

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

**AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS
CLÁSSICAS NA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR
GLOBAL NA ILHA DO FUNDÃO**

PATRÍCIA FRANKLIN CAFÉ

Rio de Janeiro

2008

PATRÍCIA FRANKLIN CAFÉ

**AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS
CLÁSSICAS NA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR
GLOBAL NA ILHA DO FUNDÃO**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada à Banca Examinadora da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Orientadora: Profa. D. Sc. Célia Maria Paiva

Rio de Janeiro

2008

PATRÍCIA FRANKLIN CAFÉ

**AVALIAÇÃO DAS EQUAÇÕES EMPÍRICAS
CLÁSSICAS NA ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR
GLOBAL NA ILHA DO FUNDÃO**

Monografia de Conclusão de Curso apresentada à Banca Examinadora da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharel em Meteorologia.

Data de aprovação: ___/___/___.

Banca Examinadora:

Profa. D. Sc. Célia Maria Paiva
Departamento de Meteorologia – IGEO - UFRJ

Prof. Ph D. Gutemberg Borges França
Departamento de Meteorologia – IGEO - UFRJ

M. Sc. Lázaro Costa Fernandes
Meteorologista

À minha mãe Helena e à minha irmã
Mariana pelo apoio incondicional. Eu
não sou nada sem vocês.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, por me deixar escolher o curso que eu queria e por me apoiar em todos os momentos de desespero, desânimo e sofrimento que eu passei nos últimos cinco anos.

À minha irmã, pela paciência, pela sinceridade e por todo apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao meu primo Leonardo, pelo incentivo e pelos conselhos.

Aos amigos de curso, que durante estes anos compartilharam comigo parte de suas vidas, sonhos, alegrias e tristezas.

À professora Célia, pelos conselhos e orientação.

Aos professores, por contribuírem para minha formação.

Aos funcionários da secretaria, que sempre se mostraram prontos a ajudar.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que esse momento se tornasse possível.

Obrigada!

RESUMO

Dados de radiação solar global (R_s) são escassos no Brasil. Em lugares onde a R_s não é medida diretamente, ela pode ser estimada por equações empíricas, entre elas, a equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940), a de Glover & McCulloch (1958) e a de Hargreaves (Allen et al., 1998). Essas equações foram criadas a partir de dados climáticos locais e devem ser testadas e calibradas para cada nova área de estudo. Em muitas situações, estas equações são usadas de forma pouco criteriosa, gerando estimativas de radiação incorretas e, conseqüentemente, comprometendo todos os resultados derivados desses dados. Este trabalho tem como objetivo avaliar as estimativas de R_s obtidas pelas equações de Angström-Prescott (Prescott, 1940), a de Glover & McCulloch (1958) e a de Hargreaves (Allen et al., 1998) para a Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro. Os resultados reportam que os erros de estimativa se elevam com o aumentam da nebulosidade.

ABSTRACT

Solar radiation (R_s) data are not always available in Brazil. Where R_s is not directly measured, it can be derived with the help of empirical equations, like: Angström-Prescott (Prescott, 1940), Glover & McCulloch (1958) and Hargreaves (Allen et al., 1998). These kinds of equations are developed based on local climatic data. Therefore, accurate results in different places depend on tests and calibrations for each locality. However, that doesn't always happen. These equations are often used with no criteria. As a consequence, they result in flawed radiation estimates. In this work, the purpose is to evaluate R_s estimates derived from Angström-Prescott (Prescott, 1940), Glover & McCulloch (1958) and Hargreaves (Allen et al., 1998) equations considering Ilha do Fundão, Rio de Janeiro. The results report that the error of estimate increase with cloudiness.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1. O problema	1
1.2. Escopo do trabalho	2
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 O Sol	3
2.1.1 <u>Descrição</u>	3
2.1.2 <u>A estrutura do Sol</u>	3
2.1.3 <u>Atividade solar</u>	8
2.2 Relações astronômicas Terra-Sol	11
2.2.1 <u>Distância Terra-Sol (r)</u>	11
2.2.2 <u>Declinação solar (δ)</u>	11
2.2.3 <u>Posição do Sol em relação a uma superfície horizontal</u>	13
2.3 Fundamentos da radiação eletromagnética	15
2.3.1 <u>Espectro eletromagnético</u>	15
2.3.2 <u>Ângulo sólido</u>	17
2.3.3 <u>Quantidades radiométricas básicas</u>	17
2.3.4 <u>Leis de radiação de corpos negros</u>	19
2.3.4.1 <i>Lei de Planck</i>	20
2.3.4.2 <i>Lei de Stefan-Boltzmann</i>	21
2.3.4.3 <i>Lei de Wien</i>	22
2.3.4.4 <i>Lei de Kirchhoff</i>	23
2.3.5 <u>Constante solar</u>	24
2.3.6 <u>Radiação solar extraterrestre</u>	24
2.3.7 <u>Espalhamento e absorção da radiação na atmosfera Terrestre</u>	25
2.3.8 <u>Balanco de radiação na superfície</u>	26
2.4. Utilização de equações empíricas para a estimativa da radiação solar global, relatos de casos	28
2.5. As equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves	30

CAPÍTULO 3 METODOLOGIA	32
3.1 Região de estudo	32
3.2 Dados disponíveis	32
3.3 Equações avaliadas	33
3.4 Avaliação de desempenho das equações empíricas	35
3.5 Calibração	37
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	38
4.1 Avaliação das equações em escala mensal	38
4.2 Avaliação das equações em escala anual	41
4.3 Avaliação das equações em diferentes condições de nebulosidade	44
4.4 Calibração	45
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Camadas do Sol.	4
Figura 2.2	Imagem da fotosfera.	5
Figura 2.3	Grânulos.	6
Figura 2.4	Manchas solares.	6
Figura 2.5	Cromosfera.	7
Figura 2.6	Corona.	7
Figura 2.7	Variação do número de manchas solares	8
Figura 2.8	Fáculas - regiões mais brilhantes.	9
Figura 2.9	Labaredas solares.	10
Figura 2.10	Protuberância.	10
Figura 2.11	Movimento da Terra em torno do Sol.	11
Figura 2.12	O caminho aparente do Sol e o ângulo de declinação solar na esfera celeste.	12
Figura 2.13	Esfera celeste e coordenadas do Sol em relação a um ponto na superfície terrestre.	13
Figura 2.14	Definição dos ângulos zenital, azimute e elevação solar.	14
Figura 2.15	Espectro eletromagnético.	16
Figura 2.16	Definição de ângulo sólido.	17
Figura 2.17	Modelo teórico de um corpo negro.	20
Figura 2.18	Intensidade de um corpo negro dada pela função de Planck para as temperaturas de 5000 K, 5500 K, 6000 K, 6500 K e 7000 K.	21
Figura 2.19	Variação anual da radiação extraterrestre no Equador e nas latitudes 20° e 40° norte e sul.	25
Figura 2.20	Padrão de espalhamento de luz visível de 0,5 μm por aerossóis esféricos de: (a) 10^{-4} μm ; (b) 0,1 μm e (c) 1 μm .	26
Figura 4.1	Média mensal da radiação solar global diária observada e estimada.	39
Figura 4.2	Erro Quadrático Médio Mensal obtidos pelas equações de Angström-PreScott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	39
Figura 4.3	Desvio Médio Mensal obtidos pelas equações de Angström-PreScott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	40
Figura 4.4	Erro Relativo Médio mensal obtido pelas equações de Angström-PreScott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	41

Figura 4.5	Erro Quadrático Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	42
Figura 4.6	Desvio Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	42
Figura 4.7	Erro Relativo Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	43
Figura 4.8	Índice de Concordância.	43
Figura 4.9	Índice de Desempenho.	44
Figura 4.10	ERM por razão de insolação obtidos pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.	45
Figura 4.11	Regressão Linear feita para a equação de Angström-Prescott.	46
Figura 4.12	Regressão Linear feita para a equação de Glover & McCulloch.	47
Figura 4.13	Regressão Linear feita para a equação de Hargreaves.	47
Figura 4.14	Médias mensais da radiação solar global diária medida e estimada pelas equações calibradas.	48
Figura 4.15	Erro Quadrático Médio Mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.	49
Figura 4.16	Desvio Médio Mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.	50
Figura 4.17	Erro Relativo Médio mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.	51
Figura 4.18	Erro Quadrático Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.	52
Figura 4.19	Erro Relativo Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa através do coeficiente c .	36
-------------------	--	----

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Sol é a estrela mais próxima da Terra. A sua energia radiante é praticamente a única fonte de energia do planeta. Ela influencia a circulação atmosférica e o clima. Além disso, a radiação solar exerce forte influência no desenvolvimento e no crescimento das plantas e dos animais e, conseqüentemente, em todos os processos e atividades relacionadas a estes.

A radiação solar interage com a atmosfera ao atravessá-la. Parte da radiação é espalhada ou absorvida por gases atmosféricos, nuvens e poeira (Allen et al., 1998). A radiação espalhada é denominada de radiação difusa, podendo atingir a superfície depois de sofrer múltiplos espalhamentos. No entanto, outra parte da radiação solar atinge a superfície sem sofrer alteração, sendo chamada de radiação direta. Pela soma dessas duas componentes tem-se a radiação solar global.

Como o ritmo da disponibilidade de energia de uma região é um dos determinantes do seu potencial de produtividade agrícola (Pereira et al, 2002), conhecer a quantidade de radiação solar global e a sua ação sobre o acúmulo de fitomassa possibilita determinar a potencialidade do uso de um ambiente de cultivo. Da mesma forma, possibilita a previsão de safras através do uso de modelos de estimativa de produtividade e a análise da eficiência energética de culturas, o que fornece subsídios para a adoção de técnicas de manejo que possam aumentar a produtividade das mesmas (Nonhebel, 1995 apud Costa, 2000).

A radiação solar global também é importante nos estudos de aproveitamento de energia. O desenvolvimento de um programa de pesquisa de energia solar deve sempre começar com um estudo de dados de radiação solar da região de interesse (Udo, 2002). É necessário ter conhecimentos precisos a respeito da disponibilidade da radiação solar global. Portanto, é necessário conhecer a radiação solar sob as condições climáticas locais (Ahmad et al, 2004).

1.1. O problema

A radiação solar pode ser medida com piranômetros. Esses instrumentos contêm um sensor instalado em uma superfície horizontal que mede a intensidade da radiação solar global, isto é, radiação direta e difusa. Nestes instrumentos, o sensor é frequentemente

protegido e mantido em uma atmosfera seca por um domo de vidro, que deve ser regularmente limpo (Allen et al., 1998).

Devido ao alto custo de aquisição e manutenção desses instrumentos, os dados de radiação solar global são escassos. Em lugares onde essa grandeza não é medida diretamente, ela pode ser estimada por parametrizações, ou equações empíricas, criadas a partir de dados climáticos locais. Para que tais equações obtenham resultados precisos fora de seu local de origem, elas devem ser testadas e calibradas para uma nova área de estudo. Entretanto, muitas vezes isso não acontece. Em muitas situações, as equações empíricas são usadas de forma pouco criteriosa, gerando estimativas de radiação incorretas e, conseqüentemente, comprometendo todos os resultados derivados desses dados. Não obstante, é importante ressaltar que essa prática em geral é conseqüência da falta de disponibilidade de dados para a realização de pesquisas, levando os cientistas a optarem por aproximações que nem sempre são adequadas. Uma forma de minimizar tal questão seria avaliar e calibrar tais equações empíricas para os diferentes climas do território brasileiro e relatar seus erros de estimativa para cada condição estudada. Assim, os pesquisadores poderiam optar por equações que apresentassem erros aceitáveis para suas aplicações ou na pior das hipóteses conhecer o erro dessas equações para a região estudada.

Nesse sentido, este trabalho pretende contribuir para o conhecimento dos erros de estimativa de algumas equações que estimam a radiação solar global. O objetivo é avaliar as estimativas dessa variável obtidas por equações empíricas para a Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro. Para tanto, foram escolhidas as seguintes equações: Angström-Prescott (Prescott, 1940), Glover & McCulloch (1958) e Hargreaves (Allen et al., 1998).

1.2. Escopo do trabalho

Este trabalho é dividido em quatro capítulos. O primeiro diz respeito à introdução, onde são abordadas as motivações e os objetivos desta monografia. O segundo capítulo é uma revisão da literatura sobre radiação solar. O terceiro capítulo é a metodologia utilizada neste trabalho. Neste capítulo, são apresentadas as três equações estudadas e os métodos estatísticos empregados para a análise de seus erros. No capítulo quatro, são apresentados os resultados, as conclusões e as recomendações deste estudo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Sol

2.1.1 Descrição

Segundo Liou (2002), o Sol é uma estrela típica de segunda geração na hierarquia cósmica, sendo composto principalmente de hidrogênio (H) e hélio (He). O seu raio tem cerca de $6,96 \times 10^5$ km, enquanto a sua massa aproximadamente $1,99 \times 10^{30}$ kg. A temperatura solar varia de aproximadamente 15×10^6 K no centro a 5800 K na superfície. Por sua vez, a sua densidade varia de aproximadamente 150 g.cm^{-3} no centro a $10^{-7} \text{ g.cm}^{-3}$ na superfície. Tanto a temperatura quanto a densidade são muito maiores no centro do que na superfície, de forma que, aproximadamente 90% da massa está contida na metade interna do raio solar.

A distância média do Sol à Terra é de $1,5 \times 10^8$ km. Ele está 300.000 vezes mais perto da Terra do que a segunda estrela mais próxima. Dessa forma, pode-se dizer que o Sol é a única fonte de energia da Terra.

2.1.2 A Estrutura do Sol

O Sol pode ser dividido em camadas, como mostra a Figura 2.1. O seu interior pode ser dividido em núcleo, zona radiativa e zona de convecção, enquanto a sua superfície consiste na fotosfera e a sua atmosfera em cromosfera e coroa.

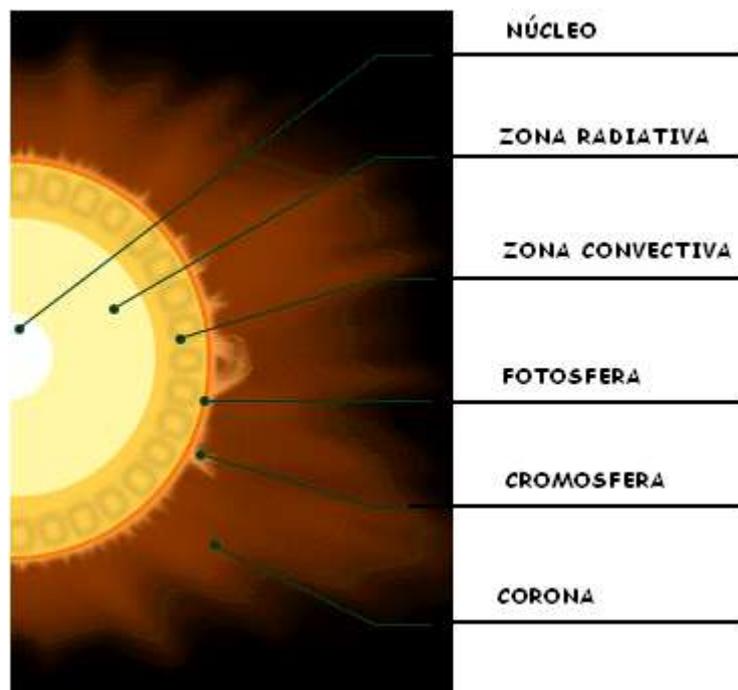


Figura 2.1: Camadas do Sol.
(Adaptado de Transition Region And Coronal Explorer, 2007)

O núcleo do Sol é onde ocorre a geração de energia. Esse processo é realizado através da fusão de hidrogênio em hélio a temperaturas de quinze milhões de Kelvin. A quantidade de energia liberada nessas reações provoca a redução da massa solar. Estima-se que o Sol irradia quase 5 milhões de toneladas de massa por segundo como energia eletromagnética (Liou, 2002).

A zona radiativa é a parte mais espessa do Sol. Ela ocupa cerca de 70% do diâmetro solar, se estendendo do núcleo à zona convectiva. A característica mais importante dessa camada é a forma como a energia é transportada. A energia gerada no núcleo atravessa essa camada na forma de radiação eletromagnética, ou seja, na forma de um fluxo de fótons (Liou, 2002). A densidade na zona radiativa cai de 20 g.cm^{-3} para 0.2 g.cm^{-3} da parte mais interna para a mais externa. Da mesma forma, a temperatura decresce de $7,0 \times 10^6 \text{ K}$ a $2,0 \times 10^6 \text{ K}$ (Nasa/Marshall Solar Physics, 2007).

A zona convectiva é a região onde ocorre o transporte por convecção da energia que será dissipada na fotosfera. Essa região se estende da zona radiativa até a fotosfera, ou seja, de uma profundidade de aproximadamente 150.000 km até a superfície do Sol (Liou, 2002). Na região mais profunda da zona convectiva a temperatura é de cerca de $2,0 \times 10^6 \text{ K}$, enquanto na região mais próxima à superfície a temperatura é de cerca de 5700 K e a densidade é de apenas $0,0000002 \text{ g.cm}^{-3}$ (Nasa/Marshall Solar Physics, 2007).

A fotosfera, também chamada de superfície solar, é a região visível do Sol (Figura 2.2). Essa camada constitui não apenas a fonte da radiação solar visível como também é a origem da maior parte da energia eletromagnética que atinge a Terra. A fotosfera é uma camada relativamente fina de cerca de 500 km de espessura. A temperatura nesta camada varia de cerca de 8000 K na parte mais interna a cerca de 4000 K na parte mais externa, sendo a temperatura média de aproximadamente 5800 K. A fotosfera não é uniforme. Ela é coberta por áreas chamadas de grânulos e regiões chamadas de manchas solares (Figuras 2.3 e 2.4). Os grânulos são regiões associadas com as correntes quentes ascendentes do topo da zona convectiva. Eles têm cerca de 1500 km em diâmetro e são bem distribuídos no disco solar. Já as manchas solares são regiões relativamente mais frias da fotosfera, com temperatura em torno de 4.000 K. Elas se destacam na fotosfera por sua aparência mais escura e, em média, se estendem por 10.000 km. No entanto, podem variar de regiões quase imperceptíveis a regiões que se estendem por mais de 150.000 km. Dependendo do seu tamanho, elas podem durar de alguns dias a várias semanas.



Figura 2.2: Imagem da fotosfera.
(Fonte: Nasa Sun Earth Media Viewer, 2007)

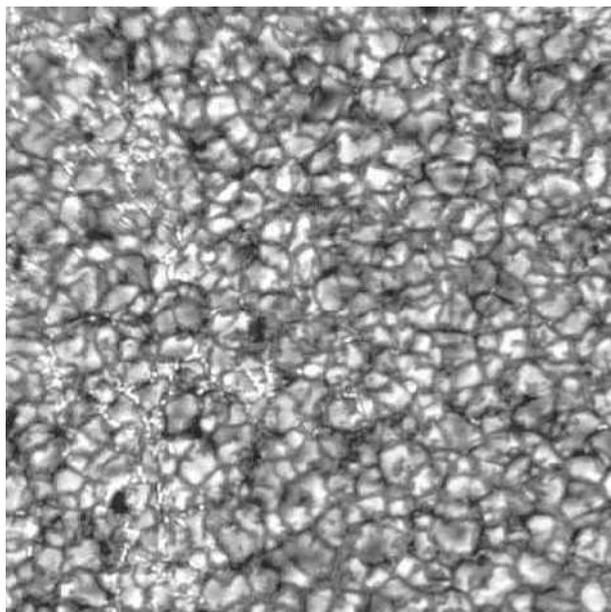


Figura 2.3: Grânulos. (Scharmer, 2003)

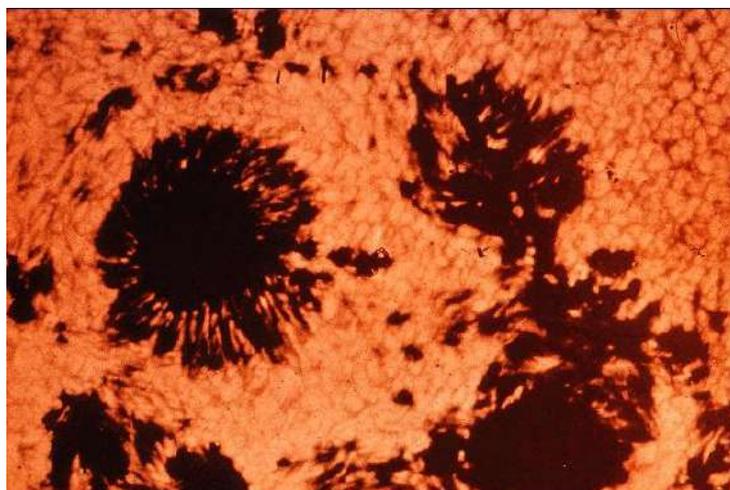


Figura 2.4: Manchas solares.

(Fonte: European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere, 2007)

A porção inferior da atmosfera solar é chamada de cromosfera. Essa camada é transparente e é encontrada acima da fotosfera até uma altura de aproximadamente 2000 km. Na cromosfera, a temperatura aumenta de 4.000 K para cerca de 400.000 K. Essa camada é visível na luz monocromática de átomos de hidrogênio, ou seja, na luz H-alfa (European Organisation for Astronomical Research in the Southern Hemisphere - ESO, 2007). Nessas temperaturas, o hidrogênio emite luz em um tom avermelhado, o que pode ser observado durante eclipses totais (Figura 2.5). Vários fenômenos podem ser observados na cromosfera, entre eles estão as protuberâncias e as labaredas solares.



Figura 2.5: Cromosfera. (Fonte: ESO, 2007)

Acima da cromosfera fica a corona, uma camada que se estende do disco solar até muitos milhões de quilômetros. Essa camada é visível como um halo esbranquiçado durante eclipses totais (Figura 2.6). A temperatura nesta camada chega a 10^6 K. É da corona que saem os ventos solares, jatos de gás que fluem continuamente do Sol para o sistema solar.

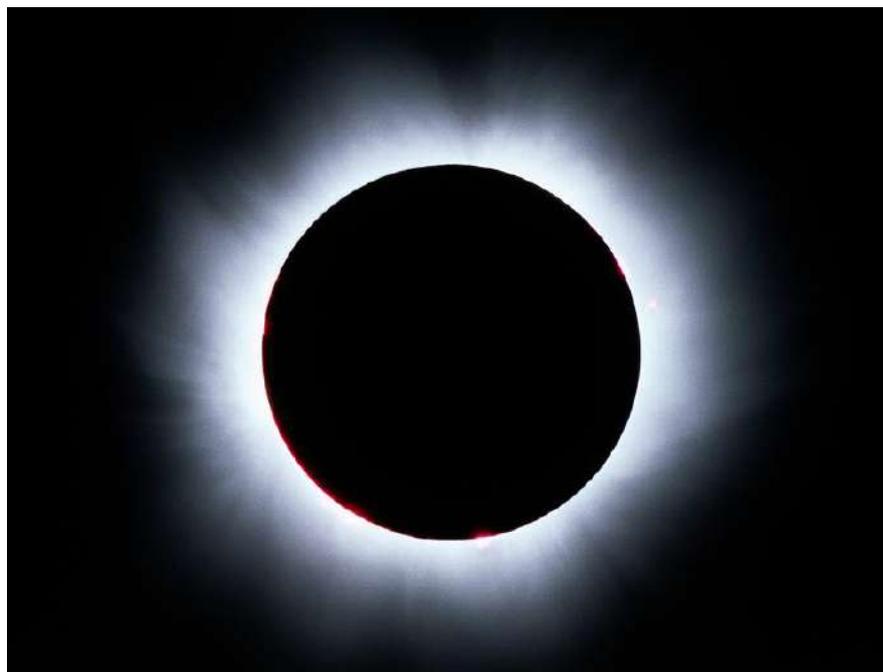


Figura 2.6: Corona. (Duhoux, 1999)

2.1.3 Atividade solar

Entre os fenômenos que ocorrem na superfície do Sol, as manchas solares são as mais observadas. Elas têm grande influência em fenômenos geofísicos e processos atmosféricos. O número médio de manchas solares em um período é muito variável. Em alguns períodos aparecem muitas manchas solares, enquanto em outros elas quase não aparecem. São períodos em que a ocorrência de manchas solares é máxima e mínima, respectivamente. Essa variação é periódica, como mostra a Figura 2.7. A cada onze anos, aproximadamente, o número de manchas solares atinge um máximo. Essa variação é chamada de ciclo das manchas solares. Nos anos de máxima incidência de manchas solares observam-se explosões de partículas e radiação com frequência, o que não ocorre nos anos de mínima incidência de manchas solares.

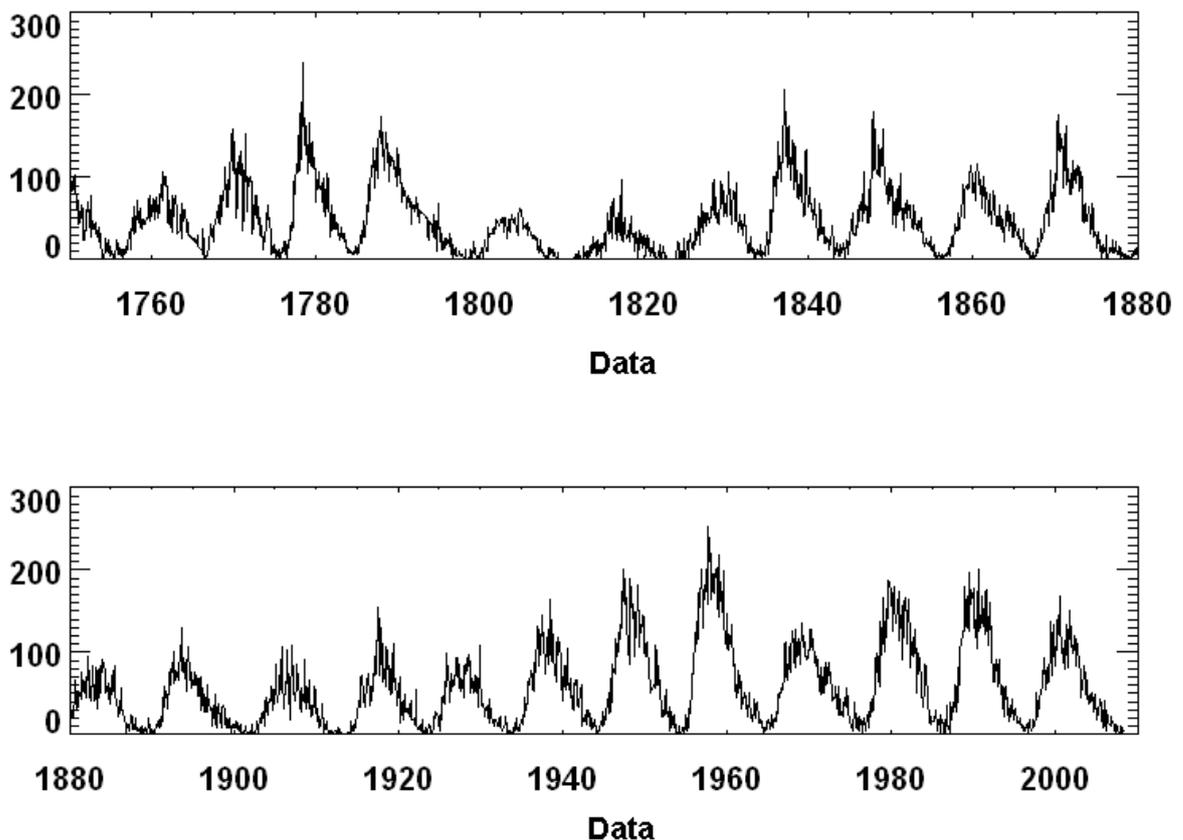


Figura 2.7: Variação do número de manchas solares.
(Adaptado de NASA/MARSHALL SOLAR PHYSICS, 2008)

Outros fenômenos ocorrem na superfície solar, tais como o aparecimento de fáculas, labaredas solares e protuberâncias (Figuras 2.8, 2.9 e 2.10). As fáculas são áreas brilhantes na superfície do Sol. Elas são observadas com mais facilidade na borda do disco solar. Assim como as manchas solares, elas também estão associadas a um campo magnético, porém mais fraco que o das manchas solares. Além disso, elas se estendem sobre áreas maiores do disco solar e duram mais do que as manchas solares. Durante o ciclo de manchas solares, as fáculas fazem o Sol parecer mais brilhante no período de máxima ocorrência de manchas solares do que no período de mínima.

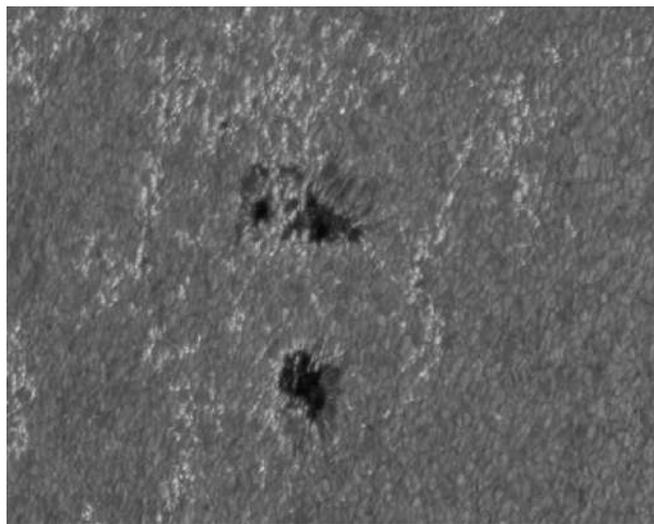


Figura 2.8: Fáculas - regiões mais brilhantes.
(Fonte: Nasa/Marshall Solar Physics, 2007)

Labaredas solares (Figura 2.9) são grandes explosões que ocorrem na superfície do Sol nas proximidades de manchas solares. Essas labaredas liberam energia de muitas formas, como energia eletromagnética de raios gama e raios x, partículas de energia (prótons e elétrons) e fluxos de massa (Nasa/Marshall Solar Physics, 2007). A energia liberada por elas é capaz de provocar interferências nas comunicações de rádio e variações no campo magnético da Terra.

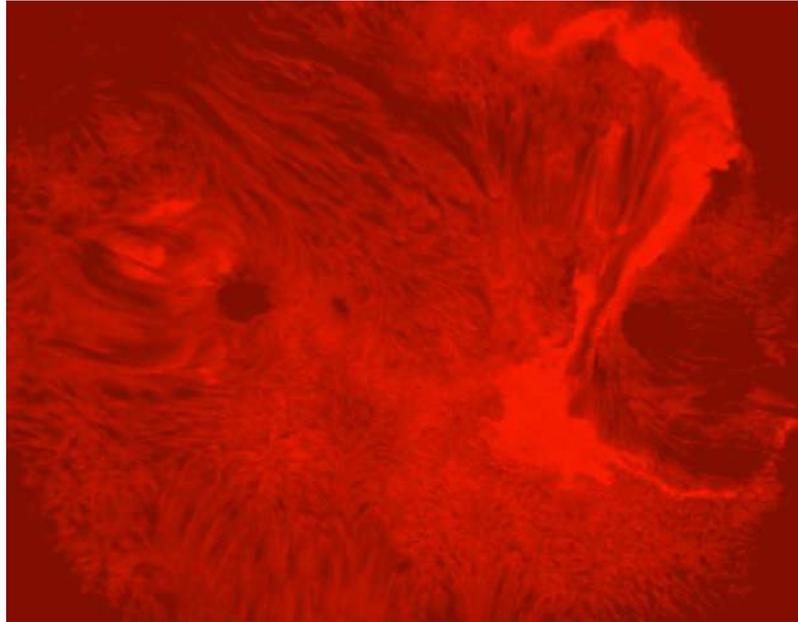


Figura 2.9: Labaredas solares. (Fonte: ESO, 2007)

As protuberâncias (Figura 2.10) são nuvens densas de material suspenso acima da superfície do Sol (Nasa/Marshall Solar Physics, 2007). Elas são formadas por erupções na fotosfera e se estendem pela cromosfera, podendo ser observadas na borda do disco solar. No entanto, quando vistas projetadas no disco solar em imagens H-alfa, são chamadas de filamentos. As protuberâncias, em geral, têm cerca de 30.000 km de altura, 200.000 km de comprimento e 5.000 K de temperatura.

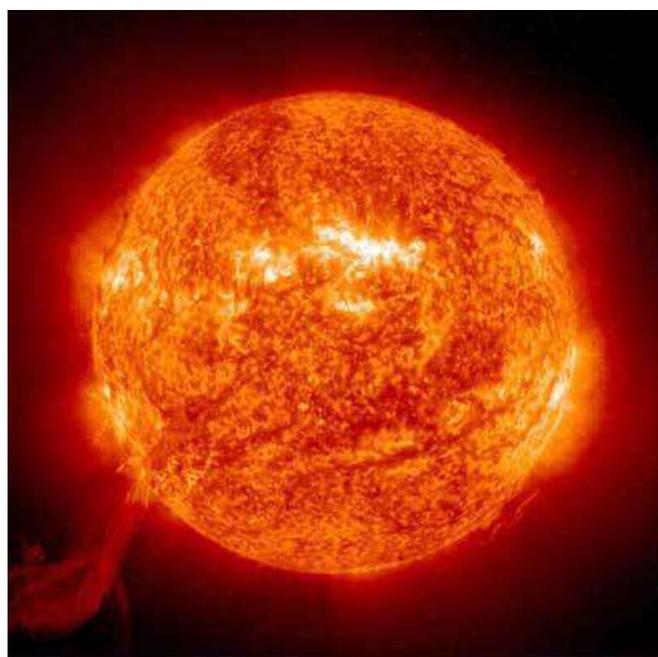


Figura 2.10: Protuberância. (Fonte: ESO, 2007)

2.2 Relações astronômicas Terra-Sol

2.2.1 Distância Terra-Sol (r)

A Terra gira em torno do Sol em uma órbita elíptica com o Sol em um dos focos (Figura 2.11). Esse movimento, que leva aproximadamente 365 dias para completar uma volta, provoca a variação da distância entre a Terra e o Sol ao longo do ano. Como a quantidade de radiação solar que atinge a Terra é inversamente proporcional à distância entre a Terra e o Sol, é importante saber o valor preciso dessa distância.

A distância média entre a Terra e o Sol (r_0) é chamada de uma unidade astronômica: $1\text{UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$. A distância mínima entre a Terra e o Sol, chamada de periélio, é de cerca de 0,983 UA enquanto a distância máxima, chamada de afélio, é de cerca de 1,017 UA. A Terra passa pelo periélio por volta do dia 3 de janeiro, pelo afélio por volta do dia 4 de julho e pela distância média nos dias 4 de abril e 5 de outubro.

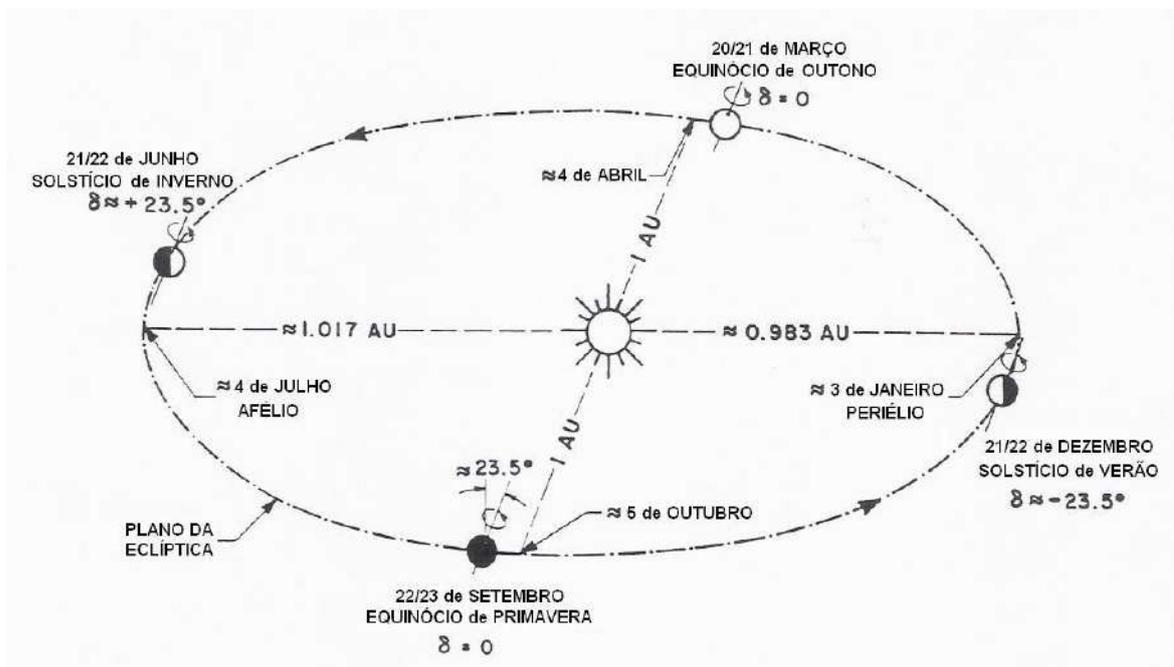


Figura 2.11: Movimento da Terra em torno do Sol. (Adaptado de Iqbal, 1983)

2.2.2 Declinação solar (δ)

Simultaneamente ao movimento em torno do Sol, a cada 24 horas, a Terra completa uma volta em torno do seu próprio eixo em um movimento contínuo para leste. Este eixo é

chamado de eixo polar e tem inclinação de $23,5^\circ$ em relação à reta normal ao plano da eclíptica, que é o plano da órbita da Terra em torno do Sol.

Assim como o deslocamento da Terra em torno do Sol, a sua rotação em torno do eixo polar também é muito importante na determinação da quantidade de radiação solar que chega à superfície. O movimento de rotação da Terra em torno do eixo polar é responsável por variações diurnas na radiação incidente na superfície, pois provoca a exposição de diferentes partes da Terra ao Sol, resultando, assim, na determinação dos dias e das noites. Além disso, a inclinação do eixo polar em relação ao plano da eclíptica provoca variações sazonais na radiação solar, ou seja, resulta na determinação das estações do ano.

O ângulo entre o plano da eclíptica e o plano equatorial é chamado de declinação solar (Figura 2.12). Esse ângulo indica a distância angular do Sol ao equador. Como a Terra está constantemente em movimento em relação ao Sol, esse ângulo muda o tempo todo. A declinação solar é positiva quando o Sol está ao norte do equador e negativo quando ao sul. A declinação solar é zero nos equinócios, aproximadamente $+23,5^\circ$ no solstício de inverno e aproximadamente $-23,5^\circ$ no solstício de verão no hemisfério sul.

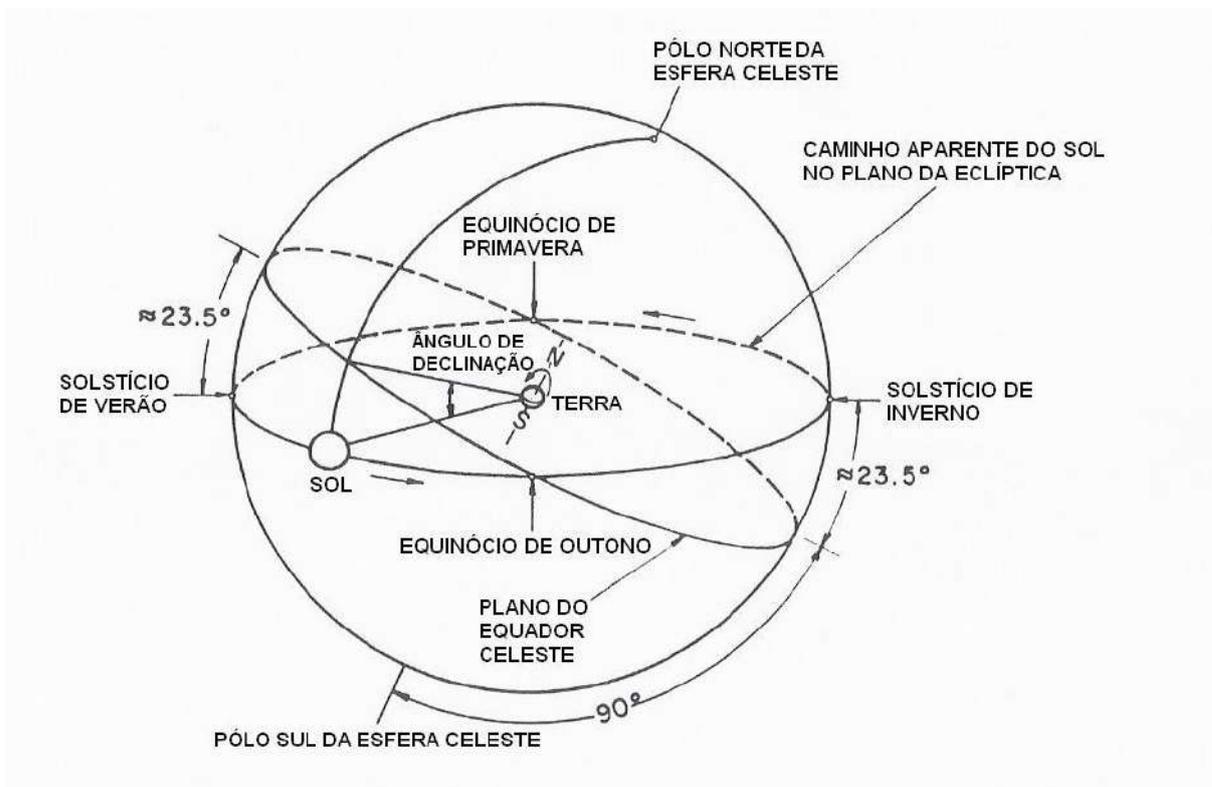


Figura 2.12: O caminho aparente do Sol e o ângulo de declinação solar na esfera celeste. (Adaptado de Iqbal, 1983)

2.2.3 Posição do Sol em relação a uma superfície horizontal

A posição do Sol em relação à superfície da Terra é essencial no cálculo da radiação solar nela incidente. Dessa forma, é necessário conhecer as relações trigonométricas que a determinam.

Uma forma de fazer isso é considerando uma esfera celeste com a Terra em seu centro, como na Figura 2.13. Nesta esfera imaginária, os pólos celestes são definidos pelo prolongamento do eixo polar da Terra, enquanto o equador celeste é definido pelo prolongamento do plano equatorial terrestre. A posição de um ponto na superfície da Terra é representada na esfera celeste pelo zênite local, que é determinado pela intersecção da reta normal à superfície neste ponto com a própria esfera celeste. O ponto da esfera celeste oposto ao zênite local é chamado de nadir local e o eixo que os une é normal ao plano do horizonte celeste, que passa pelo centro da Terra.

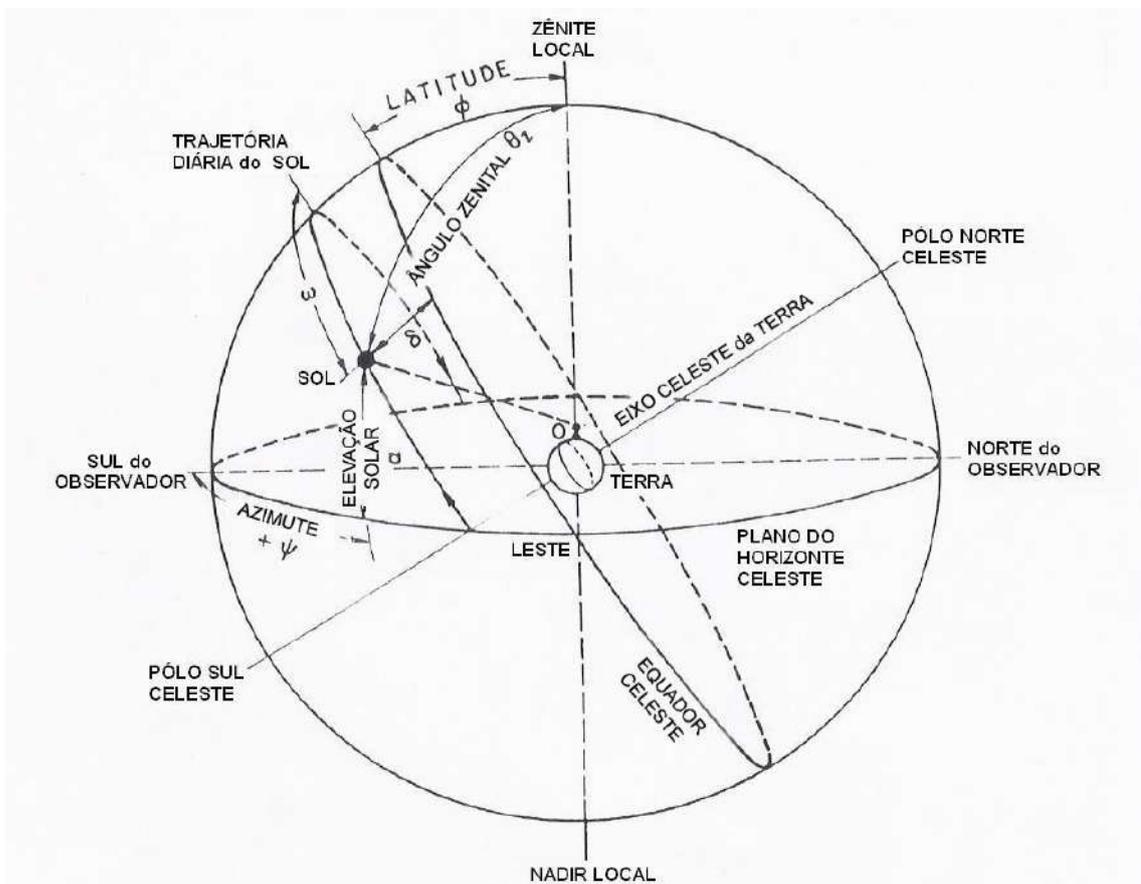


Figura 2.13: Esfera celeste e coordenadas do Sol em relação a um ponto na superfície terrestre. (Adaptado de Iqbal, 1983)

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha \quad \text{Eq. 2.1}$$

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde θ_z é o ângulo zenital, δ é a declinação solar, ϕ é a latitude, ω é o ângulo horário, α é a elevação solar e ψ é o azimute solar.

Através da Equação 2.1, pode-se encontrar o ângulo horário correspondente ao nascer do Sol. Como ao nascer do Sol $\theta_z = 90^\circ$, o resultado é:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad \text{Eq. 2.3}$$

Como o ângulo horário do nascer do Sol é igual em módulo ao ângulo horário do pôr do Sol, pode-se concluir que a duração astronômica do dia (N) equivale a $2\omega_s$. Assim, o comprimento do dia expresso em horas é:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad \text{Eq. 2.4}$$

2.3 Fundamentos da radiação eletromagnética

2.3.1 Espectro eletromagnético

A radiação eletromagnética é o principal processo responsável pela transferência de energia na atmosfera. Ela pode ser emitida pela matéria por agitação molecular e atômica, viajando na forma de onda na velocidade da luz (c). Sua classificação pode ser feita por comprimento de onda (λ), frequência (ν) ou número de onda (η). A distribuição da radiação eletromagnética é chamada de espectro eletromagnético. Este é formado pela luz visível, raios ultravioleta, raios gama, raios-x, radiação infravermelha, microondas, sinais de televisão e ondas de rádio. (Figura 2.15)

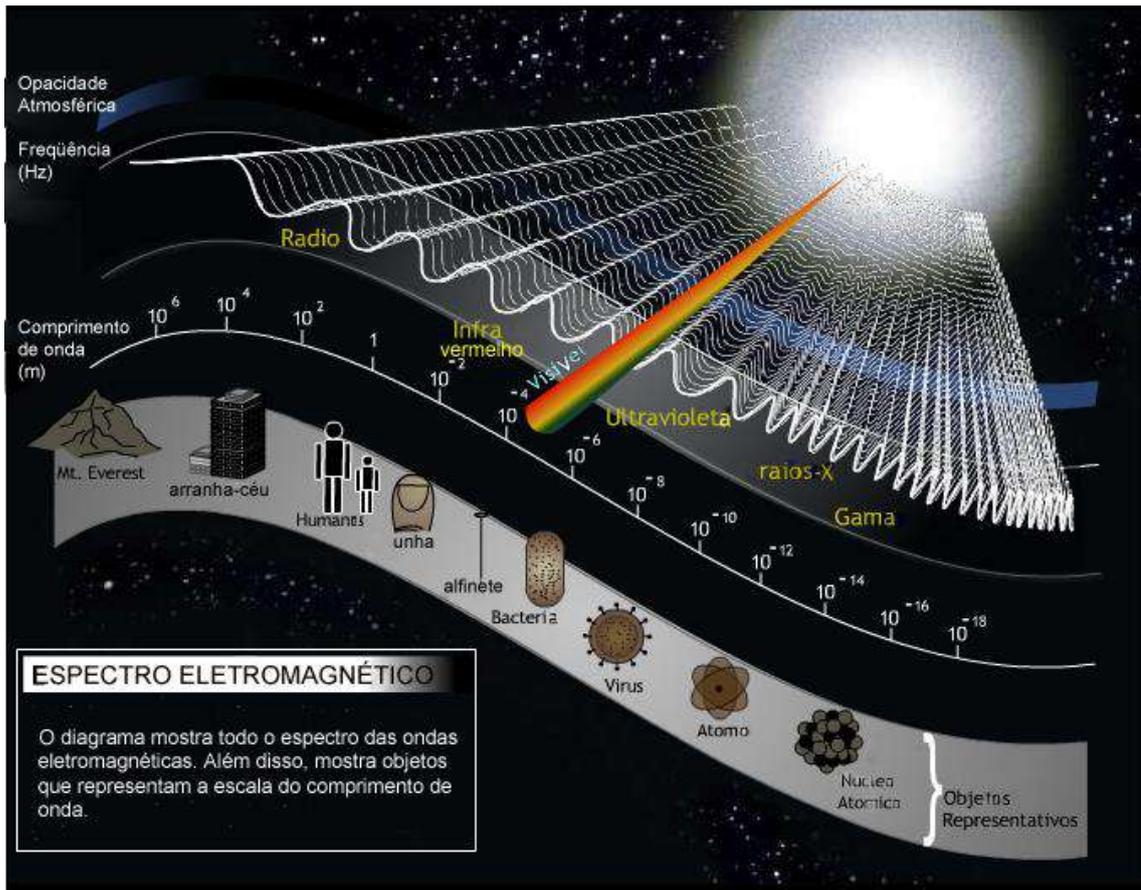


Figura 2.15: Espectro eletromagnético. (Adaptado de Nasa Sun Earth Media Viewer, 2007)

A luz visível fica na região do espectro onde as ondas eletromagnéticas possuem frequências entre $4,3 \times 10^{14}$ Hz e $7,5 \times 10^{14}$ Hz. Assim, a região do visível pode ser subdividida em faixas que correspondem às cores: violeta, anil, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho.

Nas frequências maiores do que $7,5 \times 10^{14}$ Hz estão as regiões dos raios ultravioleta, raios x e raios gama. A região dos raios ultravioleta é adjacente à região da luz visível no espectro eletromagnético. Esta região do espectro eletromagnético pode ser subdividida em ultravioleta próximo, ultravioleta distante e ultravioleta extremo. Ao lado da região do ultravioleta fica a região dos raios x. Os raios x têm frequências que variam de aproximadamente 3×10^{16} Hz a 3×10^{18} Hz e são menores apenas que as frequências da região dos raios gama, que são maiores que 3×10^{19} Hz.

As ondas eletromagnéticas que possuem frequências entre 3×10^{12} Hz e $4,3 \times 10^{14}$ Hz são chamadas de radiação infravermelha. Essa região pode ser subdividida em infravermelho próximo, que fica mais perto da luz visível, e infravermelho distante. Em seguida ficam as

microondas, que têm entre 3×10^{10} Hz e 3×10^{12} Hz, e as ondas de rádio, que têm frequências menores do que 3×10^5 Hz e são as menores do espectro eletromagnético.

No que diz respeito à transferência de energia na atmosfera, a região mais importante do espectro eletromagnético fica entre o ultravioleta próximo e as microondas.

2.3.2 Ângulo sólido

O ângulo sólido é a razão entre a área de uma superfície esférica e seu raio ao quadrado (Figura 2.16), o que pode ser expresso como:

$$\Omega = \frac{\sigma}{r^2} \quad \text{Eq. 2.5}$$

onde σ é a área da superfície, r é o raio e Ω é o ângulo sólido em unidades de esterorradiano (sr).

Esse ângulo é usado para descrever a propagação de energia radiante em uma determinada direção.

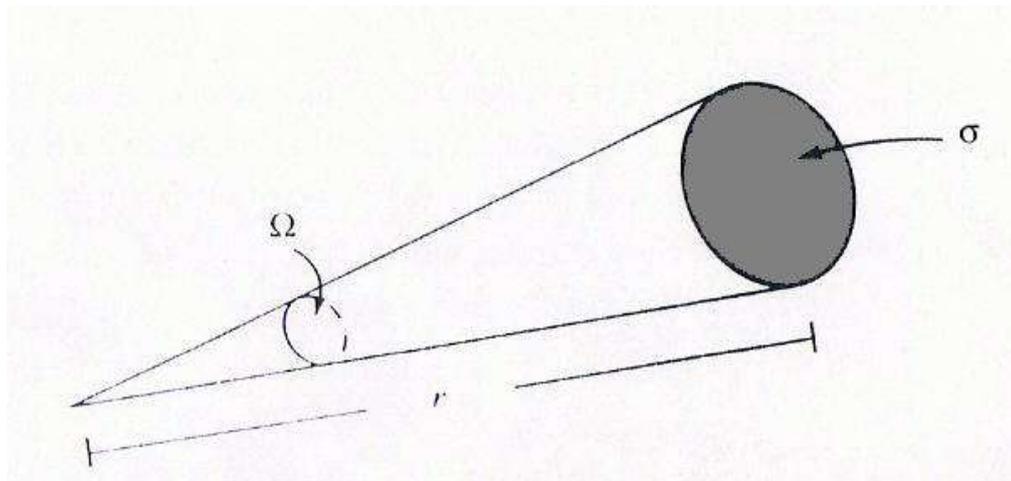


Figura 2.16: Definição de ângulo sólido. (Adaptado de Liou, 2002)

2.3.3 Quantidades radiométricas básicas

A razão da propagação de energia em uma determinada direção é dada pela intensidade de radiação. Esta definição se aplica aos corpos negros e às superfícies reais na propagação de energia emitida, refletida ou incidente. A intensidade pode ser espectral ou

total, ou seja, limitada em uma faixa de comprimento de onda ou englobando todo o espectro eletromagnético.

A intensidade monocromática ou radiância I_λ é a energia radiante em um determinado intervalo de comprimento de onda que cruza um elemento de área em um intervalo de tempo em direções confinadas em um ângulo sólido. Ela é, portanto, uma grandeza direcional, em $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{sr}^{-1}$. Desta forma, a intensidade monocromática pode ser expressa como:

$$I_\lambda = \frac{dE_\lambda}{\cos\theta d\Omega d\lambda dt dA} \quad \text{Eq. 2.6}$$

onde: dE_λ é a quantidade de energia radiante diferencial, $(\cos\theta.dA)$ corresponde a área na qual a energia efetivamente é interceptada, $d\Omega$ é o ângulo sólido diferencial, $d\lambda$ é o comprimento de onda diferencial e dt é o intervalo de tempo.

A componente normal de I_λ pode ser integrada por todo o ângulo sólido hemisférico. O resultado é chamado de densidade de fluxo monocromático ou irradiância monocromática F_λ . Esta representa a radiação que atravessa a superfície hemisférica inteira, em $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$. Dessa forma:

$$F_\lambda = \int_{\Omega} I_\lambda \cos\theta d\Omega \quad \text{Eq. 2.7}$$

Quando a intensidade é independente da direção, ela é chamada de isotrópica. Nesse caso, a irradiância monocromática é definida como:

$$F_\lambda = \pi I_\lambda \quad \text{Eq. 2.8}$$

A irradiância monocromática corresponde apenas a uma faixa de comprimento de onda. A quantidade que representa a energia por tempo e por área em todos os comprimentos de onda é a densidade de fluxo ou irradiância total, em Wm^{-2} . Ela é obtida integrando-se a irradiância monocromática por todo o espectro eletromagnético:

$$F = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda \quad \text{Eq. 2.9}$$

O fluxo total W ou potência radiante, em Watts, é a energia por tempo. É definido como:

$$W = \int_A F dA \quad \text{Eq. 2.10}$$

2.3.4 Leis de radiação de corpos negros

Segundo Iqbal (1983), um corpo negro é uma superfície ideal que, em uma dada temperatura, emite o máximo de energia em cada comprimento de onda em todas as direções, além de absorver toda radiação incidente em cada comprimento de onda em todas as direções.

A teoria do corpo negro pode ser entendida através do modelo ilustrado na Figura 2.17. Esse modelo se baseia na idéia de uma cavidade aberta apenas por um orifício pequeno o suficiente para permitir que um fluxo de radiação entre e fique preso em sua quase totalidade. Ao entrar nessa cavidade, um fluxo de radiação sofreria repetidas reflexões até ser totalmente absorvido, em um processo independente das características da parede da cavidade. No entanto, simultaneamente ao processo de absorção desse fluxo, a parede também emitiria radiação em todas as direções, de forma que o fluxo emitido por ela também sofreria diversas reflexões. Isso faria com que o fluxo dentro da cavidade variasse em intensidade. Ele ficaria mais fraco quando absorvido pela parede, mas, ao mesmo tempo, novas emissões o tornariam mais forte, o que duraria até que uma condição de equilíbrio fosse atingida.

Vale ressaltar que os corpos negros são usados como modelos de comparação com corpos reais. Dessa forma, as leis da radiação de corpos negros são importantes na compreensão dos processos de emissão e absorção.

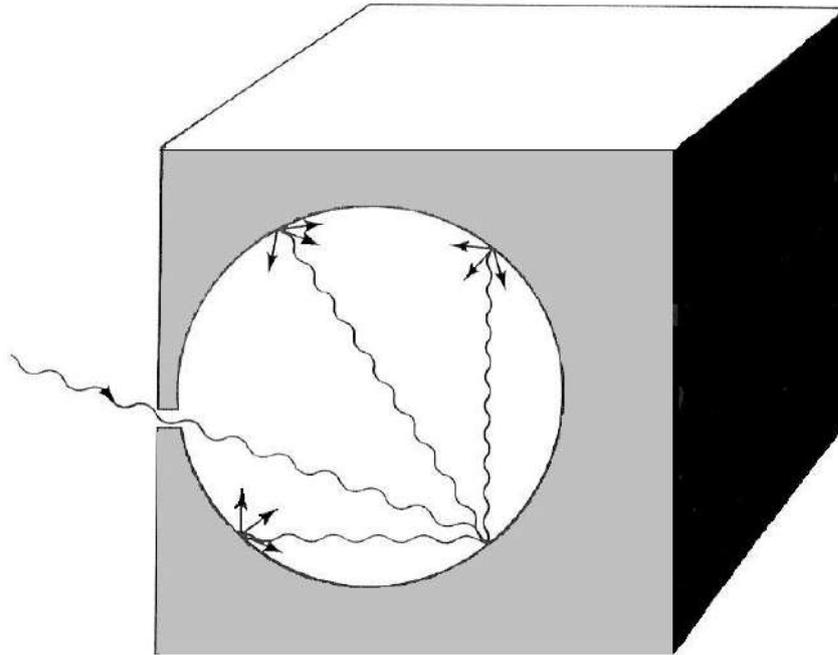


Figura 2.17: Modelo teórico de um corpo negro.
(Adaptado de Liou, 2002)

2.3.4.1 Lei de Planck

A lei de Planck relaciona a intensidade monocromática de radiação $B_\nu(T)$ emitida por um corpo negro a uma determinada temperatura, em unidades de energia por área, por tempo, por esterorradiano e por frequência é:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/KT} - 1)} \quad \text{Eq. 2.11}$$

onde h é a constante de Planck (igual a $6,626 \times 10^{-34}$ J s), ν é a frequência, K é a constante de Boltzmann (igual a $1,3806 \times 10^{-23}$ J K⁻¹), c é a velocidade da luz e T é a temperatura absoluta.

Como o comprimento de onda (λ) está relacionado com a frequência pela relação $\lambda = c/\nu$, a Equação 11 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5(e^{hc/KT\lambda} - 1)} = \frac{C_1\lambda^{-5}}{\pi(e^{C_2/\lambda T} - 1)} \quad \text{Eq. 2.12}$$

onde $C_1 = 2\pi hc^2$ e $C_2 = hc/K$.

A análise de curvas de $B_{\lambda}(T)$ para diferentes temperaturas, como a Figura 2.18, permite concluir que com o aumento da temperatura, a intensidade de radiação de um corpo negro aumenta em todos os comprimentos de onda. Além disso, o aumento da temperatura corresponde à diminuição do comprimento de onda da intensidade máxima, o que significa que a emissão de energia é maior em ondas curtas.

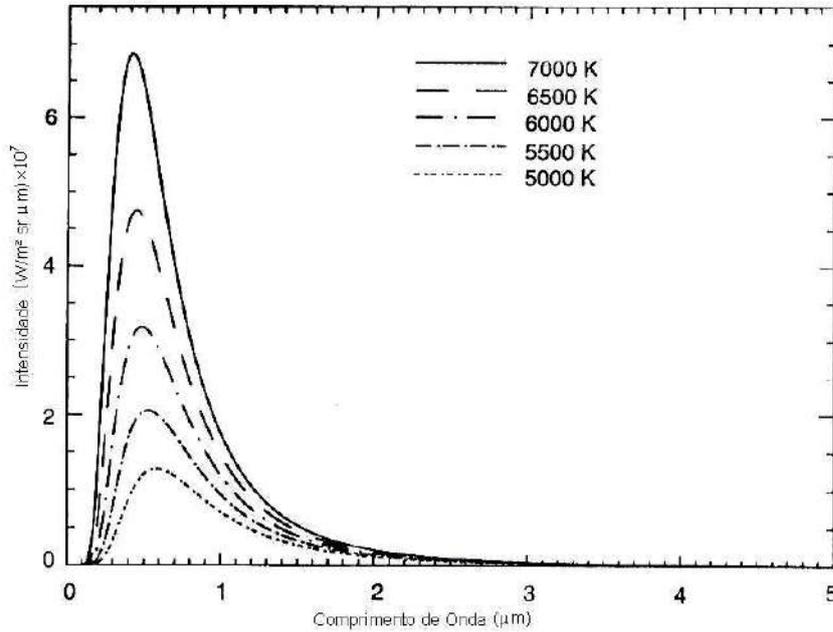


Figura 2.18: Intensidade de um corpo negro dada pela função de Planck para as temperaturas de 5000 K, 5500 K, 6000 K, 6500 K e 7000 K. (Adaptado de Liou, 2002)

2.3.4.2 Lei de Stefan-Boltzmann

A lei de Stefan-Boltzmann define que a irradiância emitida por um corpo negro é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta.

Para encontrar essa relação, primeiro é necessário encontrar a intensidade de radiação total de um corpo negro, o que é feito através da integração da lei de Planck por todos os comprimentos de onda, de 0 a ∞ . Portanto:

$$B(T) = \int_0^{\infty} B_{\lambda}(T) d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{(e^{hc/KT\lambda} - 1)} d\lambda \quad \text{Eq. 2.13}$$

O resultado desta integração é:

$$B(T) = bT^4 \quad \text{Eq. 2.14}$$

onde $b = \frac{2\pi^4 K^4}{15c^2 h^3}$, T é a temperatura absoluta em Kelvin e $B(T)$ é a intensidade de radiação total em unidades de energia por área, por tempo, por esterradiano.

A irradiância total emitida por um corpo negro é encontrada pelas relações apresentadas nas Equações 2.8 e 2.9 para radiação isotrópica. Dessa forma:

$$F = \pi B(T) \quad \text{Eq. 2.15}$$

Portanto, a Lei de Stefan-Boltzmann pode ser expressa pela equação:

$$F = \sigma T^4 \quad \text{Eq. 2.16}$$

onde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Jm}^{-2}$ é a constante de Stefan-Boltzmann e F é a irradiância total para corpos negros em unidades de energia por área e por tempo.

2.3.4.3 Lei de Wien

A lei de Wien define a proporção inversa entre o comprimento de onda de máxima intensidade e a temperatura absoluta. Essa relação permite calcular o comprimento de onda de máxima intensidade monocromática de um corpo negro em uma dada temperatura.

A Lei de Wien é encontrada derivando a Lei de Planck em relação ao comprimento de onda e igualando o resultado a zero. Assim,

$$\frac{\partial B_\lambda(T)}{\partial \lambda} = 0, \quad \text{Eq. 2.17}$$

o que dá origem à relação:

$$\lambda_{\max} = \frac{a}{T} \quad \text{Eq. 2.18}$$

onde λ_{\max} é o comprimento de onda de máxima intensidade monocromática em μm , T é a temperatura em K e é uma constante, sendo $a = 2898 \mu\text{mK}$.

2.3.4.4 Lei de Kirchhoff

Um meio é capaz de absorver e emitir radiação em um mesmo comprimento de onda simultaneamente. A razão na qual essa emissão acontece não é função da substância, mas da temperatura desse meio e do comprimento de onda da radiação eletromagnética.

A razão entre a intensidade absorvida e a função de Planck é chamada de absortividade enquanto a razão entre a intensidade emitida e a função de Planck é chamada de emissividade. Neste sentido, a lei de Kirchhoff estabelece que, em equilíbrio termodinâmico, a emissividade (ε_{λ}) de um corpo em um determinado comprimento de onda é igual absortividade (A_{λ}) desse corpo, ou seja:

$$\varepsilon_{\lambda} = A_{\lambda} \quad \text{Eq. 2.19}$$

Para um corpo negro, a absorção e a emissão são máximas em todos os comprimentos de onda, portanto:

$$\varepsilon_{\lambda} = A_{\lambda} = 1 \quad \text{Eq. 2.20}$$

Para um corpo cinza (ou real), a absorção e emissão são incompletas, de forma que:

$$\varepsilon_{\lambda} = A_{\lambda} < 1 \quad \text{Eq. 2.21}$$

Isso acontece porque, além de absorvida, a radiação também é refletida e transmitida pelos corpos cinza. Assim:

$$A_{\lambda} + R_{\lambda} + T_{\lambda} = 1 \quad \text{Eq. 2.22}$$

onde R_λ é a refletividade e T_λ a transmissividade. A primeira é a razão entre a intensidade monocromática refletida e a incidente, enquanto a segunda é a razão entre a intensidade monocromática transmitida e a incidente.

2.3.5 Constante solar (G_{sc})

A constante solar G_{sc} é compreendida como uma grandeza que representa a quantidade de energia solar que atinge o topo da atmosfera.

Segundo Peixoto et al. (1992), a constante solar é definida como a quantidade de radiação solar incidente por unidade de área e por unidade de tempo em uma superfície normal à direção de propagação e situada a uma distância média entre a Terra e o Sol, sendo portanto, uma irradiância ou densidade de fluxo total.

O valor da constante solar recomendado por Liou (2002) é 1366 Wm^{-2} .

2.3.6 Radiação solar extraterrestre

A radiação solar extraterrestre (R_a) é definida como a radiação recebida em uma superfície horizontal no topo da atmosfera terrestre. Essa grandeza varia em função do dia do ano e da hora do dia, como também varia com a latitude, o que pode ser observado na Figura 2.19. Isso acontece porque a intensidade local de radiação é dependente do ângulo entre a direção dos raios solares e a normal a uma superfície horizontal no topo da atmosfera, ou seja, do ângulo zenital solar, bem como da distância entre a Terra e o Sol. Dessa forma, a radiação solar extraterrestre é igual ao valor da constante solar nos dias de equinócio, quando a distância entre a Terra e o Sol tem seu valor médio.

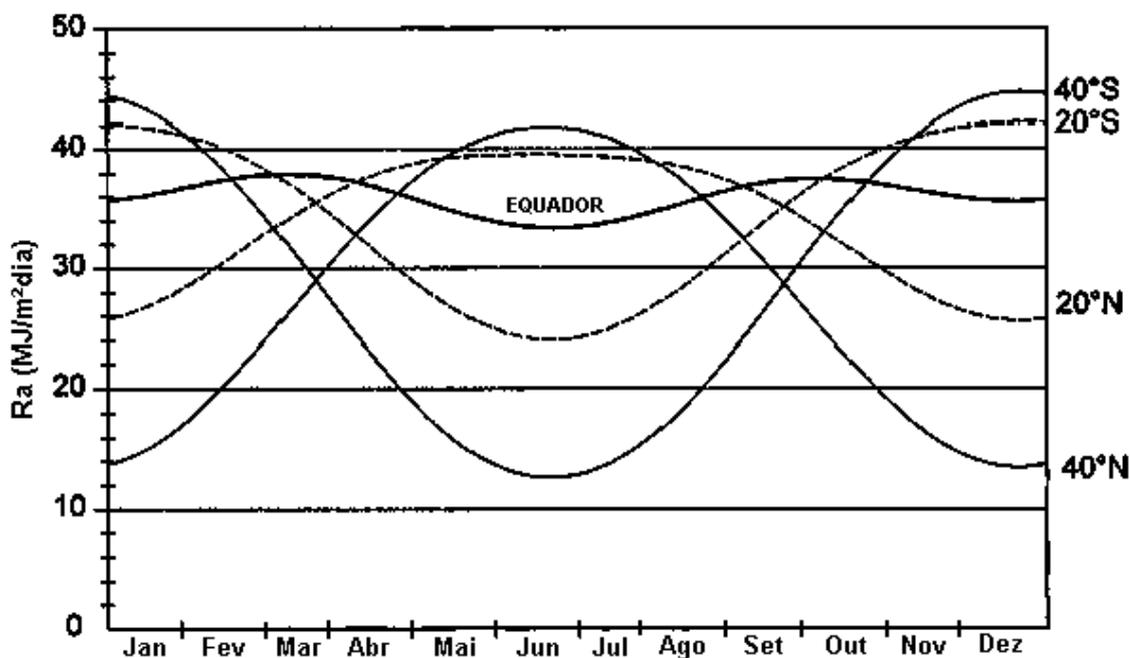


Figura 2.19: Variação anual da radiação extraterrestre no Equador e nas latitudes 20° e 40° norte e sul. (Adaptado de Allen et al., 1998)

2.3.7 Espalhamento e absorção da radiação na atmosfera terrestre

Espalhamento é um processo físico resultante da interação da luz com a matéria. É o processo responsável pela difusão da luz e por diversos fenômenos ópticos produzidos na atmosfera.

Este processo ocorre quando uma partícula da atmosfera se interpõe na trajetória de uma onda eletromagnética. Essa partícula intercepta a energia da onda incidente e, então, a espalha em todas as direções, dando origem à radiação difusa.

O espalhamento é fortemente influenciado pelo tamanho das partículas. Quando o comprimento de onda é muito maior do que a circunferência da partícula, o espalhamento é chamado de Rayleigh. No entanto, se as partículas forem maiores ou aproximadamente iguais ao comprimento de onda, o espalhamento é chamado de Lorenz-Mie. No primeiro caso, a radiação é emitida igualmente nos dois sentidos da direção da onda incidente (para frente e para trás), enquanto no segundo, a energia espalhada se concentra para frente. É o que pode ser observado na Figura 2.20.

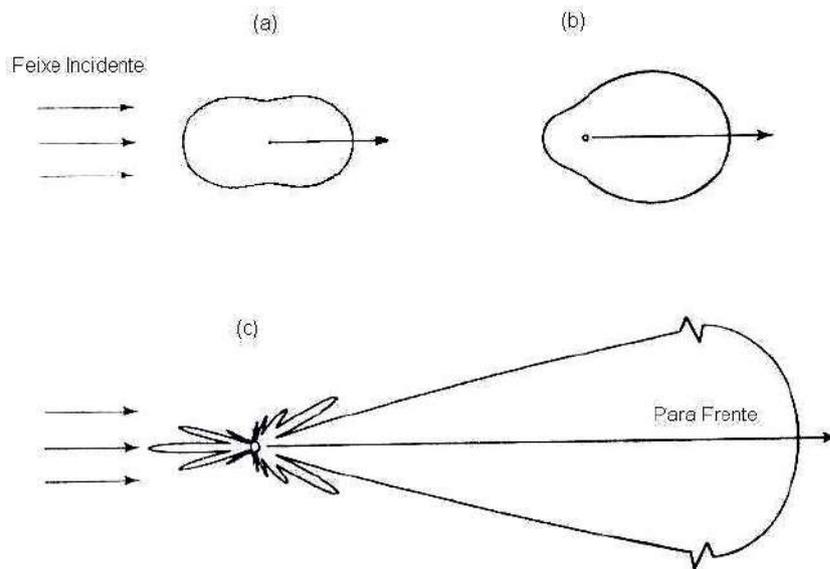


Figura 2.20: Padrão de espalhamento de luz visível de 0,5 µm por aerossóis esféricos de: (a) 10^{-4} µm; (b) 0,1 µm e (c) 1 µm. (Adaptado de Liou, 2002)

O espalhamento é muitas vezes acompanhado por absorção de energia, processo que resulta na emissão de radiação. A energia solar é absorvida por gases atmosféricos como o vapor d'água, o dióxido de carbono, o ozônio, o oxigênio, o nitrogênio e o metano (Peixoto et al., 1992). Junto com o espalhamento, a absorção remove energia de um feixe de luz quando este atravessa um meio, ou seja, faz com que o feixe de luz seja atenuado. Tal processo é chamado de extinção.

2.3.8 Balço de radiação na superfície

O balanço de radiação na superfície, também chamado de radiação líquida, expressa o saldo entre a quantidade de energia radiante que incide na superfície e a quantidade de energia radiante que emerge dela, com o intuito de obter a quantidade de energia disponível para processos como o aquecimento da atmosfera, a evapotranspiração, o aquecimento do solo e da água. A radiação líquida resulta do saldo ou balanço de radiação de ondas curtas e de ondas longas em superfície. Assim, o balanço de radiação em superfície pode ser expresso como:

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad \text{Eq. 2.23}$$

onde R_n é a radiação líquida, R_{ns} é o balanço de ondas curtas e R_{nl} é o balanço de ondas longas.

O balanço de radiação de ondas curtas resulta da diferença entre a radiação solar incidente e a radiação solar refletida pela superfície. Ele pode ser expresso pela equação:

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad \text{Eq. 2.24}$$

onde R_s é a radiação solar global em Wm^{-2} e α é o albedo da superfície.

A radiação solar global incidente na superfície corresponde ao somatório da radiação solar direta e difusa. A primeira chega à superfície sem interagir com atmosfera, enquanto a segunda interage com a atmosfera através do espalhamento. Assim, a radiação global varia bastante ao longo do dia e do ano em função da composição da atmosfera.

O balanço de radiação de ondas longas engloba a radiação emitida pela superfície (R_{sup}), a radiação emitida pela atmosfera (R_{atm}), bem como a porção emitida pela atmosfera que é refletida pela superfície. Dessa forma:

$$R_{nl} = R_{atm\downarrow} - (R_{sup} + R_{atm\uparrow}) \quad \text{Eq. 2.25}$$

A radiação de ondas longas emitida pela superfície é determinada pela Lei de Stefan-Boltzmann, o que significa que ela é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta da superfície. Além disso, ela é dependente da emissividade da superfície. Dessa forma, essa componente pode ser expressa como:

$$R_{sup} = \varepsilon\sigma T^4 \quad \text{Eq. 2.26}$$

onde ε é a emissividade da superfície, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T é a temperatura da superfície.

Da mesma forma, a radiação de ondas longas emitida pela atmosfera é função de sua temperatura e de sua emissividade, conforme segue:

$$R_{atm} = \varepsilon_{atm}\sigma T_{atm}^4 \quad \text{Eq. 2.27}$$

onde ε_{atm} é a emissividade da atmosfera, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e T_{atm} é a temperatura da atmosfera.

A radiação de ondas longas emitida pela atmosfera corresponde à radiação incidente na superfície. A atmosfera absorve parte da radiação emergente da superfície e parte da radiação solar incidente e, então, emite radiação de ondas longas de volta à superfície e para fora da atmosfera. Tal radiação emitida pela atmosfera é dependente do perfil vertical de temperatura, das nuvens, e da distribuição vertical dos absorvedores (Peixoto et al., 1992).

A componente de onda longa emitida pela superfície tem uma variação diurna como a da temperatura, atingindo um valor máximo no início da tarde e um valor mínimo no início da manhã. Já a radiação de onda longa incidente na superfície, praticamente não varia durante o dia (Peixoto et al., 1992).

Pode-se dizer que o balanço de ondas longas é influenciado por nuvens, vapor d'água, dióxido de carbono e poeira, visto que estes constituintes contribuem tanto para a absorção quanto para a emissão de radiação de ondas longas. Eles absorvem parte da radiação emitida pela superfície e emitem radiação de ondas longas de volta para ela, contribuindo para o aumento da temperatura e, conseqüentemente, para a emissão de ondas longas da superfície.

As componentes do balanço de ondas longas têm a mesma ordem de magnitude. Conseqüentemente, durante o dia, a magnitude do balanço de ondas longas é pequena em relação à magnitude do balanço de ondas curtas. No entanto, à noite, o balanço de radiação de ondas curtas é zero e o balanço de radiação consiste, em geral, no resfriamento da superfície pela perda de radiação de onda longa (Peixoto et al., 1992).

O balanço de radiação na superfície pode ser expresso então pela equação:

$$R_n = R_s(1 - \alpha) + (R_{atm\downarrow} - (R_{sup} + R_{atm\uparrow})) \quad \text{Eq. 2.28}$$

ou

$$R_n = R_s(1 - \alpha) + (\epsilon_{atm}\sigma T_{atm}^4\downarrow - (\epsilon\sigma T^4 + \epsilon_{atm}\sigma T_{atm}^4\uparrow)) \quad \text{Eq. 2.29}$$

2.4. Utilização de equações empíricas para a estimativa da radiação solar global, relatos de casos

Muitos trabalhos que utilizam equações de estimativa da radiação solar global podem ser encontrados na literatura. Entre eles estão os citados a seguir.

Conceição e Mandelli (2006), Valiati e Ricieri (2005), Blanco e Sentelhas (2002), Dantas et al. (2003), Fontana e Oliveira (1996) tiveram como objetivo a determinação dos parâmetros da equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940), respectivamente, para as

cidades de Bento Gonçalves, Cascavel, Piracicaba, Lavras e para todo o estado do Rio Grande do Sul.

Silva et al. (2004) encontraram coeficientes de regressão múltipla para a equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940) acrescida da razão de pressão. Neste trabalho, os coeficientes foram determinados para cada mês do ano para diferentes localidades do litoral da Paraíba mediante regressão linear múltipla entre o índice de limpidez (R_s/R_a), a razão de insolação e a razão de pressão.

Campelo Júnior (1998) objetivou analisar a relação entre a radiação solar global e a insolação diária em Santo Antônio do Leverger, Mato Grosso. Para tanto utilizou a equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940), entre outros modelos.

Sacco e Assis (2004) também aplicaram a equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940) para estimar a radiação solar global. No entanto, além de determinar os parâmetros a e b desta equação e de comparar R_s medida e estimada para a região da cidade de Pelotas, as autoras também analisaram o índice de limpidez.

Back (2007) e Araújo et al. (2007) utilizaram a equação de Angstrom-Prescott (Prescott, 1940) para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o). O primeiro teve o objetivo de avaliar o desempenho da equação de Penman-Monteith em diferentes intervalos de tempo, enquanto o segundo teve o objetivo de comparar o desempenho de diferentes modelos de estimativa de evapotranspiração, sendo que em ambos os casos foram usados os coeficientes recomendados pela FAO em Allen et al. (1998), ou seja, $a = 0,25$ e $b = 0,50$.

Sentelhas et al (2001) avaliaram dois geradores de dados meteorológicos, WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais do Brasil. Para tanto, foram comparadas séries históricas de dados meteorológicos com dados meteorológicos gerados. Entre os dados fornecidos por estes geradores estão valores diários de radiação solar, que são estimados através da equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940).

Jadoski et al. (2007) avaliou o comportamento do balanço de radiação ao longo do ano em Guarapuava, região centro-sul do Paraná. Para tanto, foram utilizados dados médios do período entre 1979 e 2006 e as equações de Angström-Prescott (Prescott, 1940) e de Brunt para determinar o balanço de ondas curtas e de ondas longas, respectivamente.

Conceição (2002) teve como objetivo avaliar a estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados do tanque Classe A utilizando diferentes métodos de determinação do coeficiente do tanque (K_p) para as condições da região noroeste do Estado de São Paulo. O mesmo autor, em outro trabalho (Conceição, 2003) teve o objetivo de avaliar diferentes métodos de estimativa de ET_o com base apenas na temperatura do ar, para as condições do

Baixo Rio Grande, região noroeste do Estado de São Paulo. Em ambos casos, os valores estimados foram comparados com os obtidos utilizando-se o modelo de Penman-Monteith, conforme a parametrização da FAO. Dessa forma, fez-se necessário conhecer a radiação líquida, que foi estimada conforme a recomendação da FAO, e a radiação solar global diária, que foi determinada pela relação proposta por Glover & McCulloch (1958). O mesmo fizeram Vieira et al. (2007), que tiveram como objetivo avaliar a performance dos modelos de estimativa de ETo pelos métodos de Thornthwaite, Hargreaves e Samani, Makkink e Penman Original para a região de Diamantina em MG.

Costa e dos Santos (2000) tiveram como objetivo comparar a eficiência do uso da radiação solar pelas culturas da soja, milho, arroz e feijão em diferentes regiões produtoras de Minas Gerais. Para isso, utilizou a equação de Glover & McCulloch (1958) para estimar a radiação solar disponível em cada uma das regiões geográficas escolhidas.

O modelo de estimativa de radiação de Hargreaves (Allen et al, 1998) também é muito usado. No entanto, na maioria dos casos, isso se dá através da equação de estimativa de ETo Hargreaves-Samani, que na verdade nada mais é do que a combinação da equação de radiação citada com a equação de estimativa de ETo original de Hargreaves (Samani, 2000). Dessa forma, pode-se dizer a equação de radiação de Hargreaves (Allen et al, 1998) foi usada por: Oliveira et al. (2008), com o objetivo de testar o Irrigâmetro, um aparelho evapo-pluviométrico desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa para ser utilizado no manejo da irrigação; Campos et al. (2004), com o objetivo de analisar o comportamento intra-anual e espacial da ETo no Nordeste do Brasil durante um ano de El Niño e um de La Nina; Tagliaferre et al. (2006), com o objetivo avaliar um minievaporímetro, operando com quatro níveis d'água diferentes (30, 45, 60 e 75 mm da borda); além de Batista et al. (2007), Barros et al. (2007), da Silva et al. (2007), Vieira et al. (2007), Lucas et al. (2007), Faccioli et al. (2007) e Araújo et al. (2007), com o objetivo de avaliar diferentes métodos de estimativa de ETo.

2.5. As equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves

A equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940) é um modelo de estimativa que relaciona a radiação solar global com a radiação extraterrestre e a razão de insolação. Esta equação, que foi criada por Angström e modificada por Prescott (1940), é amplamente utilizada e atualmente é recomendada pela FAO para uso nas fórmulas de estimativa da evapotranspiração como alternativa à medida da radiação.

A equação original de Angström para estimar a radiação solar global tinha a forma:

$$R_s = R_0(0,25 + 0,75S),$$

onde R_s é a quantidade total de radiação recebida durante o dia, R_0 é a quantidade de radiação solar incidente recebida em um dia perfeitamente limpo e S é o tempo de brilho solar expresso como uma fração do maior tempo possível, ou seja, é a razão de insolação (n/N). Como o valor de R_0 varia sensivelmente em função de pequenas mudanças nos teores de água e de poeira na atmosfera em uma mesma localidade, essa fórmula foi modificada por Prescott com a substituição de R_0 pelo valor da radiação solar extraterrestre (R_a), dando origem à expressão conhecida atualmente.

Já a equação de Glover & McCulloch (1958) propõe a dependência do coeficiente linear a da equação de Angstrom-Prescott (Prescott, 1940) em relação à latitude φ . Assim, essa dependência seria dada pela relação $a = 0,29 \cdot \cos(\varphi)$ para locais entre as latitudes 0° e 60° . Além disso, os autores verificaram que b , o coeficiente angular desta equação, assume um valor constante igual a 0,52.

A equação de Hargreaves (Allen et al, 1998), por sua vez, foi desenvolvida para fazer estimativas de radiação usando apenas dados de temperatura. Para isso, ela se baseia no princípio de que a diferença entre as temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) está relacionada ao grau de cobertura de nuvens em uma localidade, de forma que pode ser usada como indicador da fração de radiação extraterrestre que alcança a superfície da Terra. Por exemplo, em condições de céu claro, as temperaturas são altas durante o dia e baixas durante a noite, já que a atmosfera é transparente a radiação solar incidente, no primeiro caso, e pouca radiação de onda longa emitida pela superfície é absorvida pela atmosfera, no segundo. Como resultado, a diferença entre T_{max} e T_{min} será grande. Por outro lado, em condições de céu encoberto, T_{max} é relativamente mais baixa do que seria em um dia de céu claro e T_{min} será relativamente maior. T_{max} é mais baixa porque uma parte significativa da radiação solar incidente nunca alcança a superfície da Terra e é absorvida e refletida pelas nuvens, enquanto T_{min} é mais alta por que a cobertura de nuvens faz com que a radiação de onda longa líquida emitida diminua. Dessa forma, a diferença entre T_{max} e T_{min} será menor do que no caso de céu claro.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Região de estudo

A região de estudo escolhida é a Ilha do Fundão, no município do Rio de Janeiro, localizada em 22,85°S e 43,13°W.

Segundo as normais climatológicas da estação meteorológica Rio de Janeiro (período 1961-1990), localizada em 22°53'S e 43°11'W e situada a aproximadamente 10 km da região de estudo, a temperatura média anual é de 23,7°C, enquanto as temperaturas médias mensais ficam entre 21,3°C no mês julho e 26,5°C em fevereiro. Já a precipitação total média anual é de 1172,9 mm, com valores médios mensais variando de 50,5 mm em agosto a 169 mm em dezembro.

Segundo os dados de uma Plataforma de Coleta de Dados localizada na Ilha do Fundão, a temperatura média anual é de 24,95°C, enquanto as temperaturas médias mensais ficam entre 17,95°C no mês de outubro e 28,83°C em fevereiro.

3.2 Dados disponíveis

Os dados foram coletados por uma Plataforma de Coleta de Dados (PCD). A PCD encontrava-se instalada em um jardim gramado dentro das dependências do Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES), sendo que a sua exposição seguiu a padronização, inclusive a de não sombreamento de seus sensores por obstáculos, contida no manual n°.8 da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2006).

Entre os dados coletados disponíveis estão a temperatura do ar e a radiação solar global, que foram registrados de minuto em minuto. A temperatura foi utilizada como dado de entrada na equação de Hargreaves (Allen et al., 1998). Os dados registrados de temperatura foram trabalhados de forma a encontrar a temperatura máxima e a mínima diária para todos os dias estudados. Já a radiação solar global serviu como parâmetro de comparação na avaliação das equações. Os valores de R_s medidos foram integrados entre os instantes do nascer e pôr do Sol, o que significa dizer que todos os valores de R_s medidos nos minutos entre o nascer e o pôr do sol foram somados de forma a fornecer valores diários, e sua unidade foi convertida de W/m^2 para MJ/m^2 dia. Dessa forma, os valores de R_s observados pela PCD foram

comparados com os valores estimados pelas equações empíricas escolhidas na mesma escala de tempo e na mesma unidade.

Além disso, os dados observados de radiação solar global também foram usados para estimar o valor da insolação diária, ou número de horas de brilho solar (n). De acordo com o manual nº8 da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2006), o valor de 120 W/m^2 é o limiar da irradiância solar para distinguir a insolação. Assim, cada minuto em que $R_s > 120 \text{ W/m}^2$ foi considerado como um minuto de insolação, que, posteriormente, foram somados para dar origem a um valor diário de n , que, então, foi convertido em unidade de hora.

O período estudado foi o ano de 2001. Por falta de dados, não foram considerados os dias: 4 de abril; 5,12,14,15,16 e 25 de maio; 18 a 29 de junho; 12,22,23 e 28 de julho; 11,14 a 27 de setembro; 1 a 6, 8, 15 e 16 de outubro; 3, 4, 12, e 13 de novembro.

3.3 Equações avaliadas

Neste estudo, foram escolhidas as seguintes equações empíricas para estimar a radiação solar global diária: Angström-Prescott (Prescott, 1940), Glover & McCulloch (1958), Hargreaves (Allen et al., 1998).

A equação de Angström-Prescott (Prescott, 1940) tem a seguinte forma:

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad \text{Eq. 3.1}$$

onde, R_s representa a radiação solar global diária [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; R_a representa a irradiância solar global extraterrestre diária [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; n representa as horas diárias de insolação real (h d^{-1}); N é duração astronômica do dia (h d^{-1}); n/N é a razão de insolação; a é o coeficiente linear da equação empírica; e b é o coeficiente angular da equação empírica.

Nessa expressão, os parâmetros a e b são obtidos por métodos estatísticos. Os valores desses parâmetros variam com as condições atmosféricas e com a declinação solar. No entanto, na inexistência de dados de radiação solar e de calibração para a determinação adequada de a e b , são recomendados os valores $a = 0,25$ e $b = 0,50$ como parâmetros da equação (Allen et al., 1998). Nesse caso, a atmosfera teria uma transparência de 0,75 em dias

completamente sem nebulosidade, quando, teoricamente, n/N seria igual à unidade (Assis et al., 1998). Esses foram os valores adotados neste trabalho.

A equação de Glover & McCulloch (1958) é expressa como segue:

$$\mathbf{R}_s = \mathbf{R}_a \cdot \left(0,29 \cdot \cos(\varphi) + 0,52 \cdot \frac{n}{N} \right) \quad \text{Eq. 3.2}$$

onde R_s representa a radiação solar global diária [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; R_a representa a irradiância solar global extraterrestre diária [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; n representa as horas diária de insolação real (h d^{-1}); N é duração astronômica do dia (h d^{-1}); e φ é a latitude.

A equação de Hargreaves é dada pela expressão (Allen et al., 1998):

$$\mathbf{R}_s = k_{R_s} \cdot \mathbf{R}_a \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

onde R_s representa a radiação solar global diária [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; R_a representa a irradiância solar global extraterrestre diária [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$]; k_{R_s} é um coeficiente de ajuste de valor 0,16 para o continente e 0,19 para o litoral, valor que foi usado neste trabalho; T_{\max} é a temperatura máxima do ar [$^{\circ}\text{C}$] e T_{\min} é a temperatura mínima do ar [$^{\circ}\text{C}$].

Para o cálculo da radiação solar global diária e da irradiância solar global extraterrestre diária (R_a) também foi necessário utilizar as seguintes equações (Allen et al., 1998):

$$\delta = 0,409 \cdot \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} \cdot J + 1,39 \right) \quad \text{Eq. 3.4}$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \cdot \tan(\delta)) \quad \text{Eq. 3.5}$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{365} \cdot J \right) \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$\mathbf{R}_a = \left(\frac{24 \cdot 60}{\pi} \right) \cdot G_{sc} \cdot d_r \cdot [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\omega_s)] \quad \text{Eq. 3.7}$$

$$N = \left(\frac{24}{\pi} \right) \cdot \omega_s \quad \text{Eq. 3.8}$$

onde δ é a declinação solar [rad]; J é o dia Juliano; ω_s é o ângulo horário [rad]; φ é a latitude [rad]; d_r é o inverso da distância relativa Terra-Sol; G_{sc} é a constante solar, de valor 0,0820 [MJ.m⁻².min⁻¹]; e N a duração astronômica do dia.

3.4 Avaliação de desempenho das equações empíricas

Para avaliar o desempenho das equações, os valores de R_s medidos e estimados foram comparados. Para isso, utilizou-se o Erro Quadrático Médio (EQM), o Desvio Médio (DM), o Erro Relativo Médio (ERM), o coeficiente de correlação (r), o índice de concordância (d) e o coeficiente de desempenho (c). O coeficiente de correlação e o índice de concordância foram utilizados somente para o cálculo do coeficiente de desempenho.

O EQM descreve o desvio médio absoluto entre os valores estimados por uma equação e os valores observados. Dessa forma, quanto menor for o seu valor, maior será a exatidão do modelo. O EQM é calculado pela equação (Andrade Júnior et al., 2003):

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{1}{\eta} \sum (P_i - O_i)^2} \quad \text{Eq. 3.9}$$

onde P_i é o valor estimado por uma das equações, O_i o valor observado usado como referência e η a quantidade de amostras.

O DM foi usado para indicar se uma equação tem a tendência de superestimar ou subestimar valores, sendo calculado pela seguinte expressão (Fiorin et al., 2006):

$$\text{DM} = \frac{\sum (P_i - O_i)}{\eta} \quad \text{Eq. 3.10}$$

onde P_i é o valor estimado por uma das equações, O_i o valor observado usado como referência e η a quantidade de amostras.

O ERM foi calculado usando a expressão (Oliveira et al., 1999):

$$\text{ERM} = \frac{\sum \left(\frac{|P_i - O_i|}{O_i} \right)}{\eta} \times 100 \quad \text{Eq. 3.11}$$

onde P_i é o valor estimado por uma das equações, O_i o valor observado usado como referência e η a quantidade de amostras.

O índice de concordância, proposto por Wilmott et al. (1985), foi usado para indicar a exatidão, o afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Esse índice mostra como o modelo simula os valores observados, variando de zero, para nenhuma concordância, a um, para a concordância perfeita, sendo calculado da seguinte forma:

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \quad \text{Eq. 3.12}$$

onde P_i é o valor estimado, O_i o valor observado e O a média dos valores observados.

O coeficiente de desempenho foi proposto por Camargo e Sentelhas (1995). Este coeficiente foi usado para quantificar o desempenho da equação e foi calculado pela seguinte expressão:

$$c = r \cdot d \quad \text{Eq. 3.13}$$

onde r é o coeficiente de correlação e d o índice de concordância. O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos pelo índice c é apresentado na Tabela 1.

Tabela 3.1 Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa através do coeficiente c .

VALOR DE c	DESEMPENHO
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Ruim
≤ 0,40	Péssimo

Neste estudo, primeiro fez-se uma comparação da média mensal de R_s observada com a média mensal de R_s estimada. Depois, são apresentados o EQM, o DM e o ERM na escala mensal e anual e, então, são apresentados o índice d e o coeficiente c . Finalmente, apresenta-

se o ERM para diferentes condições de nebulosidade, onde são consideradas faixas de insolação (n/N) correspondentes aos seguintes intervalos encontrados neste estudo: 0,0-0,10; 0,11-0,20; 0,21-0,30; 0,31-0,40; 0,41-0,50; 0,51-0,60; 0,61-0,70; e 0,71-0,80.

3.5 Ajuste de curva

Após a comparação entre os valores observados e estimados da radiação solar global diária, fez-se um ajuste de curva das três equações escolhidas. Realizou-se uma regressão linear para cada uma das equações avaliadas, onde os valores estimados são a variável dependente e os valores observados, a variável independente. Assim, as equações de estimativa foram ajustadas pela regressão linear, e os novos resultados de R_s foram comparados com os valores medidos.

Faz-se necessário salientar que o cálculo da radiação solar global diária feito com as equações ajustadas utilizou os mesmos dados empregados no ajuste de curva de tais equações, tendo em vista a disponibilidade de apenas um ano de dados. Nesse sentido, sabendo-se que para a avaliação de desempenho de equações ajustadas deve-se utilizar dados distintos daqueles empregados no ajuste de curva, fez-se tais ajustes apenas para fins ilustrativos de como é possível melhorar o desempenho de equações empíricas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1 Avaliação das equações em escala mensal

Na Figura 4.1, são apresentadas as médias mensais das observações de radiação solar global diária e suas estimativas obtidas pelas três equações empíricas. As estimativas das três equações estudadas acompanham a tendência de comportamento dos valores observados. No entanto, as médias dos valores estimados de R_s são muito maiores do que as médias dos valores observados, com diferenças de quase 13,00 MJ/m²dia. As três equações, em média, superestimaram os valores de radiação solar global diária observados, sendo que a equação de Angström-Prescott foi a que mais se aproximou desses valores, enquanto que a equação de Hargreaves foi a que mais se afastou. Essa discrepância entre os valores observados e estimados ocorreu porque nenhuma das equações foi calibrada para o local de estudo, demonstrando que os coeficientes recomendados na literatura não são apropriados para este local.

A média mensal da radiação solar global diária observada variou de 6,70 MJ/m²dia em maio a 17,21 MJ/m²dia em fevereiro, enquanto a média de R_s estimada pela equação de Angström-Prescott variou de 11,87 MJ/m²dia em junho a 23,79 MJ/m²dia em janeiro. A média de R_s estimada pela equação de Glover & McCulloch variou de 12,51 MJ/m²dia em junho a 25,05 MJ/m²dia em janeiro. Já a média de R_s estimada pela equação de Hargreaves variou de 14,06 MJ/m²dia em junho a 27,15 MJ/m² dia em janeiro.

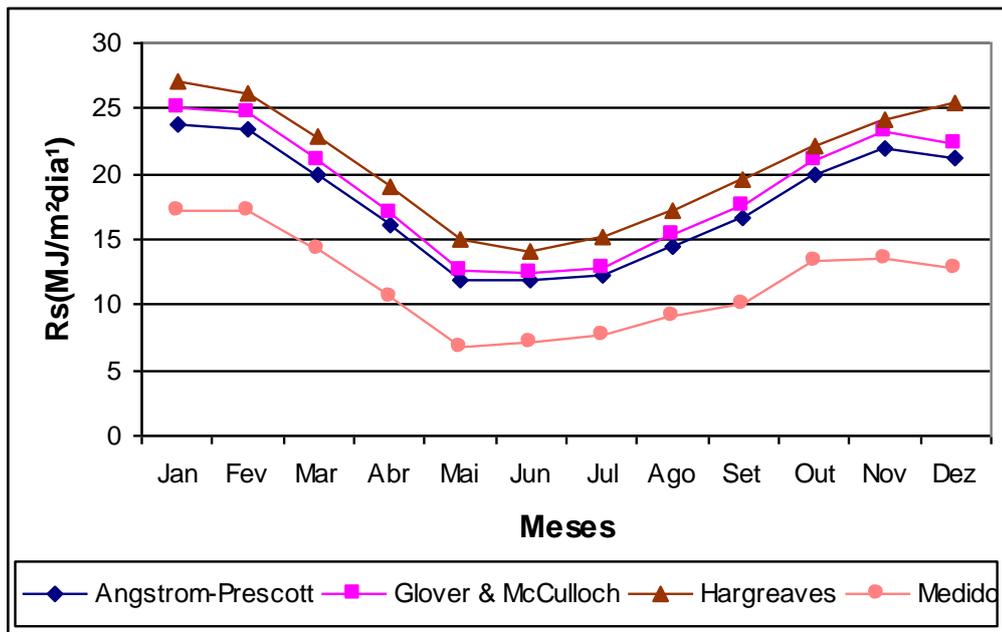


Figura 4.1: Média mensal da radiação solar global diária observada e estimada.

Os valores do Erro Quadrático Médio mensal das estimativas das três equações analisadas são apresentados na Figura 4.2. As estimativas da equação de Angström-Prescott obtiveram os menores valores do EQM, que variaram entre 4,63 MJ/m²dia no mês de julho e 8,89 MJ/m²dia no mês de dezembro. A equação de Glover & McCulloch apresentou erros que variaram de 5,28 MJ/m²dia em julho a 9,96 MJ/m²dia em novembro. Já as estimativas da equação de Hargreaves obtiveram os maiores valores do EQM, variando entre 7,10 MJ/m²dia em junho e 13,92 MJ/m²dia em dezembro.

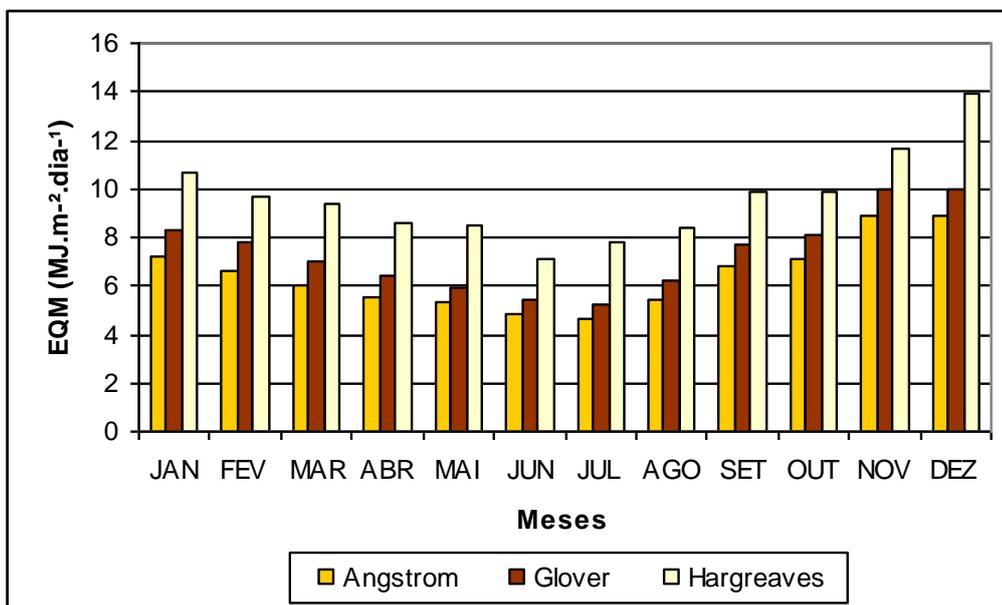


Figura 4.2: Erro Quadrático Médio Mensal obtidos pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

Os resultados do Desvio Médio mensal (Figura 4.3) sugerem que as três equações superestimaram o valor de radiação solar global diária no ano de 2001 nessa localidade. Os valores do DM para as estimativas da equação de Angström-Prescott variaram de 4,58 MJ/m²dia em julho a 8,43 MJ/m²dia em novembro. Para as estimativas da equação de Glover & McCulloch, o DM variou entre 5,24 MJ/m²dia em julho a 9,61 MJ/m²dia em novembro. Por fim, para as estimativas da equação de Hargreaves, variou de 6,10 MJ/m²dia em junho a 12,67 MJ/m²dia em dezembro.

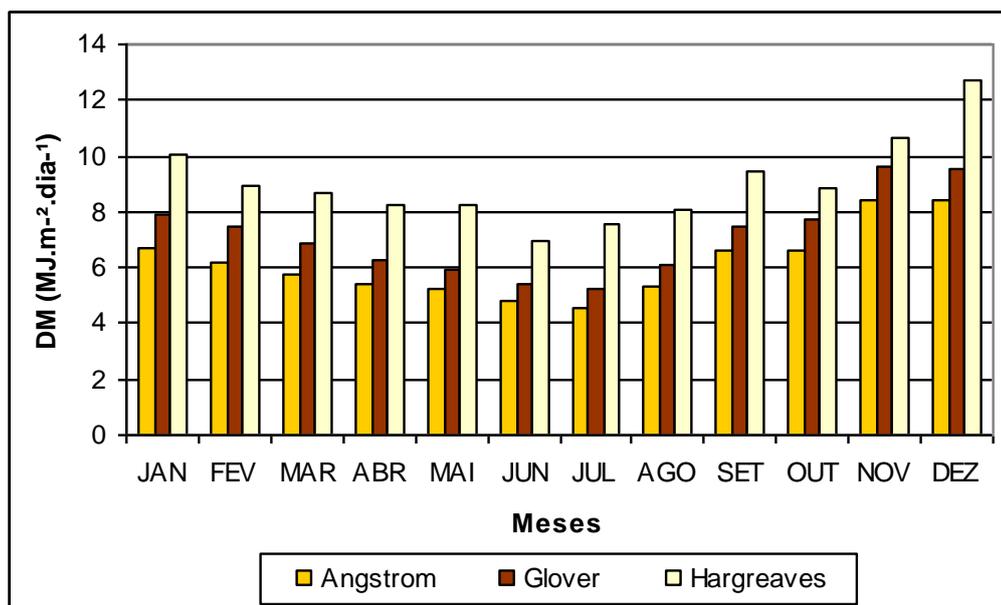


Figura 4.3: Desvio Médio Mensal obtidos pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

Os resultados do Erro Relativo Médio mensal das estimativas das três equações estudadas são mostrados na Figura 4.4. O ERM para as estimativas da equação de Angström-Prescott variou de 43% em fevereiro a 310% em setembro. Os meses de maio, setembro, outubro, novembro e dezembro apresentaram erros superiores a 100%. Para esses meses, o ERM foi de, respectivamente, 121%, 310%, 261%, 106% e 165%. Para as estimativas de Glover & McCulloch, o ERM variou de 51% em fevereiro a 336% em setembro. Nos meses de maio, julho, setembro, outubro, novembro e dezembro, o ERM foi superior a 100%, sendo de 134%, 109%, 336%, 283%, 118% e 181%, respectivamente. Já para as estimativas de Hargreaves, o ERM variou de 62% em fevereiro a 434% em outubro. Apenas os meses de janeiro, fevereiro e março não apresentaram erros maiores que 100%, sendo o ERM de 78%, 62% e 91%, respectivamente. Nos outros meses, o ERM foi de 101% em abril e junho, 200%

em maio, 167% em julho, 123% em agosto, 423% em setembro, 434% em outubro, 143% em novembro e 256% em dezembro.

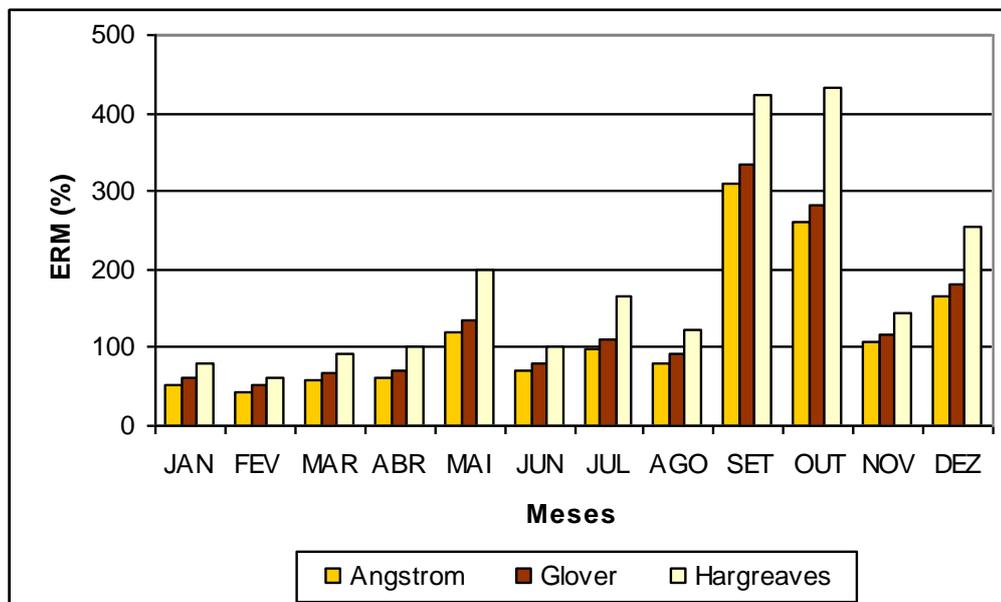


Figura 4.4: Erro Relativo Médio mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

4.2 Avaliação das equações em escala anual

O Erro Quadrático Médio, o Desvio Médio e o Erro Relativo Médio em escala anual para cada uma das três equações analisadas são apresentados nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente. O EQM anual da equação de Angström-Prescott foi de 6,62 MJ/m²dia, o da equação de Glover & McCulloch de 7,55 MJ/m²dia e o da equação de Hargreaves de 9,90 MJ/m²dia. O DM anual foi de 6,20 MJ/m²dia para a primeira equação, de 7,17 MJ/m²dia para a segunda e de 9,11 MJ/m²dia para a última. Da mesma forma, o ERM anual foi de 109%, de 121% e de 167%, respectivamente para cada uma das três equações.

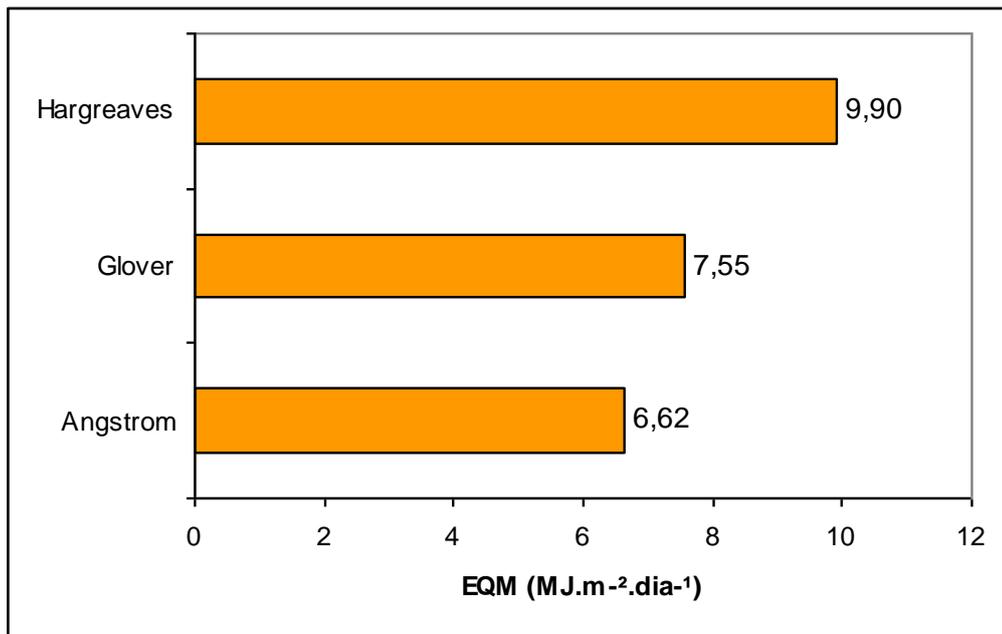


Figura 4.5: Erro Quadrático Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

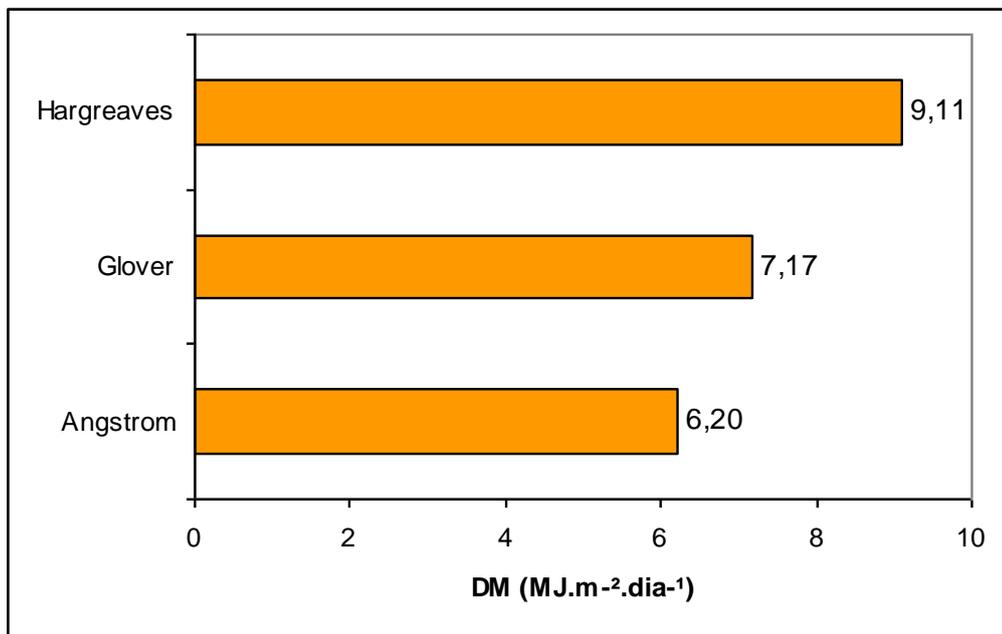


Figura 4.6: Desvio Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

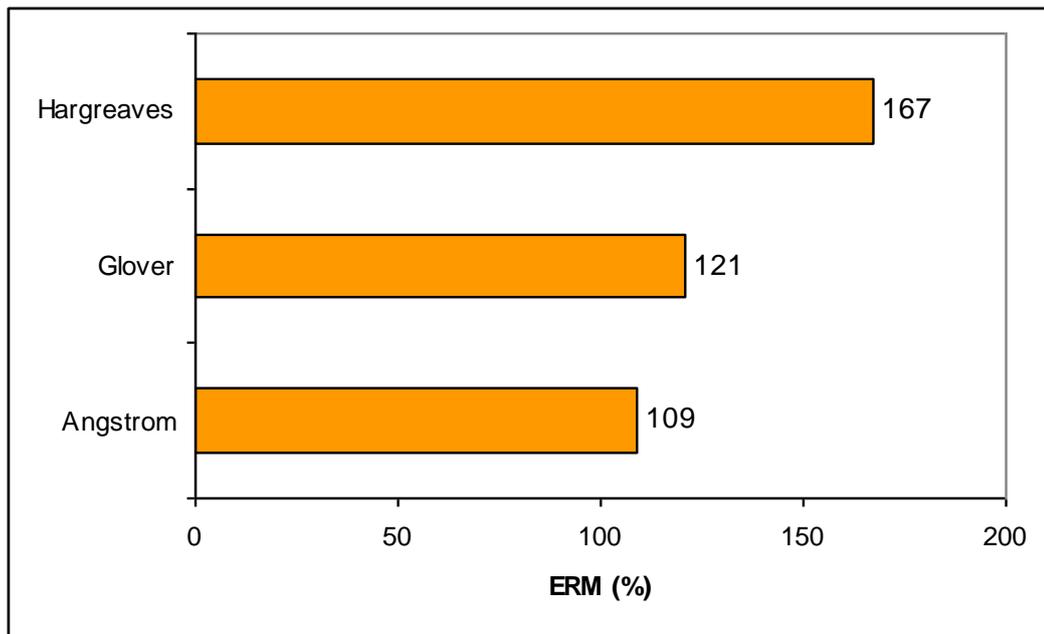


Figura 4.7: Erro Relativo Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

O índice de concordância d não apresentou valores muito altos, como mostra a Figura 4.8. Os valores de d foram de 0,74 para a equação de Angström-Prescott, 0,70 para a equação de Glover e 0,59 para a equação de Hargreaves.

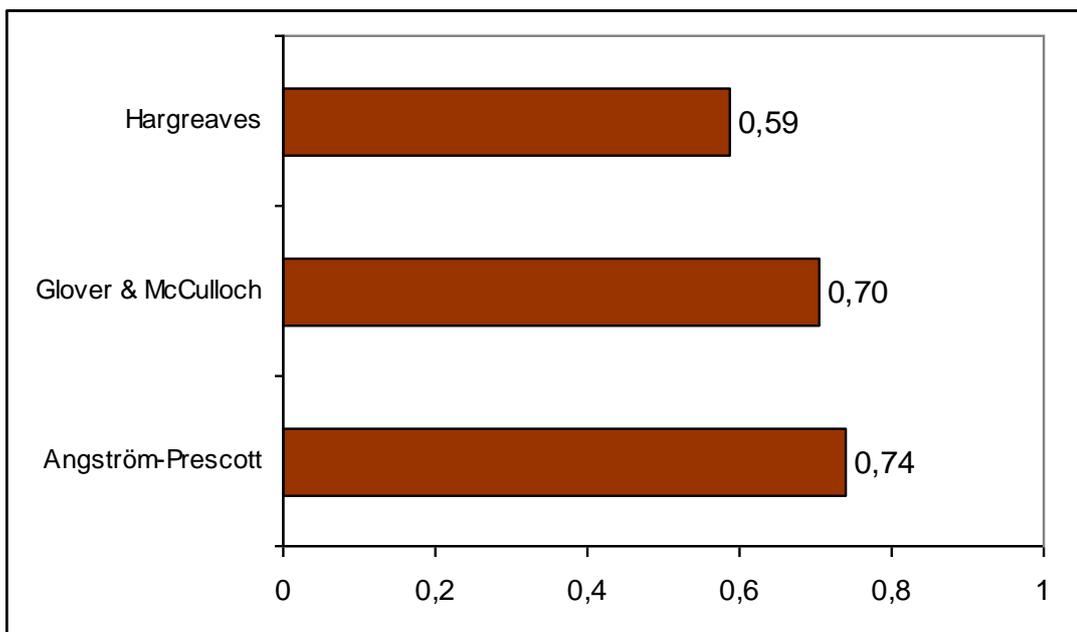


Figura 4.8: Índice de Concordância.

O índice c proposto por Camargo e Sentelhas (1997), indica o desempenho das equações. Como mostra a Figura 4.9, o índice c para a equação de Angström-Prescott é de 0,68, o que é interpretado como um desempenho bom segundo o critério de classificação proposto pelos autores citados (ver Tabela 3.1 do capítulo 3). A equação de Glover & McCulloch apresentou o índice c de 0,64, tendo um desempenho mediano. Já a equação de Hargreaves teve o índice c de apenas 0,44, caracterizando, assim, um desempenho ruim.

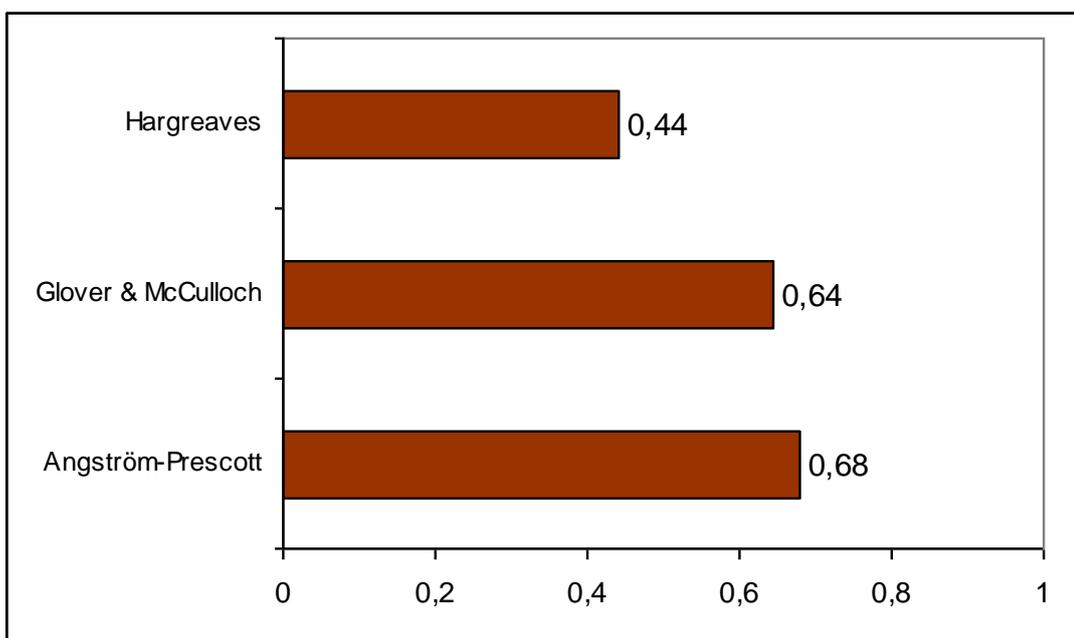


Figura 4.9: Índice de Desempenho.

4.3 Avaliação das equações em diferentes condições de nebulosidade

Os resultados anteriores consideram todas as condições de cobertura de nuvens presentes durante o ano de 2001 na localidade estudada. Nessas condições, estão incluídos valores de razão de insolação n/N que variam de aproximadamente 0,01 a 0,80.

Nesse sentido, com o intuito de avaliar o desempenho das equações em diferentes condições de nebulosidade, foi determinado o ERM para diferentes faixas de valores da razão n/N , conforme apresentado na Figura 4.10. Percebe-se o aumento do erro conforme a razão de insolação diminui. Para valores de n/N inferiores a 0,70, o ERM apresenta valores acima de 40% para as três equações avaliadas. Os menores valores de ERM são observados quando a razão n/N é igual ou superior a 0,70. Nesse caso, o ERM assume valores iguais a 25,19%, 31,67% e 32,84% para as equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e

Hargreaves, respectivamente. Os resultados indicam que para valores de n/N gradativamente menores a estimativa da radiação solar global diária apresenta erros gradativamente maiores, chegando a valores extremamente altos. Por outro lado, mediante o comportamento do erro em função da razão n/N , acredita-se que o desempenho dessas equações sejam satisfatórias para razões de n/N superiores a 0,90. No entanto, não foi possível avaliar as equações para essa situação, tendo em vista que neste estudo não ocorreram valores para a razão n/N superiores a 0,80.

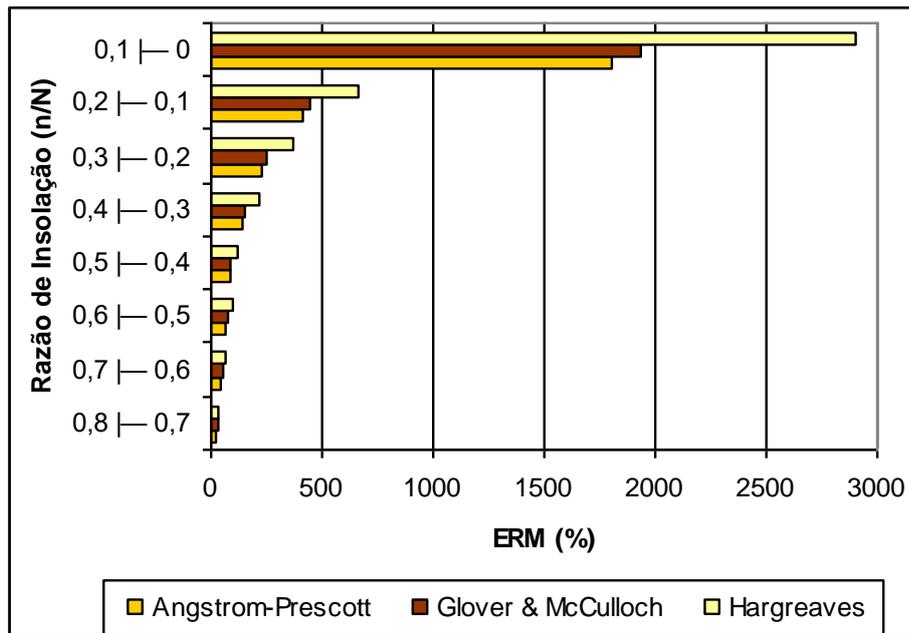


Figura 4.10: ERM por razão de insolação obtidos pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves.

4.4 Ajuste de curva

As três equações de estimativa de R_s foram ajustadas através de uma regressão linear feita para cada uma delas. A partir da regressão linear, os valores estimados foram comparados com os observados, como mostrado nas Figuras 4.11, 4.12 e 4.13 dando origem às seguintes relações:

$$M = 1,01AP - 6,30 \quad \text{Eq. 4.1}$$

$$M = 0,96GM - 6,35 \quad \text{Eq. 4.2}$$

$$M = 0,83H - 5,62$$

Eq. 4.3

onde M representa os valores de R_s medidos, AP representa os valores estimados pela equação de Angström-Prescott, GM representa os valores estimados pela equação de Glover & McCulloch e H representa os valores estimados pela equação de Hargreaves.

Nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13, são exibidas análises de regressão linear em que se relacionam os valores estimados com os valores observados. Pode-se observar nessas figuras, que as equações de Angström-Prescott e de Glover & McCulloch têm dispersões muito parecidas, o que fica claro pelos seus valores do coeficiente de determinação R^2 . No caso da equação de Angström-Prescott, o valor de R^2 foi de 0,8369 e no da equação de Glover & McCulloch, R^2 foi de 0,8335. Já no caso da equação de Hargreaves, R^2 foi de 0,5716, representando o pior ajuste em relação aos valores medidos.

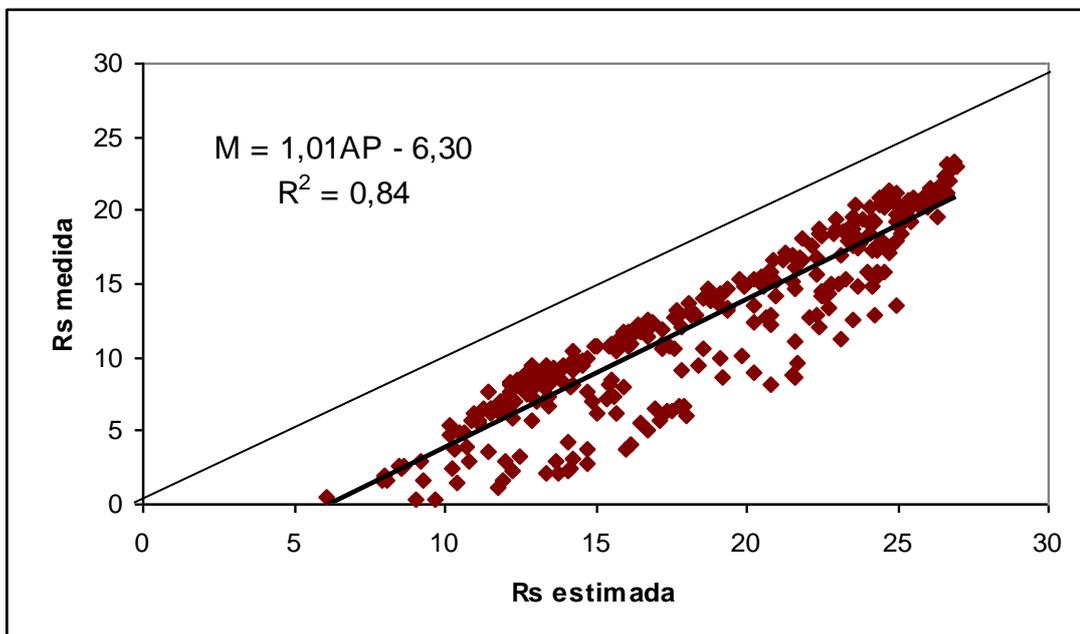


Figura 4.11: Regressão Linear feita para a equação de Angström-Prescott.

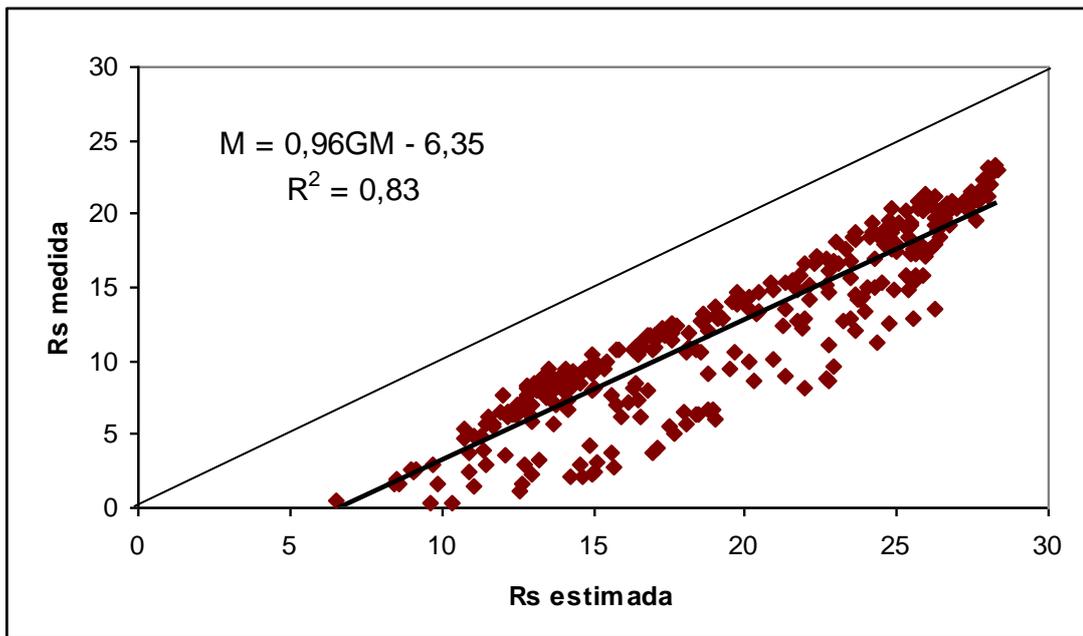


Figura 4.12: Regressão Linear feita para a equação de Glover & McCulloch.

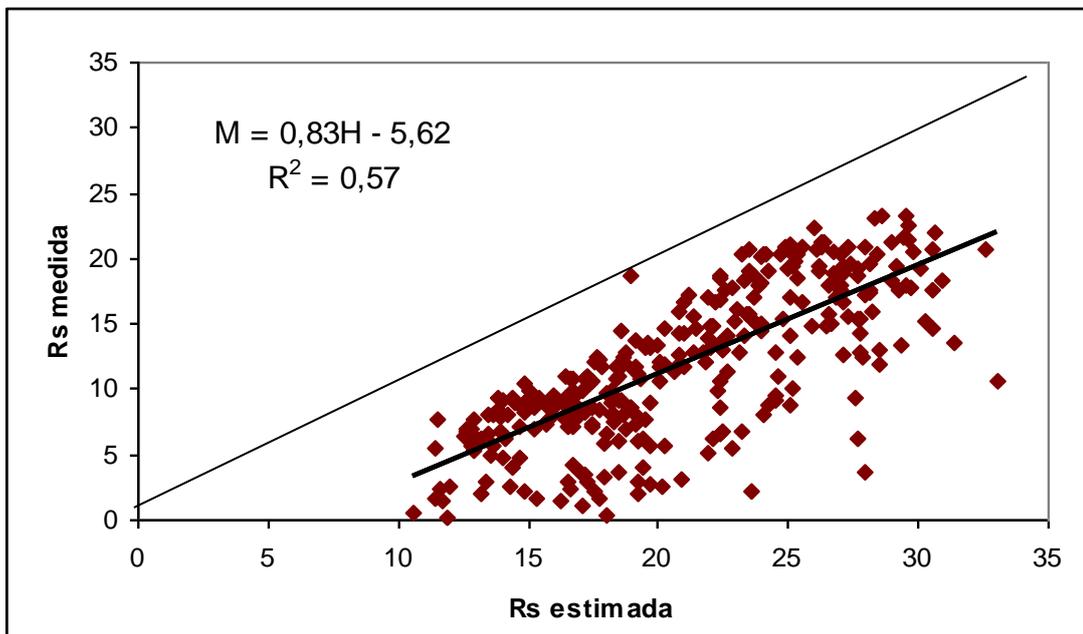


Figura 4.13: Regressão Linear feita para a equação de Hargreaves.

Na Figura 4.14, ilustram-se as médias mensais das observações de radiação solar global diária e das estimativas de R_s obtidas pelas três equações empíricas após o ajuste de curva. As médias dos valores calibrados de R_s ficaram muito próximas às médias dos valores observados, com diferenças inferiores a 3,00 MJ/m²dia.

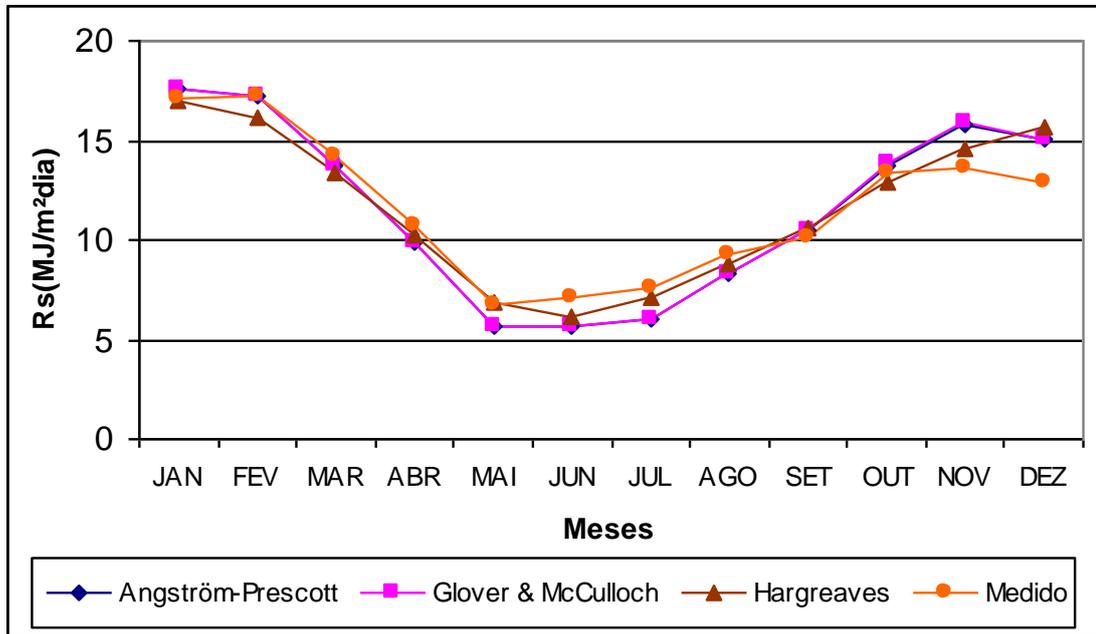


Figura 4.14: Médias mensais da radiação solar global diária medida e estimada pelas equações ajustadas.

Os resultados do Erro Quadrático Médio mensal para as três equações ajustadas são ilustradas na Figura 4.15. As estimativas da equação de Angström-Prescott após o ajuste de curva obtiveram erros que variaram entre 1,25 MJ/m²dia no mês de maio e 3,65 MJ/m²dia no mês de dezembro. A equação ajustada de Glover & McCulloch apresentou erros que variaram de 1,26 MJ/m²dia em maio a 3,69 MJ/m²dia em dezembro. Já as estimativas da equação ajustada de Hargreaves obtiveram valores que variaram entre 1,44 MJ/m²dia em junho e 6,46 MJ/m²dia em dezembro.

Em comparação com os EQM encontrados anteriormente, esses resultados são melhores. O erro da equação de Angström-Prescott passa a ser até 5,34 MJ/m²dia menor no mês de novembro e o erro da equação de Glover & McCulloch tem uma redução de até 6,41 MJ/m²dia nesse mesmo mês. O EQM da equação de Hargreaves obteve as maiores reduções, chegando a 7,47 MJ/m²dia no mês de dezembro.

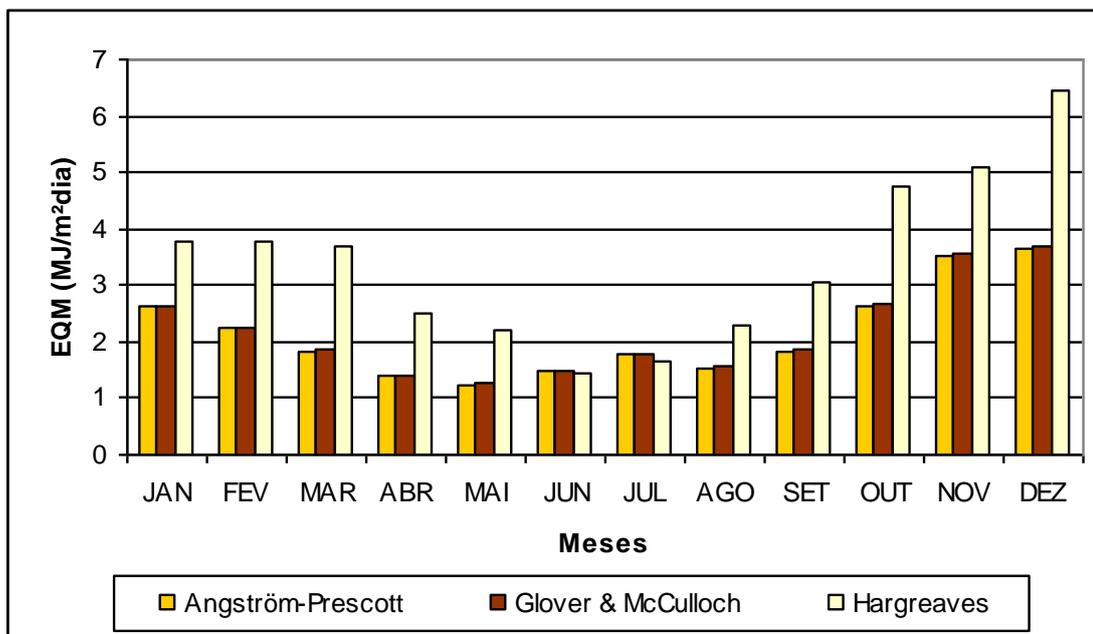


Figura 4.15: Erro Quadrático Médio Mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.

Os resultados do Desvio Médio mensal para as três equações ajustadas são ilustradas na Figura 4.16. A partir desses resultados pode-se perceber que as estimativas da equação de Angström-Prescott subestimaram o valor da R_s nos meses de março a agosto, variando de -0,40 a -1,65 MJ/m²/dia. Nos outros meses, a equação de Angström-Prescott superestimou os valores de R_s , variando de 0,05 a 2,25 MJ/m²/dia. As estimativas da equação de Glover & McCulloch também subestimaram o valor da R_s nos meses de março a agosto, variando de -0,41 a -1,66 MJ/m²/dia. Nos outros meses, o DM desta equação variou entre 0,04 e 2,27 MJ/m²/dia. Por fim, as estimativas da equação de Hargreaves superestimaram o valor de R_s nos meses de maio, setembro, novembro e dezembro, variando de 0,14 a 2,82 MJ/m²/dia. Nos meses em que essa equação subestimou o valor de R_s , o DM variou de -0,09 a -1,03 MJ/m²/dia. Esses resultados são bem diferentes dos DM encontrados inicialmente. As três equações tinham uma tendência a superestimar a radiação global diária, o que não ocorreu após o ajuste de curva.

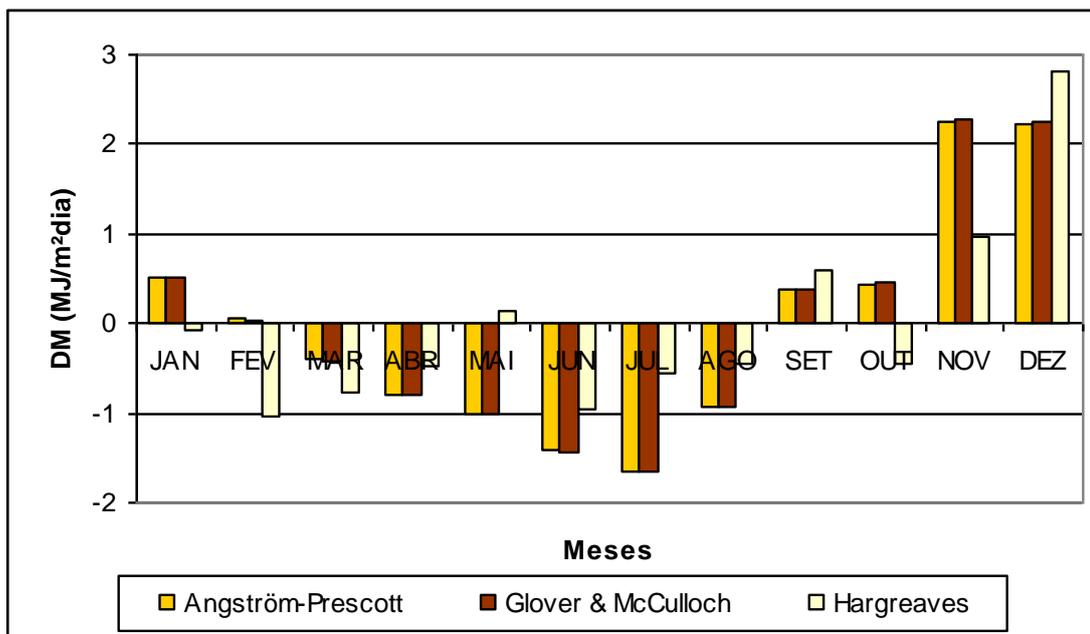


Figura 4.16: Desvio Médio Mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.

Os resultados do Erro Relativo Médio mensal para as estimativas das três equações ajustadas são mostrados na Figura 4.17. O ERM das estimativas da equação de Angström-Prescott após o ajuste de curva variou de 12,70% em abril a 89,40% em outubro. As estimativas ajustadas de Glover & McCulloch obtiveram erros entre 12,90% em abril e 91,92% em outubro. De janeiro a agosto, tanto o ERM das estimativas ajustadas de Angström-Prescott quanto o das estimativas ajustadas de Glover & McCulloch foram menores do que 25%, sendo maiores do que 85% apenas em setembro e outubro. Esses resultados são melhores do que os anteriores ao ajuste de curva. Já o ERM das estimativas ajustadas de Hargreaves variou de 15,98% em junho a 206,48% em outubro. Nos meses de janeiro, fevereiro, abril e junho, as estimativas da equação de Hargreaves após o ajuste de curva apresentaram erros inferiores a 30%, enquanto nos meses de março, maio, julho e agosto o ERM ficou entre 30 e 50%. No entanto, nos meses de setembro, outubro e dezembro, as estimativas da equação de Hargreaves após o ajuste de curva obtiveram erros superiores a 100%. Estes resultados mostram que, apesar das estimativas obtidas após o ajuste de curva serem melhores do que as anteriores, ainda não são boas o suficiente.

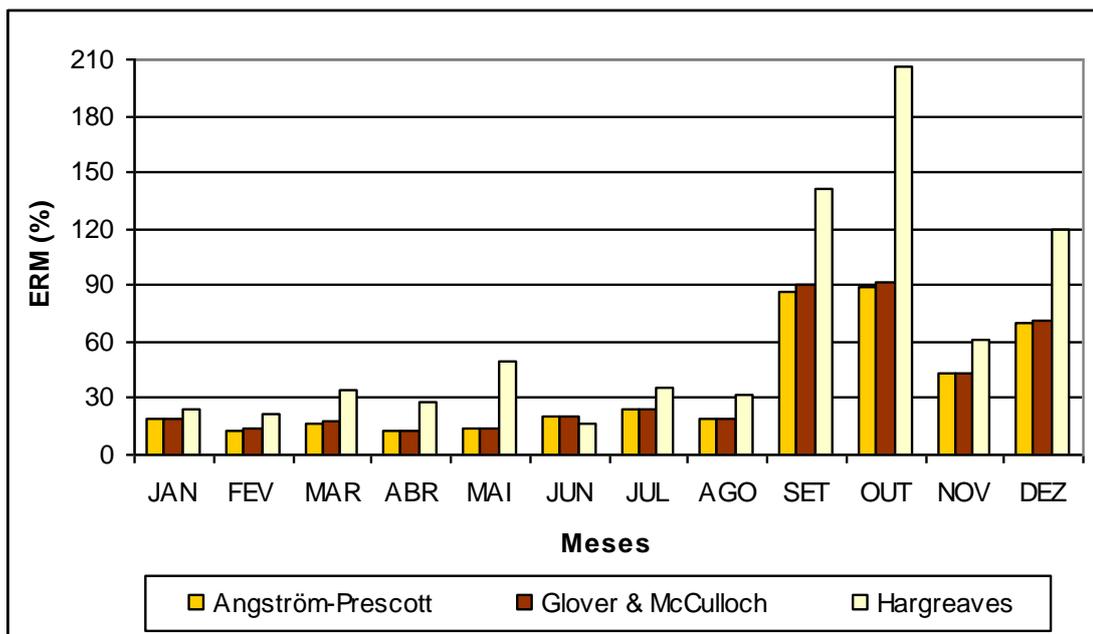


Figura 4.17: Erro Relativo Médio mensal obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva

O Erro Quadrático Médio e o Erro Relativo Médio em escala anual das estimativas de R_s obtidas pelas três equações após o ajuste de curva são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19. Em comparação com os resultados anteriores à calibração, os erros anuais das estimativas de radiação solar global diária foram sensivelmente melhores. O EQM chegou a ter uma redução de $6,13 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$, enquanto o ERM teve uma queda de quase 108% no caso da equação de Hargreaves.

O EQM anual da equação de Angström-Prescott após o ajuste de curva foi de $2,32 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$, o da equação de Glover & McCulloch após o ajuste de curva foi de $2,34 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$ e o da de Hargreaves após o ajuste de curva de $3,76 \text{ MJ/m}^2\text{dia}$. Da mesma forma, o ERM anual dessas três equações foi de, respectivamente, 33%, de 34% e de 60%, o que são resultados relativamente bons para as duas primeiras equações e ruim para a última. O DM anual das estimativas de R_s da primeira equação após o ajuste de curva foi de $2,65 \times 10^{-4} \text{ MJ/m}^2\text{dia}$, o da segunda foi de $9,09 \times 10^{-4} \text{ MJ/m}^2\text{dia}$ e o da última de $\text{MJ/m}^2\text{dia}$, o que indica que, em média, as três equações não se afastaram muito dos valores reais.

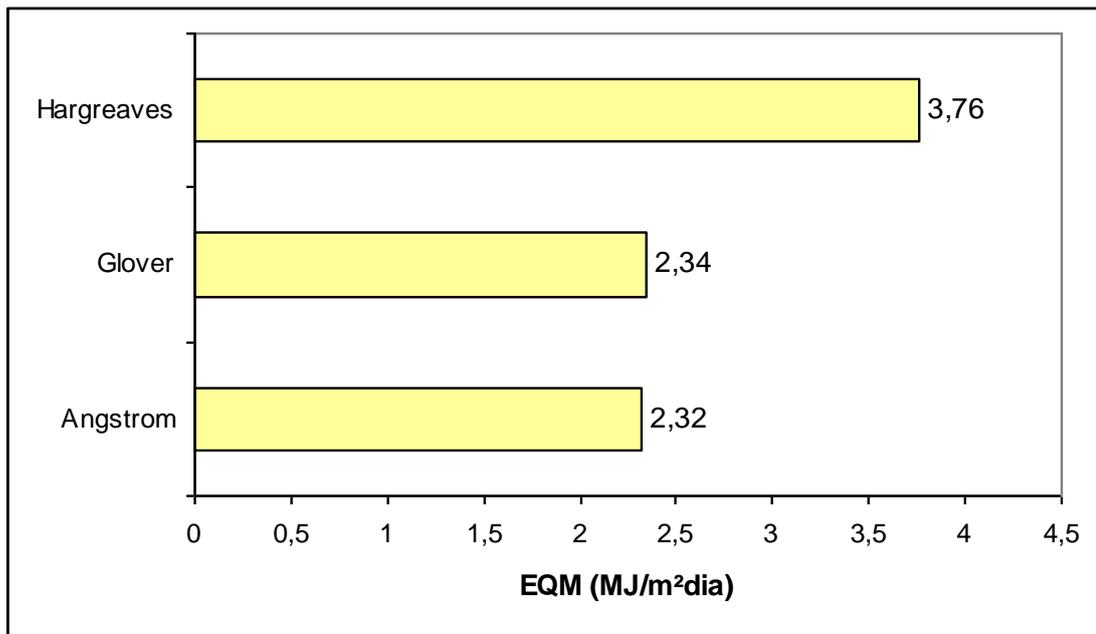


Figura 4.18: Erro Quadrático Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.

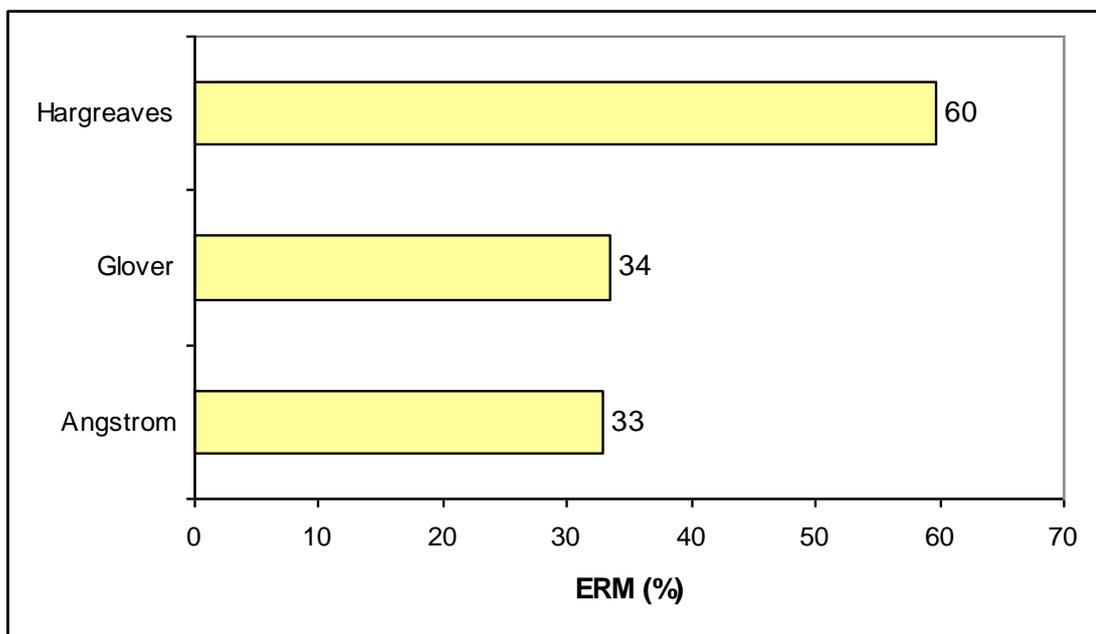


Figura 4.19: Erro Relativo Médio Anual obtido pelas equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves após o ajuste de curva.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nessa avaliação, percebe-se que, para o local e período estudados, as estimativas das três equações estudadas acompanham a tendência de comportamento dos valores observados. As estimativas da equação de Angström-Prescott obtiveram os menores valores de EQM e a de Hargreaves obteve os maiores valores. Os resultados do Desvio Médio mensal indicam que as três equações superestimaram o valor de radiação solar global diária no ano de 2001 nessa localidade. No entanto, os erros foram muito elevados, sendo o ERM superior a 40% em todos os meses e apresentando valores anuais acima de 100% para as três equações avaliadas.

O índice de concordância apresentou melhores valores para as equações de Angström-Prescott e Glover & McCulloch, sendo ruim para a equação de Hargreaves. O índice de desempenho classificou as equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves como boa, mediana e ruim, respectivamente. De um modo geral, os valores do índice de concordância e de desempenho não foram muito altos, o que reforça a idéia de um desempenho fraco das equações.

A avaliação das equações em diferentes condições de nebulosidade mostrou um aumento do erro conforme a razão de insolação diminui, ou seja, os resultados indicam que para valores de n/N gradativamente menores a estimativa da radiação solar global diária apresenta erros gradativamente maiores. Os melhores desempenhos ocorreram quando a razão n/N foi igual ou superior a 0,70. Mediante o comportamento do erro em função da razão n/N , acredita-se que o desempenho dessas equações sejam satisfatórias para razões de n/N superiores a 0,90. Conclui-se que a correção de nebulosidade das equações avaliadas não necessariamente apresenta um bom desempenho em todas as possíveis situações de cobertura de nuvens. Para as condições estudadas, o desempenho dessa correção foi considerado muito pobre.

Com o intuito de melhorar esse desempenho, as equações foram ajustadas por métodos estatísticos. Os resultados deste ajuste foram sensivelmente melhores do que os obtidos inicialmente. No entanto, estes resultados ainda não são bons o suficiente, portanto mais estudos são necessários para confirmar a aplicabilidade destas equações, mesmo após o ajuste.

Recomenda-se a não utilização generalizada das equações de Angström-Prescott, Glover & McCulloch e Hargreaves, em condições de nebulosidade, antes de serem testadas e, se possível, consistentemente calibradas para uma determinada região. Nesse sentido, é

importante mencionar o desempenho mensal diferenciado das equações estudadas. Portanto, sugere-se uma avaliação mensal e se possível calibrações mensais dessas equações, que possivelmente indicariam os meses em que as mesmas poderiam ser utilizadas, conforme o erro máximo admitido para cada estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD F.; ULFAT I. **Empirical models for the correlation of monthly average daily global solar radiation with hours of sunshine on a horizontal surface at Karachi, Pakistan.** Turkish Journal of Physics, v.28, p. 301-307, 2004.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements.** FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; SENTELHAS, P.C.; SILVA, A.A.G. **Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 11, n. 1, p. 63-68, 2003.

ASSIS, F.N.; STEINMETZ S.; MARTINS, S.R.; MENDES, M.E.G. **Aplicabilidade de modelos de estimativa da radiação solar global.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.6, p.91-97, 1998.

ARAÚJO, W.F.; COSTA, S.A.A.; SANTOS, A.E. dos. **Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETO) para Boa Vista, RR.** Revista Caatinga, v.20, n.4, 2007.

BACK, A.J. **Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo.** Engenharia Agrícola, vol.27, n.1, 2007.

BATISTA, W.R.M.; FACCIOLI, G.G; SILVA, A.A.G. da; AGUIAR NETTO, A. O. **Determinação da evapotranspiração de referência na região de Canindé do São Francisco – SE.** In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

BARROS, V.R.; SOUZA, A.P. de; CARVALHO, D.F. de; SILVA, L.D.B. da; SALVADOR, C.A. **Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica–RJ, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos.** In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

BLANCO, F.F.; SENTELHAS, P.C. **Coefficientes da equação de Angström-PreScott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 10, n. 2, p. 295-300, 2002.

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

CAMPELO JÚNIOR, J.H. **Relação sazonal entre radiação solar global e insolação no sudoeste da Amazônia.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 6, n. 2, p. 193-199, 1998.

CAMPOS, J.H.B. da C.; SILVA, V. de P.R. da; BELO FILHO, A.F. **Análise do comportamento da evapotranspiração de referência no nordeste do Brasil em anos de El Nino e La Nina.** In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.

CONCEIÇÃO, M.A.F.; MANDELLI, F. **Estimativa diária da radiação solar incidente com base no número de horas de brilho solar para a região de Bento Gonçalves, RS.** Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 12, Embrapa Uva e Vinho, 2006, 12 p.

CONCEIÇÃO, M.A.F. **Reference evapotranspiration based on Class A Pan evaporation.** Scientia Agricola, v.59, n.3, 2002.

COSTA, L.C.; SANTOS, A.A. dos. **Análise da eficiência do uso da radiação solar para as culturas de milho, soja, arroz e feijão nas diversas regiões produtoras de Minas Gerais.** Engenharia Agrícola, v.20, n.3, p.188-194, 2000.

DANTAS, A.A.A.; CARVALHO, L.G. de; FERREIRA, E. **Estimativa da radiação solar global para a região de Lavras, MG.** Ciência e Agrotecnologia, v.27, n.6, p.1260-1263, 2003.

FACCIOLI, G.G.; BATISTA, W.R.M.; SILVA, A.A.G. da; AGUIAR NETTO, A.O. **Determinação da evapotranspiração de referência na região de Frei Paulo-SE.** In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

FIORIN, D.V.; PES, M.P.; GUEDES, M.; BERTAGNOLLI, R.F.; GUARNIERI, R.A.; MARTINS, F.R.; PEREIRA, E.B.; SCHUCH, N.J. **Estudo da iluminância natural em dias de céu claro em estações da rede SONDA.** In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia,

2006, Florianópolis. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro : Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

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

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation.** Academic Press, 1983, 390 p.

GLOVER, J.; McCULLOCH, J.S.G. **The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine.** Quartely Journal of the Royal Meteorological Society, v. 84, n. 360, p. 172-175, 1958.

JADOSKI, S.O.; MAGGI, M.F.; DENEGA, S.; WATZLAWICK, L.F.; SANDER, L.C. **Comportamento da radiação líquida em Guarupava, região centro sul do estado do Paraná.** In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

LIU, K.N. **An Introduction to Atmospheric Radiation.** Segunda edição. Academic Press, 2002, 583 p.

LUCAS, E.W.M.; SOUSA, F. de A.S. de; SANTOS, L.A.R. dos; SOARES, F. de P.M. **Estimativa da evapotranspiração potencial por meio de métodos baseados na temperatura do ar para estações na bacia hidrográfica do Xingu/PA.** In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

OLIVEIRA, L.F.C. de; CARVALHO, D.F. de; FERREIRA, P.A. **Comparação de metodologias de determinação do coeficiente de dispersão para o cloreto de cálcio em um latossolo vermelho-amarelo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, n.1, p.7-10, 1999.

OLIVEIRA, R.A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G.C.; MATERAM, F.J.V.; CECON, P.R. **Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.12, n.2, p.166-173, 2008.

PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H. **Physics of climate.** American Institute of Physics, 1992, 519 p.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Livraria e Editora Agropecuária Ltda., 2002.

PRESCOTT, J.A. **Evaporation from water surface in relation to solar radiation**. Transactions of Royal Society of Science Austria, v. 64, p. 114-125, 1940.

SACCO, F.G.; ASSIS, S.V. de. **Correlação entre radiações solar global medida e estimada**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.

SAMANI, Z. **Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v.126, n.4, p.265-267, 2000.

SENTELHAS, P.C.; FARIA, R.T. de; CHAVES, M.O.; HOOGENBOOM, G. **Avaliação dos geradores de dados meteorológicos WGEN e SIMMETEO, nas condições tropicais e subtropicais brasileiras, usando modelos de simulação de culturas**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 9, n. 2, p. 357-376, 2001.

SILVA, A.A.G. da; BATISTA, W.R.M.; FACCIOLI, G.G.; AGUIAR NETTO, A.O. Determinação da **evapotranspiração de referência na região de Gararu-SE**. In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

SILVA, L.L. da; MENEZES, H.E.A.; LIMEIRA, R.C.; DANTAS, R.T. **Coefficientes de regressão múltipla para extrapolação da estimativa da irradiação solar global no litoral da Paraíba**. In: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004, Fortaleza. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004.

TAGLIAFERRE, C.; OLIVEIRA, R.A.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DENICULI, W.; MARTINEZ, M. A.; MATERAM, F.J.V. **Estimativa da evapotranspiração de referência usando minievaporímetro operando com irrigâmetro modificado**. Engenharia na Agricultura, v.14, n.3, 212-212 223, 2006.

UDO, S.O. **Contribution to the relationship between solar radiation and sunshine duration in the tropics: a case study of experimental data at Ilorin, Nigéria**. Turkish Journal of Physics, v.26, p. 229-236, 2002.

VALIATI, M.I.; RICIERI, R.P. **Estimativa da irradiação solar global com partição mensal e sazonal para a região de Cascavel – PR.** Engenharia Agrícola, vol.25, n.1, 2005.

VIEIRA, J.P.G.; SOUZA, M.J.H.; SOUSA, F.A.; TEXEIRA, J.M. **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Diamantina, MG.** In: XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracaju. Anais do XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, R.E.; FEDDEMA, J.J.; KLINK, K.M.; LEGATES, D.R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C.M. **Statistics for the evaluation and comparison of models.** Journal of Geophysical Research, 90(5):8995-9005, 1985.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2006. **Guide to meteorological instruments and methods of observation.** Sétima edição, WMO-No. 8. Disponível em <<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Draft-7-edition.html>>. Acesso em 15 dez. 2007.

SITES ACESSADOS

EUROPEAN ORGANISATION FOR ASTRONOMICAL RESEARCH IN THE SOUTHERN HEMISPHERE (ESO). Disponível em: <<http://www.eso.org/public/outreach/eduoff/vt-2004/mt-2003/mt-sun.html>>. Acesso em: 21 nov. 2007.

NASA/MARSHALL SOLAR PHYSICS. Disponível em: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/feature1.shtml>>. Acesso em 21 nov. 2007.

NASA SUN EARTH MEDIA VIEWER: LIVE SOLAR IMAGES. Disponível em: <<http://ds9.ssl.berkeley.edu/viewer/flash/flash.html>>. Acesso em 21 nov. 2007.

SCHARMER, G. Lund Observatory. Disponível em: <<http://www.astro.lu.se/~dainis/HTML/SOLAR.html>>. Acesso em 21 nov. 2007.

TRANSITION REGION AND CORONAL EXPLORER (TRACE). Disponível em: <<http://trace.lmsal.com/Public/sun.htm>>. Acesso em 21 nov. 2007.