96	0,19	0,49	0,57	202
Cachoeirinha	29°57'36"	51°04'22"	4	0,20	0,56	0,67	393
Cruz Alta	28°38'21"	53°36'34"	473	0,20	0,53	0,64	349
Encruzilhada do Sul	30°32'35"	52°31'20"	420	0,15	0,47	0,68	316
Erechim	27°37'46"	52°16'33"	760	0,19	0,47	0,43	351
Farroupilha	29°14'30"	51°26'20"	702	0,17	0,60	0,53	338
Eldorado do Sul	30°04'25"	51°43'42"	46	0,15	0,47	0,68	316
Ijuí	28°23'17"	53°54'50"	448	0,25	0,46	0,50	271
Julio de Castilhos	29°13'26"	53°40'45"	514	0,17	0,62	0,77	393

Continuação da Tabela 4.4.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	a	b	r <sup>2</sup>	n
Osório	29°40'49"	50°13'56"	32	0,17	0,50	0,45	387
Quarai	30°23'17"	56°26'53"	100	0,25	0,38	0,59	335
Rio Grande	32°01'44"	52°15'37"	15	0,27	0,32	0,52	306
Santa Rosa	27°51'50"	54°25'59"	360	0,15	0,55	0,69	360
Santo Augusto	27°51'24"	54°46'59"	380	0,17	0,53	0,65	216
Soledade	29°03'14"	52°26'00"	380	0,23	0,41	0,64	349
São Gabriel	30°27'27"	54°19'01"	109	0,23	0,45	0,71	337
Uruguaiana	29°49'25"	57°12'05"	74	0,24	0,41	0,50	220
Vacaria	29°30'09"	50°56'12"	955	0,25	0,46	0,51	271
Veranópolis	28°56'14"	51°33'11"	705	0,21	0,40	0,46	316

**Tabela 4.5** Coeficientes da Equação de Ångström ( $a$  e  $b$ ) para estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, média mensal, a partir da insolação; coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e o número de observações ( $n$ ) médio para o Estado do Rio Grande do Sul, período 1980-90.

Adaptada de Fontana e Oliveira, 1996.

Coef.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
$a$	0,27	0,21	0,24	0,23	0,26	0,22	0,18	0,19	0,19	0,21	0,25	0,37	0,21
$b$	0,42	0,44	0,44	0,40	0,38	0,41	0,51	0,49	0,48	0,49	0,41	0,30	0,47
$r^2$	0,42	0,48	0,40	0,53	0,41	0,50	0,64	0,60	0,60	0,51	0,51	0,23	0,52
$n$	551	555	534	490	530	554	542	556	557	549	557	548	6523

Se for feita uma média dos valores de  $a$  e  $b$  contidos na Tabela 4.4 os valores obtidos serão, respectivamente, 0,20 e 0,48. Valores muito próximos aos coeficientes encontrados por Berlato.

No mesmo trabalho, Fontana e Oliveira, 1996, calcularam ainda coeficientes para regiões ecoclimáticas do Estado do Rio Grande do Sul observando que os valores de  $b$  foram mais elevados nos meses de inverno do que nos meses de verão. Concluíram que é possível estimar a densidade de fluxo de radiação solar global, a nível decendial, a partir dos dados de insolação em locais onde os mesmos encontrem-se disponíveis.

De acordo com a Tabela 3.1, a Tabela 4.5 mostra que a correlação é classificada como *regular* para todos os meses excetuando-se Agosto e Setembro onde as correlações podem ser classificadas como *fortes*. Na Tabela 4.4 observa-se que 55% das estações têm correlação regular e 45% têm correlação *forte*.

Ribeiro, 1980 citado por Assis, *et al.*, 1998, publicou uma Tabela de valores de coeficientes  $a$  e  $b$  baseados na Equação 1.2 para 32 localidades do Brasil, sendo 9 pertencentes ao Estado do Rio Grande do Sul. A Tabela 4.6 mostra os valores relativos as estações de coleta de dados gaúchas. Não determina o período de observação.

**Tabela 4.6** Coeficientes de correlação determinados por Ribeiro, 1980 a partir da Equação de Ångström-Prescott para nove localidades do Estado do Rio Grande do Sul.

Adaptada de Assis *et al.*, 1998.

Localidade	Latitude (°)	Altitude (m)	$a$	$b$	$a + b$
São Borja	28,65	99	0,211	0,478	0,69
Veranópolis	28,93	705	0,257	0,541	0,80
Júlio de Castilhos	29,22	514	0,186	0,424	0,61
Osório Maquine	29,67	32	0,195	0,576	0,77
Uruguaiana	29,75	74	0,246	0,385	0,63
Encruzilhada do Sul	30,55	420	0,225	0,568	0,79
Bajé	31,33	214	0,212	0,503	0,71
Pelotas	31,87	11	0,190	0,500	0,69
Domingos Petrolini	32,02	-	0,218	0,632	0,85

Pelos trabalhos pesquisados e valores apresentados, observa-se que existe uma correlação principalmente entre  $K_T$  e fração de insolação, mas também a nebulosidade, altitude, latitude, albedo são correlacionados com os valores de  $K_T$ .

O que se observa é que normalmente os pesquisadores, principalmente os primeiros, calculavam as correlações obtendo coeficientes, para as equações de regressão, únicos para todo o ano. Em trabalhos mais recentes como os de Laperuta & Lunardi, 1998, e Fontana & Oliveira, 1996, foram desenvolvidos coeficientes mensais além dos anuais.

Para terminar este capítulo é importante que se ressalte que existem inúmeros trabalhos com relação a busca de correlações entre radiação solar e variáveis climatológicas. Entre os pesquisadores que trabalharam neste assunto e não citados acima encontram-se: Becker, C. F. e Boyd, J. S. 1957; Löf, J. A., Duffie, J. A., e Smith, C. O., 1966; Sabbagh, J. A., *et al.*, 1977; Hay, J. E., 1979; Iqbal, M., 1979b; Silveira, J. 1979; Hernandez, E. e Durazo, G., 1979; Kasten, F. E Czeplak, G., 1980; Neuwirth, F., 1980; Iqbal, M., 1980; Flocas, A. A., 1980; Barbaro, S. *et al.* 1981; Ahmad, I. *et. al.* 1983; Khogali, A. 1983; Khogali, A. *et. al.* 1983; Bamiro, O. A. 1983; Powell, G. L., 1984; Rao, C. R. N., *et al.*, 1985; Hinrichsen, K., 1994; Vernich, L. e Ferruccio, Z. 1996; Şahin A. e Şen Z., 1998; Suehrcke, H., 2000; Power, Helen C., 2001.

## 5.0. MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR

Muito se discute sobre a importância da utilização da energia solar como uma fonte alternativa de energia para os mais variados fins nas atividades humanas. De fato, é indiscutível a importância da energia solar, no entanto, é preciso determinar sua disponibilidade em termos estatísticos. Como já discutido em capítulos anteriores a estatística faz sua parte analisando os dados disponíveis de variáveis relacionadas com a energia solar e determinando equações que permitam estimá-la em locais onde dados medidos são inexistentes. Como última etapa no processo de disponibilidade destes dados para pessoas interessadas e que normalmente são leigas em termos de tratamento de dados, estão os mapas. Mapas são apresentações em papel ou mídia digital, esquemas que podem ser linhas ou cores, sobre a representação gráfica de um país, estado ou região, representando os valores da variável desejada. No caso da radiação solar, poderá estar disponível em valores médios: diária, mensal, anual ou ambas.

Para que estes mapas sejam traçados são necessárias técnicas matemáticas e/ou estatísticas. A literatura explicita várias técnicas que serão a seguir descritas.

### 5.1. MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO PARA MODELAGEM DE SUPERFÍCIES

A variabilidade espacial de variáveis regionalizadas é muito comum em ciências físicas. As medidas de variáveis envolvidas no estudo da energia solar sofrem influência local de variáveis como clima, relevo, vegetação e latitude, entre outras. Como não é possível ter medidas das variáveis em cada local que possa apresentar uma diferença significativa nos valores, é necessário recorrer a métodos matemáticos de interpolação. Isto significa que, a partir de alguns pontos, com valores medidos, sobre um território, é possível interpolar e preencher todo o espaço restante com dados estimados.

Várias dificuldades podem ser visualizadas quando se pretende realizar interpolações espaciais como o comportamento aleatório regionalizado da radiação solar e a irregularidade do relevo. Ficam as questões: Como transferir a influência de cada estação de medida vizinha para um ponto em questão, e como combinar estes efeitos para criar uma estimativa regional real da radiação solar.

Matheron, 1971, citado por Şen, *et al.*, 2001a, baseou-se no estudo empírico de Krige, 1951, para desenvolver a teoria das variáveis regionalizadas. Essa teoria, conhecida como

geoestatística tem sido utilizada para quantificar a variabilidade espacial dos parâmetros. A idéia básica da geoestatística é que para muitos fenômenos naturais, amostras de um local têm grande probabilidade de serem iguais a amostras de outros locais com características semelhantes. O problema da estimação espacial da radiação solar foi inicialmente estudado por Dooley e Hay, 1983 e Hay, 1986. Eles utilizaram uma técnica de interpolação otimizada sugerida por Gandin, 1963, citado por Şen, *et al.*, 2001a.

A geoestatística calcula estimativas dentro de um contexto regido por um fenômeno natural com distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionadas. Devido a esta característica tem sido grande a sua aplicação principalmente para efetuar estimativas e/ou simulações de variáveis em locais não amostrados.

É possível confeccionar mapas de radiação solar baseado em um conjunto de dados medidos utilizando-se técnicas geoestatísticas básicas como os semivariogramas e a metodologia Kriging. De fato, os semivariogramas são ingredientes fundamentais nos procedimentos de krigagem porque eles representam a estrutura de correlação espacial do fenômeno considerado.

Segundo Landim, 2000, existem inúmeros métodos de estimação para modelagem de superfícies. Entre elas:

A) *Triangulação*: faz a conexão dos pontos amostrados através de triângulos e interpola os valores entre eles; são chamados de métodos de estimação diretos, pois os contornos derivam do padrão original dos dados; não permite extrapolação, ou seja, as estimativas restringem-se estritamente à área mostrada.

B) *Reticulação*: confecciona-se uma grade regular sobre a área estudada e calcula-se os valores dos reticulados com base nos valores dos pontos já amostrados; são considerados métodos de estimação indiretos, uma vez que os contornos são construídos a partir dos dados estimados para os nós da grade e não a partir dos dados originais; permite tanto a interpolação quanto a extrapolação de valores. Utiliza-se um algoritmo matemático para ajustar uma superfície através dos dados estimados para os nós; Existem inúmeros algoritmos e os mais utilizados são: o inverso ponderado da distância, a mínima curvatura, a superfície de tendência e krigagem (existem mais de trinta métodos de krigagem).

### 5.1.2. ALGORITMOS DE INTERPOLAÇÃO

Existem inúmeros algoritmos de estimação para modelagem de superfícies. Entre eles, os mais utilizados estão:

1 – *Média Móvel Ponderada*. Segundo Assad, E. D. *et al.* 2003, o interpolador média ponderada calcula o valor da variável  $z$ , de cada ponto  $(x_j, y_j)$  da grade, a partir da média ponderada dos valores dos  $n$  vizinhos mais próximos, atribuindo pesos variados para cada ponto amostrado  $(x_i, y_i)$  por meio da função  $w(x_i, y_i)$  que considera a distância do ponto medido ao ponto da grade, conforme a seguinte equação:

$$z(x_j, y_j) = \frac{\sum_{i=1}^n w(x_i, y_i) \times z(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w(x_i, y_i)} \quad (5.1)$$

onde  $z(x_j, y_j)$  é o valor interpolado da variável no ponto  $(x_j, y_j)$ ;  $z(x_i, y_i)$  é o valor medido da variável no ponto  $(x_i, y_i)$ ;  $w(x_i, y_i)$  é uma função peso que considera a distância do ponto medido ao ponto a ser interpolado.

Um estimador determinístico por média móvel pode considerar a anisotropia do atributo, ou seja, sua variação em função da direção espacial, a partir da definição do raio de busca dos vizinhos, que varia com a distância e a direção.

2 – *Método do Inverso Ponderado da Distância*. É o método de distância ponderada mais utilizado. Cada ponto tem uma influência (peso) que diminui com o aumento da distância ao nó da grade a ser estimado. Quanto mais próximo o nó do ponto amostrado, maior é o peso. A soma de todos os pesos dos pontos amostrados que influenciam um nó é igual a um, ou seja, é atribuído um peso proporcional à contribuição de cada ponto vizinho. Quando o nó coincide com um ponto amostrado as outras influências são desconsideradas. A Equação 5.1 mostra o modelo matemático.

$$\hat{H} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^b} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^b}} \quad (5.2)$$

onde  $\hat{H}$  é o valor interpolado para o nó do reticulado;  $X_i$  é o valor do  $i$ -ésimo ponto amostrado vizinho;  $h_{ij}$  é a distância entre o nó da grade e o ponto  $X_i$  amostrado;  $b$  é o expoente de ponderação (peso) e  $n$  é o número de pontos amostrados utilizados para interpolar cada nó.

O expoente de ponderação pode ser selecionado. Os resultados são variáveis, desde altamente tendenciosos a favor dos pontos mais próximos até resultados onde o peso é

praticamente o mesmo para todos os pontos próximos. Um expoente entre 0 e 2 destaca anomalias locais; expoentes entre 3 e 5 suavizam anomalias locais; expoentes  $\geq 10$  resultam em estimativas poligonais, ou seja, planas; expoente igual a zero resulta em estimativas de média móvel e expoente igual a 2 é o inverso do quadrado da distância.

*3 – Mínima Curvatura.* Método segundo qual equações diferenciais ajustam uma superfície. Um valor inicial de  $H_i$  é calculado para cada nó das células a partir dos pontos próximos. São efetuados cálculos de derivação repetidamente até que seja alcançada uma diferença (convergência ou tolerância) entre os valores amostrados e os estimados, especificada pelo usuário, ou até que um número máximo de iterações seja alcançado. Mapas gerados apresentam contornos muito suaves utilizando este método. Pelo menos um ponto amostrado em cada célula da malha tem seu valor respeitado de forma fiel. Por outro lado, formas estranhas indesejáveis são geradas especialmente no interior de células onde o valor inicial de  $\hat{H}$  é calculado utilizando a média global dos valores amostrados. Isto ocorre quando não há valores amostrados dentro ou próximos da célula cujo nó deve ser estimado. Outra fonte geradora de formas estranhas é o número insuficiente de interações.

$$\nabla^4 \hat{H} = 0 \quad (5.3)$$

com a existência da seguinte condição:  $\nabla^2 \hat{H} = 0$

onde  $\nabla$  representa a equação diferencial e  $\hat{H}$  é o valor estimado para o nó da célula. O algoritmo calcula a quarta derivada:

$$\frac{\delta^4}{\delta_x} \hat{H} + \frac{\delta^4}{\delta_y} \hat{H} = 0 \quad (5.4)$$

*4 – Superfície de Tendência.* É um método pelo qual uma superfície contínua é ajustada, por critérios de regressão por mínimos quadrados, aos valores de  $H_i$  como uma função linear das coordenadas  $X$ - $Y$  dos pontos amostrados e irregularmente distribuídos. A equação matemática utilizada para o ajuste da superfície baseia-se nos polinômios não ortogonais. O ajuste é incrementado pela adição de termos adicionais (ordens) à equação polinomial. Após ajuste da superfície aos dados amostrados, segundo o grau desejado, os valores de  $\hat{H}$  para os nós são calculados. Após a solução das equações com a determinação dos coeficientes, as equações

são utilizadas para o cálculo de  $\hat{H}$  para qualquer valor  $X$ - $Y$ , no caso a localização dos nós das células da grade. Se necessário, é possível calcular os resíduos entre a superfície gerada e os valores originais. Podem ser obtidos contornos muito suaves utilizando este método. As isolinhas, entretanto, podem não ser fiéis aos dados originais. É uma técnica adequada para a “remoção” de tendências e destaque de resíduos. Algumas formas estranhas e indesejadas podem ser geradas nas bordas e no interior do mapa quando houver áreas sem dados amostrados e com a utilização de ordens polinomiais elevadas. A seguir, respectivamente as funções de primeira, segunda, terceira e quarta ordem:

$$\hat{H} = A + Bx + Cy \quad (5.5)$$

$$\hat{H} = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 \quad (5.6)$$

$$\hat{H} = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^2 + Hx^2 + Lxy^2 + Jy^3 \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \hat{H} = A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^2 + Hx^2 + Lxy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + \\ + Nxy^3 + Oy^4 \end{aligned} \quad (5.8)$$

onde  $\hat{H}$  é o valor estimado de  $H$  para o nó da célula (variável dependente);  $X$  e  $Y$  são as coordenadas  $x$  e  $y$  (variáveis independentes). E  $A \dots O$  são os coeficientes que proporcionam o melhor ajuste aos dados amostrados.

5 – *Krigagem*. De acordo com Landim e Sturaro, 2002, a krigagem é um processo de estimação por médias móveis, de valores de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como independentes por uma função chamada *variograma*. O termo correto seria *semivariograma*, pois no cálculo dessa função o somatório dos quadrados das diferenças é dividido por duas vezes o número de pares de valores.

A krigagem leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas. Nas variáveis regionalizadas deve existir uma certa continuidade espacial, o que permite que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido. Ao ser constatado que a variável não possui continuidade espacial na área estudada, não há sentido em

estimar/interpolar usando-se a krigagem. O único meio disponível para se verificar a existência ou não de continuidade espacial e, se houver, determinar os parâmetros que caracterizam este comportamento regionalizado é a análise variográfica.

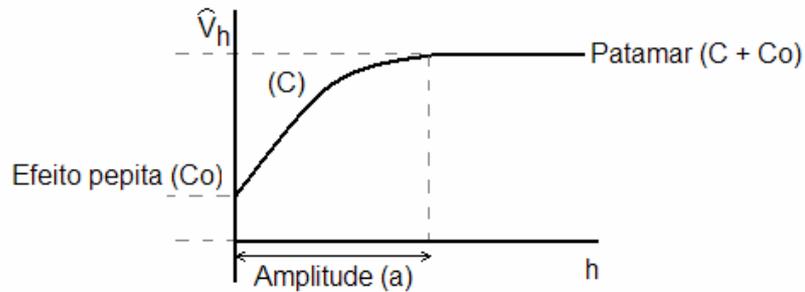
Se uma variável regionalizada  $v_i$  for coletada em diversos pontos  $i$ , o valor de cada ponto estará relacionado com valores obtidos a partir de pontos situados a uma certa distância  $h$  e a influência será tanto maior quanto menor for a distância entre os pontos. O grau de relação entre os pontos numa certa direção pode ser expresso pela covariância, sendo os pontos regularmente espaçados por múltiplos inteiros de  $h$ . A partir de  $h = 0$  a covariância diminui enquanto a variância aumenta, ou seja, ocorre progressivamente maior independência entre os valores obtidos a distâncias cada vez maiores. Graficamente isso significa que o variograma tem um comportamento inverso ao do covariograma.

É necessário um sistema de equações em matrizes, no qual são usados os parâmetros variográficos, para obtenção dos pesos a serem usados para o cálculo do valor do ponto a ser estimado/interpolado.

A estimativa não tendenciosa da semivariância de  $n$  pontos,  $v_1, v_2, \dots, v_n$  de uma variável regionalizada é dada por

$$\widehat{V}_h = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{(v_{(i+h)} - v_i)\}^2 \quad (5.9)$$

Quando se desenha o variograma fazendo-se a função  $\widehat{V}_h$  em função de  $h$  pode-se perceber as relações desde que o gráfico apresente um patamar, o que significa ausência de tendência. Na Figura 5.1 percebe-se: a *amplitude*( $a$ ) que indica distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial e a relação entre elas torna-se aleatória; toda amostra cuja distância ao ponto a ser estimado for menor ou igual à amplitude fornece informações sobre o ponto; o *patamar* ( $C + Co$ ), que indica o valor segundo o qual a função estabiliza-se no campo aleatório, correspondendo a distância  $a$ ; mostra a variabilidade máxima entre pares de valores, isto é, a variância dos dados e, conseqüentemente, covariância nula; a *continuidade*, pela forma do variograma, em que para  $h = 0$ ,  $\widehat{V}_h$  já apresenta algum valor. Esta situação é conhecida como *efeito pepita* e é representada por  $Co$ ; pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos, para mostrar o comportamento espacial subjacente do fenômeno em estudo; a *anisotropia*, quando os semivariogramas mostram parâmetros diferentes pr diferentes direções do fenômeno em estudo.



**Figura 5.1** Modelo variográfico. Adaptado de Landim e Sturaro, 2002.

“A krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos. O método também fornece o erro associado a tal estimacão, o que distingue dos demais métodos de interpolao. É entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. Dentre os métodos de estimativas, comumente empregados, o método geoestatístico da krigagem pode ser considerado como o melhor estimador linear sem viés, cujo objetivo é a minimizao da variância da estimativa”. [Landim e Sturaro, 2002].

As formas mais usuais são a *krigagem simples* que é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante por toda a área; a *krigagem ordinária* que é utilizada quando a média é flutuante ou móvel por toda a área e a *krigagem indicativa* que é a krigagem ordinária aplicada para uma variável transformada, ou seja, a variável resultante da aplicao da funo linear  $f(H) = 0$  ou  $1$ . O conceito inicial foi apresentado por Journel em 1983 segundo Landim e Sturaro, 2002, como uma proposta para construir uma funo de distribuo cumulativa condicional para a estimativa de distribues espaciais.

Existem outros tipos de krigagem, no entanto, para esta dissertao somente serão escritos os breves comentários acima.

Quando um variograma é adequadamente elaborado, a estimativa por krigagem resultante é reconhecida como sendo a estimativa linear melhor e não tendenciosa.

*6 – Interpolao Linear:* A essência da interpolao espacial é transferir informaes disponíveis na forma de dados de lugares adjacentes para outro ponto na forma de dados estimados através de uma funo que representa os pesos de acordo com as distâncias entre os lugares. Normalmente a mudança no número de lugares adjacentes ou especialmente no local de estimacão causa mudanças nos pesos. A técnica de interpolao linear apresentada por Gandin em 1970, é representada pela equao:

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^n w_i H_i \quad (5.10)$$

onde  $\hat{H}$  é a radiação solar estimada em um local sem medição;  $n$  é o número de locais com medida;  $w_i$  é o fator peso da contribuição da radiação solar medida  $H_i$ , de um  $i$ -ésimo local. Como restrição, a soma de todos os pesos deve ser igual a 1. Toda estimacão apresenta um erro,  $\varepsilon$ , definido como uma diferença entre a radiação solar estimada,  $\hat{H}$ , ao local  $i$  e o valor medido  $H_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ). Pelos mínimos quadrados a melhor estimacão é encontrada quando a variância estimada  $\hat{s}^2$  é minimizada.

$$\hat{s}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{H} - H_i)^2 \quad (5.11)$$

Landim *et al.*, 2002, apresenta uma comparacão entre alguns desses métodos na Tabela 5.1:

**Tabela 5.1** Comparacão entre métodos de interpolacão. Adaptado de Landim et al. 2002.

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computacão	Precisão geral
Triangulacão	1*	5**	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Superfície de Tendência	5	1	3	2
Mínima curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1

\* 1 – melhor \*\* 5 – pior

Pelo que se observa a krigagem é o melhor método.

“A krigagem tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolacão, porque está embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas. Além disto, quando se trabalha considerando a dependência espacial, podem-se reduzir os erros aleatórios pelo controle de parcela deste erro associada à dependência espacial. Deve-se ressaltar que a krigagem mostra uma ótima qualidade estatística explícita, exatamente as propriedades descritas anteriormente, enquanto o inverso do quadrado da distância não tem tal qualidade objetiva”. [Vieira, 2000 e Thompson, 1992, citado por Mello *et al.*, 2003]

## 5.2. REPRESENTAÇÃO DE MAPAS

Os mapas de contornos ou isolinhas facilitam a leitura de variáveis físicas de todos os tipos. As ciências físicas, em especial, geram grande quantidade de informações através de vasta quantidade de variáveis encontradas na natureza. A meteorologia, a climatologia, pesquisa em diversas áreas aplicadas da física e engenharias, entre outras, se beneficiam da técnica de traçado de mapas. A representação de grandes quantidades de dados, na forma de mapas, pode ser feita de duas formas: a) Apresentação em papel; b) apresentação digital.

### 5.2.1. Apresentação em Papel

Até poucos anos atrás, a representação de mapas em papel, era a principal mídia de apresentação de resultados numéricos de variáveis na forma de isolinhas traçadas sobre um mapa de um país, estado, região ou mundo (Figura 5.2). Normalmente traçados em preto e branco. Como exemplos tem-se o Atlas Agroclimático do Rio Grande do Sul (Seção 5.3.1) e trabalhos como os Mapas da Radiação Solar Diária Total Média Mensal (Seção 5.3.2) e Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil (Seção 5.3.2). A vantagem desta forma de apresentação reside na rapidez de consulta e como desvantagens a não interatividade com os resultados apresentados. Atualmente continua-se representando dados em papel na forma de isolinhas, no entanto, com o advento do computador com maior poder de processamento, os espaços entre as linhas estão adquirindo cores e as vezes as isolinhas nem aparecem, como é o caso do Atlas de Irradiação Solar do Brasil (Seção 5.3.4), em papel, onde tonalidades de cores representam os dados, sendo devidamente indicados através de uma escala de valores correspondentes aos tons (Figura 5.3). No Atlas Solarimétrico Brasileiro (Seção 5.3.5) ainda estão presentes as isolinhas, mas entre as mesmas encontra-se um conjunto de cores, cujos valores correspondentes das variáveis representadas, devidamente indicadas por escalas. As vantagens e desvantagens desta apresentação são as mesmas que as das isolinhas, no entanto são mais agradáveis de serem visualizadas.

### 5.2.2. Apresentação Digital

Com o advento do computador pessoal e da internet, a difusão da informação ganhou grande ímpeto atingindo milhões de pessoas pelo mundo afora quase instantaneamente. Programas interativos permitem ao usuário modificar parâmetros de aplicativos científicos e

obter mapas que mudam de valores de acordo com suas necessidades. São mapas digitais podendo ou não ser interativos. Os mais comuns são programas de computador distribuídos pela rede mundial de computadores que ao serem instalados permitem a manipulação dos dados e conseqüentemente dos resultados observados. Nesta categoria, como exemplo, existe um programa de computador sendo desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS que será disponibilizado gratuitamente internet (Seção 5.3.5) e que integrará um pacote de *programas* voltados ao estudo, análise e dimensionamento de sistemas solares. Um mapa digital oferece a vantagem de ser manipulado de acordo com as necessidades do usuário, desde que o mesmo disponha de um computador, acesso a internet e facilidade em operar novos sistemas, que geralmente são amigáveis e apresentam um menu *Ajuda*. Outro exemplo de mapa digital ou virtual é apresentado no *endereço eletrônico* do INMET (Seção 5.3.6)

### 5.3. MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR DESENVOLVIDOS PARA O BRASIL E RIO GRANDE DO SUL

Nesta seção serão descritos trabalhos de traçado de mapas confeccionados no Brasil e no Rio Grande do Sul. São mapas desenhados a partir de 1979 até os mais recentes que utilizam tecnologia de ponta, como os satélites, e sistemas de computação avançados que permitem uma nova forma de apresentação das informações.

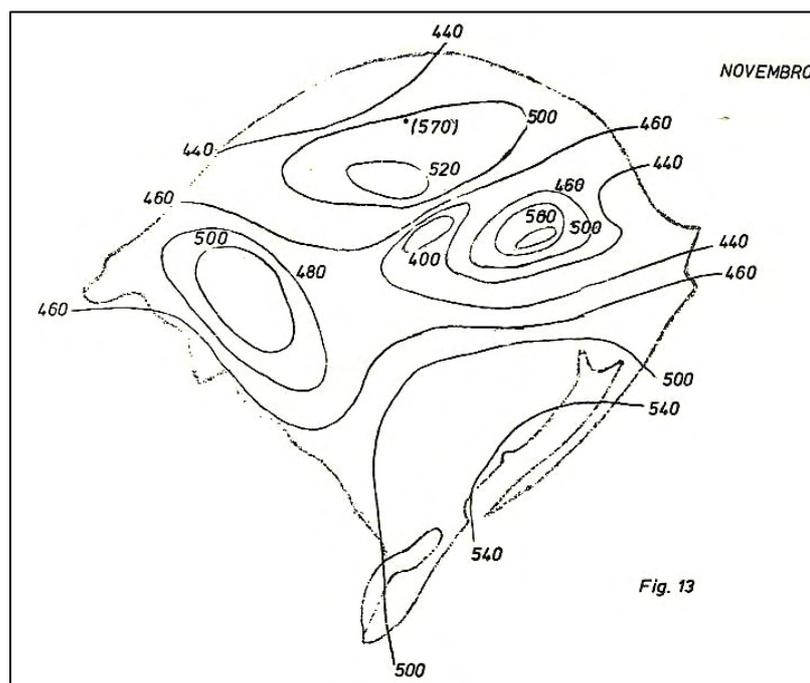
#### 5.3.1. Atlas Agroclimático do Rio Grande do Sul

Em 1989, o Instituto de Pesquisas Agronômicas, IPAGRO, hoje, FEPAGRO, publicou um Atlas Agroclimático do Rio Grande do Sul. Entre todas as variáveis agroclimáticas apresentadas estão as cartas de isolinhas de radiação solar global e insolação. As isolinhas de radiação global representam a distribuição espacial média diária desse elemento. Nas cartas mensais e anuais, as isolinhas foram traçadas com intervalos de  $25 \text{ cal.cm}^2.\text{dia}^{-1}$ . As isolinhas de insolação representam a distribuição espacial do número de horas de brilho de Sol mensal e anual. As isolinhas das cartas mensais foram traçadas com intervalo de 20 horas, e a anual com intervalo de 200 horas. É preciso ressaltar que a obra não dá explicação sobre as técnicas de interpolação utilizadas no traçado das isolinhas. Na época da publicação do Atlas, Moacir Antonio Berlato era Presidente do Instituto de Pesquisas Agropecuárias. Como nota de

referência, Berlato trabalhou com os dados de radiação solar do Rio Grande do Sul e calculou os coeficientes  $a$  e  $b$  da Equação de Ångström para o estado.

### 5.3.2. Mapas da Radiação Solar Diária Total Média Mensal

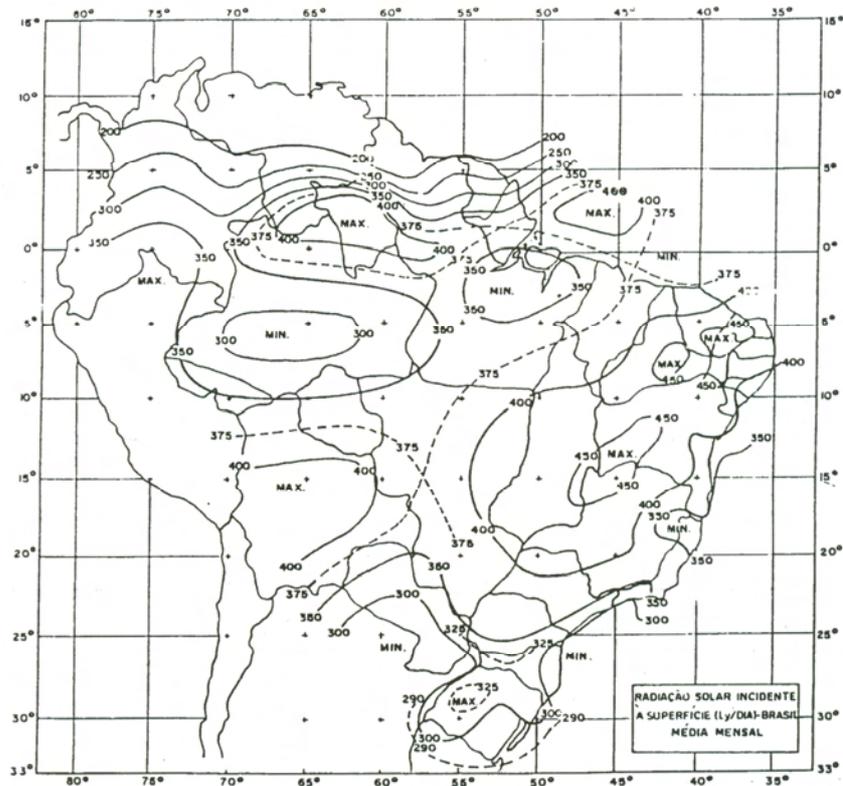
Kessler e Corbella, 1979, apresentaram no 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar mapas de radiação solar diária total média mensal sobre superfície horizontal para o Rio Grande do Sul para os 12 meses do ano. Utilizaram dados de 25 estações de medida do IPAGRO. Utilizaram períodos de tempo diferentes para cada estação, variando de 2 a 15 anos. De acordo com o artigo, algumas estações não possuíam alguns intervalos de dados que foram preenchidos com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott em função dos dados de fração de insolação. Outras cidades, sem estações de coleta tiveram todos os seus dados estimados pela equação e variável independente anteriormente citada nesta seção. Foram utilizados os coeficientes  $a$  e  $b$  calculados por Berlato (Capítulo 4). Os autores citam como possíveis fontes de erro: os valores estimados; estações que não calibram seus instrumentos de medida anualmente; os dados das distintas estações não se referem a idênticos períodos de tempo; foi utilizado um único valor de  $a$  e  $b$  para todo o estado. Não existe referência para o modelo de interpolação utilizado no traçado das isolinhas. A Figura 5.2 mostra o mapa de isolinhas de radiação solar média mensal para o Rio Grande do Sul para o mês de Janeiro.



**Figura 5.2** Mapa de isolinhas de radiação solar para o Rio Grande do Sul, mês de Novembro. Adaptado de Kessler e Corbella, 1979.

### 5.3.3. Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil

Ainda em 1979, Nunes *et al.* citado por GTES, 1999, apresentaram o trabalho “Estudo da Distribuição de Radiação Solar Incidente sobre o Brasil”. Estes autores utilizaram o modelo desenvolvido por Bennett para os Estados Unidos e o adaptaram para o Brasil. Este modelo determina a radiação solar global a partir de uma formulação que, além de considerar o efeito do número de horas de insolação, incorpora também os efeitos relativos à altitude, latitude e época do ano. Utilizaram dados de insolação medidos por 10 anos e 30 anos para países limítrofes como Colômbia, Venezuela e Guianas. Os autores afirmaram que o erro apresentado entre os valores estimados e valores de validação em dois pontos com latitudes muito diferentes foi de apenas 2,5 %. Foi elaborado um mapa para cada mês. As isolinhas foram traçadas para intervalos de 50 ly/dia, tentando ajustá-las, o melhor possível, aos dados calculados, de forma que elas se tornassem consistentes com os campos de nebulosidade, obtidos a partir de fotos de satélites e de observações convencionais de vários tipos de nuvens. Novamente não existe descrição do modelo de interpolação utilizado para o traçado das isolinhas. A Figura 5.3 mostra o mapa de isolinhas de radiação solar média mensal para o Brasil para o mês de janeiro.



**Figura 5.3** Radiação Solar Incidente na superfície (ly/dia) – Brasil – Média Mensal – Abril.

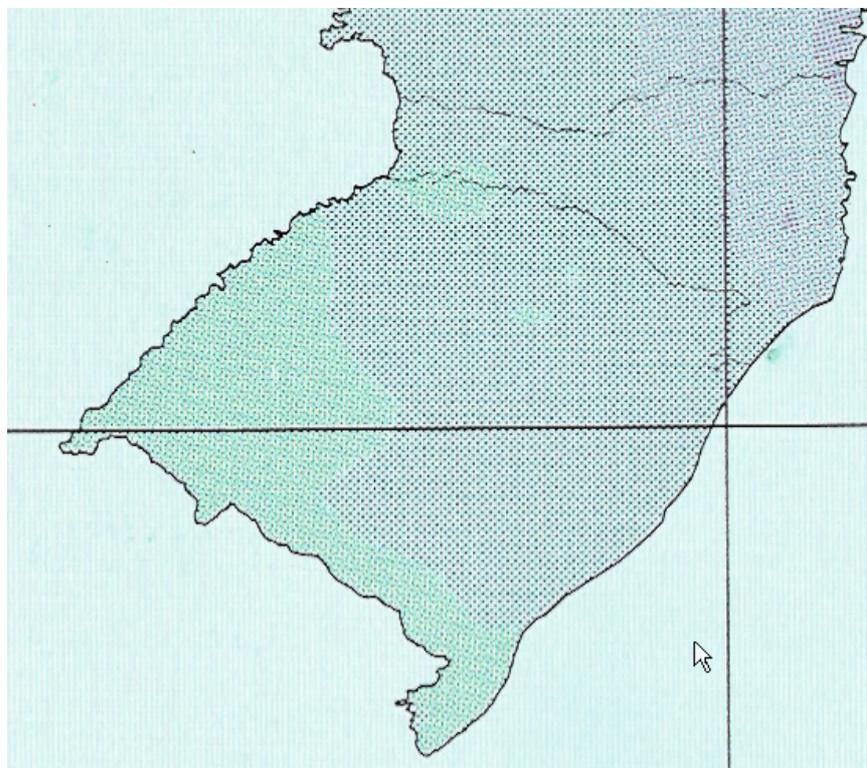
Adaptado de GTES, 1999.

### 5.3.4. Atlas de Irradiação Solar do Brasil

Em 1998, sob coordenação de Colle e Pereira como pesquisador principal, o INMET e LABSOLAR-UFSC, lançaram o Atlas de Irradiação Solar do Brasil. Este Atlas de Radiação Solar brasileiro foi confeccionado a partir de dados de satélites. Os satélites que forneceram dados foram os METEOSAT-2, METEOSAT-3 e GOES-8. Os valores oriundos dos satélites foram validados por dados obtidos por estações de medição terrestres. O Atlas se compõem de mapas mensais de radiação solar em  $\text{Wh/m}^2$  e mapas mensais de variabilidades diários em cada mês além de mapas de irradiação média anual típica para o intervalo de 10 anos. O mapa de irradiação média anual típica utiliza intervalos de  $200 \text{ Wh/m}^2$  e os mapas de irradiação média mensal utilizam intervalos de  $500 \text{ Wh/m}^2$ .

O Atlas mostra também mapas de variabilidade mensal da irradiação anual e variabilidade diária da irradiação mensal, em percentuais.

As imagens foram obtidas por interpolação, a partir de uma matriz de estimativas geradas pelo modelo. Não especifica o método de interpolação. A Figura 5.4 mostra um mapa parcial do Brasil para o mês de Novembro.



**Figura 5.4** Atlas de Irradiação Solar do Brasil. Satélite.

Novembro – 1998 – UFSC – INPE.

Adaptado de Colle, S. e Pereira, E. B. 1998

### 5.3.5. Atlas Solarimétrico do Brasil

Sob coordenação de Tiba, em 2000, a Universidade Federal de Pernambuco e a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco – CHESF, com o apoio do Ministério de Minas e Energia, CEPEL/Eletróbrás e CRESESB lançaram o Atlas Solarimétrico do Brasil.

O Atlas foi desenvolvido a partir de dados de superfície coletados em estações do INMET distribuídos pelo Brasil e de outros órgãos estaduais e de Universidades.

O Atlas foi elaborado partir de correlações envolvendo vários modelos. Foram utilizados os seguintes modelos: a) Ångström-Prescott (Equação 1.2); b) o método indireto de Hottel/Liu-Jordan que utiliza informações sobre a transmitância da radiação solar direta através da atmosfera, a constante solar e o ângulo de zênite; c) A correlação de Bennett que é uma correlação linear múltipla que além de relacionar  $K_T$  com a fração de insolação leva em consideração a altitude da estação.

Para a confecção do Atlas foram utilizados: os mapas do Brasil com Divisão Político-Administrativa do IBGE; o mapa do Brasil com relevo – hipsometria do IBGE, com altitude de 200 em 200 m; o mapa do Brasil com cobertura vegetal; mapa do Brasil com tipo de relevo e mapa da América do Sul com Temperaturas e Precipitações médias.

Para o traçado das isolinhas de radiação solar foram priorizados dados provenientes de piranômetros (faixa de erro entre 3% e 5%) em detrimento aos dados provenientes de actinógrafos. Foram extrapolados valores obtidos por piranômetros em 200 km admitindo a anisotropia. Foram utilizados valores médios de radiação solar obtido em países limítrofes. A Figura 5.5 ilustra um dos seus mapas.



**Figura 5.5** Atlas de Solarimétrico do Brasil. Novembro – 2000 – UFPe – CHESF.

Adaptado de Tiba *et al.*, 2000

Quanto à anisotropia, Tiba, *et al.*, 2002, afirmam que estudos recentes sobre variabilidade espacial do recurso solar em regiões fitogeográficas homogêneas indicam que é possível extrapolar valores medidos até 200 km distantes com erros de 15%, e com um nível de confiança de 90 %.

O espaçamento utilizado entre isolinhas sucessivas de radiação solar foi de 2MJ/m<sup>2</sup>.

Para o traçado de isolinhas de insolação foi considerado um erro não inferior a 10% por não se saber a precisão das medidas realizadas por heliógrafos Campbell-Stokes. Também foram considerados os resultados de estudos sobre a variabilidade espacial dos valores de insolação diária, médias mensais em regiões homogêneas e isotrópicas que permitem extrapolar valores até 200 km sem exceder os erros de extrapolação de 1%, com um nível de confiança de 90%.

O espaçamento entre as isolinhas de insolação foi fixado em 1 h/dia.

Não ficou clara na descrição dos procedimentos do Atlas a técnica de interpolação utilizada. Só há referência a extrapolação.

### 5.3.6. Mapas do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia em seu *endereço* na internet, INMET, 2004, mantém uma página que no setor de *climatologia* apresenta uma aplicação que mostra mapas mensais e anuais das seguintes variáveis: temperatura máxima, temperatura média, temperatura mínima, precipitação, número de dias de chuva, insolação, nebulosidade, umidade relativa do ar e evaporação.



**Figura 5.6** Imagem do *endereço* do INMET que apresenta um Atlas de mapas de inúmeras variáveis climatológicas.

Trata-se de um mapa digital ou virtual onde o usuário pode escolher a variável que deseja. A Figura 5.6 apresenta a tela que mostra a nebulosidade média para o mês de junho. Apresenta ainda a animação de todas variáveis que avançam automaticamente mês a mês.

Este mapa em particular não mostra radiação solar, mas suas variáveis climatológicas fazem parte de modelos de estimativa da radiação solar e o mesmo serve de exemplo de uma aplicação interativa em mídia digital.

Infelizmente o aplicativo não tem maiores detalhes sobre as técnicas utilizadas para a confecção dos mapas.

### 5.3.7. SEQMETBR – Laboratório de Energia Solar

O Laboratório de Energia Solar da UFRGS está desenvolvendo um pacote integrado de *programas* direcionados ao estudo, análise e dimensionamento de sistemas solares. Um dos módulos, chamado SEQMETBR, é dedicado à sintetização de seqüências de dados meteorológicos para o Brasil. Baseado nos trabalhos de Krenzinger e Macagnan (1988), Krenzinger (1994) e Krenzinger e Farenzena (2002), permite ao usuário ler os valores de variáveis climatológicas conforme o *mouse* é deslocado através do mapa.

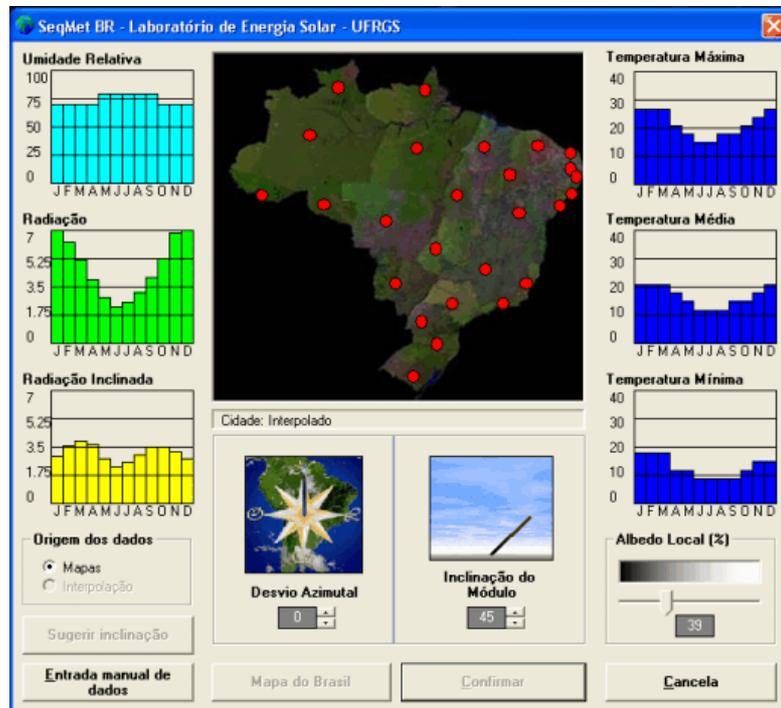
A Figura 5.7 mostra a ação de se clicar sobre um ponto qualquer do território nacional. Instantaneamente aparecem os gráficos dos valores das variáveis citadas para o ponto amostrado. As seguintes variáveis podem ser visualizadas: umidade relativa, radiação solar, radiação inclinada, temperatura máxima, média e mínima. O usuário define o desvio azimutal do norte, a inclinação do módulo coletor e o albedo local.

Este aplicativo é mais um exemplo de um mapa digital ou virtual e que possibilita maior interatividade do usuário com a fonte de informação.

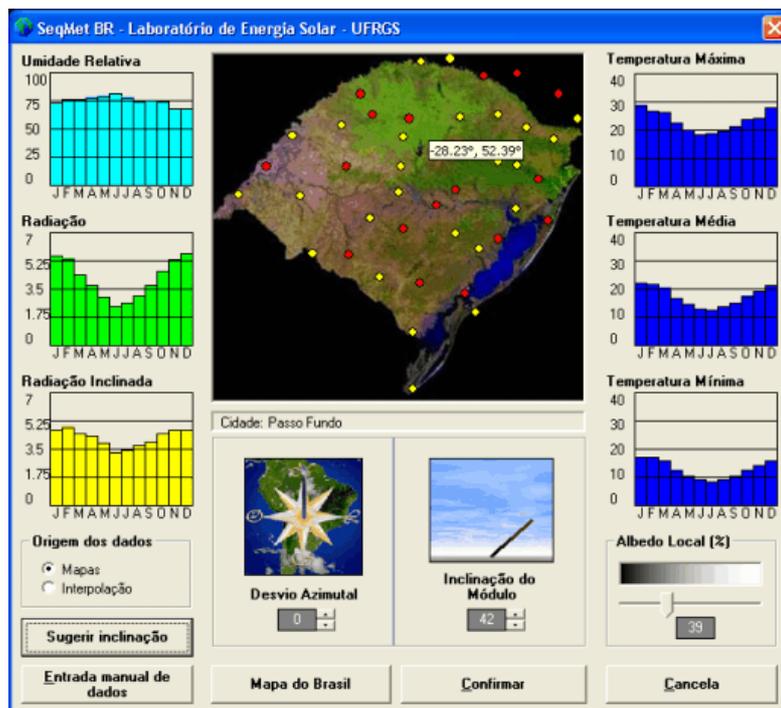
A Figura 5.8 mostra que ao se clicar em um ponto vermelho correspondente a um estado, imediatamente aparece o estado em questão. Um novo clique sobre um ponto qualquer e os gráficos aparecerão indicando os valores correspondentes as variáveis disponibilizadas. Os pontos vermelhos indicam cidades onde não existe a radiação solar medida. Com um clique ligeiramente ao lado do ponto vermelho ou em qualquer outra região e imediatamente aparecerão valores interpolados. Usa-se a interpolação por *função de peso clássico*. As informações são oriundas de vários bancos de dados que contemplam as variáveis apresentadas tendo como fonte a FEPAGRO e o INMET. Os pontos amarelos indicam cidades com medidas de radiação solar.

Com a explicação do programa acima se encerra esta seção sobre mapas desenvolvidos no Brasil e no Rio Grande do Sul. Certamente existem mapas em outros estados,

regiões ou até mesmo em municípios, no entanto, não foram citados por dificuldade de encontrá-los e também porque os já citados cumprem o papel nesta dissertação. A seguir, serão descritos alguns trabalhos de confecção de mapas em outras partes do mundo.



**Figura 5.7** Clicando-se sobre um ponto, os gráficos mostram os valores das variáveis para aquele local.



**Figura 5.8** Tela exibindo os dados quando o *mouse* é apontado para um local específico e seu botão direito pressionado.

#### 5.4. MAPAS DE RADIAÇÃO SOLAR DESENVOLVIDOS NO MUNDO

Em 1965, Bennett relatou trabalho de confecção de mapas mensais de médias diárias de radiação solar para os Estados Unidos. Neste trabalho foram testados vários modelos estatísticos visando remediar a falta de dados ou dados incompletos em algumas estações. Muitas estações de coleta tiveram os dados desconsiderados pela falta de confiabilidade nos mesmos e substituídos por valores estimados. Devido ao tamanho continental dos EUA, a presença de muitas regiões climáticas e várias altitudes, foi necessário, como anteriormente descrito, testar várias equações. Algumas delas estão citadas na seção 1.3 com autoria de Bennet. Após os testes das equações foram gerados 12 mapas mensais de médias diárias de radiação solar em ly/dia. A Figura 5.9 mostra um dos mapas, correspondente ao mês de Julho.

Em 1987, a Organização Latino Americana de Energia (OLADE) publicou o Atlas de Climatologia Solar para a América Latina e Caribe. O Atlas foi feito a partir de pesquisas sobre a solarimetria física e modelos de estimacão existentes. A base de todo o cálculo se estabeleceu nas medidas de insolação, pois as medidas de radiação eram, como hoje, escassas.

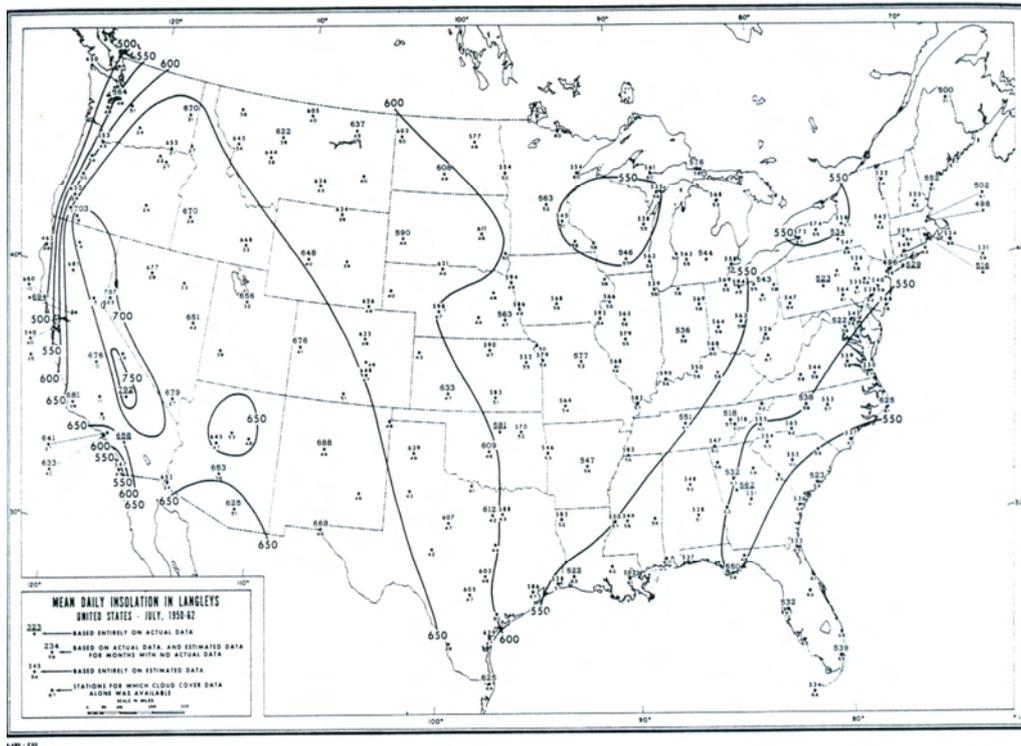
Neste trabalho assumiu-se que a distribuição horária da radiação solar ao longo de um dia é uma função senoidal.

Devido a falta de consenso sobre o melhor modelo a ser aplicado nos diversos países optou-se por determinar, inicialmente, o índice de transparência  $\bar{K}_t$ , para aplicação na Equação de Ångström modificada por Page, segundo OLADE, 1987, e habilitada com as constantes de Trewartha. Com esta equação foram determinados os valores de  $\bar{K}_t$ , para cada ponto sobre o território em questão. A equação assumiu a forma:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = 0,29 + 0,42 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} \quad (5.12)$$

Foram utilizados valores tabelados de  $\bar{H}_o$  e  $\bar{S}_o$  para cada estação. Com o  $\bar{K}_t$  conhecido e a correspondente latitude se tem finalmente o valor de  $\bar{H}$ , isto é, a radiação solar global média estimada. Os dados de radiação global média foram convertidos em radiação global máxima média mensal e radiação máxima direta média mensal utilizando-se de funções conhecidas na literatura.

O Atlas de mapas de radiação foi feito com 12 cartas mensais por sub-região e para cada uma das radiações: radiação global máxima média mensal e radiação máxima direta média mensal.



**Figura 5.9** Mapa de radiação solar global horizontal média diária para o mês de Julho. EUA. Adaptado de Bennett, I. 1965.

A Figura 5.10 mostra uma das cartas de radiação máxima média mensal correspondente ao mês de novembro para o Brasil, Suriname e Guiana.

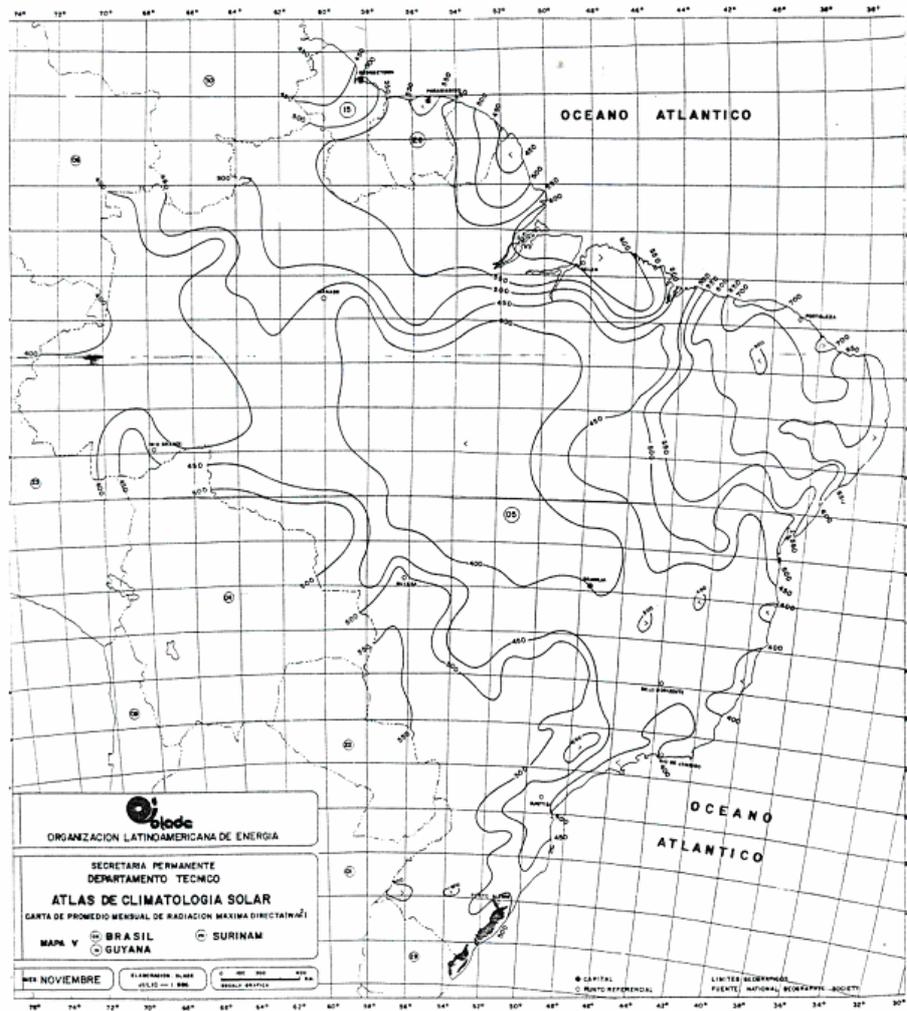
Não há descrição das técnicas de interpolação utilizadas para o traçado das isolinhas.

Em 1983, Ahmad, I. *et al.* publicaram artigo relatando a confecção de mapas mensais de radiação solar para o Iraque. Utilizaram dados obtidos pela Organização Meteorológica Iraquiana. As estações, num total de 8 possuíam dados coletados entre 5 e 10 anos. A maioria das estações só possuía medidas de horas de brilho de Sol. Somente três estações possuíam medidas de Insolação e radiação. Foi necessário desenvolver modelos de estimativa. Foram utilizados 6 modelos diferentes relacionando  $K_T$ , fração de insolação e umidade relativa para realização de testes. Foi utilizada a Equação de Ångström–Prescott para encontrar os coeficientes  $a$  e  $b$ .

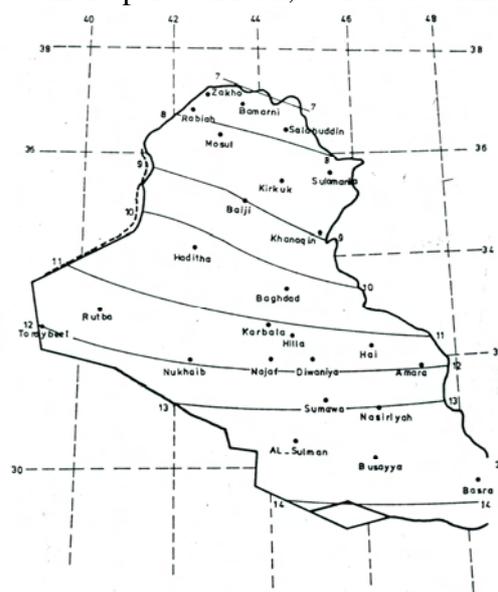
A Figura 5.11 mostra um mapa de isolinhas de radiação global média mensal em MJ/m<sup>2</sup>.dia, para o mês de Fevereiro.

Não há descrição para as técnicas de interpolação utilizadas no traçado dos mapas.

Existem na literatura vários outros trabalhos de traçado de mapas de radiação solar global e que não serão descritos, apenas citados. Entre eles: Balling, R. C. *et al.*, 1983; Balling, R. C., 1983; Maure, D. e Galanis, N., 1979; Maure, D. e Galanis, N., 1979; Ojo, O., 1973; Terjung, W. H., 1970; Löf, J. A. *et al.*, 1966; Supit, I. e Van Kappel, R.R., 1998;



**Figura 5.10** Mapa do Atlas de Climatologia Solar da OLADE, correspondente ao mês de Novembro para o Brasil, Guiana e Suriname.



**Figura 5.11** Mapa de isolinhas de radiação global média mensal em MJ/m<sup>2</sup>.dia. Iraque. Fevereiro. Adaptado de Ahmad, I. *et al.* 1983.

## 6. ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo é uma descrição dos procedimentos estatísticos aplicados sobre a base de dados SAMSON, Leste dos EUA, e dados do estado do Rio Grande do Sul.

### 6.1. ANÁLISE DOS DADOS DO BANCO DE DADOS SAMSON

Para iniciar o trabalho de investigação visando a(s) melhor(es) equação(ões) e/ou técnica(s) para estimativa de radiação solar a partir de vários parâmetros, utilizou-se inicialmente o banco de dados SAMSON, para o Leste dos Estados Unidos da América (EUA). Na Figura 6.1 a área dos EUA com estações nesta pesquisa está a direita da linha vermelha. O banco de dados possui uma série histórica de registros de 1961 a 1990 para 79 estações de coleta. Os dados estão registrados como valores horários. Entre as grandezas registradas, as principais estão citadas a seguir:

- Radiação extraterrestre horizontal Global – [Wh/m<sup>2</sup>]
- Radiação extraterrestre normal – [Wh/m<sup>2</sup>]
- Radiação horizontal Global – [Wh/m<sup>2</sup>]
- Radiação direta normal – [Wh/m<sup>2</sup>]
- Radiação horizontal difusa – [Wh/m<sup>2</sup>]
- Nebulosidade – parcela do céu coberta por nuvens – em décimos
- Temperatura de bulbo seco – [°C]
- Temperatura de bulbo úmido – [°C]
- Umidade relativa – em percentuais
- Pressão atmosférica na Estação – [milibars]
- Direção do vento
- Velocidade do vento – [m/s]
- Visibilidade – [km]
- Altitude – [m]
- Latitude – [°, ′, ″]

Foi desenvolvido um programa de computador, utilizando a linguagem Visual Basic 5, doravante chamado de PLPS – Programa de Leitura e Processamento do Banco de dados

SAMSON, para ler o banco de dados e processar as informações necessárias para o estudo da correlação e regressão linear e múltipla. A Figura 6.2 mostra a tela de abertura do sistema.

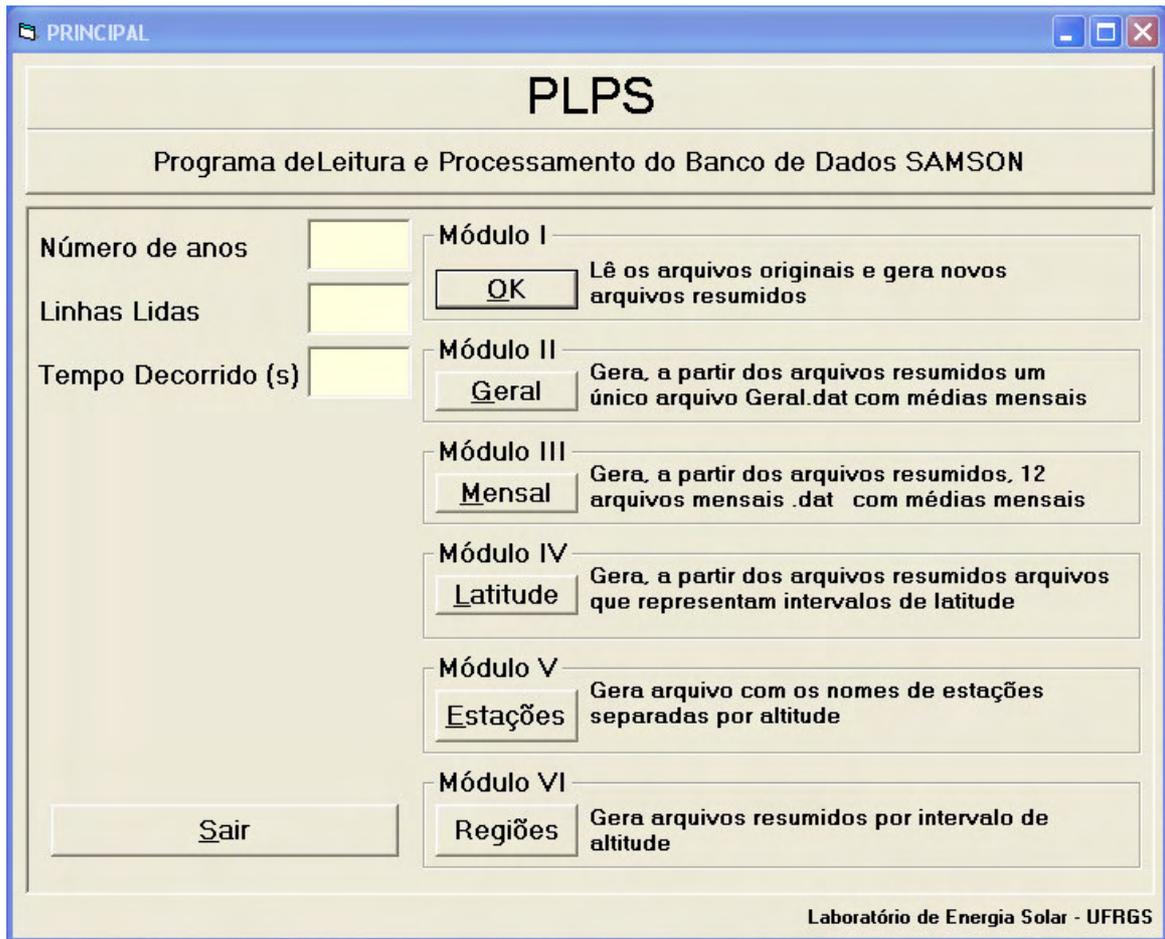


**Figura 6.1** Mapa parcial dos EUA. À direita da linha vermelha estão localizadas as estações utilizadas neste trabalho. Adaptado de Grande Enciclopédia Larousse Cultural, 1988.

O primeiro módulo do programa tem como funções:

- Ler o banco de dados;
- Calcular o número de horas de sol diário no topo da atmosfera, utilizando a Equação 2.8, para o dia característico do mês, Tabela 2.1;
- Copiar ou calcular o valor horário para cada uma das variáveis a seguir listadas e gravá-las em arquivos com os nomes originais com a extensão ponto dat (.dat);
- Ano
- Mês
- Radiação Global Horizontal ( $H$ )
- Radiação Extraterrestre Horizontal ( $H_0$ )

- Insolação ( $S$ )
- Horas de Sol no Topo da Atmosfera Terrestre ( $S_o$ )
- Altitude
- Temperatura de bulbo seco
- Latitude – em inteiros e décimos
- Nebulosidade
- Umidade Relativa



**Figura 6.1** Tela principal do Programa de Leitura e Processamento do Banco de Dados SAMSON.

A Tabela 6.1 apresenta detalhes dos arquivos gerados pelo Módulo I.

Como o banco de dados SAMSON não possui dados de Insolação foi desenvolvido um algoritmo, descrito a seguir, para se calcular a fração de insolação a partir de dados de Radiação Global Horizontal e Radiação Difusa Horizontal. O algoritmo descrito é processado a cada linha de dados que corresponde a uma hora e os valores de  $\bar{S}/\bar{S}_o$  (fração de insolação) são somados e gravados como valores diários.

Se Radiação Global Horizontal( $G_H$ ) > 0 então

$$\frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} = \frac{(G_H - \text{Radiação Difusa Horizontal}(D_H))}{G_H}$$

Se Radiação Global Horizontal = 0 então

$$\frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} = 0$$

Se  $G_H < D_H$  então

$$\frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} = 0$$

Fim

O resultado da aplicação deste algoritmo relaciona a fração direta da radiação horária com o tempo em que houve sol durante uma hora. Este procedimento subestima o valor de S porque não considera que nos momentos com sol a radiação difusa também deveria ser contabilizada. Assim um segundo “*bloco if*” foi aplicado para atenuar este erro (Acrésceta 15% ao valor de  $\bar{S}/\bar{S}_o$ ) e finalmente um controle para evitar valores acima de 1.

Se  $G_H > D_H$  então

$$\bar{S}/\bar{S}_o = \bar{S}/\bar{S}_o \times 1,15$$

Fim

Se  $\bar{S}/\bar{S}_o \leq 1$  então

$$\bar{S}/\bar{S}_o = \bar{S}/\bar{S}_o$$

Se  $\bar{S}/\bar{S}_o > 1$  então

$$\bar{S}/\bar{S}_o = 1$$

Fim

O módulo II do programa tem como função gerar um arquivo único, Geral.dat, com médias mensais a partir dos arquivos gravados pelo módulo I. O módulo lê cada estação trinta vezes, correspondentes aos 30 anos de registros gerando 360 médias mensais. O processo é repetido para as 79 estações gerando 28440 médias mensais que são todas gravadas no mesmo arquivo. As radiações médias,  $\bar{H}$  e  $\bar{H}_o$ , são convertidas para MJ/m<sup>2</sup>. Cada registro do módulo II contempla as seguintes variáveis, em médias mensais:

- Mês

- Ano
- Radiação Global Horizontal ( $\bar{H}$ ) – [MJ/m<sup>2</sup>]
- Radiação Global Horizontal Extraterrestre ( $\bar{H}_o$ ) – [MJ/m<sup>2</sup>]
- Razão entre  $\bar{H}$  e  $\bar{H}_o$
- Razão entre  $\bar{S}$  e  $\bar{S}_o$
- Altitude – [m]
- Temperatura de bulbo seco – [°C]
- Latitude – em inteiros e décimos de grau
- Nebulosidade – em décimos
- Umidade Relativa – 0 a 100%

**Tabela 6.1** A Tabela ilustra parte de um arquivo gerado pelo PLPS. O primeiro registro contém dados da Estação, como local, Estado, Latitude, Longitude e Altitude. A Segundo registro não existe no Arquivo, apenas ilustra as variáveis gravadas. A partir do terceiro registro observa-se os dados gravados.

ASHEVILLE – NC N35° 26" W082°32" 661											
Ano	Mês	Hora	Ho <sup>a</sup>	Hn <sub>sc</sub> <sup>b</sup>	H <sup>c</sup>	H <sub>b</sub> <sup>d</sup>	H <sub>d</sub> <sup>e</sup>	S <sup>f</sup>	Tbs <sup>g</sup>	Nebulosidade	Umidade Relativa
61	1	1	0	0	0	0	0	0	3.3	10	92
61	1	1	0	0	0	0	0	0	2.8	10	96
61	1	1	0	0	0	0	0	0	3.3	10	92
61	1	1	0	0	0	0	0	0	3.3	10	92
61	1	1	0	0	0	0	0	0	2.8	10	96
61	1	1	0	0	0	0	0	0	3.9	6	82
61	1	1	0	0	0	0	0	0	2.8	9	75
61	1	1	45	377	5	2	4	0.23	1.7	10	81
61	1	1	200	1415	48	13	46	0.048	1.7	9	75
61	1	1	420	1415	110	39	98	0.125	1.7	9	72
61	1	1	591	1415	260	267	149	0.491	2.8	7	69
61	1	1	700	1415	435	674	101	0.883	3.9	4	64

<sup>a</sup> Radiação extraterrestre horizontal global – [Wh/m<sup>2</sup>]      <sup>b</sup> Radiação extraterrestre normal – [Wh/m<sup>2</sup>]

<sup>c</sup> Radiação horizontal global – [Wh/m<sup>2</sup>]      <sup>d</sup> Radiação direta normal – [Wh/m<sup>2</sup>]

<sup>e</sup> Radiação horizontal difusa – [Wh/m<sup>2</sup>]

<sup>f</sup> Fração de Insolação calculada pelo algoritmo descrito a seguir [h]

<sup>g</sup> Temperatura de bulbo seco – [°C]

A Tabela 6.2 apresenta parte do arquivo Geral.dat com os registros divididos em campos na ordem das variáveis acima mencionadas. A radiação global agora tem como unidade o J/m<sup>2</sup>.

O módulo III tem como função gerar um arquivo de médias mensais para cada mês, contemplando as mesmas variáveis do módulo II, ou seja, há uma divisão do arquivo Geral.dat em doze arquivos mensais.

**Tabela 6.2** Imagem de parte dos registros do arquivo Geral.dat gerado pelo Módulo II. Respectivamente, a partir da primeira coluna tem-se as variáveis: *Mês*, *Ano*,  $\bar{H}$ ,  $\bar{H}_0$ ,  $\bar{K}_t$ ,  $\overline{(S/S_0)}$ , *Altitude*, *Temperatura de bulbo seco (média mensal)*, *Latitude (inteiro e décimos)* e *Nebulosidade (média mensal)*.

1	75	7.43	17.18	0.4324	0.3774	50	4.79	37.5	7.23	67
2	75	10.13	22.26	0.4550	0.3686	50	5.31	37.5	7.31	63
3	75	13.97	29.15	0.4791	0.4074	50	7.38	37.5	6.48	57
4	75	18.57	35.69	0.5203	0.4745	50	11.74	37.5	5.9	50
5	75	20.65	40.06	0.5153	0.4338	50	19.79	37.5	6.93	65
6	75	22.81	41.96	0.5437	0.4947	50	23.18	37.5	5.64	65

O módulo IV que tem como função gerar arquivos de médias mensais separando-as por latitudes e contempla as mesmas variáveis do módulo II.

O módulo V gera um arquivo com o número e nome das estações separadas por altitude.

O módulo VI tem com função gerar arquivos de médias mensais separadas por intervalos de altitude. Os intervalos são de 150 m. Um dos arquivos leva em conta apenas as estações litorâneas. A classificação foi feita levando em conta a topografia do Leste dos EUA. Esta escolha de intervalos de altitude foi arbitrária.

### 6.1.1. Regressão Linear Utilizando o Arquivo “Geral.dat”

O arquivo Geral.dat contém 28440 médias mensais de todas as 79 estações do Leste dos EUA. Inicialmente o arquivo Geral.dat foi processado por um programa estatístico visando determinar a correlação entre as variáveis  $\bar{H} / \bar{H}_0$  e  $\bar{S} / \bar{S}_0$ , modelo de Ångström–Prescott, sobre um amplo território, não levando em consideração as diferentes altitudes ou outras particularidades. A Tabela A1.1 resume a estatística dos dados. O próximo passo foi determinar, utilizando-se o mesmo programa estatístico, os coeficientes de determinação,  $a$  e  $b_1$ , que também se encontram na Tabela A1.1. De posse destes dados, o banco de dados Geral.dat foi copiado para uma planilha eletrônica onde se calculou o valor estimado da radiação global horizontal ( $\hat{H}$ ) na superfície terrestre a partir dos coeficientes de regressão e dos valores ( $H_0$  e  $\bar{S} / \bar{S}_0$ ) do banco de dados. Calculado o valor estimado da radiação global horizontal ( $\hat{H}$ ) na superfície terrestre, foi aplicada a validação do modelo ajustado, conforme descrito no item 3.5. As equações para calcular estes erros foram listadas na seção 3.8 e foram utilizadas as equações do Erro Padrão da estimativa dos coeficientes de regressão (Equação 3.22), Erro Relativo Médio –  $\bar{\epsilon}_{Rel}$  (Equação 3.25), Erro Quadrático Médio – RMSE (Equação 3.24) e Erro de Desvio Médio – M.B.E

(Equação 3.23). Nas Tabelas A1.1 a A1.7,  $\varepsilon_{rel}(\%)$ , é uma comparação dos erros relativos médios de cada modelo aplicado aos dados com o Erro Relativo Médio do modelo de Ångström–Prescott, considerado neste trabalho como padrão, pelo seu pioneirismo.  $\varepsilon_{rel}(\%)$  indica, se positivo, quanto o modelo é relativamente melhor que o modelo de Ångström–Prescott, sempre na primeira linha de cada tabela A1.1 até a1.9; se negativo que o modelo dá resultados inferiores que o modelo de Ångström–Prescott.

Na Tabela A1.1 pode-se observar 22 linhas indicando coeficientes e erros associados de 22 modelos de regressão linear simples e múltiplos. A primeira linha descreve o modelo de correlação e regressão linear simples, a equação clássica de Ångström–Prescott, envolvendo apenas  $\bar{K}_T$  e fração de insolação ( $\bar{S}/\bar{S}_0$ ), onde o coeficiente de correlação é  $r = 0,880$ , o coeficiente de determinação é  $r^2 = 0,775$ . Observa-se que a correlação é forte. Os coeficientes  $a = 0,296$  e  $b_1 = 0,450$  têm erro padrão da estimativa,  $S_{XY}$ , de 0,02632.

A tabela 6.3 mostra todos os modelos de estimativa baseados no método dos mínimos quadrados presentes na Tabela A1.1.

O erro MBE, para a Equação de Ångström–Prescott, é de  $-0,15 \text{ MJ/m}^2$  e indica uma subestimação do modelo em relação aos dados medidos e o erro RMSE é de  $0,73 \text{ MJ/m}^2$ . O Desvio Relativo Médio é de 0,0435 ou 4,35%.

Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a correlação a um nível de significância de 5%, para os valores anuais, obteve-se o valor  $t_{crit} = 0,48$  e  $t_{calc} = 312,44$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0 : \rho = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de correlação entre as variáveis  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_0$ . Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a regressão a um nível de significância de 5%, para os valores anuais, obteve-se o valor  $t_{crit} = 0,48$  e  $t_{calc} = 319,58$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0 : \beta = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de regressão entre as variáveis  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_0$ . Estes testes de hipóteses só foram aplicados para o modelo de Ångström–Prescott porque, como já citado anteriormente, este modelo é considerado padrão. Os outros podem dar resultados melhores ou inferiores a ele.

A segunda linha de dados, da Tabela A1.1, índice 2, resume os resultados do modelo de correlação e regressão múltiplas que correlaciona  $\bar{K}_T$  com  $\bar{S}/\bar{S}_0$ , altitude( $h$ ), nebulosidade( $\bar{Neb}$ ), temperatura( $\bar{T}$ ) e latitude( $\phi$ ). Para estimar o valor de  $\hat{H}$ , o modelo matemático assume a forma da Equação 6.2.

O erro MBE é de  $-0,05 \text{ MJ/m}^2$  e erro RMSE, é de  $0,60 \text{ MJ/m}^2$ . O erro padrão da estimativa dos coeficientes de correlação é de 0,024. A coluna  $\varepsilon_{Rel}$  indica que o desvio relativo médio é 15,17% menor que o correspondente para a Equação de Ångström–Prescott, ou seja,

existe uma melhora nos resultados da estimação utilizando uma Regressão linear múltipla, no entanto, há que se considerar a dificuldade na obtenção de todas as variáveis envolvidas.

**TABELA 6.3** Lista dos modelos de regressão linear simples e múltipla desenvolvidos para o todo o Leste dos EUA Banco de dados SAMSON.

i	Modelo	Eq.
1	$\hat{H} = \left( 0,296 + 0,450 \frac{\bar{S}}{S_o} \right) \bar{H}_o$	6.1
2	$\hat{H} = \left( 0,284 + 0,387 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0000082h + 0,0014\bar{T} + 0,0012\phi - 0,0042\overline{Neb} \right) \bar{H}_o$	6.2
3	$\hat{H} = \left( 0,317 + 0,372 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0000072h + 0,0014\bar{T} + 0,0012\phi - 0,0042\overline{Neb} - 0,00046\overline{UR} \right) \bar{H}_o$	6.3
4	$\hat{H} = \left( 0,293 + 0,453 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0000072h \right) \bar{H}_o$	6.4
5	$\hat{H} = \left( 0,293 + 0,451 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,000034\overline{UR} \right) \bar{H}_o$	6.5
6	$\hat{H} = \left( 0,300 + 0,408 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0011\bar{T} \right) \bar{H}_o$	6.6
7	$\hat{H} = \left( 0,278 + 0,458 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,00039\phi \right) \bar{H}_o$	6.7
8	$\hat{H} = \left( 0,344 + 0,407 \frac{\bar{S}}{S_o} - 0,00464\overline{Neb} \right) \bar{H}_o$	6.8
9	$\hat{H} = \left( 0,350 + 0,382 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,013\bar{T} - 0,0063\overline{UR} \right) \bar{H}_o$	6.9
10	$\hat{H} = \left( 0,283 + 0,403 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0015\bar{T} + 0,00123\phi - 0,00049\overline{UR} \right) \bar{H}_o$	6.10
11	$\hat{H} = \left( 0,240 + 0,424 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0014\bar{T} + 0,00132\phi \right) \bar{H}_o$	6.11
12	$\hat{H} = \left( 0,342 + 0,410 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0000072h - 0,00465\overline{Neb} \right) \bar{H}_o$	6.12
13	$\hat{H} = \left( 0,351 + 0,362 \frac{\bar{S}}{S_o} + 0,0011\bar{T} - 0,00496\overline{Neb} \right) \bar{H}_o$	6.13

Continuação da Tabela 6.3

14	$\hat{H} = \left( 0,295 + 0,412 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} + 0,000014h + 0,0012\bar{T} \right) \bar{H}_o$	6.14
15	$\hat{H} = \left( 0,277 + 0,459 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} + 0,0000048h + 0,00036\phi \right) \bar{H}_o$	6.15
16	$\hat{H} = \left( 0,325 + 0,417 \frac{\bar{S}}{\bar{S}_o} + 0,00036\phi - 0,00438\overline{Neb} \right) \bar{H}_o$	6.16
17	$\hat{H} = (0,286 + 0,0031\bar{T}) \bar{H}_o$	6.17
18	$\hat{H} = (0,507 - 0,000074h) \bar{H}_o$	6.18
19	$\hat{H} = (0,714 - 0,003\overline{UR}) \bar{H}_o$	6.19
20	$\hat{H} = (0,744 - 0,040\overline{Neb}) \bar{H}_o$	6.20
21	$\hat{H} = (0,628 - 0,0035\phi) \bar{H}_o$	6.21

onde:  $\bar{S} / \bar{S}_o \rightarrow$  fração de insolação média;  $h \rightarrow$  altitude;  $\bar{T} \rightarrow$  temperatura média;  $\phi \rightarrow$  latitude;  $\overline{Neb} \rightarrow$  Nebulosidade;  $\overline{UR} \rightarrow$  Umidade Relativa do Ar;  $\hat{H} \rightarrow$  radiação solar global horizontal estimada;  $\bar{H}_o \rightarrow$  radiação solar global horizontal extraterrestre.

Todas as equações podem ser observadas na Tabela 6.3 e os resultados da aplicação da metodologia estatística estão na Tabela A1.1. Observando a Tabela A1.1, a partir do segundo modelo, verificou-se que apenas os modelos apresentados nos índices 2, 3, 6, 9, 10, 11, 13 e 14 apresentam resultados melhores que o modelo de Ångström–Prescott. Todos os comentários de melhorias no modelo referem-se ao Erro Relativo Médio.

Os índices 17 a 22, da Tabela A1.1, representam modelos que não consideram a fração de insolação, ou seja, somente  $\bar{K}_T$  e a outra variável. Todos apresentam um Erro Relativo Médio significativamente maior que o erro do modelo de Ångström–Prescott. No entanto, destes, o modelo que correlaciona  $\bar{K}_T$  com nebulosidade é o que apresenta menor erro, ou seja, 5,39%.

Como comentário final sobre a Tabela A1.1, que tem seus índices calculados sobre todas as estações do Leste dos EUA, pode-se dizer que todos os modelos que apresentam, de alguma forma, um melhor desempenho relativo ao modelo de Ångström–Prescott, tem a variável temperatura média presente.

Na seqüência, foram desenvolvidos modelos sobre médias mensais de estações localizadas em altitudes diferentes visando regionalizar os coeficientes por intervalos de altitude. As estações foram separadas pelos seguintes intervalos de altitude: 0  $\text{H}$  150m; 151  $\text{H}$  300 m; 301  $\text{H}$  450 m; 451  $\text{H}$  670 m e um intervalo que considera todas as estações litorâneas ou próximas ao litoral localizadas até 67 m acima do nível do mar. Foram desenvolvidos os mesmos

modelos presentes na Tabela A1.1 com exceção dos que não levavam em consideração a fração de insolação. Dos intervalos, foram escolhidos para cálculos de modelos os dados do Litoral, Tabela A1.2, dados das altitudes entre 0 e 150m, Tabela A1.3. Chama-se atenção para o conjunto de dados do litoral. Uma das funções do conjunto de dados do litoral é mostrar o comportamento dos modelos diante de uma uniformidade fito-climática.

A Tabela A1.2 mostra, portanto, os modelos para todas as estações litorâneas do Leste dos EUA. Se for feita uma comparação com os coeficientes da Tabela A1.1, observa-se que todos os modelos para os dados do litoral são melhores que os modelos para todos os dados do Leste dos EUA, isto é, usando os erros relativos médios para comparação, observa-se que os modelos para o litoral são de 9,6% a 97% menores que os erros relativos médios dos modelos para todo o Leste dos EUA, sem levar em consideração diferenças de altitude. Estes percentuais foram obtidos comparando-se os erros relativos médios da Tabela A1.1 com os erros relativos médios correspondentes da Tabela A1.2. Observa-se que existe uma diminuição dos erros associados aos modelos de estimativa feitos sobre dados do litoral, ou seja, existe uma identidade regional entre estes dados.

A Tabela A1.3 apresenta o resumo da aplicação da metodologia estatística para dados entre as altitudes de 1 a 150 m. São 21 estações e 7548 médias mensais. Observa-se que os erros relativos médios dos modelos para este intervalo de altitude, que envolve todo o Leste dos EUA, com exceção das estações litorâneas, são maiores que os erros relativos médios para os modelos que foram feitos para todas as estações do Leste dos EUA (Tabela A1.1). Pode-se afirmar que, utilizando este intervalo de altitude, não se observa uma diminuição dos erros de estimativa associada aos modelos. Observa-se que nestes locais não existe uma uniformidade regional apenas por identidade de altitude.

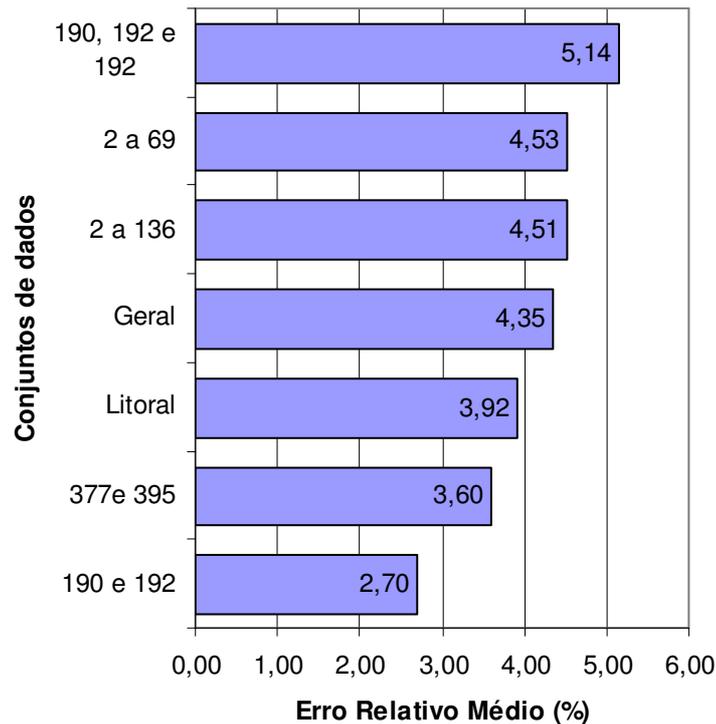
Na tentativa de melhorar os modelos, foram realizados novos cálculos de modelos que levam em consideração um intervalo de altitude ainda menor, ou seja, de 0 a 69 m. Nesta categoria encontram-se 10 estações localizadas no interior do Leste dos EUA entre altitudes de 2 a 69 m. A Tabela A1.4 mostra os modelos e o resumo dos cálculos. São apenas modelos com conjuntos de variáveis que, baseados nos cálculos anteriores, fornecem melhores resultados. Observa-se que não houve melhora significativa quanto aos erros associados aos modelos ao se diminuir a altitude das estações. É bom lembrar que estes cálculos foram feitos sobre médias mensais de estações espalhadas por todo Leste dos EUA e que não se conhece as particularidades locais de vegetação e relevo. Portanto, levar em consideração apenas altitude para regionalizar os modelos não resolve o problema de reduzir os erros de estimativa.

Em busca de melhores correlações, foram feitos cálculos de novos coeficientes dos

modelos já calculados anteriormente sobre médias mensais de estações com altitudes aproximadamente iguais. Como método de escolha destas estações, foram classificadas as estações por altitude, e escolhidas, por conveniência, no Norte do Alabama, (Ver retângulo amarelo, na Figura 6.1) as estações de Birmingham (Latitude =  $33,57^\circ$  e altitude = 190 m) e Huntsville (Latitude =  $34,65^\circ$  e altitude = 192 m), e Caribou, no norte do Maine (retângulo vermelho, na Figura 6.1 – latitude =  $46,87^\circ$  e Altitude = 190 m). As três estações totalizam 1080 médias mensais de variáveis climatológicas. A Tabela A1.5 mostra os resultados destas correlações. O que se observa é que os erros aumentaram e os coeficientes de correlação diminuíram, se comparados com a Tabela A1.1. Observa-se também uma diminuição na melhora percentual de modelos que usam a altitude em comparação ao modelo de Ångström–Prescott, isto porque para estas três estações, as altitudes são praticamente as mesmas. Este fato observado mostra que apesar das estações estarem em altitudes praticamente iguais, a separação em termos de latitude tem uma influência considerável, pois estas estações podem se localizar em micro-regiões com particularidades que merecem uma análise mais apurada. Para comprovar a idéia expressa acima, foram refeitos os cálculos para as duas estações mais próximas, Birmingham e Huntsville. Os resultados estão na Tabela A1.6. Como previsto, há uma melhora considerável nos coeficientes e diminuição dos erros associados a estimativa, concretizando a idéia de que a radiação solar que atinge a superfície terrestre é influenciada pelo relevo, particularidades como vegetação, proximidade com grandes extensões de água, neve, entre outras, isto é, existe a anisotropia, conforme citado por Mello, C. R., 2003. Mais cálculos de coeficientes dos modelos principais foram realizados, agora para duas estações próximas em distância e altitudes parecidas para um último cálculo. As cidades são Akron e Mansfield, com altitudes, 377 m e 397 m, respectivamente. Estão separadas por 6'' de latitude. A Tabela A1.7 mostra os resultados. Observa-se uma diminuição expressiva dos erros, principalmente MBE e RMSE, corroborando conclusivamente sobre a influência regional de fenômenos físicos sobre a radiação solar global.

Retornando aos resultados da Tabela A1.1, na coluna  $\epsilon_{Rel}$ , observa-se também que os quatro últimos modelos lineares simples, desconsiderando a fração de insolação são impraticáveis. Merece uma observação o modelo que leva em consideração apenas a nebulosidade e  $\bar{K}_T$ . Na falta de dados de insolação poderia se considerar o seu uso. No entanto, deve-se considerar o fato de que, se possível, o uso de modelos regionalizados aumentaria o grau de confiança das estimativas.

A Figura 6.3 faz uma comparação gráfica dos resultados dos modelos de Ångström–Prescott para cada uma das divisões dos dados citados anteriormente.



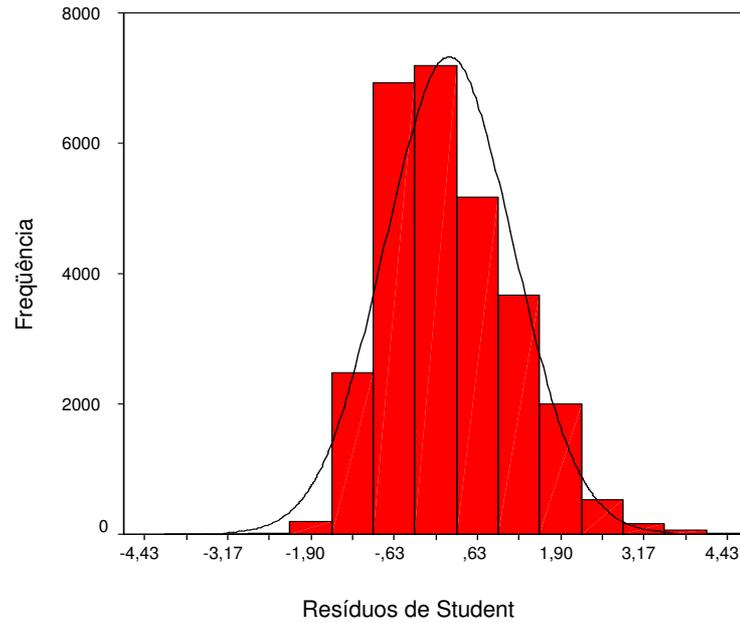
**Figura 6.3** Distribuição dos erros relativos médios para o modelo de Ångström–Prescott para os conjuntos de dados descritos anteriormente no texto.

Para validar o modelo de regressão linear de Ångström–Prescott, foram testados todos os pressupostos da análise de resíduos para a correlação linear simples entre  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S} / \bar{S}_0$ .

O pressuposto da normalidade foi testado observando-se os *resíduos de Student* em um gráfico de distribuição de frequências. O resultado pode ser observado na Figura 6.4. Pode-se perceber uma distribuição aproximadamente normal.

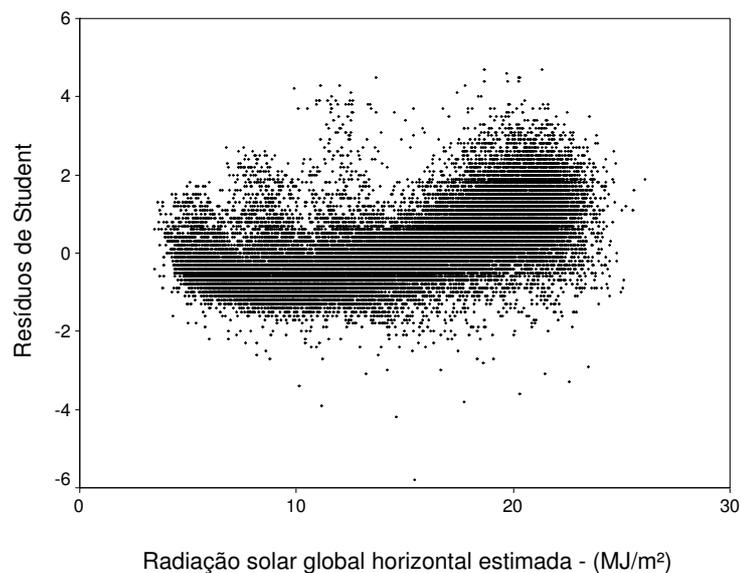
O pressuposto da homocedasticidade foi avaliado através da análise dos resíduos representando-se graficamente os *resíduos de Student em função de valores de radiação solar global horizontal estimada*. A avaliação é qualitativa. A Figura 6.5 mostra que o padrão de pontos não é o esperado, ou seja, parece existir uma certa tendência, isto é, o esperado seria uma nuvem de pontos em torno do eixo zero dos *resíduos de Student*, mas o que se vê é uma espécie de curva disforme que poderia ser interpretada como a existência da sazonalidade dos dados. Como esta tendência não aparece claramente, pode-se dizer que o pressuposto da homocedasticidade não está sendo completamente violado.

O pressuposto da *independência dos erros* foi avaliado mostrando-se graficamente os Resíduos de *Student* em ordem cronológica. A Figura 6.6 mostra a distribuição dos pontos indicando violações no pressuposto, ou seja, exibem o efeito da autocorrelação que fere o princípio da independência dos erros. Observa-se claramente o efeito da sazonalidade sobre os dados.

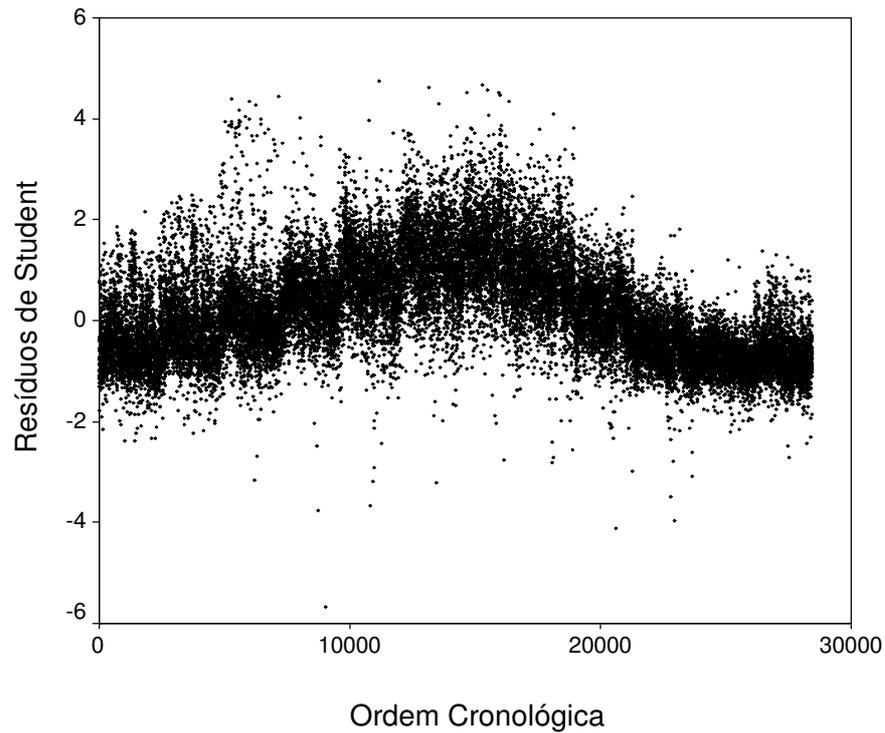


**Figura 6.4** Distribuição aproximadamente normal dos resíduos de Student para a correlação linear simples entre  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S} / \bar{S}_0$ .

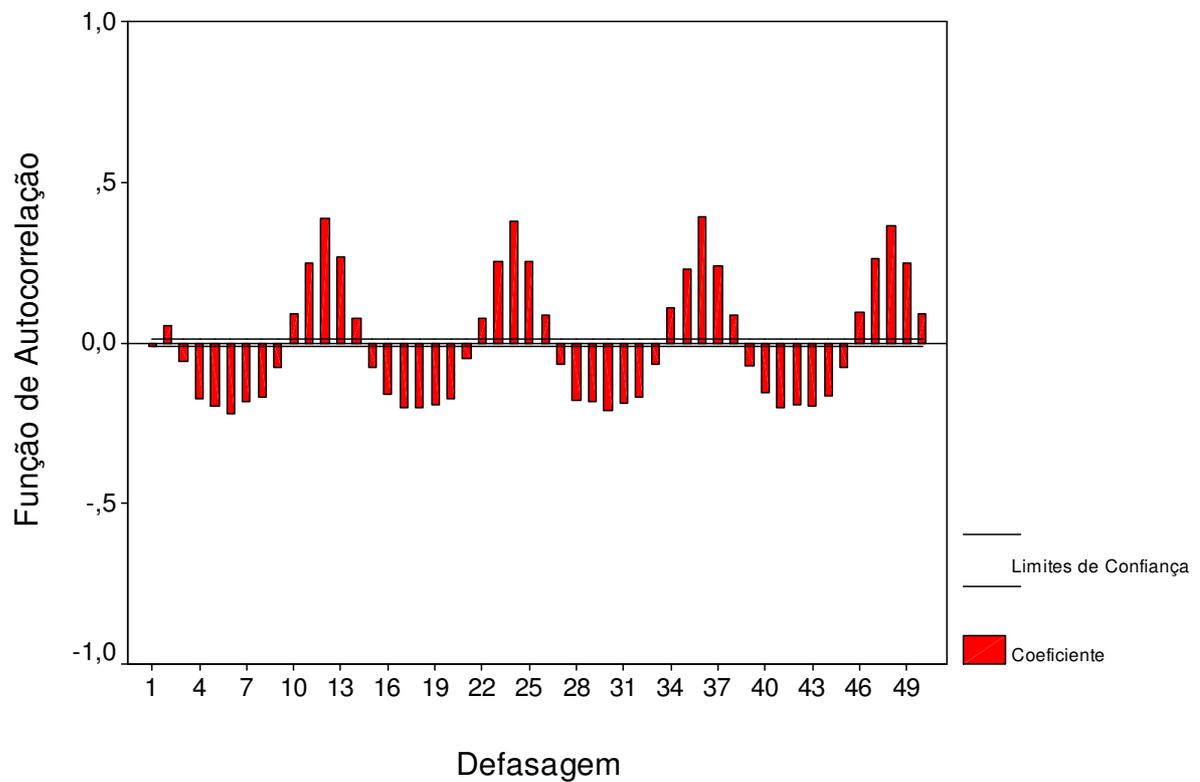
Para aprofundar a análise da violação do pressuposto da *independência dos erros* utilizou-se um programa estatístico para fazer uma análise de série temporal a fim de detectar sazonalidade, devido às características da distribuição da energia solar sobre o planeta. A Figura 6.7 mostra claramente a sazonalidade existente nos dados, o que compromete a previsão realizada pelo método da regressão linear. Não levar em consideração a sazonalidade não invalida o método da regressão linear, no entanto diminui a precisão do modelo.



**Figura 6.5** Distribuição dos *resíduos de Student* em função da radiação solar global horizontal estimada. Dados mensais.



**Figura 6.6** Distribuição dos *resíduos de Student* em ordem cronológica. A ordem cronológica indica que as estações de coleta têm suas médias ordenadas mês a mês, a partir de Janeiro. Dados de todo o Leste dos EUA.



**Figura 6.7** Distribuição dos coeficientes de autocorrelação para os 50 primeiros *resíduos de Student*.

### 6.1.2. Regressão Linear Simples utilizando os Arquivos Mensais

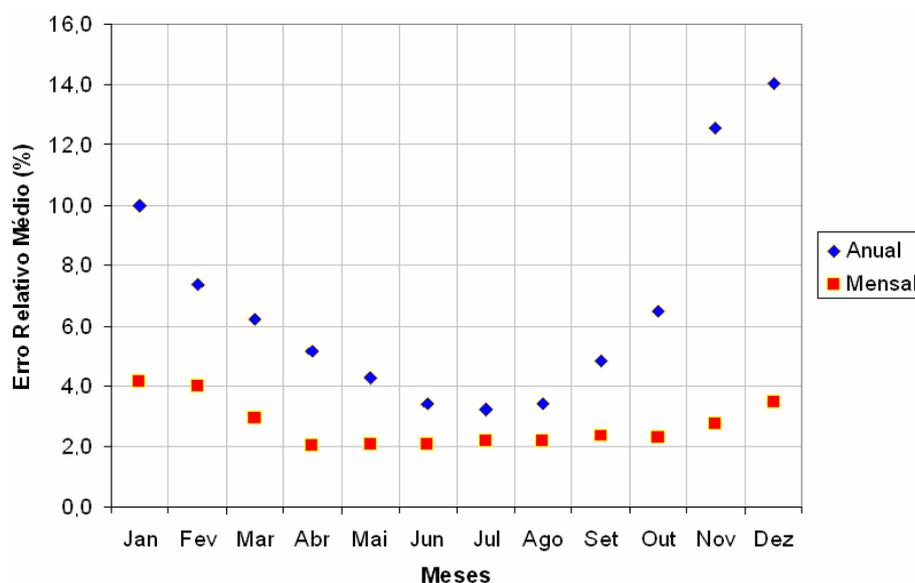
A observação da sazonalidade presente nos dados para coeficientes  $a$  e  $b$  únicos para o ano todo exige um tratamento estatístico de séries temporais a fim de que a influência da sazonalidade seja suprimida ou minimizada e o ajuste do modelo de regressão seja otimizado. No entanto, tal tratamento mostrou-se complexo devido a grande variação espacial e temporal envolvida. Na tentativa de reduzir a influência da sazonalidade, vários modelos desenvolvidos e apresentados nas Tabelas A1.1 até A1.7, foram agora testados para dados de cada mês no lugar dos dados para todo o ano. Foram testados os modelos para os meses de Janeiro (Inverno) e Julho (Verão), para as estações do litoral Leste dos EUA. São 600 médias mensais para cada um dos meses, envolvendo 20 estações. As Tabelas A1.8 e A1.9 mostram os resultados destes modelos. Observa-se uma redução significativa dos erros de estimativa associados aos modelos, quando comparados com todos os modelos anteriormente analisados.

Foram também determinados os coeficientes da Equação de Ångström-Prescott para valores mensais para todos os dados do Leste dos EUA. A Tabela 6.4 mostra estes coeficientes e erros de estimativa obtidos no processo de validação. As correlações entre  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_0$ , corroborando com os resultados apresentados nas Tabelas A1.8 e A1.9, mostram que modelos de regressão linear, mesmo simples, apresentam-se melhores que os mesmos modelos desenvolvidos para todos os dados do ano. Observam-se nitidamente melhoras nos coeficientes de determinação mensais, com exceção dos meses de Janeiro e Fevereiro que tiveram este coeficiente menor do que o mesmo para o modelo geral. No entanto, todos os erros foram menores. Comparando-se os resultados das Tabelas A1.8 e A1.9 com os resultados da Tabela 6.4 pode-se concluir que utilizando-se conjuntos de dados regionalizados, isto é, dados identificados com as particularidades de uma região, os resultados são muito melhores. Para esclarecer melhor a Tabela 6.4, a primeira linha corresponde aos coeficientes para a Equação de Ångström-Prescott aplicados a todos os dados do Leste dos EUA. Os coeficientes  $a$  e  $b$  únicos para o ano todo foram aplicados a todos os dados do ano.

Os coeficientes  $a$  e  $b$  únicos para todo o ano foram também aplicados para os dados separados por mês. O Erro Relativo Médio está representado no gráfico da Figura 6.8. Novamente se observa a diminuição do erro dos modelos com coeficientes mensais.

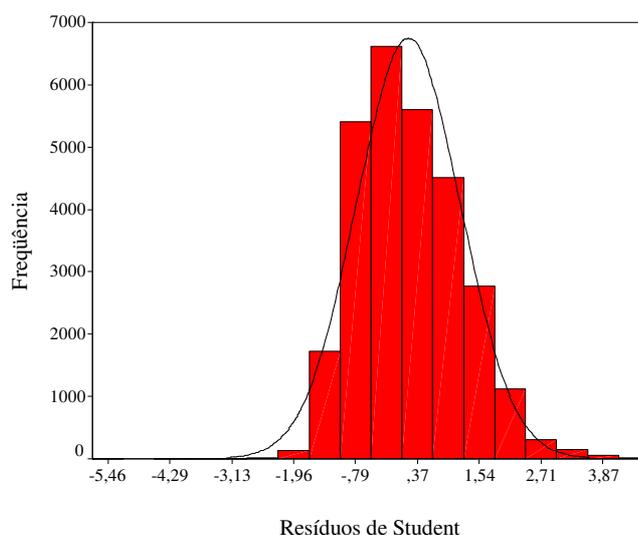
Por sorteio aleatório simples o mês de Julho foi escolhido para uma análise de resíduos. Os dados para esta análise são de todo o território Leste dos EUA.

O pressuposto da normalidade foi testado observando-se os *resíduos* em um gráfico de distribuição de freqüências. O resultado pode ser observado na Figura 6.9. Pode-se perceber uma distribuição aproximadamente normal e comparando com a Figura 6.3 observa-se uma maior aproximação com a distribuição normal no caso da distribuição mensal.



**Figura 6.8** Resultado da aplicação do Erro Relativo Médio para a Equação de Ångström–Prescott calculada com coeficientes mensais e anuais.

A Figura 6.10 é um gráfico de dispersão entre valores médios mensais de radiação solar global horizontal estimada e os Resíduos de *Student*. Demonstra-se claramente que o pressuposto da homocedasticidade é satisfeito, pois não se percebe nenhuma tendência nos pontos, se comparados com a Figura 6.5.



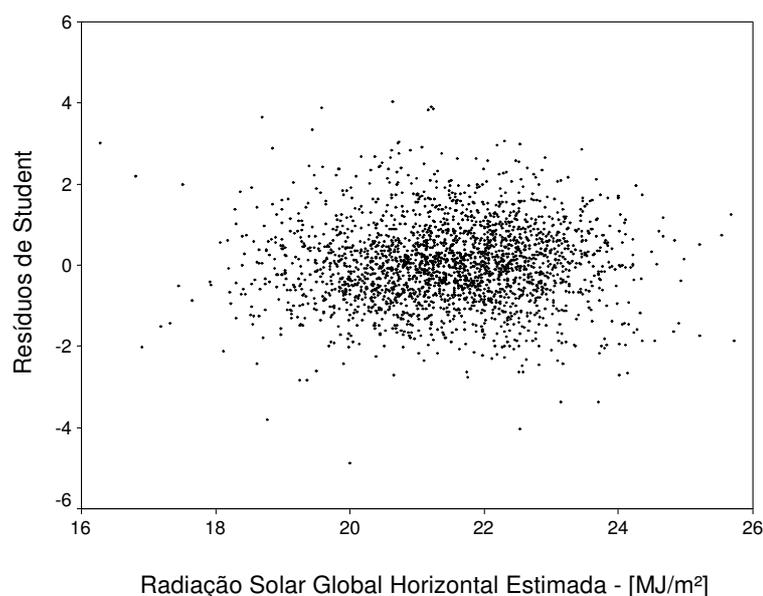
**Figura 6.9** Distribuição aproximadamente normal dos resíduos de *Student* para a correlação linear simples entre  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S} / \bar{S}_0$  do mês de Julho.

**Tabela 6.4** Valor (es) anual e mensais dos coeficientes  $a$  e  $b$ , coeficientes de determinação  $r^2$ , desvio relativo médio de estimativa e erro relativo entre estimativa (s) anual e mensais. Estes dados levam em consideração apenas a correlação linear simples entre  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S} / \bar{S}_0$ .

Período	$r$	$r^2$	$a$	$b_5$	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel} (\%)$	$MBE$	$RMSE$	$S_{YX}$
Geral <sup>1</sup>	0,880	0,775	0,296	0,450	0,0435	-	-0,150	0,730	0,026
Jan <sup>2</sup>	0,845	0,715	0,329	0,331	0,0416	4,37	0,015	0,393	0,025
Fev	0,848	0,718	0,337	0,351	0,0402	7,59	0,023	0,544	0,027
Mar	0,897	0,804	0,321	0,402	0,0292	32,87	0,010	0,595	0,022
Abr	0,963	0,927	0,299	0,463	0,0203	53,33	0,019	0,491	0,014
Mai	0,943	0,889	0,304	0,464	0,0207	52,41	-0,019	0,554	0,014
Jun	0,925	0,856	0,305	0,475	0,0206	52,64	-0,024	0,585	0,014
Jul	0,909	0,827	0,318	0,452	0,0214	50,80	-0,011	0,596	0,015
Ago	0,901	0,812	0,307	0,462	0,0218	49,89	0,005	0,551	0,015
Set	0,932	0,869	0,289	0,479	0,0234	46,21	0,093	0,466	0,015
Out	0,962	0,935	0,264	0,485	0,0232	46,67	-0,030	0,367	0,015
Nov	0,971	0,942	0,269	0,442	0,0274	37,01	-0,003	0,289	0,015
Dez	0,932	0,869	0,295	0,374	0,0345	20,69	0,003	0,289	0,020

<sup>1</sup> 28840 médias mensais.

<sup>2</sup> 2370 médias mensais.



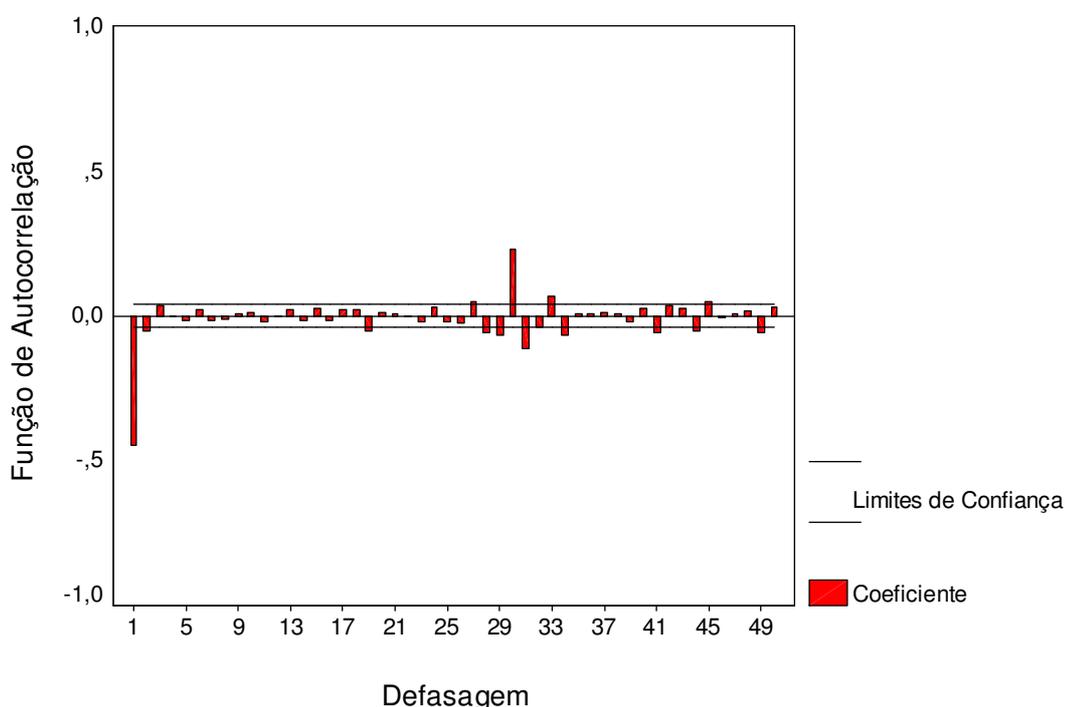
**Figura 6.10** Distribuição dos *Resíduos de Student* em função da radiação solar global horizontal estimada para o mês de Julho.

Continuando com a análise da violação do pressuposto da *Independência dos Erros* utilizou-se um programa estatístico para fazer uma análise de série temporal a fim de detectar sazonalidade. A Figura 6.11 mostra claramente a diminuição na sazonalidade existente nos dados, se comparado com a Figura 6.7.

Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a correlação a um nível de significância de 5%, para os valores de Julho, obtiveram-se os valores  $t_{crít} = 0,48$  e  $t_{calc} = 90,158$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0: \rho = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de correlação entre as va-

riáveis  $\bar{K}_t$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a regressão a um nível de significância de 5%, para os valores de Julho, obtiveram-se os valores  $t_{crit} = 0,48$  e  $t_{calc} = 13,862$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0: \beta = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de regressão entre as variáveis  $\bar{K}_t$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ .

Para concluir a análise estatística dos dados mensais pode-se perceber que existem fortes indícios a favor do uso de coeficientes  $a$  e  $b$  mensais no lugar de coeficientes  $a$  e  $b$  únicos para o ano todo. A provável explicação para este fato é a de que a sazonalidade mensal é menor que a anual.



**Figura 6.11** Distribuição dos coeficientes de autocorrelação para os 50 primeiros resíduos de *Student* do mês do Julho.

### 6.1.3. Correlação entre $\bar{K}_T$ e Nebulosidade

Foi realizada uma análise estatística da correlação entre  $\bar{K}_T$  e Nebulosidade. A Tabela 6.5 mostra os resultados dessas correlações. Observa-se uma melhora nos coeficientes de determinação em todos os meses, com diminuição dos valores do erro relativo, MBE e RMSE em todos os meses. Mais uma vez se comprova a idéia de que coeficientes mensais eliminam parcialmente o efeito da sazonalidade. A equação de regressão para coeficientes únicos para o ano todo tem a forma:

$$\hat{H} = (0,744 - 0,0399 \cdot \bar{Neb}) \bar{H}_o \quad (6.22)$$

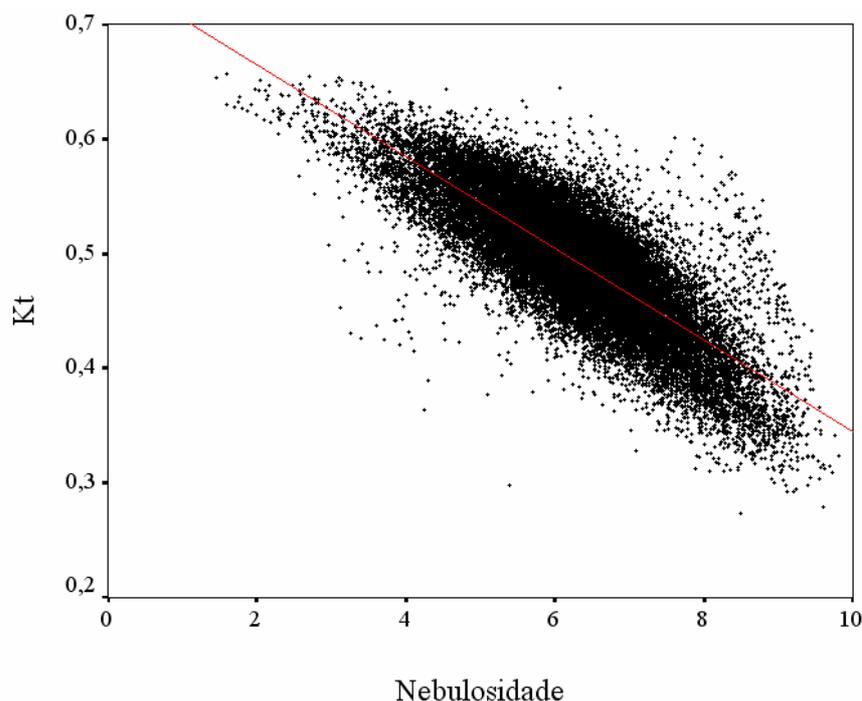
A Figura 6.12 mostra o diagrama de dispersão para os dados de  $K_T$  e nebulosidade.

A Figura 6.13 mostra a distribuição de freqüências para a variável nebulosidade. A variável tem distribuição normal.

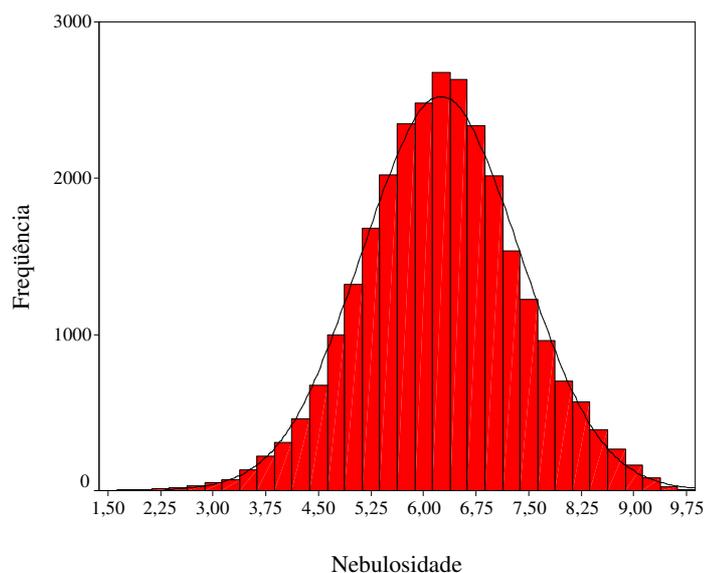
A Figura 6.14 mostra o diagrama de dispersão entre os valores mensais medidos da radiação global e os valores estimados a partir da nebulosidade.

**Tabela 6.5** Valores anuais e mensais dos coeficientes  $a$  e  $b$ , coeficientes de determinação  $r^2$ , desvio relativo médio de estimativa e erro relativo entre estimativa ( $s$ ) anual e mensais. Estes dados levam em consideração apenas a correlação linear simples entre  $\bar{K}_T$  e nebulosidade.

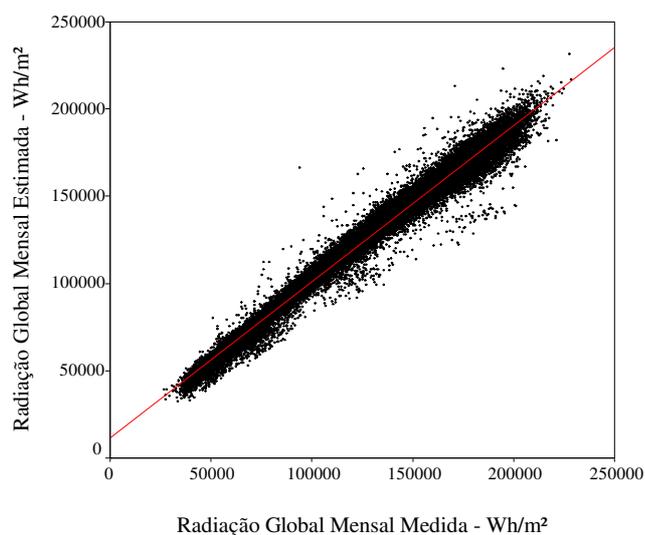
Período	$r$	$r^2$	$a$	$b_5$	$\bar{\varepsilon}_{Rel}$	$\varepsilon_{rel}(\%)$	$MBE$	$RMSE$	$S_{YX}$
Geral <sup>1</sup>	0,807	0,651	0,744	-0,0399	0,0539	-	0,195	0,948	0,0330
Jan <sup>2</sup>	0,806	0,649	0,685	-0,0336	0,0468	12,96	0,007	0,461	0,0281
Fev	0,819	0,671	0,725	-0,0366	0,0442	18,52	-0,019	0,612	0,0290
Mar	0,841	0,707	0,754	-0,0395	0,0397	25,93	-0,013	0,756	0,0269
Abr	0,884	0,781	0,771	-0,0422	0,0347	35,19	0,015	0,864	0,0241
Mai	0,843	0,711	0,758	-0,0389	0,0332	38,89	-0,016	0,899	0,0223
Jun	0,818	0,669	0,746	-0,0362	0,0314	42,59	0,006	0,893	0,0212
Jul	0,812	0,660	0,733	-0,0338	0,0300	44,44	0,001	0,840	0,0206
Ago	0,808	0,652	0,723	-0,0335	0,0295	46,30	-0,011	0,759	0,0202
Set	0,848	0,719	0,718	-0,0358	0,0322	40,74	0,010	0,695	0,0214
Out	0,917	0,842	0,712	-0,0381	0,0315	42,59	0,022	0,557	0,0214
Nov	0,932	0,868	0,724	-0,0424	0,0388	27,78	0,024	0,460	0,0231
Dez	0,888	0,789	0,700	-0,0389	0,0457	14,81	0,017	0,401	0,0253



**Figura 6.12** Diagrama de dispersão dos pontos entre  $K_T$  e nebulosidade.



**Figura 6.13** Distribuição de frequências da variável nebulosidade.



**Figura 6.14** Comparação dos dados de radiação global medidos com dados de radiação solar estimados a partir da nebulosidade.

## 6.2. RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE MODELOS PESQUISADOS NA LITERATURA

As descrições de desempenho de algumas equações, utilizadas por pesquisadores referem-se a aplicação das mesmas sobre 7200 médias mensais de localidades no litoral e próximos deste, no Leste dos EUA. Estes dados foram escolhidos porque, certamente correspondem a uma área com afinidades climatológicas. Todas as comparações devem ser feitas com os dados contidos na Tabela A1.2. Um valor negativo de M.B.E indica que o modelo está, na média, subestimando o valor da radiação. A Tabela 6.6 mostra o resumo destes modelos.

Aplicando-se a Equação 1.6, que correlaciona  $\bar{K}_T$  com fração de cobertura de nuvens, aos dados citados acima, obtiveram-se resultados bem inferiores aos obtidos pela Equação de Ångström–Prescott. Os erros obtidos na validação foram: Erro Relativo Médio  $\bar{\epsilon}_{Rel}$ : 0,1446; M.B.E. de  $-2,2314$  MJ/m<sup>2</sup> e RMSE de  $3,1637$  MJ/m<sup>2</sup>.

Tendo como base a idéia de Glover e McCulloch, Equação 1.8, foi desenvolvida neste trabalho uma equação de regressão linear múltipla que correlaciona  $\bar{K}_T$  com o cosseno da latitude e com a fração de insolação. A equação, válida somente para as estações do litoral do Leste dos EUA, tem a forma:  $\hat{H} = \bar{H}_o(0,310 + 0,415(\bar{S}/\bar{S}_o)) - 0,0007354\cos(\phi)$ . Os resultados obtidos foram ligeiramente melhores que os obtidos pela Equação 1.2 de Ångström–Prescott, mas ligeiramente inferiores aos resultados obtidos pela mesma relação levando em conta a latitude e não o cosseno da latitude (Linha 7 da Tabela A1.2). Os erros obtidos na validação foram: Relativo  $\bar{\epsilon}_{Rel}$  0,0392; M.B.E. de  $-0,1575$  MJ/m<sup>2</sup> e RMSE de  $0,73777$  MJ/m<sup>2</sup>.

**Tabela 6.6** Comparação dos erros de estimativa de alguns modelos desenvolvidos por pesquisadores e aplicados aos dados das estações litorâneas do Leste dos Estados Unidos da América.

Modelo	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE	RMSE
Ångström–Prescott	0,0392	-	-0,17	0,74
Equação 1.6 - Black	0,1446	-268,88	-2,23	3,16
Equação 1.8 - Glover e McCulloch	0,0392	0,00	-0,16	0,74
Equação 1.10 - Bennett	0,1680	-328,57	-2,87	3,30
Equação 1.38 - Riedveld	0,0683	-74,23	-1,03	1,54
Equações 1.44 e 1.45 - Şen	0,0406	-3,57	-0,15	0,79

A Equação 1.10 de Bennett mostrou resultados bem inferiores, quando comparados com os resultados da Equação 1.2 de Ångström–Prescott. O coeficiente de correlação ficou em 0,733 e o de determinação,  $r^2$ , ficou em 0,537 com um erro padrão de estimativa de 0,03164. Na validação observaram-se os erros: Relativo  $\bar{\epsilon}_{Rel}$  é 0,168; M.B.E de  $-2,865$  MJ/m<sup>2</sup> e RMSE de  $3,301$  MJ/m<sup>2</sup>.

A Equação 1.13 de Bennett, observando-se a Tabela A1.2, índice 4, não mostrou melhora nos resultados em comparação com a Equação de Ångström–Prescott.

Aplicando-se a Equação 1.38 de Riedveld, equação com coeficientes descritos para o mundo todo, observou-se os seguintes erros na validação: Relativo  $\bar{\epsilon}_{Rel}$  é 0,0683; M.B.E. de  $-1,03$  MJ/m<sup>2</sup> e RMSE de  $1,539$  MJ/m<sup>2</sup>. Estes valores estão bem acima dos valores da Equação de Ångström–Prescott.

Aplicando-se a técnica do método irrestrito de Şen, Equações 1.44 e 1.45, aos dados do litoral Leste dos Estados Unidos, verificou-se que, para esta quantidade de dados, os

resultados não foram conclusivos em relação aos da Equação de Ångström–Prescott. Observaram-se os seguintes erros na validação: Relativo  $\bar{\epsilon}_{Rel}$  e 0,0406; M.B.E. de  $-0,154 \text{ MJ/m}^2$  e RMSE de  $0,7859 \text{ MJ/m}^2$ . Somente o erro M.B.E. ficou inferior ao do modelo de Ångström–Prescott.

### 6.3. CONCLUSÕES E DIRECIONAMENTO PARA APLICAÇÃO NO RIO GRANDE DO SUL

Por dificuldades de se obter um mapa de distribuição vegetal dos Estados Unidos da América, uma única região, com afinidades geográficas, climatológicas e de vegetação foi analisada. Foi a região litorânea. Com esta análise foi possível concluir que se os modelos levarem em consideração as particularidades regionais, serão obtidas equações de estimativa mais precisas. Este fato é concordante com inúmeras conclusões presentes na literatura.

Outra conclusão obtida é a de que modelos de regressão linear múltiplo que levem em consideração a temperatura média são melhores, isto é, apresentam menores erros de estimativa associados. A temperatura média associada com outras variáveis pode produzir modelos com erros menores ainda, no entanto, a melhoria não justifica o uso de várias variáveis no modelo, com exceção da umidade relativa. Portanto, um modelo que leve em consideração  $\bar{K}_t$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$ , Temperatura média e Umidade Relativa, dados fáceis de serem obtidos, apresenta-se como o ideal para ser aplicado aos dados do Rio Grande do Sul.

Deste trabalho de análise, conclui-se ainda, que modelos mensais têm erros de estimativa associados menores que um único modelo anual. Portanto, esta conclusão poderá ser aplicada aos dados do Rio Grande do Sul.

### 6.4 ANÁLISE DOS DADOS DOS BANCOS DE DADOS DO RIO GRANDE DO SUL

Como já comentado anteriormente, uma das dificuldades na previsão da radiação solar é a precisão dos equipamentos de medidas de radiação solar e de insolação. O equipamento utilizado no Rio Grande do Sul para a medida da Radiação Solar é o actinógrafo tipo bimetálico – FUES (1,5 m s.n.s) e para a medida da Insolação utiliza-se o heliógrafo tipo Cambell-Stokes (1,5 m s.n.s.), segundo IPAGRO, 1989.

Nesta seção foram utilizados dados fornecidos pela FEPAGRO, INMET e disponíveis na rede mundial de computadores pela UFPel/EMBRAPA/INMET. A Tabela 6.7 mostra a lista de estações de coleta utilizadas bem como a relação das variáveis disponíveis para cada estação. A Figura 6.15 mostra a distribuição das estações.

Os dados disponibilizados digitalizados e gratuitamente pela FEPAGRO, perfazem 15 estações. Conforme a Tabela 6.7, cuja fonte é a FEPAGRO, a maioria das estações disponibilizam dados de insolação, radiação global, umidade relativa e temperatura média. Os dados de insolação estavam registrados como totais diários de horas e décimos para cada dia do mês para cada estação. A radiação global estava registrada em ly/dia divididos por 10. Algumas das estações tiveram seus dados fornecidos como médias mensais.

**Tabela 6.7** Relação das estações de coleta de dados disponibilizadas pela FEPAGRO, INMET, UFPel/EMBRAPA/INMET.

Estação	Insolação (horas e décimos)	Radiação (ly/dia)	UR (%)	T <sub>méd</sub> (°C)	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Intervalo de Tempo (anos)
<b>Fonte: FEPAGRO</b>								
Alegrete	X	X	X	X	29°46'59"	55°46'59"	96	1968-86
Bajé	X	X	-	-	31°20'13"	54°06'21"	214	1961-84
Cachoeirinha	X	X	X	X	29°57'36"	51°04'22"	4	1975-01
Cruz Alta	X	X	X	X	28°38'21"	53°36'34"	473	1973-01
Encruz. Do Sul	X	X	X	X	30°32'35"	52°31'20"	420	1958-99
Erechim	X	X	X	X	27°37'46"	52°16'33"	760	1966-91
Farroupilha	X	X	X	X	29°14'30"	51°26'20"	702	1963-96
Julio de Castilhos	X	X	X	X	29°13'26"	53°40'45"	514	1956-86
Maquiné	X	X	X	X	29°40'49"	50°13'56"	32	1958-97
Quaraí	X	X	X	X	30°23'17"	56°26'53"	100	1966-01
S. do Livramento	X	X	X	X	30°53'18"	55°31'56"	210	1966-81
Santa Rosa	X	X	X	X	27°51'50"	54°25'59"	360	1975-01
São Borja	X	X	X	X	28°39'44"	56°00'15"	99	1956-01
Taquari	-	X	-	-	29°48'15"	51°49'30"	76	1963-01
Veranópolis	X	-	-	-	28°56'14"	51°33'11"	705	1956-90
<b>Fonte: UFPel/EMBRAPA/INMET</b>								
Pelotas	X	X	X	X	31°28'12"	52°15'00"	13	1971-00
<b>Fonte: INMET</b>								
Bento Gonçalves	X	-	-	-	29°10'12"	51°25'12"	672	1976-85
Bom Jesus	X	-	-	-	28°40'12"	50°28'36"	1047	1979-78
Iraí	X	-	-	-	27°12'00"	53°13'48"	222	1975-85
Passo Fundo	X	-	-	-	28°15'36"	52°24'36"	667	1970-87
Porto Alegre	X	-	-	-	30°18'00"	51°13'12"	10	1970-85
Santa Maria	X	-	-	-	29°42'36"	53°48'36"	95	1976-85
Santa V. do Palmar	X	-	-	-	33°31'12"	53°21'36"	5	1973-87
Uruguaiana	X	-	-	-	29°45'36"	57°5'24"	74	1973-83

Foi necessário desenvolver um programa de computador para processar os dados e, convertê-los em médias mensais dadas em horas e décimos e radiação global em MJ/m<sup>2</sup>. O programa também gerou a radiação global extraterrestre média mensal,  $\bar{H}_o$ , o comprimento médio mensal do dia,  $\bar{S}_o$ , além de calcular o  $\bar{K}_T$  médio mensal e a fração de insolação,  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . Posteriormente foram acrescentados aos arquivos os dados de umidade relativa e temperatura média.

A estação de Pelotas apresenta dados médios mensais de insolação, radiação global, umidade relativa e temperatura média.

As estações do INMET têm somente dados de insolação e serão utilizados para a aplicação dos modelos de regressão e conseqüente estimativa da radiação solar global horizontal para estes lugares.

Após processamento preliminar observou-se que os dados da estação Veranópolis, da FEPAGRO, não poderiam ser utilizados porque o número médio de horas de brilho de Sol, em sua maioria, era maior que a duração do dia.

Conforme observado na Tabela 6.7, das estações fornecidas pela FEPAGRO apenas duas, Taquari e Veranópolis, não tinham dados de insolação, umidade relativa e temperatura média. A estação de Bagé não tinha dados de umidade relativa e temperatura média.

Para dar início ao trabalho estatístico sobre os dados do Rio Grande do Sul foram desenvolvidos modelos de regressão simples (Ångström–Prescott) e múltiplos, levando em consideração a fração de insolação, a temperatura média e a umidade relativa para cada uma das estações com todos os dados disponíveis. Para fins de elucidação, foram feitos testes piloto com os dados de Pelotas, correlacionando nos modelos de regressão linear múltiplos, ora a temperatura média ora a temperatura máxima média. Como os modelos com temperatura média foram melhores, descartou-se o uso da temperatura máxima média.

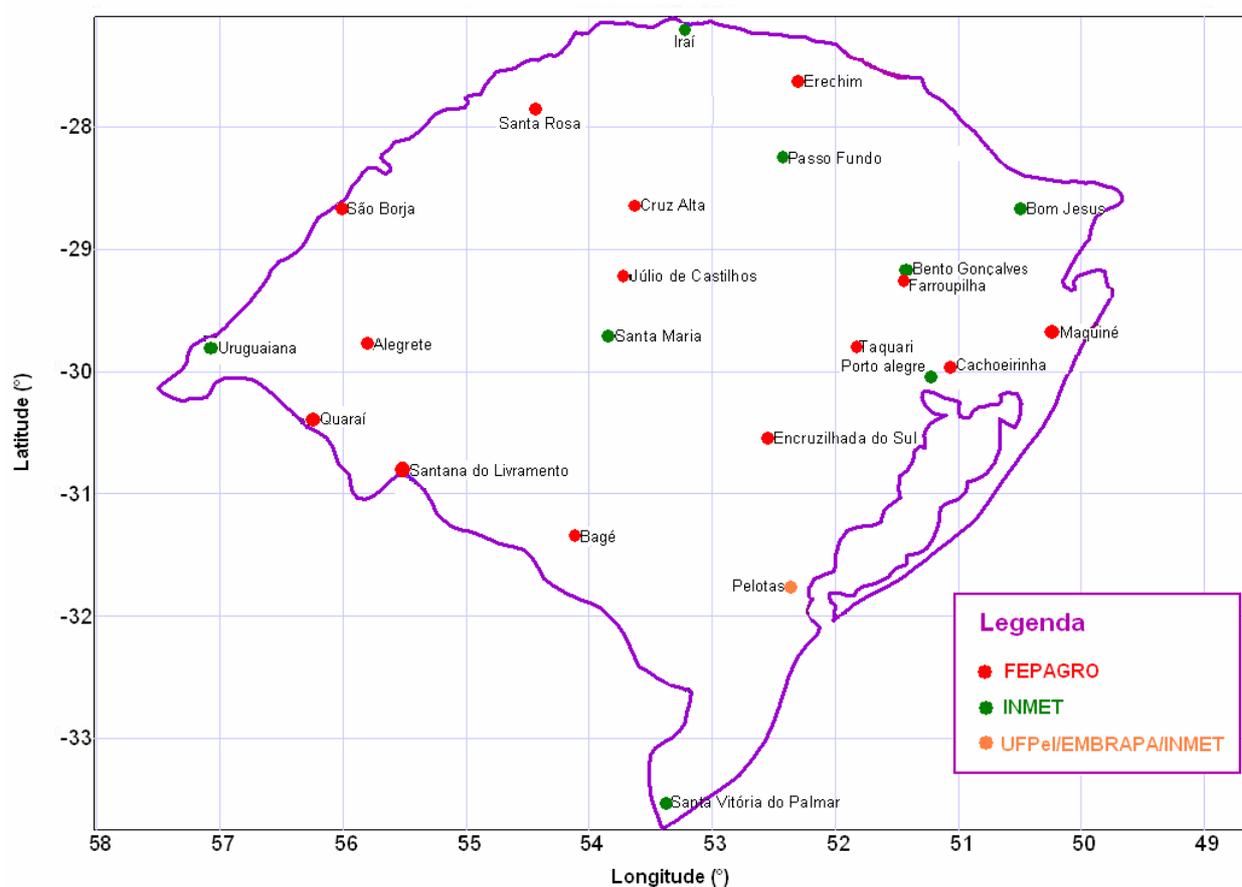
A Tabela 6.8 relaciona todas as estações bem como seus coeficientes estatísticos e resultados da validação aplicada sobre os próprios dados que geraram os coeficientes. O que se observa é que para a maioria das estações, os modelos que utilizam fração de insolação, temperatura média e/ou a umidade relativa são melhores que o modelo de Ångström–Prescott.

Na validação para o caso do Rio Grande do Sul, os modelos estatísticos foram aplicados sobre todos os dados oriundos de todas as estações.

Como sugestão do estudo dos modelos estatísticos para o Leste dos Estados Unidos está o fato de que se forem regionalizados os modelos, isto é, um modelo para cada região com particularidades fito-climáticas, os erros relacionados aos modelos diminuirão, aumentando a precisão dos dados estimados.

De acordo com Moreira, 2003, o Rio Grande do Sul pode ser classificado em 4 regiões de vegetação natural: a) Campos; b) Mata subtropical; c) Mata dos Pinhais; d) Vegetação litorânea. A Figura 6.16 mostra um mapa do Rio Grande do Sul com a distribuição destas regiões.

Outra classificação, ainda de acordo com Moreira, 2003, leva em consideração a homogeneidade física entre outros fatores. O Rio Grande do Sul fica dividido em: a) região de Porto Alegre; b) região do Planalto; c) região da Campanha; d) região da Depressão Central e e) região do Litoral. A Figura 6.17 mostra esta divisão física.



**Figura 6.15** Distribuição das estações e respectivas fontes de dados do Rio Grande do Sul.

(Mapa: Projeção cilíndrica equatorial)

Optou-se, neste trabalho, por adotar o modelo regional da Figura 6.17 para separar as estações e calcular os coeficientes regionais anuais para os modelos de regressão linear simples e múltiplo. O modelo regional físico leva mais em consideração o relevo enquanto o modelo regional da Figura 6.16 leva em consideração a vegetação.

Neste trabalho nem todas as regiões tem estações meteorológicas com dados disponíveis. A seguir estão citadas as regiões e as correspondentes estações com dados disponíveis.

**Tabela 6.8** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos foram

feitos sobre as médias mensais do ano todo. Fonte dos dados: FEPAGRO.

$i$	$N$	$r$	$r^2$	$a$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	$MBE^*$	$RMSE^*$	$S_{YX}$
<b>Erechim – Radiação Média Mensal Anual – 14,98 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	240	0,462	0,213	0,257	0,414	-	-	0,1321	-	0,412	2,413	0,077
2	240	0,604	0,365	0,405	0,490	-0,01017	-	0,1210	8,40	0,097	2,195	0,070
3	240	0,495	0,245	0,460	0,342	-	-0,0023	0,1268	4,01	0,364	2,335	0,076
4	240	0,630	0,397	0,611	0,417	-0,01020	-0,0023	0,1177	10,90	0,106	2,144	0,068
<b>Cachoeirinha – Radiação Média Mensal Anual – 15,01 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	313	0,480	0,230	0,308	0,358	-	-	0,0921	-	0,339	2,630	0,059
2	313	0,660	0,436	0,385	0,531	-0,00829	-	0,0754	18,13	0,102	2,154	0,052
3	313	0,535	0,287	-0,063	0,500	-	0,0039	0,0879	4,56	0,242	2,502	0,059
4	313	0,666	0,443	0,236	0,573	-0,00769	0,0015	0,0751	18,46	0,068	2,128	0,052
<b>Santa Rosa – Radiação Média Mensal Anual – 14,36 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	276	0,395	0,156	0,299	0,293	-	-	0,1169	-	0,208	1,911	0,069
2	276	0,478	0,229	0,372	0,369	-0,00539	-	0,1150	1,63	0,053	1,893	0,066
3	276	0,397	0,157	0,331	0,280	-	0,0003	0,1167	0,17	0,213	1,910	0,066
4	276	0,485	0,235	0,462	0,338	-0,00568	-0,0009	0,1151	1,54	0,072	1,890	0,066
<b>Cruz Alta – Radiação Média Mensal Anual – 15,52 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	266	0,521	0,572	0,271	0,408	-	-	0,1080	-	0,230	4,218	0,069
2	266	0,569	0,324	0,326	0,465	-0,00442	-	0,1071	0,83	0,110	4,108	0,063
3	266	0,532	0,283	0,174	0,447	-	0,0010	0,1004	7,04	0,225	4,796	0,064
4	266	0,573	0,328	0,261	0,487	-0,00419	0,0006	0,1072	0,74	0,109	4,111	0,062
<b>Farroupilha – Radiação Média Mensal Anual – 13,67 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	310	0,406	0,165	0,298	0,288	-	-	0,1087	-	0,252	1,789	0,060
2	310	0,503	0,253	0,362	0,344	-0,00534	-	0,1014	6,72	0,087	1,770	0,057
3	310	0,455	0,207	-0,033	0,383	-	0,0036	0,1055	2,94	0,178	1,766	0,058
4	310	0,517	0,268	0,147	0,396	-0,00464	0,0022	0,1002	7,82	0,068	1,755	0,056

Continuação da Tabela 6.8.

i	N	r	r <sup>2</sup>	a	b <sub>1</sub> <sup>1</sup>	b <sub>2</sub> <sup>2</sup>	B <sub>3</sub> <sup>3</sup>	$\bar{\epsilon}_{ReL}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE*	RMSE*	S <sub>YX</sub>
<b>Júlio de Castilhos – Radiação Média Mensal Anual – 14,68 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	402	0,373	0,139	0,252	0,386	-	-	0,1843	-	0,247	2,979	0,097
2	402	0,415	0,172	0,286	0,504	-0,00548	-	0,1844	-0,05	0,110	2,974	0,095
3	402	0,412	0,170	-0,125	0,557	-	0,0037	0,1805	2,06	0,206	2,943	0,095
4	402	0,442	0,196	-0,054	0,644	-0,00493	0,0033	0,1806	2,01	0,066	2,937	0,094
<b>Maquiné – Radiação Média Mensal Anual – 12,85 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	375	0,556	0,369	0,117	0,629	-	-	0,1562	-	0,290	2,499	0,083
2	375	0,622	0,387	0,280	0,617	-0,00787	-	0,1511	3,27	0,089	2,408	0,078
3	375	0,558	0,311	0,030	0,645	-	0,0010	0,1562	0,00	0,294	2,498	0,083
4	375	0,624	0,390	0,181	0,635	0,007902	0,0012	0,1513	3,15	0,080	2,402	0,078
<b>Bagé – Radiação Média Mensal Anual – 14,28 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1 <sup>a</sup>	280	0,369	0,136	0,309	0,282	-	-	0,1473	-	0,247	2,442	0,074
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Alegrete – Radiação Média Mensal Anual – 14,70 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	171	0,500	0,250	0,317	0,273	-	-	0,0779	-	0,166	1,389	0,046
2	171	0,596	0,355	0,355	0,366	-0,00439	-	0,0682	12,54	0,054	1,366	0,043
3	171	0,521	0,272	0,198	0,319	-	0,0013	0,0764	2,00	0,163	1,397	0,045
4	171	0,599	0,359	0,302	0,380	-0,00415	0,0006	0,0669	14,20	-0,029	1,372	0,042
<b>Encruzilhada do Sul – Radiação Média Mensal Anual – 14,01 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	331	0,485	0,235	0,251	0,394	-	-	0,1223	-	0,354	2,009	0,075
2	331	0,593	0,352	0,327	0,519	-0,00819	-	0,1177	3,79	0,157	1,918	0,069
3	331	0,503	0,253	0,039	0,471	-	0,0022	0,1231	-0,59	0,324	2,010	0,074
4	331	0,597	0,356	0,220	0,551	-0,00786	0,0011	0,1171	4,24	0,134	1,918	0,067
<b>Quaraí – Radiação Média Mensal Anual – 15,73 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	364	0,185	0,034	0,436	0,145	-	-	0,1281	-	0,370	2,366	0,061
2	364	0,477	0,227	0,517	0,324	-0,00934	-	0,1131	11,78	0,094	2,190	0,077
3	364	0,188	0,035	0,474	0,126	-	-0,0004	0,1496	-16,78	1,189	2,701	0,086
4	364	0,529	0,280	0,836	0,215	-0,01153	-0,0030	0,1056	17,63	0,127	2,072	0,074

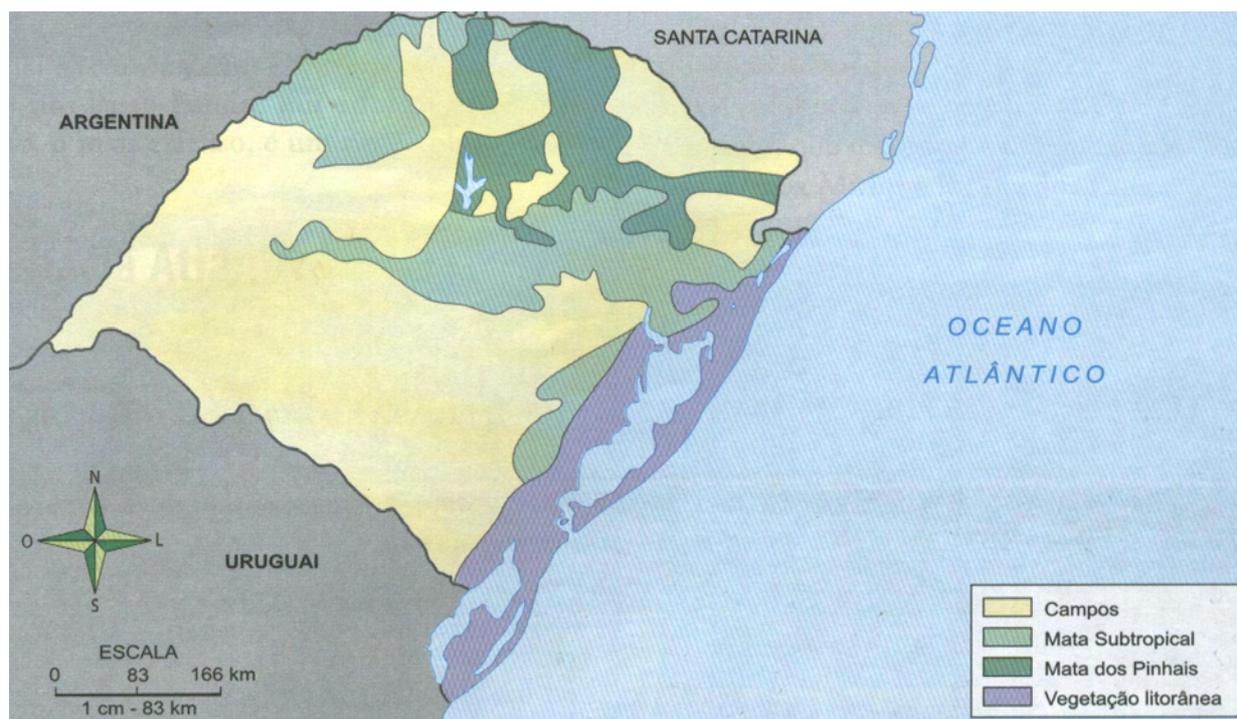
Continuação da Tabela 6.8.

i	N	r	r <sup>2</sup>	a	b <sub>1</sub> <sup>1</sup>	b <sub>2</sub> <sup>2</sup>	B <sub>3</sub> <sup>3</sup>	$\bar{\epsilon}_{ReL}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE <sup>*</sup>	RMSE <sup>*</sup>	S <sub>YX</sub>
<b>Santana do Livramento – Radiação Média Mensal Anual – 14,47 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	166	0,507	0,257	0,345	0,238	-	-	0,0786	-	0,224	1,327	0,060
2	166	0,633	0,401	0,394	0,334	-0,00551	-	0,0709	9,78	0,091	1,244	0,043
3	166	0,528	0,279	0,200	0,299	-	0,0015	0,0761	3,22	0,182	1,289	0,048
4	166	0,633	0,401	0,379	0,338	-0,00543	0,0002	0,0432	45,09	0,087	1,242	0,044
<b>São Borja – Radiação Média Mensal Anual – 16,21 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	177	0,524	0,274	0,320	0,320	-	-	0,0881	-	0,256	1,683	0,060
2	177	0,675	0,455	0,381	0,483	-0,00740	-	0,0781	11,27	0,036	1,580	0,049
3	177	0,583	0,340	-0,009	0,466	-	0,0033	0,0847	3,84	0,188	1,634	0,054
4	177	0,695	0,483	0,158	0,566	-0,00672	0,0022	0,0759	13,86	0,053	1,545	0,048
<b>Pelotas – Radiação Média Mensal Anual – 14,47 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	358	0,764	0,584	0,239	0,449	-	-	0,0622	-	0,252	0,946	0,037
2	358	0,810	0,656	-0,23	0,587	-	0,0049	0,0552	11,25	0,140	0,913	0,034
3	358	0,848	0,719	0,026	0,579	-0,00400	0,0027	0,0498	19,94	0,067	0,886	0,031
4	358	0,848	0,719	0,294	0,514	-0,00504	-	0,0510	17,97	0,087	0,901	0,031
<b>Rio Grande do Sul – Radiação Média Mensal Anual – 14,44 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	3439	0,472	0,223	0,274	0,361	-	-	0,1229	-	0,273	2,133	0,072
2	3439	0,549	0,302	0,344	0,437	-0,0058	-	0,1182	3,85	0,111	2,089	0,069
3	3439	0,478	0,228	0,178	0,398	-	0,0010	0,1224	0,38	0,256	2,131	0,072
4	3439	0,549	0,302	0,347	0,436	-0,0058	-0,00003	0,1182	3,82	0,114	2,089	0,069

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{s}/\bar{s}_0$ . <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura <sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Os valores de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal da radiação solar global horizontal medida para cada região, em MJ/m<sup>2</sup>, fornecidas pela FEPAGRO.

<sup>a</sup> A estação agroclimatológica de Bagé não teve os dados de Temperatura média e Umidade Relativa fornecidos pela FEPAGRO.



**Figura 6.16** Distribuição regional da vegetação natural do Rio Grande do Sul.

Adaptado de Moreira, 2003.

Campanha – Alegrete, Encruzilhada do Sul, Quaraí, Santana do Livramento, São Borja.

Planalto Médio → Cruz Alta, Júlio de Castilhos e Santa Rosa.

Planalto – Alto e Médio Uruguai → Erechim

Planalto – Serra → Farroupilha

Porto Alegre → Cachoeirinha

Litoral → Pelotas e Maquine.

A Tabela 6.9 mostra os coeficientes dos modelos de regressão linear simples e múltiplos desenvolvidos para cada uma destas regiões e os respectivos erros associados à validação aplicada sobre os dados da própria região. Os resultados não foram muito bons se comparados com os coeficientes de Pelotas (Tabela 6.8). De todas as regiões, apenas a litorânea apresentou resultados melhores, em termos de coeficientes se comparados com os coeficientes do modelo único para todo o Rio Grande do Sul (Tabela 6.8).

É importante observar que para a região de Porto Alegre a única estação representante é a de Cachoeirinha. Para o Planalto, sub-região Alto e Médio Uruguai tem apenas Erechim com dados disponíveis e ainda para o Planalto, sub-região Serra tem apenas Farroupilha

com dados disponíveis. A região da Depressão Central não tem nenhuma estação com dados disponíveis assim como para a região do Planalto as sub-regiões de Campos do Planalto e Encosta não tem estações com dados.



**Figura 6.17** Divisão por homogeneidade física do Rio Grande do Sul.

Adaptado de Moreira, 2003.

Na Tabela 6.10 encontram-se os erros obtidos da validação aplicada de três maneiras diferentes: a primeira, chamada de *modelo próprio*, é a aplicação do modelo anual oriundo dos próprios dados da estação e aplicado sobre os dados da própria estação; a segunda, chamada de *modelo regional* é a aplicação do modelo anual oriundo dos dados das estações de cada região, conforme Tabela 6.9, aplicado sobre os dados de cada estação da mesma região; a terceira, chamada de *modelo geral* é a aplicação do modelo cujos coeficientes originaram-se dos dados de

todas as estações do Rio Grande do Sul, sobre os dados de cada estação. Ao contrário do esperado foram não conclusivos os resultados, ou seja, esperava-se que na validação, neste trabalho chamado de *modelo regional*, os erros fossem menores que os erros do chamado *modelo geral*. Apenas nas estações de Quaraí, Maquiné, Farroupilha, Erechim e Cruz Alta a aplicação do *modelo regional* sobre os dados destas estações forneceu um erro menor que os erros do *modelo geral* também aplicados sobre estes dados. Destas, para fins de esclarecimentos, as estações de Farroupilha (Planalto – Serra) e Erechim (Planalto – Alto e médio Uruguai) não tem os erros da validação para o *modelo regional* porque para estas regiões existem apenas estas estações. Portanto considera-se para análise destas duas estações os dados do *modelo próprio* e *modelo geral* e nestes casos, certamente, a validação própria produzirá erros menores.

Fato preocupante se observa nos coeficientes de determinação obtidos para as diversas estações. Isto pode ser observado nas Tabelas 6.8 a 6.11. São baixos, com exceção de Pelotas. Além disso, todos os erros são altos, se comparados com os coeficientes obtidos para os modelos aplicados no Leste dos EUA (Tabela A1.1). Isto é um indício de problemas nos dados medidos e/ou registrados.

Baseando-se nos dados da Tabela 6.8 pode-se concluir que o modelo de regressão linear múltiplo considerando  $\bar{K}_T$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$ , temperatura média mensal e umidade relativa é melhor que o modelo de regressão linear simples de Ångström-Prescott. Também se pode observar que na falta de dados de umidade relativa, o uso apenas do  $\bar{K}_T$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$  e temperatura média mensal também fornece bons resultados.

De acordo com as conclusões do trabalho realizado sobre os dados do Leste dos EUA foram determinados coeficientes mensais para a Equação de Ångström-Prescott e para as equações de regressão linear múltipla envolvendo  $\bar{K}_T$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$ , temperatura média mensal e umidade relativa. O modelo que correlaciona  $\bar{K}_T$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$  e umidade relativa não foi utilizado porque apresentou resultados inferiores aos dois modelos de regressão linear múltipla descritos anteriormente neste parágrafo. As Tabelas 6.11, 6.12 e 6.13 mostram os resultados destas correlações e regressões bem como os erros obtidos na validação sobre os próprios dados que deram origem aos coeficientes das equações.  $\mathcal{E}_{Rel}(\%)$  positivo indica quanto percentualmente o erro de cada modelo mensal é menor que o erro do modelo único anual. Observa-se uma melhoria nos resultados, isto é, uma diminuição nos erros associados aos modelos mensais em relação aos erros associados ao modelo anual, conforme detectado no estudo dos dados do Leste dos EUA. A diferença é que os erros relativos e erros quadráticos médios são bem maiores do que os obtidos para o Leste dos EUA. Novamente fica a preocupação com a qualidade

**Tabela 6.9** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais do ano todo. Fonte dos dados: FEPAGRO.

<b>i</b>	<b>N*</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b><math>\bar{\epsilon}_{Rel}</math></b>	<b><math>\epsilon_{rel}</math> (%)</b>	<b>MBE **</b>	<b>RMSE **</b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
<b>CAMPANHA – Radiação Média Mensal Anual – 15,06 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	1143	0,383	0,146	0,336	0,276	-	-	0,111	-	0,322	2,248	0,073
2	1143	0,510	0,260	0,390	0,407	-0,007	-	0,102	7,91	0,107	2,176	0,068
3	1143	0,383	0,146	0,338	0,275	-	-0,00002	0,111	0,01	0,322	2,248	0,073
4	1143	0,525	0,275	0,543	0,358	-0,008	-0,0015	0,103	7,54	0,120	2,143	0,067
<b>LITORAL – Radiação Média Mensal Anual – 13,36 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	733	0,633	0,401	0,161	0,568	-	-	0,115	-	0,301	1,947	0,067
2	733	0,710	0,504	0,282	0,593	-0,0071	-	0,106	7,92	0,079	1,834	0,061
3	733	0,656	0,430	-0,14	0,630	-	0,0035	0,110	3,96	0,263	1,909	0,065
4	733	0,715	0,511	0,114	0,623	-0,0065	0,0018	0,104	9,46	0,069	1,816	0,061
<b>PLANALTO – ALTO E MÉDIO URUGUAI – Radiação Média Mensal Anual – 14,98 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	240	0,462	0,213	0,257	0,414	-	-	0,132	-	0,412	2,413	0,077
2	240	0,604	0,365	0,405	0,490	-0,0102	-	0,121	8,40	0,097	2,195	0,070
3	240	0,495	0,245	0,460	0,342	-	-0,0023	0,127	4,01	0,364	2,335	0,076
4	240	0,630	0,397	0,611	0,417	-0,0102	-0,0023	0,118	10,90	0,106	2,144	0,068
<b>PLANALTO - SERRA – Radiação Média Mensal Anual – 13,67 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	310	0,406	0,165	0,298	0,288	-	-	0,109	-	0,252	1,789	0,060
2	310	0,503	0,253	0,362	0,344	-0,0053	-	0,101	6,72	0,087	1,770	0,057
3	310	0,455	0,207	-0,03	0,383	-	0,0036	0,106	2,94	0,178	1,766	0,058
4	310	0,517	0,268	0,147	0,396	-0,0046	0,0022	0,100	7,82	0,068	1,755	0,056
<b>PLANALTO MÉDIO – Radiação Média Mensal Anual – 14,82 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	943	0,406	0,165	0,276	0,357	-	-	0,148	-	0,219	2,505	0,082
2	943	0,453	0,205	0,330	0,424	-0,0046	-	0,146	0,97	0,101	2,494	0,080
3	943	0,414	0,171	0,171	0,400	-	0,0011	0,147	0,42	0,206	2,503	0,082
4	943	0,454	0,206	0,277	0,441	-0,004	0,001	0,146	1,33	0,061	2,491	0,080
<b>PORTO ALEGRE – Radiação Média Mensal Anual – 15,01 MJ/m<sup>2</sup></b>												
1	313	0,480	0,230	0,308	0,358	-	-	0,092	-	0,339	2,630	0,059
2	313	0,660	0,436	0,385	0,531	-0,0083	-	0,075	18,13	0,102	2,154	0,052
3	313	0,535	0,287	-0,06	0,500	-	0,0039	0,088	4,56	0,242	2,502	0,059
4	313	0,666	0,443	0,236	0,573	-0,0077	0,0015	0,075	18,46	0,068	2,128	0,052

\* N é o número de médias mensais sobre os quais foram calculados os coeficientes.

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{s} / \bar{s}_0$  <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\*\* Os valores de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal da radiação solar global horizontal medida para cada região, em MJ/m<sup>2</sup>, fornecidas pela FEPAGRO.

Tabela 6.10 Distribuições dos erros de validação de acordo com a região, estação e a base de validação.

Região	Estação	Modelo *	Modelo Próprio			Modelo Regional			Modelo Geral					
			$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}$ (%)	MBE	RMSE	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}$ (%)	MBE	RMSE	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}$ (%)	MBE	RMSE
C	Alegrete	1	0,078	-	0,166	1,389	0,092	-	0,814	1,666	0,082	-	0,401	1,464
		2	0,068	12,54	0,054	1,366	0,075	18,87	0,362	1,469	0,068	17,24	-0,021	1,403
		3	0,076	1,92	0,163	1,409	0,092	-0,06	0,815	1,667	0,078	5,14	0,227	1,411
		4	0,067	14,19	-0,030	1,371	0,080	13,13	0,442	1,523	0,068	16,71	0,030	1,402
A	Encruzilhada do Sul	1	0,122	-	0,355	2,009	0,141	-	0,932	2,270	0,125	-	0,463	2,043
		2	0,118	3,79	0,157	1,918	0,143	-1,17	1,048	2,219	0,125	-0,31	0,586	2,001
		3	0,123	-0,59	0,324	2,012	0,141	0,06	0,928	2,268	0,125	-0,68	0,506	2,055
		4	0,117	4,24	0,134	1,919	0,139	1,43	0,879	2,155	0,126	-1,14	0,618	2,014
P	Quaraí	1	0,128	-	0,370	2,366	0,120	-	-0,333	2,293	0,123	-	-0,722	2,390
		2	0,113	11,78	0,095	2,190	0,106	11,72	-0,567	2,238	0,108	11,90	-0,954	2,375
		3	0,150	-16,78	1,189	2,701	0,120	0,00	-0,331	2,292	0,124	-0,70	-0,952	2,493
		4	0,106	17,63	0,127	2,073	0,104	13,04	-0,374	2,125	0,108	12,34	-0,897	2,348
N	Santana do Livramento	1	0,079	-	0,224	1,330	0,086	-	0,699	1,549	0,080	-	0,228	1,368
		2	0,071	9,78	0,091	1,247	0,079	8,06	0,541	1,396	0,071	11,24	0,099	1,280
		3	0,076	3,22	0,183	1,292	0,086	-0,01	0,698	1,549	0,078	3,10	0,144	1,315
		4	0,071	9,88	0,087	1,244	0,081	6,17	0,529	1,451	0,072	10,46	0,143	1,288
H	São Borja	1	0,0881	-	0,256	1,683	0,0886	-	-0,085	1,639	0,0890	-	-0,441	1,651
		2	0,0781	11,27	0,036	1,580	0,0795	10,28	-0,598	1,697	0,0859	3,47	-0,947	1,822
		3	0,0847	3,84	0,188	1,634	0,0878	0,91	-0,087	1,640	0,0880	1,07	-0,500	1,634
		4	0,0759	13,86	0,053	1,545	0,0829	6,40	-0,716	1,818	0,0853	4,14	-0,909	1,805
A	Farrroupilha	1	0,109	-	0,251	1,790	-	-	-	-	0,116	-	0,618	1,942
		2	0,101	6,74	0,087	1,771	-	-	-	-	0,115	1,31	0,674	1,959
		3	0,106	2,92	0,178	1,767	-	-	-	-	0,115	0,95	0,611	1,927
		4	0,100	7,78	0,069	1,756	-	-	-	-	0,116	0,16	0,714	1,976
SERRA	PLANALTO	1	0,109	-	0,251	1,790	-	-	-	-	0,116	-	0,618	1,942
		2	0,101	6,74	0,087	1,771	-	-	-	-	0,115	1,31	0,674	1,959
		3	0,106	2,92	0,178	1,767	-	-	-	-	0,115	0,95	0,611	1,927
		4	0,100	7,78	0,069	1,756	-	-	-	-	0,116	0,16	0,714	1,976

Continuação da Tabela 6.10.

Região	Estação	Modelo	Modelo Próprio			Modelo Regional			Modelo Geral					
			$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE RMSE	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE RMSE	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE RMSE			
L I T O R A L	Maquiné	1	0,156	-	0,290	2,499	0,160	-	0,455	2,535	0,187	-	1,099	2,855
		2	0,151	3,27	0,088	2,407	0,149	6,8	-0,051	2,406	0,165	11,3	0,623	2,527
		3	0,156	0,0	0,294	2,497	0,155	2,5	0,135	2,505	0,185	1,0	1,064	2,823
		4	0,151	3,1	0,080	2,401	0,146	8,5	-0,221	2,406	0,167	10,7	0,662	2,542
	Pelotas	1	0,062	-	0,252	0,947	0,063	-	40,23	0,954	0,059	-	-0,174	0,908
		2	0,050	19,71	0,087	0,902	0,060	5,33	-39,71	1,161	0,054	9,15	-0,162	0,994
		3	0,055	11,02	0,141	0,913	0,056	11,85	-35,45	0,929	0,057	3,15	-0,089	0,889
		4	0,050	19,71	0,087	0,886	0,058	8,32	-41,36	1,154	0,054	9,13	-0,134	0,993
PLANALTO	Erechim	1	0,132	-	0,412	2,412	0,132	-	0,027	0,161	0,128	-	-0,069	2,317
		2	0,121	8,34	0,097	2,195	0,121	8,34	0,006	0,147	0,119	6,75	-0,125	2,188
		3	0,127	3,96	0,364	2,335	0,127	3,96	0,024	0,156	0,131	-1,92	-0,206	2,372
		4	0,118	10,86	0,107	2,142	0,118	10,86	0,007	0,143	0,119	6,86	-0,074	2,183
P L N A L I T O	Cruz Alta	1	0,108	-	0,230	4,218	0,112	-	-0,509	4,242	0,112	-	-0,533	4,246
		2	0,107	0,84	0,111	4,108	0,111	1,18	-0,622	4,492	0,112	-0,09	-0,773	4,871
		3	0,107	0,69	0,225	4,233	0,110	1,45	-0,498	4,292	0,112	0,47	-0,605	4,361
		4	0,107	0,77	0,109	4,110	0,110	1,40	-0,674	4,567	0,112	0,21	-0,731	4,808
A D L I O	Júlio de Castilhos	1	0,184	-	0,247	2,980	0,187	-	0,451	3,020	0,186	-	0,445	3,017
		2	0,184	-0,04	0,110	2,974	0,190	-1,74	0,510	3,029	0,190	-1,96	0,420	3,024
		3	0,180	2,09	0,205	2,944	0,187	-0,05	0,540	3,018	0,186	0,41	0,440	2,996
		4	0,181	2,05	0,066	2,938	0,189	-1,28	0,488	3,012	0,191	-2,31	0,455	3,033
S A N T A R O S A	Santa Rosa	1	0,119	-	0,318	1,943	0,125	-	0,581	2,021	0,124	-	0,551	2,012
		2	0,114	4,08	-0,415	1,956	0,116	6,71	0,200	1,893	0,115	7,20	-0,034	1,904
		3	0,123	-3,85	-0,145	2,129	0,125	-0,57	0,561	2,039	0,147	-18,86	-1,735	2,645
		4	0,126	-5,68	-0,774	2,271	0,116	6,98	0,145	1,898	0,128	-3,03	-1,359	2,370

\* Modelos de Correlação de  $\bar{K}_t$  com:  $1 - \bar{S}/\bar{S}_o$ ,  $2 - \bar{S}/\bar{S}_o, \bar{T}_{med}$ ,  $3 - \bar{S}/\bar{S}_o, \bar{UR}$ ,  $4 - \bar{S}/\bar{S}_o, \bar{T}_{med}, \bar{UR}$

dos dados medidos e/ou registrados. No entanto, no âmbito dessa dissertação, vale o fato de que modelos mensais são melhores do que um único modelo anual.

Esta observação é válida tanto para a Equação de Ångström-Prescott quanto para o modelo regressão linear múltipla que envolve  $\bar{K}_T$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$  e temperatura média mensal e o modelo de regressão linear múltipla envolvendo  $\bar{K}_T$ ,  $\bar{S}/\bar{S}_o$ , temperatura média mensal e umidade relativa.

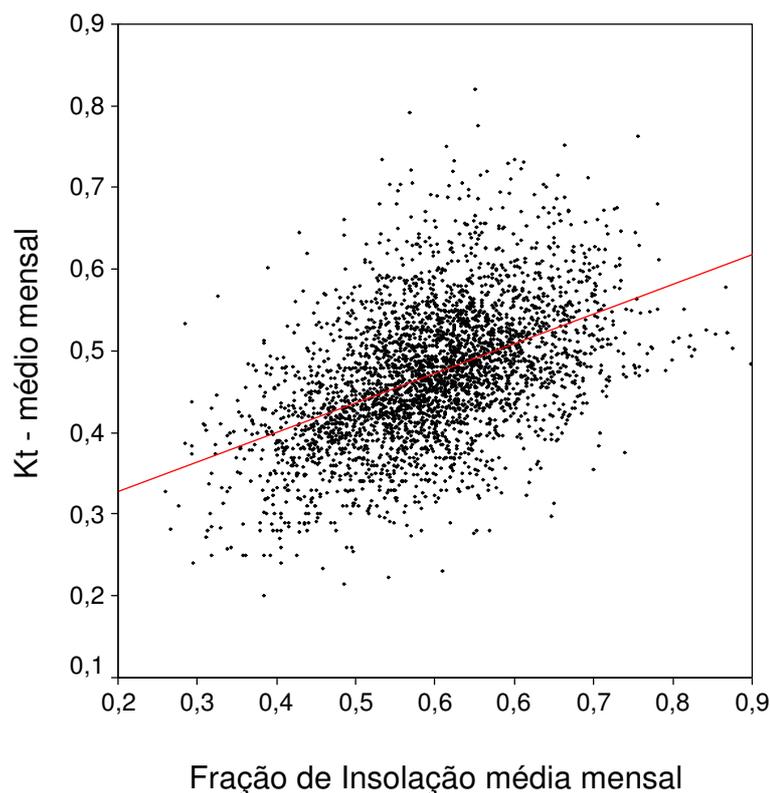
Portanto, é possível estimar a radiação solar global para estações que dispõe apenas de dados de insolação utilizando-se modelos mensais sem diminuir muito a precisão do modelo. Dispondo-se de dados de temperatura média e umidade relativa é possível melhorar a precisão do modelo adotado para previsão da radiação solar global para um determinado local.

## 6.5 – ANÁLISE DO DIAGRAMA DE DISPERSÃO DE $\bar{K}_T$ E $\bar{S}/\bar{S}_o$ MENSAIS.

Fato citado anteriormente e motivo de preocupação são os baixos coeficientes de determinação linear encontrados para cada estação, com exceção de Pelotas. A Figura 6.18 mostra o diagrama de dispersão dos 3439 pares de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  utilizados nesta pesquisa para todo o Rio Grande do Sul.

O diagrama de dispersão mostra, de fato, porque os coeficientes de determinação dos modelos lineares de regressão são tão baixos. A nuvem de pontos é muito dispersa tendo em alguns casos valores muito altos de fração de insolação média mensal para um  $\bar{K}_T$  médio mensal não tão alto ou vice-versa.

No Anexo 02 encontram-se todos os diagramas de dispersão correspondentes a cada estação de coleta de dados. Durante o traçado dos gráficos de dispersão observou-se que várias frações de insolação eram maiores que 1, algo fisicamente impossível. Estes pontos foram deliberadamente excluídos. Alguns pontos têm valores altos demais, no entanto, foram mantidos por uma questão de fidedignidade, mas certamente indicam sobre valoração da insolação ou radiação global horizontal. Uma análise rápida dos diagramas de dispersão indica o problema sério das medidas, pois os pares estão muito dispersos em praticamente todas as estações excetuando-se a estação de Pelotas.



**Figura 6.18** Diagrama de dispersão anual dos pares de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  médios mensais para todo o Rio Grande do Sul.

## 6.6. TESTES ESTATÍSTICOS.

Conclusões já foram tiradas da análise das Tabelas e gráficos anteriormente descritos. Nesta seção serão mostrados os resultados de testes estatísticos sobre os coeficientes de correlação linear e de determinação linear. Estes testes visam mostrar que existem evidências da correlação e conseqüentemente regressão entre variáveis.

A Tabela 6.11 mostra um resumo da estatística do banco de dados do Rio Grande do Sul para correlação linear simples. Observa-se que o coeficiente de correlação linear  $r$  é classificado como regular para o período anual. Já os coeficientes  $r$  mensais são maiores e o Erro Relativo Médio diminui assim como os valores MBE e RMSE, indicando, como já foi dito, que é melhor utilizar coeficientes  $a$  e  $b$  mensais no lugar de um único conjunto de  $a$  e  $b$  anual, conforme já discutido e analisado para os valores do banco de dados SAMSON. Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a correlação a um nível de significância de 5%, para a correlação anual, obteve-se o valor  $t_{crit} = 0,48$  e  $t_{calc} = 1,199$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0: \rho = 0$  é descartada, ou

**Tabela 6.11** Apresentação de coeficientes estatísticos para o Rio Grande do Sul para os modelos mensais que envolvem as variáveis  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ .  
(Modelo de Ångström-PreScott).

$N^*$	Período	$r$	$r^2$	$a$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\bar{X}^{***}$	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{Rel}$ (%)	$MBE$	$\epsilon_{Rel}$ (%)	$RMSE$	$\epsilon_{Rel}$ (%)	$S_{XY}$
3439	Ano	0,472	0,223	0,274	0,361	-	-	14,5	0,1229	-	0,274	-	2,142	-	0,07
285	Jan	0,579	0,335	0,238	0,391	-	-	19,9	0,1101	10,397	0,026	93,04	1,879	12,258	0,06
296	Fev	0,585	0,342	0,228	0,395	-	-	18,2	0,1119	8,932	0,321	6,70	1,928	9,969	0,06
291	Mar	0,540	0,291	0,222	0,419	-	-	15,88	0,1079	12,165	0,004	98,82	1,934	9,698	0,06
280	Abr	0,555	0,308	0,270	0,499	-	-	12,7	0,1009	17,873	0,165	30,98	1,842	14,010	0,06
287	Mai	0,515	0,265	0,275	0,434	-	-	10,1	0,1140	7,205	0,000	99,74	2,108	1,576	0,08
288	Jun	0,544	0,296	0,272	0,522	-	-	8,53	0,1169	4,845	0,006	96,45	2,130	0,539	0,08
288	Jul	0,527	0,278	0,261	0,485	-	-	8,95	0,1182	3,807	0,010	94,19	2,198	-2,631	0,08
285	Ago	0,619	0,383	0,219	0,467	-	-	10,6	0,1116	9,225	0,002	99,01	2,001	6,575	0,06
283	Set	0,629	0,396	0,188	0,480	-	-	13,2	0,1009	17,911	0,016	93,43	1,784	16,708	0,05
289	Out	0,608	0,370	0,208	0,425	-	-	16,5	0,0957	22,147	0,000	99,86	1,715	19,912	0,05
285	Nov	0,525	0,275	0,249	0,367	-	-	19,1	0,1026	16,535	0,024	93,45	1,792	16,339	0,06
282	Dez	0,512	0,262	0,242	0,391	-	-	20,5	0,1079	12,183	0,020	94,81	2,408	-12,415	0,06

\* N é o número de médias mensais sobre os quais foram calculados os coeficientes. <sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

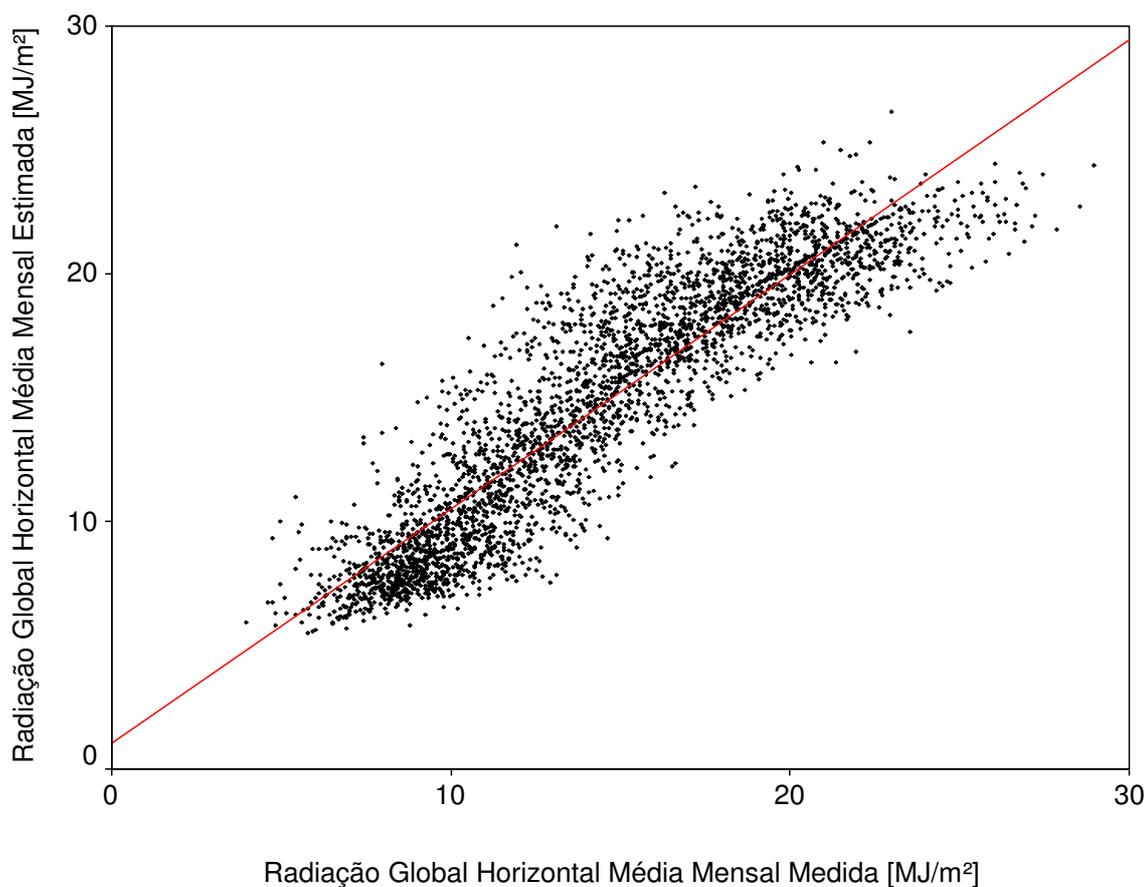
<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar <sup>\*\*</sup> Os valores de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal da radiação solar global horizontal medida para todas as estações do Rio Grande do Sul, em  $MJ/m^2$ , fornecidas pela FEPAGRO.

seja, existe evidência de correlação entre as variáveis  $\bar{K}_t$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a regressão a um nível de significância de 5%, para a correlação anual, obteve-se o valor  $t_{crít} = 0,48$  e  $t_{calc} = 31,39$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0: \beta = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de regressão entre as variáveis  $\bar{K}_t$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ .

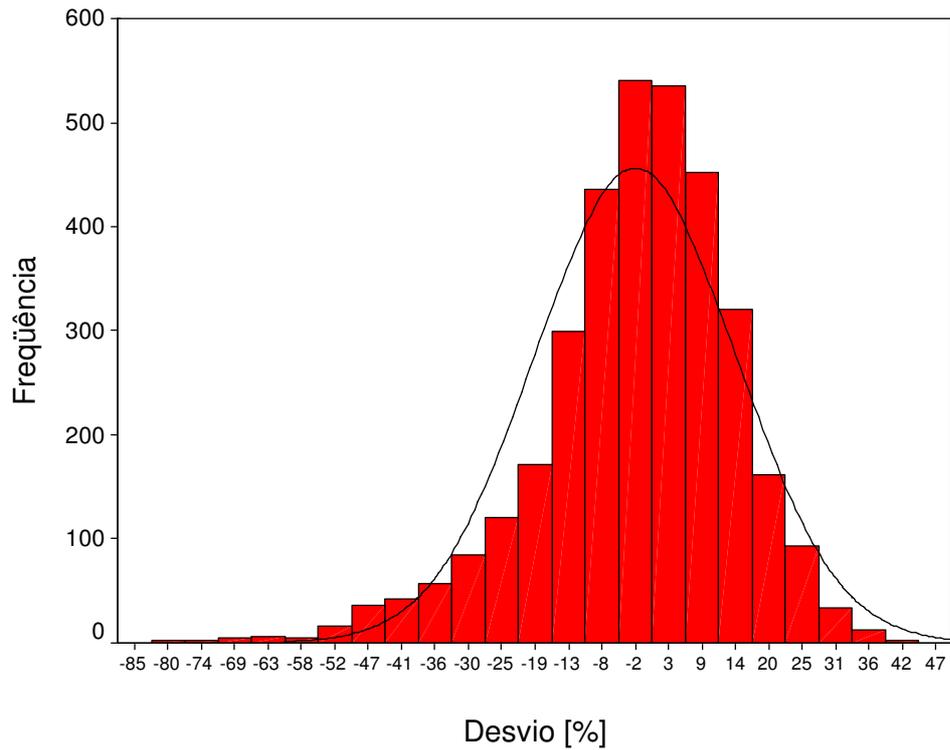
A Figura 6.19 mostra uma comparação de dados de Radiação Global medida com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott.

A Figura 6.20 mostra os desvios percentuais entre dados medidos e dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott. Distribuição aproximadamente normal.

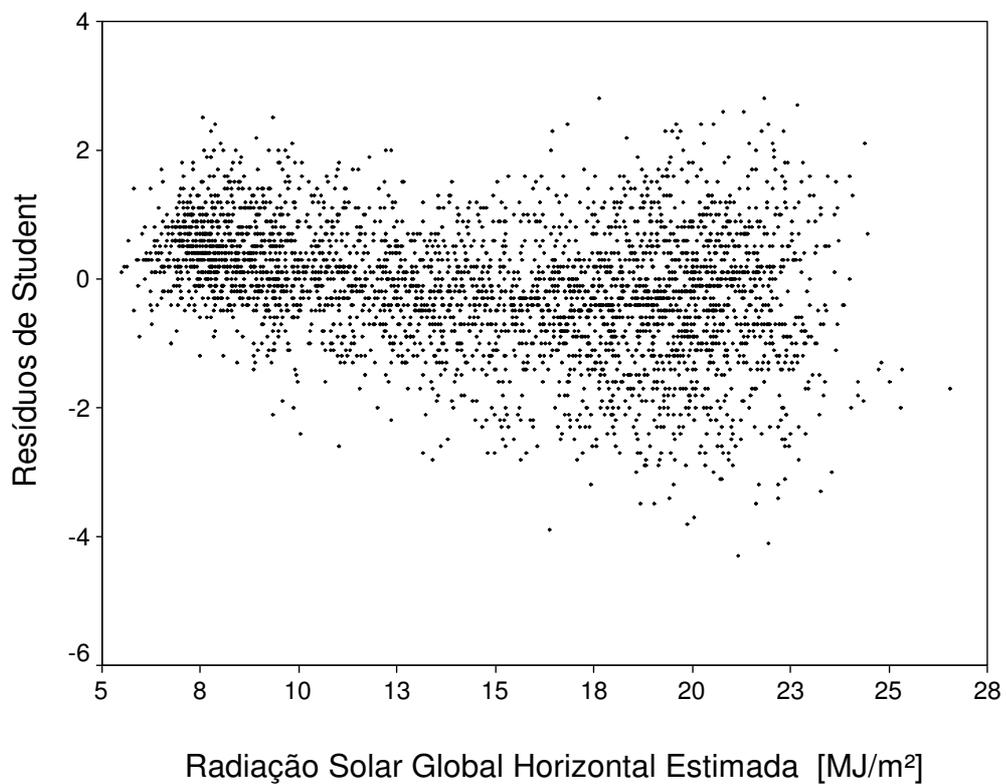
A Figura 6.21 mostra que o pressuposto da homocedasticidade não foi violado, ou seja, não existe uma nuvem de pontos com uma dispersão definida. No entanto esperava-se uma nuvem de pontos um pouco mais uniforme em torno do eixo zero dos resíduos de *Student*. A exemplo da Figura 6.10, para os dados do Leste dos EUA, observa-se aqui, uma leve tendência, que não chega a instigar o uso da análise de séries temporais com o intuito de retirar a tendência dos dados.



**Figura 6.19** Comparação de dados de radiação global medida com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott. Médias mensais – Rio Grande do Sul – 1959-90.



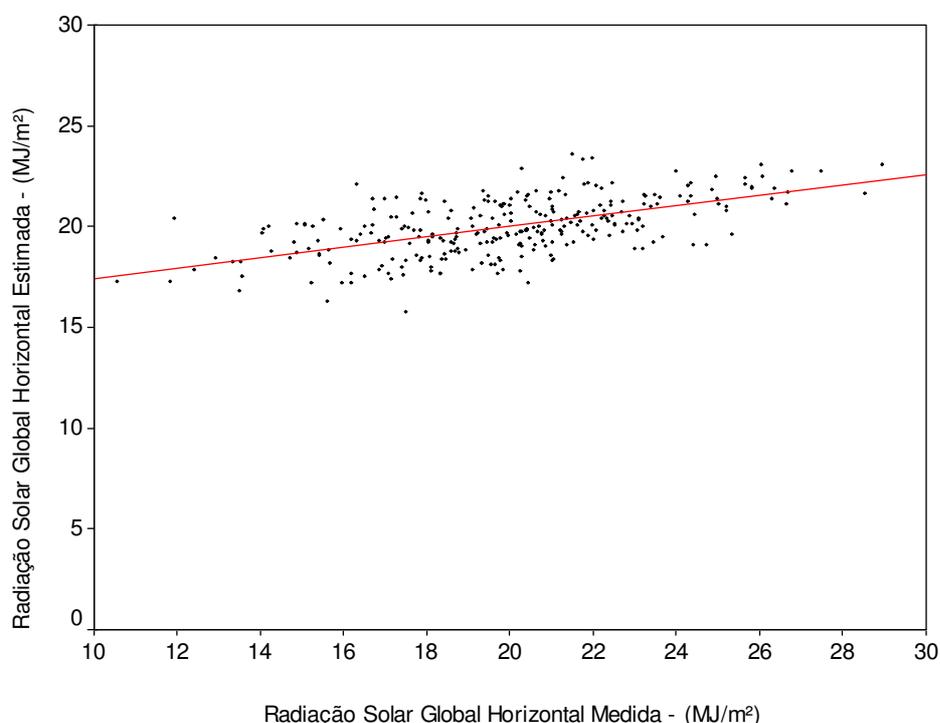
**Figura 6.20** Desvios percentuais da comparação entre dados medidos e dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott.



**Figura 6.21** Distribuição dos *Resíduos de Student* em função da radiação solar global horizontal estimada.

Para os coeficientes mensais, ainda utilizando o modelo Ångström–Prescott foi escolhido o mês de Janeiro para aplicação do teste da existência da correlação e regressão linear simples. Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a correlação a um nível de significância de 5%, para a correlação do mês de Janeiro, obteve-se o valor  $t_{crít} = 0,48$  e  $t_{calc} = 5,42$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0: \rho = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de correlação entre as variáveis  $\bar{K}_t$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . Aplicando-se o teste de hipóteses unilateral para a regressão a um nível de significância de 5%, para a correlação anual, obteve-se o valor  $t_{crít} = 0,48$  e  $t_{calc} = 6,67$ . Com isso a hipótese nula,  $H_0: \beta = 0$  é descartada, ou seja, existe evidência de regressão entre as variáveis  $\bar{K}_t$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$ .

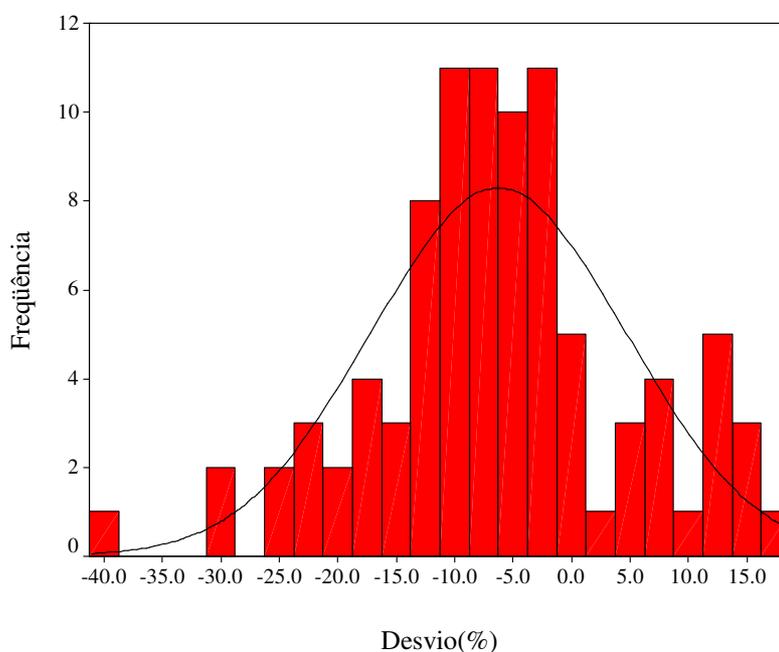
A Figura 6.22 mostra a comparação de dados de Radiação Global medida com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott para o mês de Janeiro.



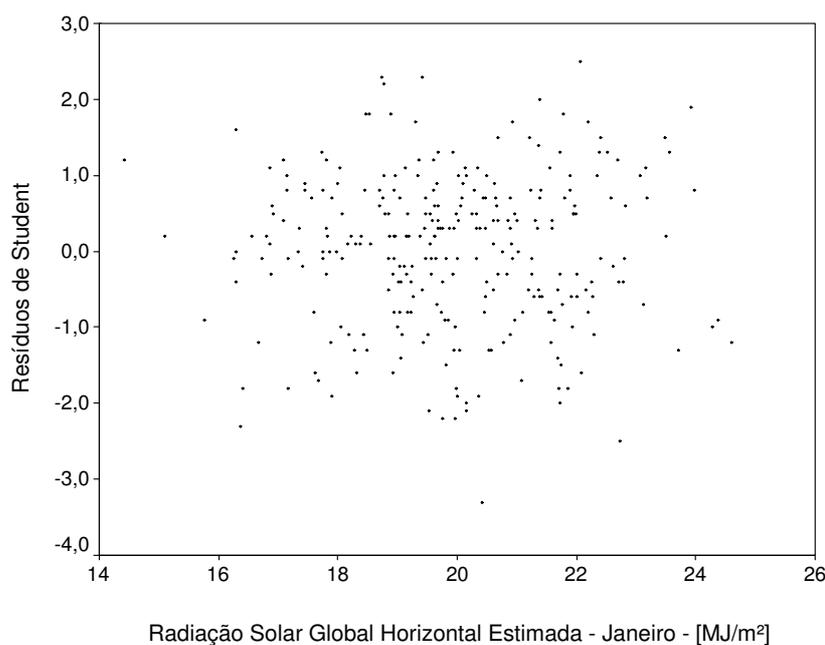
**Figura 6.22** Comparação de dados de radiação solar global horizontal medida com dados estimados pela Equação de Ångström–Prescott. Médias diárias para o mês de Janeiro - Rio Grande do Sul – 1959-90.

A Figura 6.23 mostra os desvios percentuais da comparação entre dados medidos de radiação solar global horizontal e dados estimados de radiação solar global horizontal pela Equação de Ångström–Prescott. Médias diárias para Janeiro - Rio Grande do Sul – 1959-90. Observa-se que o gráfico que se ajusta precariamente a Distribuição Normal de Probabilidades. Um dos motivos é o número não muito expressivo de médias mensais.

A Figura 6.24 mostra a distribuição dos *Resíduos de Student* em função da radiação solar global horizontal estimada,  $\hat{H}$ . Percebe-se claramente que o pressuposto da homocedasticidade não foi violado, ou seja, existe uma nuvem de pontos indefinida, sem um plano aparente de dispersão.



**Figura 6.23** Desvios percentuais da comparação entre dados medidos de radiação solar global horizontal e dados estimados de radiação solar global horizontal pela Equação de Ångström–Prescott. Médias mensais para Janeiro - Rio Grande do Sul – 1959-90.



**Figura 6.24** Distribuição dos resíduos de *Student* em função da radiação solar global horizontal estimada,  $\hat{H}$ . Médias mensais diárias para Janeiro – Rio Grande do Sul – 1959-90.

O que se pode concluir quanto aos dados do Rio Grande de Sul é que eles apresentam problemas de confiabilidade, ou seja, se for feita uma comparação entre os coeficientes estatísticos obtidos para estes dados e os coeficientes obtidos em outras partes do mundo, conforme já descrito anteriormente, observa-se que eles não são totalmente confiáveis para uma previsão a partir de uma regressão linear simples. Portanto, a estimativa de valores a partir das equações de regressão obtidas, mesmo as mensais, implica em erros difíceis de serem estimados. Este fato se explica por não se conhecer, na realidade, como os equipamentos de medida, actinógrafos e heliógrafos, eram calibrados, ou se eram calibrados conforme instruções dos fabricantes. No entanto, como a regressão linear é um método estatístico robusto, e na falta de dados mais fidedignos este método poderá ser utilizado na previsão, desde que se ressalve que a incerteza na precisão dos resultados é grande.

De toda esta análise pode-se dizer que se comprova a idéia de que modelos mensais são, em geral, mais confiáveis do que o modelo de regressão único para o ano todo. Essa conclusão será utilizada para estimar os valores de radiação solar global para o Rio Grande do Sul em locais onde existem a insolação, a temperatura média e a umidade relativa. Em locais onde estas variáveis medidas inexistam serão feitas interpolações pelo método do inverso da distância ao quadrado dos pontos mais próximos. Toda a análise de resíduos foi feita sobre valores estimados pela Equação de Ångström–Prescott, mas é preciso ressaltar que para a confecção dos mapas serão utilizados valores estimados por uma regressão linear múltipla envolvendo as três variáveis citadas neste parágrafo além da radiação solar horizontal extraterrestre.

As Tabelas 6.12 e 6.13 mostram os coeficientes anuais e mensais para dois modelos de correlação linear múltipla calculados sobre dados de todo o Rio Grande do Sul. Um destes modelos relaciona radiação solar global extraterrestre,  $\bar{S} / \bar{S}_o$  e temperatura média e o outro relaciona radiação solar global extraterrestre,  $\bar{S} / \bar{S}_o$  e umidade relativa. O modelo de regressão linear múltipla que correlacionava radiação solar global extraterrestre,  $\bar{S} / \bar{S}_o$  e umidade relativa foi descartado por apresentar resultados inferiores aos outros modelos de regressão linear múltipla já citados neste parágrafo.

Os modelos mensais desenvolvidos para todo o Rio Grande do Sul e aplicados sobre todos os seus dados resultaram, e as Tabela 6.11, 6.12 e 6.13 assim o mostram, que, para os dados deste Estado, em termos de Erro Relativo Médio,  $\bar{\epsilon}_{Rel}$ , a diminuição deste erro não é tão significativa quanto o que ocorre com os dados do Leste dos Estados Unidos. No entanto, se for observado o Erro de Desvio Médio, M.B.E., a diminuição do erro é apreciável quando se trata de modelos mensais. O Erro Quadrático Médio também apresenta uma diminuição em seus valores.

**Tabela 6.12** Apresentação de coeficientes estatísticos para o Rio Grande do Sul para os modelos mensais que envolvem as variáveis  $\bar{K}_r$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  e

## Temperatura Média.

N*	Período	r	r <sup>2</sup>	a	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	$\bar{X}$	$\bar{\epsilon}_{Re/}$	$\epsilon_{Rel}$ (%)	MBE	$\epsilon_{Rel}$ (%)	RMSE	$\epsilon_{Rel}$ (%)	S <sub>XY</sub>
											**		**		
3439	Ano	0,549	0,302	0,344	0,437	-0,0058	-	14,5	0,1182	-	0,111	-	2,098	-	0,068
285	Jan	0,584	0,341	0,164	0,381	0,00329	-	19,9	0,068	6,802	0,004	96,791	1,871	10,79	0,061
296	Fev	0,585	0,342	0,212	0,393	0,0007	-	18,2	0,061	7,418	0,006	95,069	1,911	8,913	0,061
291	Mar	0,544	0,296	0,16	0,404	0,00312	-	15,88	0,061	8,805	-0,010	91,341	1,927	8,114	0,062
280	Abr	0,555	0,308	0,257	0,351	0,00092	-	12,7	0,062	14,07	-0,005	95,576	1,831	12,691	0,06
287	Mai	0,519	0,269	0,326	0,433	-0,0031	-	10,1	0,06	3,817	0,007	93,705	2,102	-0,223	0,075
288	Jun	0,546	0,298	0,308	0,517	-0,0242	-	8,53	0,075	1,235	0,006	94,295	2,126	-1,361	0,077
288	Jul	0,535	0,286	0,324	0,48	-0,0044	-	8,95	0,077	0,471	-0,001	99,003	2,187	-4,275	0,075
285	Ago	0,621	0,385	0,188	0,465	0,00213	-	10,6	0,075	4,931	0,004	96,108	1,997	4,782	0,062
283	Set	0,630	0,397	0,21	0,484	-0,0015	-	13,2	0,062	14,672	-0,022	80,502	1,781	15,083	0,052
289	Out	0,614	0,377	0,15	0,424	0,00303	-	16,5	0,052	18,813	0,002	98,611	1,705	18,713	0,052
285	Nov	0,525	0,276	0,266	0,371	-0,0009	-	19,1	0,052	13,535	0,019	82,68	1,791	14,629	0,057
282	Dez	0,513	0,263	0,216	0,382	0,00134	-	20,5	0,057	8,404	-0,003	97,473	2,406	-14,675	0,062

\* N é o número de médias mensais sobre os quais foram calculados os coeficientes. <sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar\*\* Os valores de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal da radiação solar global horizontal medida,  $\bar{X}$ , em  $MJ/m^2$ , para todas as estações do Rio Grande do Sul, fornecidas pela FEPAGRO.

**Tabela 6.13** Apresentação de coeficientes estatísticos para o Rio Grande do Sul para os modelos mensais que envolvem as variáveis  $\bar{K}_r$  e  $\bar{S}/\bar{S}_0$  e Temperatura Média e Umidade Relativa Média.

$N^*$	Período	R	$r^2$	a	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\bar{X}$	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{Rel}$ (%)	MBE **	$\epsilon_{Rel}$ (%)	RMSE **	$\epsilon_{Rel}$ (%)	$S_{XY}$
3439	Ano	0,549	0,302	0,347	0,436	-0,0058	-0,000028	14,50	0,11819	-	0,114	-	2,098	-	0,069
285	Jan	0,584	0,341	0,170	0,379	0,003	-0,000049	19,94	0,11013	6,819	-0,007	94,276	1,871	10,802	0,061
296	Fev	0,591	0,349	0,346	0,354	-0,0002	-0,001170	18,21	0,10934	7,485	-0,012	89,732	1,901	9,406	0,062
291	Mar	0,546	0,298	0,244	0,383	0,00256	-0,000767	15,88	0,10771	8,871	-0,003	96,927	1,924	8,289	0,063
280	Abr	0,572	0,327	0,503	0,279	-0,0009	-0,002160	12,65	0,10152	14,106	0,010	90,859	1,808	13,83	0,059
287	Mai	0,528	0,278	0,508	0,383	-0,0039	-0,001786	10,09	0,1129	4,474	-0,003	96,97	2,089	0,447	0,074
288	Jun	0,550	0,303	0,433	0,484	-0,0025	-0,001345	08,53	0,11565	2,152	-0,006	95,001	2,118	-0,973	0,077
288	Jul	0,561	0,314	0,623	0,415	-0,0058	-0,003106	08,95	0,1171	0,925	0,013	88,584	2,143	-2,156	0,093
285	Ago	0,621	0,386	0,180	0,466	0,00206	0,0001147	10,55	0,11238	4,92	0,013	88,335	1,997	4,795	0,062
283	Set	0,632	0,399	0,254	0,471	-0,0017	-0,000460	13,17	0,10054	14,937	-0,007	93,486	1,778	15,237	0,052
289	Out	0,614	0,377	0,146	0,425	0,00306	0,0000395	16,46	0,09589	18,867	0,002	98,186	1,705	18,724	0,052
285	Nov	0,526	0,276	0,282	0,365	-0,001	-0,000142	19,10	0,10229	13,452	0,008	92,618	1,791	14,652	0,057
282	Dez	0,516	0,266	0,128	0,406	0,00242	0,0006895	20,45	0,10798	8,643	-0,011	89,895	2,401	-14,44	0,062

\* N é o número de médias mensais sobre os quais foram calculados os coeficientes. <sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_0$ . <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar \*\*. Os valores de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal da radiação solar global horizontal medida,  $\bar{X}$ , em  $MJ/m^2$ , para todas as estações do Rio Grande do Sul, fornecidas pela FEPAGRO.

Observa-se, no conjunto dos erros, que modelos mensais são mais apropriados na previsão de valores de radiação solar global. Até o momento foram desenvolvidos modelos para todos os dados do Rio Grande do Sul. Baseando-se no fato de que para os EUA, modelos regionalizados mensais originaram erros de estimativa menores, foram desenvolvidos modelos mensais regionais, isto é, cada região tem um conjunto de coeficientes para cada mês e um conjunto de coeficientes únicos para o ano todo. Esses coeficientes mensais serão utilizados para a estimativa, como já descrito anteriormente, dos valores da radiação solar global para o Rio Grande do Sul. Estes coeficientes encontram-se descritos na Tabela 6.14.

**Tabela 6.14.** Descrição dos coeficientes de correlação, determinação e coeficientes para a equação de regressão linear múltipla para os dados regionalizados do Rio Grande do Sul.

<b>LITORAL</b>								
<b>T</b>	<b>N*</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
ANO	733	0,715	0,511	0,114	0,623	-0,006500	0,001800	0,061
JAN	62	0,735	0,540	0,558	0,481	-0,015000	-0,000015	0,054
FEV	62	0,758	0,575	0,669	0,441	-0,021000	0,000265	0,053
MAR	61	0,756	0,571	-0,03	0,733	-0,002600	0,001800	0,050
ABR	61	0,636	0,404	0,288	0,443	-0,004141	0,000201	0,059
MAI	61	0,628	0,394	0,411	0,574	-0,010000	-0,000697	0,075
JUN	59	0,620	0,385	0,435	0,499	-0,007197	-0,000707	0,065
JUL	61	0,623	0,389	0,004	0,566	-0,001957	0,002893	0,062
AGO	60	0,750	0,563	0,139	0,617	-0,003710	0,000724	0,054
SET	60	0,718	0,515	0,280	0,566	-0,006820	-0,000364	0,044
OUT	64	0,734	0,538	-0,45	0,730	0,002303	0,006002	0,049
NOV	61	0,759	0,576	-0,25	0,743	-0,005278	0,005368	0,053
DEZ	61	0,735	0,540	0,249	0,643	-0,011921	0,001571	0,061
<b>CAMPANHA</b>								
<b>T</b>	<b>N*</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
ANO	1143	0,525	0,275	0,543	0,358	-0,0080000	-0,0015000	0,067
JAN	92	0,611	0,373	0,318	0,266	0,0030000	-0,0010000	0,049
FEV	97	0,641	0,411	0,538	0,282	-0,0030000	-0,0020000	0,048
MAR	99	0,505	0,255	0,630	0,235	-0,0011210	-0,0035790	0,057
ABR	92	0,596	0,355	0,641	0,269	-0,0035120	-0,0030552	0,059
MAI	97	0,490	0,240	0,715	0,296	-0,0102520	-0,0021665	0,075
JUN	91	0,684	0,468	0,466	0,581	-0,0013000	-0,0022418	0,080
JUL	96	0,631	0,319	0,903	0,352	-0,0058000	-0,0060398	0,077
AGO	96	0,670	0,449	0,695	0,316	-0,0013000	-0,0047990	0,059
SET	94	0,726	0,528	0,365	0,439	0,0027230	-0,0025160	0,048
OUT	97	0,534	0,285	0,302	0,304	0,0029190	-0,0010127	0,046
NOV	97	0,560	0,314	0,378	0,344	-0,0009760	-0,0013360	0,048
DEZ	97	0,516	0,266	0,439	0,123	0,0043750	-0,0019487	0,048

Continuação da Tabela 6.14.

<b>PLANALTO MÉDIO – SERRA – ENCOSTA – CAMPOS DO PLANALTO</b>								
<b>T</b>	<b>N*</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
ANO	943	0,472	0,223	0,267	0,440	-0,00417	0,000531	0,076
JAN	83	0,454	0,206	-0,032	0,364	0,012	0,000064	0,075
FEV	84	0,459	0,211	0,176	0,373	0,00518	-0,000719	0,075
MAR	82	0,527	0,277	0,144	0,408	0,00757	-0,001104	0,076
ABR	78	0,453	0,189	0,373	0,238	0,00322	-0,001338	0,068
MAI	79	0,451	0,203	0,254	0,376	0,00170	0,000218	0,082
JUN	83	0,421	0,177	0,329	0,447	-0,00532	0,000536	0,096
JUL	81	0,591	0,349	0,522	0,561	-0,00672	-0,002723	0,092
AGO	74	0,571	0,326	0,330	0,463	0,00181	-0,00181	0,075
SET	75	0,527	0,278	0,105	0,603	-0,00535	0,001388	0,067
OUT	74	0,486	0,236	0,093	0,452	0,00289	0,000612	0,065
NOV	75	0,416	0,173	0,178	0,400	0,00001	0,000793	0,069
DEZ	75	0,400	0,160	0,025	0,459	0,00306	0,001650	0,077
<b>PLANALTO-ALTO E MÉDIO URUGUAI</b>								
<b>T</b>	<b>N*</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
ANO	240	0,630	0,397	0,611	0,417	-0,0102	-0,00230	0,068
JAN	18	0,732	0,535	1,133	0,277	-0,017882	-0,06916	0,075
FEV	17	0,711	0,506	0,185	0,388	0,01523	-0,00392	0,068
MAR	19	0,409	0,168	0,803	-0,020	-0,00102	-0,00415	0,072
ABR	18	0,696	0,484	0,795	0,290	-0,00945	-0,00383	0,069
MAI	20	0,771	0,594	0,785	0,380	0,00097	-0,00623	0,072
JUN	20	0,761	0,579	0,817	0,511	-0,00559	-0,00606	0,072
JUL	19	0,526	0,277	0,822	0,319	-0,00860	-0,00446	0,065
AGO	22	0,594	0,353	0,625	0,342	-0,00617	-0,00316	0,065
SET	22	0,683	0,466	0,649	0,442	-0,01000	-0,00400	0,048
OUT	23	0,579	0,356	0,839	0,071	-0,00694	-0,00427	0,047
NOV	21	0,724	0,524	1,032	0,341	-0,02895	-0,00232	0,053
DEZ	20	0,339	0,115	0,971	-0,018	-0,01330	-0,00290	0,060
<b>PORTO ALEGRE-DEPRESSÃO CENTRAL</b>								
<b>T</b>	<b>N*</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
ANO	313	0,666	0,443	0,236	0,573	-0,0077000	0,0015000	0,052
JAN	25	0,816	0,665	-0,26	0,633	0,0073340	0,0028530	0,033
FEV	25	0,867	0,751	0,090	0,555	0,0023578	0,0001750	0,031
MAR	25	0,826	0,642	0,139	0,365	0,0127560	-0,0022470	0,029
ABR	26	0,717	0,514	0,513	0,336	-0,0016090	-0,0020740	0,039
MAI	26	0,682	0,464	0,543	0,411	-0,0110000	0,0003010	0,047
JUN	27	0,564	0,318	0,318	0,502	-0,0023200	0,0006090	0,054
JUL	26	0,695	0,483	0,825	0,521	-0,0161700	-0,0037400	0,061
AGO	27	0,705	0,497	0,292	0,539	0,0019647	-0,0015100	0,062
SET	27	0,604	0,364	0,217	0,386	-0,0035256	0,0013370	0,036
OUT	26	0,882	0,777	0,186	0,670	-0,0067400	0,0009080	0,030
NOV	27	0,646	0,417	0,404	0,338	0,0061000	-0,0034400	0,041
DEZ	26	0,526	0,277	0,339	0,437	-0,0008800	-0,0011740	0,044

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_o$ . <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura média.<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa Média.

Os cálculos dos coeficientes presentes na Tabela 6.14 foram feitos utilizando-se a mesma distribuição de estações mostradas na Tabela 6.10. No entanto há que se ressaltar o fato de que agora os dados do Planalto médio serão utilizados para se estimar os valores de toda a região do Planalto com exceção do Alto e Médio Uruguai. Tal procedimento explica-se pelo fato de que existem poucas ou nenhuma estação de coleta nas sub-regiões da Serra, Encosta e Campos do Planalto.

Concluindo este capítulo pode-se dizer que o modelo de Ångström–Prescott é um bom modelo quando se tem apenas a insolação, mas que, dispondo-se de variáveis como a temperatura média e a umidade relativa, modelos de regressão linear múltipla dão melhores resultados. Qualquer um destes modelos, sendo regionalizados e calculados para cada mês, fornecem um resultado melhor ainda em termos de diminuição do erro associado à estimativa.

#### 6.7. REPRESENTATIVIDADE TEMPORAL DOS VALORES MÉDIOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA A BASE DE DADOS DA FEPAGRO

Conforme descrito no item 3.7, a aplicação da Equação 3.27 aos dados do Rio Grande do Sul verificou-se, de acordo com a Tabela 6.15, que em 99,4 % dos casos as médias mensais são obtidas a partir de séries temporais com maior extensão que o mínimo de anos estatisticamente necessário para garantir uma variabilidade menor ou igual que 7,5%. Os 0,6% restantes, indicados em cinza na Tabela 6.15 poderia estar sugerindo, além de séries de duração insuficiente, a existência de problemas na manutenção do instrumental de medição e/ou no processamento dos dados e/ou outro problema conforme sugerido no item 3.7.

**Tabela 6.15** Representatividade temporal dos valores diários, médios mensais, da radiação solar. Para cada local os valores da parte superior, em anos, são calculados e os valores da parte inferior, medidos.

<b>Localidade</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>Pelotas</b>	3,0	6,2	3,6	5,7	4,3	5,7	6,6	5,6	3,9	2,9	2,5	2,3
	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0	29,0	29,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
<b>Júlio de Castilhos</b>	22,2	19,6	27,2	13,9	24,3	27,9	25,2	24,4	13,0	13,3	7,8	10,8
	36,0	37,0	38,0	37,0	35,0	38,0	36,0	29,0	28,0	29,0	29,0	30,0
<b>São Borja</b>	7,4	2,8	5,8	14,4	6,5	11,7	5,6	5,7	8,0	2,2	5,4	4,3
	15,0	15,0	15,0	14,0	13,0	13,0	13,0	15,0	16,0	16,0	16,0	16,0
<b>Santana do Livramento</b>	2,0	5,8	2,1	4,5	2,5	10,8	8,7	7,6	0,9	9,2	4,3	3,8
	12,0	12,0	14,0	13,0	14,0	12,0	11,0	13,0	13,0	14,0	14,0	14,0

Continuação da Tabela 6.15

<b>Santa Rosa</b>	4,2	6,3	9,4	5,0	10,8	13,0	24,2	16,5	12,6	5,4	9,0	4,6
	23,0	23,0	23,0	21,0	21,0	24,0	24,0	22,0	24,0	24,0	24,0	23,0
<b>Quarai</b>	8,3	8,0	12,4	7,9	12,3	17,1	18,0	10,4	8,0	5,5	7,6	5,5
	28,0	30,0	32,0	29,0	30,0	29,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0	31,0
<b>Maquine</b>	15,0	16,9	17,6	15,5	25,4	14,5	11,1	24,6	16,2	19,0	20,6	29,8
	32,0	32,0	31,0	31,0	31,0	30,0	32,0	30,0	30,0	34,0	30,0	31,0
<b>Farroupilha</b>	6,9	8,0	9,3	9,7	11,2	8,1	5,1	7,9	7,3	5,3	3,7	6,5
	24,0	30,0	27,0	25,0	25,0	25,0	26,0	26,0	25,0	26,0	26,0	25,0
<b>Erechim</b>	20,9	15,9	10,2	14,1	15,6	15,1	7,1	10,3	8,3	6,4	10,2	6,9
	18,0	17,0	19,0	18,0	20,0	20,0	19,0	22,0	22,0	23,0	21,0	20,0
<b>Encruzilhada do Sul</b>	8,8	9,4	6,2	13,1	13,9	17,6	11,6	13,8	10,3	6,3	6,9	3,4
	21,0	24,0	22,0	21,0	25,0	24,0	25,0	24,0	21,0	23,0	23,0	23,0
<b>Cruz Alta</b>	9,8	12,4	6,8	9,1	7,2	12,2	12,4	6,5	10,3	8,5	7,8	8,3
	24,0	24,0	21,0	20,0	23,0	21,0	21,0	23,0	23,0	21,0	22,0	22,0
<b>Cachoeirinha</b>	4,9	6,4	4,2	4,7	5,2	5,2	9,2	14,4	3,9	7,7	4,6	4,3
	25,0	25,0	25,0	26,0	26,0	27,0	26,0	27,0	27,0	26,0	27,0	26,0
<b>Bagé</b>	13,6	10,7	12,2	9,6	14,2	19,5	13,9	14,4	21,2	11,0	15,1	10,9
	24,0	23,0	24,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	24,0	24,0	23,0	23,0
<b>Alegrete</b>	4,5	5,5	3,6	3,1	2,5	9,7	4,4	4,9	6,9	2,5	3,7	5,2
	16,0	16,0	16,0	15,0	15,0	14,0	13,0	13,0	13,0	14,0	13,0	13,0

## 7.0 MAPAS MENSAS E ANUAL DE ISO-RADIAÇÃO

Este capítulo é uma apresentação dos mapas mensais e anuais de iso-irradiação global horizontal e insolação para o Rio Grande do Sul, bem como a metodologia utilizada para a confecção dos mesmos.

Inicialmente, conforme já descrito no capítulo anterior, os dados das estações agroclimatológicas do Rio Grande do Sul, pertencentes a FEPAGRO e INMET bem como UF-Pel/EMBRAPA/INMET foram preliminarmente processados e convertidos em médias mensais de insolação, radiação solar global horizontal, umidade relativa e temperatura média, conforme Tabela 6.7.

A Figura 7.1 mostra a distribuição das estações ou locais com os valores de radiação solar global medidos ou estimados bem como sua classificação por fonte de dados. As estações da FEPAGRO, conforme Tabela 6.7, possuem dados medidos de radiação solar global horizontal, umidade relativa e temperatura e são representados pelos pontos vermelhos. Os dados de radiação solar global horizontal correspondentes aos pontos verdes são valores estimados por regressão linear múltipla levando em consideração além da fração de insolação, cuja origem é o INMET, a umidade relativa e a temperatura média, conforme coeficientes regionalizados mensais constantes na Tabela 6.14. Nestes pontos a umidade relativa e a temperatura foram interpoladas a partir de estações vizinhas da FEPAGRO com estas medidas pelo método do inverso do quadrado das distâncias.

Os dados de radiação solar global horizontal correspondentes ao ponto cor de laranja são da UFPEL/EMBRAPA/INMET, que também dispõe da insolação, temperatura e umidade relativa.

Os pontos azuis indicam locais onde foram interpoladas pelo método do inverso do quadrado das distâncias a insolação, a temperatura média e a umidade relativa. A radiação solar global horizontal foi estimada a partir de equações regionalizadas de regressão linear múltipla mensal conforme coeficientes da Tabela 6.14.

Os dados correspondentes aos pontos de cor violeta são originários da OLADE, disponíveis no *site* da CRESESB – SUNDATA. Estes dados são necessários para que o programa de desenho dos mapas preencha com dados locais externos ao Rio Grande do Sul. Não se tem informação dos erros associados a estes dados bem como o intervalo de tempo em que foram baseados, sendo, portanto, uma fonte de imprecisão dos mapas e principalmente de valores de radiação solar global horizontal nas fronteiras do estado do Rio Grande do Sul.

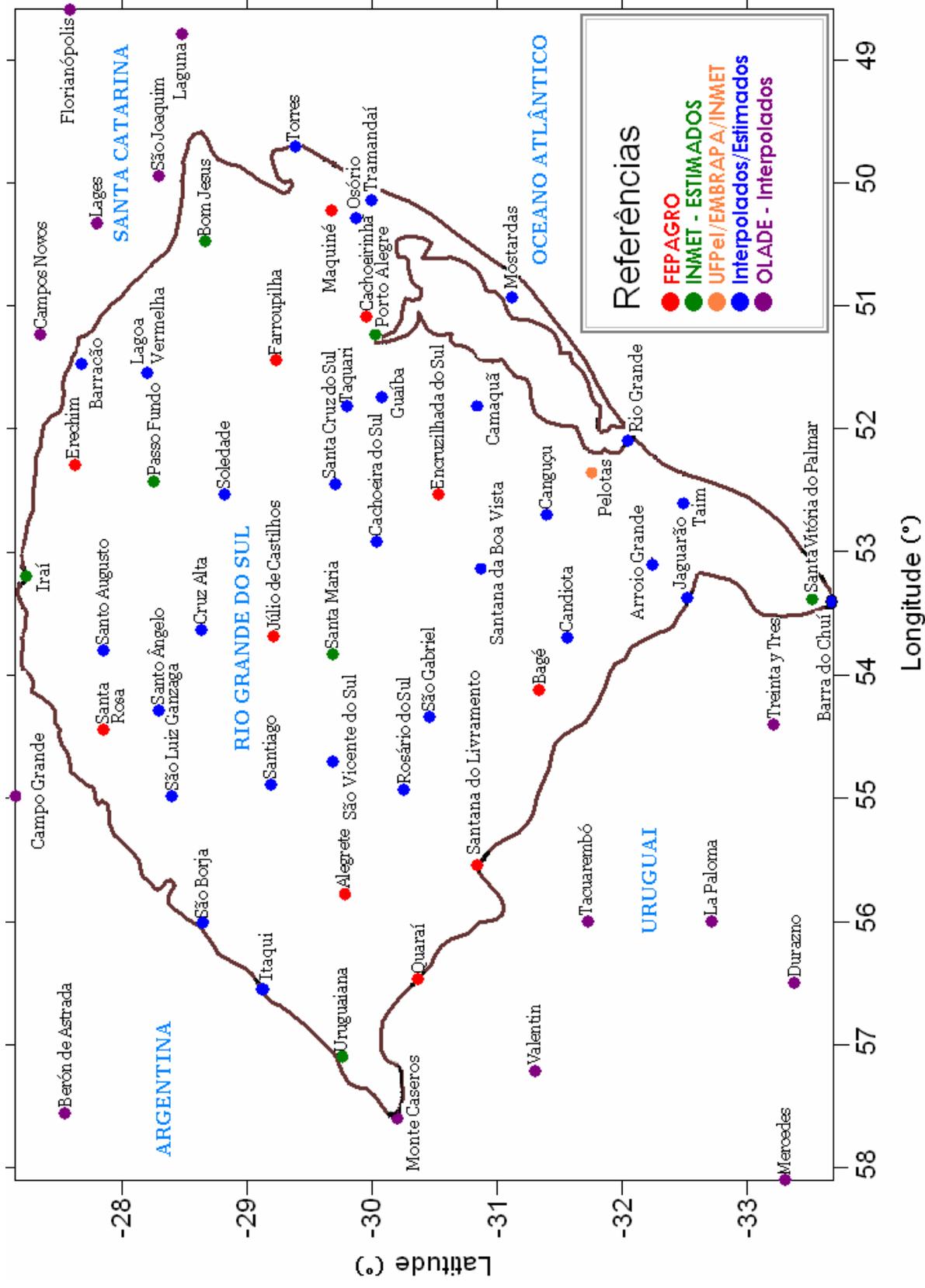


Figura 7.1 Distribuição das estações com valores de radiação solar global horizontal medidos, interpolados e estimados.

A Tabela 7.1 mostra as médias mensais de radiação solar global horizontal para algumas estações de coleta do Rio Grande do Sul tendo como fonte a FEPAGRO e a UFFeI/EMBRAPA/INMET.

A Tabela 7.2 apresenta as médias mensais de insolação para o Rio Grande do Sul de algumas estações da FEPAGRO. Somente as que têm a radiação solar correspondente. Foram utilizados para a estimativa da radiação solar global para locais sem medidas de radiação solar. Apresenta também a insolação para Pelotas tendo como fonte a UFFeI/EMBRAPA/INMET.

A Tabela 7.3 apresenta médias mensais medidas de temperatura média de algumas estações da FEPAGRO.

A Tabela 7.4 apresenta médias mensais medidas de umidade relativa de algumas estações da FEPAGRO.

A Tabela 7.5 apresenta médias mensais de insolação de algumas estações adquiridas junto ao 8° DISME/INMET – Porto Alegre – RS.

Para aumentar o número de pontos com dados para o traçado dos mapas de radiação solar global horizontal sobre o Rio Grande do Sul, foi utilizado o método do inverso do quadrado das distâncias para interpolar valores a partir dos pontos mais próximos com dados de insolação umidade relativa e temperatura média. Conforme já descrito no início deste capítulo, a Figura 7.1 mostra a distribuição destes pontos.

Conforme descrito no início deste capítulo, foram utilizados dados procedentes da OLADE através de um *site* do CRESESB para pontos do Uruguai e da Argentina. Esses dados, embora não se saiba precisar sua precisão nem a base de tempo utilizada para calculá-los, são necessários para completar a região que envolve o Rio Grande do Sul. O Programa utilizado para o traçado dos mapas de isolinhas de radiação solar global horizontal necessita destes pontos para informar dados externos ao Rio Grande do Sul. Alguns destes pontos, como os do Uruguai, são interpolados, pelo método do inverso do quadrado das distâncias, entre pontos com dados da OLADE e pontos do Rio Grande do Sul. O mesmo ocorre com alguns pontos da Argentina. Os dados do estado de Santa Catarina têm como fonte o banco de dados utilizado pelo programa RADIASOL, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da UFRGS. Este programa também usa dados de várias fontes, até mesmo da OLADE. Os dados de radiação solar global horizontal para Argentina, Uruguai e Santa Catarina encontram-se na Tabela 7.6.

A Tabela 7.7 mostra as estações com os dados de radiação solar global horizontal estimados, por regressão linear múltipla, a partir dos dados de insolação do INMET, dados de umidade relativa e temperatura médios interpolados pelo método do inverso do quadrado das distâncias.

**Tabela 7.1** Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global horizontal medidas de estações gaúchas da FEPAGRO e UFPe/EMBRAPA.

Estação	Lat (°)	Long (°)	Altitude (m)	Período (anos)	Radiação Solar Global Média Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
					Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
<i>Alegrete</i>	-29,78	55,77	96	1968-86	20,57	18,49	15,74	13,14	9,84	7,43	8,75	10,42	13,45	16,67	19,28	21,17	14,70
Bagé	-31,34	54,10	214	1961-84	20,70	18,02	15,61	12,25	9,37	7,39	7,77	10,23	13,17	16,79	18,99	20,79	14,29
Cachoeirinha	-29,96	51,07	4	1975-99	21,29	19,31	17,01	13,24	10,53	8,93	9,41	10,55	13,61	17,10	20,36	21,07	15,11
Encruzilhada do Sul	-30,53	52,52	420	1958-99	19,93	17,67	15,42	12,69	10,12	8,23	8,41	9,77	12,39	16,18	18,94	19,97	14,14
Erechim	-27,62	52,27	760	1966-91	19,23	18,13	16,24	13,46	11,45	9,57	10,29	11,82	13,94	17,09	19,19	19,78	14,98
Farroupilha	-29,23	51,43	702	1963-96	18,95	17,55	19,91	12,00	9,35	8,17	8,89	9,63	12,53	15,22	17,67	18,70	13,67
Júlio de Castilhos	-29,22	53,67	514	1956-99	20,49	19,18	16,10	12,46	9,98	8,48	8,84	10,44	13,28	17,24	19,72	21,56	14,81
Maquiné	-29,68	50,22	32	1958-97	17,36	15,89	14,29	11,82	9,66	8,47	8,62	10,21	11,64	14,43	17,65	18,16	13,18
Quaraí	-30,38	56,45	100	1966-91	21,15	19,26	17,14	13,70	10,88	9,15	9,65	11,90	14,30	18,06	20,77	22,18	15,79
Santa Rosa	-27,85	54,42	360	1975-98	19,82	18,16	15,97	12,31	10,36	8,66	9,00	10,81	12,76	15,90	18,36	20,00	14,34
Santana do Livramento	-30,88	55,52	210	1966-81	20,39	18,22	15,66	13,00	9,71	7,63	7,63	10,22	13,57	16,30	19,38	20,75	14,37
São Borja	-28,65	56,00	99	1956-99	21,88	19,82	17,44	13,10	11,12	9,33	9,72	11,67	15,09	18,77	20,36	22,75	16,21
Cruz Alta	-28,64	53,61	437	1974-01	20,61	19,32	17,15	13,60	10,44	9,05	9,71	11,63	14,03	17,64	20,19	21,96	15,52
Taquari	-29,80	51,82	76	1963-99	20,47	18,28	15,77	13,07	10,09	8,81	9,82	10,30	12,93	16,40	19,34	20,50	14,65
Pelotas*	-31,47	52,25	13	1971-00	20,85	18,37	15,80	12,44	9,45	7,70	7,95	9,61	12,52	16,15	19,29	21,94	14,43

\* Dados da UFPe/EMBRAPA

**Tabela 7.2** Apresentação das médias mensais e anuais de Insolação solar para as estações gaúchas da FEPAGRO.

<i>Estação</i>	Latitude		Longitude		Período		Altitude		Insolação Média Diária (h)												
	(°)	(°)	(°)	(°)	(anos)	(m)	(m)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano	
Alegrete	29,78	55,77	1968-86	96	8,53	8,16	7,42	7,31	6,29	5,12	5,27	5,61	6,23	6,89	8,07	8,81	7,00				
Bagé	31,34	54,10	1961-84	214	8,56	7,92	7,05	6,69	5,57	4,56	4,52	5,19	5,70	6,85	8,00	8,90	6,64				
Encruzilhada do Sul	30,54	52,52	1966-91	420	8,27	7,61	6,80	6,38	5,42	4,55	4,57	5,01	5,36	6,69	7,85	8,53	6,43				
Quaraí	30,39	56,43	1966-91	100	8,40	7,78	6,99	6,52	5,58	4,58	4,77	5,17	5,67	6,98	8,07	8,73	6,60				
Santana do Livramento	30,89	55,52	1966-81	210	8,31	7,73	6,90	6,45	5,48	4,46	4,66	5,17	5,69	6,89	8,00	8,66	6,53				
São Borja	28,66	56,00	1956-99	99	8,97	8,44	7,64	7,03	6,19	5,20	5,36	5,81	6,38	7,61	8,63	9,29	7,21				
Santa Rosa	-27,85	54,42	1975-98	360	7,66	7,62	6,96	6,26	5,46	4,68	5,38	5,59	5,88	6,64	7,42	7,81	6,45				
Erechim	-27,62	52,27	1966-91	760	7,73	7,30	6,89	6,34	6,19	5,31	5,61	5,65	5,75	6,76	7,32	7,83	6,56				
Júlio de Castilhos	-29,22	53,67	1956-99	514	8,73	8,48	7,60	6,71	6,09	5,25	5,31	5,51	6,17	7,56	8,34	9,06	7,07				
Farroupilha	-29,23	51,43	1963-96	702	7,40	6,97	6,31	5,99	5,47	4,62	5,09	4,88	5,48	6,29	7,00	7,19	6,06				
Cachoeirinha	-29,96	51,07	1975-99	4	7,99	7,5	7,08	6,10	5,5	4,67	4,94	5,03	5,53	6,44	7,63	8,04	6,37				
Maquiné	-29,68	50,22	1958-97	32	6,55	6,37	5,99	5,74	5,58	5,28	5,18	5,06	5,00	5,74	6,55	6,88	5,83				
Cruz Alta	-28,64	53,61	1974-01	437	7,92	7,71	6,73	6,22	5,73	5,14	5,42	5,75	5,92	7,07	7,70	8,10	6,62				
Pelotas*	-31,47	52,25	1971-00	13	8,10	7,31	6,87	6,32	5,73	4,87	4,83	4,96	5,38	6,44	7,51	8,55	6,44				

\* Dados da UFPel/EMBRAPA/INMET

**Tabela 7.3** Apresentação das médias mensais e anuais de Temperatura Média para as estações gaúchas da FEPAGRO.

<i>Estação</i>	Latitude Longitude Período			Temperatura Média (°C)													
	(°)	(°)	(anos)	(m)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Alegrete	29,78	55,77	1968-86	96	26,4	25,6	23,7	20,0	17,2	14,3	14,9	15,7	18,0	20,8	22,9	25,6	20,4
Bagé	31,34	54,10	1961-84	214	26,1	25,3	23,4	20,0	16,9	13,9	14,3	15,9	17,5	20,3	22,6	25,5	20,1
Encruzilhada do Sul	30,54	52,52	1966-91	420	22,9	22,6	21,1	18,1	15,4	12,7	12,8	13,3	14,7	17,2	19,2	21,6	17,6
Quaraí	30,39	56,43	1966-91	100	26,1	24,9	23,2	19,3	16,1	13,2	13,7	15,0	18,9	19,8	22,3	25,1	19,8
Santana do Livramento	30,89	55,52	1966-81	210	24,5	24,2	22,2	18,8	15,8	12,7	13,1	13,5	16,2	18,5	21,0	23,9	18,7
São Borja	28,66	56,00	1956-99	99	27,1	26,1	24,7	21	17,9	14,9	15,1	16,8	18,1	21,8	23,8	26,4	21,1
Santa Rosa	-27,85	54,42	1975-98	360	26,1	25,1	24,0	21,2	17,8	15,6	15,6	17,3	18,4	21,8	23,9	25,9	21,1
Erechim	-27,62	52,27	1966-91	760	23,0	22,7	21,7	18,8	16,2	14,1	14,5	15,2	16,1	18,9	20,7	22,3	18,7
Júlio de Castilhos	-29,22	53,67	1956-99	514	23,9	23,5	22,0	18,9	16,0	13,6	13,5	14,6	16,1	18,9	21,1	23,3	18,8
Farroupilha	-29,23	51,43	1963-96	702	22,2	22,1	20,5	17,5	14,6	12,2	12,5	13,4	14,9	17,3	19,1	21,1	17,3
Cachoeirinha	-29,96	51,07	1975-99	4	25,9	25,7	24,3	21,0	17,3	14,6	14,5	16,0	17,5	20,4	22,4	24,7	20,4
Maquiné	-29,68	50,22	1958-97	32	24,3	24,4	23,1	20,5	17,7	15,1	15,5	15,9	17,2	19,6	21,6	23,3	19,9
Cruz Alta	-28,64	53,61	1974-01	437	24,5	23,7	23,3	19,6	16,6	14,3	13,8	15,2	16,4	19,8	21,8	24,5	19,5
Pelotas*	-31,47	52,25	1971-00	13	23,4	23,0	21,7	18,5	15,1	12,5	12,4	13,4	14,9	17,5	19,6	21,9	17,8

\* Dados da UFPel/EMBRAPA/INMET

**Tabela 7.4** Apresentação das médias mensais e anuais de Umidade Relativa para as estações gaúchas da FEPAGRO.

<i>Estação</i>	<b>Latitude Longitude Período</b>			<b>Umidade Relativa (%)</b>													
	(°)	(°)	(anos)	(m)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Alegrete	29,78	55,77	1968-86	96	66,2	69,9	71,4	72,0	75,6	76,6	74,8	73,2	69,2	69,2	66,2	63,9	70,7
Bagé	31,34	54,10	1961-84	214	65,5	70,9	70,9	72,2	75,2	76,1	74,6	71,0	68,0	68,8	63,6	60,8	69,8
Encruzilhada do Sul	30,54	52,52	1966-91	420	73,2	78	79,3	80,9	82,2	83,2	82,2	80,5	79,8	77,6	74,6	72,5	78,7
Quaraí	30,39	56,43	1966-91	100	61,0	68,1	70,1	74,6	77,3	78,1	76,8	71,8	68,0	66,4	62,0	57,5	69,3
Santana do Livramento	30,89	55,52	1966-81	210	70,9	72,20	74,3	75,5	79,1	82	82,3	79,4	76,1	73,3	67,9	66,9	75,0
São Borja	28,66	56,00	1956-99	99	69,1	74,7	74,7	78,6	78,3	80,1	78,5	76,3	74,3	70,1	68,8	66,4	74,2
Santa Rosa	-27,85	54,42	1975-98	360	72,6	77,8	77,4	76,7	78,1	80,0	78,5	74,9	73,4	71,3	67,8	67,1	74,6
Erechim	-27,62	52,27	1966-91	760	72,5	75,5	75,6	76,4	75,9	75,1	72,7	71,1	70,8	69,2	68,7	69,6	72,8
Júlio de Castilhos	-29,22	53,67	1956-99	514	21,7	74,9	76,7	77,5	78,7	80,9	80,1	77,9	76,3	72,2	69,8	69,2	71,3
Farroupilha	-29,23	51,43	1963-96	702	75,2	77,9	80,3	81,7	82,9	82,6	80,2	79,7	77,4	76,0	74,9	74,8	78,6
Cachoeirinha	-29,96	51,07	1975-99	4	70,7	74,1	74,9	77,7	79,1	80,4	79,3	77,8	76,7	73,9	70,3	68,7	75,3
Maquiné	-29,68	50,22	1958-97	32	77,6	79,8	80,5	80,3	79,4	78,6	79,0	78,6	76,3	76,7	75,5	75,5	78,2
Cruz Alta	-28,64	53,61	1974-01	437	72,9	78,5	78,0	77,1	78,3	79,8	79,6	76,0	75,2	71,5	66,5	66,6	75,0
Pelotas*	-31,47	52,25	1971-00	13	80,9	79,9	80,5	52,3	83,6	84	85	83,2	81,8	79,5	76	75,5	78,5

\* Dados da UFPe/EMBRAPA/INMET

**Tabela 7.5** Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar estimada para algumas estações do 8° DISME/INMET – Porto Alegre – RS.

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Período (anos)	Altitude (m)	Insolação Média Diária (h)												
					Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Bento Gonçalves	-29,17	51,42	1976-85	672	7,81	7,27	6,74	6,33	5,07	4,55	4,85	4,61	5,34	6,38	7,30	8,15	7,44
Bom Jesus	-28,67	50,47	1979-88	1047	6,68	6,52	5,81	6,06	4,68	4,27	4,66	4,42	5,15	6,25	5,92	6,84	5,60
Iraí	-27,20	53,23	1975-85	222	8,05	7,53	7,04	6,27	5,61	4,73	5,32	4,62	5,57	6,67	7,14	8,05	6,38
Passo Fundo	-28,26	52,41	1970-87	667	7,94	7,61	6,79	6,45	5,71	5,01	5,26	4,85	5,55	6,52	7,29	8,08	6,42
Porto Alegre	-30,03	51,22	1970-85	10	7,94	7,36	6,31	6,17	5,07	4,53	4,63	4,52	5,45	6,09	7,20	7,73	6,08
Santa Maria	-29,71	53,81	1976-85	95	8,16	7,35	6,94	6,17	5,02	4,36	4,35	4,37	5,55	6,47	7,42	8,35	6,21
Santa Vitória do Palmar	-33,52	53,36	1973-87	5	8,54	7,30	7,06	6,39	5,40	4,95	4,48	5,07	5,68	6,70	7,47	8,30	6,45
Uruguaiana	-29,76	57,09	1973-83	74	8,75	7,96	7,45	6,60	5,60	4,85	4,80	5,30	6,35	7,58	8,21	9,22	6,89

**Tabela 7.6** Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global de todas as estações e fontes consideradas para o traçado dos mapas de iso-radiação.

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Período (anos)*	Altitude (m)	Radiação Solar Global Horizontal (MJ/m <sup>2</sup> )												
					Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
<b>SANTA CATARINA</b>																	
Bom Jesus	-28,67	50,47	SI	1047	17,97	16,95	16,30	12,80	10,84	10,78	9,94	10,63	13,15	16,86	18,33	19,16	14,48
Campos Novos	-27,36	51,22	SI	934	20,20	21,40	17,80	15,00	12,80	10,10	10,90	13,20	15,80	19,50	21,00	22,80	16,79
Florianópolis	-27,58	48,59	SI	25	20,00	18,70	16,70	13,80	11,30	9,90	10,50	12,50	13,90	16,20	18,90	20,60	15,25
Lages	-27,81	50,32	SI	884	19,80	18,80	16,10	14,10	11,70	9,00	10,80	12,70	14,10	17,20	20,00	22,00	15,53
Laguna	-28,48	48,78	SI	2	20,50	19,20	16,20	14,00	11,70	9,60	10,50	12,50	13,30	17,00	20,00	21,80	15,53
São Joaquim	-28,30	49,93	SI	1353	17,97	16,95	16,30	12,80	10,84	10,78	9,94	10,63	13,15	16,86	18,33	19,16	14,48
<b>ARGENTINA</b>																	
Campo Grande	-27,22	54,97	SI	415	21,58	20,06	17,21	13,76	10,96	9,06	9,75	11,83	13,85	17,72	16,90	22,20	15,24
Berón de Astrada	-27,55	57,53	SI	55	22,91	20,57	18,39	14,09	11,42	9,44	10,23	12,38	15,36	19,42	18,74	22,01	15,72
<b>URUGUAI</b>																	
Durazno	-33,38	56,48	SI	95	21,95	19,20	16,46	13,14	9,72	8,00	7,10	10,59	13,24	17,25	20,67	21,97	14,94
La Paloma	-32,72	55,98	SI	70	21,94	19,34	16,61	13,35	9,86	8,12	7,68	10,85	13,68	17,41	20,81	22,23	15,16
Mercedes	-33,30	58,10	SI	62	22,08	19,12	16,32	12,93	9,52	7,83	6,40	10,29	12,72	17,10	20,61	21,77	14,73
Monte Caseros	-30,20	57,60	SI	54	22,16	19,18	16,87	13,12	10,14	8,64	9,33	11,00	13,99	17,73	20,92	21,88	15,41
Tacuarembó	-31,71	55,98	SI	140	21,28	18,97	16,40	13,33	9,99	8,14	8,09	10,85	13,96	17,16	20,34	21,77	15,02
Treinta y Tres	-33,22	54,38	SI	9	21,86	18,98	16,24	12,90	9,56	7,84	6,50	10,27	12,78	17,01	20,44	21,59	14,67
Valentin	-31,30	57,20	SI	74	22,06	18,35	16,44	13,07	9,72	8,19	8,35	11,07	13,64	16,97	20,40	22,20	15,04

\*SI – Sem Informação.

**Tabela 7.7** Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global horizontal estimada de estações gaúchas com dados de insolação medidos pelo 8° DISME/INMET – Porto Alegre.

Estação	Lat (°)	Long (°)	Altitude (m)	Período (anos)	Radiação Solar Global Média Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												Ano
					Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Santo Ângelo	-28,30	-54,26	281	1963-84	20,61	19,29	16,67	13,36	10,37	8,85	9,32	11,00	13,39	17,04	19,09	20,80	14,98
Bom Jesus	-28,67	-50,47	1047	1979-78	17,97	16,95	16,30	12,80	10,84	10,78	9,94	10,63	13,15	16,86	18,33	19,16	14,48
Iraí	-27,20	-53,23	222	1975-85	20,07	18,20	16,30	13,27	11,04	9,30	9,77	10,61	13,30	16,74	18,42	20,54	14,80
Passo Fundo	-28,26	-52,41	667	1963-83	19,70	18,71	15,86	13,03	10,37	8,95	9,44	10,70	13,44	16,56	19,27	20,22	14,69
Porto Alegre	-30,03	-51,22	10	1970-85	20,38	18,71	15,34	13,36	10,98	8,71	9,32	10,88	13,35	17,50	19,80	20,42	14,90
Santa Maria	-29,69	-53,81	153	1963-83	21,45	19,56	15,41	13,74	11,82	9,25	9,61	10,51	13,72	18,38	19,51	20,40	14,81
Santa Vitória do Palmar	-33,52	-53,37	5	1963-83	21,92	18,92	16,16	12,77	9,46	7,75	6,09	10,10	12,48	16,92	20,39	21,46	14,54
Uruguaiana	-29,76	-57,09	74	1973-83	21,32	19,89	16,87	13,96	10,61	8,69	9,23	11,41	14,89	17,64	19,95	21,52	15,50

A Tabela 7.8 apresenta os valores da radiação solar global horizontal para os locais que tiveram a radiação solar global horizontal estimada por regressão linear múltipla a partir de médias mensais de insolação (fração de insolação), umidade relativa e temperatura média, interpoladas pelo método do inverso do quadrado das distâncias. Nesta Tabela, os dados de Barra do Chuí são repetidos de Santa Vitória do Palmar. Isto se fez necessário devido ao fato que é um ponto extremo do Rio Grande do Sul e sem dados. Como todo o estado do Rio Grande do Sul deve aparecer no mapa, este ponto foi incluído com os dados da referida estação.

### **7.1 Traçado dos mapas de Radiação Solar Global Horizontal**

De posse de todos os dados de radiação solar global horizontal além das Coordenadas Geográficas das respectivas estações ou pontos do Estado do Rio Grande do Sul iniciou-se o traçado dos mapas de iso-radiação solar global horizontal.

Inicialmente foi necessário encontrar um mapa do Rio Grande do Sul que pudesse ser utilizado como fundo num programa de computador de geração de mapas (SURFER). Foi encontrado um mapa com a extensão “.dxf” e é uma projeção cilíndrica equatorial, segundo Gaspar, 2000. Na projeção cilíndrica equatorial os meridianos e os paralelos são igualmente espaçados. O programa de traçado de mapas utiliza este tipo de projeção. Foram testadas várias configurações de mapas e finalmente optou-se por um mapa com resolução de 0,5 MJ/m<sup>2</sup> ou 139 kWh e isolinhas traçadas para diferenças de 1,0 MJ/m<sup>2</sup> ou 278 kWh.

O método de interpolação utilizado no traçado dos mapas foi o de kriging sendo que o modelo de variograma com grau 1 e anisotropia 1. Como observação vale ressaltar que não existem pontos com valores medidos ou interpolados sobre o oceano. A radiação nestes locais é resultado apenas da interpolação feito pelo programa SURFER.

Foram traçados 12 mapas de médias mensais de radiação solar global horizontal e um mapa de média mensal anual de radiação solar global horizontal. As Figuras 7.2 a 7.14 mostram estes mapas.

Observando-se os mapas pode-se perceber, em alguns deles, algumas áreas de concentração de radiação solar global horizontal ou de valores menores do que regiões circunvizinhas.

Como citado no parágrafo anterior, alguns mapas apresentam concentrações localizadas de energia solar em alguns pontos específicos, normalmente em torno de estações com medidas de radiação solar global horizontal. Infelizmente, devido à metodologia utilizada

**Tabela 7.8** Apresentação das médias mensais e anuais de radiação solar global horizontal estimada a partir de variáveis interpoladas. Estas variáveis são: umidade relativa, temperatura média e insolação. Método de interpolação: inverso do quadrado das distâncias.

Estação	Lat (°)	Long (°)	Altitude (m)	(anos)	Radiação Solar Global Média Diária (MJ/m <sup>2</sup> )												
					Jan	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Arroio Grande	-32,24	-53,09	22	1963-83	20,51	19,03	15,48	12,57	9,69	7,98	7,82	9,74	12,24	16,26	19,25	20,14	14,23
Camaquã	-30,85	-51,81	39	1963-83	20,37	19,02	15,71	13,03	10,31	8,76	8,61	10,26	12,58	16,38	19,21	20,07	14,53
Candiota	-31,56	-53,67	220	1963-83	20,73	19,28	15,68	12,83	9,98	8,19	8,10	10,02	12,74	16,59	19,54	20,18	14,49
Canguçu	-31,40	-52,68	386	1963-83	20,30	19,01	15,56	12,78	9,92	8,34	8,20	10,00	12,39	16,32	19,24	20,05	14,34
Guatuba	-30,07	-51,73	46	1968-84	20,76	18,56	15,41	13,17	11,28	8,85	9,00	10,51	13,72	18,38	19,85	21,20	15,06
Itaqui	-29,13	-56,55	78	1963-83	21,27	19,75	17,00	13,86	10,57	8,73	9,19	11,35	14,68	17,61	19,74	21,42	15,43
Jaguarão	-32,54	-53,35	26	1933-74	20,61	19,05	15,50	12,59	9,69	7,97	8,83	9,77	12,33	16,08	19,23	20,15	14,32
Lagoa Vermelha	-28,21	-51,53	801	1963-83	19,54	18,51	16,05	13,11	10,46	9,09	9,63	10,73	13,51	16,31	19,39	20,28	14,72
Mostardas	-31,11	-50,92	17	1963-83	19,15	16,29	14,87	12,03	9,25	7,46	7,96	9,48	11,64	14,10	17,33	18,51	13,17
Osório	-29,89	-50,27	16	1963-83	19,90	17,60	14,11	12,48	10,08	8,40	8,17	9,73	12,29	12,82	16,74	18,49	13,32
Rio Grande	-32,05	-52,09	15	1963-83	21,78	18,70	15,79	12,53	10,48	7,45	7,76	9,81	12,00	16,48	20,21	21,54	14,54
Rosário do Sul	-30,26	-54,91	125	1963-83	21,50	18,90	16,02	13,23	10,41	8,65	8,35	10,15	12,80	17,17	19,57	20,49	14,25
Santana da Boa Vista	-30,87	-53,12	306	1963-83	20,69	19,32	15,87	13,15	10,33	8,66	8,61	10,41	13,03	16,73	18,59	20,28	14,55
Santiago	-29,19	-54,87	409	1963-83	20,94	19,34	16,70	13,13	10,12	8,44	8,98	10,89	13,58	17,03	19,39	21,33	14,99
Santo Augusto	-27,86	-53,78	380	1963-84	20,59	19,36	16,76	13,55	10,66	9,20	9,65	11,20	13,57	17,10	19,14	20,81	15,13
São Gabriel	-30,46	-54,32	109	1964-84	20,57	19,62	16,32	13,39	10,38	8,67	8,81	10,65	13,54	17,10	19,62	20,77	14,95
São Vicente do Sul	-29,69	-54,68	129	1963-83	20,96	19,68	16,59	13,75	10,78	9,11	9,32	11,01	13,85	17,26	19,62	20,83	15,23
Soledade	-28,82	-52,52	726	1963-84	19,92	18,82	16,01	13,08	10,39	9,00	9,45	10,84	13,60	16,70	19,45	20,38	14,80
Taim	-32,49	-52,58	5	1963-83	22,01	18,80	15,98	12,58	9,22	7,45	7,76	9,87	12,21	16,70	20,26	21,67	14,54
Torres	-29,38	-49,70	16	1963-83	19,90	17,60	14,11	12,48	10,08	8,40	8,17	9,73	12,29	12,82	16,74	18,49	13,32
Tramandaí	-29,98	-50,13	8	1963-83	18,22	16,37	14,21	12,23	9,69	8,59	8,55	9,81	11,77	14,03	16,99	18,04	13,21
Barra do Chuí*	-33,69	-53,45	2	1963-83	21,92	18,92	16,16	12,77	9,46	7,75	6,09	10,10	12,48	16,92	20,39	21,46	14,54
Santa Cruz do Sul	-29,72	-52,43	73	1963-99	20,97	18,95	15,47	13,55	11,52	9,10	9,62	10,30	13,65	17,50	19,34	20,99	15,08
Cachoeira do Sul	-30,04	-52,89	68	1963-99	20,87	19,35	15,35	13,48	11,60	9,18	9,52	10,35	13,49	18,02	19,39	21,08	15,14
Barracão	-27,67	-51,46	828	1966-91	19,13	18,10	16,14	13,26	11,25	9,50	10,19	11,72	13,84	17,09	19,09	19,80	14,93

\*Os dados de Barra do Chuí são repetidos de Santa Vitória do Palmar.

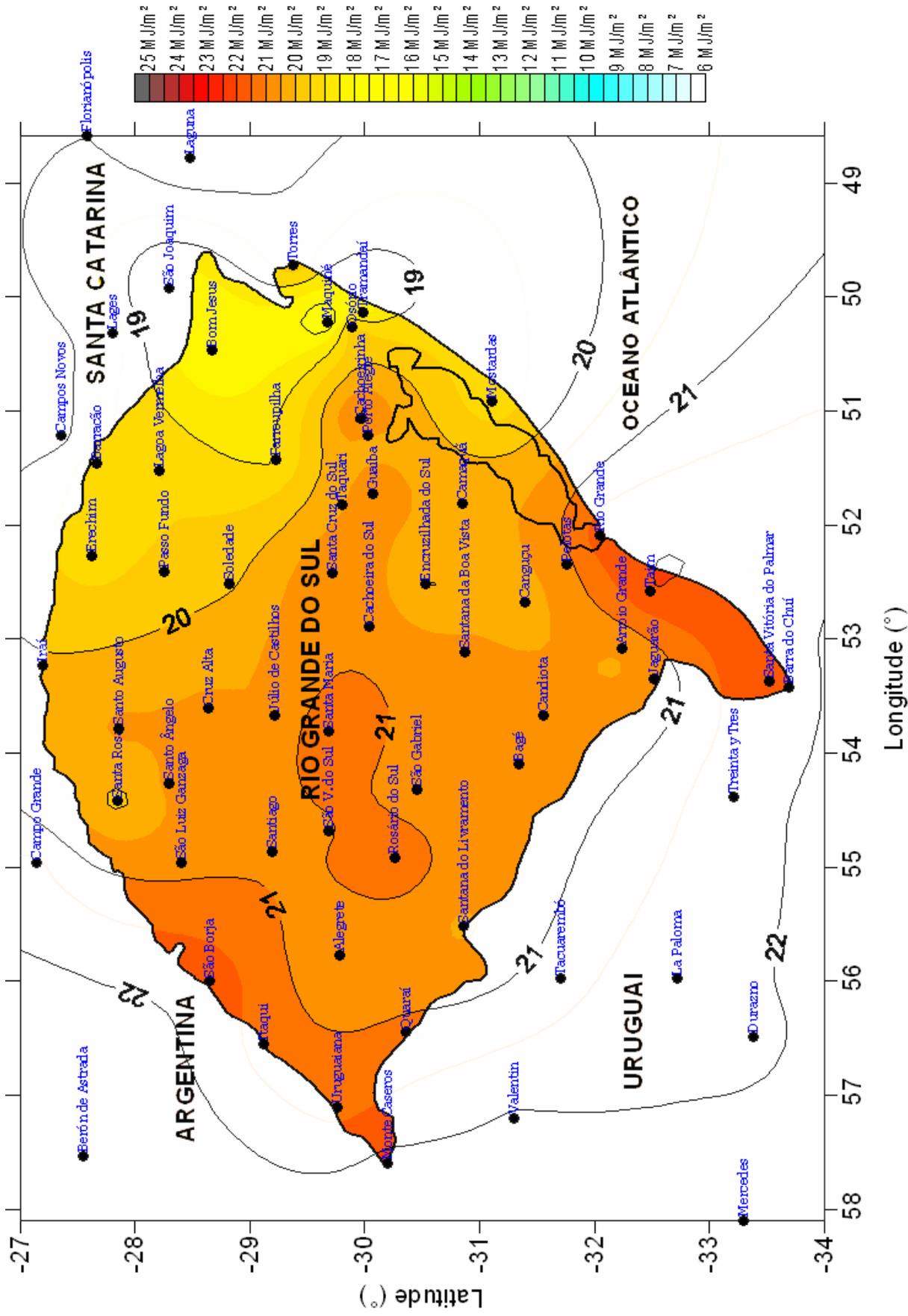


Figura 7.2 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Janeiro.



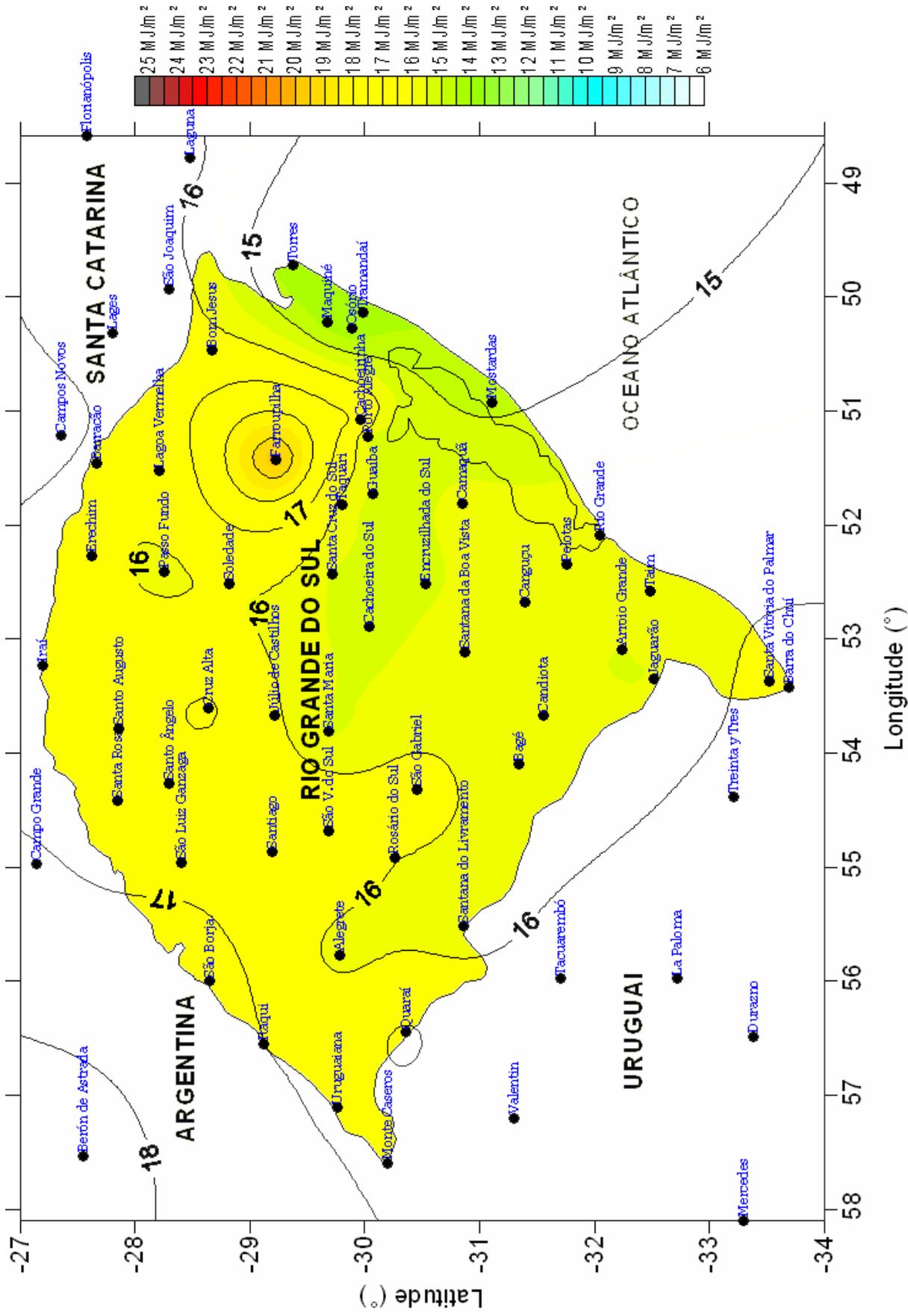


Figura 7.4 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Março.



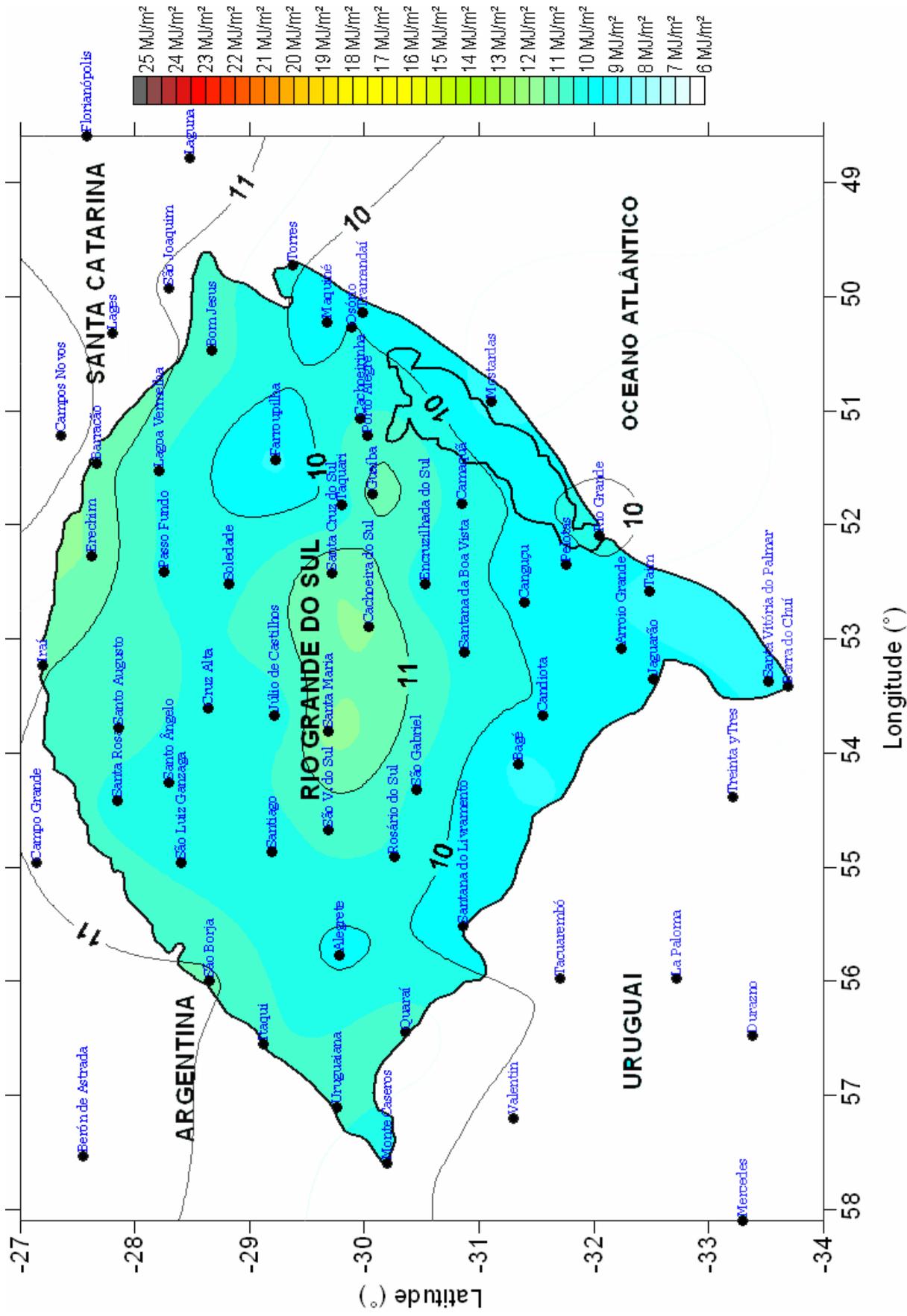


Figura 7.6 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Maio.

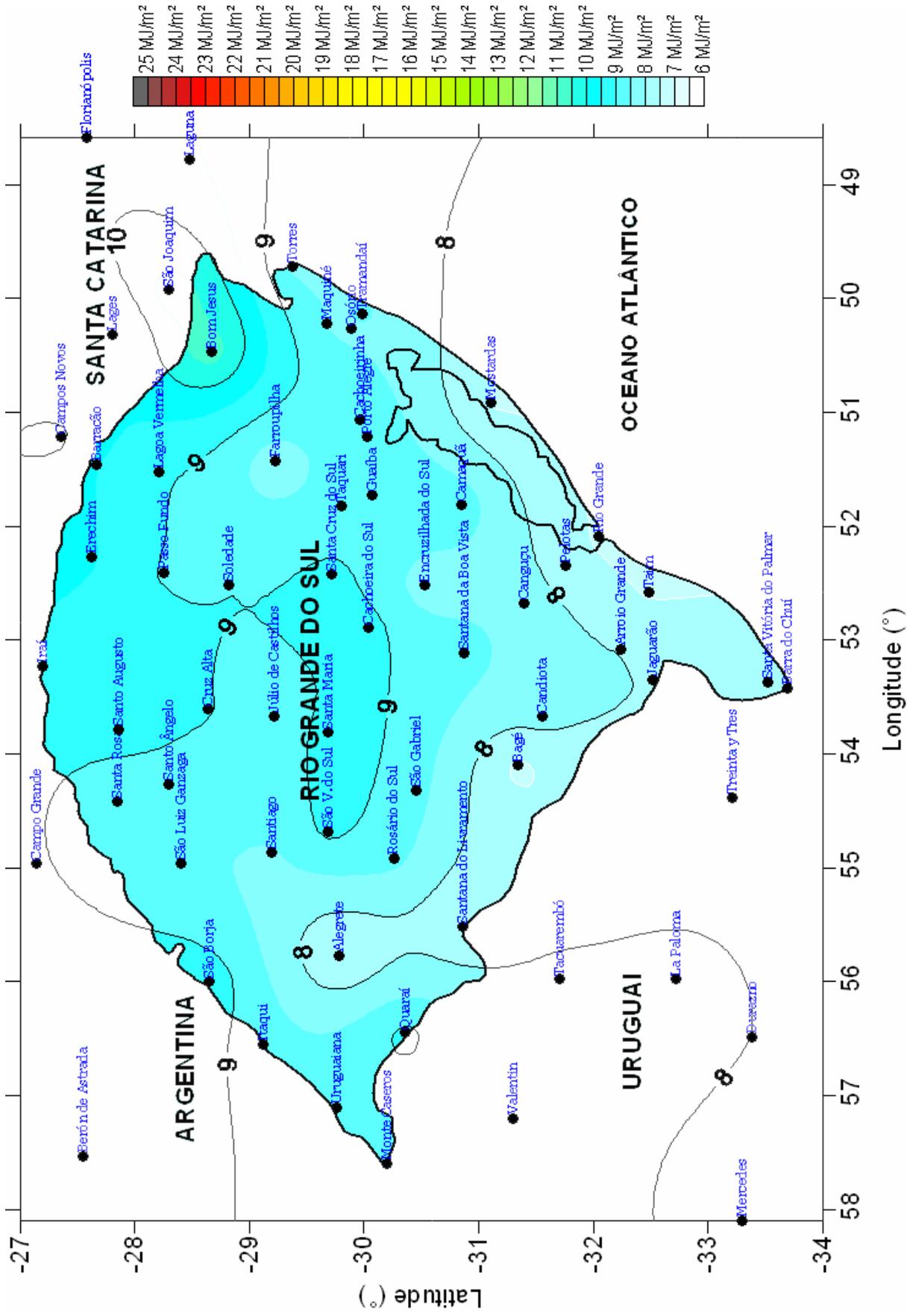


Figura 7.7 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Junho.

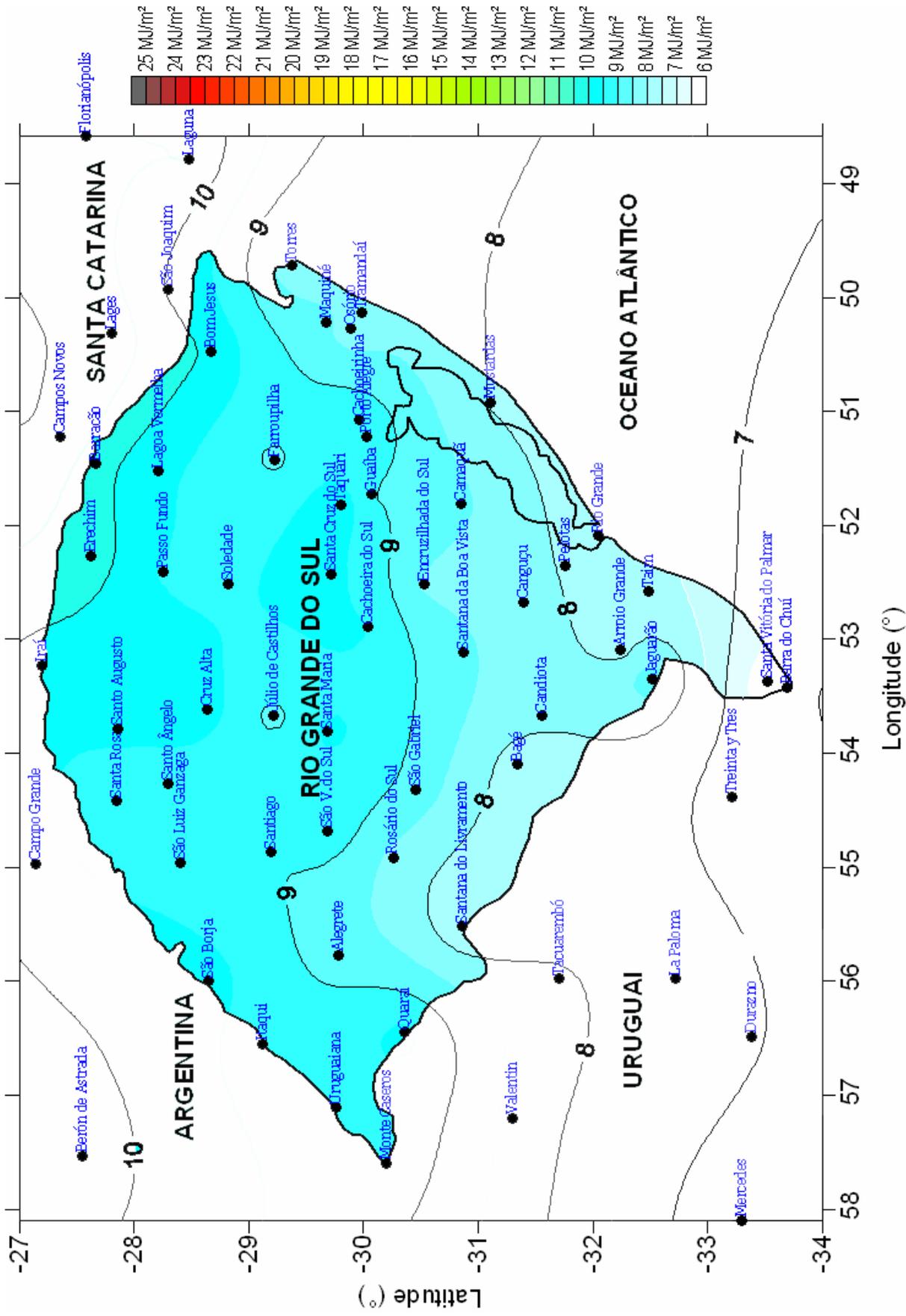


Figura 7.8 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Julho

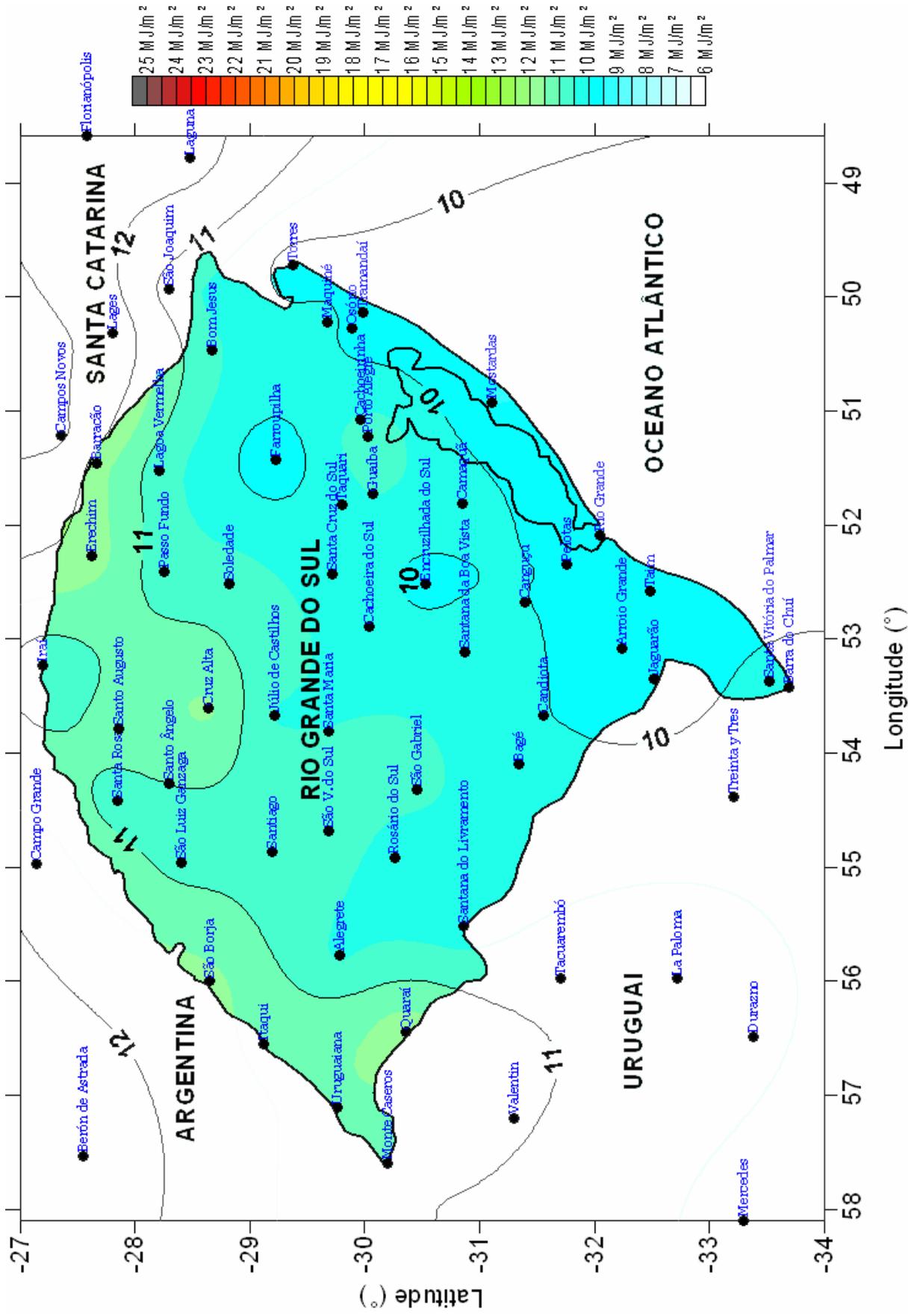


Figura 7.9 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Agosto.

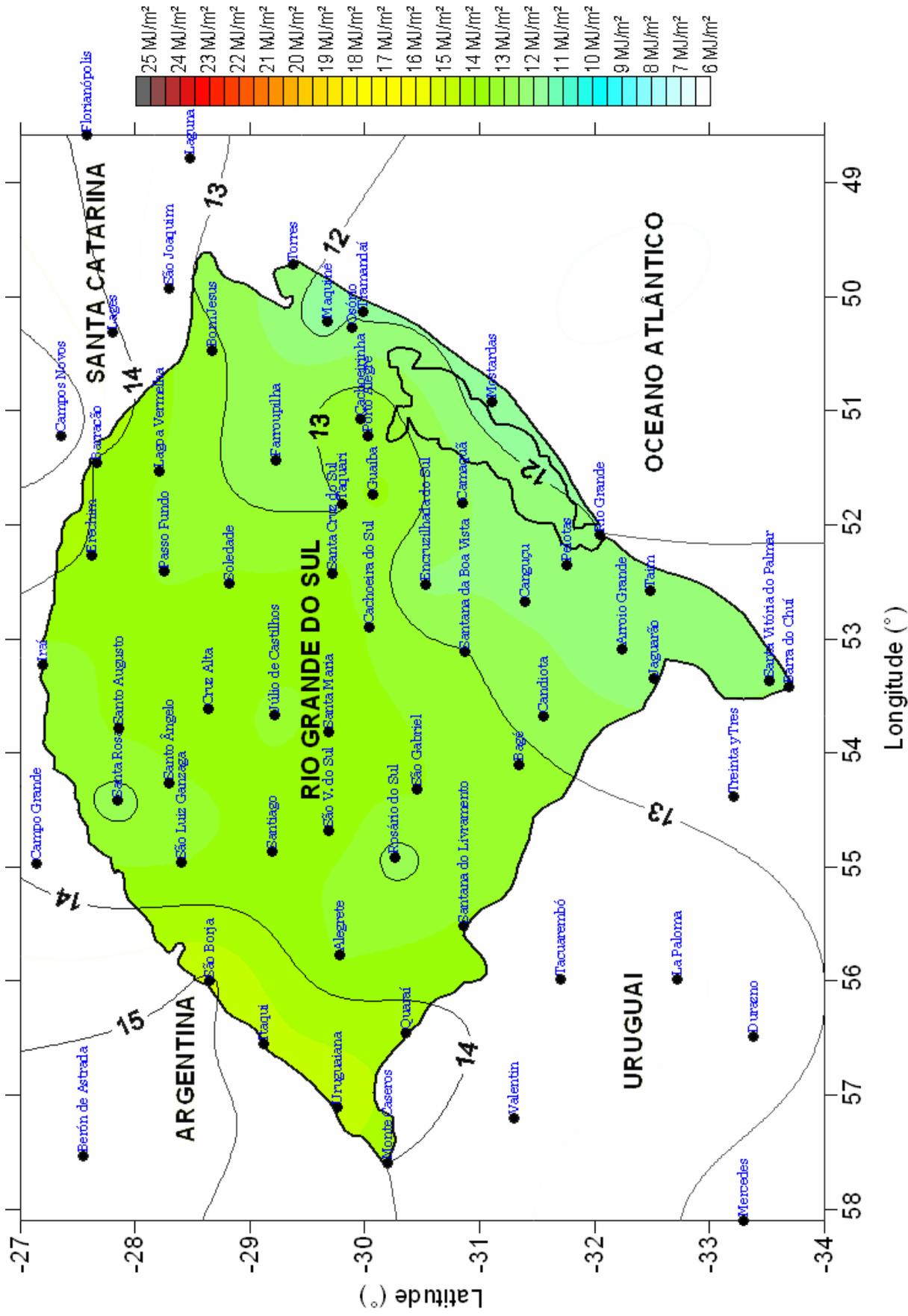


Figura 7.10 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Setembro.

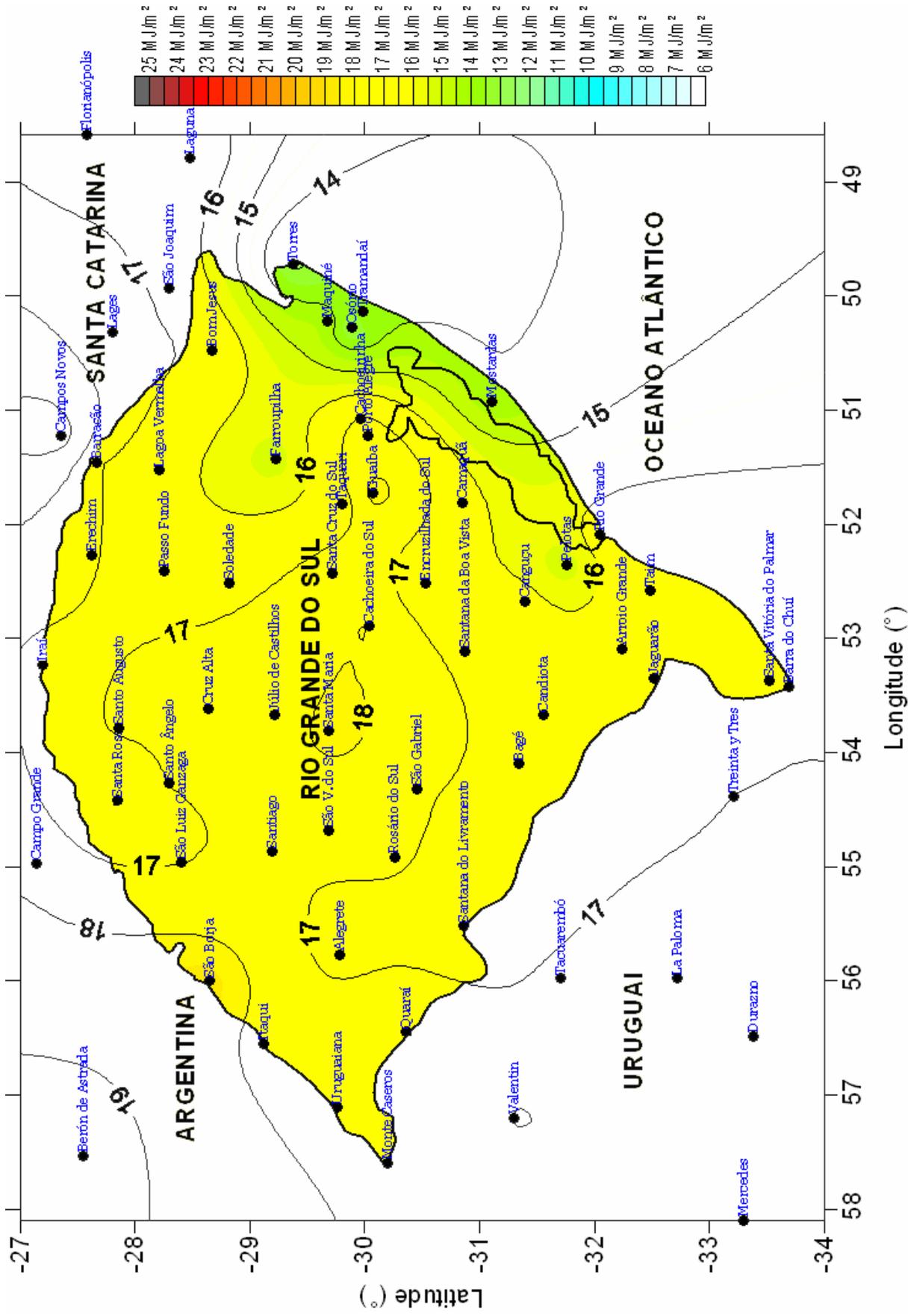


Figura 7.11 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Outubro.

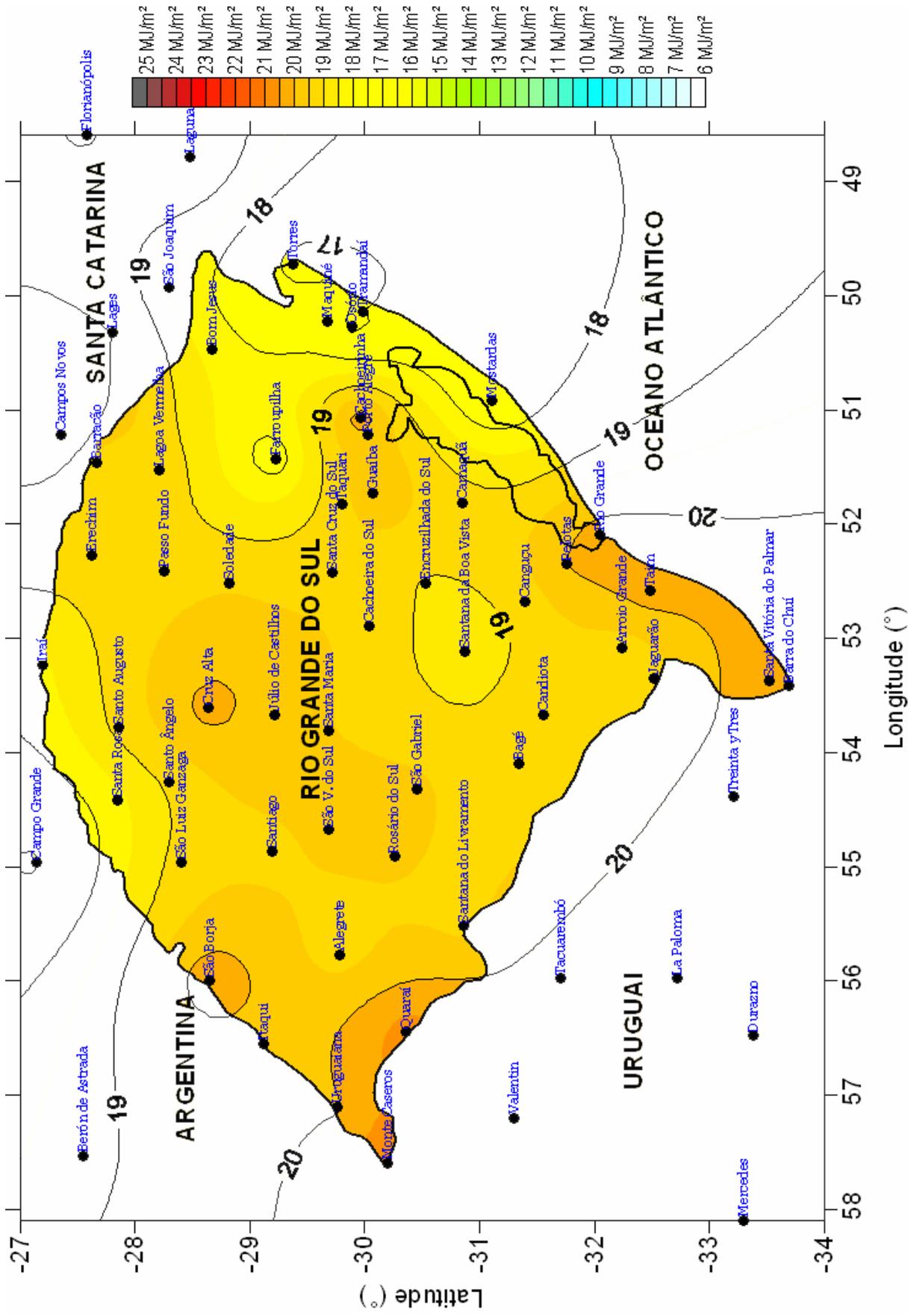


Figura 7.12 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Novembro.

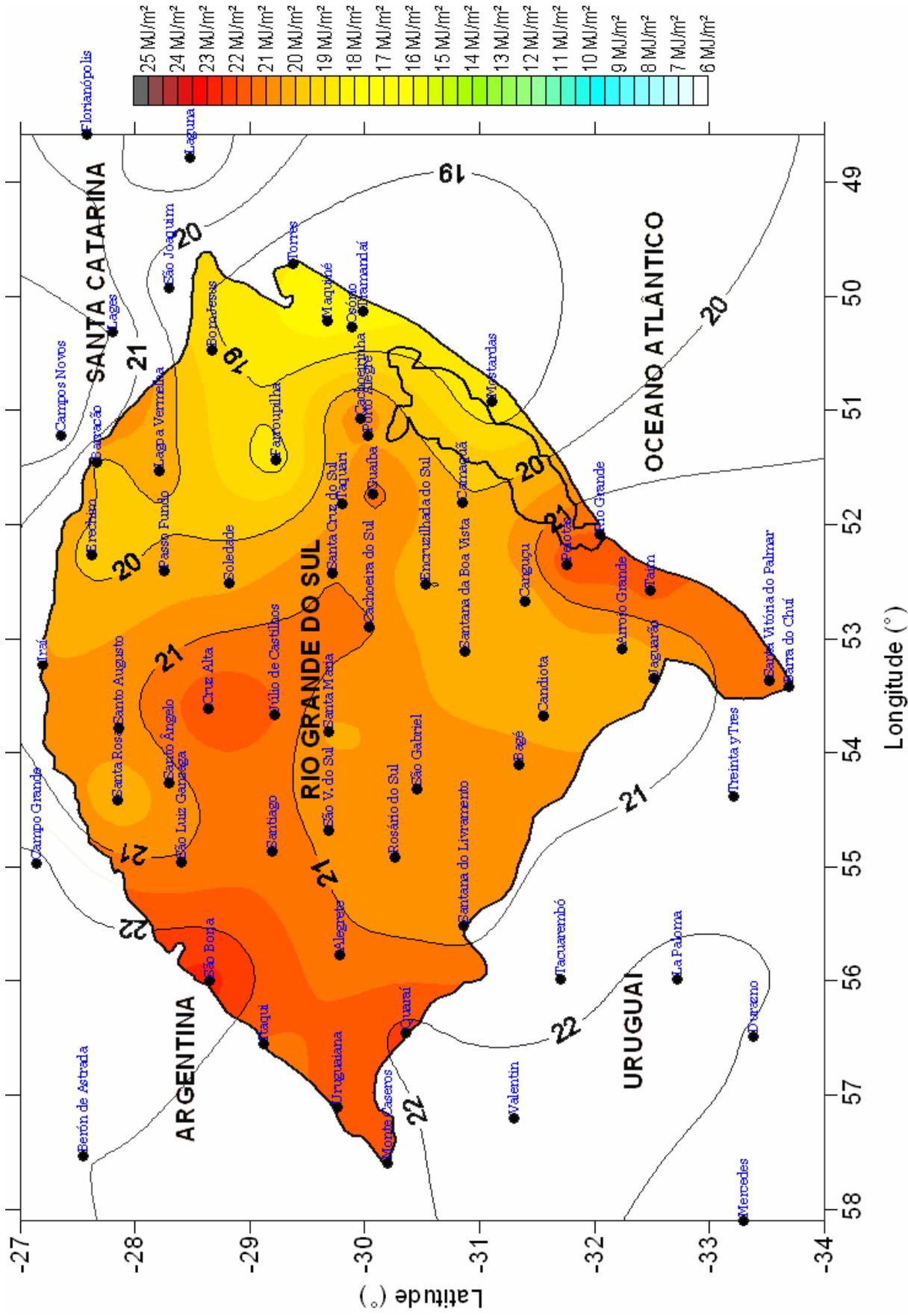


Figura 7.13 Mapa de radiação solar global horizontal média mensal diária para o Rio Grande do Sul – Dezembro.

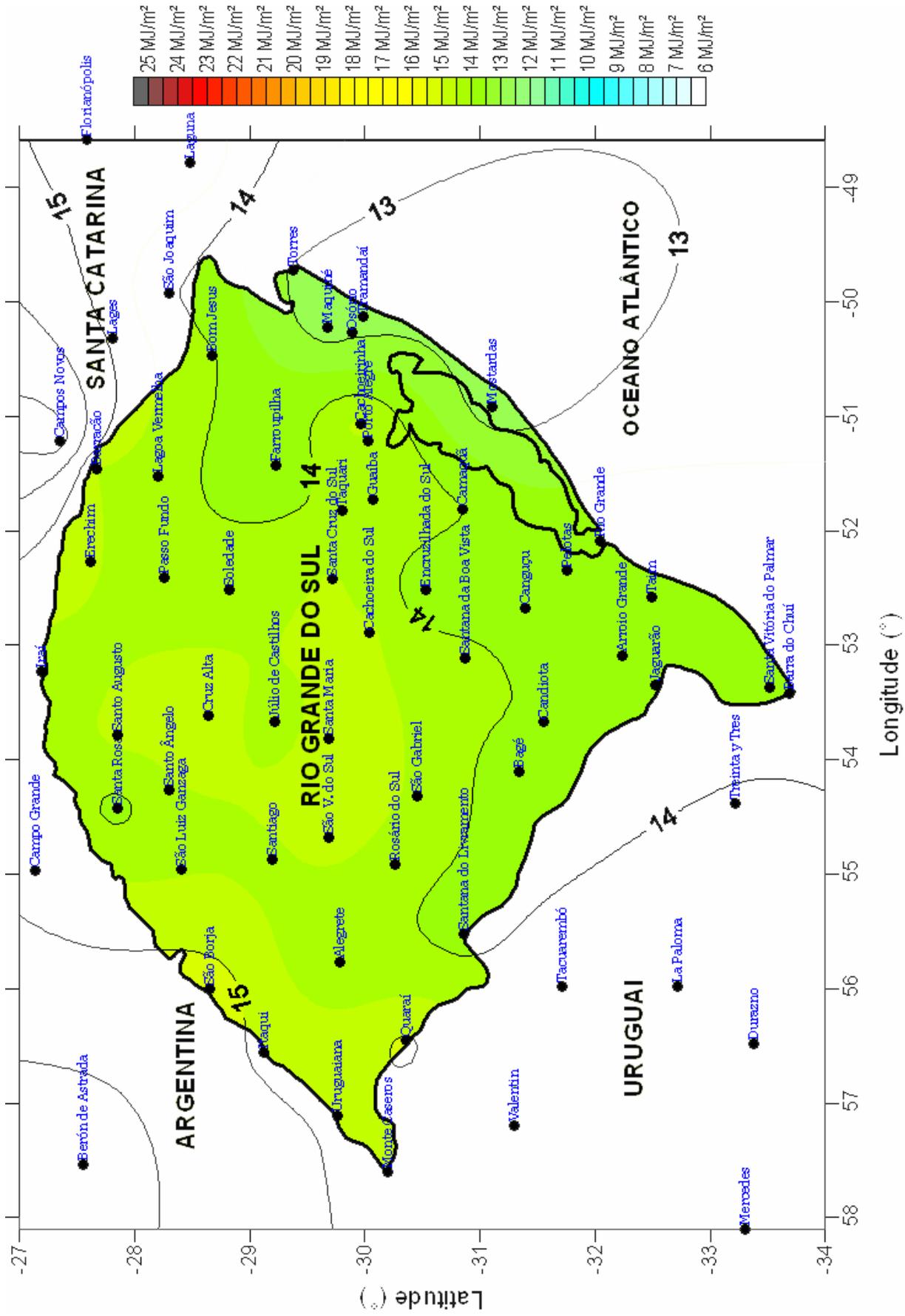


Figura 7.14 Mapa de radiação solar global horizontal média anual diária para o Rio Grande do Sul.

para traçado, aliado com a incerteza nos valores medidos, não é possível determinar se tal local tem a radiação proeminente ou escassa ou se é erro de medida ou de estimação.

De qualquer forma a metodologia desenvolvida mostra-se bem adequada e de boa qualidade visual. Percebe-se que, se houvesse uma maior certeza quanto a confiabilidade dos valores medidos seria possível associar a cada mapa o grau de incerteza dos valores apresentados.

## 9.0 CONCLUSÕES

Nesta seção é apresentado, face às metodologias empregadas e os resultados obtidos, um conjunto de conclusões e considerações finais relacionadas a esta dissertação.

Conclui-se, a partir de dados dos EEUU que:

- A aplicação de modelos de regressão linear múltipla gera uma diminuição entre 11 % e 17 % do erro relativo médio associado à estimativa quando o modelo for anual.

- A aplicação de modelos mensais de regressão linear simples gera uma diminuição média de 33,5% do erro relativo médio associado à estimativa em relação ao modelo anual único. A mesma diminuição do erro, em média, ocorre com os modelos mensais de regressão linear múltipla. Em outras palavras, modelos de regressão linear simples ou múltipla de dados de um único mês ajustam-se melhor aos dados do que um modelo anual único, pois diminui o efeito da sazonalidade;

- O modelo de Ångström–Prescott que é um modelo de regressão linear simples pode ser aplicado com bons resultados quando se dispõe apenas da insolação;

- Modelos de regressão linear múltipla que levam em consideração a previsão da radiação solar global a partir de mais de três variáveis explicativas não fornecem resultados satisfatoriamente melhores;

- O modelo anual de regressão linear baseado no  $K_T$  e na nebulosidade pode ser empregado para a estimativa da radiação solar global, na falta da insolação, no entanto, com aumento de 24% do erro relativo médio em relação ao modelo de Ångström–Prescott anual;

- Modelos mensais regionalizados se ajustam melhor aos dados do que modelos mensais únicos para todo um país ou estado. A regionalização dos modelos leva em consideração o efeito das particularidades regionais como altitude, vegetação, presença de grandes extensões de água entre outras;

- Modelos de regressão linear múltipla que tem como variáveis explicativas a fração de insolação e a altitude não reduzem o erro relativo médio associado a estimativa em relação ao modelo de regressão linear de Ångström–Prescott.

- O erro relativo médio associado à estimativa aumenta com a diminuição do número de dados, como já previsto pela estatística, sendo, portanto, imprescindível uma base de dados com muitos anos para o cálculo dos modelos, principalmente mensais;

- Modelos regionalizados mensais, isto é, modelos que levam em consideração as particularidades regionais de relevo, vegetação, latitude, entre outras, se ajustam melhor aos dados destas regiões do que modelos mensais para toda uma grande região;

Conclui-se a partir dos dados do Rio Grande do Sul que:

– A metodologia dos modelos mensais aplica-se ao Rio Grande do Sul, no entanto, com resultados inferiores aos dos EEUU, em termos percentuais, devido, principalmente, à base de dados ser menor, temporalmente;

– Os valores medidos das variáveis solarimétricas, do Rio Grande do Sul, em geral, apresentam indícios de inexatidão, isso já desconsiderando os erros inerentes dos radiômetros calibrados;

– Não se tem uma boa estimativa do grau de incerteza associado aos valores estimados pelos modelos de regressão, quando não se conhece o grau de imprecisão dos dados amostrados;

Conclui-se ainda que:

– De acordo com a literatura pesquisada o melhor método de interpolação para variáveis regionalizadas, na confecção de mapas, é o de kriging;

– O sistema de aquisição e/ou registro de dados solarimétricos da FEPAGRO deveria ser aferido, para que estudos mais confiáveis, possam ser feitos e conseqüentemente possa ser definida uma política de desenvolvimento sustentável a longo prazo, considerando a energia solar como uma alternativa viável e segura.

Sugestões para futuros trabalhos:

– Pesquisar a relação entre altitude, vegetação, umidade relativa, temperatura, insolação e radiação solar para uma determinada região, a partir de novos dados coletados por equipamentos modernos e calibrados;

– Analisar a base de dados solarimétricas como uma série temporal, identificando a sazonalidade, tendências e eliminando-as para a aplicação de modelos de previsão;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmad, I., Al-Hamadani, N. e Ibrahim, K., 1983. “Solar Radiation maps for Iraq”. **“Solar Energy”**. v. 31. n°. 1. pp. 29-44.

Assad, E. D. *et al.* “Avaliação de métodos geoestatísticos na espacialização de índices agrometeorológicos para definir riscos climáticos”. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. [online]. Fev. 2003, v.38, n°2 [citado 13 Fevereiro 2004], pp.925-933. Disponível em: <<http://atlas.sct.embrapa.br/pdf/pab2003/fevereiro/161.pdf>.

Assis, F. N. *et al.*, 1998. “Aplicabilidade de Modelos de Estimativa da Radiação Solar Global”, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 6. n°. 1. pp. 91-97.

Balling, R. C. e Vojtesak, M., 1983. “Solar climates of the United States based on long-term montly averaged daily insolation values”. **Solar Energy**. v. 31. n°. 3. pp. 283-291.

Balling, R. C., 1983. “Harmonic analysis of monthly insolation levels in the United States”. **Solar Energy**. v. 31. n. 3. pp. 283-291.

Bamiro, O. A. 1983. “Empirical Relations for the Determination of Solar Radiation in Ibadan, Nigeria”, **Solar Energy**, v. 31, n° 1, pp. 85-94.

Barbaro, S., Giraud, C., Longhetto, A. e Morra, O., 1981. “Correlation between relative sunshine and state of the sky”, **Solar Energy**. v. 26, n° 6, pp. 537-550.

Becker, C. F. e Boyd, J. S. 1957. “Solar radiation availability on surfaces in the United States as affected by season, orientation, latitude, altitude and cloudiness”, **Solar Energy**, v. 1. n° 1. pp. 13-21.

Bendt, PP. Collares-Pereira, M. e Rabs, A., 1981. “The Frequency Distribution of Daily Radiation Values”. **Solar Energy**. v.27. n.1. pp. 1-5.

Bennett, Iven., 1965. “Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States”, **Solar Energy**, v. 9, n° 3, pp. 145 – 158.

Bennett, Iven., 1967. “Frequency of daily insolation in Anglo North America during June and December”, **Solar Energy**, v. 11, n° 1, pp. 41-55.

Bennett, Iven., 1969. “Correlation of daily insolation with daily total sky cover, opaque cover and percentage of possible sunshine”, **Solar Energy**, v. 12, n° 3.

Berlato, M. A. 1971. “Radiação Solar no Estado do Rio Grande do Sul”. **Agrometria Sulriograndense**. Porto Alegre. v.5. pp. 115-131.

Box, G. E. P. e Jenkins, G. M., 1976. “**Time Series Analysis**”. Holden-Day Ed. San Francisco.

Callegari-Jacques, 2003. “**Bioestatística – Princípios e Aplicações**”. ArtMed Editora. Porto Alegre.

Collares-Pereira, M. e Rabl, A. 1979. “The average distribution of solar radiation fraction correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values”, **Solar Energy**, v. 22, Nº 2. pp. 155-164.

Colle, S. e Pereira, E. B. 1998. “**Atlas de Irradiação Solar do Brasil**”. LabSolar-UFSC, Florianópolis.

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito – Programa SUNDATA. Disponível em: <[www.cresesb.cepel.br/potencialenergetico.htm](http://www.cresesb.cepel.br/potencialenergetico.htm)> Acesso em: 25 dez 2003.

Duffie, J. A. e Beckman, W. A., 1991. “**Solar Engineering of Thermal Processes**”, John Wiley & Sons, Inc. New York.

Erbs, D. G., Klein, S. A., Duffie, J. A., 1982. “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation”, **Solar Energy**, v. 28, Nº 4. pp. 293-302.

Estação Agroclimatológica de Pelotas. Convênio EMBRAPA-UFPel. Disponível em: <<http://laranjal.cpact.embrapa.br/estacao/estacao.html>>. Acesso em: 23 set. 2003.

Flocas, A. A., 1980. “Estimation and prediction of global solar radiation over Greece”. **Solar Energy**. v. 24. n. 1. pp. 63-70.

Fonseca, J. S., Martins, G.A. e Toledo, G. L., 1991. “**Estatística Aplicada**”, Ed. Atlas S.A., São Paulo.

Fontana, D. C. e Oliveira, D. 1996. “Relação entre Radiação Solar Global e Insolação para o Estado do Rio Grande do Sul”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 4. n. 1. pp. 87-91.

Gaspar, J. A. 2000. “**Cartas e Projeções Cartográficas**”. 2ª ed., Ed. Lidel. Lisboa.

Grande Enciclopédia Larousse Cultural, Ed. Círculo do Livro. São Paulo: 1992.

GTES –Grupo de Trabalho de Energia Solar. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. 1999. “Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”. CRESESB. Rio de Janeiro.

Hay, J. E., 1979, “Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces”, **Solar Energy**, v. 23, pp. 301-307.

Hernandez, E. e Durazo, G., 1979. “Análisis de varios métodos para la evaluación de la radiación solar global”. **Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar**. v. 1. pp. 191-203. João Pessoa – Paraíba – BR.

Hinrichsen, K., 1994. “The Angström Formula with Coefficients Having a Physical Mea-

ning”, **Solar Energy**, v. 52, n. 6, pp. 491 – 495.

Hutchinson, M. F. *et al.* 1984. “Estimating Monthly Mean Values Of Daily Total Solar Radiation For Australia”. v. 32. n. 2, pp. 277-290.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. “Climatologia – Mapas”. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/climatologia/combo\\_climatologia\\_C.html](http://www.inmet.gov.br/climatologia/combo_climatologia_C.html)>. Acessada em 13 jan. 2004.

IPAGRO, 1989. Seção de Ecologia Agrícola. “Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul”. V. 1. Porto Alegre, 1989.

Iqbal, M., 1979a. “Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine”, **Solar Energy**, v. 23, nº 2. pp. 169-173.

Iqbal, M., 1979b. “A study of Canadian diffuse and total solar radiation data-I. Monthly average daily horizontal radiation”, **Solar Energy**, v. 22, nº 1. pp. 81-86.

Iqbal, M., 1980. “Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on a horizontal surface”, **Solar Energy**, v. 24, nº 5. pp. 491-503.

Kasten, F. E Czeplak, G., 1980. “Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud” . **Solar Energy**. v. 24. n. 2. pp. 177-189.

Kessler, M. C. e Corbella, O. D., 1979. “Mapas da Radiação Solar diária total média mensal sobre superfície horizontal para o Rio Grande do Sul para os 12 meses do ano”. **Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar**. v. 1. pp. 61-80. João Pessoa – Paraíba – BR.

Khogali, A. 1982. “Solar Radiation over Sudan – Comparison of measured and predicted data”. **Solar Energy**. v. 31. n. 1. pp. 55-62.

Khogali, A., Ramadan, M. R. I., Ali, Z. E. H. e Fattah, Y. A.. 1983. “Global and diffuse solar irradiance in Yemen (Y.A.R.)”. **Solar Energy**. v. 31. n. 1. pp. 45-53.

Knight, K. M. Klein, S. A. Duffie, J. A., 1991. “A Methodology for the Synthesis of Hourly Weather Data”. **Solar Energy**. v. 46. n. 2. pp. 109-120.

Kreith, F. e Kreider, J. F., 1978. “**Principles of Solar Engineering**”, McGraw-Hill Book Company, EUA.

Krenzinger, A. e Farenzena, D. 2003, “Synthesizing Sequences of Hourly Ambient Temperature Data”, 17 International Congress of Mechanical Engineering (17 COBEM), São Paulo.

Krenzinger, A. e Macagnan, M. H., 1988. “Estudo Comparativo de diferentes Modelos de Geração de Séries de Radiação Solar”. Anais do II Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Águas de Lindóia (SP), pp. 389-392.

Krenzinger, A., 1994, “Seqüências Horárias de Radiação Solar”, V Encontro Nacional de Ciências Térmicas (V ENCIT), São Paulo.

Landim, PP. M. B. e Sturaro, J. R., 2002. “Krigagem Indicativa Aplicada à Elaboração de Mapas Probabilísticos de Riscos”. Geomatemática, Texto Didático 06. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/kindicativa.pdf>> Acessada em 12 Jan. 2004.

Landim, PP. M. B., 2000. “Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas”. Geomatemática, Texto Didático 02. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/kindicativa.pdf>>. Acessada em 12 Jan. 2004.

Laperuta Filho, J. e Lunardi, D. M. C. 1998. “Modelos Horários para Estimativa da Radiação Solar Global para todos os Meses do Ano para Botucatu – SP”, **Botucatu Científica**, v.12, pp. 54 – 60.

Levine, D.M, Berenson, M. L. e Stephan, D., 1998. “**Estatística: Teoria e Aplicações**”, LTC. Rio de Janeiro.

Liu, B. Y. H. E. e Jordan R. C. 1960. “The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.” **Solar Energy**, v. 4, nº 3. pp. 1-19.

Löf, J. A., Duffie, J. A., e Smith, C. O., 1966. “World Distribution of Solar Radiation”, **Solar Energy**, v. 10, nº 1. pp. 29-37.

Ma, C. C. Y. e Iqbal, M., 1984. “Statistical Comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces”, **Solar Energy**, v. 31, nº 3. pp. 313-317.

Macagnan, M. H. 1989. “Estudo de Modelos de Sintetização de Dados de Radiação Solar”. Dissertação de Mestrado pela UFRGS.

Mani, A. e Chacko, O., 1973. “Solar Radiation climate of Índia”. **Solar Energy**, v. 14, nº 2. pp. 313-317.

Maure, D. e Galanis, N., 1979. “Solar Radiation data for Quebec”, **Solar Energy**, v. 23, nº 4. pp. 309-314.

Mello, C. R., Lima, J. M., Silva, A. M., Mello, J. M. e Oliveira, M. S. “*Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas*”. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. [online]. set./out. 2003, v.27, nº5 [citado 13 Fevereiro 2004], pp.925-933. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832003000500017&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000500017&lng=pt&nrm=iso) . ISSN 0100-0683.

Moreira, I. 2003. “**O Espaço Rio-Grandense**”. 5ª ed., Ed. Ática. São Paulo.

NASAA. Disponível em: <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime-images.html>>. Acesso em: 11 out. 2003.

NASAb. Disponível em: <[http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/realtime-mdi\\_](http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/realtime-mdi_)

igr.html >. Acesso em : 11 out. 2003.

NASAc. **Measuring Solar Radiation Incident on Earth**. Solar Constant-3 (SOLCON-3). STS-107. Disponível em: <<http://spacereserch.nasa.gov>> . Acesso em : 11 out. 2003.

Neuwirth, F., 1980. “The estimation of global and sky radiation in Austria”. **Solar Energy**. V. 24. n. 5. 421-426.

Ojo, O., 1973. “Solar radiation, net radiation e temperature in Argonne, Chicago”. **Solar Energy**, v. 15, Nº 2. pp. 155-170.

OLADE, 1987. “**Atlas de Climatologia Solar**”. V. I. Quito – Equador.

Onyango, F. N., 1983. “On the Estimation of Global Solar Insolation”, **Solar Energy**, v. 31, Nº 1. pp. 69-71.

Powell, G. L., 1984, “Comparative Evaluation of SOLMET Clear Sky Global Solar Radiation Model”, **Solar Energy**, v. 32. Nº 4, pp. 453-460.

Power, Helen C., 2001. “Estimating Clear-Sky Beam Irradiation From Sunshine Duration”, **Solar Energy**, v. 71, nº 4, pp. 217-224.

Rao, C. R. N., Bradley W. A. e Young Lee, T., 1985. “Some Comments on Angström models for the Estimation of the Daily Global irradiation”, **Solar Energy**, v. 34, nº , pp.117 – 119.

Rimóczi-Paál, A., 1983. “Determination of global radiation from satellite pictures and meteorological data”, **Solar Energy**, v. 31, nº 1. pp. 79-84.

Rossini, E. 2002. “Caracterização da distribuição de intensidade da radiação solar difusa”. Porto Alegre. Tese. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFRGS.

Sabbagh, J. A., Sayigh, A. M. e El-Salam, E. M. A., 1977. “Estimation of the total solar radiation from meteorological data”, **Solar Energy**, v. 19, nº 4 , pp.307 – 311.

Şahin A. e Şen Z., 1998. “Statistical Analysis of the Ångström formula coefficients and application for Turkey”, **Solar Energy**, v. 62, nº 1, pp. 29-38.

Sayigh, A. A. M., 1977, “**Solar Energy Engineering**”, Ed. Academic Press, London.

Şen, Z. e Şahin, A.D., 2001. “Spatial Interpolation e and Estimation of Solar Irradiation by Cumulative Semivariograms”, **Solar Energy**. v. 71, nº 1 , pp. 11 – 21.

Şen, Z., 2001a. “Ångström Equation Parameter Estimation by Unrestricted Method”, **Solar Energy**, v. 71, n. 2. pp. 95-107.

Silveira, J. 1979. “Contribution a l’etude statistique des mesures de rayonnement solaire en Paraíba (Bresil)”. **Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar**. v. 1, pp. 191-203. João Pessoa – Paraíba – BR.

Suehrcke, H. e McCormick, PP. G., 1989. “The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over day”, **Solar Energy**, v. 42, nº 4. pp. 303-309.

Suehrcke, H., 2000. "On the Relationship between duration of sunshine and solar radiation on the earth's surface: Ångström Equation Revisited", **Solar Energy**, v. 68, n° 5. pp. 417-425.

Supit, I. e Van Kappel, R.R., 1998. "A simple method to estimate global radiation". **Solar Energy**, v. 63, n° 3, pp. 147-160.

Terjung, W. H., 1970. "A global classification of solar radiation", **Solar Energy**, v. 13, n° 1. pp. 67-81.

Tiba, C. e Fraidenraich, N., 2000. "**Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres**", Ed. Universitária da UFPE, Recife.

Tiba, C., Fraidenraich, N., Lyra, F. J. M. e Gallegos, H. G., 2002. "Solar Energy Resource Assessment – Brazil", **Renewable Energy**, v. 27, pp. 383-400.

Tipler, P.P. e Llewellyn, R. A., 2001. "**Física Moderna**". 3ª ed. Ed. LTC, Rio de Janeiro.

WMO – World Meteorological Organization, 1961. **Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices**. Second Edition. WMO – n° 8. TPP.3.

**BIBLIOGRAFIA CONSULTADA**

Charnet, R., Freire, C. A. D. E., Charnet, E. M. R.; Bonvino, H. 1999. “**Análise de Modelos de Regressão Linear**”. Editora da UNICAMP . Campinas.

Ezekwe, C. I. e Ezeilo, C. C. O. 1981. “Measured Solar Radiation in a Nigerian Environment Compared with Predicted Data”, **Solar Energy**, v. 26, n° 2, pp. 181-186

Iqbal, M., 1983. “**An Introduction to Solar Radiation**”, Academic Press, Toronto.

Landim, PP. M. B., Monteiro, R.C. e Corsi, A. C. 2002. “Introdução à Confecção de mapas pelo SURFER”. Geomatématica, Texto Didático 08. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/Surfer.pdf>> Acessada em 12/01/04.

Lilliefors, H. W. 1967. “On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknow”. **Journal of the American Statistical Association**, v. 62, pp. 399-402.

Şen, Z. e Şahin, A. D., 2000. “Solar Irradiation Polygon Concept and Application in Turkey”, **Solar Energy**. v. 68, n° 1, pp. 57-68.

Şen, Z. e Şahin, A. D., 2001b. “Spatial Interpolation and Estimation of Solar Irradiation by Cumulative Semivariograms”, **Solar Energy**, v. 71, n° 1, pp. 11-21.

Şen, Z., 1998. “Fuzzy Algorithm for Estimation of Solar Irradiation From Sunshine Duration”, **Solar Energy**, v. 63, n° 1, pp. 39-49.

Vernich, L. e Ferruccio, Zuanni. 1996. “About the Minimum Number of Years Requierid to Stabilize the Solar Irradiation Statistical Estimates”, **Solar Energy**, v. 57, n° 6 , pp. 445-447.

Walraven, Robert., 1978. “Calculating the Position of the Sun”, **Solar Energy**, v. 20, n° 6 , pp. 393-397.

## ANEXO 01

**Tabela A1.1** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  e  $b_5$ , coeficientes de correlação  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Com exceção dos modelos correspondentes aos índices 17 a 21, os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_0$  com as outras variáveis. Os modelos correspondentes aos índices 17 a 21 correlacionam  $\bar{K}_T$  e com as outras variáveis, com exceção de  $\bar{S}/\bar{S}_0$ . Os coeficientes baseiam-se em médias mensais de todos os meses e de todas as variáveis envolvidas de todo o território Leste dos EUA.

i	N	r	$r^2$	a	$b_1^1$	$b_2^2$	$b_3^3$	$b_4^4$	$b_5^5$	$b_6^6$	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	MBE*	RMSE*	$S_{YX}$
1	28440	0,881	0,775	0,296	0,450	-	-	-	-	-	0,0435	-	-0,15	0,73	0,026
2	28440	0,904	0,818	0,284	0,387	$8,2 \times 10^{-6}$	0,0014	0,00124	-0,00415	-	0,0369	15,17	-0,05	0,60	0,024
3	28440	0,906	0,818	0,317	0,372	$8,7 \times 10^{-6}$	0,0015	0,00115	-0,00356	-0,00046	0,0361	17,01	-0,12	0,60	0,024
4	28440	0,881	0,776	0,293	0,453	$7,2 \times 10^{-6}$	-	-	-	-	0,0435	0,00	-0,16	0,73	0,026
5	28440	0,881	0,775	0,293	0,451	-	-	-	-	0,000034	0,0443	-1,75	-0,29	0,45	0,026
6	28440	0,897	0,805	0,300	0,408	-	0,0011	-	-	-	0,0384	11,72	-0,07	0,63	0,025
7	28440	0,881	0,776	0,278	0,458	-	-	0,00039	-	-	0,0435	0,00	-0,14	0,72	0,026
8	28440	0,881	0,777	0,344	0,407	-	-	-	-0,00464	-	0,0435	0,00	-0,15	0,72	0,026
9	28440	0,900	0,809	0,350	0,382	-	0,0013	-	-	-0,00630	0,0374	14,02	-0,07	0,61	0,024
10	28440	0,905	0,819	0,283	0,403	-	0,0015	0,00123	-	-0,00049	0,0364	16,32	-0,05	0,59	0,024
11	28440	0,903	0,816	0,240	0,424	-	0,0014	0,00132	-	-	0,0370	14,94	-0,06	0,60	0,024
12	28440	0,882	0,777	0,342	0,410	$7,2 \times 10^{-6}$	-	-	-0,00465	-	0,0434	0,23	-0,13	0,72	0,026
13	28440	0,898	0,807	0,351	0,362	-	0,0011	-	-0,00496	-	0,0382	12,18	-0,08	0,62	0,024
14	28440	0,898	0,807	0,295	0,412	$1,4 \times 10^{-5}$	0,0012	-	-	-	0,0381	12,41	-0,08	0,63	0,024
15	28440	0,881	0,776	0,277	0,459	$4,8 \times 10^{-6}$	-	0,00036	-	-	0,0434	0,23	-0,17	0,73	0,026
16	28440	0,882	0,778	0,325	0,417	-	-	0,00036	-0,00438	-	0,0434	0,23	-0,14	0,72	0,026
17	28440	0,535	0,286	0,453	-	-	0,0031	-	-	-	0,0766	-76,09	-0,07	1,29	0,047
18	28440	0,207	0,043	0,507	-	$-7,4 \times 10^{-5}$	-	-	-	-	0,0917	-110,80	-0,30	1,52	0,054
19	28440	0,433	0,187	0,714	-	-	-	-0,003	-	-	0,0977	-124,60	0,49	1,38	0,005
20	28440	0,807	0,651	0,744	-	-	-	-0,040	-	-	0,0539	-23,908	-0,21	0,96	0,033
21	28440	0,334	0,111	0,628	-	-	-	-0,0035	-	-	0,0884	-103,22	-0,20	1,47	0,052

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_0$       <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude      <sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Média mensal anual da radiação solar global horizontal medida de  $14,91 \text{ MJ/m}^2$ , para estes locais.

**Tabela A1.2** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 7200 médias mensais de 20 estações próximas ao mar, do Leste dos EUA localizadas entre as altitudes de 1 a 67m.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	7200	0,840	0,705	0,310	0,414	-	-	-	-	-	0,0392	-	-0,17	0,74	0,025
2	7200	0,900	0,810	0,255	0,389	0,000077	0,00219	0,001543	-0,00395	-	0,0300	23,47	-0,05	0,56	0,021
3	7200	0,907	0,823	0,324	0,373	0,000017	0,00252	0,001332	-0,00181	-0,00109	0,0285	27,30	-0,05	0,54	0,020
4	7200	0,840	0,706	0,309	0,416	0,000058	-	-	-	-	0,0392	0,00	-0,14	0,73	0,025
5	7200	0,840	0,705	0,308	0,415	-	-	-	-	0,000036	0,0390	0,51	-0,15	0,73	0,025
6	7200	0,881	0,775	0,296	0,391	-	0,00146	-	-	-	0,0328	16,33	-0,08	0,64	0,022
7	7200	0,040	0,706	0,316	0,411	-	-	-0,00012	-	-	0,0390	0,51	-0,15	0,74	0,025
8	7200	0,841	0,707	0,342	0,387	-	-	-	-0,00313	-	0,0392	0,00	-0,16	0,73	0,025
9	7200	0,896	0,803	0,398	0,353	-	0,00205	-	-	-0,00144	0,0303	22,70	-0,07	0,59	0,021
10	7200	0,907	0,823	0,309	0,387	-	0,00253	0,001357	-	-0,00115	0,0284	27,55	-0,06	0,55	0,019
11	7200	0,898	0,806	0,214	0,422	-	0,00218	0,001634	-	-	0,0302	22,96	-0,06	0,57	0,021
12	7200	0,841	0,707	0,338	0,391	0,000034	-	-	-0,00288	-	0,0392	0,00	-0,03	0,74	0,025
13	7200	0,884	0,782	0,365	0,330	-	0,00154	-	-0,00697	-	0,0323	17,60	-0,09	0,63	0,022
14	7200	0,882	0,778	0,291	0,395	0,000137	0,00149	-	-	-	0,0328	16,33	-0,09	0,64	0,022
15	7200	0,840	0,706	0,315	0,413	0,000064	-	-0,000138	-	-	0,0392	0,00	-0,14	0,73	0,025
16	7200	0,841	0,707	0,356	0,378	-	-	-0,000199	-0,00366	-	0,0391	0,26	-0,16	0,74	0,025
17	7200	0,840	0,706	0,319	0,410	-	-	-0,000133	-	-0,00003	0,0392	0,00	-0,14	0,73	0,025

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_0$

<sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Média mensal de todo o ano da radiação solar global horizontal medida de 16,012 MJ/m<sup>2</sup>, para estes locais.

**Tabela A1.3** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 7548 médias mensais de 21 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 2 a 136m, com exceção das estações litorâneas.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	7548	0,851	0,725	0,291	0,462	-	-	-	-	-	0,0451	-	-0,17	0,76	0,024
2	7548	0,887	0,786	0,300	0,379	0,000106	0,00141	0,000938	-0,00549	-	0,0373	17,29	-0,06	0,60	0,027
3	7548	0,888	0,789	0,338	0,356	0,000109	0,00153	0,000996	-0,00534	-0,00053	0,0365	19,07	-0,07	0,59	0,024
4	7548	0,855	0,730	0,285	0,046	0,000098	-	-	-	-	0,0448	0,67	-0,11	0,73	0,027
5	7548	0,852	0,726	0,269	0,473	-	-	-	-	0,000283	0,0451	0,00	-0,15	0,74	0,027
6	7548	0,881	0,776	0,294	0,419	-	0,00131	-	-	-	0,0378	16,19	-0,07	0,61	0,025
7	7548	0,852	0,725	0,304	0,453	-	-	-0,00028	-	-	0,0453	-0,44	-0,22	0,78	0,027
8	7548	0,855	0,753	0,347	0,410	-	-	-	-0,00590	-	0,0455	-0,89	-0,27	0,80	0,027
9	7548	0,882	0,778	0,332	0,397	-	0,00141	-	-	-0,00047	0,0372	17,52	-0,06	0,60	0,024
10	7548	0,884	0,781	0,300	0,404	-	0,00152	0,000775	-	-0,00050	0,0371	17,74	-0,05	0,60	0,024
11	7548	0,882	0,778	0,261	0,427	-	0,00140	0,000721	-	-	0,0388	13,97	-0,19	0,67	0,024
12	7548	0,856	0,733	0,343	0,408	0,000102	-	-	-0,00579	-	0,0446	1,11	-0,16	0,74	0,027
13	7548	0,882	0,777	0,336	0,381	-	0,00130	-	-0,00404	-	0,0378	16,19	-0,07	0,60	0,025
14	7548	0,883	0,781	0,286	0,420	0,000094	0,00131	-	-	-	0,0375	16,85	-0,08	0,61	0,024
15	7548	0,855	0,730	0,292	0,460	0,000097	-	-0,00018	-	-	0,0448	0,67	-0,16	0,75	0,027
16	7548	0,855	0,731	0,263	0,473	0,000097	-	-	-	-0,00026	0,0447	0,89	-0,15	0,75	0,027
17	7548	0,853	0,728	0,353	0,410	-	-	-0,00018	-0,00517	-	0,0451	0,00	-0,17	0,74	0,027
18	7548	0,852	0,726	0,281	0,469	-	-	-0,00027	-	0,000276	0,0450	0,22	-0,16	0,75	0,027

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_0$       <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude      <sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude      <sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar  
\* Média mensal de todo o ano da radiação solar global horizontal medida de 14,81 MJ/m<sup>2</sup>, para estes locais.

**Tabela A1.4** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$ ,  $b_6$ ,  $e$ ,  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 3600 médias mensais de 10 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 2 a 69m, com exceção das estações litorâneas.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{rel}$	$\epsilon_{rel}$	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	3600	0,836	0,698	0,285	0,468	-	-	-	-	-	0,0453	-	-0,19	0,78	0,027
2	3600	0,894	0,799	0,312	0,366	0,000199	0,00170	0,0007937	-0,00683	-	0,0346	23,62 %	-0,06	0,56	0,022
3	3600	0,895	0,801	0,340	0,347	0,000211	0,00179	0,000904	-0,00691	-0,00041	0,0339	25,17 %	-0,08	0,56	0,022
4	3600	0,889	0,790	0,281	0,430	-	0,002	-	-	-	0,0345	23,84 %	-0,10	0,55	0,022
5	3600	0,889	0,791	0,304	0,416	-	0,00171	-	-	-0,00029	0,0339	25,17 %	-0,08	0,56	0,022
6	3600	0,889	0,791	0,264	0,433	-	0,00171	0,0003667	-	-	0,0344	24,06 %	-0,09	0,57	0,022
7	3600	0,890	0,792	0,329	0,386	-	0,00163	-	-0,00452	-	0,0344	24,06 %	-0,06	0,56	0,022
8	3600	0,891	0,794	0,277	0,426	0,000142	0,00163	-	-	-	0,0346	23,62 %	-0,06	0,56	0,022

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{5}/\bar{5}_0$

<sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Média mensal de todo o ano da radiação solar global horizontal medida de 14,86 J/m<sup>2</sup>, para estes locais.

**Tabela A1.5** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 1080 médias mensais de 3 estações do Leste dos EUA, localizadas nas altitudes de 190, 192 e 192m, no Norte do Alabama e no norte do Maine.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{\text{Rel}}$	$\epsilon_{\text{rel}}(\%)$	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	1080	0,801	0,642	0,300	0,448	-	-	-	-	-	0,0514	-	-0,12	0,87	0,033
2	1080	0,826	0,682	-0,51	0,463	0,00379	0,00057	0,0024187	-0,00267	-	0,0476	7,39	-0,07	0,85	0,031
3	1080	0,829	0,688	-0,41	0,428	0,003564	0,00064	0,0024811	-0,00268	-0,00074	0,0475	7,59	-0,07	0,85	0,031
4	1080	0,802	0,643	0,301	0,445	-	0,00009	-	-	-	0,0510	0,78	-0,09	0,86	0,033
5	1080	0,803	0,645	0,347	0,419	-	0,00013	-	-	-0,00074	0,0513	0,19	-0,08	0,85	0,033
6	1080	0,823	0,678	0,197	0,487	-	0,00055	0,0020887	-	-	0,0482	6,23	-0,07	0,86	0,033
7	1080	0,804	0,646	0,347	0,403	-	0,00014	-	-0,00447	-	0,0506	1,56	0,11	0,86	0,033
8	1080	0,826	0,683	0,258	0,451	-	0,00062	0,0021700	-	-0,00077	0,0480	6,61	-0,08	0,86	0,031
9	1080	0,802	0,644	0,732	0,449	-0,00227	0,00013	-	-	-	0,0508	1,17	-0,10	0,86	0,033

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S} / \bar{S}_0$ , <sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude, <sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude, <sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Média mensal de todo o ano da radiação solar global horizontal medida de 14,81 MJ/m<sup>2</sup>, para estes locais.

**Tabela A1.6** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 720 médias mensais de 2 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 190 e 192 m, no Norte do Alabama.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	720	0,863	0,744	0,281	0,477	-	-	-	-	-	0,0270	-	-0,12	0,61	0,024
2	720	0,944	0,891	0,426	0,503	0,00000	0,00206	-0,005944	0,002354	-	0,0167	38,15	-0,04	0,36	0,016
3	720	0,944	0,891	0,438	0,494	0,00000	0,00208	-0,005812	0,002336	-0,00019	0,0167	38,15	-0,03	0,36	0,016
4	720	0,942	0,887	0,250	0,477	-	0,00207	-	-	-	0,0172	36,30	-0,04	0,38	0,016
5	720	0,942	0,887	0,270	0,466	-	0,00209	-	-	-0,00023	0,0172	36,30	-0,03	0,37	0,016
6	720	0,943	0,890	0,415	0,477	-	0,00206	-0,004822	-	-	0,0169	37,41	-0,03	0,36	0,016
7	720	0,943	0,890	0,427	0,468	-	0,00208	-0,004695	-	0,000194	0,0169	37,41	-0,03	0,36	0,016
8	720	0,942	0,887	0,239	0,488	-	0,00208	-	0,000932	-	0,0172	36,30	-0,04	0,37	0,016
9	720	0,943	0,890	-0,25	0,477	0,0026	0,00206	-	-	-	0,0169	37,41	-0,05	0,37	0,016

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S} / \bar{S}_0$

<sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Os valores percentuais de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal anual da radiação solar global horizontal medida de 15,82 MJ/m<sup>2</sup>.

**Tabela A1.7** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as médias mensais de todo o ano. Estes cálculos foram realizados sobre 720 médias mensais de 2 estações do Leste dos EUA, localizadas entre as altitudes de 377 e 395 m, no Norte de Ohio.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{rel}$	$\epsilon_{rel}$ (%)	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	720	0,947	0,897	0,266	0,538	-	-	-	-	-	0,0360	-	-0,016	0,223	0,020
2	720	0,952	0,906	0,428	0,532	0,00000	0,00077	-0,004757	0,004013	-	0,0334	7,22	-0,011	0,201	0,019
3	720	0,953	0,909	1,078	0,499	0,00000	0,00081	-0,019230	0,003363	-0,00063	0,0326	9,44	-0,007	0,193	0,019
4	720	0,952	0,906	0,275	0,492	-	0,00078	-	-	-	0,0336	6,67	-0,014	0,202	0,019
5	720	0,953	0,908	0,324	0,467	-	0,00082	-	-	-0,00060	0,0328	8,89	-0,012	0,196	0,019
6	720	0,952	0,906	0,273	0,492	0,000006	0,00078	-	-	-	0,0336	6,67	-0,012	0,202	0,019
7	720	0,952	0,906	0,235	0,530	-	0,00077	-	0,003872	-	0,0334	7,22	-0,014	0,202	0,019
8	720	0,953	0,908	0,995	0,466	-	0,00083	-0,0163	-	-0,00064	0,0327	9,17	-0,008	0,193	0,019
9	720	0,952	0,906	0,316	0,492	-	0,00079	-0,0010	-	-	0,0336	6,67	-0,012	0,202	0,019

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_0$

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Os valores percentuais de MBE e RMSE foram calculados levando-se em conta a média mensal anual da radiação solar global horizontal medida de 13,58 MJ/m<sup>2</sup>.

**Tabela A1.8** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as

Médias Mensais Anuais. Estes cálculos foram realizados sobre 600 médias mensais de 20 estações próximas ao mar, do Leste dos EUA localizadas entre as altitudes de 1 a 67m. Mês de Janeiro.

$i$	$N$	$r$	$r^2$	$a$	$b_1$ <sup>1</sup>	$b_2$ <sup>2</sup>	$b_3$ <sup>3</sup>	$b_4$ <sup>4</sup>	$b_5$ <sup>5</sup>	$b_6$ <sup>6</sup>	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}$ (%)	$MBE$ <sup>*</sup>	$RMSE$ <sup>*</sup>	$S_{YX}$
1	600	0,905	0,819	0,290	0,407	-	-	-	-	-	0,0291	-	-0,009	0,370	0,019
2	600	0,918	0,843	0,478	0,321	-0,00008	-0,00165	-0,00243	-0,00860	-	0,0266	8,59	-0,003	0,334	0,017
3	600	0,918	0,843	0,486	0,319	-0,00008	-0,00154	-0,00237	-0,00837	-0,00017	0,0266	4,81	0,005	0,332	0,017
4	600	0,905	0,819	0,289	0,408	0,000022	-	-	-	-	0,0291	0,00	-0,012	0,371	0,019
5	600	0,905	0,820	0,289	0,410	-	-0,00008	-	-	-	0,0290	0,34	-0,015	0,374	0,019
6	600	0,905	0,820	0,299	0,401	-	-	-0,00017	-	-	0,0292	-0,34	-0,003	0,365	0,019
7	600	0,912	0,831	0,373	0,340	-	-	-	-0,00857	-	0,0278	4,47	-0,008	0,355	0,018
8	600	0,906	0,822	0,314	0,405	-	-	-	-	-0,00035	0,0289	0,69	0,002	0,369	0,018
9	600	0,907	0,822	0,322	0,399	-	0,000128	-	-	-0,00045	0,0288	1,03	0,000	0,364	0,019
10	600	0,912	0,833	0,406	0,391	-	-0,00156	-0,00230	-	-0,00029	0,0280	3,78	-0,005	0,349	0,018
11	600	0,912	0,832	0,390	0,397	-	-0,00178	-0,00242	-	-	0,0282	3,09	-0,012	0,354	0,018
12	600	0,912	0,831	0,374	0,339	-0,00001	-	-	-0,00862	-	0,0278	4,47	-0,008	0,355	0,018
13	600	0,912	0,832	0,377	0,335	-	0,000820	-	-0,00886	-	0,0322	-10,65	0,151	0,389	0,018
14	600	0,905	0,820	0,289	0,411	0,000017	-0,00008	-	-	-	0,0293	-0,69	0,001	0,372	0,019
15	600	0,906	0,820	0,298	0,403	0,000025	-	-0,00002	-	-	0,0322	-10,65	0,107	0,382	0,019
16	600	0,913	0,834	0,400	0,321	-	-	-0,00037	-0,00946	-	0,0274	5,84	0,001	0,343	0,018
17	600	0,908	0,825	0,355	0,387	-	-	-0,00049	-	-0,00006	0,0285	2,06	0,006	0,352	0,018

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/S_0$

<sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Média mensal da radiação solar global horizontal medida de 9,70 MJ/m<sup>2</sup>, para estes locais e mês.

**Tabela A1.9** Valores anuais dos coeficientes  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ ,  $b_5$  e  $b_6$ , coeficientes de correlação anuais  $r$ , coeficientes de determinação anuais,  $r^2$ , erros de estimação associados aos modelos. Todos os modelos correlacionam  $\bar{K}_T$  com as outras variáveis. Todos os cálculos são feitos sobre as

Médias Mensais Anuais. Estes cálculos foram realizados sobre 600 médias mensais de 20 estações próximas ao mar, do Leste dos EUA localizadas entre as altitudes de 1 a 67m. Mês de Julho.

<b>i</b>	<b>N</b>	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>	<b>a</b>	<b>b<sub>1</sub><sup>1</sup></b>	<b>b<sub>2</sub><sup>2</sup></b>	<b>b<sub>3</sub><sup>3</sup></b>	<b>b<sub>4</sub><sup>4</sup></b>	<b>b<sub>5</sub><sup>5</sup></b>	<b>b<sub>6</sub><sup>6</sup></b>	$\bar{\epsilon}_{Rel}$	$\epsilon_{rel}(\%)$	<b>MBE<sup>*</sup></b>	<b>RMSE<sup>*</sup></b>	<b>S<sub>YX</sub></b>
1	600	0,899	0,808	0,323	0,440	-	-	-	-	-	0,0225	-	0,008	0,597	0,014
2	600	0,922	0,850	0,342	0,378	-0,00005	0,00206	0,000776	-0,00726	-0,00035	0,0199	11,56	-0,033	0,529	0,013
3	600	0,921	0,848	0,307	0,380	-0,00004	0,00241	0,000978	-0,00812	-	0,0201	10,67	-0,007	0,531	0,013
4	600	0,899	0,809	0,320	0,444	0,000065	-	-	-	-	0,0225	0,00	0,003	0,595	0,015
5	600	0,911	0,829	0,390	0,426	-	-	-	-	-0,00088	0,0215	4,44	0,009	0,563	0,014
6	600	0,899	0,808	0,326	0,441	-	-0,0002	-	-	-	0,0225	0,00	-0,010	0,597	0,015
7	600	0,904	0,817	0,302	0,449	-	-	0,000501	-	-	0,0219	2,67	0,000	0,582	0,014
8	600	0,915	0,837	0,421	0,365	-	-	-	-0,01000	-	0,0209	7,11	0,043	0,552	0,014
9	600	0,911	0,830	0,384	0,423	-	0,00034	-	-	-0,00091	0,0214	4,89	-0,021	0,563	0,014
10	600	0,916	0,839	0,264	0,432	-	0,00262	0,001006	-	-0,00056	0,0208	7,56	-0,001	0,546	0,014
11	600	0,913	0,833	0,188	0,444	-	0,00332	0,001433	-	-	0,0212	5,78	0,018	0,557	0,014
12	600	0,915	0,837	0,427	0,360	-0,00004	-	-	-0,01100	-	0,0208	7,56	-0,090	0,557	0,014
13	600	0,915	0,837	0,420	0,364	-	0,00009	-	-0,01000	-	0,0210	6,67	0,075	0,555	0,014
14	600	0,899	0,809	0,322	0,444	0,000064	-0,0001	-	-	-	0,0225	0,00	-0,017	0,596	0,015
15	600	0,904	0,818	0,301	0,451	0,000037	-	0,000488	-	-	0,0220	2,22	0,002	0,582	0,014
16	600	0,916	0,840	0,401	0,376	-	-	0,000275	-	-	0,0206	8,44	-0,011	0,546	0,013
17	600	0,911	0,830	0,373	0,432	-	-	0,000204	-	-0,00077	0,0214	4,89	0,002	0,561	0,014

<sup>1</sup> Coeficiente relacionado a  $\bar{S}/\bar{S}_0$

<sup>2</sup> Coeficiente relacionado a Altitude

<sup>3</sup> Coeficiente relacionado a Temperatura

<sup>4</sup> Coeficiente relacionado a Latitude

<sup>5</sup> Coeficiente relacionado a Nebulosidade

<sup>6</sup> Coeficiente relacionado a Umidade Relativa do Ar

\* Média mensal da radiação solar global horizontal medida de 21,34 MJ/m<sup>2</sup>, para estes locais e mês.

ANEXO 2 – DIAGRAMAS DE DISPERSÃO DE  $\bar{K}_T$  E  $\bar{S}/\bar{S}_o$  MENSALIS PARA O RIO GRANDE DO SUL

A2-1. Região da Campanha

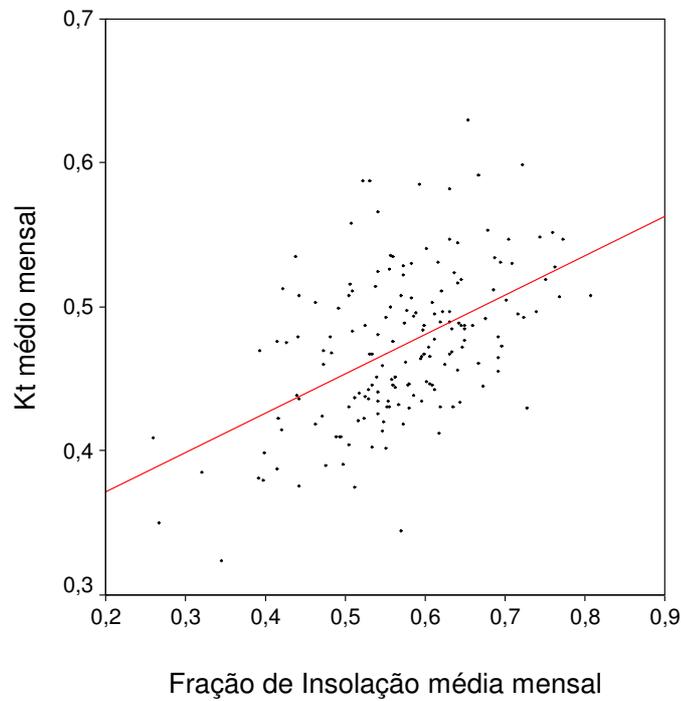


Fig. A2-1 Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Alegrete.

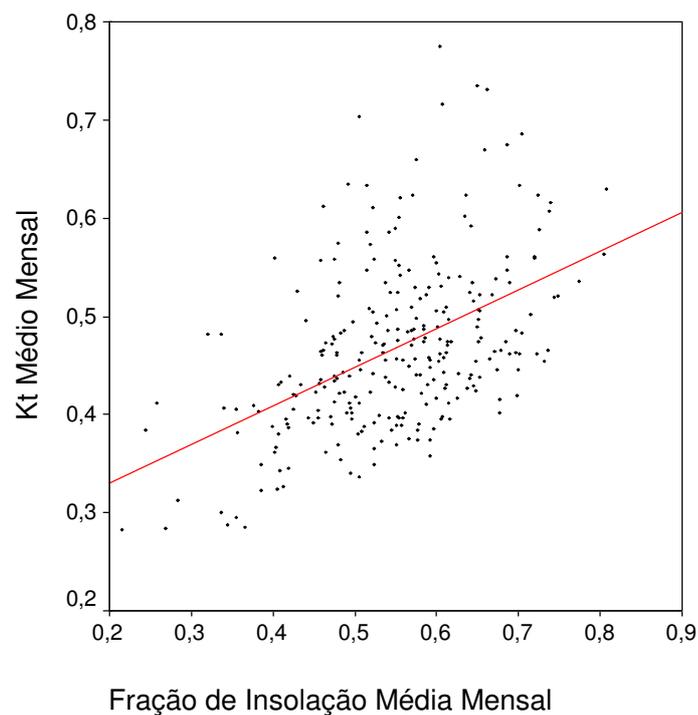
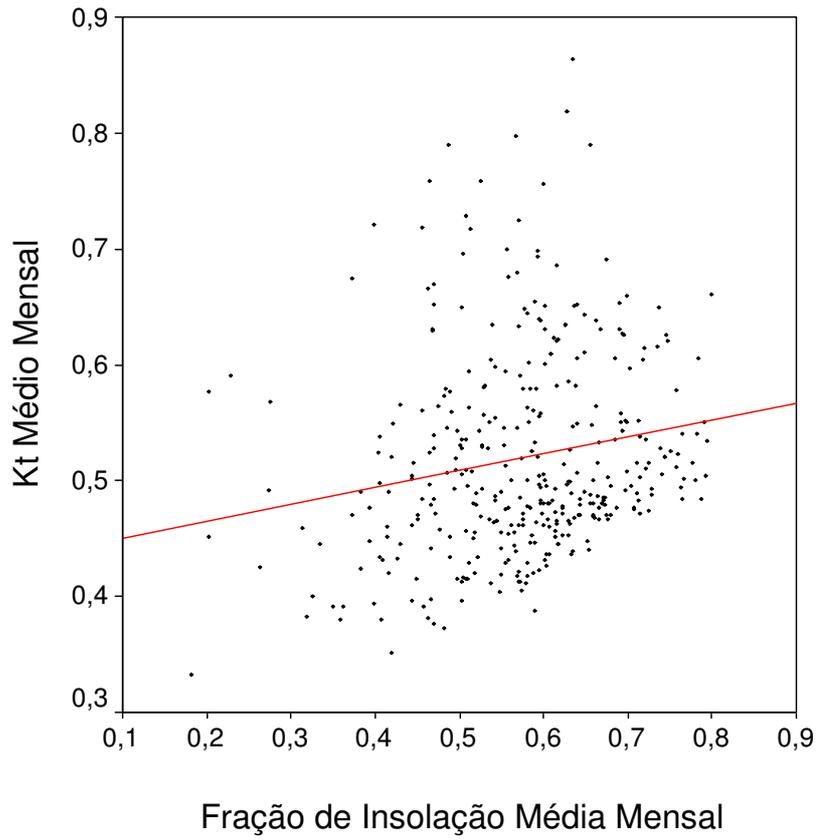
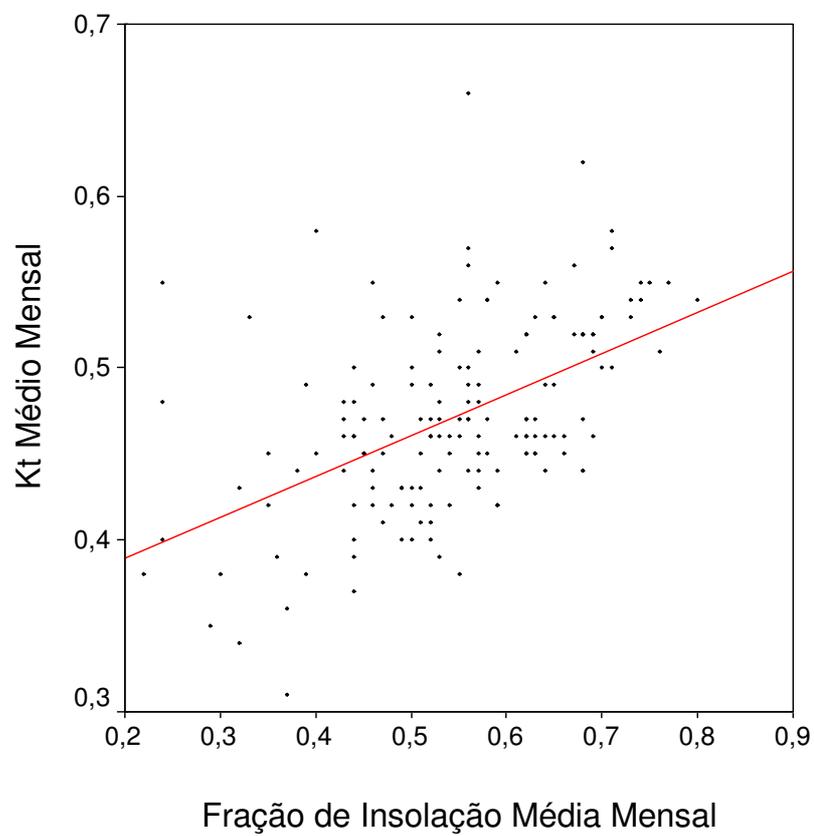


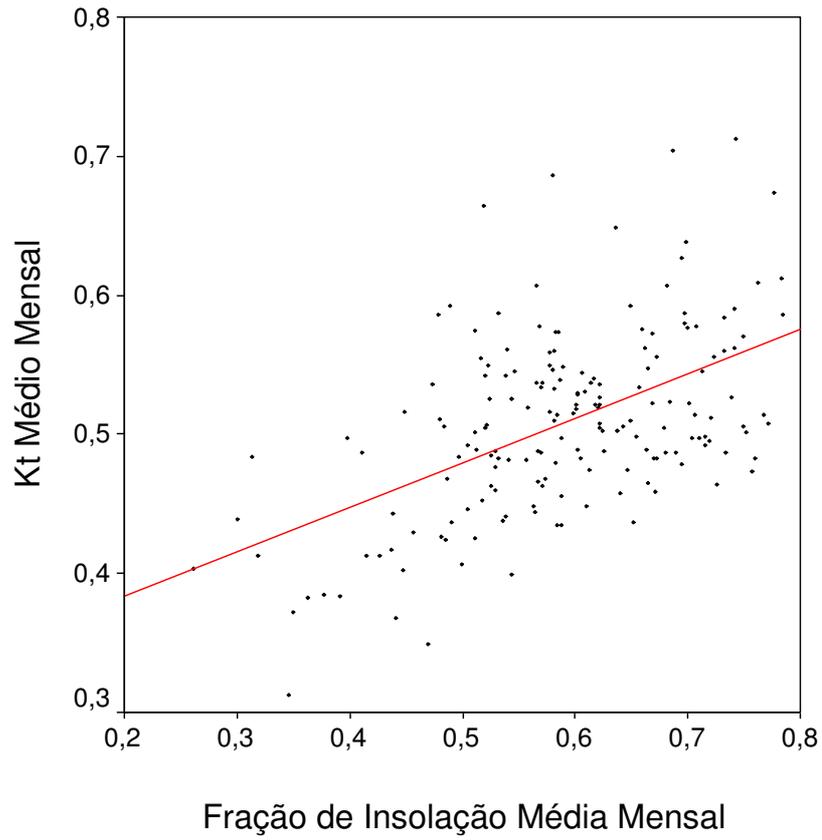
Fig. A2-2 Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Encruzilhada do Sul.



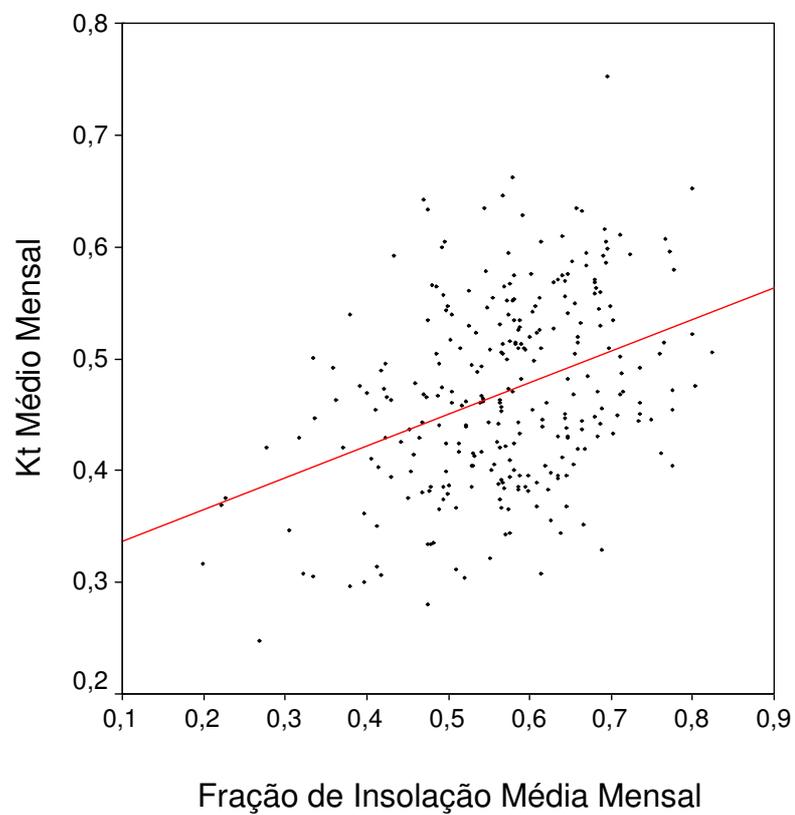
**Fig. A2-3** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Quaraí.



**Fig. A2-4** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Santana do Livramento.

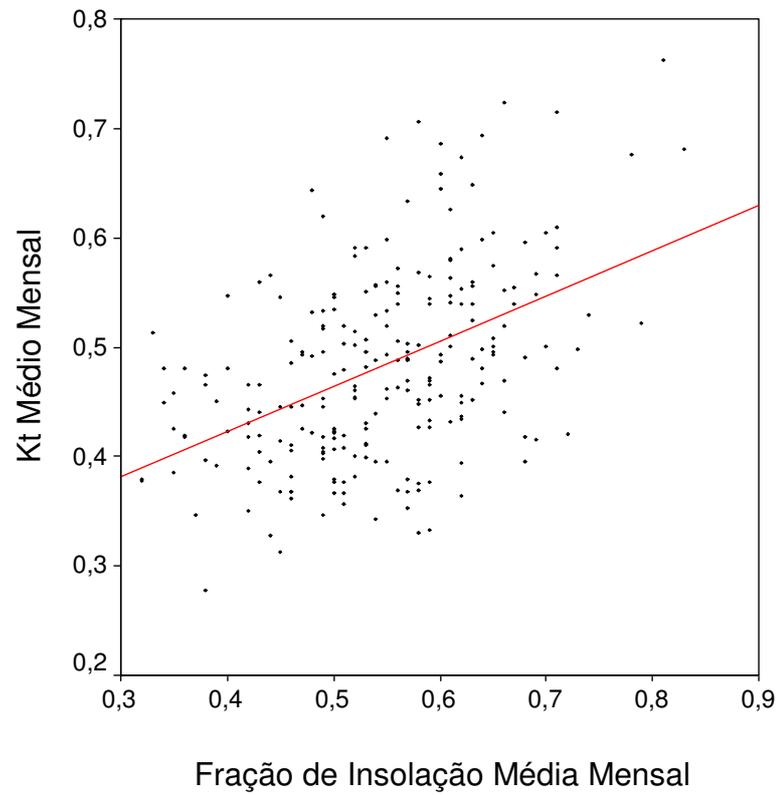


**Fig. A2-5** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para São Borja.

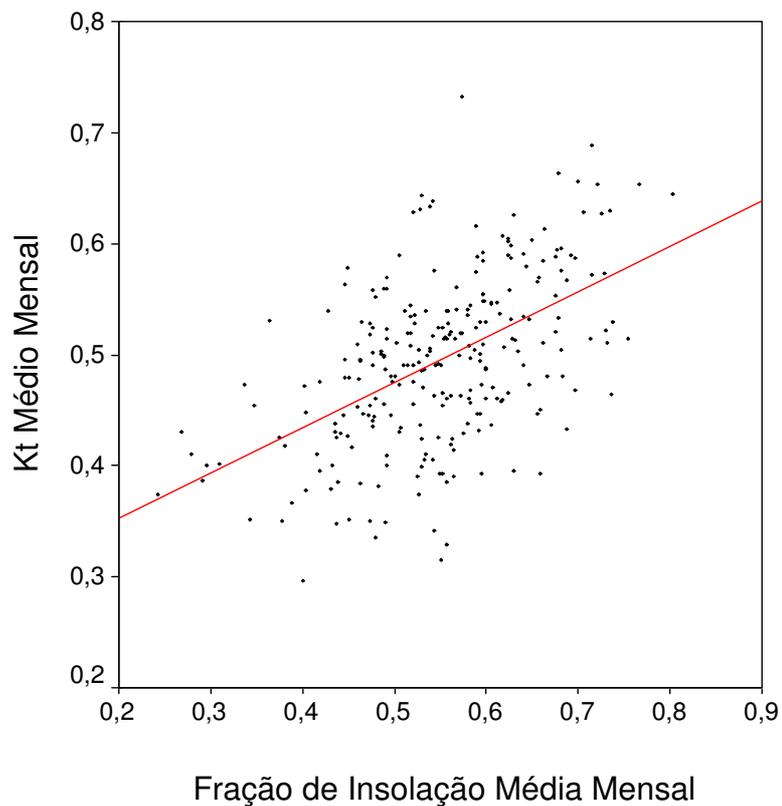


**Fig. A2-6** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Bagé.

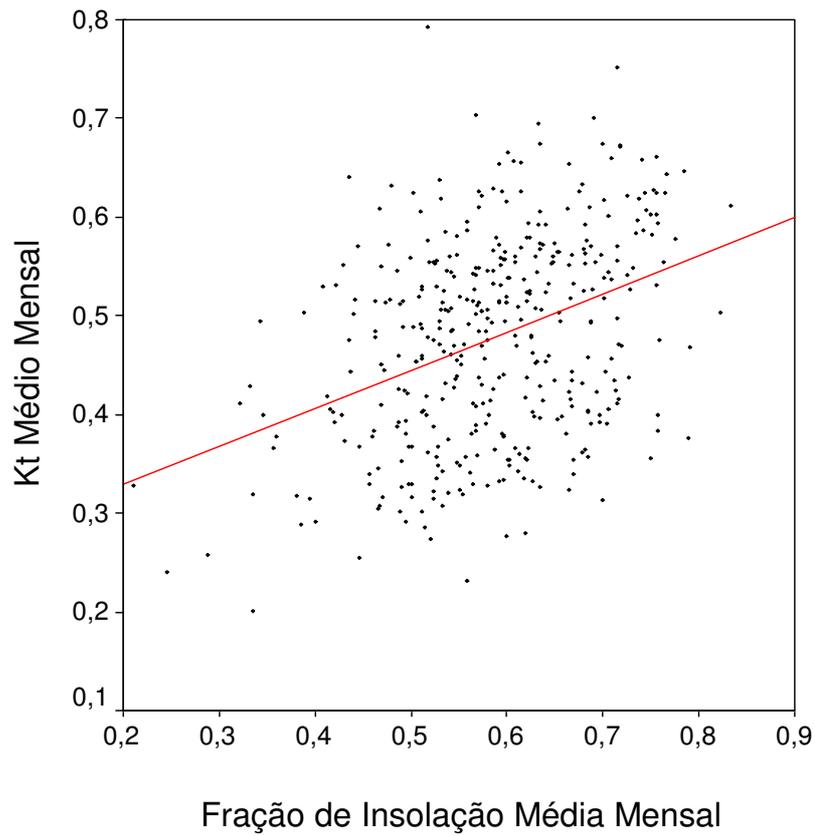
## A2-2. Região do Planalto



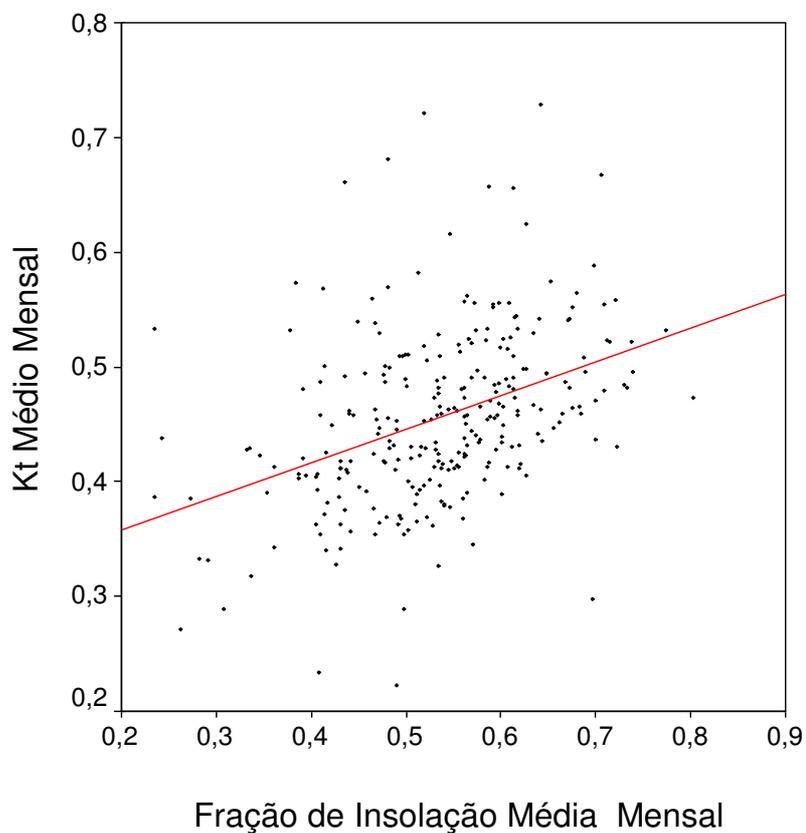
**Fig. A2-7** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Erechim.



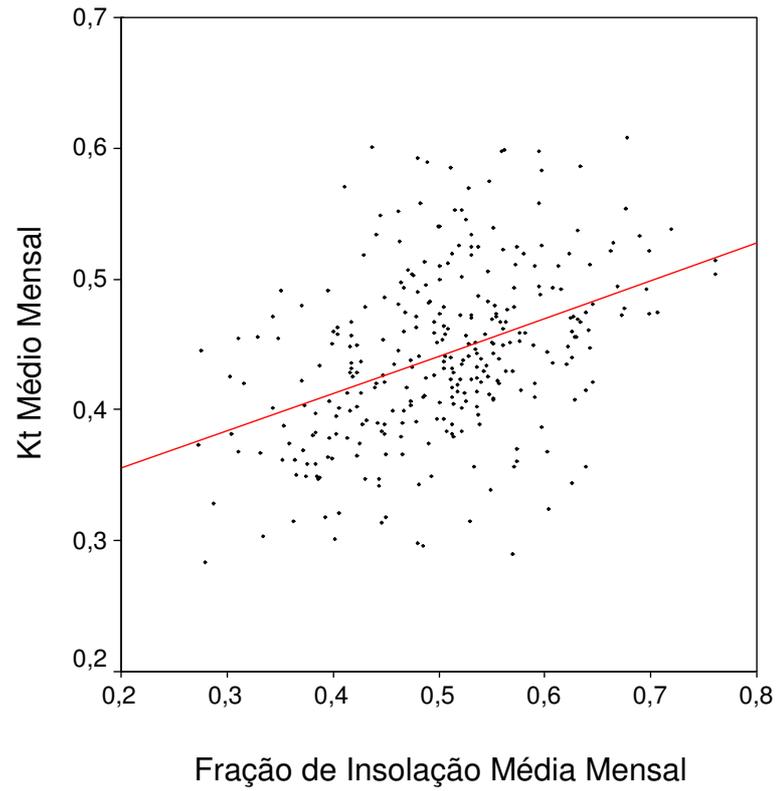
**Fig. A2-8** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Cruz Alta.



**Fig. A2-9** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Júlio de Castilhos.

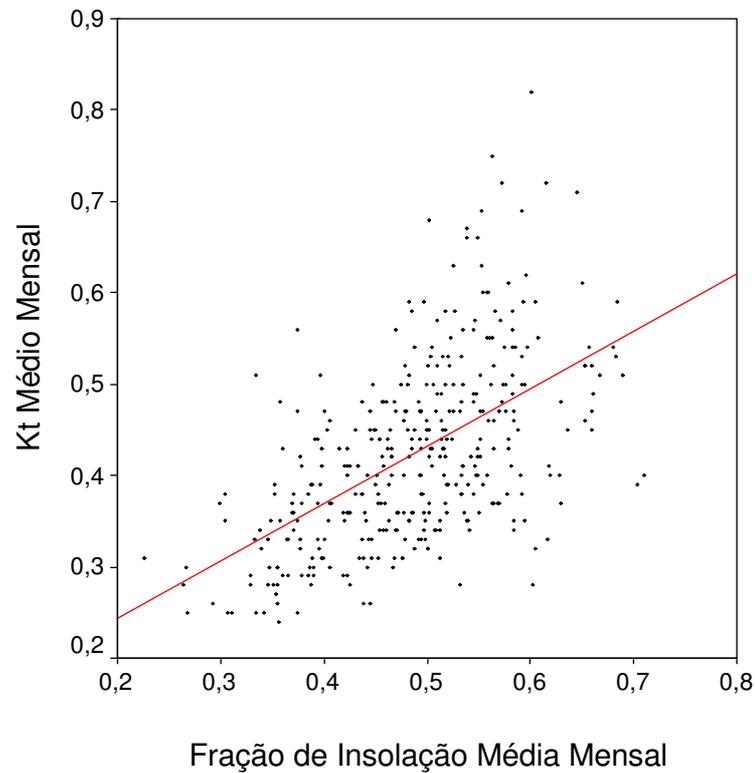


**Fig. A2-10** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Santa Rosa.

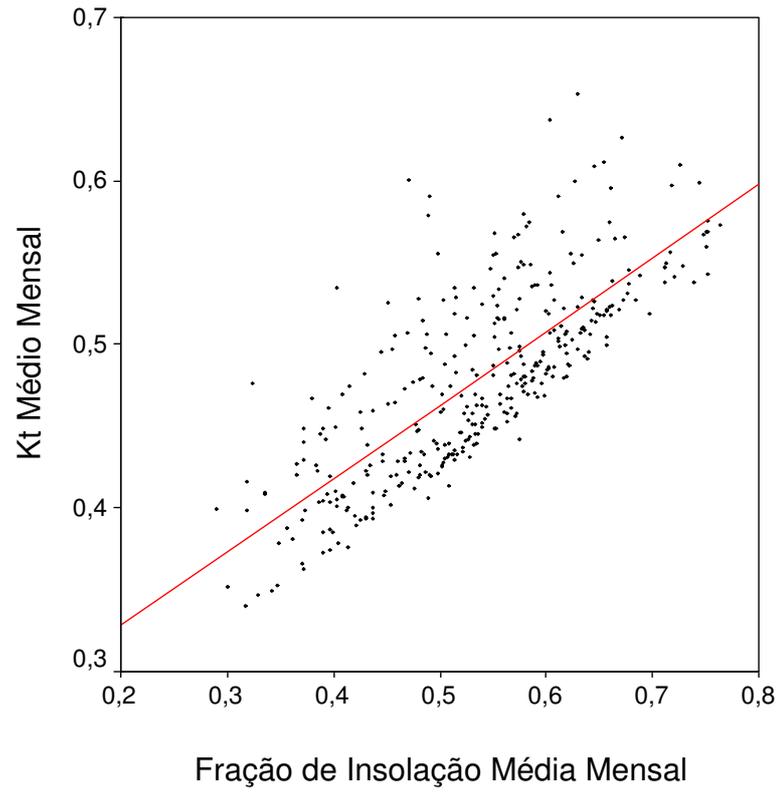


**Fig. A2-11** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Farroupilha.

## A2-2. Região do Litoral



**Fig. A2-12** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Maquiné.



**Fig. A2-13** Diagrama de dispersão de  $\bar{K}_T$  e  $\bar{S}/\bar{S}_o$  mensais para Pelotas.