



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

TRABALHO DE LICENCIATURA

**Determinação da Radiação Solar Global em  
Moçambique pelo Modelo de Allen para o  
Período 1975 – 2005**

**Autor:** Basílio Zeloso Tamele

Maputo, Junho de 2007



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

Trabalho de Licenciatura

**Determinação Da Radiação Solar Em  
Moçambique Pelo Modelo De Allen  
Para O Período 1975 - 2005**

**AUTOR:** Basilio Zeloso Tamele

**Supervisor:** dr. Marcelino Macome

**Co-Supervisor:** dr. Daniel Zefanias Quissico

Maputo, Junho de 2007

## **Dedicatória**

Dedico o presente trabalho à todos os que me ajudaram tornar o meu sonho numa realidade, em especial à minha família.

# Agradecimentos

O sucesso de qualquer actividade depende, fundamentalmente do esforço das entidades nela envolvidas. Pelo sucesso na realização deste trabalho, quero deixar registado aqui o meu apreço, admiração e principalmente o meu muito obrigado!

Ao departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, por parte dos docentes e funcionários por me ter proporcionado espaço para que me formasse. Os meus agradecimentos estendem-se para os meus supervisores, dr. Marcelino Macome e dr. Daniel Zefanias Quissico, pelo incansável apoio e ensinamento que me deram para que o que um dia foi um sonho se tornasse numa realidade hoje.

Aos meus colegas e amigos do curso, em especial ao André Cuinica, Tomás Nhabetse, Arsénio Cuco, Jeremias Jasse, Marcolino Massango, Arnaldo Simbine, Etelvino Joaquim, Ilídio Nhandane, Caetano Serrote, Guiseppe Garfo e Évisson Chipaumire, vão os meus agradecimentos pelo companheirismo que me ofereceram durante a minha formação.

À família Macondzo, em particular, aos meus tios Raimundo Macondzo e Celina Mataleza, vão os meus agradecimentos pelo apoio e carinho que me proporcionaram durante a minha formação.

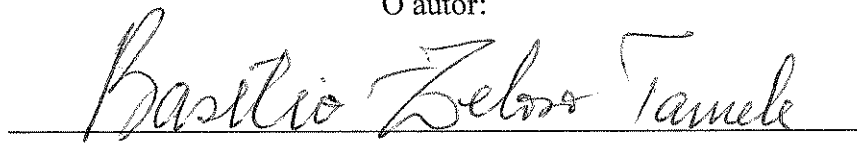
Aos meus pais, Salvador Basílio Tamele e Maria de Fátima Pedro Macondzo, meus irmãos, Ricardina Tamele, Francisco Tamele, Heloide Tamele, Verónica Tamele e Fátima Meiva Tamele, e a minha companheira Laura Louceiro Mavie, vão os meus agradecimentos pelo apoio que me deram e têm sido o grande incentivo da minha vida.

A todos os que não foram aqui mencionados, muito obrigado.

## Compromisso de Honra

Declaro por minha honra que este trabalho é resultado de investigações feitas por mim e que nunca foi submetido para fins de obtenção do grau de licenciatura em Meteorologia na Universidade Eduardo Mondlane.

O autor:

A handwritten signature in cursive script, reading "Basilio Zeloso Tamele", is written over a horizontal line.

(Basilio Zeloso Tamele)

## Resumo

A radiação solar é uma fonte primária de energia na terra, sendo importante a sua quantificação para o seu melhor aproveitamento nas actividades tais como agricultura, fornecimento de energia eléctrica, etc. A radiação solar ao atravessar a atmosfera, divide-se em duas componentes, a *radiação solar directa* e *radiação solar difusa*, e ao conjunto destas é conhecida por *radiação solar global*, que é o total da radiação solar incidente na superfície da terra. Este trabalho teve como objectivo central determinar a radiação solar global em Moçambique com base no modelo de Allen, que se baseia nos valores das temperaturas mínimas e máximas médias mensais e na pressão atmosférica. Para a boa análise do modelo, e com relativa simplicidade, fez-se uma escolha aleatória das estações meteorológicas em que se mede pelo menos temperatura e pressão, e agruparam-se as estações em três regiões (sul, centro e norte) do país. Os resultados mostraram em geral, que a radiação solar global ( $R_g$ ) em Moçambique assume um valor médio anual da ordem de  $20.0 \text{ MJ/m}^2$ , tendo se verificado o valor mais baixo de  $15.2 \text{ MJ/m}^2$  em Junho e o mais elevado  $24.0 \text{ MJ/m}^2$  no mês de Dezembro. E foi possível concluir que o modelo de Allen pode ser usado para estimar a  $R_g$  em Moçambique, com uma boa aproximação entre os valores estimados e observados, sendo válido o coeficiente empírico ( $K_{ra}$ ) sugerido pela literatura (igual a  $0.20$  junto à costa, e  $0.17$  no interior). Porém, este modelo não toma em consideração a dinâmica da atmosfera, precisamente a nebulosidade, humidade e as condições do terreno, sendo necessário um bom conhecimento do clima da região em estudo.

## Símbolos e Abreviaturas

UV	.....	Radiação ultravioleta
$\lambda$	.....	Comprimento de onda
c	.....	Velocidade da luz
$f, \nu$	.....	Frequência de oscilação
c.o.d.	.....	Comprimento de onda
VIS	.....	Radiação visível
IR	.....	Radiação infravermelha
$R_{ex}$	.....	Radiação extra-terrestre ou radiação no topo da atmosfera
$G_{sc}$	.....	Constante solar
dn	.....	Dia Juliano
$\omega$	.....	Ângulo horário
$\varphi$	.....	Latitude
$\delta$	.....	Declinação
$R_g$	.....	Radiação solar global
$R_i$	.....	Radiação solar directa
$R_s$	.....	Radiação solar difusa
$\psi$	.....	Ângulo Azimutal
$\beta$	.....	Ângulo da altura do sol
$I_0$	.....	Insolação astronómica
I	.....	Insolação real
INAM	.....	Instituto Nacional de Meteorologia
$T_{max}$	.....	Temperatura média das máximas mensais
$T_{min}$	.....	Temperatura média das mínimas mensais
$P_0$	.....	Pressão atmosférica local
P	.....	Pressão atmosférica ao nível do mar
$K_r$	.....	Coefficiente empírico
$\varepsilon$	.....	Erro relativo
$\sigma_{er}$	.....	Erro quadrático
$\sigma_s$	.....	Desvio padrão
r	.....	Coefficiente de correlação
ITCZ	.....	Zona de Convergência Inter-tropical

## Lista de tabelas

<b>Tabela 2-1</b> :Variação do ângulo horário com o dia .....	21
<b>Tabela 3-1</b> : Estações radiométricas e os parâmetros que se medem em Moçambique .....	28
<b>Tabela 3-2</b> : Constantes usadas nos cálculos da radiação solar global .....	30
<b>Tabela 3-3</b> : Dia Juliano médio para cada mês. ....	31
<b>Tabela 3-4</b> : conversão de unidades.....	32
<b>Tabela 4-1</b> : Aqui encontram-se os valores não ajustados e ajustados de: Coeficiente empírico ( $K_r$ ), coeficiente de correlação linear ( $r$ ). ....	42



## Lista de figuras

<b>Figura 2-1:</b> Espectro electromagnético da radiação solar no topo da atmosfera e a descrição das regiões das bandas espectrais. Também estão indicadas as percentagens em termo de contribuição de cada região (Cunha, 1977). .....	8
<b>Figura 2-2:</b> Diagrama que ilustra as componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre (Kratzemberg et all, 2003). .....	10
<b>Figura 2-3:</b> É uma ilustração da atenuação que a radiação solar sofre da atmosfera (Cunha, 1977). .....	13
<b>Figura 2-4:</b> ilustração da absorção espectral da radiação solar nos diversos comprimentos de onde pelos gases .....	14
<b>Figura 2-5:</b> Variação da radiação solar na superfície da terra para os dia 21 de Março (equinócio de Outono para HS) e 21 de Junho (solstício de Inverno para HS) . no dia 21 de Junho, o hemisfério Norte está mais iluminado que o hemisfério Sul, e no dia 21 de Março latitudes iguais recebem a mesma quantidade de radiação para ambos hemisférios (Varejão-Silva, 2005). .....	16
<b>Figura 2-6</b> Distribuição da radiação solar diária total ao longo da latitudes sobre uma superfície horizontal, $R_s$ em $\text{kJ/m}^2.\text{dia} \times 10^6$ , em latitudes compreendidas entre $30^\circ \text{ N}$ e $30^\circ \text{ S}$ . Fonte de dados: (Díez, 2000). .....	16
<b>Figura 2-7:</b> O diagrama mostra o trajecto dos raios solares vistos por um observador na superfície da terra num determinado dia, a posição do sol pode ser descrita em termos: do ângulo do zenital ( $\theta_z$ ), do ângulo do azimutal ( $\Psi$ ) e do ângulo solar da altura ( $\beta$ ) (Macome, 2004). .....	18
<b>Figura 2-8:</b> Variação do ângulo de declinação ao longo do ano. Este ângulo varia de $+23,5^\circ$ em Junho a $-23,5^\circ$ em Dezembro, sendo igual a zero nos dias 21 de Setembro e 21 de Março. Estes dias correspondem ao início ou fim de cada esta estação do ano (Varejão-Silva, 2005)..	19
<b>Figura 2-9:</b> Fotografia de um Piranômetro Eppley PSP. É usado para medição directa da radiação solar global e difusa, numa faixa compreendida entre $0.3$ e $3.0 \mu\text{m}$ . .....	22
<b>Figura 2-10:</b> Fotografia de um Pireliômetro de Cavidade, e destina-se para a medição da radiação solar directa. ....	23

<b>Figura 2-11:</b> É fotografia de um Heliógrafo de Campbell-Stokes, serve para medir a Insolação astronómica.....	24
<b>Figura 4-1:</b> Comportamento da Radiação solar Global mensal na Zona Sul de Moçambique no período 1975 – 2005. ....	35
<b>Figura 4-2:</b> Comparação da radiação solar global e estimada para a estação de Maputo. Foi escolhida como estação representativa da zona sul. ....	36
<b>Figura 4-3:</b> Comportamento da Radiação solar Global mensal na Zona Centro de Moçambique no período 1975 – 2005. ....	37
<b>Figura 4-4:</b> Comparação da radiação solar global e estimada para a estação de Beira. Foi escolhida como estação representativa da zona centro. ....	38
<b>Figura 4-5:</b> Comportamento da Radiação solar Global mensal na Zona Norte de Moçambique no período 1975 – 2005. ....	39
<b>Figura 4-6:</b> Comparação da radiação solar global e estimada para a estação de Pemba. Foi escolhida como estação representativa da zona norte.....	40
<b>Figura 4-7:</b> Comportamento da radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen em termos médios nas regiões sul, centro e norte do país, para o período 1975 – 2005.....	41

# Índice

1	Introdução .....	1
	Importância da radiação solar .....	2
1.1	Objectivos .....	4
1.1.1	Objectivo geral.....	4
1.1.2	Objectivos específicos .....	4
1.2	Alguns conceitos da radiação solar.....	4
1.3	Técnicas de medição da radiação solar.....	5
2	Resumo Teórico .....	7
2.1	Radiação Solar .....	7
2.2	Distribuição Espectral da Radiação Solar.....	7
2.3	Componentes da radiação solar .....	9
2.3.1	Radiação no topo da atmosfera.....	9
2.3.2	Radiação solar que atinge a superfície da Terra .....	9
2.4	Efeito da atmosfera sobre a radiação solar .....	11
2.4.1	Efeito de estufa .....	13
2.5	Distribuição espacial e temporal da radiação solar.....	15
2.5.1	Distribuição espacial da radiação solar.....	15
2.5.2	Distribuição temporal da radiação solar .....	17
	<i>Declinação solar</i> .....	19
2.5.3	Insolação .....	20
2.6	Medição da radiação solar .....	21
2.6.1	Técnicas de medição da radiação solar.....	21
2.6.2	Modelação da radiação solar.....	24
3	Materiais e métodos .....	28
3.1	Descrição do modelo de Allen (1997) .....	29
3.1.1	Ajuste do coeficiente Kra.....	29
3.2	Etapas da realização do trabalho.....	30
3.3	Limitações do modelo de Allen.....	33
4	Resultados e Discussão .....	34

4.1	Radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen para a região Sul de Moçambique .....	34
4.2	Radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen para a região Centro de Moçambique .....	36
4.3	Radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen para a região Norte de Moçambique .....	38
5	Conclusões .....	44
5.1	Recomendações .....	44

# 1 Introdução

A radiação solar constitui a fonte primária de energia responsável por todos os fenómenos e processos físicos, químicos e biológicos observados na natureza. Ela pode ser aproveitada de várias maneiras, na forma térmica para aquecimento de ar e água; na forma fotoeléctrica para iluminação e aquecimento, para fins domésticos e industriais, além da importância que possui para o processo da fotossíntese na biomassa.

A radiação solar, em relação ao seu percurso para a superfície da terra, é comumente subdividida em duas (2) componentes a saber:

- Radiação solar directa que é a irradiância proveniente do sol e que atinge a superfície terrestre sem sofrer atenuação no seu percurso.
- Radiação solar difusa, conhecida como a irradiância proveniente do sol que atinge a superfície da terra após ter sofrido uma alteração da sua direcção pelos gases (nuvens, partículas sólidas em suspensão na atmosfera) constituintes da atmosfera.

E ao conjunto das duas componentes se designa por radiação solar global, conhecida também como o total de energia emitida pelo sol, que incide sobre a superfície terrestre. A radiação solar global é uma onda electromagnética de comprimento de onda compreendido entre  $\sim 0.1$  a  $4.0 \mu\text{m}$  do espectro electromagnético (Martin et al, 2004). A radiação solar global é a principal fonte de energia na terra, ela é responsável pela distribuição da fauna e da flora no planeta, influenciando directamente as actividades fisiológicas dos seres vivos e fenómenos climáticos.

Pela importância da radiação solar global na agricultura, aproveitamento de energia, manutenção da vida na superfície terrestre, é necessário estimar a quantidade disponível, para o seu melhor aproveitamento, ou seja para a elaboração de projectos que melhor se adequam para cada ponto, e situação. Para se conhecer a quantidade da radiação solar global procede-se de duas maneiras, a medição directa que é feita através de instrumentos e medição indirecta que envolve a modelação, como é o caso da estimativa da radiação solar global com base por exemplo, no número de horas do brilho solar (Lundari, 1994).

A medição directa tem custos elevados na aquisição de instrumentos e pessoal para a manutenção técnica, o que dificulta para muitos países, instalações de estações radiométricas em quantidade que corresponde à extensão e necessidades do território. Os métodos de medição indirecta através de modelos empíricos constituem uma alternativa razoável para se ultrapassar aquelas dificuldades.

O presente trabalho, dedicou-se a estimativa (ou modelação) da radiação solar global, tendo como base os valores das temperaturas máximas e mínimas médias mensais em algumas estações de Moçambique, no período entre 1975 a 2005, visto que quase todo o país consegue medir a temperatura, e ainda por situar-se numa zona inter-tropical onde os valores médios da radiação solar variam pouco durante o ano.

### *Importância da radiação solar*

A radiação solar é o elemento fundamental para quase todos os fenómenos que ocorrem na natureza, para além de que mesmo a manutenção da vida no planeta Terra depende essencialmente deste factor. A radiação solar para além de determinar o clima, constitui uma fonte energética “limpa”, ou seja não poluente, tanto para a geração de energia eléctrica como para o aquecimento da água e ambientes internos (Website1).

A radiação solar ao atingir a superfície da terra aquece as moléculas de ar e água, estas por sua vez agitam-se, separando-se umas das outras. No movimento destas partículas ocorrem trocas de energia e ainda transporte de massa da terra para atmosfera e vice-versa e ainda na horizontal, através da evaporação e transpiração (circulação geral dos oceanos e da atmosfera), contribuindo para a formação das nuvens na atmosfera e posteriormente da precipitação (ciclo hidrológico), e ainda para as variações do tempo e clima em geral.

A radiação solar, participa na síntese da vitamina D na pele através dos raios solares na região ultravioleta (UV), para além do conforto que proporciona ao organismo humano. Ela fornece

luz para a fotossíntese, processo pelo qual as plantas usam essa energia para crescer e eventualmente prover alimentos para outros seres através da cadeia alimentar.

É de realçar que a radiação solar quando em excesso, pode causar problemas à vida, tais como: queimaduras, o fotoenvelhecimento e o câncer da pele. Entretanto, a radiação UV é usada pelos médicos em algumas circunstâncias especiais para tratamento de afecções cutâneas quando nenhum outro tipo de tratamento se mostrou eficiente; em todo caso, é bom lembrar que a pele sadia é lesada nesse tipo de terapia (Website2).

### ***Motivação***

A energia é um elemento indispensável nas diversas actividades da sociedade humana, sendo mais comum para o uso doméstico como energia eléctrica. Sabe-se que não é fácil montar uma rede eléctrica convencional que possa alimentar todo o nosso país, em especial para as zonas rurais. Entretanto é imperioso que se encontre outras vias alternativas de energia de modo a responder em momento certo as necessidades de todos os Moçambicanos, tomando em consideração o actual cenário da poluição ambiental.

Sendo o sol uma fonte limpa e gratuita de energia, e que é disponível quase em qualquer lugar do mundo, todo o mundo tem se preocupado em desenvolver técnicas para o uso e aproveitamento desta energia. E para tal é necessário em primeiro lugar avaliar o potencial de radiação solar da região onde se pretende usá-la, para melhor decidir se é viável ou não a implementação do projecto na região em causa.

A medição directa através de instrumentos não é de fácil acesso, devido a vários factores já mencionados, mas é necessário quantificar a radiação solar. Deste modo a solução alternativa tem sido a modelação. Mas os modelos diferem-se nas variáveis que usam para a estimativa da radiação solar. Um exemplo concreto que mais vezes foi usado em Moçambique é o modelo de Ångström, que se baseia no número de horas de brilho solar.

Em Moçambique, nem todas as estações meteorológicas conseguem medir o número de horas do brilho solar (insolação), torna-se necessário aplicar outros modelos que possam quantificar a radiação solar com base nos parâmetros disponíveis em quantidade. Neste caso escolheu-se o modelo de Allen, por este basear-se em dados de temperatura e de pressão, parâmetros que são medidos em quase todas estações meteorológicas do país.

## **1.1 Objectivos**

Os objectivos a atingir neste trabalho são:

### **1.1.1 Objectivo geral**

- Determinar a radiação solar global em Moçambique com base nos valores de temperatura máxima e mínima média mensal observados no período compreendido entre 1975 e 2005.

### **1.1.2 Objectivos específicos**

- Verificar o modelo de Allen em Moçambique;
- Comparar os resultados deste modelo com outros já difundidos no país.

## **1.2 Alguns conceitos da radiação solar**

Em física, define-se radiação como sendo partículas e campos que se propagam transferindo energia no espaço que pode estar preenchido ou não por matéria (Díez, 2000).



A radiação solar é a designação dada à energia radiante emitida pelo Sol, em particular aquela que é transmitida sob a forma de radiação electromagnética (Díez, 2000). A radiação electromagnética é constituída por campos eléctrico e magnético variando no espaço e no tempo. É caracterizada pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) e pela frequência ( $f$ ) da oscilação e possui uma velocidade ( $c$ ) constante. O comprimento de onda e a frequência são grandezas inversamente proporcionais, ou seja:

$$\lambda \sim \frac{1}{f} \quad (1)$$

A radiação solar é caracterizada por um espectro electromagnético, em que a radiação está dividida em bandas espectrais (ultravioleta, visível e infravermelha) de acordo com o seu comprimento de onda e da frequência. Antes de atingir a superfície da Terra, a radiação solar sofre vários processos, sendo os mais importantes: o *espalhamento*, a *reflexão* e a *absorção*. E chega à superfície de duas formas: *radiação solar directa* e *radiação solar difusa* e ao conjunto destas denomina-se *radiação solar global*.

### 1.3 Técnicas de medição da radiação solar

Para quantificar a radiação solar tem-se usado duas técnicas, a saber: medição directa através de instrumentos e a medição indirecta através de modelos (Arruda, 2004). A medição directa fornece valores reais num determinado instante do lugar em estudo. E é importante para a previsão do tempo e clima, e ainda no monitoramento de outras actividades que dependam da energia solar (Ayoade, 1991), mas é necessário que haja uma vasta densidade de estações de registos (estações actinométricas).

Quando se trata de regiões vastas como um país, normalmente a densidade das estações actinométricas é baixa, pelo que a medição indirecta através de uso de modelos para estimar a radiação solar em locais onde não existem registos de valores experimentais tem sido o melhor recurso. Existem basicamente dois tipos de modelos: os modelos teóricos e modelos empíricos.

Os modelos teóricos baseiam-se fundamentalmente em propriedades ópticas mensuráveis da atmosfera como o percurso óptico e o albedo atmosférico. Estes modelos têm uso restrito porque são em geral válidos para determinadas condições de tempo, como seja situações de nebulosidade ou para condições de céu limpo.

Enquanto que os modelos empíricos, resultam da tentativa de estabelecer relações estatísticas entre a radiação solar e outras variáveis meteorológicas de superfície. Como as estações meteorológicas existem numa malha muito mais densa que as actinométricas, registando valores de diversos parâmetros meteorológicos correntes, pode-se deste modo estimar valores da radiação solar com base nestes parâmetros, para um número considerável de pontos. Os modelos empíricos não tomam em consideração alguns factores que podem alterar o comportamento da radiação solar na superfície, como é o caso da nebulosidade, humidade e cobertura do solo.

## 2 Resumo Teórico

### 2.1 Radiação Solar

O sol fornece anualmente à atmosfera terrestre cerca de  $1.5 \times 10^{18}$  kWh de energia, o que corresponde a aproximadamente 1000 vezes o consumo mundial de energia na actualidade (McDaniels, 1984). Este facto leva a concluir que para além de ser responsável pela manutenção da vida no planeta, a radiação solar é uma inesgotável fonte de energia, cuja exploração pode contribuir para o desenvolvimento económico e social do país, sobretudo das comunidades rurais localizadas além das redes de fornecimento da energia eléctrica convencional.

Radiação solar é a energia radiante emitida pelo Sol, que é transmitida sob a forma de onda electromagnética. Cerca de metade desta energia é emitida como luz visível na parte de frequência mais alta do espectro electromagnético e o restante na banda do infravermelho e como radiação ultravioleta.

### 2.2 Distribuição Espectral da Radiação Solar

O Sol emite radiação electromagnética, cujos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) vão de centenas de metros até valores inferiores a  $10^{-10}$  metros. A radiação electromagnética tem características ondulatórias e propaga-se no vácuo com uma mesma velocidade ( $c$ ), e que tem o valor de  $2.998 \times 10^8$  m/s (Arruda, 2004). Por isso, entre o comprimento de onda ( $\lambda$ ), e a frequência ( $\nu$ ), existe uma relação, dada pela expressão:

$$c = \lambda \nu \quad (2)$$

O espectro da radiação é comumente dividido em três regiões principais em função do comprimento de onda. Assim entre  $\sim 0.4$  e  $0.73 \mu\text{m}$  encontra-se a radiação visível (VIS) e que representa uma pequena faixa do espectro quando comparada com as outras faixas. A radiação do comprimento de onda (c.d.o) inferior a  $0.4 \mu\text{m}$  é chamada radiação ultravioleta (UV), e radiação com c.d.o. superior a  $0.73 \mu\text{m}$  é chamada de radiação infravermelha (IR).

As regiões do espectro são designadas de acordo com os comprimentos de onda ou de acordo com a frequência. As regiões do espectro do ultravioleta e do infravermelho referem-se a frequências mais elevadas e mais baixas, respectivamente quando comparadas com as frequências do visível. É usual caracterizar a radiação do espectro solar pelos seus comprimentos de onda do que pelas frequências. Ultravioleta quer dizer no domínio das frequências “acima do violeta”, infravermelho “abaixo do vermelho” e visível é região onde se consegue detectar a luz solar através dos olhos e localiza-se entre o violeta e o vermelho. A Figura 2.1 mostra o espectro da radiação solar incidente no topo da atmosfera (Cunha, 1977).

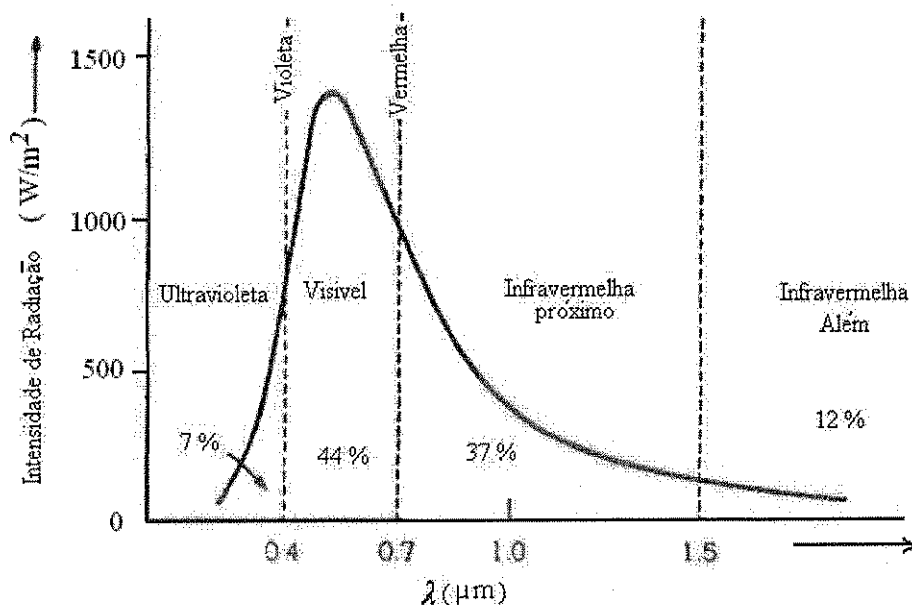


Figura 2-1: Espectro electromagnético da radiação solar no topo da atmosfera e a descrição das regiões das bandas espectrais. Também estão indicadas as percentagens em termos de contribuição de cada região (Cunha, 1977).

## 2.3 Componentes da radiação solar

### 2.3.1 Radiação no topo da atmosfera

Como já foi mencionado na secção 2.1, radiação solar é uma onda electromagnética que é emitida pelo sol. A radiação solar que incide no topo da atmosfera é por vezes chamada por Radiação Solar Extra-Terrestre (Varejão-Silva, 2005).

Segundo Cooper (1969), citado por Duffie Beckman (1961) e ASHRAE (1999), a radiação extra-terrestre pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$R_{ex} = \frac{24 \times 3600 \times G_{sc}}{\pi} \left[ 1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 dn}{365}\right) \right] \times \left[ \cos\phi \cos\delta \sin\omega + \frac{2\pi\omega}{360} \sin\phi \sin\delta \right] \quad (3)$$

Onde:  $G_{sc}$  - é a constante solar e é igual a  $1367 \text{ J/m}^2$ ;  $dn$  - dia Juliano e varia de 1 a 365;  $\phi$  - latitude dum lugar;  $\omega$  - ângulo horário;  $\delta$  - declinação dos raios solares que varia de  $-23.5^\circ$  a  $+23.5^\circ$ .

A parte desta radiação que penetra na atmosfera atingindo a superfície terrestre é conhecida por *radiação de curto comprimento de onda*.

### 2.3.2 Radiação solar que atinge a superfície da Terra

Devido à atenuação no seu percurso para a superfície da terra, a radiação solar divide-se em duas categorias distintas: *radiação solar directa*, definida como sendo a radiação recebida numa superfície horizontal proveniente do ângulo sólido limitado ao disco solar ( $\approx 32$  minutos), durante o intervalo de tempo (Arruda, 2004) em que o sol se encontra descoberto e *radiação solar difusa*, que é a radiação recebida na superfície horizontal que provém de todos

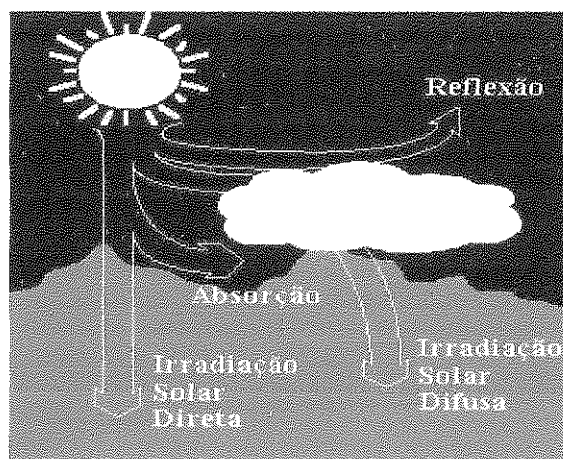
ângulos, à excepção do ângulo sólido limitado ao disco solar. E que o somatório destas denomina-se de *radiação solar global*. Isto é:

$$R_g = R_i + R_s \quad (4)$$

Onde:  $R_g$  – radiação global;  $R_i$  – radiação directa;  $R_s$  – radiação difusa.

Pode-se definir a radiação global como a quantidade de energia solar que num dado instante e local atinge a superfície terrestre, ou seja, a radiação solar proveniente dum ângulo sólido de  $2\pi$  que incide sobre a superfície terrestre (Kratzenberg et al, 2003).

A radiação solar atinge a superfície terrestre depois de sofrer vários processos: absorção, reflexão e difusão, que resulta na sua atenuação. Num dia de céu limpo, a quantidade radiação solar directa é superior à da radiação solar difusa. Em dias de céu completamente nublado, a radiação que chega à superfície da Terra é apenas a radiação solar difusa, e desempenha um papel muito importante na actividade agrícola, na síntese da vitamina D na pele humana, etc. A figura 2.2, é uma ilustração da forma como a radiação solar atinge a superfície da terra.



**Figura 2-2:** Diagrama que ilustra as componentes da radiação solar incidente na superfície terrestre (Kratzenberg et al, 2003).

## 2.4 Efeito da atmosfera sobre a radiação solar

Ao atravessar a atmosfera a radiação solar é atenuada por espalhamento, reflexão e absorção. O *espalhamento* ocorre quando se interpõem partículas atmosféricas na trajectória da radiação solar (região do azul e violeta) (Varejão-Silva, 2005). Conhecem-se dois tipos de espalhamento da radiação solar, a saber: espalhamento de *Rayleigh* e de *Myer*.

O *espalhamento de Rayleigh* ocorre quando há interacção entre as partículas (moléculas de nitrogénio ou de oxigénio e pequenas partículas de poeira) presentes na atmosfera e a radiação solar, em que elas são muito menores que o comprimento de onda da radiação solar. Este tipo de espalhamento afecta principalmente os pequenos c.d.o. e ocorrem predominantemente no topo da atmosfera (website3). A radiação solar, ao atravessar a atmosfera, pequenos c.d.o. do espectro visível são mais espalhados que os c.d.o. maiores da região visível do espectro electromagnético solar. Na nascente ou poente do sol, os raios solares percorrem distâncias mais longas pela atmosfera quando comparada com o meio dia solar, e o espalhamento dos pequenos c.d.o. é mais completo. A irradiância monocromática espalhada é inversamente proporcional a quarta potência (eq. 5), daí a aparência da cor azul do céu (Website4).

$$E_{\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^4} \quad (5)$$

O *espalhamento de Myer* tem lugar quando há interacção entre as partículas presentes na atmosfera e a radiação solar, em que elas são de tamanho igual ao do comprimento de onda da radiação solar. A poeira, fumaça e vapor de água são as causas comuns do espalhamento de Myer e que afecta os longos comprimentos de onda (website3). Este tipo de espalhamento ocorre nas regiões mais baixas da atmosfera, onde abundam as partículas de tamanho maior.

Também pode ocorrer, quando as partículas (gotas de água, e grandes partículas de poeira) presentes na atmosfera são muito maiores que o c.d.o. da radiação solar. Diz-se então que o *espalhamento é não-selectivo*, porque todos comprimentos são igualmente espalhados. Este

tipo de espalhamento é causado por nevoeiro e nuvens, tendo como resultado a cor branca das nuvens.

As partículas maiores são menos selectivas, reflectindo todos os c.d.o., daí a aparência branca das nuvens. E na *absorção* a radiação é captada por gases e partículas suspensas na atmosfera e posteriormente convertida noutra forma de energia.

Em virtude dos processos espalhamento, reflexão e absorção, nem toda a radiação solar incidente no topo da atmosfera consegue alcançar a superfície da Terra, somente cerca de 25% penetra directamente na superfície da Terra sem nenhuma interferência da atmosfera. Cerca de 30% é reflectida para o espaço sem ser aproveitada na superfície da terra. As nuvens contribuem reflectindo 20% da energia incidente, como se pode ver na figura 2.3.

Ao quociente entre a radiação reflectida e a incidente na superfície denomina-se albedo e mede-se em percentagem (Thornton et al, 1999). A radiação reflectida representa o albedo planetário, que é a capacidade que a terra tem de reflectir energia, e é uma função do estado da vegetação e do solo, tendendo a subir desde os valores próximos de 0.17 em savanas verdes frescas, até 0,35 em desertos arenosos e de um modo geral, a degradação da vegetação faz subir o albedo planetário, ao secar a superfície (Díez, 2000). E a energia restante é absorvida pela atmosfera, particularmente pela superfície terrestre, cerca de 50% (WMO, 2003).

Da mesma forma que as nuvens no seu conjunto absorvem grandes quantidades de energia vindas do sol, também irão absorver maior quantidade de energia reflectida pela Terra. Neste âmbito, a atmosfera desempenha um papel muito importante, serve de barreira ou filtro para a radiação solar, impedindo que o planeta se esfrie rapidamente, ou se aqueça extensivamente.

Os gases constituintes da atmosfera funcionam como controladores da temperatura da superfície terrestre, e qualquer processo que altere a quantidade média dos gases atmosféricos afectará a vida dos seres vivos. Portanto, há que destacar o gás carbónico no controlo da temperatura terrestre, impedindo que uma parte da radiação emitida pela superfície da Terra se escape para o espaço exterior, mantendo um equilíbrio térmico sobre o planeta, tanto durante o dia como durante a noite. O gás carbónico juntamente com o vapor de água é um dos



constituintes do famoso efeito estufa, fenómeno natural que na sua ausência a qualidade de vida no planeta seria péssima, porque a superfície da terra seria coberta de gelo (Website5).

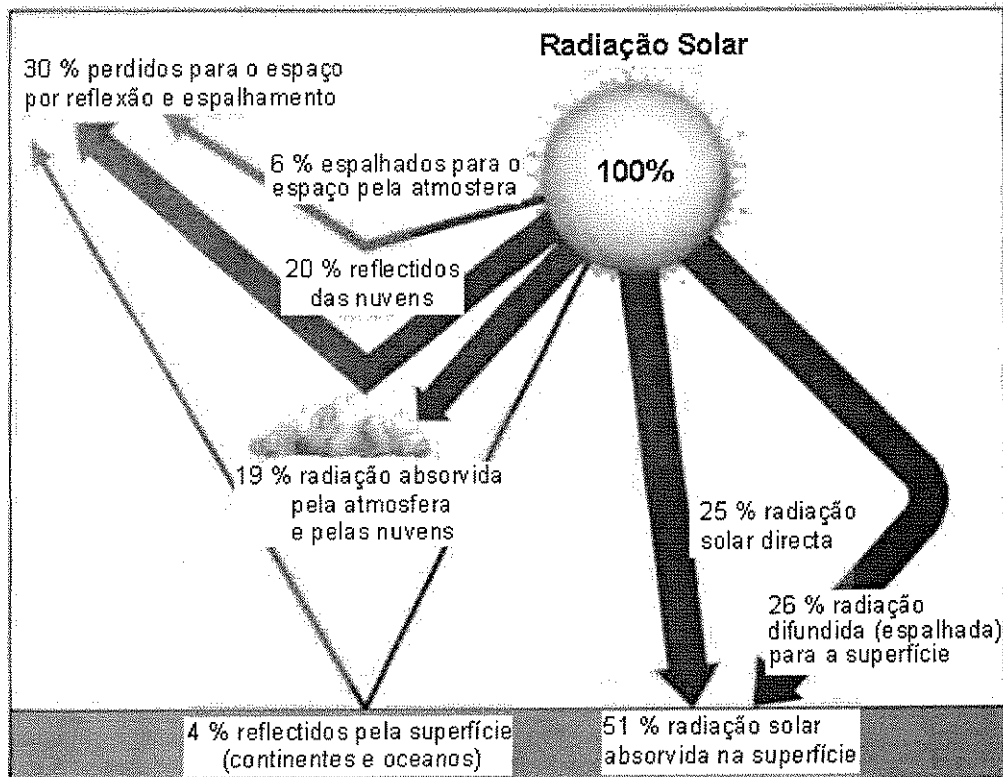
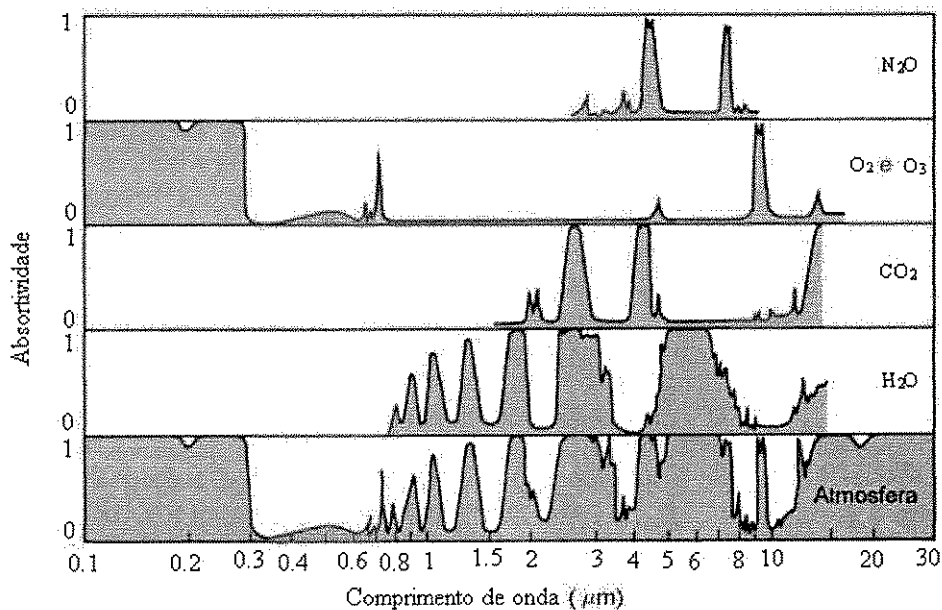


Figura 2-3: Uma ilustração da atenuação que a radiação solar sofre da atmosfera (Cunha, 1977).

### 2.4.1 Efeito de estufa

Da radiação infravermelha total emitida pela superfície terrestre, apenas uma pequena fracção, aproximadamente 9% escapa para o espaço, em sua maior parte na faixa de 8 a 11,5  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda (janela atmosférica), onde não ocorre nenhuma absorção pelos componentes da atmosfera (Burroughs, 2001). A restante radiação emitida pela superfície é absorvida pela atmosfera. Assim embora praticamente transparente à radiação visível, a atmosfera mostra-se opaca no que diz respeito à radiação infravermelha. A figura 2.4, mostra a absorção da radiação solar pelos constituintes da atmosfera nos diversos comprimentos de onda.



**Figura 2-4:** Ilustração da absorção espectral da radiação solar nos diversos comprimentos de onda pelos gases constituintes da atmosfera (website3).

A atmosfera, por seu turno, emite radiação infravermelha para o espaço e para a superfície da Terra. A camada atmosférica situada até 4 Km de altura é responsável, em média por cerca de 98% do fluxo de calor que atinge à superfície procedente da atmosfera (Arruda, 2004).

Quanto maior for a nebulosidade, a humidade do ar e a presença de poluentes, menores serão as perdas radioactivas para níveis mais elevados da atmosfera e daí para o espaço. Essa propriedade é conhecida como efeito de estufa e pode ser facilmente constatada. Tem-se, por exemplo, que um dia de verão muito nublado é quase sempre *abafado* e que, depois de uma noite sem nuvens segue-se uma madrugada muito mais fria do que iria se notar se o céu estivesse encoberto (McDaniels, 1984). Na ausência de nuvens e com ar pouco húmido a superfície recebe um retorno muito pequeno da energia infravermelha que emitira para a atmosfera. Isto justifica o maior resfriamento observado em noites com estrelas em relação ao que se dá em noites nubladas, na mesma época do ano (Varejão-Silva, 2005).

Dos vários gases que contribuem para o efeito de estufa, destacam-se: *vapor de água (H<sub>2</sub>O)* que é o maior constituinte dos gases de estufa e a sua quantidade varia no tempo e no espaço, *dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)* o segundo mais importante, *o metano (CH<sub>4</sub>)*, *o ozónio (O<sub>3</sub>)* e o

*óxido nítrico* ( $N_2O$ ). Os *compostos de clorofluorcarbono* (*CFCS*), fabricados pelo homem, também são capazes de aprisionar calor (Robredo, 1952).

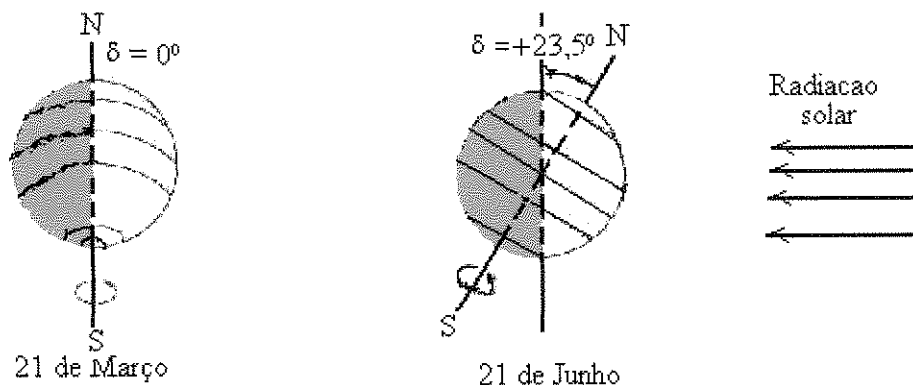
## **2.5 Distribuição espacial e temporal da radiação solar**

A radiação solar que chega na superfície da terra, varia de um lugar para outro em função da localização geográfica, ou seja, da sua latitude. Por outro lado, para o mesmo lugar, a quantidade de radiação irá variar ao longo do dia, mês e época do ano.

### **2.5.1 Distribuição espacial da radiação solar**

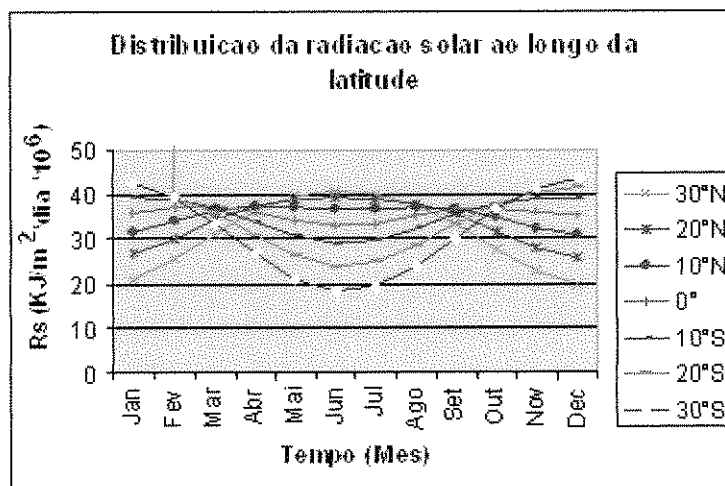
A quantidade de radiação solar que atinge a superfície da terra num determinado instante varia de um lugar para outro, dependendo da sua localização geográfica em relação ao equador e da natureza da superfície (líquida ou sólida).

O eixo da Terra tem uma inclinação de cerca de  $23,5^\circ$  em relação a sua órbita, o que faz com que cada hemisfério receba quantidades diferentes de radiação, dependendo da posição em que a Terra se encontra em relação ao sol (Robredo, 1952). Regiões próximas ao equador recebem maior quantidade de radiação em relação às latitudes médias e aos pólos, ou seja, a radiação solar diminui do equador aos pólos. A figura 2.5 é um exemplo da variação espacial da radiação solar num determinado dia, ela representa a forma como a radiação solar se distribui ao longo das latitudes no dia 21 de Junho, ou seja solstício de inverno para o hemisfério sul.



**Figura 2-5:** Variação da radiação solar na superfície da terra para os dia 21 de Março (equinócio de Outono para HS) e 21 de Junho (solstício de Inverno para HS) . No dia 21 de Junho, o hemisfério Norte está mais iluminado que o hemisfério Sul, e no dia 21 de Março latitudes iguais recebem a mesma quantidade de radiação para ambos hemisférios (Varejão-Silva, 2005).

Em média, o hemisfério sul (HS) absorve maior quantidade de radiação solar em relação ao hemisfério norte (HN), devido ao facto de maior porção da superfície do HS ser líquida. Os líquidos possuem maior capacidade de absorver a radiação solar que os sólidos (Cunha, 1977). Também observa-se que em superfícies vegetadas a radiação solar é atenuada pelas folhas. A figura 2.6, representa a distribuição da radiação solar pelas latitudes ao longo do ano.



**Figura 2-6** Distribuição da radiação solar diária total ao longo da latitudes sobre uma superfície horizontal, Rs em kJ/m<sup>2</sup>.dia x 10<sup>6</sup>, em latitudes compreendidas entre 30° N e 30° S. Fonte de dados: (Díez, 2000).

A altitude também contribui para a variação da radiação solar à superfície (McGregor, 1988). Superfícies elevadas recebem maior quantidade de radiação quando comparadas com as de

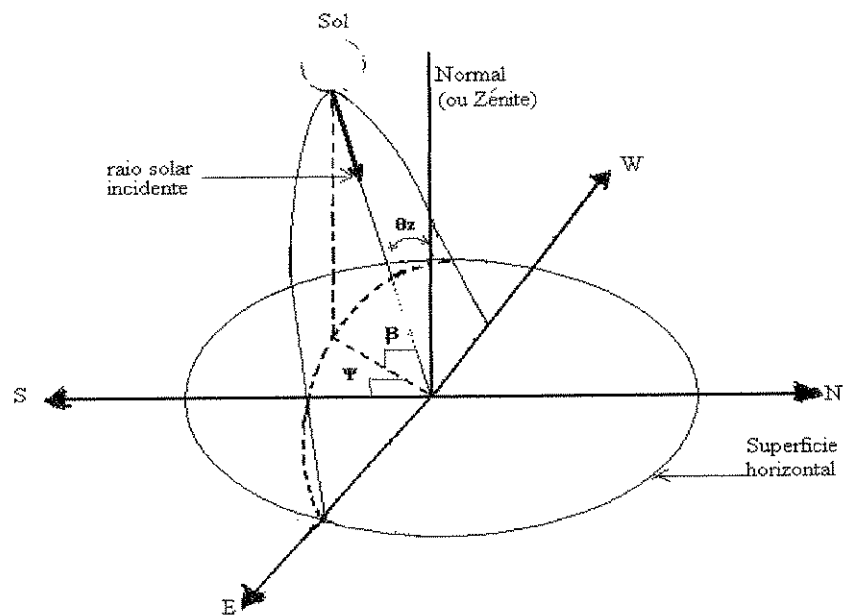
baixa altitude, isto porque os raios solares percorrerem uma trajectória curta para atingir as superfícies elevadas.

### **2.5.2 Distribuição temporal da radiação solar**

A quantidade de radiação solar que atinge um determinado lugar situado na superfície da terra depende de vários factores, dos quais se destacam: a duração do dia, a estação do ano, a posição do sol em relação ao referido lugar, entre outros.

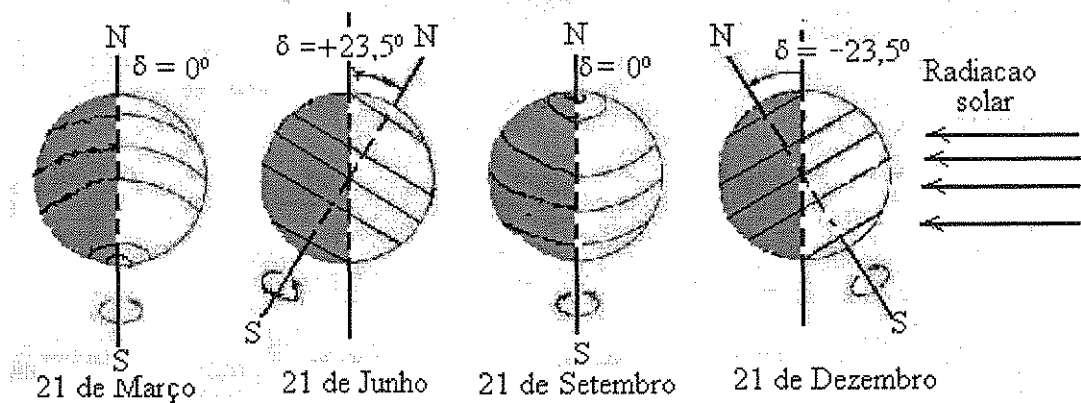
Na sua jornada, a Terra realiza diversos movimentos, sendo os mais importantes o de rotação e o de translação (Ayoade, 1991). No movimento de rotação a Terra gira em torno do seu eixo, com um período de aproximadamente 24 horas, sendo responsável pelo aparecimento do dia e da noite. E a translação é o movimento que a Terra executa em volta do sol e demora cerca de 365 dias para dar uma volta completa, e é este movimento que dá origem às estações do ano (Primavera, Verão, Outono e Inverno).

Durante o dia a radiação solar varia com o ângulo com que os raios solares incidem sobre a superfície que é uma função da hora do dia. Ao nascer e pôr do sol, o ângulo formado pelos raios solares e a superfície da terra é menor a quantidade de radiação solar que atinge a superfície da terra é mínima (McDaniels, 1984), isto porque os raios solares percorrem longas distâncias até atingir a superfície da terra. Por volta do meio dia solar, o ângulo entre os raios solares e a superfície da terra atinge o seu valor máximo ( $90^{\circ}$ ) e diz-se que o sol está no zénite, os raios solares percorrem a distância mais curta, e a radiação solar que chega à superfície terrestre é máxima.



**Figura 2-7:** O diagrama mostra o trajecto dos raios solares vistos por um observador na superfície da terra num determinado dia, a posição do sol pode ser descrita em termos: do ângulo zenital ( $\theta_z$ ), do ângulo azimutal ( $\Psi$ ) e do ângulo da altura do sol ( $\beta$ ) (Macome, 2004).

Com a época do ano a radiação solar que chega à superfície da terra depende da duração do dia e posição Terra-sol. Nos meses de verão, os dias são geralmente longos e no inverno acontece o contrário (Robredo, 1952), o que se explica pelo facto de que o hemisfério de verão permanece mais tempo iluminado pelo sol, e deste modo a quantidade de radiação solar que chega à superfície também será maior. A figura 2.8, é uma ilustração da variação do ângulo de declinação ao longo do ano.



**Figura 2-8:** Variação do ângulo de declinação ao longo do ano. Este ângulo varia de  $+23,5^\circ$  em Junho a  $-23,5^\circ$  em Dezembro, sendo igual a zero nos dias 21 de Setembro e 21 de Março. Estes dias correspondem ao início ou fim de cada estação do ano (Varejão-Silva, 2005).

O sol ao passar pelos eixos de maior raio da elipse, duas latitudes no planeta recebem radiação máxima. No mês Dezembro na latitude  $23,5^\circ$  S (trópico de Capricórnio) e no mês de Junho na latitude  $23,5^\circ$  N (trópico de Câncer). Quando o sol se encontra a  $23,5^\circ$  S, diz-se que é solstício de verão para o hemisfério sul e de inverno para o hemisfério norte e, a  $23,5^\circ$  N representa o solstício de verão para o hemisfério norte e de inverno para o hemisfério sul.

Durante os meses de Março e Setembro, a Terra encontra-se em posições igualmente equidistantes do sol. Neste período, a quantidade de radiação que chega à superfície da Terra é a mesma em latitudes iguais de ambos hemisférios. Esta posição chama-se equinócio, o que significa duração do dia igual à duração da noite (McGrogor, 1998). Em Março ocorre o equinócio de Outono e no hemisfério sul e de Primavera para o hemisfério norte. O equinócio de Primavera para o hemisfério sul observa-se em Setembro, sendo ao mesmo tempo para o hemisfério norte o equinócio de Outono.

### ***Declinação solar***

Ao ângulo compreendido entre o plano do equador e o vector posição de um astro, tomado desde o centro da Terra, dá-se o nome de *declinação* do astro em questão (Varejão-Silva, 2005). Este ângulo varia de  $23,5^\circ$  em 21 Junho a  $-23,5^\circ$  em 21 de Dezembro, sendo igual a zero nos dias 21 de Setembro e 21 de Março (equinócios).

Assumindo que a órbita da Terra é circular e também dependendo do número de ordem ( $dn$ ) do dia (Klein, 1977), a declinação pode ser calculada com base na seguinte fórmula:

$$\delta = 23.5 \operatorname{Sen} \left[ 360 \times \frac{284 + dn}{365} \right] \quad (6)$$

### 2.5.3 Insolação

Define-se insolação como sendo o número de horas de brilho solar (Varejão-Silva, 2005), ou seja, o período do dia em que o sol encontra-se descoberto. Porque a órbita da Terra é elíptica, a quantidade de insolação varia ligeiramente durante o ano. O valor médio da insolação no topo da atmosfera é conhecido por constante solar ( $G_{sc} = 2.0 \text{ cal.cm}^{-2}\text{min}^{-1} = 1367 \text{ J/m}^2$ ). A insolação média num determinado local é um dos factores que determina o clima desse local (McDaniels, 1984).

Define-se constante solar como sendo a energia radiante que incide sobre uma superfície perpendicular aos raios solares, antes que ocorra qualquer perda ou absorção dessa energia ao atravessar a atmosfera (Arruda, 2004). O padrão da distribuição da insolação é ligeiramente alterado sobre a superfície da Terra devido principalmente ao efeito da atmosfera: ela absorve, reflecte, difunde e re-irradia a energia solar.

A insolação astronómica pode ser determinada segundo Duffie e Beckman (1991) usando a seguinte expressão:

$$I_o = \frac{2\omega}{15} \quad (7)$$

Onde:  $I_o$  – insolação astronómica;  $\omega$  – é o ângulo horário.



A tabela 2.1, abaixo mostra como o ângulo horário pode variar com o dia:

**Tabela 2-1 :Variação do ângulo horário com o dia**

Tempo	Comportamento de $\omega$
Antes das 12 horas	$\omega < 0$
As 12 horas	$\omega = 0$
Depois das 12 horas	$\omega > 0$

O ângulo horário  $\omega$  pode se calculado a partir da seguinte expressão:

$$\cos \omega = -\operatorname{tg} \delta \times \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

Onde:  $\delta$  – é a declinação;  $\varphi$  – é a latitude do lugar.

## 2.6 Medição da radiação solar

As medidas da radiação solar são normalmente feitas no plano horizontal e disponíveis com valores médios diários ou horários. A energia radiante total mensal, embora utilizada no cálculo ou simulações do comportamento de alguns equipamentos solares para longos períodos de tempo (Lorenzo, 1994), pode conduzir a erros devido a não linearidade no desenvolvimento do processo.

### 2.6.1 Técnicas de medição da radiação solar

Para a medição da radiação solar distinguem-se duas técnicas básicas: a medição directa através de instrumentos e a medição indirecta baseada em modelos. A medição directa fornece valores reais da radiação solar, e exige a disponibilidade de estações meteorológicas numa malha de pontos mais densa possível. Os modelos para estimativa da radiação solar à superfície baseiam-se em expressões matemáticas ou físicas que relacionam a radiação solar com outros parâmetros meteorológicos.

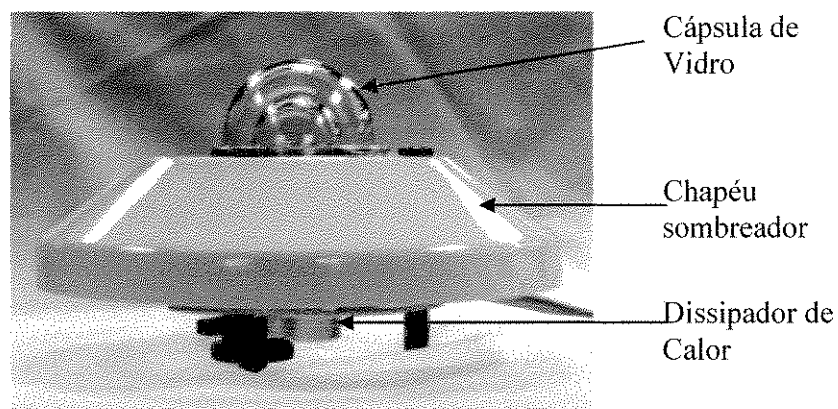
### 2.6.1.1 Medição directa da radiação solar

Há vários instrumentos usados para medir a radiação solar, dentre os quais se pode destacar: o *Piranómetro*, o *pireliómetro* e o *heliógrafo*, que se diferem da componente da radiação solar que cada um deles mede.

#### a) *Piranómetros*

Os piranómetros (ou solarímetros) medem a radiação global ou apenas a radiação difusa em plano horizontal quando está provido de um arco que intercepta a radiação solar directa e mantém na sombra o órgão sensível do piranómetro.

A figura 2.9 é uma fotografia de um Piranómetro de Epley PSP, cujo elemento sensível é composto por uma série de duas junções cobre-constantan (termopares), dispostas radialmente, formando uma termopilha. Uma junção fica exposta a radiação (junção quente) e outra protegida da radiação (junção fria). A junção quente é pintada com tinta preta e a fria pintada a cor branca. A diferença de temperatura entre as duas junções da termopilha, gera corrente eléctrica proporcional à quantidade de radiação solar recebida, que pode ser medida em forma de tensão, mostrando o valor instantâneo da energia solar.

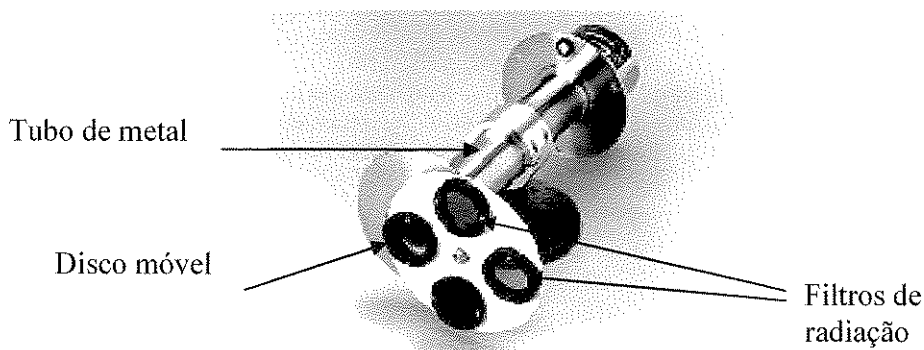


**Figura 2-9:** Fotografia de um **Piranómetro Epley PSP**. É usado para medição directa da radiação solar global e difusa, numa faixa compreendida entre 0.3 e 3.0  $\mu\text{m}$ .

### *b) Pireliómetros*

Para a medição da radiação solar directa usam-se os *Pireliómetros*. Os pireliómetros usam um mecanismo de direccionamento do detector ao sol para manter a radiação solar directa com incidência normal.

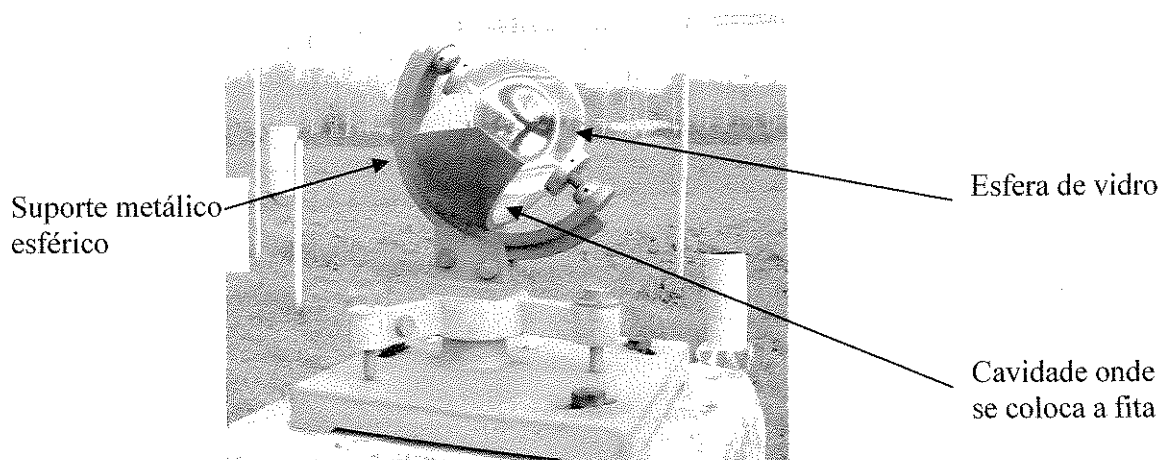
São caracterizados por apresentar uma pequena abertura de forma a "visualizar" apenas o disco solar e a região vizinha denominada circunsolar. O instrumento é instalado num mecanismo que segue o aparente movimento do sol, para permitir que esteja constantemente apontado ao sol. Um exemplo do pireliómetro é o *pireliómetro de incidência normal*. A figura 2.10 é uma fotografia de um *pireliómetro de incidência normal (NIP)* modelo, cujo sensor é constituído por duas placas, situadas na base de um tubo enegrecido internamente, uma das quais é aquecida devido à absorção da radiação solar directa e a outra é protegida da radiação solar. Este aquecimento cria uma diferença de temperatura entre as duas placas, o que cria uma diferença de potencial entre as mesmas, gerando desta forma uma corrente eléctrica que pode ser medida através de um miliamperímetro (digital ou analógico).



**Figura 2-10:** Fotografia de um **Pireliómetro de Incidência Normal (NIP)** modelo, e destina-se para a medição da radiação solar directa.

### c) *Heliógrafos*

O aparelho que mede a Insolação chama-se Heliógrafo. A figura 2.11 é uma fotografia que ilustra um heliógrafo de Campbell-Stokes, que consiste numa esfera de vidro, incolor ou de um verde amarelado, com cerca de 10 cm de diâmetro e encontra-se montado concentricamente num suporte metálico esférico. A radiação solar é focalizada pela esfera sobre uma fita que, pela acção da radiação é queimada. O comprimento desta fita queimada é a medida da insolação.



**Figura 2-11:** É fotografia de um **Heliógrafo** de Campbell-Stokes, serve para medir a Insolação astronómica.

Este instrumento tem alguns constrangimentos, porque não mede a radiação solar mas sim a insolação, sendo necessário se fazer uma conversão desta para se conhecer a quantidade de radiação solar. A conversão é feita com base em modelos, o que pode causar alguns desvios em relação ao valor real da radiação solar. Ainda nota-se que, em dias de sol fraco, este instrumento pode não registar a insolação, ou se o cartão estiver húmido pode não queimá-lo.

### 2.6.2 Modelação da radiação solar

Embora a melhor avaliação da radiação solar disponível seja através de medidas directas, há no entanto, em vários locais, falta de dados de radiação solar devido ao limitado número de

estações radiométricas. O uso de modelos figura-se como uma alternativa para suprir a escassez da informação sobre as potencialidades de energia solar de cada local de interesse. Os modelos baseiam-se em relações empíricas, normalmente utilizando os valores médios diários ou mensais de radiação solar e relacionando-os com o número de horas de insolação, ou através de análise estatística baseada em séries de dados históricos.

### *Modelo*

Define-se modelo, como uma representação de fenómeno do mundo real com base em fórmulas matemáticas ou físicas que descrevem o seu comportamento, de modo a ser possível fazer uma previsão (Teixeira et al, 2005). Distinguem-se dois modelos básicos para estimar a radiação solar à superfície, a saber: modelos teóricos e modelos empíricos.

Os modelos teóricos baseiam-se fundamentalmente em propriedades ópticas mensuráveis da atmosfera como o percurso óptico e o albedo atmosférico. Estes modelos têm uso restrito porque são em geral válidos para determinadas situações de nebulosidade ou para condições de céu limpo.

Os modelos empíricos resultam da tentativa de estabelecer relações estatísticas entre a radiação solar e outras variáveis meteorológicas de superfície. Como as estações meteorológicas existem numa malha muito mais densa que as radiométricas, registando valores de diversos parâmetros meteorológicos correntes, pode-se deste modo estimar valores da radiação solar com base nestes parâmetros, para um número considerável de pontos. Os modelos empíricos não tomam em consideração alguns factores que podem alterar o comportamento da radiação solar na superfície.

Em geral os modelos precisam da existência de uma série de dados históricos de modo a fazer o ajuste dos coeficientes empíricos para cada região em estudo e isto ajuda a validar ou não a eficiência do modelo para cada local.

Vários modelos para o cálculo da radiação solar foram desenvolvidos por pesquisadores em várias partes do mundo e em Moçambique, em especial. A seguir apresenta-se alguns exemplos de modelos empíricos para a estimativa da radiação solar

*a) Modelo de Ångstron*

Vários trabalhos na tentativa de estimar a radiação solar na superfície foram feitos no país, tendo sido quase todos centrados na aplicação do modelo da Ångstron, porque provavelmente maior número de estações no país mede a insolação. O modelo de Ångstron foi sugerido pela primeira vez por Kimbal (1918) e posteriormente melhorado por Ångstron (1924), serve para determinar a radiação solar com base na insolação.

A equação (9), representa a expressão matemática para o modelo de Ångstron.

$$\frac{R_g}{R_{ex}} = a + b \frac{I}{I_0} \quad (9)$$

Onde:  $R_g$  é a radiação na superfície da Terra;  $R_{ex}$  é a radiação no topo da atmosfera;  $a$  e  $b$  são coeficientes de regressão que dependem das condições climáticas do local e são tabelados;  $I$  é a insolação real, medida pelo instrumento e  $I_0$  é a insolação astronómica.

Esta é uma das expressões empíricas simples que permitem conhecer a distribuição espacial da radiação solar. É aplicável para qualquer ponto da Terra.

*b) Método empírico para a determinação da radiação solar na superfície do globo com base na nebulosidade*

Em virtude da influência que a nebulosidade exerce na radiação solar, e por este elemento ser obrigatoriamente observado nas estações meteorológicas de todo o globo, houve necessidade, desde há muito tempo de estabelecer uma expressão que relacione a quantidade de radiação solar global,  $Q$ , com a nebulosidade,  $N$ , e com a radiação máxima possível em dias de céu limpo,  $Q_0$ .

Assim, Ångstrom, Kimball, Houghton e Fritz, propuseram equações do tipo:

$$\frac{Q}{Q_0} = F(N) \quad (10)$$

em que  $F(N)$  é uma função de distribuição da nebulosidade. O valor de  $Q_0$  pode determinar-se por via teórica, ou usando tabelas, ou ainda, empiricamente, através de um diagrama da variação anual da radiação global para dias de céu limpo.

A forma de função  $F(N)$  que se considera mais frequentemente é linear, isto é:

$$\frac{Q}{Q_0} = aN + b \quad (11)$$

### c) *Modelo de Allen*

Para o presente trabalho, escolheu-se o **modelo de Allen**, em virtude de em Moçambique, maior parte das estações meteorológicas medirem dados de temperatura e pressão, em número reduzido medir-se a insolação, e isto dificulta a obtenção de informação sobre a radiação solar com base no modelo de Ångström. Mas o Allen, sugere o cálculo da radiação solar com base nos valores das temperaturas mínimas e máximas e ainda da pressão atmosférica (Assis, 2004), parâmetros estes que são disponíveis em quase todas estações meteorológicas e os instrumentos para a sua medição são de baixo custo. Uma outra vantagem deste modelo é o facto de ser ajustável para qualquer ponto (local). Detalhes sobre o modelo de Allen estão apresentados no capítulo 3.

### 3 Materiais e métodos

Este trabalho inspira-se no modelo de Allen e foi realizado na base de valores médios mensais de temperatura e de pressão atmosférica medidos no país, pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INAM) no período que vai de 1975 a 2005 nas estações de observação meteorológica em diversos pontos do país.

Para a análise do modelo com relativa simplicidade, fez-se uma escolha aleatória das estações meteorológicas, em que se mede pelo menos temperatura e pressão, era de desejar incluir também dados da radiação solar de modo a facilitar a comparação dos resultados mas nem todas as estações têm disponíveis dados da radiação solar. Na tabela 3.1 encontram-se indicadas as estações escolhidas e os respectivos parâmetros que são medidos em cada estação para a realização deste trabalho:

**Tabela 3-1:** Estações radiométricas e os parâmetros que se medem em Moçambique

	Estação	Grandeza Medidas				Localização			Classific.
		Temperatura		Radiação Global	Pressão	Lat. (S)	Long. (E)	Alt. (m)	
		Máxima	Mínima						
Zona Sul	Maputo	X	X	X	X	25°58'	32°36'	70	Costeira
	Changalane	X	X	-	X	26°18'	32°11'	100	Interior
	Xa-Xai	X	X	-	X	25°03'	33°38'	4	Costeira
	Inhambane	X	X	X	X	23°52'	35°01'	14	Costeira
	Vilanculos	X	X	-	X	22°00'	35°19'	20	Interior
Zona Centro	Beira	X	X	X	X	19°50'	34°51'	7	Costeira
	Chimoio	X	X	-	X	19°07'	33°28'	731	Interior
	Tete	X	X	-	X	16°11'	33°35'	149	Interior
	Quelimane	X	X	-	X	17°53'	36°53'	6	Costeira
Zona Norte	Nampula	X	X	-	X	15°06'	39°17'	438	Interior
	Angoche	X	X	-	X	16°13'	39°54'	61	Costeira
	Lichinga	X	X	-	X	13°18'	35°14'	1365	Interior
	Pemba	X	X	X	X	12°59'	40°32'	101	Costeira
	Montepuez	X	X	-	X	13°08'	39°02'	534	Interior

Fonte: INAM – Maputo, 2006



### 3.1 Descrição do modelo de Allen (1997)

Allen, em 1997, propôs um modelo para estimar a radiação solar global média mensal usando dados de temperaturas médias mensais máxima e mínima e da radiação extraterrestre, como segue:

$$\frac{R_g}{R_{ext}} = K_r (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (12)$$

Onde:  $R_g$  é a radiação solar global média mensal;  $R_{ext}$ , radiação extraterrestre ou seja no topo ou ainda considerando a ausência da atmosfera;  $K_r$  é o coeficiente empírico,  $T_{max}$ , temperatura média das máximas mensais;  $T_{min}$ , temperatura média das mínimas mensais. Allen, em 1995, expressou o coeficiente empírico ( $K_r$ ) como função da razão entre a pressão atmosférica local ( $P$ ) e a pressão ao nível do mar ( $P_0 = 101,34$  kPa) (Assis et al, 2004).

$$K_r = K_{ra} \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.5} \quad (13)$$

O valor de  $K_{ra}$ , de acordo com a literatura, é igual a 0,17 para regiões interiores e 0,20 para regiões costeiras, podendo ser ajustado para situações específicas.

#### 3.1.1 Ajuste do coeficiente $K_{ra}$

Para ajustar o coeficiente  $K_{ra}$ , é necessário fazer-se estimativas da radiação global para os pontos com radiação solar já determinada e em seguida calcular o erro relativo. Calculado o erro, já é possível ajustar o  $K_r$  e, com o conhecimento do clima da região pode-se usar o  $K_r$  ajustado para obter o  $K_{ra}$  ajustado.

O cálculo do erro relativo ( $\epsilon$ ) é baseado nas seguintes expressões:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{er}}{\sigma_s} \quad (14)$$

onde  $\sigma_{er}$  é o erro quadrático e  $\sigma_s$  é o desvio padrão, que são definidos como:

$$\sigma_{er} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n-1}} \quad e \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{\sum_{j=m}^m (x_j - \bar{x}_j)^2}{m}} \quad (15)$$

Onde:  $\sigma_{er}$  é o erro quadrático;  $\sigma_s$  é o desvio padrão;  $Y$  são os valores estimados;  $\bar{Y}$  é a media dos valores estimados;  $X$  são os valores observados;  $\bar{X}$  é a media dos valores observados;  $i, j, = 1, 2, 3, \dots$  – números de ordem;  $n, m = 12$  é o tamanho da amostra. Todos os cálculos aqui realizados tiveram como suporte o pacote estatístico MS-Excell.

Na tabela 3.2 encontram-se os valores das constantes que foram usadas neste trabalho para os cálculos da radiação solar global:

**Tabela 3-2:** Constantes usadas nos cálculos da radiação solar global

Nome	Símbolo	Valor	Unidade(SI)
Constante solar	Gsc	1367.0	Wm <sup>-2</sup>
Pressão ao nível médio do mar	Po	101.3*10 <sup>-3</sup>	Pa
Coefficiente empírico para a costa	Kra(costa)	0.20	-
Coefficiente empírico para o continente	Kra(continente)	0.17	-

### 3.2 Etapas da realização do trabalho

A primeira etapa foi centrada na obtenção de dados de temperaturas médias mínimas e máximas mensais e dos dados da pressão referentes aos locais em estudo. Segundo o INAM, estes dados representam os valores médios diários medidos nas estações meteorológicas de superfície em cada local, através dos instrumentos (para medir a temperatura usam-se

termómetros e para a pressão usam-se os *barómetros*), em seguida faz-se uma extrapolação para as médias mensais.

Obtidos os dados, seguiu-se a fase da manipulação dos mesmos, obedecendo os seguintes passos:

- a) Achar  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  e  $P$ , com base na expressão seguinte:

$$T_{max} = \frac{\sum_{i=1}^k T_i}{k}, \quad T_{min} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{k}, \quad P = \frac{\sum_{i=1}^k P_i}{n} \quad (16)$$

Onde:  $T_i$  é o valor da temperatura média máxima mensal para cada ano;  $t_i$  é o valor da temperatura média mínima mensal para cada ano;  $P_i$  é o valor da pressão média mensal para cada ano;  $k = 30$  é o número de anos considerados.

Com base nos resultados da equação (15), estimou-se o coeficiente empírico  $K_r$ , considerando  $K_{ra}$  dado pela literatura. Estimou-se também a partir da equação (6) a declinação solar ( $\delta$ ), tomando em consideração o dia médio de cada mês. A tabela 3.3 mostra o dia médio para cada mês, considerado para este trabalho.

Tabela 3-3: Dia Juliano médio para cada mês.

Mes	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Dia Juliano	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

Com ajuda da equação (7), determinou-se o ângulo horário ( $\omega$ ), e em seguida estimou-se  $R_{ex}$ , aplicando a equação (3). A partir deste ponto conseguiu-se estimar a radiação global média mensal, usando a equação (12).

O resultado da  $R_g$ , foi obtido em calorías por centímetro quadrado e em seguida fez-se a conversão para  $MJ/m^2$  com base nas relações da tabela 3.4.

Tabela 3-4: conversão de unidades

Grandeza	Unidades
Tempo	1 hora = 60 minutos = 3600 segundos
Distância	1 centímetros quadrados = $10^{-4}$ metros quadrados
Energia	1 caloria = 4.1868 Joules

Seguiu-se a fase de ajuste do coeficiente  $K_{ra}$ , que em primeiro lugar determinou-se a equação da recta e o coeficiente de correlação linear ( $r$ ), a partir das expressões (17) e (19), respectivamente.

$$y = b_o + bx \tag{17}$$

Onde:  $y$  é o valor estimado da  $R_g$ ;  $x$  são os valores estimados da  $R_g$ ;  $b_o$  e  $b$  são constantes e são estimados a partir das seguintes expressões:

$$b_o = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum (yx)}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, b = \frac{n \sum (xy) - \sum y \sum x}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \tag{18}$$

E o valor de  $r$  é dado pela expressão:

$$r = \frac{n \sum (xy) - \sum x \sum y}{\sqrt{\{[n \sum x^2 - (\sum x)^2]x [n \sum y^2 - (\sum y)^2]\}}} \tag{19}$$

Para avaliar se o modelo é bom ou não usou-se o seguinte critério:

$$-1 \leq r \leq 1 \rightarrow \begin{cases} r = -1 - \text{há correlação linear negativa} \\ r = 0 - \text{não há correlação} \\ r = 1 - \text{há correlação linear perfeita} \end{cases}$$

Em último lugar, usando as equações (14) e (15) estimou-se o erro relativo, fez-se o ajuste da radiação global estimada e ajustou-se o coeficiente  $K_{ra}$  para cada local.

### **3.3 Limitações do modelo de Allen**

O modelo de Allen não toma em consideração a dinâmica da atmosfera, precisamente a nebulosidade, humidade e as condições do terreno. Para tal é necessário conhecer melhor o clima da região em estudo para melhor avaliar se o modelo é aplicável ou não para esse mesmo lugar.

Uma das maiores limitações encontradas neste trabalho foi a escassez de séries de dados históricos referentes à radiação solar global nas estações radiométricas, o que dificultou em certa medida na definição das causas da discordância no comportamento da radiação global estimada e observada para alguns pontos.

## **4 Resultados e Discussão**

Para a presente análise, as estações consideradas foram agrupadas em três regiões: Sul, Centro e Norte do País e para a comparação dos resultados escolheu-se em cada região, uma estação representativa. Em geral, a quantidade da radiação solar é maior nos meses de Verão e menor nos de Inverno, atingindo o seu valor máximo no mês de Dezembro e o mínimo ocorre no mês de Junho. A média anual da radiação global é da ordem de 20.0 MJ/m<sup>2</sup>.

Ao longo do país a radiação solar global é tal que cresce no sentido Sul-Norte nos meses de Verão e nos meses do Inverno decresce no mesmo sentido, pelo facto de que a nebulosidade aumenta de sul para o norte. As estações costeiras apresentam maior quantidade de vapor de água próximo à superfície, o que faz com que haja maior atenuação da radiação solar por absorção. As estações do interior têm a atmosfera preenchida por grandes quantidades de poeiras e partículas sólidas, o que causa atenuação da radiação solar por difusão. Ainda nota-se nas estações do interior, que a radiação solar é maior quanto maior for a altitude.

### **4.1 Radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen para a região Sul de Moçambique**

A região sul de Moçambique é caracterizada por verões húmidos e invernos secos. Porém a radiação solar é maior nos meses de verão que nos de inverno

A radiação solar global no sul de Moçambique apresenta valores baixos, quando comparada com as zonas centro e norte. portanto, esta região é caracterizada por fraca nebulosidade, e a radiação solar é influenciada pelo efeito da latitude e pela acção da costa. A figura 4.1, representa, o gráfico que mostra o comportamento da radiação solar global média mensal na zona Sul de Moçambique estimada a partir do modelo de Allen. Para o efeito de comparação convista a determinar o nível de correlação (ou nível de aceitabilidade dos valores estimados), escolheu-se os valores estimados e observados em Maputo.

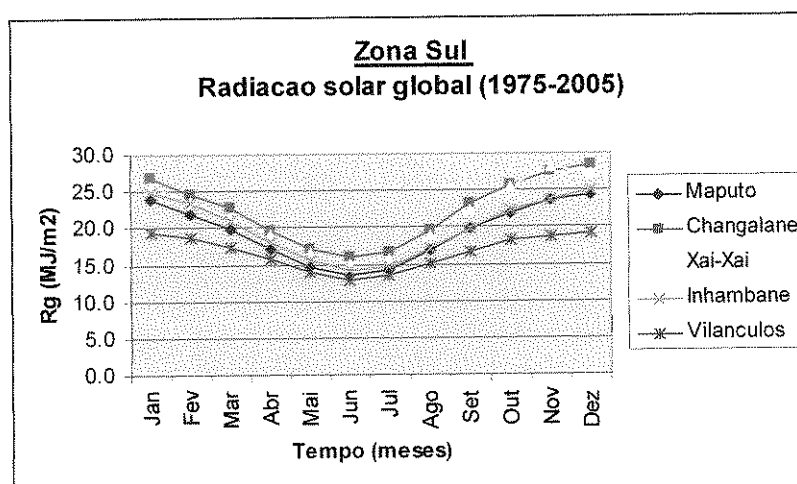


Figura 4-1 Comportamento da Radiação solar Global mensal na Zona Sul de Moçambique no período 1975 – 2005.

De acordo com a figura 4.1, a radiação solar global decresce de Janeiro a Junho e cresce de Junho a Dezembro, verificando-se em média, os valores mínimos no mês de Junho ( $\approx 14.0 \text{ MJ/m}^2$ ) e os máximos em Dezembro ( $\approx 24.8 \text{ MJ/m}^2$ ). Este comportamento da radiação global que está de acordo com o que se pode esperar teoricamente.

Na zona Sul, os valores mais baixos da radiação global foram registados na estação de Vilanculos e os mais elevados em Chagalane. As estações de Xai-Xai, Inhambane e Maputo apresentam valores muito próximos, sendo em Xai-Xai com valores ligeiramente mais elevados, porque sua latitude é menor que a de Maputo. Inhambane é influenciado pela Zona de Convergência Inter-tropical (ITCZ), caracterizada por forte nebulosidade.

Chagalane apresentou valores médios da  $R_g$  mais elevados nesta região sul, possivelmente por localizar-se distante da costa e a nebulosidade é baixa, também encontra-se a uma altitude elevada, e isto contribui para que a radiação solar chegue em quantidades elevadas à superfície. Vilanculos a pesar de ter uma latitude menor apresenta valor médio mais baixo da radiação solar, porque a nebulosidade é consideravelmente alta neste ponto quando comparada com as restantes estações da mesma região, neste ponto ocorre maior evaporação.

A figura 4.2, mostra que os valores estimados e observados da radiação solar global em Maputo estão muito próximos, com o coeficiente de correlação ( $r$ ) igual a 0.94.

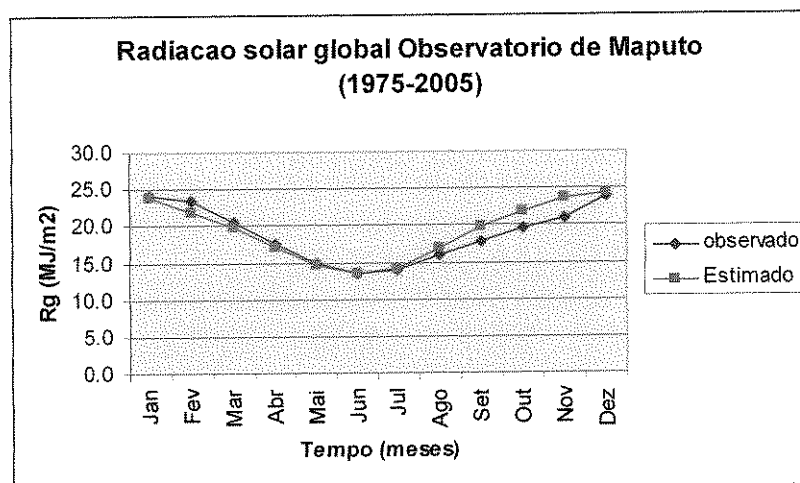


Figura 4-2: Comparação da radiação solar global e estimada para a estação de Maputo. Foi escolhida como estação representativa da zona sul.

A  $R_g$  estimada tem valores inferiores aos da observada entre os meses de Janeiro e Abril, e são superiores entre Julho e Agosto. Entre Agosto e Dezembro está-se na época chuvosa, em que a humidade e nebulosidade são elevados, e há maior absorção de radiação e em simultâneo da temperatura. O modelo de Allen baseia-se em temperaturas, e isto pode fazer com que os valores estimados da  $R_g$  sejam elevados.

## 4.2 Radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen para a região Centro de Moçambique

A radiação solar na região centro de Moçambique sofre maior influência da ITCZ e do efeito da Costa. Esta região apresenta forte nebulosidade e chuvas intensas, o que contribui para atenuação da radiação solar por absorção.

As figuras 4.3, representa, o gráfico que mostra o comportamento da radiação solar global média mensal na zona Centro de Moçambique estimada com base no modelo de Allen para o



período compreendido entre 1975 e 2005. Para a região centro de Moçambique foi escolhida a estação da Beira para a comparação entre os valores estimados e os observados.

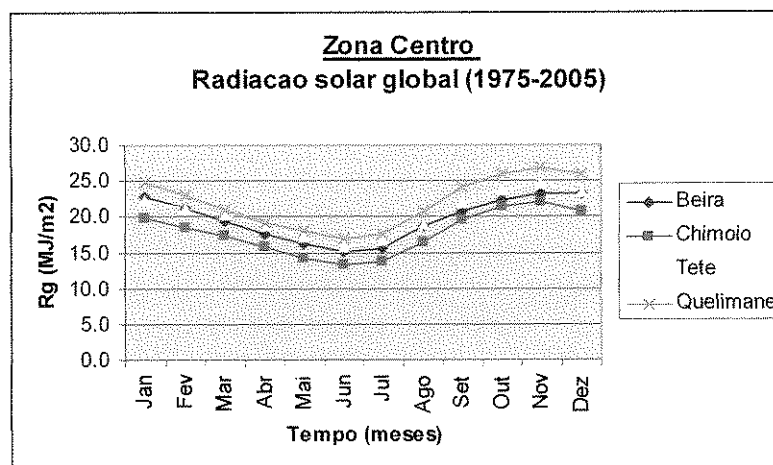


Figura 4-3: Comportamento da Radiação solar Global mensal na Zona Centro de Moçambique no período 1975 – 2005.

A figura 4.3, indica que a radiação global diminui de Janeiro a Junho, alcançando os valores mínimos no mês de Junho ( $\approx 15.3 \text{ MJ/m}^2$ ) e os máximos em Dezembro ( $\approx 24.2 \text{ MJ/m}^2$ ).

Nesta região do país, os valores mais baixos da  $R_g$  foram registados na estação de Chimoio e os mais elevados em Quelimane. Quelimane é muito húmido e isto pode contribuir em certa medida para valores altos da temperatura na superfície, portanto, ao contrário do que se podia esperar, este apresentou valores de  $R_g$  elevados que Tete. Beira tem valores de  $R_g$  elevados em relação a Chimoio, provavelmente devido ao efeito da altitude, isto é, pontos mais elevados recebem maior radiação que os pontos mais baixo. Tirando Quelimane, o efeito da altitude é que joga maior importância nesta região do país.

A figura 4.4, representa as curvas que mostram a comparação dos valores estimados e observados da radiação solar global para a estação de Beira para o período 1975 a 2005.

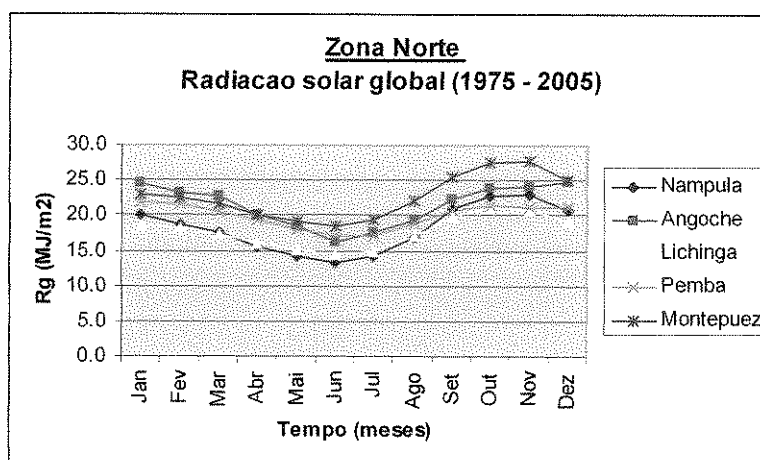
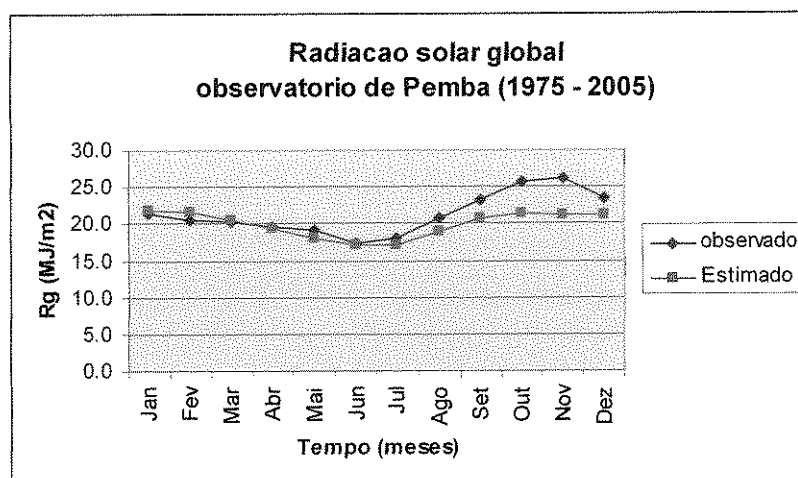


Figura 4-5 Comportamento da Radiação solar Global mensal na Zona Norte de Moçambique no período 1975 – 2005.

De acordo com a figura 4.5, a situação não fugiu das outras regiões do país, a radiação solar global na zona norte diminui de Janeiro a Junho e cresce de Junho a Dezembro, alcançando os valores mínimos em Junho ( $\approx 15.9 \text{ MJ/m}^2$ ) e máximos em Novembro ( $\approx 23.4 \text{ MJ/m}^2$ ). Em média a radiação solar na zona norte do país é de cerca de  $20.0 \text{ MJ/m}^2$ .

As estações de Lichinga e Nampula registaram valores mais baixos de  $R_g$  e os máximos foram registados em Montepuez. Montepuez está no interior, e ainda tem uma latitude menor que as restantes estações, o que favorece para que a radiação solar chegue em quantidades elevadas à superfície. Lichinga encontra-se próximo ao lago Niassa, o que contribui para atenuação da radiação solar devido ao elevado índice de humidade.

Os resultados da comparação entre os valores estimados e observados estão apresentados na figura 4.6.



**Figura 4-6** Comparação da radiação solar global e estimada para a estação de Pemba. Foi escolhida como estação representativa da zona norte.

Os gráficos revelam que os valores estimados e observados da  $R_g$  em Pemba, são muito próximos, com o coeficiente de correlação ( $r$ ) igual a 0.75. Os valores da  $R_g$  observada são, em geral superiores que os da estimada, tendendo a ser mais pronunciada entre os meses de Setembro e Dezembro. Mas não foi encontrada a causa exacta desta situação. Porém esta zona é caracterizada por forte nebulosidade, e ainda a variação da temperatura pode ser a causa da diferença entre os valores estimados e observados da  $R_g$ .

De um modo geral, a radiação solar global ( $R_g$ ) em Moçambique assume um valor médio anual da ordem de  $20.0 \text{ MJ/m}^2$ , tendo se verificado o valor mais baixo de  $15.2 \text{ MJ/m}^2$  em Junho e o mais elevado  $24.0 \text{ MJ/m}^2$  no mês de Dezembro. Nas estações de Vilanculos, Chimoio, Nampula e Lichinga foram registados os valores mais baixos da radiação solar global, isto porque a nebulosidade cresce de Sul para Norte. Também observa-se que a radiação global cresce da costa para o interior, pelo facto de que na costa, para além da se registar maior evaporação, também ocorrem as brisas marítimas que podem contribuir significativamente para a atenuação da radiação solar. A figura 4.7, mostra as curvas que descrevem o comportamento da radiação solar global média para o período (1975 - 2005) nas regiões sul, centro e norte do país, em média.

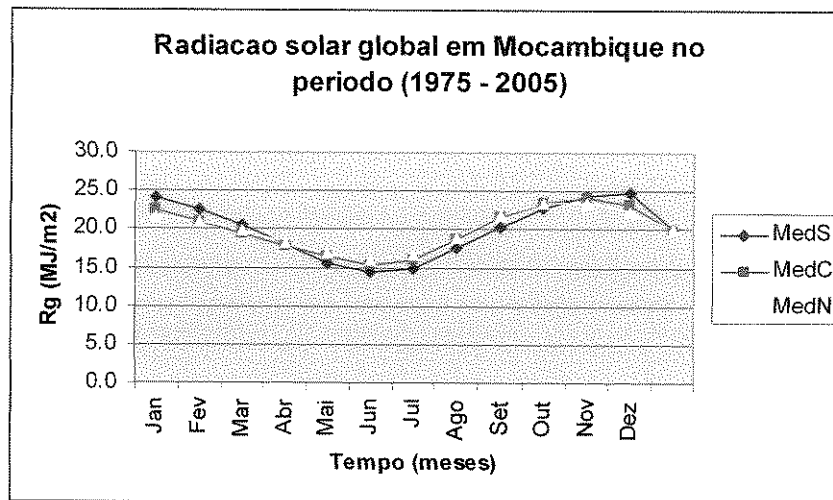


Figura 4-7: Comportamento da radiação solar global estimada a partir do modelo de Allen em termos médios nas regiões sul, centro e norte do país, para o período 1975 – 2005.

A figura 4.7, mostra que nos meses de Abril e Outubro, a radiação solar global que atinge a superfície é quase igual em todas as regiões do país. Estes meses marcam o fim e o começo do período chuvoso, a nebulosidade diminui de norte para sul, fazendo com que a radiação em latitudes menores seja fortemente atenuada. E na zona sul como já foi referido, a nebulosidade é fraca e possivelmente a radiação solar será menos atenuada.

Em média, os valores mais baixos da radiação solar global verificam-se nos meses de Junho, sendo  $14.0 \text{ MJ/m}^2$  para o Sul,  $15.3 \text{ MJ/m}^2$  no centro e  $15.9 \text{ MJ/m}^2$  para o Norte. Isto mostra que a radiação solar global cresce de Sul para Norte devido ao efeito da latitude. Os valores mais altos ocorrem entre os meses de Novembro e Dezembro, sendo  $24.8 \text{ MJ/m}^2$  no Sul,  $24.2 \text{ MJ/m}^2$  Centro e  $23.4 \text{ MJ/m}^2$  no Norte, o que mostra que para além do efeito da latitude, as zonas Centro e Norte são influenciadas pela zona de convergência inter-tropical, caracterizada por forte nebulosidade e chuvas intensas, atenuando desta forma a radiação solar à superfície.

Entre os meses de Janeiro e Abril, Outubro e Dezembro, a zona sul de Moçambique tem em média valores de  $R_g$  superiores às regiões centro e norte, o que corresponde ao intervalo em que o índice de nebulosidade é elevado, nas zonas centro e norte a radiação solar é mais atenuada pela humidade. E no intervalo entre Outubro e Dezembro, a zona sul apresenta os

valores mais baixos. Isto porque já há menor índice de nebulosidade, jogando maior papel o efeito da latitude, ou seja, em zonas próximas do equador o sol está quase sempre no zénite e a duração do dia é sempre igual à da noite.

Os valores do coeficiente de correlação na tabela 4.1 estão muito próximos da unidade, o que mostra que há uma boa aproximação entre os valores da  $R_g$  observados e estimados. Daqui pode-se considerar que os valores de  $K_r$  sugeridos pela literatura quer para a costa, quer para o interior são válidos em Moçambique. E a estimativa da radiação solar com base nos valores de temperaturas pode ser realizado com uma boa aproximação em Moçambique, através do modelo de Allen.

**Tabela 4-1:** Aqui encontram-se os valores não ajustados e ajustados de: Coeficiente empírico ( $K_r$ ), coeficiente de correlação linear ( $r$ ).

Estação	$K_r$ (não ajustado)	$r$ (não ajustado)	$K_r$ (ajustado)	$r$ (ajustado)
Maputo	0.1997	0.940	0.0556	0.9455
Changalane	0.1694	-	-	-
Xa-Xai	0.2004	-	-	-
Inhambane	0.2002	0.996	0.0562	0.9961
Vilanculos	0.1701	-	-	-
Beira	0.2001	0.957	0.0571	0.9571
Chimoio	0.1633	-	-	-
Tete	0.1686	-	-	-
Quelimane	0.2001	-	-	-
Nampula	0.1659	-	-	-
Angoche	0.1989	-	-	-
Lichinga	0.1573	-	-	-
Pemba	0.1990	0.753	0.0563	0.9453
Montepuez	0.1650	-	-	-

Considerando que a média da radiação solar global é da ordem de  $20 \text{ MJ/m}^2$ , pode-se dizer que Moçambique possui um bom potencial de energia solar. E o modelo de Allen pode ser usado, sobretudo nas diversas áreas de investigação.

## 5 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, chegou-se às seguintes conclusões:

- O modelo de Allen mostrou ser bom para estimar a radiação solar global em Moçambique, com uma correlação perfeita entre os valores observados e estimados. E o coeficiente empírico  $K_{ra}$  ( igual a  $0.20$  junto à costa, e  $0.17$  no interior) sugerido pela literatura é válido para Moçambique;
- Em termos médios, o nosso país possui um bom potencial de radiação solar global, cerca de  $20 \text{ MJ/m}^2$  que, diminui de Janeiro a Junho, onde começa a subir até Dezembro. Alcança os valores mínimos em Junho e os máximos em Dezembro.
- O Modelo de Allen mostrou-se bom para o nosso país. E pode ser usado para trabalhos de pesquisa nas diversas áreas.

### 5.1 Recomendações

Sabe-se que, a energia é um elemento indispensável nas diversas actividades da sociedade humana, sendo mais comum para o uso doméstico como energia eléctrica. E a radiação solar é uma fonte gratuita de energia, recomenda-se que mais estudos em relação a este elemento sejam realizados usando vários modelos de modo a contribuir para o mapeamento da radiação solar pelo país e incentivar o uso da energia solar. E isto poderá ajudar para o desenvolvimento do país.

## Referências

Arruda, L. B. (2004). *Operação de Sistemas de Aquecimento Solar de Água com controle de vazões em colectores planos*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

Assis, S. V. Et. al (2004). *Avaliação de um Método Empírico para Estimativa da Radiação Solar Global – Modelo de Allen*, Depto de Meteorologia/Fac. Met./UFPeL- Pelotas/RS, Brasil.

Ayoade, J.O (1991). *Introdução a Climatologia para os trópicos.*, 3ª ed., São Paulo: Bertrand Brasil., 332p.

Burroughs, W. J. (2001). *Climate Change-A multidisciplinary Approach*, Cambridge University Press, England.

Cunha, G.R (1977). *Meteorologia: Factos & Mitos- Passo Fundo*, EMBRAPA-CNTP.

Díez, P. F. (2000), *Procesos Termosolares en Baja, Media y Alta Temperatura*, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantábria

Duffie, J.A., W. A. Beckman (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2ª Edição, John Wiley and Sons Inc, New York, USA.

Lorenzo, E. (1994). *Electricidad Solar: Ingeniería de Los Sistemas Fotovoltaicos*, Artes Gráficas Gala, S.L., Espanha.

Lundari, D. M. C., W. R, Jesus (1994). *Estudo da variabilidade horária do número de horas de insolação no município de Bocatu*, FCA/UNESCO, Bocatu, Brasil.

Macome, M. A. (2004). *Characterization and improvement of direct solar radiation detector: A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of master of Science in*



physics in the faculty of Science at the university of KwaZulu-Natal (Westville Campus), R.S.A, pp27-49.

Martin, T. N., D. D. Neto et al (2004). *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, Brasil.

McDaniels, D. K. (1984). *The Sun: Our Future Energy Source*, 2<sup>nd</sup> Edition, University of Oregon, New York.

McGregor, G. R. (1998). *Tropical Climatology*, 2<sup>nd</sup> edition, England.

Peixoto J. P., (1981). *A radiação solar e o ambiente*, Comissão Nacional do Ambiente, Brasil.

Kratzenberg, M.G., S., Colle (2003). *Reastreabilidade de Radiômetros para medição da Energia Solar no Brasil*, Recife, Pernambuco, Brasil.

Teixeira, T. M. B. Et all (2005). *Um exemplo de uso de Modelos Físicos no ensino de Geologia de Engenharia*, Departamento de Geologia, UFRJ, Brasil.

Thornton, P.E. et al (1999). *Agricultural and Forest Meteorology: An improved algorithm for estimating incident daily solar radiation from measurements of temperature, humidity and precipitation*, n° 93.

Robredo, L. H. (1952). *Meteorologia Física y Climatologia Agrícolas*.

Varejão-Silva, (2005). *Meteorologia e Climatologia*, Recife, Brasil.

Website1: [http://www.lincx.com.br/lincx/saude\\_a\\_z/saude\\_homem.asp](http://www.lincx.com.br/lincx/saude_a_z/saude_homem.asp)

Website2: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2-6.htm>

Website3: [http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio\\_Emerson/flg0253/cap2-radiacao.pdf](http://www.geografia.fflch.usp.br/graduacao/apoio/Apoio/Apoio_Emerson/flg0253/cap2-radiacao.pdf)

Website4: <http://www.library.com.br/Filosofia/oefeito.htm>

Website5: <http://www.geografia.uniceub.br/Sensoriamento%20Remoto.pdf>