

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

**IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA CIDADE DE MAPUTO - MOÇAMBIQUE:
EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS, ESTUDO DA COBERTURA DO CÉU E
MODELAGEM ESTATÍSTICA**

Botucatu

2018

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO

**IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA CIDADE DE MAPUTO - MOÇAMBIQUE:
EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS, ESTUDO DA COBERTURA DO CÉU
E MODELAGEM ESTATÍSTICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Energia na Agricultura).

Orientador: Alexandre Dal Pai.

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

F263i	<p>Fernando, Domingos Mário Zeca, 1985-</p> <p>Irradiação solar global para cidade de Maputo - Moçambique: evolução temporal das medidas, estudo da cobertura do céu e modelagem estatística / Domingos Mário Zeca Fernando. - Botucatu: [s.n.], 2018</p> <p>52 p.: ils. color., grafs. color.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2018</p> <p>Orientador: Alexandre Dal Pai</p> <p>Inclui bibliografia</p> <p>1. Radiação solar. 2. Energia solar na agricultura. 3. Modelagem gráfica (Estatística). I. Dal Pai, Alexandre. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.</p>
-------	--

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: "IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA CIDADE DE MAPÚTO - MOÇAMBIQUE: EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS, ESTUDO DA COBERTURA DE CÉU E MODELAGEM ESTATÍSTICA"

AUTOR: DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO
ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI
Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN
Bioprocessos e Biotecnologia / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. CARLOS ROBERTO PEREIRA PADOVANI
Informática / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 14 de dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Joaquina
e nossos filhos Otoniel e Quézia.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, pela saúde mental e física...

À minha família pelo apoio, incentivo...

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação, pelo apoio psicológico...

Aos colegas do Laboratório de Radiação Solar, pelo apoio técnico e científico, e também por terem tornado esses dois anos muito divertidos e...

À todas famílias brasileiras em diferentes cidades e estados, por terem me recebido numa forma tão maravilhosa...

À FCA em geral e ao programa de Energia na Agricultura...

Ao IBE - Instituto de Bolsas de Estudos em Moçambique pela bolsa de estudos concedida...

Aos amigos...

...o meu muito obrigado.

E disse Deus: Haja luz; e houve luz.
Gênesis 1:3

RESUMO

A energia solar é um elemento de clima que exerce influência em processos físicos e biológicos em escala local e global, interferindo, indiretamente, em outras fontes energéticas, assim como na flora, por meio da fotossíntese, quanto na fauna, por meio da adaptabilidade aos diferentes biomas distribuídos na terra. O conhecimento da irradiação solar que incide numa determinada localidade é muito importante para simulação da geração de energia solar fotovoltaica e térmica, e no cálculo da evapotranspiração, elemento fundamental para estudos de sistemas de irrigação e de produtividade. A razão entre a irradiação solar global na superfície terrestre horizontal e irradiação solar no topo da atmosfera é chamada de transmissividade atmosférica. Pelo motivo da medição da irradiação solar global não estar disponível em todas as localidades, usam-se modelos de estimativas a partir de parâmetros que são amplamente medidos em estações meteorológicas. A equação de Angstrom (1924) continua sendo a relação mais usada para se estimar a irradiação solar global média diária a partir do brilho solar, em localidades onde a medição não seja contínua ou os equipamentos não estejam disponíveis. O objetivo deste trabalho foi relacionar a irradiação solar e o brilho solar em diferentes coberturas de céu a partir da transmissividade atmosférica, e na estimativa do parâmetro energético da irradiação solar global na cidade de Maputo em Moçambique. A partir de quatro anos de dados medidos de irradiação solar global e de brilho solar, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia da cidade de Maputo, foi criada uma evolução das medidas, a fim de quantificar os parâmetros ao longo dos anos e classificar a cobertura do céu. A média dos valores da irradiação solar global foi de 17,96 MJ/m², do brilho solar foi de 7,8 horas, da transmissividade atmosférica foi de 0,55 e da razão de insolação foi de 0,66. Dos modelos testados para a estimativa da irradiação solar global para cidade de Maputo, a partir de modelos de fora do continente Africano, os modelos da Espanha e de Botucatu/Brasil mostraram um desempenho aceitável. Dos modelos de localidades do continente Africano, o modelo da Botswana, mostrou o melhor desempenho. Os coeficientes “a” e “b” do modelo anual para cidade de Maputo são 0,23 e 0,49 respetivamente.

Palavras-chave: Brilho Solar. Estimativa irradiação solar global. Nebulosidade. Modelo de Angstrom.

ABSTRACT

Solar energy is an element of the climate that exerts the influence of physical and biological processes on a local and global scale, indirectly interfering with other sources, as well as in flora, through photosynthesis, and as to fauna, through adaptability to the different biomes distributed in the Earth. The knowledge of the solar irradiation that affects particular locality is very important for the generation of photovoltaic and thermal solar energy, and for calculation of the evapotranspiration, which is fundamental element for studies of irrigation systems and of productivity. The ratio of solar irradiation at the top of the atmosphere and the global solar irradiation on the horizontal terrestrial surface is called Atmospheric Transmissivity. Because measurement of global solar irradiation is not available at all locations, model estimates are used from parameters that are widely measured in weather stations. The Angstrom equation (1924) continues to be the most used relation to estimate the global mean daily solar irradiation from sunshine, in places where the measurement is not continuous or the equipment is not available. The objective of this work was to study the mechanisms that relate meteorological parameters such as solar irradiation and sunshine in the evaluation of the sky cover and in the estimation of the global solar irradiation energy parameter in the city of Maputo, Mozambique. From four years of measured global solar irradiation and sunshine data provided by the National Institute of Meteorology of the city of Maputo, an evolution of the measurements was created in order to quantify the parameters over the years and classify the sky cover. The mean values of the global solar irradiation were 17.96 MJ / m^2 , the sunshine was 7.8 hours, the atmospheric transmissivity was 0.55 and the sunshine ratio was 0.66. Next, the global solar irradiation in Maputo was estimated by means of eight models from different locations and finally the annual and monthly Angstrom estimation model was proposed to estimate global solar irradiation in the city of Maputo. The models tested for the estimation of global solar irradiance for Maputo city, from models from outside of the African continent, the models from Spain and Botucatu / Brazil show an acceptable performance. And from models of locations on the African continent, the Botswana model showed the best performance. The coefficients "a" and "b" of the annual model for city of Maputo are 0.23 and 0.49 respectively.

Keywords: Sunshine. Estimation of global solar irradiation. Cloudiness. Angstrom model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Espectro eletromagnético.....	21
Figura 2 - Mapa de África mostrando Moçambique e Maputo.....	25
Figura 3 - Evolução temporal de medidas diárias de fotoperíodo (N), brilho solar (n), irradiação solar extraterrestre (Ho) e a global (Hg).....	30
Figura 4 - Evolução anual de médias mensais de brilho solar e de razão de insolação.....	31
Figura 5 - Evolução anual de médias mensais de irradiação solar global diária e de Kt.....	32
Figura 6 - Evolução anual da frequência média diária mensal das condições de céu na cidade de Maputo.....	33
Figura 7 - Distribuição da irradiação solar global diária estimada através dos modelos da literatura de localidades fora de África.....	35
Figura 8 - Distribuição da irradiação solar global diária estimada através dos modelos da literatura de localidades dentro de África.....	36
Figura 9 - Relação entre a transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição anual.....	39
Figura 10 - Validação do modelo anual para cidade de Maputo.....	39
Figura 11 - MBE do modelo Anual para Maputo em comparação com valores medidos em cada mês.....	41
Figura 12 - Relação entre a transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição mensal, período chuvoso e quente.....	43
Figura 13 - Relação entre a transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição mensal, período seca e fria.....	44
Figura 14 - MBE do modelo Anual para Maputo em comparação com valores medidos em cada mês.....	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1	Irradiação Solar	21
2.2	Componentes da Irradiação Solar Global	22
2.3	Brilho Solar	22
2.4	Estimativa da Irradiação Solar Global	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Localização e Clima	25
3.2	Instrumentação e Controle de Qualidade dos Dados	26
3.3	Avaliação de Modelos (Equação de Angstrom).....	27
3.4	Modelo de Angstrom para Maputo	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1	Evolução Temporal das Medidas.....	30
4.2	Análises dos Modelos da Literatura para Maputo.....	34
4.3	Modelo Proposto para Maputo.....	38
5	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Moçambique localiza-se na costa sudeste de África entre os paralelos 10°27' e 26°56' de latitude sul e os meridianos 30°12' e 40°51' de longitude leste. É banhado pelo Oceano Índico e contém uma superfície territorial de 799.380 km². Apresenta um dos mais baixos níveis de consumo de energia do sul da África, onde 70% dessa energia é oriunda da biomassa (lenha e carvão), e o acesso à energia elétrica é disponível apenas para 23% da população (DOS SANTOS et al., 2013). Estudos mostram a existência de uma relação linear entre o crescimento econômico de um país e o consumo de eletricidade (YOO e LEE, 2010; EGGOH e BANGAKE, 2011).

Através do conhecimento das características da radiação solar incidente em uma região específica do globo terrestre é possível o dimensionamento da geração de energia (ANEEL, 2002). E a produção de energias através de fontes renováveis não só pode reverter esse tipo de cenário energético em países do terceiro mundo, mas também pode contribuir no combate à pobreza e à fome, melhorar a saúde e a educação, para além das mudanças climáticas e proteger as florestas (SCHWERHOFF; SY, 2017).

A radiação solar é a forma de energia que mais influência a vida na superfície terrestre, tanto a flora, por meio da fotossíntese, quanto à fauna, por meio da adaptabilidade aos diferentes biomas distribuídos na terra (SOUZA et al. 2005; LI et al. 2015). Do total da irradiação solar incidente no topo da atmosfera, na média, 51% chegam à superfície devido à atenuação pelos constituintes atmosféricos, recebendo o nome de irradiação solar global em superfície (OMETTO, 1981; KHORASANIZADEH; MOHAMMADI, 2016; LIU; JORDAN, 1960;). Esta irradiação é composta pelas componentes direta e difusa, sendo, dessa forma, os parâmetros mais importantes para simulação de energia solar fotovoltaica e térmica (YAO et al., 2014; DAL PAI et al., 2016). Também implica no cálculo da evapotranspiração, o que influencia nos sistemas de irrigação e de produtividade (ALMOROX; HONTORIA, 2004; DUMAS et al., 2015; QUEJ et al., 2016).

Um dos desafios da prática agrícola moçambicana, que é a base da economia nacional, esta relacionada com o uso de tecnologia para irrigação, para secagem e armazenamento de produtos agrícolas. Este contexto salienta que o estudo da irradiação solar e cobertura do céu, poderão mostrar a dinâmica da

variação dos níveis de energia solar sob influência das nuvens e conseqüentemente propor um planejamento e desenvolvimento adequado aos projetos de energia solar, turístico, secagem de produtos agrícolas, entre outros (TERAMOTO, 2010).

Os objetivos deste estudo são:

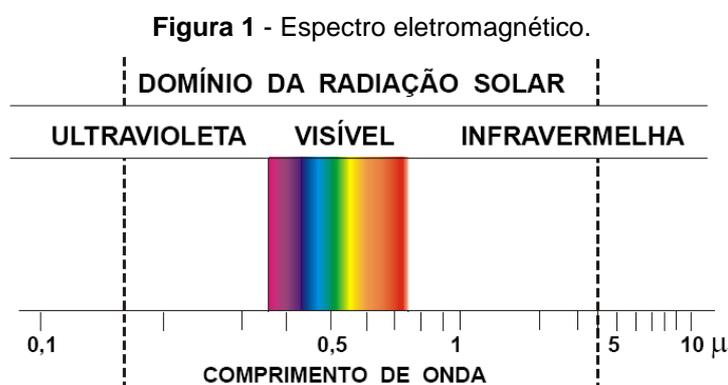
- Verificar a sazonalidade, a partir da série temporal de medidas da irradiação solar global em superfície horizontal, para Maputo/Moçambique.
- Analisar o comportamento da nebulosidade em Maputo/Moçambique a partir da transmissividade atmosférica (Kt).
- Avaliar os modelos empíricos de Angstrom de localidades diferentes na estimativa da irradiação solar global na cidade de Maputo/Moçambique.
- Propor um modelo empírico de Angstrom anual e mensal para estimar a irradiação solar global em Maputo/Moçambique.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Irradiação Solar

A Irradiação solar é a principal fonte de energia de onde derivam as outras formas energéticas utilizadas no planeta terra. Essa energia eletromagnética se propaga através de movimentos ondulatórios sem a necessidade de um meio material (VAREJÃO-SILVA, 2005). Essas ondas são retratadas por comprimentos de ondas (λ) que são a distância entre duas cristas ou vales consecutivos, e pelas frequências (ν) que definem o tempo necessário para se realizar um ciclo completo. E o produto do comprimento de onda e da frequência expressa a velocidade da luz (c) que se propaga no vácuo.

O conjunto de todos os comprimentos de onda, que varia desde 10^{-10} cm (raios gama) até cerca de 10^7 cm (ondas longas de rádio), forma o espectro eletromagnético. E apenas as radiações da faixa visível ou luz visível do espectro eletromagnético, de comprimentos de ondas entre $0,36$ e $0,74 \mu m$, podem ser detectadas pelo olho humano (VAREJÃO-SILVA, 2005). Essa faixa visível é de muita importância para as plantas e algas no processo da fotossíntese. E as irradiações com frequências superiores que a luz violeta, se chama irradiação ultravioleta, as que apresentam frequências menores que a luz vermelha se denomina irradiação infravermelha (fig. 1).



Fonte: VAREJÃO-SILVA (2005).

A irradiação solar no topo da atmosfera, também conhecida por irradiação extraterrestre, é a incidência solar por unidade de área numa superfície posicionada paralelamente à superfície da terra e no topo da atmosfera. A irradiação extraterrestre varia de acordo com a latitude local, declinação solar e ângulo horário. Esses fatores dependem dos movimentos de rotação (ao longo dos dias) e de translação da terra (ao longo dos anos). E pela influência da sazonalidade observa-se maiores valores nos períodos de verão e menores nos períodos de inverno devido à declinação solar.

2.2 Componentes da Irradiação Solar Global

A irradiação solar extraterrestre ao atravessar a superfície atmosférica, sofre alterações e como consequência apenas uma parcela dessa irradiação chega à superfície terrestre. Essa parcela é denominada de irradiação solar global (Hg), que é representada pela soma da irradiação solar direta e da irradiação solar difusa. A irradiação solar direta é a parcela da irradiação no topo da atmosfera que chega até a superfície sem interferência dos processos de espalhamento, absorção e reflexão, apresentando valores altos para dias de céu aberto. A irradiação solar difusa é a parcela da irradiação no topo da atmosfera que sofre espalhamento pela atmosfera atingindo a superfície terrestre em direções diferentes (OMETO, 1981).

A irradiação solar direta pode apresentar forte fluxo direcional, por sua incidência direta, torna-se mais energética ao atingir a superfície, podendo ser melhor aproveitada em sistemas de conversão energética como coletores e concentradores solares (MOLINEAUX; INEICHEN, 1996; ANTONIÉ et al., 2000). A irradiação solar difusa é fruto do espalhamento uniforme da irradiação solar com os constituintes atmosféricos, e pode ser aplicada em projetos de iluminação e em estudos de espécies em dosséis vegetativos, onde a penetração dos raios solares é dificultada pela copa das árvores (SZEICZ, 1994; KUUSK, 1992).

2.3 Brilho Solar

O intervalo de tempo entre nascer e pôr-do-sol, ou simplesmente as horas em que o sol não esteja oculto por nuvens ou por qualquer fenômeno atmosférico de natureza, chama-se brilho solar. E fotoperíodo é o número de horas, em horizonte

distribuído, em que o disco solar é visível para um observador situado à superfície terrestre. O brilho solar é sempre menor que ou igual ao fotoperíodo (MOTA, 1975; VAREJÃO-SILVA, 2005).

O heliográfico é o instrumento para medir o brilho solar, sendo um instrumento de fácil aquisição e necessita de pouca manutenção. O conhecimento do brilho solar de uma região é importante para o correto desenvolvimento do turismo, do planejamento urbano, de políticas relacionadas à saúde, além de contribuir para a adaptabilidade de espécies animais e vegetais (MOTA, 1975; VAREJÃO-SILVA, 2005). De uma forma geral, as estações meteorológicas no mundo medem continuamente o brilho solar.

2.4 Estimativa da Irradiação Solar Global

O custo, a operacionalização, manutenção e calibração dos piranômetros, que são instrumentos de medição da irradiação solar global, fazem com que a medição direta deste parâmetro não esteja disponível em todas as localidades (YORUKOGLU et al., 2006; BAKIRCI, 2009; AL-MOSTAFA et al., 2014; YAO et al., 2014). Para resolver esse problema, são encontrados, na literatura especializada, vários modelos empíricos que podem estimar a irradiação solar global a partir de parâmetros meteorológicos, climatológicos e geográficos que são mais simples e comumente medidos (YANG et. al., 2001; BAKIRCI, 2009; AL-MOSTAFA et al., 2014; YAO et al., 2014; DUMAS et al., 2015, NWOKOLO; OGBULEZIE, 2017).

A proposta de Angstrom (1924), que posteriormente foi modificada por Prescott (1940) na Eq. (1), continua sendo a relação mais utilizada para se estimar a irradiação solar global média diária a partir do brilho solar, em localidades onde a medição não seja contínua ou os equipamentos não estejam disponíveis (YANG et. al., 2001; MUNEER; GUL, 2000; ALMOROX et al., 2005; ZHANG et. al., 2017; BRABEC et al., 2016; NWOKOLO; OGBULEZIE, 2017).

$$K_t = a + bS \quad (1)$$

A transmissividade total atmosférica ($K_t = H_g / H_0$), também conhecida como índice de claridade, é uma grandeza adimensional que relaciona a irradiação solar

global (H_g) com a irradiação solar global no topo da atmosfera (H_0). Este parâmetro, além de quantificar a transparência da atmosfera, também explica a contaminação da atmosfera altamente carregada de aerossóis devido a sua relação direta com a concentração dos componentes atmosféricos. O parâmetro S é a razão de insolação ($S = n/N$) e depende do valor do brilho solar (n) medido e do fotoperíodo (N) calculado matematicamente. O fotoperíodo é considerado como a duração de presença da irradiação solar, desde o nascer até o pôr-do-sol. Já o brilho solar representa o tempo medido da irradiação solar ativa. Portanto, quando o valor de S está perto de 1, mostra um dia quase completamente limpo, mas se o valor fica perto de 0 é sinal de um dia quase completamente nublado.

O coeficiente a explica a fração mínima da transmissividade atmosférica recebida em um dia nublado quando a razão n/N é zero, enquanto que a soma ($a + b$) é o valor da fração máxima da transmissividade atmosférica sob condições de céu limpo (ALMOROX; HONTORIA, 2004). São coeficientes que apresentam dependência atmosférica, temporal e local, por isso observam-se diferentes valores para diferentes localidades e épocas do ano (PERSAUD et al., 1997; SUEHRCKE et al., 2013).

Em estudo de Tiris et al. (1996) para cidade de Gebze/Turquia com dados de cinco anos, em partição anual, obtiveram coeficientes para equação de Angstrom de 0,226 para a , e 0,418 para b . Para a cidade de Pradesh/Índia a irradiação solar global pode ser estimada usando os coeficientes $a = 0,20$ e $b = 0,53$ para médias diárias, mas durante o inverno (dezembro a fevereiro), para os mesmos coeficientes, será calculado com uma variação de 2-3% (SRIVASTAVA et al., 1993).

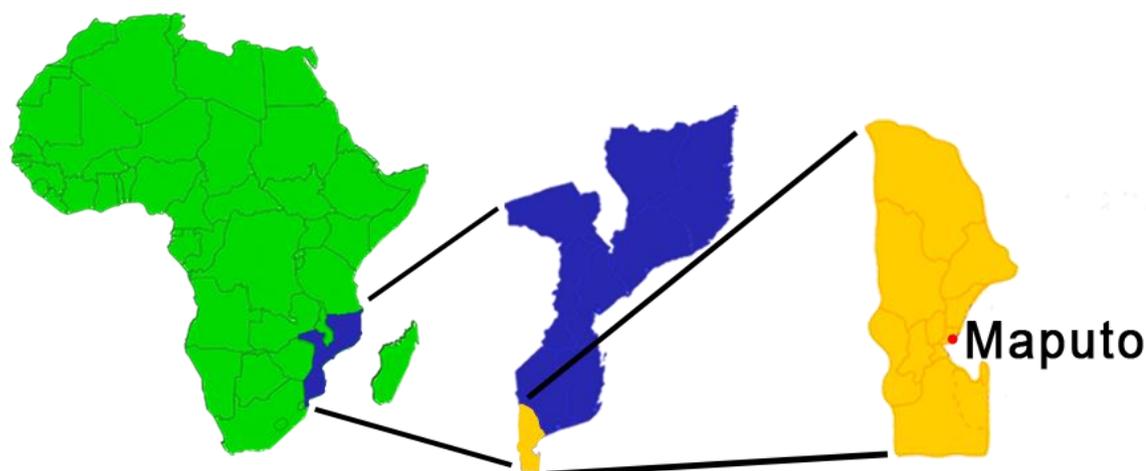
Ahmad e Ulfat (2004) encontraram $a = 0,324$ e $b = 0,405$ para coeficientes da equação de Angstrom na cidade de Karachi/Paquistão, e nesta cidade a menor transmissividade atmosférica foi de 0,474 observadas no mês de agosto e a maior foi de 0,669 observada no mês de novembro. E em estudo recente da revisão de modelos empíricos usados para estimar a irradiação solar global para vários países e cidades africanas, apresentou 732 modelos e 65 formas funcionais (CHUKWUJINDU, 2017), mas nenhum modelo para cidades de Moçambique foi apresentado neste estudo por não ter registros desses em literaturas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Clima

Para realização do trabalho foram usados dados de irradiação solar global e de brilho solar da estação do INAM - Instituto Nacional de Meteorologia de Maputo, Moçambique. Os dados foram registrados na partição diária referentes aos anos de 2004, 2005, 2008 e 2009. Maputo (latitude 25,58° sul, longitude 32,36°leste, altitude 70 m) é a capital de Moçambique (fig. 2), ocupa uma área de 346,77 km² e tem 1.225.868 habitantes.

Figura 2 - Mapa de África mostrando Moçambique e Maputo.



O clima de Maputo é tropical, e conceituado como Aw de acordo com a classificação climática de Köppen. A cidade contém duas estações principais, a quente e chuvosa (outubro a março), e a fria e seca (abril a setembro). Sua temperatura média máxima é de 26,2 °C e ocorre no mês de fevereiro, e a temperatura média mínima de 18,5 °C e ocorre no mês de julho. Maputo apresenta maior pluviosidade no verão, e sua média anual é de 781 mm, sendo o mês de agosto o mais seco com 15 mm, e de janeiro o mês de maior precipitação com 160 mm.

3.2 Instrumentação e Controle de Qualidade dos Dados

A irradiação solar global em superfície (H_g) foi medida por um piranômetro CM 6B - Kipp & Zonen e o brilho solar (n) obtido por um heliógrafo de Campbell Stokes. Os dados foram registrados por um dispositivo de aquisição de dados automatizado (*data logger*) da Kipp & Zonen e disponibilizados na partição diária em cal/cm² convertida posteriormente para a unidade de MJ/m².

O conjunto de 1462 medidas foi selecionado para compor o estudo. No intuito de comprovar a qualidade das medidas uma sequência de filtros lógicos foi aplicada por meio do MySQL (sistema de gerenciamento de banco de dados da Oracle Corporation) em sua versão 5.7 CE (*open source*). Os dados foram importados para o mecanismo MyISAM do MySQL que permitiu a utilização da linguagem de consulta estruturada (SQL) em sua manipulação.

A primeira etapa de filtragem foi responsável por comparar os dados da irradiação global com a irradiação extraterrestre (limite máximo) e o brilho solar com o fotoperíodo (duração do dia em horas). O que atestou que todas as medidas estavam abaixo do limite superior. A segunda etapa de filtragem foi responsável por verificar se as frações K_t e S apresentavam valores que não compreendiam o intervalo esperado (de 0 a 1). O que atestou que todas frações das medidas compreendiam o intervalo estipulado. A terceira e última etapa de filtragem foi responsável por verificar se haviam dados dos dois parâmetros para todos os dias do ano, requisito obrigatório para a modelagem. O que permitiu descartar 81 dias (4,93%) que se apresentavam ausentes para um dos parâmetros.

Após a filtragem pelo MySQL os dados foram exportados e inseridos no Microcal Origin versão 6 com o intuito de realizar a análise estatística, modelagem e criação de gráficos. A regressão linear entre K_t e S apresentou alguns dados demasiadamente distantes da reta linear, o que resultou no corte de 68 pontos (4,14%) do total. Neste sentido, a filtragem computacional aliada a regressão linear permitiu a eliminação de 149 pontos (10,19%), consolidando um conjunto de dados com 1313 medidas para o estudo.

3.3 Avaliação de Modelos (Equação de Angstrom)

Antes de desenvolver os modelos de estimativa da irradiação solar global para cidade de Maputo, fez-se avaliação de oito modelos da equação de angstrom (tabela 1) de localidades diferentes. Usando os valores de a e b foi estimada a H_g e comparada com os valores medidos, e a partir de indicativos estatísticos foi feita a avaliação do desempenho dos modelos, onde foi avaliada a aplicabilidade dos modelos para estimar a irradiação global para a cidade de Maputo.

Tabela 1 - Modelos de Angstrom de diferentes localidades para estimativa da irradiação solar global em superfície horizontal.

Autores	Local	Modelo
Almorox e Hontoria (2004)	ESPAÑA	$K_t = 0,2170 + 0,5453.S$
Ahmad e Ulfat (2004)	Karachi,/PAQUISTÃO	$K_t = 0,324 + 0,405.S$
Lewis (1992)	Tennessee/USA	$K_t = 0,14 + 0,57.S$
Correa (2011)	Botucatu/BRASIL	$K_t = 0,273 + 0,471.S$
Abbas e Elnesr (1977)	Gizé/EGIPTO	$K_t = 0,25 + 0,47.S$
Yohanna et al (2011)	Makurdi/NIGERIA	$K_t = 0,17 + 0,68.S$
Lewis (1983)	Harare/ZIMBABWE	$K_t = 0,32 + 0,46.S$
Luhanga e Andringa (1990)	BOTSWANA	$K_t = 0,24 + 0,513.S$

3.4 Modelo de Angstrom para Maputo

Para o desenvolvimento da equação de Angstrom, foi necessário o cálculo de K_t e S a partir da latitude (ϕ) local, irradiação solar no topo da atmosfera (H_0), fator de correção da excentricidade da órbita terrestre (E_0), ângulo do dia (Γ) em radianos, declinação solar (δ) em graus, fotoperíodo (N), ângulo horário (w_s) em graus, apresentadas pelas equações 2-7 (IQBAL, 1983).

$$H_0 = 37,61 \cdot E_0 \cdot (w_s \cdot \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{sen}w_s) \quad (2)$$

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos\Gamma + 0,00128 \cdot \sin\Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi(DJ - 1)}{365} \quad (4)$$

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos\Gamma + 0,070257 \cdot \sin\Gamma - 0,006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000907 \cdot \sin 2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \sin 3\Gamma) \quad (5)$$

$$N = \frac{2w_s}{15} \quad (6)$$

$$w_s = \arccos(-tg\phi \cdot tg\delta) \quad (7)$$

O K_t também foi usado para classificar a cobertura do céu da cidade de Maputo a partir da classificação de cobertura do céu de acordo com Escobedo et al. (2009) como se apresenta na tabela 2.

Tabela 2 - Os intervalos de K_t para classificação de cobertura céu.

K_t Intervalos	Cobertura do Céu
$0 \leq K_t < 0,35$	céu nublado
$0,35 \leq K_t < 0,55$	céu parcialmente nublado
$0,55 \leq K_t < 0,65$	céu parcialmente limpo
$0,65 \leq K_t < 1$	céu limpo

Para fins de modelagem, foram utilizados 75% dos dados, enquanto que os 25% restantes foram utilizados para validação. As equações de estimativa foram determinadas por meio de regressão linear simples, com respectivo coeficiente de determinação.

A validação foi obtida por meio dos indicativos estatísticos *mean bias error* (MBE) e *root means square error* (RMSE) apresentados pelas equações (8) e (9) respectivamente. Onde, K é o total dos pares de dados e d_i é a diferença entre os valores estimados e medidos. O RMSE quantifica a precisão do modelo ao valor medido, enquanto MBE faz análise se os dados foram sub ou sobrestimados.

$$MBE = \sum (d_i) / K \text{ (MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}) \quad (8)$$

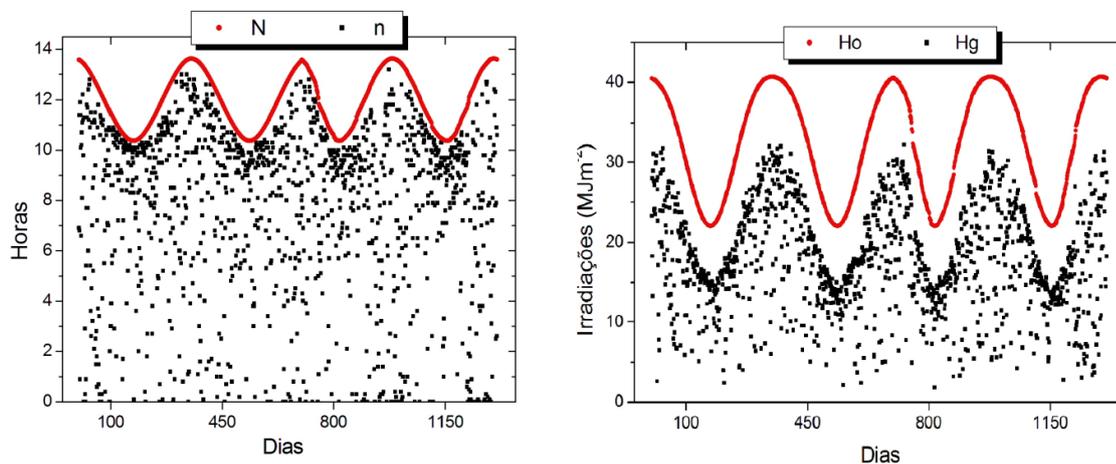
$$RMSE = \left[\sum (d_i)^2 / K \right]^{0,5} \text{ (MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}) \quad (9)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Evolução Temporal das Medidas

Para melhor se entender o clima de Maputo e a sazonalidade dos valores são apresentados na figura 3, os gráficos da evolução temporal das medidas de fotoperíodo e brilho solar, e das radiações solar extraterrestre e global na superfície horizontal.

Figura 3 - Evolução temporal de medidas diárias de fotoperíodo (N), brilho solar (n), irradiação solar extraterrestre (Ho) e a global (Hg).



Na figura 3 o fotoperíodo (N) e irradiação extraterrestre (Ho) apresentam um comportamento periódico ao longo do ano, evidenciando a sazonalidade devido à declinação solar associada ao movimento de translação da terra. Por isso que os maiores valores do fotoperíodo, brilho solar e das radiações ocorrem de outubro a março (período quente e chuvoso) e os menores nos meses entre abril a setembro (período seco e frio). Porque o brilho solar e a irradiação solar global antes de atingir a superfície interagem com atmosfera, como é o caso de nuvem, eles sofrem uma grande variação de espalhamento dos pontos, pois têm dias no período chuvoso com baixos valores comparados com o período pouco chuvoso.

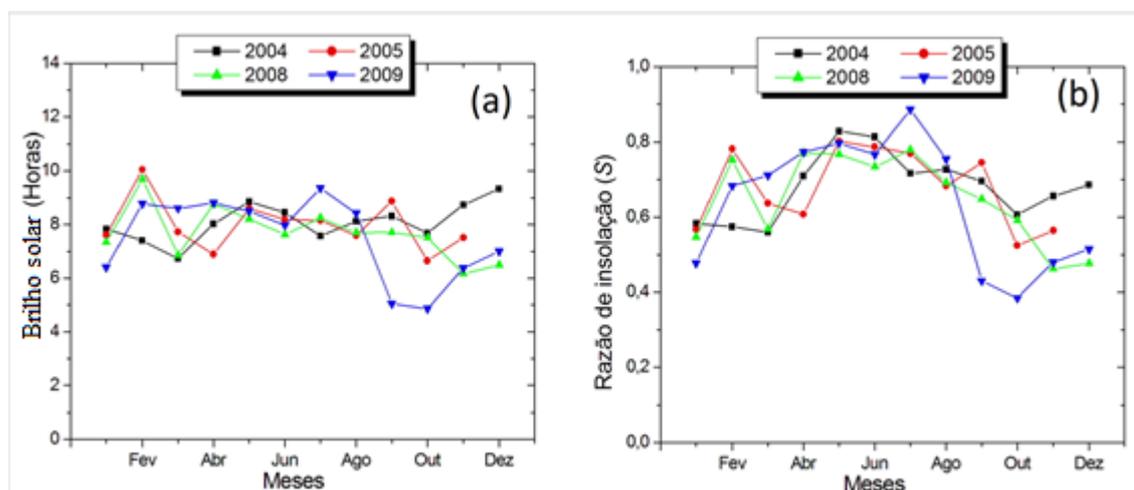
O valor máximo fotoperíodo foi de 13,62 horas, durante a estação chuvosa e quente, e valor mínimo de 10,37 horas durante a estação seca e fria. Essa tendência também acontece nos valores de brilho solar, onde a máxima de 13,2 horas e mínima de zero. E de acordo com Varejão-Silva (2006), porque a cidade de Maputo

está localizada no hemisfério sul, no inverno o fotoperíodo é inferior ou igual a 12 horas e no verão é superior ou igual a 12 horas. Mas para brilho solar existem dias no verão com valores perto de 0, como consequência da nebulosidade como é o caso do verão de 2008 e final do verão de 2009.

A irradiação solar no topo da atmosfera teve 40,69 MJ/m² de máxima no dia 12/12 e de 22,07 MJ/m² de mínima no dia 19/06, e uma média anual de 32,56 MJ/m². O valor máximo da irradiação solar global foi de 32,23 MJ/m² no dia 06/02 e o valor mínimo foi de 1,84 MJ/m² no dia 19/06 e uma média anual de 17,96 MJ/m². Os valores obtidos são coerentes, visto que, pelo movimento de translação da terra e pela declinação solar que varia de 23,45° a -23,45° durante o ano, no verão o hemisfério sul recebe o máximo da irradiação solar e no inverno recebe o mínimo da irradiação solar.

A fim de se entender a distribuição do brilho solar e da razão de insolação para cada mês ao longo dos anos de estudo na cidade de Maputo, foram calculadas as médias mensais e apresentadas em gráficos na figura 4.

Figura 4 - Evolução anual de médias mensais de brilho solar e de razão de insolação.

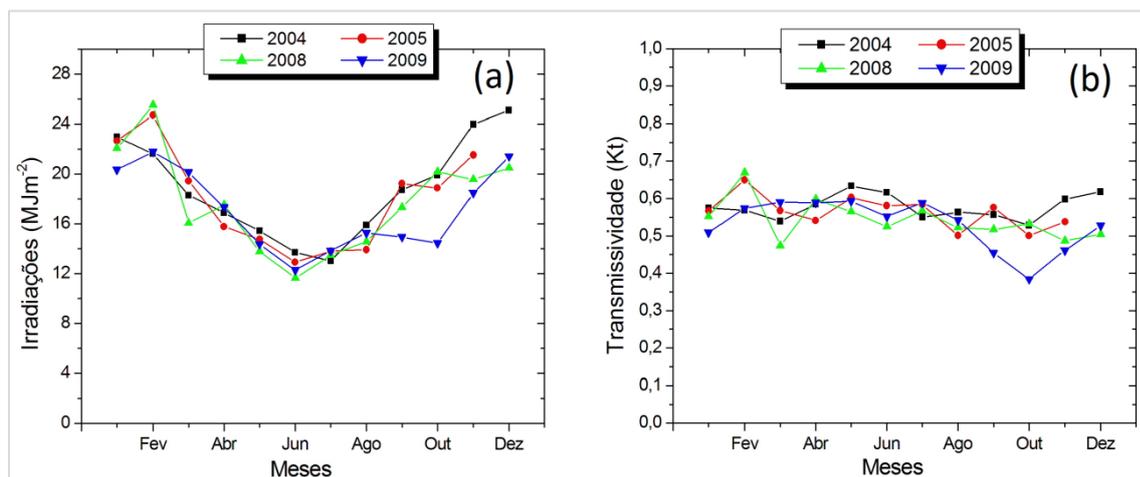


A variabilidade do ciclo anual do brilho solar para cada um dos anos observa-se na figura 4a. Os valores máximos e mínimos de brilho solar médio mensal são observados em períodos de verão, com exceção do ano de 2009 em que o máximo foi observado no inverno, no mês de julho. Essa incoerência do ano 2009 foi marcada por uma alta presença de nuvens, porém não foi refletido em muita precipitação. A sazonalidade é mais bem observada a partir da razão de insolação (figura 4b) onde o efeito da nebulosidade é mais efetivo durante o ano. As médias

mensais da razão de insolação para o período em estudo variam entre 0,38 no mês de outubro de 2009 e 0,88 no mês de julho do mesmo ano, e uma média anual de 0,66. De uma forma geral, os maiores valores médios mensais foram observados no período frio e seco (abril á setembro) devido a uma menor cobertura de nuvens e menores valores foram observado na época quente e chuvoso (outubro a março) devido o efeito de nebulosidade.

A seguir se faz a análise da variação da transmissividade atmosférica (Kt), que é a fração entre a irradiação extraterrestre e a global, a fim de se compreender o nível de transmissividade atmosférica durante os anos em estudos. A figura 5 mostra as médias mensais de irradiação solar global (figura 5a) e transmissividade atmosférica (figura 5b) para cada ano da cidade de Maputo.

Figura 5 - Evolução anual de médias mensais de irradiação solar global diária e de Kt.



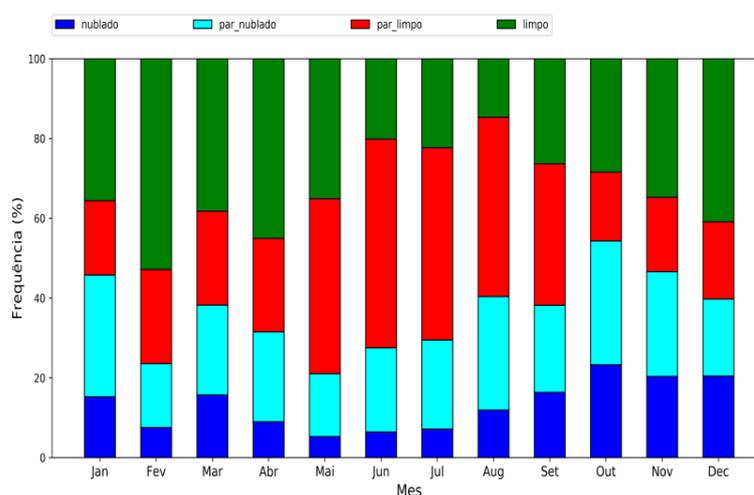
Os valores médios mensais da irradiação solar global, por causa da influência da declinação solar, acompanham a sazonalidade onde os menores valores são observados nos meses do inverno e os maiores nos meses de verão. Esses valores variam entre 11,6 no mês de junho e 25,5 no mês de fevereiro, e uma média de 17,96 MJ/m². A partir do Kt, o efeito da declinação solar é reduzido, e tem uma maior dependência da transparência atmosférica. Onde os meses do período de verão apresentam menores valores e os meses de inverno, devido à baixa nebulosidade apresentam maiores valores.

Os meses de fevereiro de 2008 e 2005, apesar de estarem no verão, foram caracterizados por uma alta transparência, mas ainda se consegue ver que no ano de 2009, nos meses de setembro a novembro, o ciclo é bem afetado pela

nebulosidade. O mês de outubro de 2009 o Kt atingiu a menor transmissividade de todos os anos em estudo, no valor de 38% e o mês fevereiro de 2008 apresentou a maior transmissividade de 67%. A média anual de incidência da irradiação solar global na superfície da terra na cidade de Maputo é de 55%.

A figura 6 apresenta a classificação da cobertura do céu para cidade de Maputo. A partir do valor de Kt para cada mês do ano, baseado na classificação da tabela 2, determinou-se a frequência média mensal de dias para cada condição de céu.

Figura 6 - Evolução anual da frequência média diária mensal das condições de céu na cidade de Maputo.



A época chuvosa e quente tende a apresentar maior frequência (média) de dias com condição de céu nublado. Tal que, nesta época, pode-se observar maior concentração de nuvens durante o ano. O mês de outubro apresenta 23,3% de dias nublados e o mês de maio apresenta 5,3% de dia nublados. Para a condição de céu parcialmente nublado, observa-se que as duas épocas do ano aumentam as frequências de acordo com evolução anual da precipitação e da concentração das nuvens. Mas os meses da época chuvosa e quente continuam apresentando maiores frequências médias enquanto os meses da época seca e fria apresentam menores frequências médias de dias parcialmente nublados durante o ano.

Para a condição de céu parcialmente limpo, o mês de junho apresentou maior frequência média de dias no valor de 52,3% e o mês de outubro apresentou a menor frequência média de dias no valor de 17,2%. Isso devido à baixa concentração da nebulosidade que é associada à baixa precipitação na época seca

e fria. Mas para a condição de céu limpo, observa-se que a cidade de Maputo apresenta uma época chuvosa e quente que não é acompanhada com uma maior concentração de nuvens, o que faz com que os meses dessa época mostrem frequências médias maiores para condições de céu limpo. O mês de fevereiro apresentou 52,8% de dias limpos e o mês de setembro apresentou um valor de 14,7%. Mas de uma forma geral o gráfico da figura 6 mostra que a cidade de Maputo apresenta dias com maior concentração de nebulosidade na época chuvosa e quente enquanto que os dias de céu limpo na época seca e fria.

4.2 Análises dos Modelos da Literatura para Maputo

A literatura apresenta várias equações lineares de Angstrom para estimativa da irradiação solar global na superfície horizontal para diferentes localidades. Com a finalidade de verificar-se o desempenho destes na estimativa da irradiação solar global, a partir de dados medidos na cidade de Maputo, oito modelos de diferentes localidades foram selecionados (tabela 1). As figuras 7 e 8 mostram os valores da irradiação solar global estimados e medidos distribuídos ao longo do tempo para cada modelo da literatura, e a validação dos modelos para as condições de Maputo por meio da correlação entre os valores estimados e medidos. Os modelos com melhores desempenhos são alcançados para um menor espalhamento dos pontos com a reta ideal (45°) e menor sub ou superestimação. Na tabela 3 são mostrados os indicativos estatísticos, MBE (MJ/m^2), MBE (%), RMSE (MJ/m^2), RMSE (%) e coeficiente angular, obtidos na comparação entre os valores estimados pelos modelos de literatura e valores medidos na cidade de Maputo.

Figura 7 - Distribuição da irradiação solar global diária estimada através dos modelos da literatura de localidades fora de África.

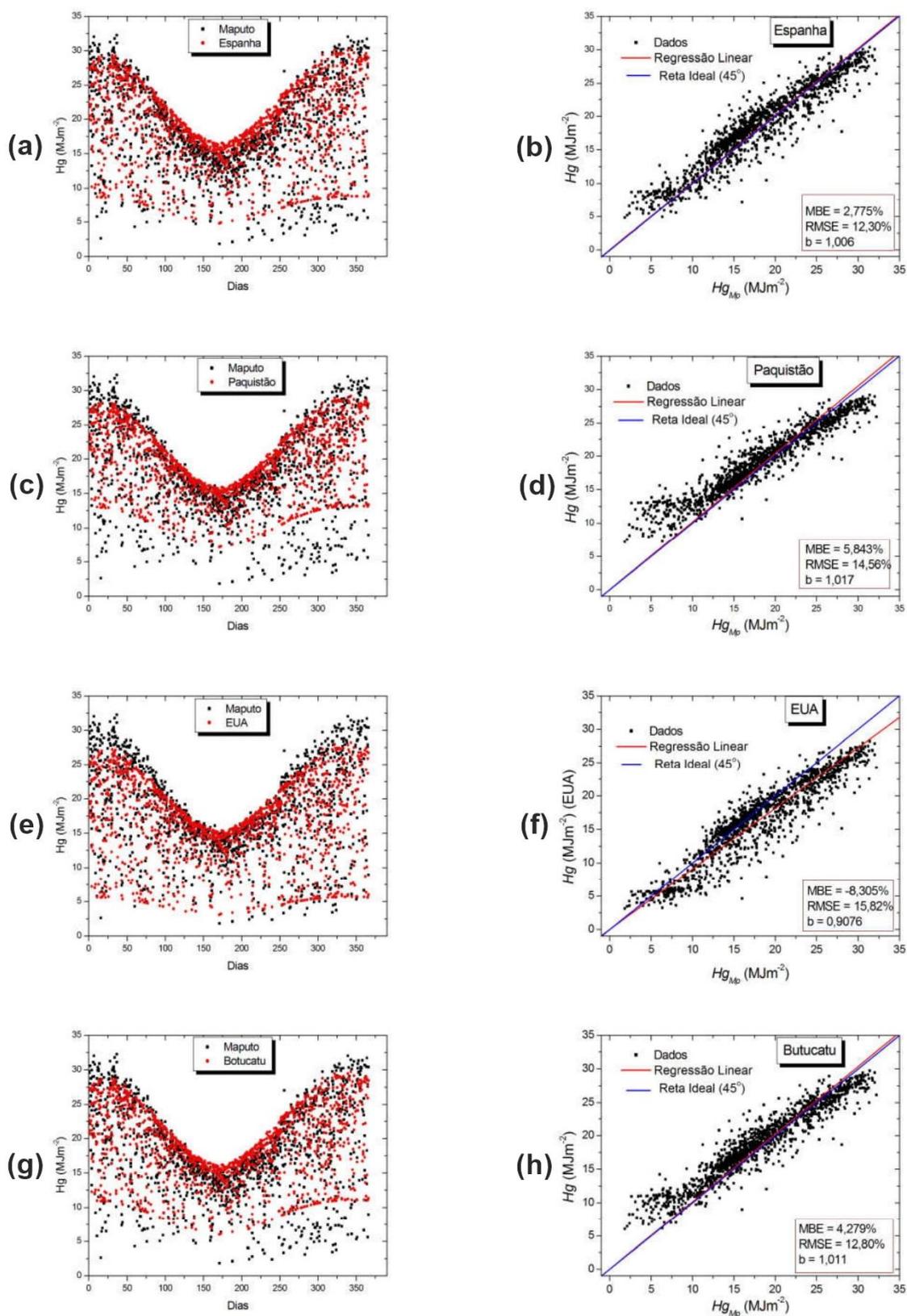


Figura 8 - Distribuição da irradiação solar global diária estimada através dos modelos da literatura de localidades dentro de África.

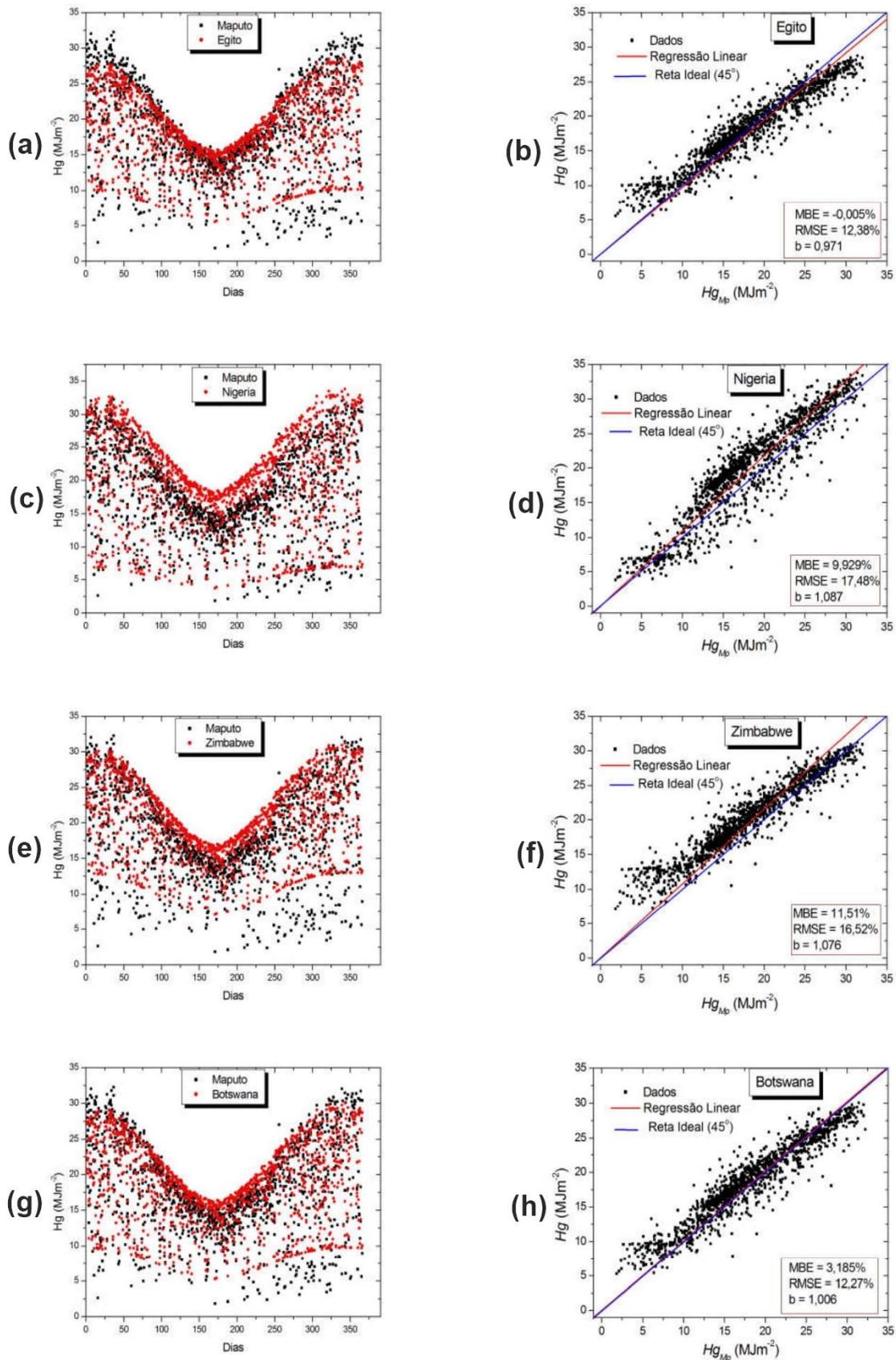


Tabela 3 - Indicativos estatísticos de desempenho dos modelos da literatura testados em comparação com valores medidos em Maputo.

Local	MBE (MJ/m²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m²)	RMSE (%)	Coefficiente Angular
ESPAÑA	0,50	2,78	2,21	12,31	1,01
Karachi,/PAQUISTÃO	1,05	5,84	2,62	14,56	1,08
Tennessee/USA	-1,49	-8,31	2,84	15,82	0,91
Botucatu/BRASIL	0,77	4,28	2,30	12,80	1,01
Gizé/EGIPTO	-0,00	-0,01	2,23	12,39	0,97
Makurdi/NIGERIA	1,78	9,93	3,14	17,49	1,09
Harare/ZIMBABWE	2,07	11,52	2,97	16,52	1,08
BOTSWANA	0,57	3,19	2,20	12,27	1,01

Os modelos de localidades fora do continente Africano (figura 7) testados com os dados de Maputo foram: modelo da Espanha (ALMOROX e HONTORIA, 2004), modelo da Karach/Paquistão (AHMAD e ULFAT, 2004), de Tennessee/USA (LEWIS, 1992) e modelo de Botucatu/Brasil (CORREA, 2011). Observa-se que estes quatros modelos, de acordo com a sazonalidade da cidade de Maputo, na época seca e fria superestimam enquanto que na época quente e chuvosa subestimam. O modelo da Espanha para valores de Hg entre 10 e 30 MJ/m², o desempenho é relativamente bom, e para modelo de Karachi/Paquistão o melhor desempenho se observa para valores de Hg entre 15 e 25 MJ/m². Praticamente para a mesma faixa de Hg da Espanha e Karachi/Paquistão, isto é, entre 17 e 25 MJ/m² modelo de Botucatu/Brasil também apresenta um bom desempenho, mas o modelo de Tennessee/USA se aplica para as condições de Maputo somente para valores de Hg muito menores que 7,5 MJ/m².

Os modelos do continente Africano (figura 8) testados com os dados de Maputo foram: modelo de Gizé/EGITO (ABBAS e ELNESR, 1977), de Harare/ZIMBABWE (LEWIS, 1993), o de Botswana (LUHANGA e ANDRINGA, 1990) e de Makurdi/NIGERIA (YOHANNA et al., 2011). Os três primeiros modelos superestimam a medida da irradiação solar global na época seca e fria e subestimam na época quente e chuvosa, apesar do modelo de Harare/ZIMBABWE apresentar uma subestimação quase insignificante nesse período. E o outro modelo

que é da Nigéria superestima em quase todas as estações do ano, com maior impacto no período seco e frio. Enquanto que o modelo de Gizé/EGYPT mostra um desempenho aceitável para valores de Hg entre 15 e 22 MJ/m². O modelo de Botswana apresenta o seu bom desempenho a partir de 10 MJ/m² até o mesmo limite máximo do valor de Hg do modelo de Gizé/EGITO. O modelo de Makurdi/NIGERIA apresenta o maior espalhamento dos pontos com relação à reta ideal em quase todo ano e junto com o modelo de Harare/ZIMBABWE apresentam mau desempenho em quase todo ano.

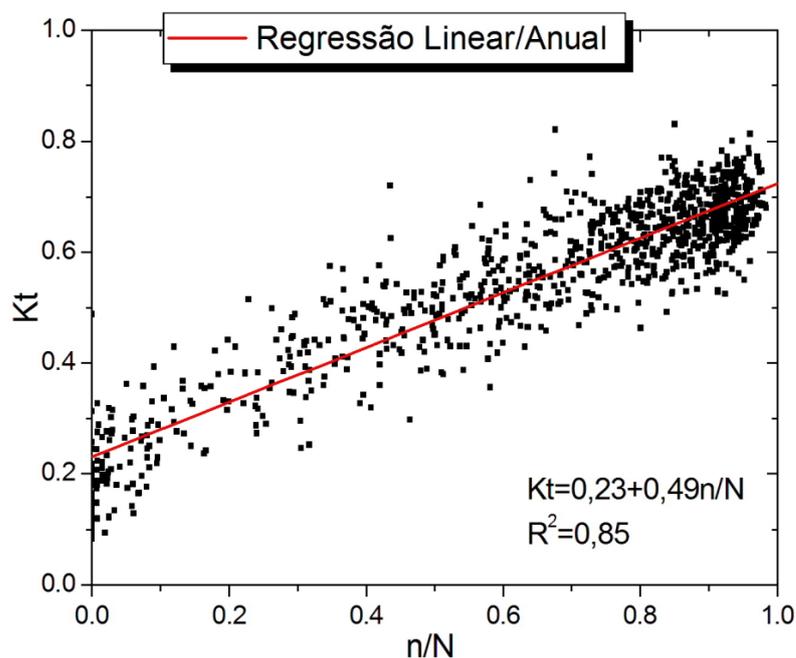
O melhor desempenho foi observado para o modelo de Botswana, Espanha e Gizé/EGITO com valores de RMSE de 12.27, 12.31 e 12.39% respectivamente. O pior desempenho corresponde com o modelo de Makurdi/NIGERIA com RMSE de 17.48%. A maior parte dos modelos superestimam comparado com valores medidos, com exceção de Modelos de Tennessee/USA e Gizé/EGITO que subestimam. A maior superestimação acontece para Harare/ZIMBABWE com MBE de 11,52%.

4.3 Modelo Proposto para Maputo

A partir de dados medidos em Maputo foi proposto o modelo anual para estimativa da irradiação solar global. Foram utilizados 75% dos dados para se gerar o modelo e 25 % dos dados para fazer a validação do mesmo. O modelo Anual é composto por apenas uma equação de estimativa média de todo período de estudo.

A figura 9 apresenta a distribuição dos pontos de transmissividade atmosférica e razão de insolação que geraram a equação de Angstrom para cidade de Maputo na partição anual. Os coeficientes “a” e “b” mostram que, para a cidade de Maputo, a transmissividade da irradiação solar global na superfície terrestre em um ano apresenta uma mínima de 23% e uma máxima de 72% da irradiação incidente no topo da atmosfera. Esses valores são bastante consistentes com os coeficientes encontrados na literatura. Resultado semelhante foi obtido na cidade de Heihe na China (CHEN et al., 2004) e a Food and Agriculture Organization (FAO) recomenda para localidades sem dados reais, os coeficientes 0,25 para “a” e 0,50 para “b”. O coeficiente de determinação de 85% mostra uma relação alta entre Kt e S, e uma precisão boa para a aplicação da equação na estimativa da irradiação solar Global anual em Maputo.

Figura 9 - Relação entre o transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição anual.



A figura 10 mostra a validação do modelo. Os indicativos estatísticos e o coeficiente angular da tabela 4 mostram o bom desempenho alcançado pelo modelo ao se comparar os valores estimados e os valores medidos.

Figura 10 - Validação do modelo anual para cidade de Maputo.

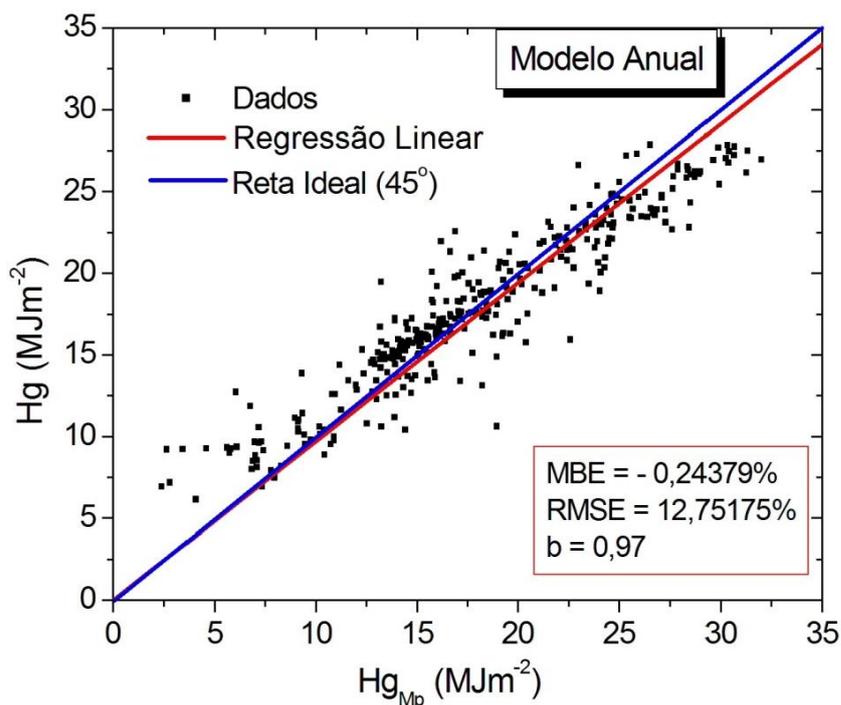


Tabela 4 - Indicativos estatísticos de desempenho do modelo Anual para cidade de Maputo

Modelo	MBE (MJ/m²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m²)	RMSE (%)	R²	Coefficiente Angular
Modelo anual	-0,04	-0,24	2,28	12,75	0,85	0,97

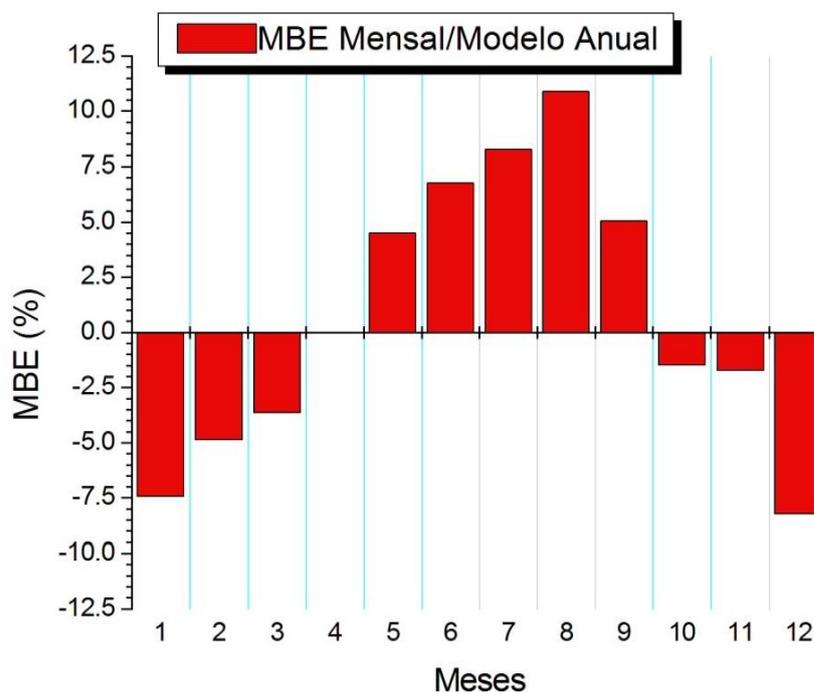
Os valores estimados pelo modelo anual apresentam maiores valores de Hg no verão sendo o máximo de 27,86 MJ/m² no mês de novembro e menores valores no inverno com o mínimo de 6,15 MJ/m² no mês de julho. Ao se comparar os valores medidos dos estimados, observa-se uma insignificante subestimação na época seca e fria, e uma ligeira superestimação na época quente e chuvosa. Este modelo mostrou bons indicativos estatísticos, MBE de -0,24% e o RMSE de 12,75%.

Visando a utilização dessa modelagem para aplicações que demandem partições de tempo mensal, o modelo anual foi validado com dados mensais. A tabela 5 e a figura 11 mostram os resultados da validação.

Tabela 5 - Indicativos estatísticos de desempenho do modelo Anual para Maputo em comparação com valores medidos em cada mês.

Modelo	MBE (MJ/m²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m²)	RMSE (%)	Coefficiente Angular
Janeiro	-1.55	-7.45	3.23	15.51	0,90
Fevereiro	-1.12	-4.88	2.63	11.50	0.95
Março	-0.70	-3.64	1.90	9.83	0.95
Abril	0,04	0,23	1,09	6,10	0,99
Maio	0.68	4.50	1.14	7.52	1.04
Junho	0.86	6.77	1.28	10.04	1.08
Julho	1.15	8.26	1.47	10.53	1.08
Agosto	1.51	10.89	2.06	14.87	1.08
Setembro	0.90	5.05	2.40	13.52	1.04
Outubro	-0.27	-1.49	2.18	12.08	0.96
Novembro	-0.34	-1.74	3.19	16.40	0.94
Dezembro	-1.98	-8.23	3.35	13.91	0.90

Figura 11 - MBE do modelo Anual para Maputo em comparação com valores medidos em cada mês.



A figura 11 e a tabela 5 mostram que a estimativa da irradiação global pelo modelo anual promove erros sistemáticos. Os meses da época chuvosa e quente o modelo subestima os dados, enquanto que para os meses da época seca e fria o modelo superestima. O MBE na época chuvosa e quente varia entre -1,49% a -8,23% e na época fria e seca o MBE varia entre 0,23% a 10,89%. E RMSE na época chuvosa e quente varia entre 9,83% a 16,40% e na época fria e seca varia entre 6,10% a 14,87%. Os indicativos estatísticos da estimativa mensal a partir do modelo anual mostram maior imprecisão e maior espalhamento dos pontos, ao se comparar com a estimativa para todo ano. Exceto o mês de abril (figura 11) que apresentou melhor resultado que a estimativa anual, e um coeficiente angular de 0.99.

Em geral, o modelo anual não apresenta boa precisão quando utilizado para necessidades de curto tempo, como estimativas mensais. Por isso, se torna necessário propor o modelo mensal, que é o modelo composto de 12 equações de estimativas, uma para cada mês do ano.

Os gráficos das figuras 12 e 13 apresentam as equações de Angstrom, os coeficientes “a” e “b” e os coeficientes de determinação para cada mês do ano. O coeficiente “a” da equação de Angstrom não mostrou uma variação significativa nas

duas estações do ano. Na época chuvosa e quente o coeficiente “a” variou de 0,17 a 0,26 e na época seca e frio variou de 0,17 a 0,25. Porém, com relação ao coeficiente “b” a variação, entre as estações do ano, foi superior ao observado para coeficiente “a”. Na época chuvosa e quente o coeficiente “b” variou de 0,51 a 0,59 enquanto que na época seca e fria variou de 0,43 a 0,51. Durante o ano em Maputo, os meses de agosto e outubro mostram-se com a maior possibilidade de apresentarem a menor transmissividade da irradiação solar global em torno de 17% da irradiação solar no topo da atmosfera, isso é, ocorrido com maior nebulosidade. Mas os meses de dezembro e janeiro mostram maior possibilidade de apresentarem a maior transmissividade atmosférica até 81%, mostrando dias com o céu completamente limpo.

Como era esperado, para além de valores dos coeficientes “a” e “b” adequados para a realidade de cada mês, observa-se que o modelo mensal apresenta os melhores ajustes. Os coeficientes de determinação são superiores a 0.85, com exceção do mês de setembro que é de 0.85. O melhor ajuste foi observado em novembro com 0.93 de R^2 .

Figura 12 - Relação entre a transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição mensal, período chuvoso e quente.

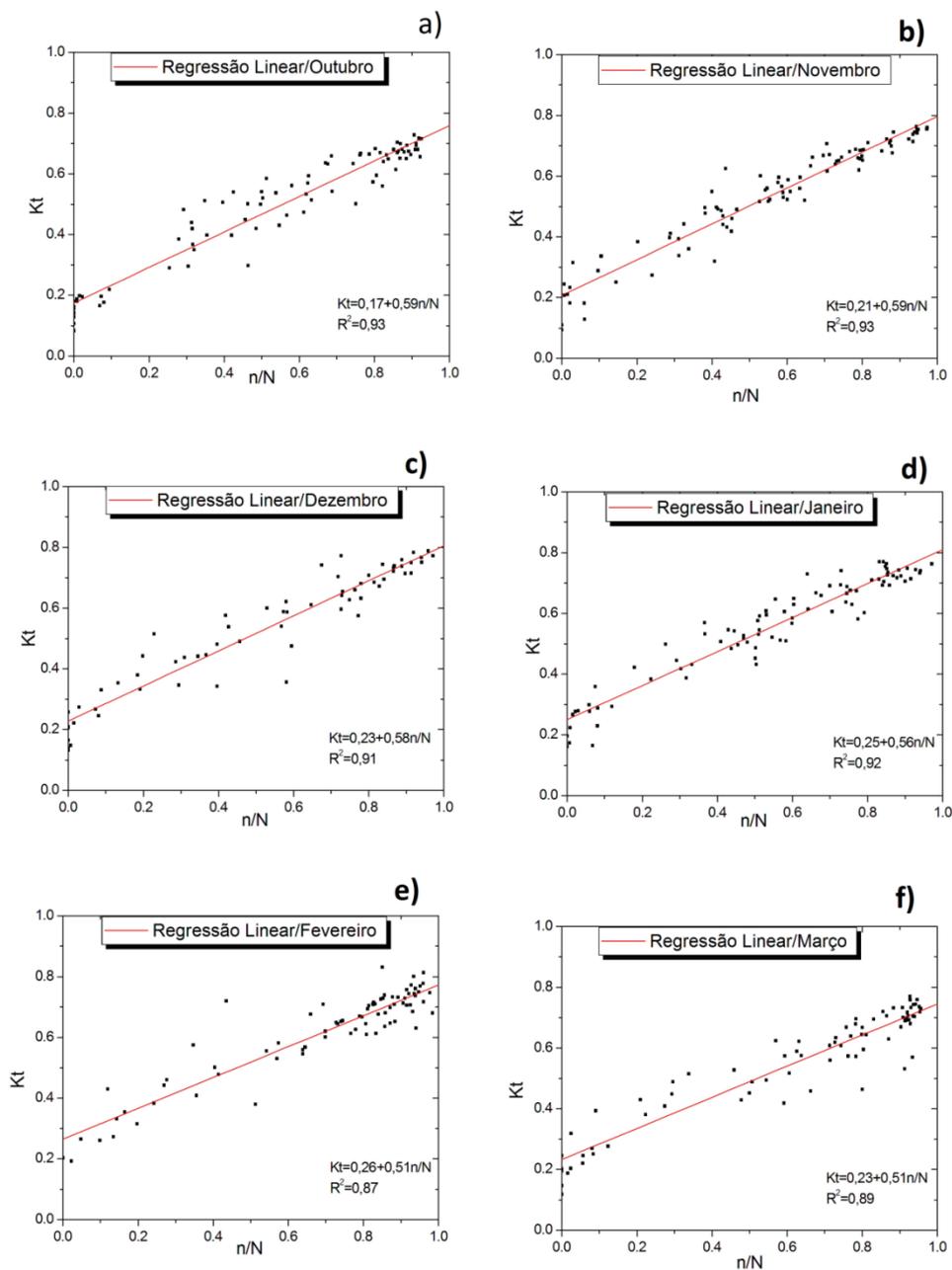
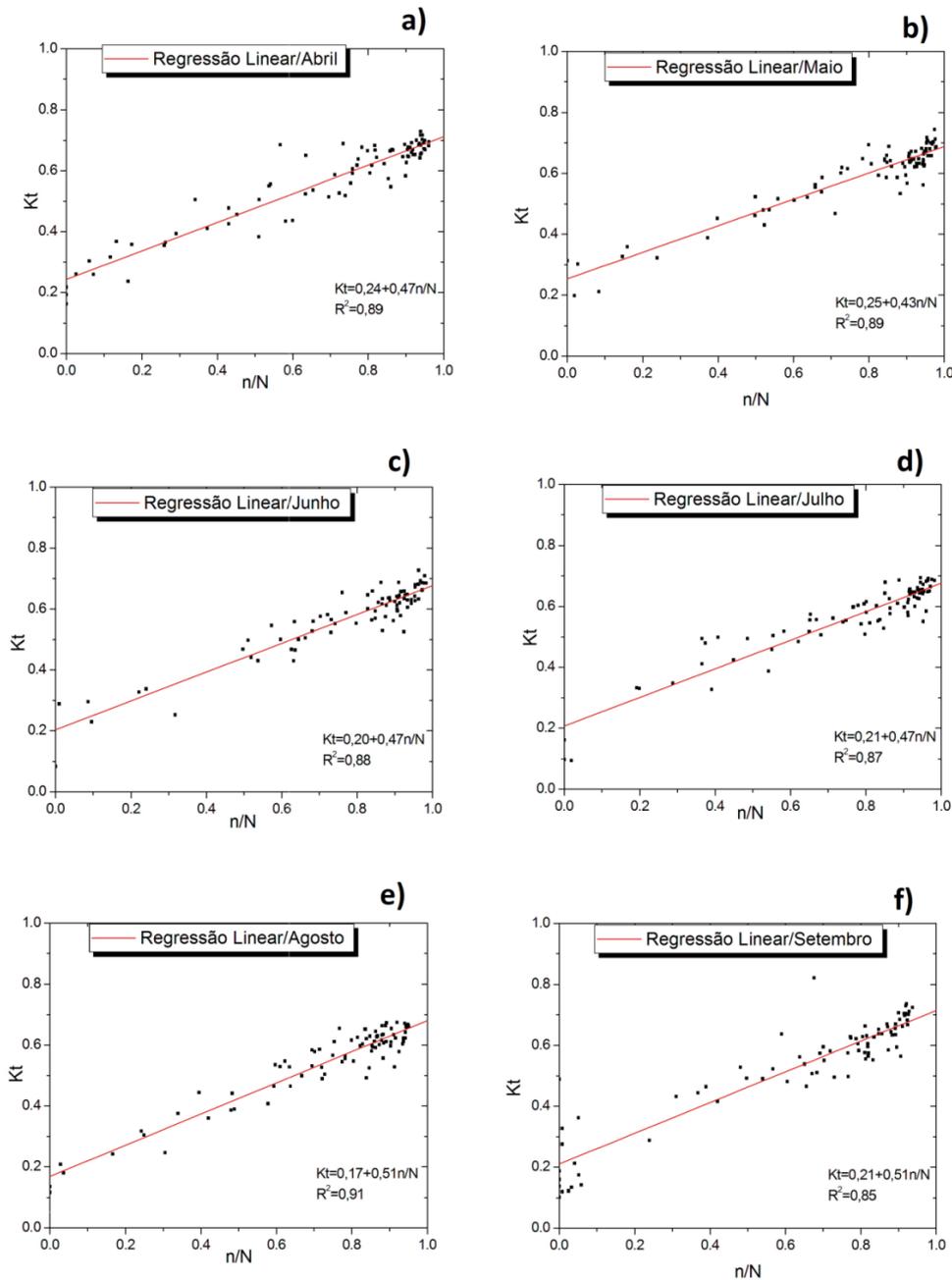


Figura 13 - Relação entre a transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição mensal, período seca e fria.

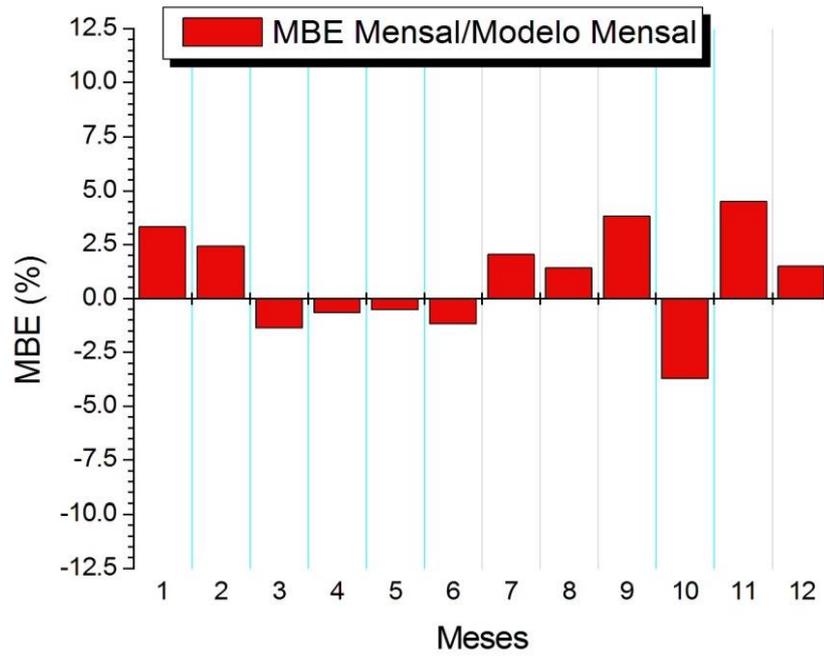


A validação do modelo mensal para cada um dos meses é apresentado na tabela 6 e figura 14. Observa-se ótimo desempenho nos meses do período pouco chuvoso, onde a irradiação solar é menor, com o menor RMSE em julho de 6,81%. Os maiores RMSE são observados nos meses de setembro e novembro com uma superestimação alta em comparação com os meses onde o ajuste é melhor. O modelo subestima nos meses de março até junho e no mês de outubro onde acontece a máxima subestimação de -3,72% (MBE). Apesar dos altos valores dos

erros em novembro, janeiro e setembro a partir do modelo mensal, o valor de desempenho melhora em comparação quando o modelo geral é aplicado. O valor médio de RMSE é de 9.96%, sendo melhor do que o equivalente do modelo geral de 12.75%. Em geral, a aplicação do modelo mensal para dados mensais mostra melhor desempenho, minimizando os erros sistemáticos.

Tabela 6 - Indicativos estatísticos de desempenho do modelo Anual para Maputo em comparação com valores medidos em cada mês.

Modelo	MBE (MJ/m²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m²)	RMSE (%)	R²	Coefficiente Angular
Janeiro	0,69	3.31	2,65	12,73	0,92	1.01
Fevereiro	0,56	2.43	2,47	10,78	0,87	1.02
Março	-0,27	-1.38	1,76	9,11	0,89	0.98
Abril	-0,12	-0.68	1,09	6,14	0,89	0.99
Maió	-0,08	-0.54	0,90	5,97	0,89	0.99
Junho	-0,15	-1.19	0,92	7,26	0,88	0.99
Julho	0,28	2.04	0,95	6,82	0,87	1.02
Agosto	0,20	1.41	1,36	9,81	0,91	0.99
Setembro	0,68	3.82	2,37	13,34	0,85	1.03
Outubro	-0,67	-3.72	2,21	12,24	0,93	0.94
Novembro	0,88	4.50	2,87	14,77	0,93	1.02
Dezembro	0,36	1.49	2,55	10,60	0,91	1.01

Figura 14 - MBE do modelo Anual para Maputo em comparação com valores medidos em cada mês.

5 CONCLUSÃO

Para além da análise da evolução de medidas da irradiação solar global na superfície horizontal e estudo de cobertura do céu para cidade de Maputo, neste trabalho foram testados oito modelos da literatura para a estimativa da irradiação solar global. E por fim, foram propostos dois modelos para estimar a irradiação solar global na cidade de Maputo. A partir desse estudo, obtivemos as seguintes conclusões:

- A cidade de Maputo apresenta uma irradiação solar global máxima no mês de fevereiro no valor de 32,23 MJ/m² e mínima no mês de junho no valor de 1,84 MJ/m². A média anual da irradiação solar global na cidade de Maputo é de 17,96 MJ/m².
- A cidade de Maputo mostra maior probabilidade de cobertura de céu limpo na estação seca e fria, e maior possibilidade de cobertura de céu nublado para estação chuvosa e quente.
- Dos modelos de localidades, fora do continente Africano, testados para a estimativa da irradiação solar global na cidade de Maputo, o da Espanha e o de Botucatu/Brasil mostraram um desempenho aceitável.
- Dos modelos de localidades, do continente Africano, testados para estimar a irradiação solar global na cidade de Maputo, o do Giza/EGITO e o da Botswana mostram um desempenho aceitável.
- Os coeficientes “a” e “b” do modelo anual da equação de Angstrom para cidade de Maputo são 0,23 e 0,49 respectivamente. Este modelo mostrou índices aceitáveis para estimativa anual, o que não ocorre para estimativa mensal a partir do mesmo modelo. Mas ao se utilizar coeficientes “a” e “b” do modelo mensal, em geral, as estimativas apresentaram resultados aceitáveis.

REFERÊNCIAS

Ahmed, F.; Ulfa,t I. Empirical models for the correlation of monthly average daily global solar radiation with hours of sunshine on a horizontal surface at Karachi, Pakistan, Turkish. **J Phys** 28, 301–307, 2004.

Almorox, J.;Benito, M.; Hontoria, C. Estimation of monthly Angstrom–Prescott equation coefficients from measured daily data in Toledo, Spain.**Renewable Energy** 30, 931–936, 2005.

ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain.**Energy Conversion and Management** 45, 1529–1535, 2004.

Al-Mostafa, Z. A. et al. Sunshine-based global radiation models: A review and case study. **Energy Convers Manage** 84, 209–216, 2014.

Angstrom, A. **Solar and terrestrial radiation**. Q. J. Roy. Meteorol. Soc. 50, 121–125, 1924.

Bakirci, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. **Energy** 34, 485–501, 2009.

Brabec, M. et al.A new point of view on the relationship between global solar irradiation and sunshine quantifiers. **Solar Energy** 126, 252–263, 2016.

Chukwujindu, N. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 78, 955–995, 2017.

DAL PAI, A. et al. MEOshadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy** 99, 754–76, 2016.

DOS SANTOS, M. et al. Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede para Moçambique. **Acta Scientiae&Technicae**, v. 1, p. 47–55, 2013.

Dumas, A. et al. A new correlation between global solar energy radiation and daily temperature variations. **Solar Energy** 116, 117–124, 2015.

Escobedo, J.F. et al. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Appl. Energy** 86, 299-309, 2009.

KHORASANIZADEH, H.; MOHAMMADI, K. Diffuse solar radiation on a horizontal surface: Reviewing and categorizing the empirical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 53, 338–362, 2016.

LI, D., JU, W. et al. Impact of estimated solar radiation on gross primary productivity simulation in subtropical plantation in southeast China. **Solar Energy** 120, 175–186, 2015.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy** 3, 1-19, 1960.

MOTA, F. S. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo, Editora Nobel. 376p, 1975.

Muneer, T.; Gul, M. S. Evaluation of sunshine and cloud cover based models for generating solar radiation data. **Energy Conversion and Management** 41, 461-482, 2000.

Nwokolo, S.C.; Ogbulezie, J.C. A quantitative review and classification of empirical models for predicting global solar radiation in West Africa / Beni-Suef Univ. J. Basic Appl. Sci, 2017.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Editora Agronômica Ceres. 425p, 1981.

Persaud, N.; Lesolle, D.; Ouattara, M. Coefficients of the Angstrom-Prescott equation for estimating global irradiance from hours of bright sunshine in Botswana and Niger. **Agricultural and Forest Meteorology** 88, 27-35, 1997.

Prescott, J.A. **Evaporation from a water surface in relation to solar radiation**. Trans. Roy. Soc. Sci. Aust. 64, 114–125, 1940.

Quej, V. H. et al. Empirical models for estimating daily global solar radiation in Yucatán Peninsula, Mexico. **Energy Conversion and Management** 110, 448–456, 2016.

SCHWERHOFF, G.; SY, M. Financing renewable energy in Africa – Key challenge of the sustainable development goals. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 393–401, 2017.

SOUZA, J.L. DE. et al. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. **Renewable Energy** 30, 1203 – 1220, 2005.

Srivastava, S. K.; Singh, O. P.; Pandey, G. N. Estimation of global solar radiation in uttarpradesh (india) and comparison of some existing correlations. **Solar Energy** 51, 27-29, 1993.

Suehrcke, H.; Bowden, R. S.; Hollands, K.G.T. Relationship between sunshine duration and solar radiation. **Solar Energy** 92, 160–171, 2013.

Tiris, M.; Tiris, Ç.; Ture, E. Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in gebze, turkey. **Energy Conversion and Management** 37, 141-1421, 1996.

Yang, K.; Huang, G. W.; Tamai, N.A hybrid model for estimating global solar radiation. **Solar Energy** 70, 13–22, 2001.

Yao, W. et al. A new correlation between global solar radiation and the quality of sunshine duration in China. **Energy Conversion and Management** 164, 579–587, 2018.

YAO, W.; et al. Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China. **Energy Conversion and Management** 84, 597–612, 2014.

Yorukoglu, M.; Celik, A. N. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration. **Energy Conversion and Management** 47, 2441–2450, 2006.

Zhang, J. et al. A critical review of the models used to estimate solar radiation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 70, 314–329, 2017.