

IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA CIDADE DE MAPUTO - MOÇABIQUE: EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS MEDIDAS E MODELAGEM ESTATÍSTICA

DOMINGOS MÁRIO ZECA FERNANDO¹; MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA²;
MATHEUS RODRIGUES RANIERO³ E ALEXANDRE DAL PAI⁴

¹Departamento de Ciências Naturais e Matemática, Universidade Púnguè, Bairro Heróis Moçambicanos, C. Postal: 323, Cidade de Chimoio, Moçambique, e-mail: dmzeca@gmail.com.

²Departamento de bioprocessos e biotecnologia, Universidade Estadual Paulista, Av. Universitária, nº 3780 - Altos do Paraíso, Botucatu - SP, 18610-034, Brasil, e-mail: mcontes@outlook.com.

³Departamento de bioprocessos e biotecnologia, Universidade Estadual Paulista, Av. Universitária, nº 3780 - Altos do Paraíso, Botucatu - SP, 18610-034, Brasil, e-mail: matheus.raniero@hotmail.com.

⁴Departamento de bioprocessos e biotecnologia, Universidade Estadual Paulista, Av. Universitária, nº 3780 - Altos do Paraíso, Botucatu - SP, 18610-034, Brasil, e-mail: dal.pai@unesp.br.

RESUMO: A equação de Angstrom continua sendo a relação mais usada para se estimar a irradiação solar global média diária a partir das horas de brilho solar, em localidades onde a medição não seja contínua ou os equipamentos não estejam disponíveis. O objetivo deste trabalho foi de apresentar a evolução das medidas de irradiação solar e das horas de brilho solar e determinar os coeficientes de Angstrom para estimativa da irradiação solar global na cidade de Maputo. A média da irradiação solar global na cidade de Maputo foi de 17,96 MJ/m² e as horas de brilho solar foram de 7,8 horas. Os coeficientes “a” e “b” do modelo anual para estimativa da irradiação solar global na cidade de Maputo são 0,23 e 0,49 respectivamente.

Palavras-chaves: brilho solar, estimativa irradiação solar global, modelo de angstrom.

GLOBAL SOLAR IRRADIATION FOR MAPUTO CITY - MOZAMBIQUE: TEMPORAL EVOLUTION OF MEASUREMENTS AND STATISTICAL MODELING

ABSTRACT: The Angstrom equation continues to be the most used relation to estimate the daily average global solar irradiation from sunshine, in places where measurement is not continuous or equipment is not available. The aim of this work was to present the evolution of solar radiation and sunshine measurements and to determine the Angstrom coefficients to estimate global solar irradiation in the city of Maputo. The average of the global solar irradiance in the city of Maputo was 17.96 MJ/m² and sunshine average was 7.8 hours. The coefficients "a" and "b" of the annual model for estimation of global solar irradiation in the city of Maputo were 0.23 and 0.49, respectively.

Keywords: sunshine, estimation of global solar irradiation, Angstrom model.

1 INTRODUÇÃO

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, 2006). O conjunto de todos os comprimentos de onda, que varia desde 10⁻¹⁰ cm (raios gama) até cerca de 10⁷ 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 µm, podem ser detectadas pelo olho humano (VAREJÃO-SILVA, 2006). Essa faixa visível é de muita importância para as plantas e algas no processo da fotossíntese (CHUKWUJINDU, 2017). 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 (Figura 1).

Figura 1. Espectro Eletromagnético.

A irradiação solar no topo da atmosfera (H_0), também conhecida por irradiação solar 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). Pela influência da sazonalidade observam-se maiores valores nos períodos de verão e menores nos períodos de inverno, devido à declinação solar. A parcela da irradiação solar extraterrestre que chega à superfície terrestre, depois de interagir com constituintes atmosféricos, é denominada de irradiação solar global (H_g).

A irradiação solar global é representada pela soma da irradiação solar direta e da irradiação solar difusa (DAL PAI et al., 2016). Onde 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. E a irradiação solar difusa é a parcela da irradiação solar extraterrestre que sofre espalhamento pela atmosfera, atingindo a superfície terrestre em direções diferentes (OMETTO, 1981).

A irradiação solar direta pode apresentar forte fluxo direcional. Por sua incidência direta, torna-se mais energética ao atingir a superfície, podendo ser mais bem aproveitada em sistemas de conversão energética como coletores e concentradores solares (MOLINEAUX; INEICHEN, 1995). A irradiação solar difusa é fruto do espalhamento uniforme da irradiação solar extraterrestre 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; MACDONALD, 1994; KUUSK, 1992).

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 horas de brilho solar. 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, 2006).

O heliográfico é o instrumento para medir as horas de brilho solar, sendo um instrumento de fácil aquisição e que necessita de pouca manutenção. O conhecimento das horas de 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, 2006). De uma forma geral, as estações meteorológicas no mundo medem continuamente as horas de brilho solar, como uma forma alternativa de se obter a radiação solar global incidente.

O custo, a operacionalização, a manutenção e a calibração de 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; CELIK, 2006; BAKIRCI, 2009; AL-MOSTAFA;

MAGHRABI; AL-SHEHRI, 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; HUANG; TAMAI, 2001; BAKIRCI, 2009; AL-MOSTAFA; MAGHRABI; AL-SHEHRI, 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 Equação 1, continua sendo a relação mais utilizada para se estimar a irradiação solar global média diária a partir de horas de brilho solar, em localidades onde a medição não seja contínua ou os equipamentos não estejam disponíveis (YANG; HUANG; TAMAI, 2001; MUNEER; GUL, 2000; ALMOROX; BENITO; HONTORIA, 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 das horas de brilho solar (n) medidas 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 as horas de 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 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; LESOLLE; OUATTARA, 1997; SUEHRCKE; BOWDEN; HOLLANDS, 2013).

Em estudo de Tiris, Tiris e Ture (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; SINGH; PANDEY, 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. O objetivo deste trabalho foi o de apresentar a evolução das medidas de irradiação solar e das horas de brilho solar e determinar os coeficientes de Angstrom para estimativa da irradiação solar global na cidade de Maputo.

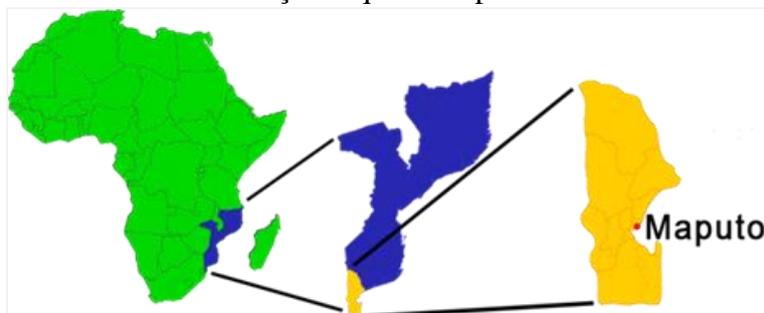
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e clima

Para realização do trabalho foram usados dados de irradiação solar global e das horas 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

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.

2.2 Instrumentação e controle de qualidade dos dados

A irradiação solar global em superfície (H_g) foi medida por um piranômetro CM6B - Kipp & Zonen e as horas de 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/cm^2 , convertidos posteriormente para a unidade de MJ/m^2 .

Um 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.

capital de Moçambique (Figura 2), ocupa uma área de 346,77 km^2 e tem 1.225.868 habitantes.

A primeira etapa de filtragem foi responsável por comparar os dados da irradiação global com a irradiação extraterrestre (limite máximo) e as horas de 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).

Essa etapa atestou que todas frações das medidas compreendiam o intervalo estipulado. A terceira e última etapa de filtragem foi responsável por verificar se havia dados dos dois parâmetros para todos os dias do ano, requisito obrigatório para a modelagem. Após a filtragem pelo MySQL os dados foram exportados e inseridos no Microcal Origin versão 6 com o intuito de realizar a regressão linear, análise estatística, e criação de gráficos. Neste sentido, a filtragem computacional aliada a regressão linear permitiu a eliminação de 149 pontos (10.19%) por serem inconsistentes, no sentido de não haver medidas concomitantes para todos os parâmetros necessários, consolidando um conjunto de dados com 1313 medidas de qualidade para o estudo.

2.3 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 quatro modelos da equação de Angstrom (Tabela 1)

de localidades diferentes. Como a equação de Angstrom é calibrada localmente a partir dos coeficientes “a” e “b” da equação, escolheu-se localidades com climas diferentes para avaliar de que forma os dados de Maputo se comportam nessas regiões. Foi selecionada

uma localidade na Europa (Espanha), uma na América do Sul (Botucatu/Brasil) e duas na África: uma mais ao norte (Makurdi/Nigéria) e outra mais ao sul (Botswana) à título de comparação.

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

AUTORES	LOCALIDADE	MODELO
Almorox e Hontoria (2004)	ESPANHA	$K_t = 0,2170 + 0,5453 \cdot S$
Corrêa (2011)	Botucatu/BRASIL	$K_t = 0,273 + 0,471 \cdot S$
Yohanna, Itodo e Umogbai (2011)	Makurdi/NIGERIA	$K_t = 0,17 + 0,68 \cdot S$
Luhanga e Andringa (1990)	BOTSWANA	$K_t = 0,24 + 0,513 \cdot S$

Usando os valores de a e b foi estimada a H_g e comparada com os valores medidos, e a partir de indicativos estatísticos *Mean Bias Error* (MBE) e *Root Means Square Error* (RMSE) 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.

2.4 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 à 7 (IQBAL, 1983).

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

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221 \cdot \cos\Gamma + 0,00128 \cdot \text{sen}\Gamma + 0,000971 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \text{sen}2\Gamma \quad (3)$$

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

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

$$\text{sen}2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \text{sen}3\Gamma$$

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

$$w_s = \arccos(-\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta) \quad (7)$$

Para fins de modelagem, foram utilizados 75% dos dados, enquanto 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 MBE e RMSE apresentados pelas Equações 8 e 9 em $\text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$ respectivamente. Onde, N é o total dos pares de dados observados, y_i valor estimado e x_i valor medido. O RMSE quantifica o espalhamento do modelo ao valor medido, enquanto MBE faz análise se os dados foram sub ou superestimados.

$$\text{MBE} = \sum_{i=1}^N (y_i - x_i) / N \quad (8)$$

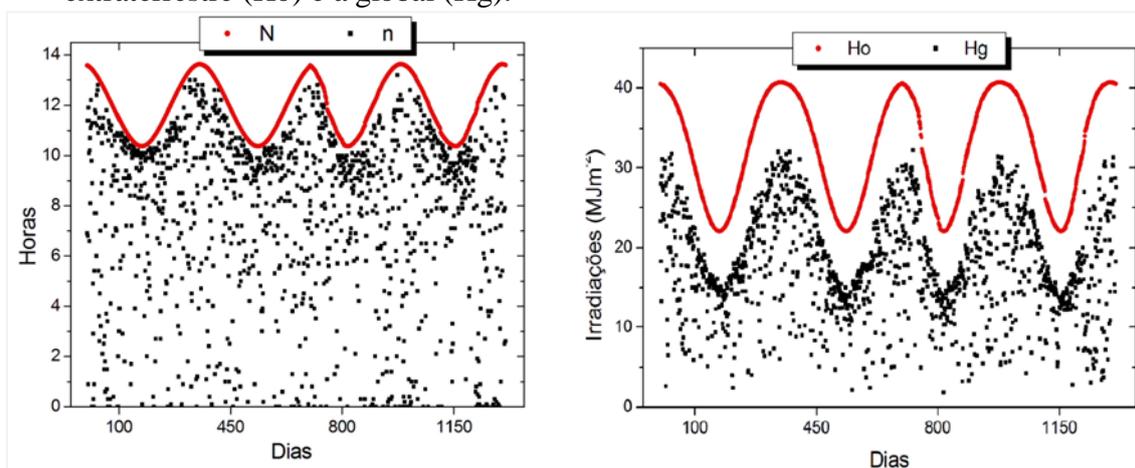
$$\text{RMSE} = \left(\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Evolução temporal das medidas

Para melhor se entender o clima de Maputo e a sazonalidade dos valores são

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



O fotoperíodo (N), as horas de brilho solar (n) e as irradiações extraterrestre (H_o) e global (H_g), apresentam uma variação periódica ao longo do ano, conforme mostrado na Figura 3, indicando a sazonalidade devido à declinação solar associada ao movimento de translação da Terra. Onde os maiores valores ocorrem de outubro a março (período quente e chuvoso) e os menores valores de abril a setembro (período seco e frio). Observa-se uma grande variação de espalhamento dos pontos para valores de n e da H_g , o que ocorre devido a interação do N e da H_o com atmosfera, como é o caso de nuvem, antes de atingirem a superfície.

O valor máximo do fotoperíodo foi de 13,62 horas durante a estação chuvosa e quente, e o valor mínimo de 10,37 horas durante a estação seca e fria. Essa tendência também acontece nos valores das horas de brilho solar, onde a máxima é de 13,20 horas e a mínima alcança a marca de zero horas. De acordo com Varejão-Silva (2006), a cidade de Maputo por ser localizada no hemisfério sul, tende no inverno a ter o fotoperíodo inferior ou igual a 12 horas e no verão superior ou igual a 12 horas. Mas para as horas de brilho solar existem dias no verão com valores perto de 0,

apresentados na Figura 3, os gráficos da evolução temporal das medidas de fotoperíodo e das horas de brilho solar, e das irradiações solar extraterrestre e global na superfície horizontal.

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, com 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 com 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.

3.2 análise dos modelos da literatura para a cidade de Maputo

A Figura 4 mostra a distribuição ao longo do tempo dos valores da irradiação solar global estimados e medidos para os quatro modelos de diferentes localidades selecionados (ver Tabela 1), 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 2 são mostrados os indicativos estatísticos, MBE (MJ/m²), MBE (%), RMSE (MJ/m²), RMSE

(%) e coeficiente angular, obtidos na comparação entre os valores estimados pelos modelos de literatura e valores medidos na cidade de Maputo.

Figura 4. Distribuição da irradiação solar global diária estimada através dos modelos da literatura

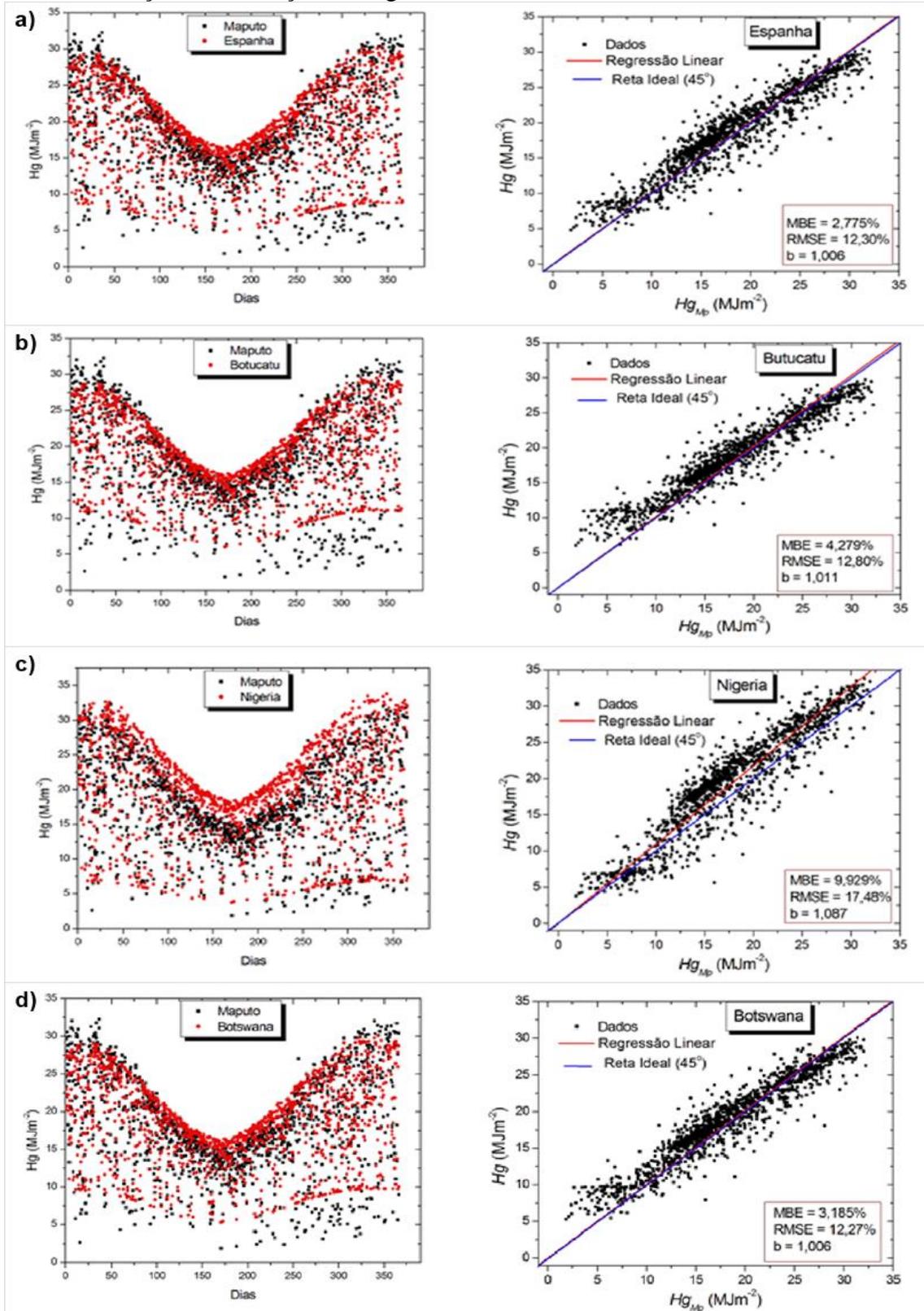


Tabela 2. Indicativos estatísticos de desempenho dos modelos da literatura testados em comparação com valores medidos em Maputo.

LOCALIDADE	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	COEFICIENTE ANGULAR
ESPAÑHA	0,50	2,78	2,21	12,31	1,01
Botucatu/BRASIL	0,77	4,28	2,30	12,80	1,01
Makurdi/NIGÉRIA	1,78	9,93	3,14	17,49	1,09
BOTSWANA	0,57	3,19	2,20	12,27	1,01

Foi observado que os dois modelos de localidades fora do continente Africano (modelo da Espanha e de Botucatu/Brasil), de acordo com a sazonalidade da cidade de Maputo, na época seca e fria, superestimam, enquanto na época quente e chuvosa subestimam. O modelo da Espanha para valores de H_g entre 10 e 30 MJ/m² o desempenho é relativamente bom e entre 17 e 25 MJ/m² o modelo de Botucatu/Brasil apresenta um bom desempenho.

Com relação aos modelos do continente Africano (modelos de Botswana e de Makurdi/Nigéria) testados com os dados de Maputo, observou-se que o modelo de Botswana superestima a medida da irradiação solar global na época seca e fria e subestima na época quente e chuvosa, enquanto o modelo de Makurdi/Nigéria superestima em quase todas as estações do ano, com maior impacto no período seco e frio. O modelo de Botswana apresenta o seu bom desempenho entre de 10 até 22 MJ/m² enquanto o modelo de Makurdi/Nigéria apresenta o maior espalhamento dos pontos com relação à reta ideal em quase todo ano.

Os melhores desempenhos foram observados para os modelos de Botswana, Espanha e Botucatu/Brasil com valores de RMSE de 12,27, 12,31 e 12,80% respectivamente. O pior desempenho corresponde com o modelo de Makurdi/Nigéria com RMSE de 17,48%.

3.3 Modelo proposto para Maputo

A Figura 5a apresenta a distribuição dos pontos de transmissividade atmosférica e razão de insolação a partir de dados medidos em Maputo. Ao se fazer a regressão linear foi gerada a Equação 10 para estimativa da irradiação solar global 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 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 K_t e S , e uma precisão boa para a aplicação da equação na estimativa da irradiação solar global anual em Maputo.

$$K_t = 0,23 + 0,49 \cdot S \quad (10)$$

A Figura 5b mostra a validação do modelo. Os indicativos estatísticos e o coeficiente angular da Tabela 3 mostram o bom desempenho alcançado pelo modelo ao se comparar os valores estimados aos valores medidos.

Figura 5. Relação entre a transmissividade atmosférica e a razão de insolação, para partição anual (a) e Validação do modelo anual para cidade de Maputo (b)

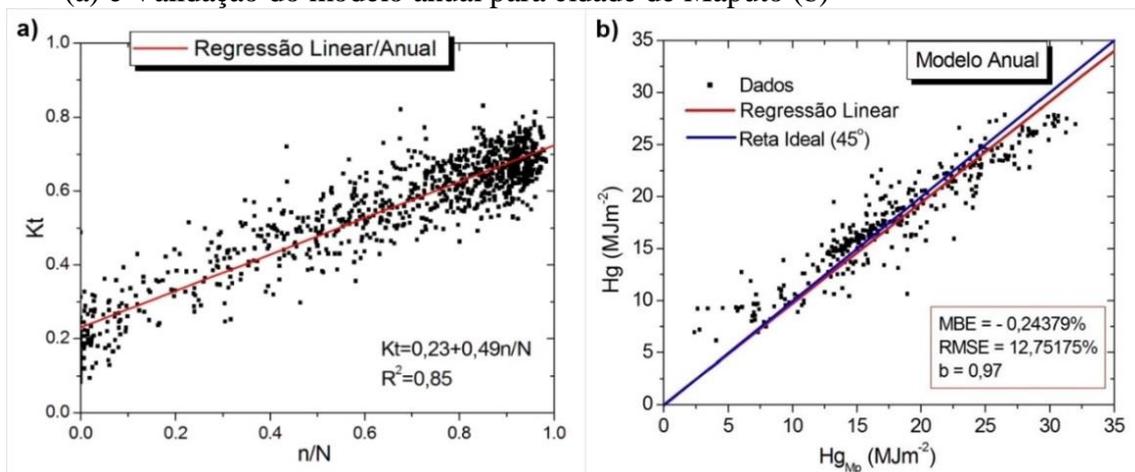


Tabela 3. Indicativos estatísticos de desempenho do modelo Anual para cidade de Maputo

MODELO	MBE (MJ/m ²)	MBE (%)	RMSE (MJ/m ²)	RMSE (%)	R ²	COEFICIENTE 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 H_g 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%.

4 CONCLUSÃO

A partir desse estudo obtive-se as seguintes conclusões:

- ✓ A média anual da irradiação solar global na cidade de Maputo corresponde a 55% da irradiação solar que chega no topo da atmosfera. A irradiação solar global máxima na cidade de Maputo é de 32,23 MJ/m² no

mês de fevereiro e a mínima é de 1,84 MJ/m² no mês de junho.

- ✓ Dos modelos da literatura testados para a estimativa da irradiação solar global na cidade de Maputo, os da Espanha e o de Botswana são os mais aceitáveis. Estes modelos apresentam o valor de coeficiente angular igual a 1,01 e RMSE (%) menor que do modelo anual de Maputo.
- ✓ 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 bons indicativos estatísticos, sendo MBE de -0,24% e o RMSE de 12,75%.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem IBE (Moçambique) - Instituto de Bolsas de Estudos e a CAPES (Brasil) - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelos incentivos e apoios financeiros.

6 REFERÊNCIAS

- AHMAD, F.; ULFAT, I. Empirical models for the correlation of monthly average daily global solar radiation with hours of sunshine on a horizontal surface at Karachi, Pakistan, Turkish. **Turkish Journal of Physics**, Ancara, v. 28, p. 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**, v. 30, p. 931-936, 2005.
- ALMOROX, J.; HONTORIA, C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1529-1535, 2004.
- AL-MOSTAFA, Z. A.; MAGHRABI A.H.; AL-SHEHRI S.M. Sunshine-based global radiation models: A review and case study. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 209-216, 2014
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 50, p. 121-126, 1924.
- BAKIRCI, K. Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey. **Energy**, London, v. 34, p. 485-501, 2009.
- BRABEC, M.; BADESCU, V.; DUMITRESCU, A.; PAULESCU, M. A new point of view on the relationship between global solar irradiation and sunshine quantifiers. **Solar Energy**, v. 126, p. 252-263, 2016.
- CHUKWUJINDU, N. A comprehensive review of empirical models for estimating global solar radiation in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Bloemfontein, v. 78, p. 955-995, 2017.
- CORRÊA, F. H. P. **Estimativa das radiações ultravioleta (UV), fotossinteticamente ativa (PAR) e infravermelha (IV) em função da razão de insolação**. 2011. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.
- CHEN, R.; ERSI, K.; YANG, J.; LU, S.; ZHAO, W. Validation of five global radiation models with measured daily data in China. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 1759-1769, 2004.
- DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; DE OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. R.; CODATO, G. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, v. 99, p. 754-763, 2016.
- DUMAS, A.; ANDRISANI, A.; BONNICI, M.; GRADITI, G.; LEANZA, G.; MADONIA, M.; TRANCOSSI, M. A new correlation between global solar energy radiation and daily temperature variations. **Solar Energy**, v. 116, p. 117-124, 2015.
- IQBAL, M. **An introduction to Solar Radiation**. Ontario: Academic Press Canada, 1983.
- KUUSK, A. Absorption profiles of shortwave radiation in a vegetation canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 62, p. 191-204, 1992.
- LUHANGA, P. V. C.; ANDRINGA, J. Characteristics of solar radiation at Sebele, Gabororu, Botswana. **Solar Energy**, v. 44, p. 77-81, 1990.

MOLINEAUX, B.; INEICHEN, P. Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity improving model performance. **Solar Energy**, v. 55, p. 125-137, 1995.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Editora Nobel, 1975.

MUNEER, T.; GUL, M. S. Evaluation of sunshine and cloud cover-based models for generating solar radiation data. **Energy Conversion and Management**, v. 41, p. 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 University Journal of Basic and Applied Sciences**, Cairo, v. xxx, p. 1-30, 2017.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 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**, v. 88, p. 27-35, 1997.

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

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**, v. 51, p. 27-29, 1993.

SUEHRCKE, H.; BOWDEN, R. S.; HOLLANDS, K. G. T. Relationship between sunshine duration and solar radiation. **Solar Energy**, v. 92, p. 160-171, 2013.

SZEICZ, J. M.; MACDONALD, G. M. Age-dependent tree-ring growth responses of subarctic white spruce to climate. **Canadian Journal of Forest research**, v. 24, p. 120-132, 1994.

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**, v. 37, p. 141-1421, 1996.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Recife: versão digital 2, 2006.
<http://www.anakena.com.br/file/239832/meteorologia-e-climatologia-vd2-mar-2006.pdf>

YANG, K.; HUANG, G. W.; TAMAI, N. A hybrid model for estimating global solar radiation. **Solar Energy**, v. 70, p. 13-22, 2001.

YAO, W.; LI, Z.; WANG, Y.; JIANG, F.; HU, L. Evaluation of global solar radiation models for Shanghai, China. **Energy Conversion and Management**, v. 84, p. 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**, v. 47, p. 2441-2450, 2006.

YOHANNA, J. K.; ITODO, I. N.; UMOGBAI, V. I. A model for determining the global solar radiation for Makurdi, Nigeria. **Renewable Energy**, v. 36, p. 1989-1992, 2011.

ZHANG, J.; ZHAO, L.; DENG, S.; XU, W.; ZHANG, Y. A critical review of the models used to estimate solar radiation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Bloemfontein ,v. 70, p. 314-329, 2017.