

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE

DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO, URBANISMO E AMBIENTE

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM PRESIDENTE PRUDENTE-
SP NOS ANOS DE 1999 A 2007

MARCUS VINÍCIUS GALBETTI

VINÍCIUS ARTHICO DEMORI

Presidente Prudente-SP

Novembro/2012



MARCUS VINÍCIUS GALBETTI

VINÍCIUS ARTHICO DEMORI

ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM PRESIDENTE PRUDENTE-
SP NOS ANOS DE 1999 A 2007

Trabalho apresentado ao curso de graduação
em Engenharia Ambiental da Faculdade de
Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente
da UNESP, como um dos requisitos para
obtenção de título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli

Presidente Prudente-SP

Novembro/2012



FICHA CATALOGRÁFICA

D451e Demori, Vinícius Arthico.
Estimativa da Radiação Solar em Presidente Prudente – SP nos anos de 1999-2007 / Vinícius Arthico Demori, Marcus Vinícius Galbetti. - Presidente Prudente: [s.n], 2012
37 f.

Orientador: José Tadeu Garcia Tommaselli
Trabalho de conclusão (bacharelado - Engenharia Ambiental) -
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
Inclui bibliografia

1. Radiação Solar Global. 2. Dados Solarimétricos. 3. Climatologia. I. Tommaselli, José Tadeu Garcia. II. Galbetti, Marcus Vinícius. III. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências e Tecnologia. IV. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

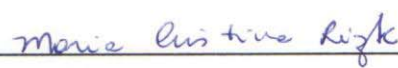
Marcus Vinícius Galbetti e Vinícius Arthico Demori

"ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL EM PRESIDENTE PRUDENTE- SP NOS ANOS DE 1999 A 2007"

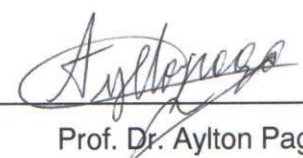
Trabalho de graduação aprovado como um dos requisitos parciais para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Faculdade de Ciências e Tecnologia, *campus* de Presidente Prudente – SP, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli (Orientador)



Profa. Dra. Maria Cristina Rizk



Prof. Dr. Aylton Pagamisse

Presidente Prudente, 08 de novembro de 2012.

DEDICATÓRIA

Aos nossos pais, Dino Demori e Aurora de Fátima Arthico Demori; Antônio Marcos Galbetti e Nilce Colete Galbetti,

Pelo apoio durante estes cinco anos somente dedicados aos estudos. Esperamos sermos grandes homens de bem para que seus esforços não tenham sido em vão.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Aylton Pagamisse pela criação das rotinas do MATLAB, sem as quais o trabalho não teria êxito.

Ao nosso amigo, professor e orientador Dr. José Tadeu Garcia Tommaselli pela confiança deste trabalho, paciência em nossas reuniões, pelos ensinamentos transmitidos, pelas conversas e conselhos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente participaram de nossas formações e contribuíram com o nosso desenvolvimento.

A FAPESP pelo apoio financeiro.

“Aqui, no entanto, nós não olhamos para trás por muito tempo, nós continuamos seguindo em frente, abrindo novas portas e fazendo coisas novas, porque somos curiosos... e a curiosidade continua nos conduzindo por novos caminhos. Siga em frente.”

(Walt Disney)

RESUMO

A grande extensão do território nacional inviabiliza a instalação e manutenção de instrumentos de medição de radiação solar, o que torna fundamental o desenvolvimento e a aplicação de modelos que sejam capazes de estimar dados suficientes e confiáveis para atividades de aproveitamento desta energia. Na maioria dos casos, são estimados a partir da equação de Ångström. Tendo como base esse modelo, o projeto objetivou a estimativa da radiação solar global para a cidade de Presidente Prudente-SP, Brasil, utilizando dados analógicos diários do ano de 1999 a 2007. Os dados sobre radiação solar global foram obtidos a partir da cotação das curvas (fitas) diárias dos registros do actinógrafo bimetálico da estação meteorológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP. Tais fitas foram digitalizadas, resultando em imagens digitais com pares de coordenadas x e y (x = tempo em horas e y = radiação solar global em $\text{cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) para os dias registrados. O valor diário da radiação solar global é a área sob a curva da imagem, sendo calculado a partir de algoritmos computacionais. Assim, com dados já digitais de horas de brilho solar, estimaram-se os coeficientes “a” e “b”, através da regressão linear por ano, entre os valores de R_g/R_0 (radiação solar global / radiação solar sobre uma superfície horizontal no topo de atmosfera), como ordenado, e n/N (insolação diária / duração astronômica do dia) como abscissa. A inclinação da linha é a constante “b” e o coeficiente linear, a constante de “a”. Os resultados estimados foram comparados aos observados através do teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo notado que os modelos podem ser aceitos. Assim, é proposta a equação para estimativa da radiação solar global $R_g = R_0 (0,2662 + 0,3592 n/N)$.

Palavras-chave: Radiação solar global, actinógrafo, equação de Ångström, dados solarimétricos.

ABSTRACT

The wide territorial extension of Brazil derails the installation and maintenance of instruments for measuring solar radiation, which makes necessary the development and application of models that are able to estimate reliable and sufficient data for many different activities that use such data. And these, in most cases, are estimated from the Ångström equation. Based on this model, this project aimed to estimate the global solar radiation at Presidente Prudente-SP, Brazil, using daily data from 1999 to 2007. The solar radiation data have been extracted from the paper tapes of actinograph bi-metallic (Robitsch) daily records at the meteorological station in the Faculty of Science and Technology, UNESP. These tapes were scanned, resulting in digital images with x and y coordinates pairs (x = time; y = solar radiation, cal/min.cm²). The daily global solar radiation is the area under the curve of the image. This value has been calculated by computer algorithms. After the acquisition and calculation of the values needed to develop the Ångström equation have been determined the constants "a" and "b", using linear regression between the values of R_g/R_0 (solar radiation/solar radiation on a horizontal surface at the top of atmosphere), as ordered, and n/N (number of hours of sunshine/day length in hours) as abscissa. The slope of the line will be the constant "b" and the linear coefficient, the constant "a". The estimated results were compared to the observed using the Kolmogorov-Smirnov test, realizing that the models can be accepted. So, the equation to aim the solar global radiation is: $R_g = R_0 (0,2662 + 0,3592 \frac{n}{N})$.

Key-words: Global solar radiation, actinograph, Ångström equation, solarimetric data

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Actinógrafo bimetálico de Robitchz, marca FUESS de escala semanal da Estação Meteorológica da FCT-UNESP.</i>	18
<i>Figura 2 - Heliógrafo, marca FUESS de escala diária da Estação Meteorológica da FCT-UNESP.</i>	18
<i>Figura 3 – Fita digitalizada do Actinógrafo com dados de 26/01/1999 a 31/01/1999</i>	23
<i>Figura 4 – Esquerda Radiograma 19990127; Direita imagem de saída do MATLAB notando duas curvas de integração (vermelha e azul).</i>	24
<i>Figura 5 – Esquerda radiograma 19990318 ilustrando uma imagem borrada, apagada e com eixo deslocado. Direita radiograma 20031203 que mostra a mudança da qualidade da fita e eixo deslocado.</i>	27
<i>Figura 6 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 1999.</i>	30
<i>Figura 7 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2000.</i>	30
<i>Figura 8 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2001.</i>	30
<i>Figura 9 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2002.</i>	30
<i>Figura 10 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2003.</i>	30
<i>Figura 11 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2004.</i>	30
<i>Figura 12 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2005.</i>	31
<i>Figura 13 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2006.</i>	31
<i>Figura 14 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2007.</i>	31

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Resumo da Estatística de Kolmogorov-Smirnov</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 2 - Resumo dos coeficientes.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 3 - Valores consideráveis dos parâmetros</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 4 - Comparação entre os autores</i>	<i>32</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

R_g : Radiação Solar Global diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo, MJ*m⁻²*dia⁻¹;

R_0 : Radiação Solar Global diária incidente em uma superfície horizontal no “topo da atmosfera”, MJ*m⁻²*dia⁻¹;

n : Insolação diária, horas;

N : Duração astronômica do período diurno, horas;

$\frac{n}{N}$: Razão de insolação;

a, b : Coeficientes determinadas empiricamente.

dR : Radiação incidente no topo da atmosfera no intervalo de tempo dt ;

φ : Latitude do local, em radianos;

δ : Declinação solar, em radianos;

h : Ângulo horário, em graus;

r : Raio vetor da terra;

I_0 : Coeficiente solar;

t_p, t_0 : Horário do ocaso (pôr do sol) e do orto (nascer do sol) respectivamente;

t_m : Horário da passagem pela meridiana;

SUMÁRIO

1. Introdução	12
2. Objetivos	16
3. Plano de Trabalho	17
4. Materiais	18
5. Procedimento Metodológico	19
5.1. Equação de Ångström/Prescott	19
5.2. Determinação de R_0	20
5.3. Determinação de N	22
5.4. Aquisição de n	22
5.5. Aquisição de R_g	22
5.6. Determinação dos coeficientes “a” e “b”	25
5.7. Teste de Kolmogorov-Smirnov	25
6. Resultados	27
7. Conclusão	33
8. Referências Bibliográficas	34
Anexo 1 – Rotina “abreim” do MATLAB.....	36
Anexo 2 - Rotina “int” do MATLAB.....	37

1. Introdução

Radiação solar pode ser definida como sendo toda forma de energia que se move a velocidade da luz, sendo em forma de ondas ou de partículas eletromagnéticas, não necessitando de meio material para se propagar, oriunda do Sol.

Segundo AYOADE (1986) “De acordo com a lei de deslocamento de Wien, o comprimento de onda de máxima intensidade de um corpo negro é inversamente proporcional à temperatura absoluta do corpo”. Desse modo, a radiação proveniente do Sol é denominada radiação de ondas curtas em sua maior parte. A Terra e a atmosfera se aquecem, absorvendo radiação de ondas curtas. A energia resultante da interação da radiação solar e da atmosfera/Terra é denominada de radiação de ondas longas.

A maneira como a atmosfera se comporta em relação às radiações de ondas curtas e longas controla, em grande parte, o seu intercâmbio de energia com a superfície terrestre. Os gases presentes na atmosfera, principalmente o vapor d'água e o gás carbônico, absorvem uma parte da radiação solar de ondas curtas, mas absorvem muito mais as de ondas longas, emitidas pela Terra. Reemitindo, portanto, a radiação de modo que parte da energia perdida pela superfície lhe é devolvida.

Como a Terra não está aquecendo, nem resfriando, pode-se completar que a atmosfera irradia, em média, a mesma quantidade de energia térmica que recebe do Sol, ou seja, apresenta-se em equilíbrio radiativo perfeito em relação ao seu ambiente circundante, mantendo uma temperatura média de, aproximadamente, 15°C.

Analisando o equilíbrio citado acima, define-se insolação como o número de horas de brilho solar enquanto a radiação solar global R_g representa a soma da radiação vinda diretamente do Sol, acrescida da radiação difundida pelas partículas e gases da atmosfera cujo valor médio que chega a superfície, conhecido pelo nome de coeficiente solar, é de duas calorias por centímetro quadrado por minuto ($2 \text{ cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$).

As variações quanto ao volume de energia recebida dependem de alguns fatores, dentre os quais os principais são:

- i. O fato de a órbita ser elíptica faz com que haja uma época em que o planeta se encontra mais próximo em relação à distância média do Sol,

denominada periélio, logo a insolação será maior. O contrário verifica-se quando o planeta está mais afastado, no afélio. A insolação varia, também, conforme a duração dos dias, pois o hemisfério que estiver voltado para o Sol (verão) apresentará dias mais longos e, conseqüentemente maior insolação e, portanto, mais R_g recebida.

- ii. Latitude, pois quanto mais perpendiculares são os raios, mais intensos se apresentam. Assim, na linha do Equador, onde a latitude é zero, os raios são perpendiculares e a R_g atinge seus níveis máximos. Todavia, nas regiões polares, verifica-se o contrário.
- iii. Processos de atenuação, como a difusão, absorção e reflexão. O primeiro ocorre através do espalhamento de partículas na atmosfera. O segundo processo de atenuação é a absorção seletiva por certos agentes atmosféricos para certos comprimentos de ondas. O terceiro processo é a reflexão e absorção pelas nuvens. A reflexão depende principalmente da espessura, estrutura e constituição da nuvem, e sua porcentagem pode chegar a 90%. A absorção pelas nuvens é muito menor em relação à reflexão, chegando a absorver apenas 7% da radiação solar (TUBELIS, 1980).

O aproveitamento racional da energia solar no sentido de produzir instalações bem dimensionadas e economicamente viáveis só é possível a partir de informações solarimétricas consistentes da região em questão. Ocorre que, no Brasil, tais informações nem sempre estão disponíveis de maneira direta, já que a grande extensão do território nacional inviabiliza a instalação e manutenção de instrumentos de medição de radiação solar. Sob essa perspectiva torna-se fundamental o desenvolvimento e a aplicação de modelos que sejam capazes de estimar dados suficientes e confiáveis para concepção dos projetos, estudos de custo e retorno de investimento (GUIMARÃES, 2001).

Os esforços mais recentes e efetivos de avaliação da disponibilidade de radiação solar no Brasil destacam-se os seguintes:

- i. Atlas Solarimétrico do Brasil: Iniciativa da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e da Companhia Hidroelétrica do São Francisco –

CHESF, em parceria com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito – CRESESB. Ele apresenta uma estimativa da radiação solar incidente no país, resultante da interpolação e extrapolação de dados obtidos em estações solarimétricas distribuídas em vários pontos do território nacional. Devido, porém, ao número relativamente reduzido de estações experimentais e às variações climáticas locais e regionais, ele faz estimativas da radiação solar a partir de imagens de satélites.

- ii. Atlas de Irradiação Solar no Brasil: Elaborado pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e pelo Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Realiza estimativa a partir de dados de satélites e de algoritmo desenvolvido no Instituto de Geofísica e Meteorologia de Colonia na Alemanha e adaptado para o Brasil
- iii. Atlas Brasileiro de Energia Solar: Realização da Divisão de Clima e Meio Ambiente – DMA, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT e patrocínio Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA.

Como lembrado por pesquisadores do Centro de Pesquisas de Eletricidade – CEPEL, os modelos apresentam falhas e limites e não devem ser vistos como concorrentes. Ao contrário, devem ser complementares, na medida em que reúnem o máximo possível de dados e podem, dessa forma, melhorar as estimativas e avaliações da disponibilidade de radiação solar no Brasil (GUIMARÃES, 2001). Nota-se, porém que estes exemplos são de aplicação generalizada, necessitando de informações mais precisas a nível regional para estudos de aproveitamento deste tipo de energia.

Como as estações meteorológicas de superfície não dispõem de instrumentos apropriados para medir a R_g , os pesquisadores tentam obter uma relação que estime o seu valor o mais próximo possível do seu valor real (NOGUEIRA et al., 2000).

O balanço de radiação ou suas partes componentes podem ser medidos através de um instrumental específico. No Brasil, a medição da radiação solar é feita

extensivamente por dois tipos de instrumentos: o actinógrafo bimetalico e o heliógrafo (TUBELIS, 1980).

O actinógrafo bimetalico realiza um procedimento no qual a R_g é recebida em três placas bimetalicas, sendo uma enegrecida e duas brancas. A diferença de dilatação das placas é proporcional à absorção diferencial da radiação solar incidente.

Nos actinógrafos emprega-se um hemisfério de quartzo para proteger o elemento sensível. Este hemisfério funciona como um filtro para as ondas eletromagnéticas comportando-se transparente para a radiação de onda curta e opaco para a radiação de onda longa. Desta forma, a dilatação diferencial das placas do actinógrafo é a medida da R_g . Um sistema de alavancas transmite a diferença de dilatação que é inscrita sobre o tambor registrador acionado por mecanismo de relojoaria (TUBELIS, 1980).

A quantidade de estações que medem a radiação solar diária é muito pequena comparada com aquelas que medem a temperatura do ar. Essa dificuldade é real, tanto no Brasil quanto em outros países (NOGUEIRA et al., 2000). Em razão disso, OMETTO (1981), sugeriu o uso de um modelo para estimar a radiação solar global diária. Assim, com base neste modelo, esse trabalho objetivou a estimativa empírica da radiação solar global R_g e o ajuste do referido modelo para a cidade de Presidente Prudente-SP a partir de dados provenientes de um actinógrafo bimetalico.

2. Objetivos

São objetivos deste trabalho de graduação:

- ✓ Implementar um procedimento automatizado de recuperação de dados radiométricos a partir das fitas do actinógrafo;
- ✓ Atualizar a equação de Ångström para o município de Presidente Prudente-SP;
- ✓ Disponibilizar dados concretos de radiação solar para projetos de aproveitamento de tal energia;

3. Plano de Trabalho

- ✓ Leituras preliminares, revisão bibliográfica;
- ✓ Estudos básicos de análise de regressão e testes de aderência;
- ✓ Elaborar a rotina de integração da curva do actinógrafo a partir da programação em linguagem MATLAB.
- ✓ Elaborar os arquivos digitais gráficos das fitas do actinógrafo bimetalico;
- ✓ Realizar testes das integrações utilizando a rotina;
- ✓ Realizar integrações para todo banco de dados;
- ✓ Compilar os dados do heliógrafo;
- ✓ Extrair os dados astronômicos (r e δ);
- ✓ Elaborar as planilhas de cálculo dos demais parâmetros necessários (R_0 e N);
- ✓ Executar as regressões lineares;
- ✓ Comparar os valores estimados e observados (teste de Kolmogorov-Smirnov);

4. Materiais

- ✓ Fotocópias das fitas registradas pelo Actinógrafo bimetalico de Robitchz (Figura 1), marca FUESS de escala semanal, dos anos de 1999 a 2007, da Estação Meteorológica da FCT-UNESP;
- ✓ Valores digitais das horas de brilho solar registrados pelo Heliógrafo (Figura 2), marca FUESS de escala diária, dos anos de 1999 a 2007, da Estação Meteorológica da FCT-UNESP;
- ✓ Valores digitais de declinação e raio vetor da Terra, extraídos da página http://euler.on.br/ephemeris/index.php?id_loc=8440
- ✓ Scanner;
- ✓ Computador;
- ✓ Softwares: GIMP 2.6.11 [Recorte das imagens da fita e processamento de imagem]; MATLAB 7.6.0.324 [Integração das curvas das imagens digitalizadas]; MICROSOFT OFFICE EXCEL 2007 [Armazenamento dos valores de integração, regressão linear e teste estatístico de Kolmogorov-Smirnov]; R 2.13.0 [Teste estático da média dos coeficientes “a” e “b”].



Figura 1 - Actinógrafo bimetalico de Robitchz, marca FUESS de escala semanal da Estação Meteorológica da FCT-UNESP.



Figura 2 - Heliógrafo, marca FUESS de escala diária da Estação Meteorológica da FCT-UNESP.

5. Procedimento Metodológico

5.1. Equação de Ångström/Prescott

Dentre as diversas expressões empíricas apresentadas na literatura para estimar a R_g a nível do solo em uma superfície horizontal, a de uso mais difundido é aquela proposta em 1924 por Ångström, e mais tarde modificada por Prescott, definida como:

$$\frac{R_g}{R_0} = \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

R_g : Radiação Solar Global diária sobre uma superfície horizontal, ao nível do solo, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$;

R_0 : Radiação Solar Global diária incidente em uma superfície horizontal no “topo da atmosfera”, $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$;

n : Insolação diária, horas;

N : Duração astronômica do período diurno, horas;

a, b : Coeficientes determinadas empiricamente.

Quanto aos coeficientes “a” e “b” da Equação 1, muitos pesquisadores, como CERVellini 1966, OMETTO 1968, TUBELIS 1980, dentre outros, têm apresentado valores para diferentes localidades do Brasil. Para outras localidades em que os valores de “a” e “b” não se apliquem, e que estejam entre as latitudes de 0° a 60° , as estimativas propostas por GLOVER e MCCULLOCH 1958 têm apresentado bons resultados. Tais estimativas são:

$$a = 0,29 * \cos \varphi; \quad \text{Equação 2.1}$$

$$b = 0,52. \quad \text{Equação 2.2}$$

Sendo φ a latitude do local. (VIANELLO, ALVES, 2000).

5.2. Determinação de R_0

A determinação de R_0 , entretanto, é puramente física, baseada nos conhecimentos da física da atmosfera e da astronomia de posição. Assim sendo, a quantidade de radiação incidente no topo da atmosfera pode ser determinada por:

$$\int_0^{R_0} dR = \int_{t_0}^{t_p} \frac{I_0}{r^2} (\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos h) dt \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

dR : Radiação incidente no topo da atmosfera no intervalo de tempo dt ;

δ : Declinação solar, em radianos;

h : Ângulo horário, em graus;

r : Raio vetor da terra;

I_0 : Coeficiente solar;

Os valores do raio vetor da Terra e da declinação solar podem ser obtidos no sítio http://euler.on.br/ephemeris/index.php?id_loc=8440, sendo que esta página gera on-line, as efemérides do sol e dos planetas, bem como o raio vetor da Terra, para qualquer local do Brasil em qualquer época do ano. No intervalo de um dia os valores de I_0 e r permanecem praticamente constantes. A única variável passa a ser o ângulo horário.

Na solução da Equação 3 deve-se considerar que o ângulo horário descreve desde o nascer até o pôr do sol dois semi-arcos idênticos. O primeiro, do nascer do sol até a passagem da meridiana e o segundo da passagem meridiana até o pôr do sol. Em vista disso, calcula-se um semi-arco e no final soma-se outro de valor idêntico. Dessa maneira é obtido o total de radiação solar que alcançaria a superfície do solo durante o dia em questão, desconsiderando-se toda a possível atenuação da radiação solar causada pela atmosfera. Assim, a Equação 3 substituída resultaria em:

$$R_0 = \frac{2I_0}{r^2} \left\{ [\sin \delta \sin \varphi] \int_{t_m}^{t_p} dt + (\cos \delta \cos \varphi) \int_{t_m}^{t_p} \cos h \cdot dt \right\} \quad \text{Equação 4}$$

Sendo:

t_p, t_0 : Horário do ocaso (pôr do sol) e do orto (nascer do sol) respectivamente;

t_m : Horário da passagem pela meridiana;

Verifica-se na Equação 4 a necessidade de substituição de variáveis, pois h é considerado em radianos e dt em minutos.

O ângulo horário da passagem meridiana até o pôr do sol é $\pi/2$ radianos e o tempo é 360 minutos (6 horas). Logo, tem-se que:

$$\frac{dt}{dh} = \frac{360}{\pi/2} \quad \text{onde } dt = \frac{720}{\pi} \cdot dh \quad \text{Equação 5}$$

Substituindo a equação 5 em 4, tem-se:

$$Ro = \frac{2I_0}{r^2} \left\{ [\sin \delta \sin \varphi] \int_{h_m}^{h_p} \frac{720}{\pi} \cdot dh + (\cos \delta \cos \varphi) \int_{h_m}^{h_p} \cos h \cdot \frac{720}{\pi} \cdot dh \right\} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo que h_p, h_m : Os ângulos horários no pôr do sol e na passagem meridiana, respectivamente. Simplificando:

$$Ro = \frac{2I_0 \cdot 720}{r^2 \cdot \pi} \left\{ [\sin \delta \sin \varphi] \int_{h_m}^{h_p} dh + (\cos \delta \cos \varphi) \int_{h_m}^{h_p} \cos h \cdot dh \right\} \quad \text{Equação 7}$$

Resolvendo a integração, tem-se que:

$$Ro = \frac{1440 \cdot I_0}{r^2 \cdot \pi} \left\{ [\sin \delta \sin \varphi] (h_p - h_m) + (\cos \delta \cos \varphi) \text{sen}(h_p - h_m) \right\} \quad \text{Equação 8}$$

Considerando o ângulo horário na passagem meridiana como nulo, tem-se que:

$$Ro = \frac{1440 \cdot I_0}{r^2 \cdot \pi} \{ [\sin \delta \sin \varphi] h + (\cos \delta \cos \varphi) \text{sen } h \} \quad \text{Equação 9}$$

Considerando I_0 o valor correspondente de $2 \text{ cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ e $\pi = 3,1416$, resulta, aproximadamente, em:

$$Ro = 37,6 * r^2 \{ h^{\text{rad}} \sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \text{sen } h \} \quad \text{Equação 10}$$

Assim, apenas em função de elementos astronômicos, consegue-se determinar, para cada dia do ano, o valor do total da R_0 .

5.3. Determinação de N

Na determinação de N será utilizada a Equação 12.

$$h = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad \text{Equação 11}$$

Durante um dia, o sol descreve dois semi-arcos idênticos e a velocidade angular da Terra é 15°/hora. Disso resulta a relação seguinte:

$$N = \frac{2 \cdot h}{15} \quad \text{Equação 12}$$

5.4. Aquisição de n

Os valores de n foram obtidos em formato digital da Estação Meteorológica da FCT-UNESP.

5.5. Aquisição de R_g

Os dados sobre a R_g foram obtidos das curvas diárias dos registros do actinógrafo bimetálico (Robitsch) da estação meteorológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP de Presidente Prudente-SP, localizado nas coordenadas 22°07'S; 51°23'WGr; 435,55m, em operação desde o ano de 1972. Segundo o “Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicada à Agricultura” (CEPAGRI-Unicamp), a classificação climática segundo Koppen é Aw, tropical com chuvas no verão e inverno seco, com precipitação média anual de 1254,9 mm. Foram utilizados os dados diários do período de 1999 a 2007, logo 9 anos de registros.

Os dados apresentam-se em fitas enumeradas com a contagem dos dias. As fitas constituem-se num sistema de eixos cartesianos, sendo que o eixo x é a variável independente “tempo”, em horas; já o eixo y é a variável dependente “Radiação Solar Global R_g ”, em $\text{cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Cada fita registra dados de uma semana, de segunda a domingo, sendo um radiograma para cada dia. A figura 3 apresenta um exemplo de fita.

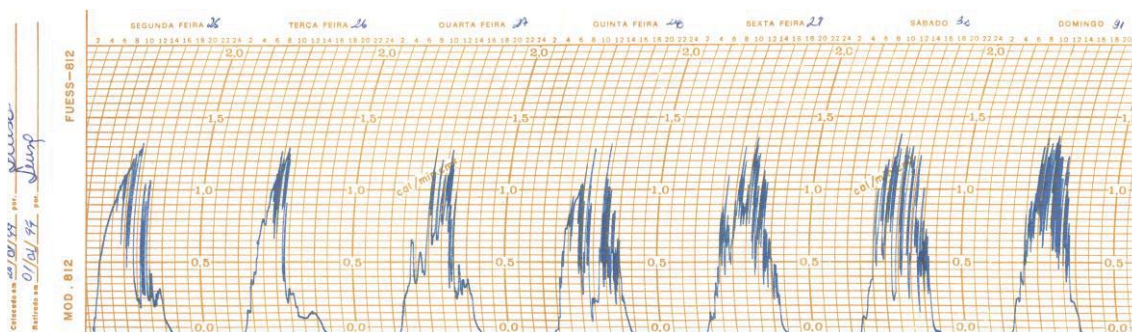


Figura 3 – Fita digitalizada do Actinógrafo com dados de 26/01/1999 a 31/01/1999

O primeiro passo foi digitalizar as fitas do actinógrafo em resolução de 400 dpi (dots per inch) no formato TIFF (Tagged Image File Format) utilizando scanner. Foram separadas em pastas por ano e nomeadas com o dia inicial e final dos dados para facilitar manipulação, como exemplo da figura 1 foi nomeada 25jan_01fev. Resultaram no total de 470 fitas digitalizadas.

Com software GIMP 2.6.11, algumas imagens foram recortadas de forma que foi gerada uma imagem por dia, exemplo representado na figura 4. Com auxílio do Prof. Dr. Aylton Pagamisse foi implementado duas rotinas para software MATLAB 7.6.0.324. A primeira chamada “abreim” (Anexo 1) que tem como função o usuário buscar a imagem no arquivo e o programa abri-la internamente. A segunda “int” (Anexo 2), a ser executada após “abreim”, que abre uma janela com a imagem e com o cursor deve-se clicar em 4 pontos no gráfico, (4, 0.0), (4, 0.5), (4, 1.5) e (12, 0.0), logo o programa realiza 2 integrações, da parte superior para inferior da imagem e vice-versa. Assim como resultado tem-se área máxima (curva em vermelho na Figura 4), área mínima (curva em azul na Figura 4), que são dados numéricos, e uma imagem das curvas de integração.

As duas integrações foram adotadas para tentar corrigir erros devidos à espessura da linha de dados do radiograma, sendo tomado o valor médio como R_g . Como teste do método foi contado visualmente os quadrados do radiograma, sendo notada boa aproximação. A saída das áreas de integração foi em quadrados do radiograma sendo aplicado o fator de conversão para tornar-se valor de R_g .

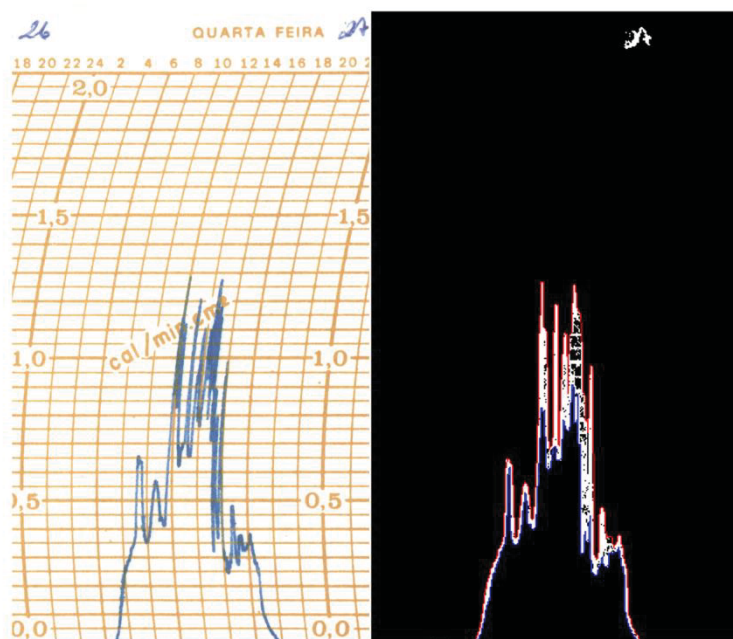


Figura 4 – Esquerda Radiograma 19990127; Direita imagem de saída do MATLAB notando duas curvas de integração (vermelha e azul).

Com as rotinas prontas foi criado o Banco de Dados que consiste nas imagens recortadas de forma que foi gerada uma imagem no formato TIFF por dia, sendo renomeada do seguinte modo ano, mês, dia (AAAAMMDD), para facilitar a classificação e posterior organização. Ainda foram separadas em pastas por ano e meses. Resultaram 3287 radiogramas.

Foram realizadas três etapas para integração dos radiogramas. Na primeira etapa, foram realizadas as rotinas sendo anotados os valores, em planilha do software Microsoft Office Excel 2007, as seguintes colunas: Data no formato “AAAAMMDD”; “Amin” com os valores da área mínima com 6 casas decimais; “Amax” com os valores da área máxima com 6 casas decimais; “Amed” sendo calculado a média dos valores anteriores com 6 casas decimais e “Anotações” que foi usada para sinalizar algum problema na imagem, sendo usado “erro” (para problemas na integração), “apagado” (para imagens com curvas com traço claro, borradas ou apagadas), “perdido” (quando não foi possível recuperar a curva). Numa mesma pasta, foram criadas planilhas para cada ano no intuito de facilitar a consulta e manipulação. As imagens da integração foram salvas nas mesmas pastas dos radiogramas com o mesmo nome.

Na segunda etapa foram revisados os dias anotados como erro, que em sua maioria consistia em problemas no contraste das imagens, que foram resolvidos

utilizando ferramentas do software GIMP 2.6.11, como “Posterizar”, “Matiz-saturação” e “Brilho e Contraste”. O princípio foi de realçar o azul da curva do radiograma ou filtrar o vermelho da grade, para assim gerar integrações mais próximas do real.

Na terceira etapa foram revisados os dias anotados como apagados, no qual utilizando a ferramenta do software GIMP 2.6.11 “Lápis” foi refeita as curvas apagadas ou claras e a “Borracha” para mascarar borrões fora da curva. Os dados em que não foi possível recuperação foram classificados como perdidos contabilizando 262, que representa aproximadamente 8%. Interessante ressaltar que 106 destes dados perdidos se concentram no final de 2007, quando as imagens são em geral compostas por uma grade de cor vermelho intenso e traço da curva estreito e azul claro, o que dificulta a integração. Nestas duas ultimas etapas, os resultados eram salvos assim como na primeira.

5.6. Determinação dos coeficientes “a” e “b”

Foi importado nas respectivas planilhas os dados de raio vetor “r”, declinação “ δ ” e insolação diária “n”. Foi então calculado ângulo horário “h”, duração astronômica do dia “N” e radiação solar global diária incidente em uma superfície horizontal no topo da atmosfera “ R_0 ” e convertido o valor “Amed” em “ R_g ” pelo fator 0,25116. Assim foi calculado R_g/R_0 e n/N , sendo criada uma planilha para compilar estas duas colunas de todos os anos para facilitar a geração dos gráficos.

Com esses dados, resta-se somente a determinação dos coeficientes “a” e “b” da equação de Ångström (Equação 1), que será realizada através da regressão linear entre os valores de R_g/R_0 como ordenadas e de n/N como abscissas. Foram compilados os dados por ano, gerando assim 9 regressões.

5.7. Teste de Kolmogorov-Smirnov

Finalmente, os valores estimados de R_g foram comparados aos valores observados e executado o teste de Kolmogorov-Smirnov para avaliar a qualidade do modelo de regressão obtido.

Este teste verifica se os valores observados podem ser considerados como oriundos de uma população com a suposta distribuição teórica. O teste utiliza as distribuições acumuladas, ou seja, ela compara a distribuição de frequências acumuladas, $(F(x))$, que deveria ocorrer sob a suposta distribuição (sob H_0) com a distribuição de frequências acumuladas dos valores observados. A estatística do teste é o ponto de maior diferença (em valor absoluto) entre as duas distribuições. Para formulação das classes utilizou-se a formula de Sturges, a qual indicou 9 classes para todos os anos. A seguir a formulação do teste.

1º Passo: Formulação das hipóteses

H_0 : As distribuições calculadas e observadas são iguais.

H_1 : As distribuições calculadas e observadas não são iguais.

2º Passo: Escolha da significância α

Neste caso foi utilizado 0,05.

3º Passo: Estatística apropriada

A estatística apropriada do teste é baseada na maior diferença absoluta entre a frequência acumulada relativa dos dados observados (R_g obtida pela integração das curvas) e dos dados estimados (R_g obtida pela estimativa usando os coeficientes “a” e “b” encontradas)

4º Passo: Conclusão

Quando o valor $D_{\text{máx}}$ for maior que o valor crítico tabelado D_n ($D_{\text{máx}} > D_n$), para um tamanho de amostra “n” e significância α , a hipótese H_0 é rejeitada e conclui-se que as distribuições calculadas e observadas não são iguais. Por outro lado, se $D_{\text{máx}}$ for menor que o valor crítico tabelado ($D_{\text{máx}} < D_n$), a hipótese H_0 é aceita e conclui-se que as distribuições calculadas e observadas são iguais.

6. Resultados

Notou-se com os testes de integração que o radiograma não deveria ser recortado apenas na área do dia em questão, deveria haver certa borda nas laterais e acima, como ilustra a figura 4. Laterais, pois o programa necessita de área maior que apenas do radiograma para realizar a integração; acima para evitar e verificar possíveis erros no banco de dados, pois fica registrado o dia do radiograma.

Da criação do banco de dados foram notados alguns possíveis problemas nos radiogramas: Imagens borradas, Imagens apagadas, Radiogramas deslocados e Mudança da qualidade da fita.

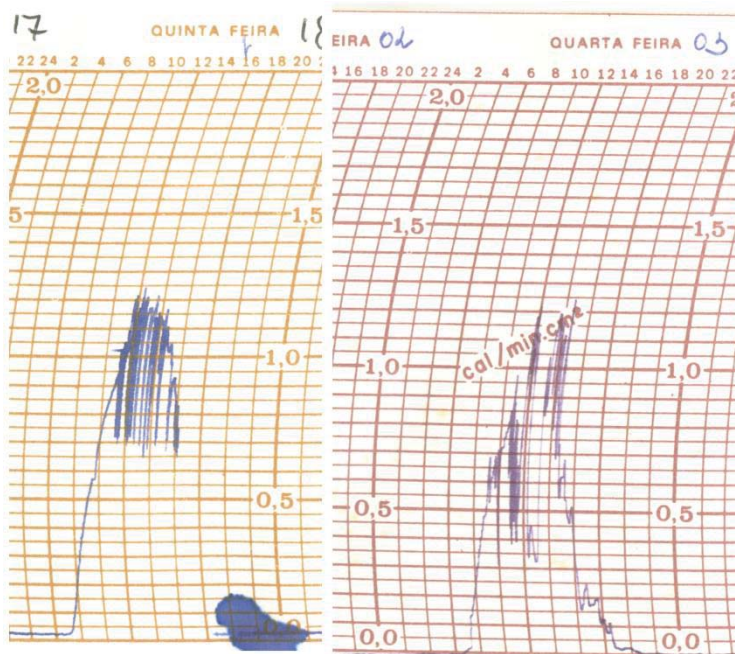


Figura 5 – Esquerda radiograma 19990318 ilustrando uma imagem borrada, apagada e com eixo deslocado. Direita radiograma 20031203 que mostra a mudança da qualidade da fita e eixo deslocado.

Os dois primeiros problemas foram de difícil resolução, pois imagens borradas geram erros nas integrações quando o programa reconhece o borrado como parte da curva devido à mesma coloração, e em imagens apagadas ou com a curva muito clara a rotina transpassa a curva. Como foi dito anteriormente, para estes erros foi utilizado processamento da imagem, com as ferramentas “Lápis” e “Borracha” do software GIMP. Para os radiogramas deslocados, basta deslocar os quatro pontos da rotina.

A mudança qualidade da fita deve-se a utilização de outra marca do produto em algumas semanas dos anos de 2003 a 2007, sendo esta de tons avermelhado escuro e

pelo fato de ser mais grosseira, o traço do radiograma tende a ser mais fino, dificultando na integração. Para este problema utilizou-se de alterações no contraste da imagem para solução.

Para validação da rotina de integração foi realizada contagem visual dos retângulos de algumas imagens e comparadas com o resultado da rotina, como exemplo pode-se citar o dia 19990107 que na contagem visual foi de 33 retângulos, já a rotina mostrou valores 30,6821 e 39,0524 sendo a média 34,86725. Ressalta-se novamente que a qualidade da imagem atrelada com a espessura do traço gera variação no valor de área maior e menor da rotina, porem na média o resultado é próximo ao real.

As tabelas 1 e 2 mostram de maneira resumida os resultados. A tabela 1 apresenta a quantidade de dados apurados por ano e a estatística para validação dos resultados. Pode-se perceber que na média perdeu-se 30 dias de dados por ano devido a borrões na fita, falta de tinta no marcador, falta de manutenção do operador, entre outros. Neste caso destaca-se o ano de 2007 com maior índice de perda de dados devido ao fato que o último trimestre foi utilizado uma fita de material grosseiro, a qual deixa o traço da caneta inadequado para a realização da rotina de integração. Total de perda de dados não ultrapassa 8% do total. Nota-se, também, pela tabela 1 que o teste estatístico, com significância de 95%, não se rejeita H_0 , logo se pode concluir que o modelo apresentado, para cada ano, adéqua-se aos dados amostrados.

A tabela 2 traz os valores dos coeficientes “a” e “b” para equação 1. Interessante reassaltar os valores de coeficientes de determinação que estão variam de 0,579 em 2004 até 0,840 em 2001, lembrando que quanto mais próximo de 1 mais explicativo é modelo. Analisando os gráficos apresentados nas figuras 6 a 14 pode-se perceber a distribuição dos dados, mostrando a variação maior em relação à linha de tendência de 2004 e a menor em 2001.

Tabela 1 - Resumo da Estatística de Kolmogorov-Smirnov

Ano	Volume de dados			Estatística		
	Esperados	Apurados	Perdidos	$D_{\text{máx}}$	D_n	$D_{\text{máx}} < D_n?$
1999	365	332	33	0,033	0,075	Não se rejeita H_0
2000	366	343	23	0,038	0,073	Não se rejeita H_0
2001	365	357	8	0,028	0,072	Não se rejeita H_0
2002	365	355	10	0,023	0,072	Não se rejeita H_0
2003	365	345	20	0,046	0,073	Não se rejeita H_0
2004	366	353	13	0,054	0,072	Não se rejeita H_0
2005	365	362	3	0,050	0,071	Não se rejeita H_0
2006	365	319	46	0,047	0,076	Não se rejeita H_0
2007	365	259	106	0,019	0,085	Não se rejeita H_0
Total	3287	3025	262			

Tabela 2 - Resumo dos coeficientes

Ano	a	b	R^2
1999	0,2809	0,3278	0,707
2000	0,2271	0,3855	0,826
2001	0,2302	0,3875	0,840
2002	0,2488	0,3647	0,795
2003	0,2632	0,3658	0,732
2004	0,2940	0,3261	0,579
2005	0,2755	0,3490	0,656
2006	0,2984	0,3418	0,745
2007	0,2774	0,3848	0,713
Média	0,2662	0,3592	-
GLOVER/MCCULLOCH	0,2687	0,5200	-

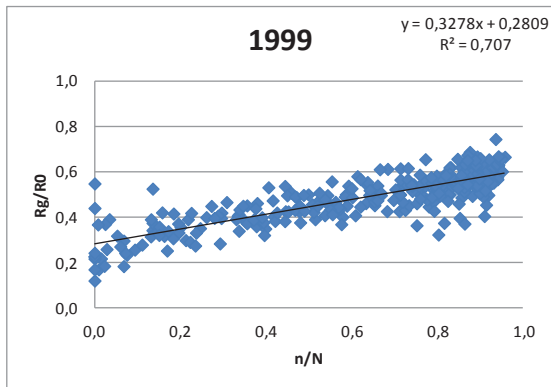


Figura 6 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 1999.

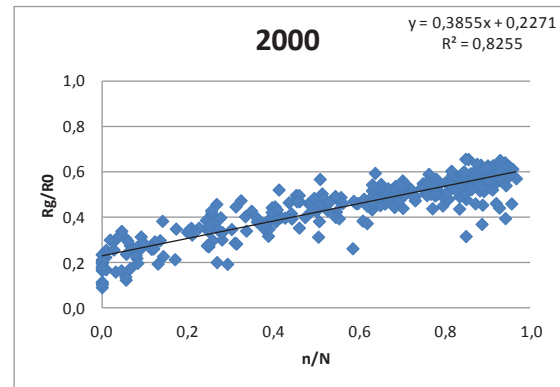


Figura 7 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2000.

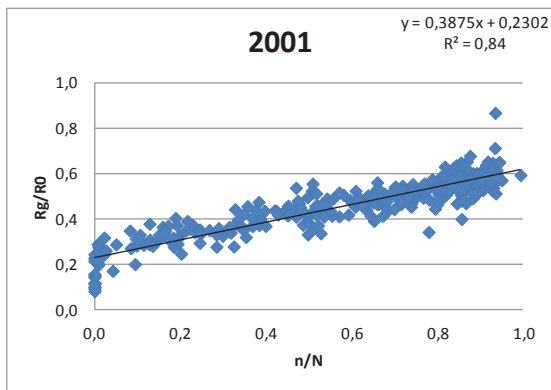


Figura 8 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2001.

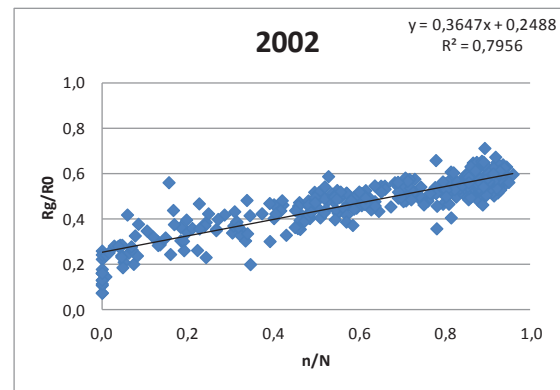


Figura 9 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2002.

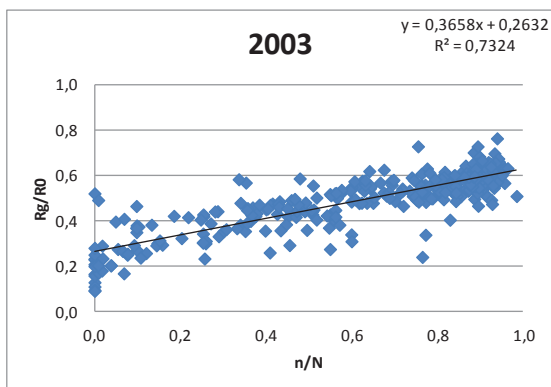


Figura 10 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2003.

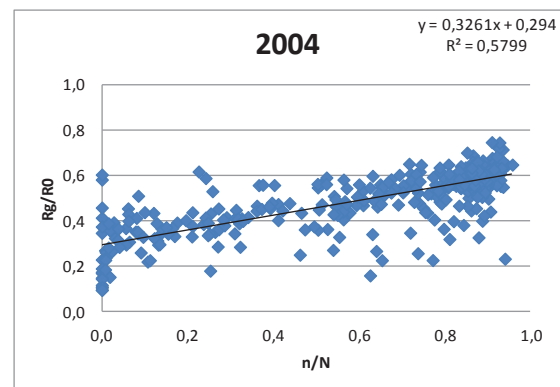


Figura 11 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2004.

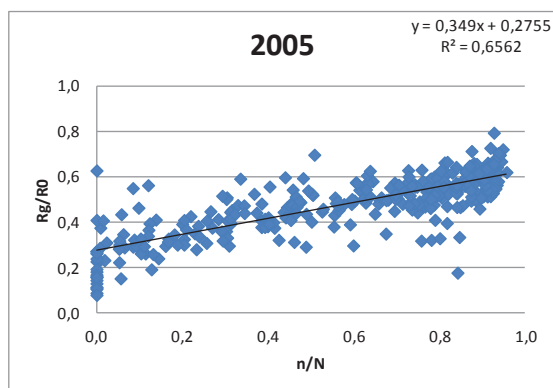


Figura 12 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2005.

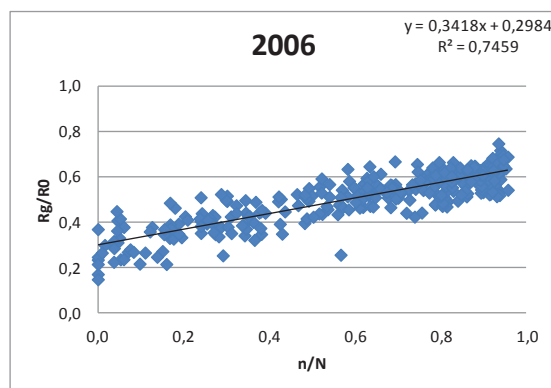


Figura 13 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2006.

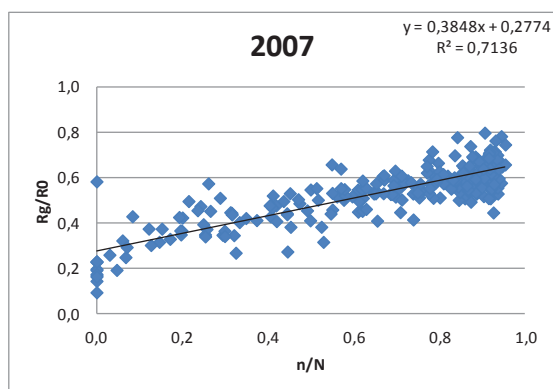


Figura 14 - Regressão linear entre a razão de radiação (R_g/R_0) e a razão de insolação (n/N), no ano 2007.

Em posse dos valores dos coeficientes “a” e “b” para cada ano foi realizado teste estatístico no software R para verificar se a média os representa bem. Testou-se a normalidade, obtendo-se resultado positivo em ambos os casos e aplicou-se o intervalo de confiança de 95% na média obtendo “a” $0,2662 \pm 0,0199$ e “b” $0,3592 \pm 0,0187$, notando que o valor do primeiro é semelhante à estimativa de GLOVER/MCCULLOCH, já o segundo tem-se diferença de 29%, salientando, com esta informação, a importância de estimativas regionais para aplicação em projetos de aproveitamento de energia solar.

A tabela 3 mostra valores pontuais dos dados, na qual se pode ver a variação de R_g tanto estimada, quanto a observada, e notam-se os valores extremos das razões de insolação e radiação, as quais são responsáveis por desvios do modelo. Pode-se perceber nos gráficos de regressão que há concentração de pontos de razão de insolação igual ou

próximo à zero, isto é explicado pelos dias nublados e que há chuva, assim a fita metálica do heliógrafo não é queimada pela concentração de raios, pois esta molhada ou úmida, logo estes valores ficam subestimados. Pode-se inferir que em média há disponibilidade de $16 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$, assim em um ano tem-se $5.840 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, valor este que pode ser utilizado para projetos de aproveitamento desta energia para a região de Presidente Prudente.

Tabela 3 - Valores consideráveis dos parâmetros

	Mínimo	Máximo	Média	Unidade
R _g (observado pelas rotinas de integração)	2,0127	28,7549	16,1143	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$
R _g (estimado pela equação 1)	6,3631	23,5759	16,1194	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$
R _g observado/R ₀	0,0741	0,8665	0,4892	Adm
n/N	0,0000	0,9929	0,6235	Adm

Outros trabalhos foram desenvolvidos neste sentido FUJITA 2003 e REIS 2008 para os mesmos dados deste projeto, porem utilizaram o princípio da vetorização das curvas, o que torna o processo de digitalização moroso, ressaltando que cada um contabilizou apenas um ano de dados. A tabela 4 mostra seus resultados, no caso de FUJITA 2003 percebe-se pouca diferença nos valores encontrados, mostrando assim que este procedimento implantado tem maior praticidade e chega a resultados muito próximos ao dos autores citados.

Tabela 4 - Comparação entre os autores

Autor	Ano dos dados	“a”	“b”
FUJITA 2003	2001	0,2165	0,3874
GALBETTI/DEMORI 2012	2001	0,2302	0,3875
REIS 2008	2004	0,1937	0,3923
GALBETTI/DEMORI 2012	2004	0,2940	0,3261
GALBETTI/DEMORI 2012	1999 a 2007	0,2662	0,3592

7. Conclusão

Estimativas de radiação solar global R_g são possíveis a nível nacional, porém para projetos específicos de aproveitamento desta energia se torna necessário a busca de parâmetros regionais, visto a grande variabilidade que ocorre em todo o território. Hoje é possível a obtenção de dados solarimétricos de forma digital, porém há series antigas em formato analógico.

É possível utilizar de softwares de tratamento e análises de imagens para transformação de dados analógicos, contidos em registros de gráficos de papel, para formato digital, quanto se visa à obtenção da área desta figura.

A fim de parâmetros para projetos de aproveitamento de energia solar, este levantamento concluiu que em média há disponibilidade de $5.840 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{ano}^{-1}$ para Presidente Prudente e região.

Por fim, pode-se concluir que a equação pode ser usada, no município de Presidente Prudente, para estimar a radiação solar global com confiança igual ou superior a 95% para qualquer dia do ano.

$$\frac{R_g}{R_0} = \left(0,2662 + 0,3592 \frac{n}{N} \right) \quad \text{Equação 13}$$

8. Referências Bibliográficas

AYOADE, J. O. *Introdução à climatologia para os trópicos*. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil, 1986.

CERVELLINI, A.; SALATI, E; GODOY, H. *Estimativa da distribuição da energia solar no Estado de São Paulo*. Bragantia, Campinas, v. 23, p. 31-39, 1966.

FUJITA, E. C., *Estimativa da radiação solar global em Presidente Prudente – SP: Ano de 2001*. Projeto de Iniciação Científica financiado pela FAPESP, FCT-UNESP, 2003.

GUIMARÃES, C. A. P. *Estimativas da radiação global no Brasil*. Informativo CRESEB, 2001.

HANSELMAM, D, LITTLEFIELD, B.; *Versão do Estudante MATLAB 5 – Guia do Usuário*, Makron Books, 1997.

NOGUEIRA, C.B.R.C., QUEIRÓS, R. M., ASSIS, V. S. *Avaliação de um método empírico para estimativa da radiação solar global – modelo de Allen*. Pelotas: Departamento de Meteorologia da Universidade Federal de Pelotas, 2000.

OMETTO, J. C. *Estudo das relações entre radiação solar global, radiação líquida, insolação*. 1968. 64 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

OMETTO, J. C. *Bioclimatologia Vegetal*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1981.

PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A.; ESCOBEDO, J.F.; OLIVEIRA, A. *Evaluation of the solar energy potential at surface in São Paulo, SP, Brazil*. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.6, p.99-104, 1998.

REIS, R. F., *Estimativa da Radiação Solar Global em Presidente Pudente-SP: Ano de 2004*, Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental, FCT-UNESP, 2008.

TUBELIS, A. *Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras*. São Paulo: Nobel, 1980.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. *Meteorologia básica e aplicações*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000.

Anexo 1 – Rotina “abreim” do MATLAB

%Function para abrir imagens

```
function y=abreim()  
[nome,caminho]=uigetfile({'*jpg;*bmp;*tif;*gif;*tiff;*pgm'});  
  
nome=[caminho nome]  
y=imread(nome);  
y=y(:,:,1:3);  
%figure,imshow(y)
```

Anexo 2 - Rotina “int” do MATLAB

```
%Clicar em 3 pontos do horário 04:00 hs em energia Zero, energia 0,5 e
%energia 1,5, que serão usados para o cálculo da parábola. O quarto
ponto
%será horário 12 hs e energia zero.
%Saídas:      y1=imagem com a grade corrigida
%              ymin=curva mínima
%              ymax=curva máxima
%              amin=número de quadrados abaixo da curva mínima
%              amax=número de quadrados abaixo da curva máxima
```

```
function [y1,ymin,ymax,amin,amax]=int(a)
```

```
a=a(:,:,1);
[m,n]=size(a);
y=zeros(m,n);
```

```
%Encontrando a, b, c para a parábola  $f(x)=ax^2+bx+c$ ; e um quarto ponto
%para definir a linha da energia zero.
```

```
figure,imshow(uint8(a))
[p,q]=ginput(4);
q4=round(q(4));
M=[q(1)^2 q(1) 1;q(2)^2 q(2) 1;q(3)^2 q(3) 1];
x=[p(1);p(2);p(3)];
M=inv(M);
x=M*x;
i=1:m;
z=x(1)*i.^2+x(2)*i+x(3)*ones(1,m);
```

```
z=ceil(z-p(1));
m1=min(z);
m2=max(z);
for j=abs(m1)+1:n-m2
    for i=1:m
        x(i)=a(i,j+z(i));
    end
    y(:,j)=x;
end
y1=y;
```

```
%Extraindo a curva principal:
y=y>90 & y<190;
y=y(1:round(q(4)),:);
p=round(p);
```

```
%Cálculo das curvas máximas e mínimas
[m,n]=size(y);
i=0;
while y(m,p(4)-i)==0
    i=i+1;
end
j=0;
while y(m,p(4)+j)==0
    j=j+1;
end
```

```
%Cálculo do ymin
```

```

ymin=zeros(1,n);
for k=p(4)-i:p(4)+j
r=1;
while y(m+1-r,k)==0 && r<m
r=r+1;
end
ymin(k)=r;
end

%Cálculo do ymax
ymax=zeros(1,n);
for k=p(4)-8-i:p(4)+8+j
r=200;
while y(r,k)==0 && r<m
r=r+1;
end
ymax(k)=r;
end
ymax(p(4)-8-i:p(4)+8+j)=abs(ymax(p(4)-8-i:p(4)+8+j)-m);

figure,imshow(y)
hold on
plot(-1*ymin+q4)
plot(-1*ymax+q4,'r')

%Cálculo da área
%Estamos utilizando 40 quadrados e os pontos clicados acima

area40=abs(q(2)-q(1))*abs(p(1)-p(4))/40;
amin=sum(ymin)/area40;
amax=sum(ymax)/area40;

```