



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE METEOROLOGIA

EXAME DE ESTADO

TEMA:

AVALIÇÃO DE MODELOS DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL NA
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MAPUTO OBSERVATÓRIO



Autor: Augusto Joaquim Januário

Maputo, 2011

Dedicatória

Dedico este trabalho, meu pai Joaquim Januário, minha mãe Laurinda Assane, minha esposa Isabel Armindo Cossa e meus filhos Djaló e Yasi.

Declaração de honra

Declaro por minha honra que este trabalho é resultado de investigações feitas por mim e que não foi submetido a outro grau que não seja o indicado, grau de Licenciatura em Meteorologia, na Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

4

O Autor

.....
(Augusto Joaquim Januário)

INDICE	pag.
Capitulo I	1
1 Introdução.....	1
1.1 Identificação do problema e justificação do estudo.....	2
1.1.1 Identificação do problema.....	2
1.1.2 Justificação do estudo.....	2
1.2.2 Objectivos.....	2
1.2.1 Objectivo geral.....	2
1.2.2 Objectivos específicos.....	2
Capitulo II	3
2 Revisão bibliográfica.....	3
2.1 Conceitos básicos da radiação solar global.....	3
2.1.1 Distribuição espectral da radiação solar.....	3
2.1.2. Interacção da radiação solar com a atmosfera	3
2.1.3. Medição da radiação solar global.....	4
2..1.4. Instrumentos de medição da radiação solar global.....	4
a) Solarígrafo Kepp & Zonen.....	6
b) Piranometro	6
c) Heliografo Campbell Stokes.....	7
2.1.5. Estimativa da radiação solar global.....	7
2.1.6. Radiação solar global que atinge a superfície da Terra.....	9
2.1.7. Radiação solar extraterrestre ou radiação solar no topo da atmosfera.....	10
Capitulo III	10
3 Metodologia	10

3.1	Localização, descrição de área de estudo, dados utilizados e modelos.....	10
3.1.1	Localização, descrição da área de estudo.....	10
3.1.2	Dados utilizados.....	10
3.2	Descrição dos modelos.....	11
3.2.1	Modelo de Allen.....	12
3.2.2	Modelo de Hargreaves & Samani.....	12
3.3	Calibração dos modelos.....	13
3.4	Validação dos modelos a partir de análises estatísticas.....	14
3.5	Coefficiente de variação.....	14
3.6	Raiz quadrada do erro médio “RMSE”.....	15
3.7	Índice de concordância de Willmott (d).....	15
3.8	Índice de confiança ou desempenho (c).....	16
Capítulo IV	17
4	Resultados e discussão.....	17
4.1	Análise dos valores observados, estimados período (1971-2000).....	17
4.2	Avaliação dos modelos com base nos valores observados e ajustados.....	18
4.2.1	Radiação solar global estimada ajustada.....	18
4.2.2	Avaliação dos modelos.....	19
Capítulo V	22
5	Limitações, Conclusões e Rrecomendações.....	22
5.1	Limitações.....	22
5.2	Conclusões finais.....	23
5.2	Recomendações.....	24

7 Referencias Bibliográficas.....	25
Anexos.....	33

Lista de tabelas

Tabela (4) Valores observados e estimados da radiação solar global, (1971-2000)	28
Tabela (5) Valores observados e ajustados da radiação solar global, (1971-2000)	29
Tabela (6) Valores da raiz quadrada do erro médio “RMSE”, coeficientes de variação (CV), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de “Willmott” (d) e índice de confiança (c).....	29

Lista de figuras

Figura (1) Solarígrafo Kipp & Zonen BD 41.....	5
Figura (2): Piranómetro Kipp & Zonen CM 6 B.....	6
Figura (3) Heliografo de Campbell-Stokes.....	7
Figura (4) valores estimados e observados da radiação solar global (1971-2000).....	18
Figura (5) Equação de regressão linear obtido através de valores da radiação solar global medidos e estimados, modelo de Allen.....	19
Figura (6) Equação linear de regressão linear obtido através de valores da radiação solar global medidos e estimados do modelo de Hargreaves & Samani	19
Figura (7) Valores observados e ajustados da radiação solar global (1971-2000)	21

ANEXOS

ANEXO I a : Valores de declinação solar (δ) determinado a partir da formula de (Spence-Iqbal, 1983 e (Klein, 1977).....	28
ANEXO I b : Valores médios mensais de Ângulo horário, da Estação Meteorológica Maputo Observatório: Latitude25°.58	29
ANEXO I c : Médias mensais da radiação extraterrestre.....	29

ANEXO II

ANEXO II a : Variação mensal da declinação solar.....	31
ANEXO II b : Distribuição mensal da radiação solar global extraterrestre.....	31
ANEXO II c : Valores estimados e observados da radiação solar global (1971-1980)....	32
ANEXO II d : Valores estimados e observados da radiação solar global (1981-1990)....	32
ANEXO II e : Valores estimados e observados da radiação solar global(1991-2000)....	32
ANEXO III f : valores mensais das temperaturas máximas e mínimas (1971-2000).....	33

RESUMO

Para este trabalho foi escolhido a Estação Meteorológica de Maputo observatório, localizada no sul de Moçambique, latitude 25:58 sul, longitude 32:35 Este, e altitude de 59.9 m, para um estudo de estimativa da radiação solar global. Os dados utilizados foram obtidos nesta Estação, apresentaram series homogêneas de dados de radiação solar global observada, temperaturas máximas e mínimas e pressão atmosférica no período entre 1971-2000. Para estimativa da radiação solar global foi utilizado o modelo proposto por Allen (1997) e Hargreaves & Samani (1982), que se baseiam de amplitudes térmicas das temperaturas (máximas e mínimas) do ar e da radiação solar extraterrestre. Foram utilizados também, dois coeficientes de ajuste; (k_r , a) propostos por Allen (1995) e (K_t) proposto por Hargreaves & Samani (1982). Assim, comparando os valores estimatidos, ajustados com valores observados o resultado mostra os seguintes valores extremos: Valores máximos observados da radiação solar global médias mensais, foram verificados entre Janeiro (574.7 cal/cm²) e, Dezembro (573.0 cal/cm²). E o valor mínimo foi observado em Junho (320.7 cal/cm²). Os valores máximos estimados através do modelo de Allen foram observados em Janeiro (561.5 cal/cm²) e Dezembro (560.7 cal/cm²). E o valor mínimo foi observado em Junho cerca de 337.4 cal/cm². Os valores máximos através do modelo de Hargreaves & Samani foram observados em Janeiro (543.7 cal/cm²) e Dezembro (550.8 cal/cm²). O valor mínimo foi observado em Junho cerca de (319.0 cal/cm²). Resultados dos valores ajustados; Os valores máximos, ajustados representando o modelo de Allen, foram observados em Janeiro (550.6 cal/cm²) e Dezembro (456.4 cal/cm²) e o valor mínimo ocorreu no mês de Junho (255.4 cal/cm²). Os valores máximos ajustados representando o modelo de Hargreaves & Samani, foram observados em Janeiro (536.5 cal/cm²) e Dezembro (535.1 cal/cm²) e o valor mínimo ocorreu no mês de Junho (327.0 cal/cm²). Os valores estimados e ajustados mostram uma boa concordância e uma correlação muito forte com os valores Observados. E com base nos coeficientes de correlação e índices de concordância, podemos concluir também que os modelos tiveram um desempenho muito bom.

- **Palavras – chave:** Radiação solar global, temperatura, estimativa, observado e actinométrica .

Capítulo I

1 Introdução.

A energia proveniente do Sol, que atinge a superfície da Terra é o factor mais importante no desenvolvimento dos processos físicos, Químicos que geram o tempo meteorológico e o clima. Ela tem influência nas diferentes actividades socio-económicas, concretamente, na agricultura, arquitectura, hidrologia, construção civil, entre outras,(Funari e Tarifa,1980).

Ferronato e Bagorn (2004), citando Thorton e Running (1999), afirmam que nem todas estações meteorológicas de superfície, se dispõem de instrumentos apropriados para medir a radiação solar global, assim, os pesquisadores procuram obter uma relação entre a radiação solar global observada e estimada de modo que o valor estimado seja o mais próximo possível ao valor real.

Os elevados custos de aquisição e manutenção dos instrumentos de medição como, Solarigrafos, Piranómetros, Actinografos e Heliografos contribuem negativamente na redução de números de estações actinométricas (estações que medem a radiação solar) existentes em Moçambique, e tem como consequência directa pouca informação sobre a radiação solar, fraca capacidade de reposição dos instrumentos avariados nas estações e falta de ampliação da rede actinométrica. Contudo, estudo feito no Inam mostra que, a disponibilidade e acesso dos valores medidos de radiação solar em Moçambique é limitado, (Gil e Rasquinho, 2008).

Os instrumentos de medição da radiação solar não são de fácil acesso, devido aos vários factores anteriormente mencionados, mas, existe a necessidade de se quantificar a radiação solar que incide num ponto da superfície da terra ao longo de todo periodo do ano. Deste modo, aplicação dos métodos empíricos para estimar a radiação solar constitui uma solução alternativa. Assim, os modelos empíricos são concebidos para terem capacidades de estimar dados suficientes e fiáveis para estudo de viabilidade económica, climático e outras aplicações. Estes modelos diferem entre si a partir das variáveis de entrada que cada um aplica. Um exemplo concreto de um modelo que já foi

usado varias vezes em Moçambique é modelo de Ångström, que se baseia em número de horas do brilho solar.

O presente trabalho esta estruturado em cinco capitulos, sendo abordados no capitulo (I) Introdução; (II) Revisão bibliografica; (III) Metodologia; (IV) Discussão de resultados e (V) Conclusão e recomendação, usando-se o modelo de Allen e Hargreaves & Samani para estimar a radiação solar global para Estação Meteorológica de Maputo Observatório.

1.1 Identificação do problema e justificação do estudo

1.1.1 Identificação do problema

A falta de aplicação de modelos de estimativas para determinar dados de radiação solar global em todas estações meteorologica de Moçambique constitui problema de haver pouca informação sobre dados coletados

1.1.2 Justificação do estudo

A energia proveniente do sol é considerada importante para os seres vivos, além disso, ela é de natureza limpa, gratuita, inesgotável e a mais disponível. Para o planejamento das actividades científicas, socio- economicas ela necessita ser quantificada de maneira que, a sua informação, seja bem aproveitada e aplicada para várias actividades.

Em Moçambique informações sobre a radiação solar em termo de dados são poucas devido a existência de uma rede actinométrica com poucas estações, tornando cada vez mais escassas por causa dos altos custos de aquisição, manutenção e calibração dos instrumentos.

1.2 Objectivos:

1.2.1 Objectivo geral

- Estimar a radiação solar global na Estação Meteorológica de Maputo Observatório no período compreendido entre 1971- 2000.

1.2.2 Objectivos específicos:

- Estimar a radiação solar a partir de modelo Allen e Hargreaves & Samani.
- Comparar os valores estimados e observados da radiação solar global.

- Avaliar modelo de Allen e Hargreaves & Samani, se são aplicáveis as condições meteorológicas da estação meteorológica de Maputo observatório.

Capítulo II

2 Revisão bibliográfica

2.1 Conceitos básicos da radiação solar global.

Valiati, (2005), citando Iqbal, (1983), numa abordagem sobre conceitos básicos da radiação solar global, definiu a Radiação solar global como sendo o fluxo solar total que incide na superfície da terra, situando-se no espectro electromagnético entre 0,35 μm à 4,0 μm , representando a soma dos fluxos da radiação solar directa e radiação solar difusa, que atinge a superfície terrestre. A Radiação solar difusa é a parte da radiação solar global que, difundida ou não selectivamente, atinge a superfície terrestre.

2.1.1 Distribuição espectral da radiação solar

A troca total de energia entre a Terra e o resto do universo ocorre por radiação. O sistema Terra-atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria energia para o espaço, sendo as taxas de absorção e emissão aproximadamente iguais (Iqbal, 1983).

A radiação electromagnética é considerada como um conjunto de ondas eléctricas e magnéticas, tendo como papel importante a transferência de calor entre a superfície da terra e atmosfera. As diversas formas de radiação caracterizadas pelo comprimento de onda, compõem o espectro electromagnético.

Em função do comprimento de onda o espectro da radiação solar divide-se em três regiões, assim, entre 0.4 à 0.73 μm encontra-se a radiação visível e que representa uma pequena faixa do espectro quando comparada com as outras faixas. A radiação do comprimento de onda inferior a 0.4 μm é chamada radiação ultravioleta (UV), e radiação com comprimento de onda superior a 0.73 μm é chamada de radiação infravermelha.

2.1.2 Interação da radiação solar com a atmosfera

Iqbal,(1983) citando Ångström, (1961) afirma que a radiação solar ao atravessar a atmosfera é absorvida pelo vapor de água, dióxido de carbono e ozónio, e uma parte é reflectida pelas nuvens e a outra espalhadas pelas moléculas e partículas no ar.

Valiate,2005 citando Escobedo, (1997) afirmou que a porção da radiação solar global absorvida aumenta a temperatura do ar e, por conseguinte, há emissão de radiação com comprimento de onda acima de 4µm no espaço e para a superfície da terra

Segundo Varejão-Silva, (2005), nem toda a radiação solar que incide no topo da atmosfera consegue alcançar a superfície da Terra. Deste modo, dos 100% de energia solar que alcança o topo da atmosfera, 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, 26% da radiação solar chega a superfície da terra depois de ter sido difundida (espalhada).

2.1.3 Medição da radiação solar.

Embora a melhor avaliação da radiação solar seja através de medidas directas, há no entanto, falta de dados de radiação solar em vários locais, devido ao limitado número de estações actinométricas e dificuldades de aquisição de instrumentos. O uso de modelos constitui uma alternativa para suprir a escassez de informação da radiação solar numa determinada zona ou região de interesse. Os modelos baseiam-se em equações empíricas, que utilizam os valores médios diários, mensais de radiação solar, relacionando com o número de horas de insolação, de temperaturas do ar, pressões atmosférica, e outros parâmetros meteorológicos.

2.1.4 Instrumentos de medição da radiação solar global

A medição da radiação solar é fundamental para estudo das influências das condições climáticas e atmosféricas. Dai que, a sua medição é condição necessária e de extrema importância para actividades científicas e socio-económicas. Estas medições podem facilitar o acesso e disponibilidade de informações actinométricas.

Figuras que se seguem representam instrumentos que servem para medir a radiação solar global.

a) Solarígrafo

Solarígrafo é aparelho que serve para medir a radiação solar global e Difusa. Ele é acoplado com dois Piranômetros com sensibilidades de calibração diferentes.

Exemplo de sensibilidade de um Piranometros:

$9.6 \times 10^{-6} \frac{V}{w.m^2}$ - é a Sensibilidade de Piranometro da radiação solar global.

$10.1 \times 10^{-6} \frac{V}{w.m^2}$ - é a Sensibilidade de Piranometro da radiação solar Difusa

O Solarígrafo recebe impulsos proveniente dos Piranometros e por sua vez, aciona um sistema que permite as penas se movimentarem sobre o papel. Este processo resulta dois gráficos que são feito em cima do papel em roloado.

O rolo tem um período de 45 dias e o registo é feito diariamente desde o nascer até ao pôr-do-sol. A figura (1) mostra um Solarígrafo Kipp & Zonen BD41 registador “Chart Recorder”

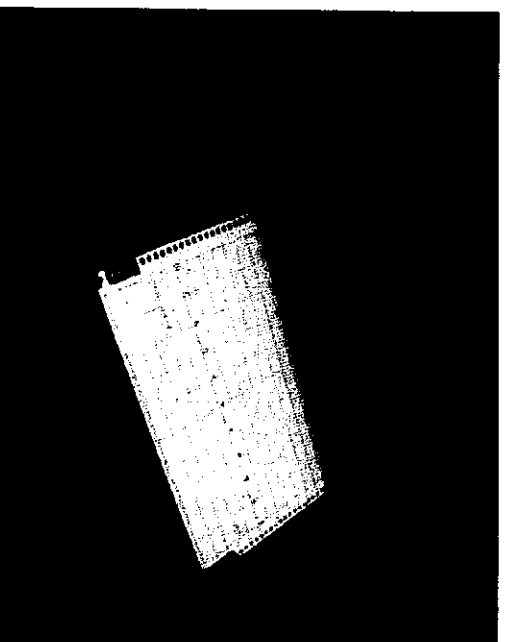


Figura 1: Solarígrafo Kipp & Zonen BD41

b) Piranometro

Piranometro é um instrumento cujo sensor de irradiação é uma pilha termoeleétrica, constituída por termopares em série. A função dos termopares é gerar uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintadas de preto e branco e igualmente iluminadas. Assim, a diferença de potencial medida na saída

do instrumento pode ser relacionada com o nível de irradiação incidente. A figura 2, ilustra uma foto de um Piranometro Kepp & Zonen CMB6



Figura 2: Piranometro Kepp & Zonen CM6B

c) Heliografos

O aparelho que regista a Insolação chama-se Heliógrafo. A figura (3) é uma fotografia que ilustra um heliógrafo de Campbell-Stokes, que consiste numa esfera de vidro, com cerca de 10 cm de diâmetro e, encontra-se montado concentricamente num suporte metálico esférico, num ambiente livre de obstáculos em redor. A radiação solar é focalizada pela esfera sobre um cartão de papel que, pela acção da radiação é queimada. O registo manifesta-se pela queimadura do cartão que se encontra inserida entre as ranhuras do Heliógrafo. As queimaduras em pontinhos, em linha recta, ou curvas sobre o cartão, que vão surgindo ao longo do dia do sol descoberto constituem registo de insolação.



Figura 3: Heliografo de Campbell-Stokes

2.1.5 Estimativa da radiação solar global

Devido a múltipla aplicação da radiação solar, é altamente desejável medi-la, por meio de aparelhos confiáveis. Infelizmente, devido ao alto custo dos equipamentos necessários, essas medidas não estão disponíveis em grande número do território Moçambicano. Apenas parte das Estações Meteorológicas Principais possuem instrumento (aparelhos) que registam a radiação solar, e, mesmo assim, deixam a desejar no que se refere à manutenção e à calibração periódica (Gil e Rasquinho, 2008). Portanto, não é só, em Moçambique que existem dificuldades de géneros, estas se fazem sentir quase em todos países, muito em particulares os países em via de desenvolvimento.

Segundo Valiate,2005, muitos pesquisadores, tais como: Martines-Iosano *et al*, (1984) Lopes *et al*, (1971) para o Rio Grande do Sul; Crivelli (1973) para Argentina, Gomez *et al*, (1995) para a Colômbia, utilizaram a metodologia clássica de Angostrom (1924) para caracterizar o regime de distribuição de energia solar em suas regiões de estudo, através a seguinte equação:

$$\frac{R_g}{R_{ex}} = a + b \frac{n}{N} \quad (1)$$

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; **n** é a insolação real, medida pelo instrumento e **N** é a insolação astronômica

(insolação que se observa no topo da atmosfera) também é denominada como a máxima possível.

Segundo Valiati,(2005) afirma que alguns autores tentaram correlacionar a irradiação solar global com fatores geográficos como a latitude e a altitude. Glover e McCulloch (1958) incluíram o efeito da latitude (ϕ) e apresentaram a relação (1.1), para $(\phi) < 60^\circ$.

$$\frac{R_g}{R_{ex}} = 0.29 \cos \phi + 0.52 \frac{n}{N} \quad (1.1)$$

Onde: **R_g** = radiação solar global (R_{calcm2}); **R_{ex}**= Radiação solar no topo da atmosfera (R_{calcm2}); ϕ = latitude, em (graus); **n**= número de horas de brilho solar; **N**= número máximo de horas de brilho solar (h)

Valiati, (2005) citando Bristow e Campbell (1984) afirma que eles demonstraram que existe uma relação directa entre a transmissividade e a radiação solar diária, elas variam com a temperatura do ar próximo a superfície. Esse modelo foi usado em numerosos estudos, e foram desenvolvidas melhorias durante os últimos anos. Para este autor, citando Supit *et al.*, (1998), ainda afirma que estes, compararam dois métodos de estimativa da radiação solar global concluindo que o método que utiliza a temperaturas (máxima e mínimas) do ar pode ser utilizado com boa precisão para a estimativa da radiação solar global em relação ao uso do método de Ångstrom.

No Chile, a complementação de dados da radiação solar global na série climatológica é feita a partir das temperaturas máximas e mínimas do ar baseando se nos modelos de estimativa com boa precisão, que conforme Meza e Varas (2000), os modelos propostos por Allen *et al.*, (1998) e Bristow e Campbell (1984), utilizando a temperatura do ar máxima e mínima para estimativa, possuem boa precisão.

Estudo de avaliação de modelos de estimativa em Cruz da Alma, na região do Recôncavo Sul da Bahia, o modelo de Hargreaves & Samani, usando amplitude térmica da temperatura para estimativa da radiação solar em regiões costeiras, apresentou melhor desempenho entre os modelos avaliados. Nesse estudo verificou se que, o modelo de Hargreaves & Samani era conservador, pelo facto de, estimativas feitas com o modelo,

raramente superestimaram a radiação solar global para condições de céu claro, demonstrou o estudo feito em (Recôncavo Sul da Bahia, 2008). Por tanto, esta é uma característica desejável já que a radiação global medida na ausência de nuvens representa um limite superior para a radiação solar incidente em dada localidade.

Valores de radiação solar em geral superior a radiação solar extraterrestre (aquela que atinge o topo da atmosfera), com frequências indicam problemas de calibração ou mau funcionamento de instrumentos (Allen1997).O mesmo autor no mesmo ano sugeriu o uso da expressão (2) para estimar a radiação solar global média mensal, usando dados de temperaturas do ar, médias mensais das máximas e mínimas e da radiação extraterrestre.

$$\frac{R_g}{R_{ext}} = K_r (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (2)$$

Onde K_r – coeficiente adimensional igual a 0,16 (para regiões do interior) e 0,19 (para regiões costeiras), T_x – temperatura máxima do ar, °C, T_{min} – temperatura mínima do ar, °C, R_a – radiação solar no topo da atmosfera, Cal/cm²

Hargreaves & Samani (1982), desenvolveram um modelo de estimativa da radiação solar que é caracterizada pela amplitude térmica das temperaturas do ar máximas e mínimas, valores médios mensais da radiação extraterrestre. Os mesmos autores, em 1994 consideraram ou coeficiente de Hargreaves & Samani igual 0,16, para regiões continentais e de 0,19 para regiões costeiras.A expressão (2.2) representa equação de Hargreaves & Samani.

$$\frac{R_g}{R_{ext}} = K_r (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (2.2)$$

2.1.6 Radiação solar global que atinge a superfície da Terra

Igbal, (1983) à parte da radiação solar global que atinge a superfície terrestre sem interagir com a atmosfera é denominada de radiação solar directa, e a radiação solar difusa é a parte da radiação solar global que, difundida ou não seletivamente, atinge a

superfície terrestre). Radiação Global (R_g) é calculada como a soma da radiação directa (RD) e radiação difusa (RS) de todos os setores (equação 3).

$$R_g = R_i + R_s \quad (3)$$

2.1.7 Radiação solar extraterrestre ou radiação solar no topo da atmosfera

Segundo Barreiro e Ribeiro,(2006), a radiação extra terrestre é a radiação lida acima da atmosfera terrestre, esta radiação não é influenciada pelas nuvens existentes na atmosfera pelo que facilmente se pode calcular ao longo do ano.O autor considera também que o movimento da Terra à volta do sol não é uma circunferência mas sim uma elipse. Isto faz com que a radiação extra terrestre não seja constante ao longo do ano, variando com as estações do ano.

Capítulo III

3 Metodologia

3.1 Localização, descrição da área de estudo, dados utilizados e modelos

3.1.1 Localização e descrição da área de estudo

O estudo foi realizado na Estação Meteorológica Maputo Observatório, que fica situada na zona sul de Moçambique, junto a costa, na baía de Maputo, cujas coordenadas são: latitude 25°.58' S, longitude 32°.34' E e altitude 59,9 m. O clima é do tipo tropical seco. O período mais quente do ano compreende os meses de Novembro a Abril e os mais frios são os meses de Maio a Outubro. O período de maior precipitação ocorre nos meses mais quentes, entre Novembro e Março.

3.1.2 Dados utilizados.

Para realizar este trabalho foram necessários trinta anos de dados de temperaturas (máxima e mínimas) diárias do ar, radiação solar global observada, pressão atmosférica e radiação extraterrestre. Os dados foram obtidos na Estação Meteorológica Maputo Observatório, no período entre (1971-2000). Os valores estimados da radiação solar global foram obtidos com base no modelo de Allen e Hargreaves & Samani.

3.2 Descrição dos modelos

Este trabalho foi realizado na perspectiva de contribuir através do modelo de Allen e Hargreaves & Samani para estimar a radiação solar global em Moçambique muito em particular na Estação Meteorológica de Maputo Observatório.

3.2.1 Modelo de Allen

Para estimar a radiação global usando modelo de Allen, consistiu em primeiro lugar, no cálculo da raiz quadrada da amplitude térmica das temperaturas máximas e mínimas médias mensais, multiplicando pela radiação solar global extraterrestre e pelo coeficiente empírico K_{ra} igual a 0.19. A expressão (4) representa o modelo de Allen

$$\frac{R_g}{R_{ext}} = K_r (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (4)$$

Onde: R_g é a radiação solar global média mensal; R_{ext} , radiação extraterrestre ou seja radiação no topo da atmosfera. K_r é o coeficiente empírico, T_{max} , temperatura média das máximas mensais; T_{min} , temperatura média das mínimas mensais. Em segundo lugar, calculou-se o K_r com base na fórmula (4.1)

Os valores do coeficiente empírico K_r , foram obtidos calculando a raiz quadrada da razão entre a pressão atmosférica da Estação Meteorológica Maputo Observatório e a pressão ao nível médio das águas do mar, multiplicando pelo coeficiente K_{ra} igual a 0.19. O coeficiente K_{ra} igual a 0.19 significa que a Estação Meteorológica Maputo Observatório fica situada junto a região costeira. A expressão (4.1) representa a fórmula do coeficiente empírico K_r

$$K_r = K_m \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.5} \quad (4.1)$$

Onde: P é a pressão atmosférica da estação em pascal (Pa) e P₀ (1013.24 Pa) é a pressão ao nível médio das águas do mar em pascal (Pa).

3.2.2 Modelo de Hargreaves & Samani

Para estimar a radiação global usando o modelo de Hargreaves & Samani foi necessário calcular a raiz quadrada da amplitude térmica das temperaturas máximas e mínimas médias mensais, multiplicando pela radiação extraterrestre e coeficiente empírico **K_r** igual a 0.19, para Estação Meteorológica Maputo Observatório, situada junto a costa.

A expressão (5) representa o modelo de Hargreaves & Samani.

$$\frac{R_g}{R_{ext}} = K_r (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (5)$$

Onde: **R_g** é a radiação solar global média mensal; **R_{ext}**, radiação extraterrestre ou seja radiação no topo da atmosfera. **K_r** é o coeficiente empírico, **T_{max}**, temperatura média das máximas mensais; **T_{min}**, temperatura média das mínimas mensais. A radiação solar global no topo da atmosfera (**R_{ext}**) foi calculado segundo a expressão (6.)

$$R_{ext} = \frac{24 \times 3600 \times G_{sc}}{\pi} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360dn}{365} \right) \right] \times \left[\cos \phi \cos \delta \operatorname{Sen} \omega + \frac{2\pi\omega}{360} \operatorname{Sen} \phi \operatorname{Sen} \delta \right] \quad (6)$$

Onde: **G_{sc}** - é a constante solar (**G_{sc} = 2.0 cal.cm⁻²min⁻¹ = 1367 J/m²**), **dn** - dia Juliano e varia de 1 a 365; **φ** - latitude dum lugar; **ω** - ângulo horário; **δ** - declinação dos raios solares que varia de -23.5

Declinação solar foi calculada usando a fórmula de Spencer expressão (6.1)

$$\delta = 572958 \left(0.0069180 - 0.399912 \cos A + 0.07025 \operatorname{Sen} A \right) + 0.006758 \cos 2A + 0.00090 \operatorname{Sen} 2A - \operatorname{Sen} 2A - 0.00269 \cos 3A + 0.00148 \operatorname{Sen} 3A \quad (6.1)$$

Onde A é o ângulo diário, foi calculado através da fórmula (6.2)

$$\text{Angulo diário} : A = \frac{360}{365} (dn - 1) \quad (6.2)$$

Calculou se a insolação astronómica a partir da expressão (6.3)

$$N = \frac{2\omega}{15} \quad (6.3)$$

Onde: W_s é o ângulo horário

O ângulo solar, (W_s) indica o deslocamento do sol, deste o nascer até ou ocaso do sol.

Foi determinado pela equação (3.5)

$$\omega_s = ar \cos s(-tag\phi \times tag\delta) \quad (6.4)$$

Onde: W_s é o ângulo horário, ϕ é a latitude, δ é a declinação solar.

Calculou-se a declinação solar usando fórmula de Klein. Ao usar esta fórmula assume-se que a órbita da terra é circular.

A expressão (6.5) representa fórmula de Klein para calcular a declinação.

$$\delta = 23.5 \text{ Sen} \left[360 \times \frac{284 + dn}{365} \right] \quad (6.5)$$

Onde: dn é número de ordem de dia.

Os valores médios mensais de T_{max} , T_{min} e P , foram calculados com base nas expressões (7)

$$T_{max} = \frac{\sum_{i=1}^k T_i}{k}, T_{min} = \frac{\sum_{i=1}^k t_i}{k}, P = \frac{\sum_{i=1}^k P_i}{n} \quad (7)$$

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 par a cada ano; $k = 30$ é o número de anos considerados.

Todos os cálculos aqui realizados tiveram como suporte o pacote estatístico MS-Excell.

3.3 Calibração dos modelos

A calibração dos modelos foi feita comparando valores medidos e estimados com base no pacote estatístico Microsoft Excel, para os trinta anos em que foram utilizados para o cálculo dos parâmetros empíricos dos modelos.

A disposição dos valores obedeceu a seguinte ordem: No eixo x os valores observados (medidos) e no eixo y os valores estimados.

Com base na disposição dos valores foram obtidos expressões lineares e seus respectivos coeficientes lineares para cada modelo. E a partir dessas expressões foi possível ajustar valores estimados da radiação solar global para validar os modelos.

3.4 Validação dos modelos.

Valores medidos em trinta anos foram utilizados para estimar a radiação solar global através de equações. Em seguida foi realizada uma comparação entre os valores estimados e medidos com base nos índices estatísticos

Para validar os modelos foi necessário calcular parâmetros estatísticos tais como, coeficiente de variação, correlação, índices de concordância e índice de confiança ou desempenho

Os valores estimados foram ajustados e validados com base nos coeficientes de variação, correlação e os modelos foram validados segundo índices de concordância e índice de confiança ou desempenho.

3.5 Coeficiente de variação (CV)

O coeficiente de variação (CV) foi determinado segundo a expressão (7.1)

O coeficiente de variação (CV) é adimensional, sendo zero quando não houver variabilidade entre os dados, ou seja, quando desvio padrão igual a zero, o que ocorre quando todos os valores da amostra são iguais. Quanto menor for o CV, mais homogêneo é o conjunto de dados. Geralmente, um valor $CV = 0,25$ indicará que o conjunto é razoavelmente homogêneo. Foi usado a classificação de Pimentel Gomes (1987), para fazer o estudo desse coeficiente, sendo:

- CV < 10 -----> baixo
- 10 ≤ CV < 20-----> médio
- 20 ≤ CV < 30 ----->alto
- 30 ≥ CV-----> muito alto

$$CV = 100 \times \left(\frac{RMSE}{\bar{X}} \right) \quad (7.1)$$

Onde:

X = média dos valores medidos;

RMSE= Raiz quadrada do erro médio

3.6 Raiz quadrada do erro médio

Para ter informação correspondente o desempenho do modelo calculou-se a raiz quadrada do erro médio “Root Mean Square Error” (RMSE). Este parâmetro é responsável para verificar a dispersão dos dados. Portanto, quanto menor o seu valor, menor a dispersão dos dados em torno do modelo. A expressão (7.2) representa a raiz quadrada do erro médio “RMSE”

$$RMSE = 100 \times \frac{\left[\sum_i^N (E - O_i)^2 / N \right]^{0.5}}{O} \quad (7.2)$$

Onde:

O_i = valores medidos em cal/cm².min;

E_i = valores estimados em cal/cm².min

N = número de observações em hora;

O = valor médio medido em cal/cm² min

3.7 Índice de concordância de Willmott (d)

Para avaliar o grau de relacionamento entre dados estimados e observados calculou-se o índice de concordância, que consistiu em agrupar os dados e substituir na formula (7.3).

Este índice mostrou que os valores ajustados do modelo de Hargreaves & Samani ficaram próximos da recta no gráfico de dispersão. O coeficiente de Willmott (d) ou índice de concordância foi calculado pela expressão (7.3).

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sum (O_i - \bar{E}_i)^2}{\sum (O_i - E | + | O_i - \bar{O} |)^2}} \quad (7.3)$$

Onde:

E = Média dos valores estimados em

O= valores medidos em

E= valores estimados em

3.8 Índice de confiança ou desempenho (C)

O índice de confiança indica o desempenho dos modelos, reunindo assim, o índice de precisão (r) e de exactidão (d), sendo expresso pela equação (7.4).

$$C = r \times d \quad (7.4)$$

onde:

r= coeficiente de correlação;

d = coeficiente de Willmott

Capítulo IV

4 Resultados e discussão.

Numa análise em torno dos resultados, importa salientar em primeiro lugar os elementos que contribuíram bastante, na estimativa da radiação solar global. Entre eles destacam-se: Declinação solar tabela (4), ângulo horário tabela (5) e radiação solar no topo da atmosfera tabela (6), veja no anexo I

A Figura (8) e Figura (9) representam radiação solar global no topo da atmosfera e declinação solar, valores das temperaturas máximas e mínimas estão representados pela Figura (13). Estas figuras encontram – se no anexo II.

4.1 Análise dos valores observados e estimados, período (1971 – 2000).

A tabela 1, apresenta resultados de valores da radiação solar global estimada pelo modelo de Allen e Hargreaves & Samani e valores observados.

Tabela 1: Valores estimados e observados da radiação solar global, (1971-2000)

Meses	Modelos		V.observados(cal/cm2)
	Allen(cal/cm2)	H-Samani(cal/cm2)	
Janeiro	561.5	543.7	574.7
Fevereiro	456.4	450.6	546.2
Março	450.6	439.3	491.1
Abril	388.3	374.0	411.8
Maior	365.2	347.6	347.1
Junho	337.4	319.0	320.7
Julho	354.8	335.6	330.9
Agosto	405.5	378.5	382.1
Setembro	447.1	424.3	421.4
Outubro	515.3	495.6	465.3
Novembro	542.4	512.1	497.1
Dezembro	560.7	550.8	573.0

A figura 10, 11 e 12 do anexo II, mostram o comportamento dos valores estimados e observados em três décadas: (1971-1980), (1981-1990) e (1991-2000). A Figura-12, anexo II c) e Figura-12, anexo II e) representam valores estimados e observados. Uma das curvas da figura-10 que representa modelo de Allen, Subestima a radiação solar global de Janeiro a Abril e superestima, de Abril a Dezembro. Esta situação verifica-se numa forma similar na Figura-12, anexo II e). Assim, análise feita sobre o acontecimento foi

encontrada a seguinte evidência: Variabilidade das temperaturas e pressões atmosféricas nas três décadas.

Figura (4) mostra o comportamento das curvas dos valores estimados e observados. Nesta figura observa-se que as curvas dos valores estimados encontram-se próximas uma da outra, de Janeiro a Maio e coincidem com valores observados de Maio até Dezembro. Não existem evidências para este acontecimento. Dai que, recomenda-se o reajuste dos coeficientes K_r .

Fazendo uma análise temporal dos valores da radiação solar global da figura (4) observa-se valores máximos em Janeiro e Dezembro e valores mínimos em Junho.

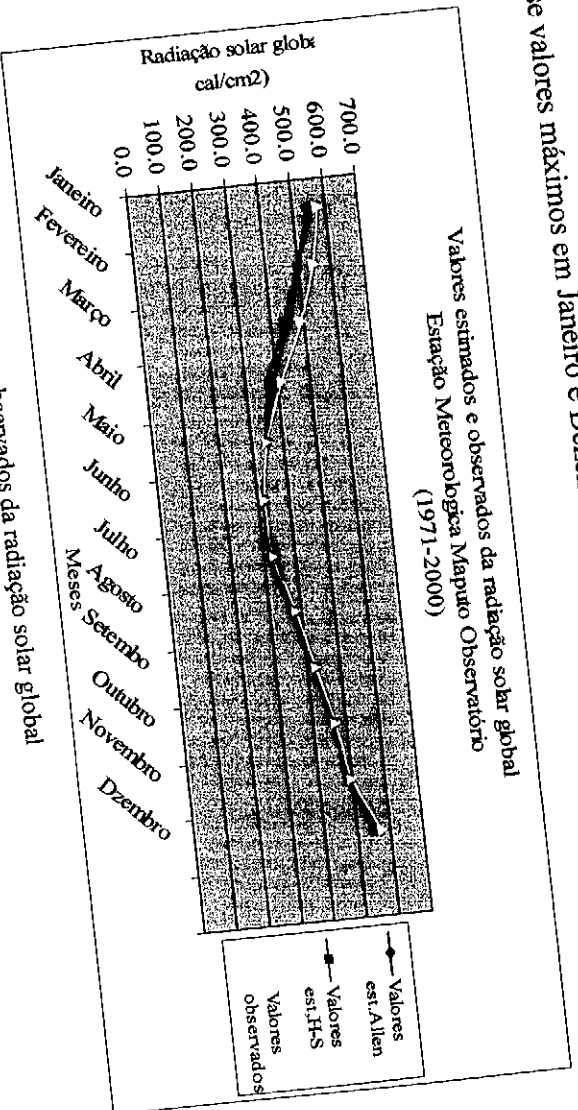


Figura 4: valores estimados e observados da radiação solar global

4.2 Avaliação dos modelos com base nos valores observados e ajustados.

4.2.1 Radiação solar global estimadas e ajustada

Para obter valores próximos aos valores observados (medidos) da radiação solar global, foram ajustados valores estimados a partir das expressões de regressão lineares.

A figura (5 e 6) mostra equações de regressão lineares que, a partir delas foram obtidos valores ajustados da radiação solar global, representando modelo de Allen e Hargreaves & Samani.

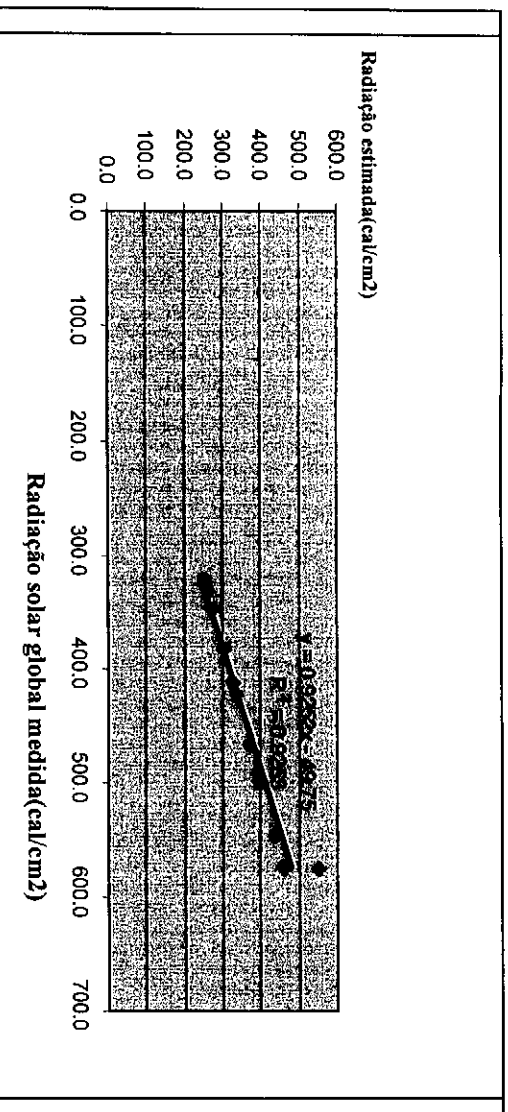


Figura-5; Equação de regressão linear obtido através de valores da radiação solar global medidos e estimados do modelo de Allen

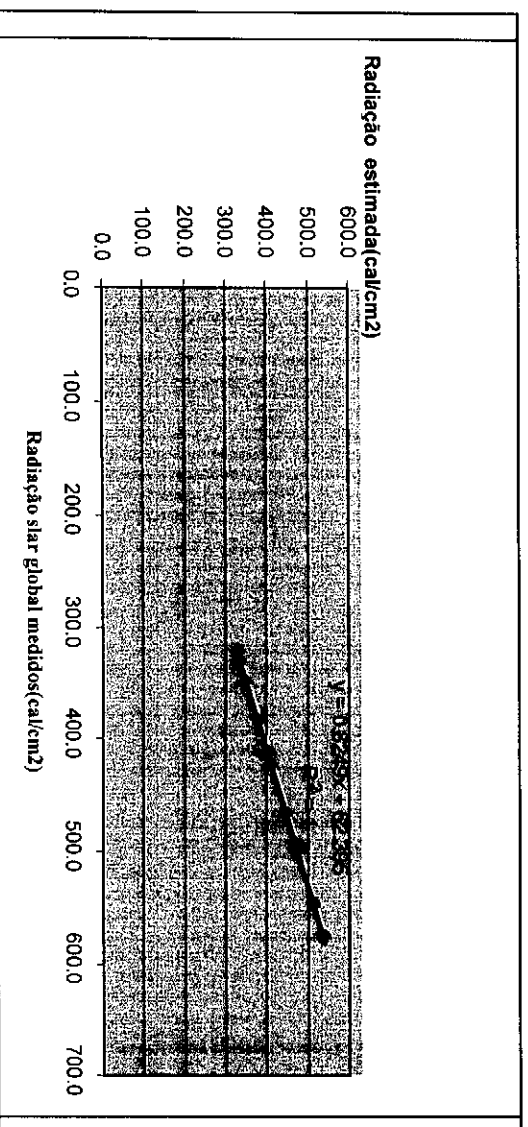


Figura-6: Equação de regressão linear obtido através de valores da radiação solar global medidos e estimados do modelo de Hargreaves & Samani

Os coeficientes de determinação (R^2) das duas figuras (5) e (6) são muito próximos, devido a forte concordância entre os valores observados e estimados da radiação solar global.

4.2.2 Validação dos modelos

Para validar os modelos foram utilizados dados correspondente o período de (1971-2000), ou seja, dados utilizados para estimar coeficientes empíricos e lineares. A tabela (2), apresenta valores observados e ajustados dos dois modelos.

Tabela -2: Valores ajustados e observados da radiação solar (1971-2000)

Modelo de Allen valores estimados (cal/cm ²)	Modelo de Hargreaves & Samani valores estimados (cal/cm ²)	Valores Observado (cal/cm ²)
550.6	536.5	574.7
435.1	513.0	546.2
391.2	467.5	491.1
328.0	402.1	411.8
276.4	348.7	347.1
255.4	327.0	320.7
263.6	335.4	330.9
304.3	377.6	382.1
335.6	410.0	421.4
370.6	446.2	465.3
395.9	472.4	497.1
456.4	535.1	573.0

Comparando o modelo de Allen e Hargreaves & Samani, na tabela (2) verifica-se que os valores ajustados do modelo de Hargreaves & Samani estão mais próximos dos valores observados. Esta situação pode se observar nas figuras (4) e (7).

A partir das expressões lineares obtidas, a radiação solar global foi ajustada, mostrando maior compatibilidade com os valores observados.

Fazendo uma comparação entre a figura (7) e a figura (4) observa-se que os valores da radiação solar global ajustada, representada pela figura (7) não superestimam a radiação solar global observada (medida)

Os valores ajustados do modelo de Hargreaves & Samani não superestima os valores observados. Esta situação verifica-se por causa da existência de uma correlação muito forte entre valores ajustados e valores observados.

Analisando o comportamento das curvas das figuras (9) e (13), verificam-se valores máximos entre Janeiro e Dezembro. E os valores mínimos verificam-se em Junho.

A figura (7) mostra o comportamento dos valores ajustados e observados

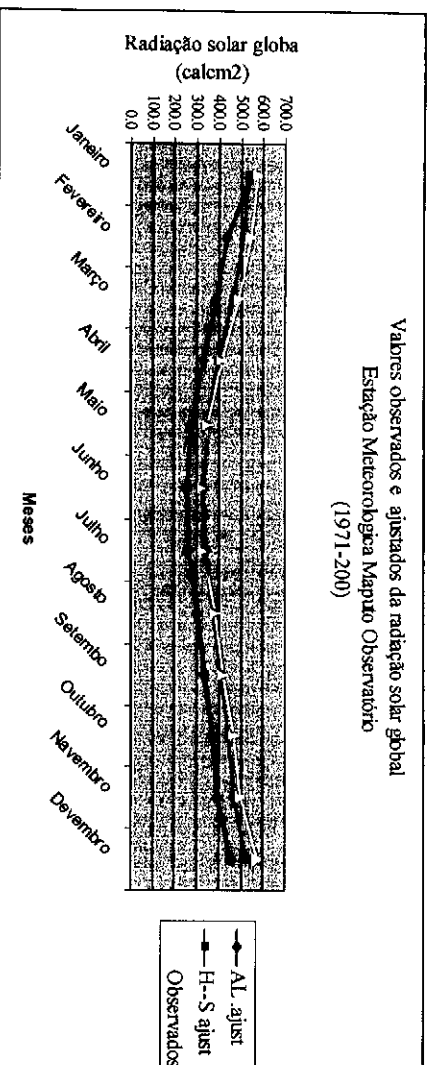


Figura -7: Valores observados e ajustados da radiação solar global (1971-2000)

Observando a figura (12) verifica-se também existência de uma correlação muito forte entre valores observados e ajustados do modelo de Hargreaves & Samani.

Tabela 3: Valores da raiz quadrada do erro médio "RMSE", coeficientes de variação (CV), coeficiente de correlação (r), índice de concordância de "Willmott" (d) e índice de confiança (c).

Modelos	RMSE	CV	R	D	C
Allen	5.66	1.3	0.96	0.79	0.76
Hargreaves&Samani	4.89	1.1	1.00	0.84	0.84

Os coeficientes de determinação e correlação mostram claramente existência de uma correlação muito forte entre valores observados e ajustados.

Os índices de concordância e de confiança do modelo Allen e Hargreaves & Samani são, (d=0.79, (c=0.76), (d=0.84) e (c=0.84) respectivamente, A partir deste índices pode se observar que há uma boa concordância entre valores observados e ajustados. A partir dos índices de concordância e de confiança na tabela 3, é fácil ver que os modelos tiveram um desempenho muito bom.

Capítulo V

5 Limitações, Conclusões finais e Recomendações.

5.1 Limitações

Séries de dados não homogêneas constituíram motivos que justificaram a opção de trabalhar com séries de dados de (1971-2000) da Estação Meteorológica de Maputo Observatório.

Falta de livros que abordam assuntos de estimativa da radiação solar global a partir do modelo de Allen e de Hargreaves & Samani. Serviu como alternativas buscas de matérias na Internet.

Não foi possível fazer uma análise espacial porque o estudo foi feito numa única estação.

5.1.1 Conclusões finais

Os resultados obtidos a partir do modelo de **Allen e de Hargreaves&Samani**, demonstram existência de uma correlação muito forte entre os valores estimados e observados.

Os índices de concordância e de confiança apresentado na tabela (3) mostram claramente que os modelos tiveram um desempenho muito bom.

Comparando os modelos através da tabela (3) e a figura 10,11 e 12, é possível observar que o modelo de **Hargreaves & Samani** apresentou o melhor desempenho.

5.1.2 Recomendações:

Em função dos resultados encontrados neste trabalho recomenda-se o seguinte:

Pode se usar o modelo de Allen e de Hargreaves & Samani para estimativa da radiação solar na Estação Meteorológica Maputo Observatório em todo período do ano.

Deve se repetir o estudo usando várias Estações Meteorológicas.

Considerar o índice de claridade nos próximos estudos.

Reajustar os coeficientes **K_r** dos modelos.

6 Referências Bibliográficas

- Funari e Tarifa 1980. Insoação e radiação solar global. <http://www.webmet.com/cbm-files>.
- Alessandro Ferronato e Rodrigo Stefano Bogorn, 2004. Estimativa da radiação Solar por meio de medidas de temperaturas de diferentes materiais exposto ao sol: http://www.etb.com.br/isolacao_radiacao.pdf.
- Gil e Rasquinho, 2008. Plano para o reforço da capacidade Institucional e técnicas do INAM.
- Muhammad Iqbal. 1983 An introduction to solar radiation
- Melania Inês Valiati. Calibração e avaliação do modelo Rad Est 3.0. Para estimativa da irradiância solar global em função de medida de temperaturas máximas e mínimas. <Http://www.athena.biblioteca.unsp.br>
- Varejaosilva. Meteorologia Climatologia, 2006. http://www.agritempo.gov.br/-publish/publicacoes/livros/Meteorologia_e_climatologia_vd2_Mar_2006.pdf
- Borge e Pampanel 2009. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar em cruz das Almas, Bahia.
- Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia, (2009,) <http://www.scielo.br>
- Allen, (1997). Estimation of mean monthly solar global radiation function of temperature <http://w.w.directy.umm.ac.id/data%20elmu/jurnal/a/ag>
- Hargreaves & Samani, (1982), <http://w.w.directy.umm.ac.id/data%20elmu/jurnal/a/ag>

ANEXOS

Anexo I

Estão disponíveis neste anexo, tabelas de declinação solar, ângulo horário, e radiação solar global no topo da atmosfera.

Anexo I a

Tabela-4: Valores de declinação solar (δ) determinado a partir da fórmula de (Spence-Iqbal (1983).) e de (Klein, 1977)

Meses	Declinação solar: Spence-valors medio mensal (grau)	Declinação solar: Klin valor médio mensal (grau)	Declinação solar: Spence-valor médio mensal (grau)	Declinação solar: Klim-valor média
Janeiro(17)	-20.90	-20.92	-20.82	-20.85
Fevereiro (16)	-12.61	-12.96	-13.01	-13.3
Março (16)	-2.04	-2.42	-2.03	-2.39
Abril (15)	9.48	9.41	9.55	9.49
Maió (15)	18.6*	18.79	18.70	18.81
Junho (11)	23.04	23.09	23.05	23.08
Julho (17)	21.35	21.18	21.26	21.10
Agosto (16)	13.99	13.45	13.84	13.0
Setembro (15)	3.34	2.22	3.50	2.37
Outubro (15)	-8.22	-9.60	-8.51	-9.85
Novembro (14)	-18.04	-18.91	18.23	19.45
Dezembro (10)	-22.84	-23.05	-22.96	-23.10

Anexo I b

Tabela-5: Valores médios mensais de Ângulo horário, da Estação Meteorológica Maputo Observatório: Latitude $25^{\circ}.58$

Meses	Ângulo horário (grau)	Meses	Ângulo horário (grau)
Janeiro	100.7	Julho	79.1
Fevereiro	96.6	Agosto	83.1
Março	91.0	Setembro	88.5
Abril	85.3	Outubro	94.1
Maiο	80.5	Novembro	99.2
Junho	78.0	Dezembro	101.9

Anexo I c

Tabela-6: médias mensais da radiação extraterrestre.

Meses	Radiação solar no topo da atmosfera médias mensais (cal/cm ²)	Meses	Radiação solar no topo da atmosfera média mensais (cal/cm ²)
Janeiro	1024.0	Julho	527.5
Fevereiro	924.0	Agosto	743.4
Março	840.0	Setembro	901.4
Abril	692.0	Outubro	963.3
Maiο	567.0	Novembro	963.3
Junho	504.0	Dezembro	1036.6

ANEXO II

Constam neste anexo, figuras de declinação solar, radiação solar global no topo da atmosfera, Figuras de valores estimados e observados da radiação solar global, (1971-1980), (1981-199) e (1991-2000).

Anexo II a

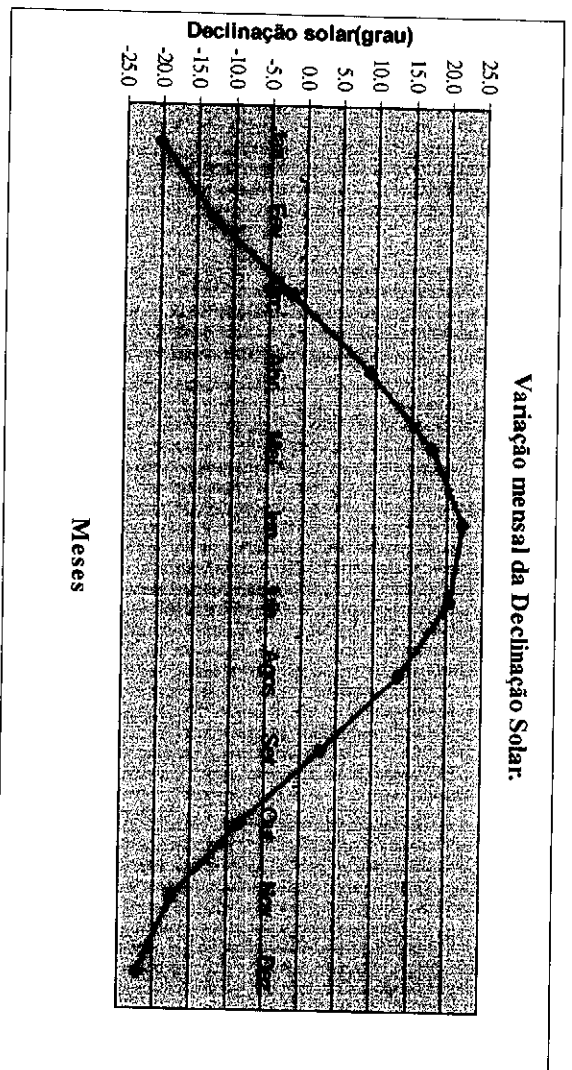


Figura-8. Declinação solar

Anexo II b

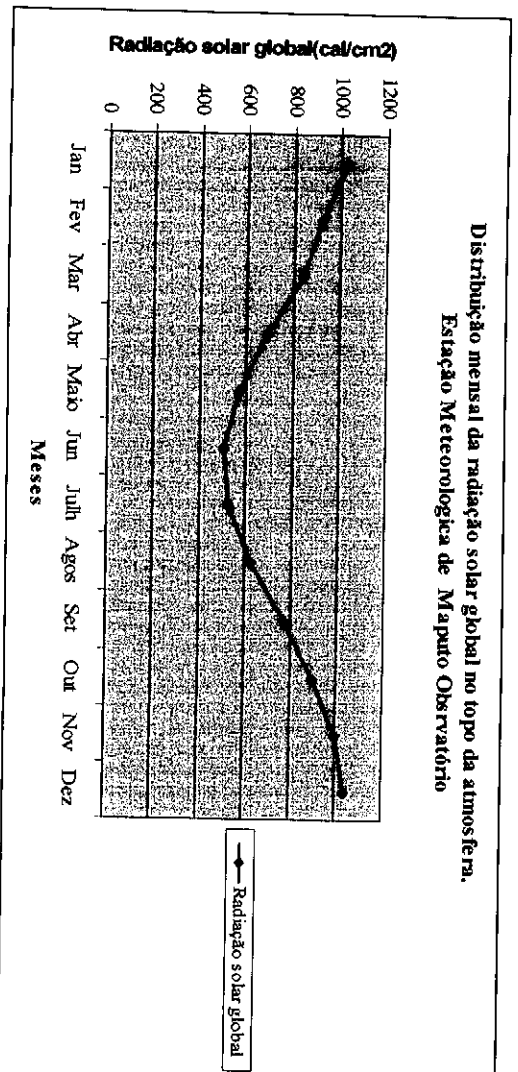


Figura-9: Radiação solar global no topo da atmosfera

Anexo II c

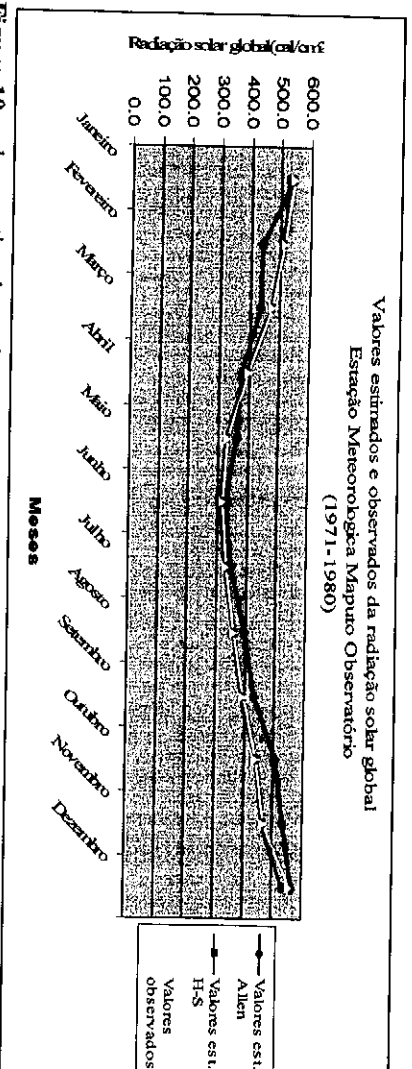


Figura-10: valores estimados e observados da radiação solar global (1971-1980)

Anexo II d

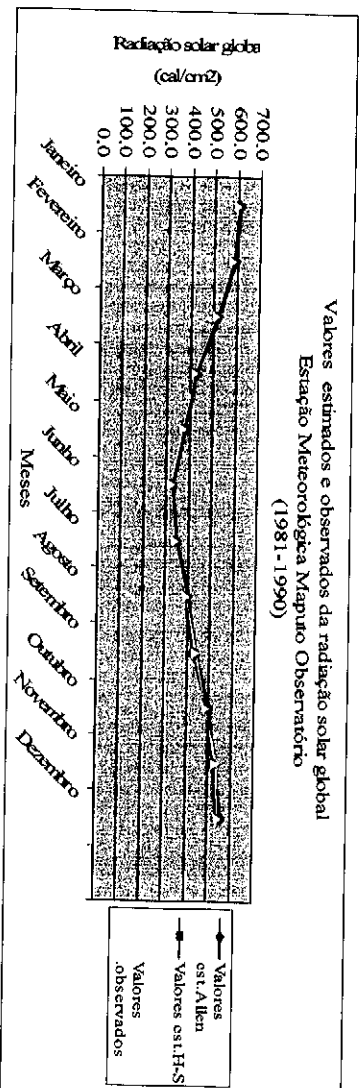


Figura-11: valores estimados e observados da radiação solar global (1981-1990)

Anexo II e

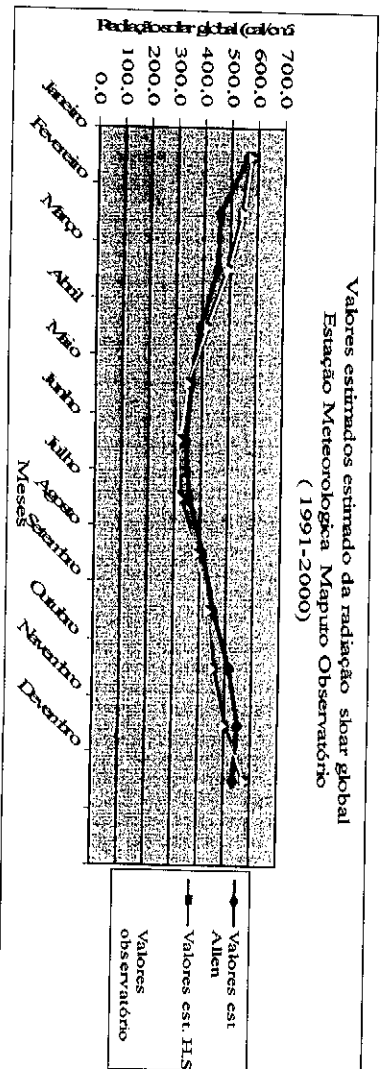
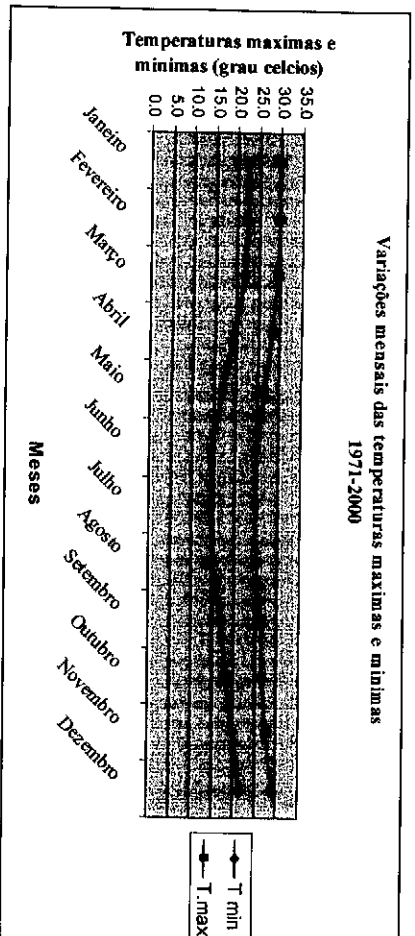


Figura-12: valores estimados e observados da radiação solar global (1991-2000)

Anexo II d



Figuras-13: Variações mensais das temperaturas máximas e mínimas

