

MODELOS ESTATÍSTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA IRRADIAÇÃO SOLAR UV DIÁRIA NO ESTADO DE PERNAMBUCO

S. S. Leal¹, C. Tiba² e R. D. Piacentini³

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)
Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Instituto de Física Rosario - Universidad Nacional de Rosario (CONICET)
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU - CEP 50.740-540, Recife, PE, Brasil
Tel.:+5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250
Email: tiba@ufpe.br

RESUMO: As medidas diárias da irradiação solar ultravioleta (UVA + UVB) e global, obtidas através de duas estações localizadas em Pesqueira e Araripina no estado de Pernambuco, possibilitaram a elaboração de modelos estatísticos para a estimativa da irradiação solar ultravioleta. Os seguintes modelos estatísticos foram construídos: correlação polinomial para a estimativa diária da fração média $\langle F_{UV} \rangle$ em função do índice de transmitância da irradiação solar global, K_T e uma outra para a estimativa do índice de transmitância atmosférica ultravioleta, K_{TUV} em função do K_T e da massa de ar, m . A modelagem polinomial resultou em MBE de 0,65% e -1,33% e RMSE de 4,82% e 3,67% respectivamente para Pesqueira e Araripina. A modelagem com regressão múltipla do K_T e m resultou em MBE de -0,12% e -1,88% e RMSE 4,30% e 3,65% respectivamente para Pesqueira e Araripina. As correlações estatísticas obtidas foram comparadas com resultados obtidos por outros autores em outras localidades.

Palavras Chaves: UV, Relação entre irradiação solar global e Irradiação UV, Modelagem estatística.

INTRODUÇÃO

A radiação solar ultravioleta (UV) que alcança a superfície terrestre é normalmente subdividida em UVB (280-320 nm) e UVA (320-400nm). O conhecimento detalhado desta radiação é de grande importância, devido aos efeitos produzidos nos sistemas biológicos e nos materiais expostos ao Sol. No primeiro caso, a saúde humana (câncer de pele e cataratas), plantas, ecossistema aquático e ciclos bioquímicos são afetados e com relação aos materiais destacam-se os plásticos, tintas e madeiras, cuja degradação pode variar de uma perda de coloração até a degradação total de suas propriedades mecânicas (ANDRADY et al., 1998).

Estudos mostram, porém, que as informações referentes a irradiação solar UV (UVA + UVB) no Brasil e no mundo são escassas com baixa cobertura espacial e temporal. Devido a este fato, alguns pesquisadores desenvolveram modelos para estimativa da irradiação UV a partir da irradiação global, estendendo as informações UV para outras localidades onde existam dados de irradiação global e possuam características climáticas semelhantes.

Com o objetivo de elaborar modelos desse tipo, foram coletados simultaneamente dados de irradiação ultravioleta (UVA + UVB) e irradiação global, no período de 2008 a 2009, a partir de duas estações de medição instaladas em Pernambuco, sendo uma delas no IFPE (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco) na cidade de Pesqueira, localizada na zona do Agreste a 214 km da capital Recife e a outra na cidade de Araripina localizada a 690 km da capital Recife na zona do Sertão.

MATERIAL E MÉTODOS

Estações de medidas e parâmetros

A Tabela 1 mostra as estações de medidas da irradiação UV e irradiação solar global, suas coordenadas geográficas, caracterização climática e período de medidas.

Estações	Coordenadas geográficas			Clima	Período
	Lat.	Long.	Alt.(m)		
Pesqueira -PE	-8° 24'	-36° 46'	639	Tropical – Semi-árido	Setembro08 / dezembro08 Janeiro09 / junho09
Araripina -PE	-7° 34'	-40° 29'	622	Tropical – Semi-árido	julho08 / dezembro08 janeiro09 / jun09

Tabela 1 – Estação de medidas simultâneas da radiação UV e Irradiação solar

A medição da irradiação solar UV foi realizada a partir de um instrumento Eppley TURV (Total UV Radiation) e para medição da irradiação solar global diária foi utilizado um piranômetro preto e branco também da Eppley. Os sensores foram acoplados a um sistema de aquisição de dados da CAMPBELL, modelo CR-10X, para estação Pesqueira e o modelo CR-1000X, para estação Araripina.

Frações diárias

A relação entre a radiação solar ultravioleta diária e a radiação solar global diária para uma determinada região resulta na fração solar ultravioleta F_{UV} . O conhecimento de F_{UV} é importante para estimar a radiação ultravioleta em lugares onde não existam dados sobre a mesma, porém existam dados sobre radiação solar global. Nestes casos, a radiação ultravioleta poderá ser facilmente calculada através da seguinte expressão:

$$F_{UV} = \frac{H_{UV}}{H_G} \quad (1)$$

onde H_{UV} e H_G são respectivamente a irradiação solar ultravioleta e global diária. Contudo, este método possui limitações que se restringem ao local de origem das medidas ou a regiões com características climáticas muito semelhantes. Uma forma de tornar os modelos estatísticos menos dependente do local é a retirada da componente determinística das irradiações solar mediante o uso dos índices de claridade para irradiação solar global e UV. K_T e K_{TUV} são definidos abaixo.

$$K_T = \frac{H_G}{H_0} \quad (2)$$

onde, H é a irradiação diária global sobre a superfície terrestre;
 H_0 é a irradiação diária global extraterrestre .

$$K_{TUV} = \frac{H_{UV}}{H_{0UV}} \quad (3)$$

onde, H_{UV} é a irradiação diária ultravioleta sobre a superfície terrestre;
 H_{0UV} é a irradiação diária ultravioleta extraterrestre .

$$H_{0UV} = \frac{24}{\pi} I_{SC}(UV) E_0 \left[\cos \delta \cos \Phi \cos \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \delta \sin \Phi \right] \quad (4)$$

onde, $I_{SC}(uv) = 80,83 \text{ W m}^{-2}$
 E_0 é a distância relativa Sol-Terra
 ϕ é a latitude local
 δ é a declinação
 ω_s é o ângulo do nascer ou por do Sol

Metodologia e comparação estatística

As séries de medidas diárias para Pesqueira e Araripina foram divididas em dois períodos distintos segundo a Tabela 2. O primeiro período foi utilizado para modelar as equações de estimativa da fração F_{UV} polinomial em K_T e K_{TUV} em função de K_T e massa relativa de ar. O segundo período corresponde uma série independente utilizada para a validação das correlações estatísticas.

Estação	Dados para modelagem	Dados para validação
Pesqueira	out., dez. /2008 e fev., abr., jun. /2009	set., nov. /2008 e jan., mar., mai. /2009
Araripina	jul., set., nov. /2008 e jan., abr., jun /2009	Ago., out., dez. /2008 e fev., mai. /2009

Tabela 2 – Séries temporais diárias para modelagem e validação

A validação da equação foi feita a partir dos indicativos estatísticos MBE% (mean bias error) e RMSE% (root mean square error)

$$\text{MBE} = 100 \frac{\sum_n (\mathbf{H}_{UV, \text{calculated}} - \mathbf{H}_{UV, \text{measured}})}{\sum_n \mathbf{H}_{UV, \text{measured}}} \% \quad (5)$$

$$\text{RMSE} = 100 \sqrt{\frac{\sum_n (\mathbf{H}_{UV, \text{calculated}} - \mathbf{H}_{UV, \text{measured}})^2}{n}} \frac{1}{\sum_n \frac{\mathbf{H}_{UV, \text{measured}}}{n}} \% \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Descrição dos dados experimentais

Os dados medidos em escala de minuto foram agrupados em torno de uma dada hora solar considerando à meia hora anterior e posterior a mesma. Integrando-se estes resultados ao longo das horas do dia obtém-se a irradiação diária (MJ/m^2). Devido a problemas operacionais foram desconsiderados os dias julianos 318 de 2008 e 90 de 2009 para cidade de Pesqueira. Para cidade de Araripina foram excluídos os dias 236, 318, 319 de 2008 e os dias 60 a 92 de 2009.

A correlação polinomial, baseia-se na fração F_{UV} diária em função do índice de claridade diário. A Figura 1 mostra o comportamento da fração solar ultravioleta diária em função do índice de claridade diário para as cidades de Pesqueira (a) e Araripina (b). Observa-se que a fração ultravioleta aumenta com a diminuição do índice de claridade (K_T). A situação onde ocorre um K_T baixo normalmente tem mais nebulosidade e, portanto, maior concentração de vapor d'água na atmosfera que exerce uma forte atenuação na faixa do espectro infravermelho. Nessa situação a atenuação do espectro global é muito maior que o espectro UV. A estação de Araripina embora situada a altitude e clima similar a Pesqueira apresenta uma fração UV e irradiação solar UV 10% inferior. Essa situação é confirmada em (TIBA E PIMENTEL, 2009) onde são apresentados os valores de profundidade ótica de aerossol para Araripina de 3,8 e de Pesqueira de 3,4. Provavelmente o valor mais alto de Araripina é em decorrência do impacto da indústria de extração de gesso.

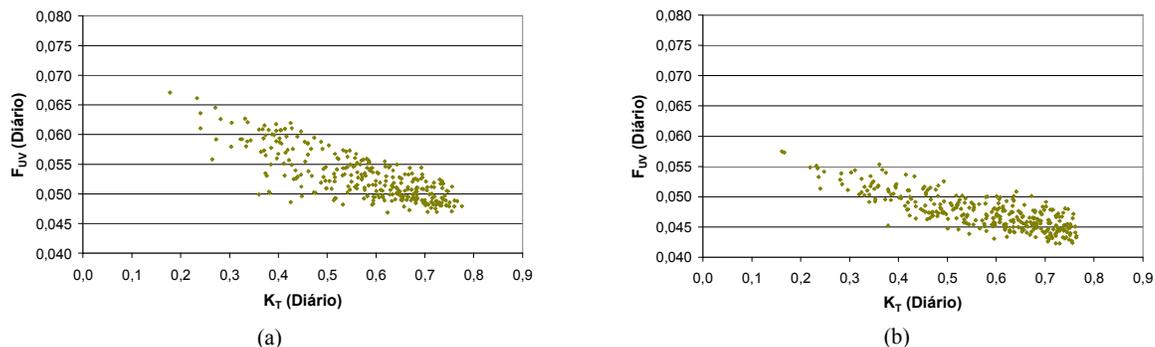


Figura 1 – Fração ultravioleta diária em função do índice de claridade diário para cidade de Pesqueira (a) e para cidade de Araripina (b).

A Figura 2 mostra a fração K_{TUV} em função do índice de claridade. Valores maiores de K_T , implicam em uma maior fração K_{TUV} .

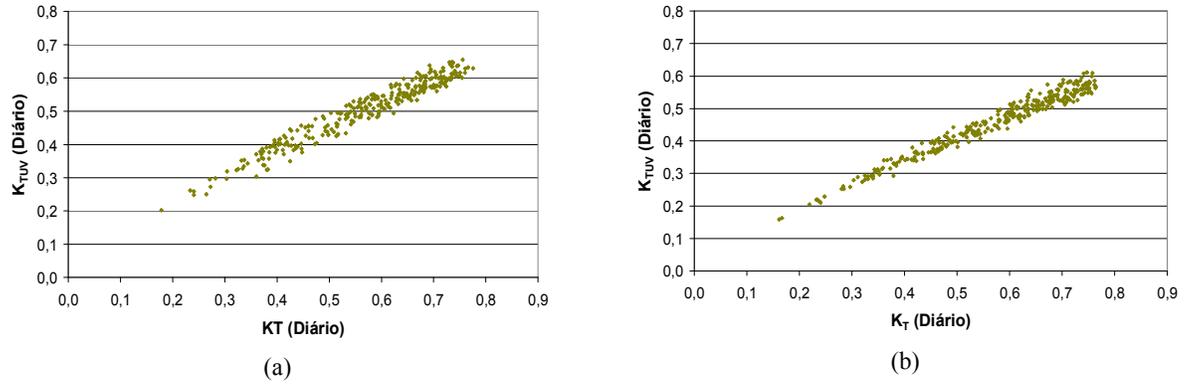


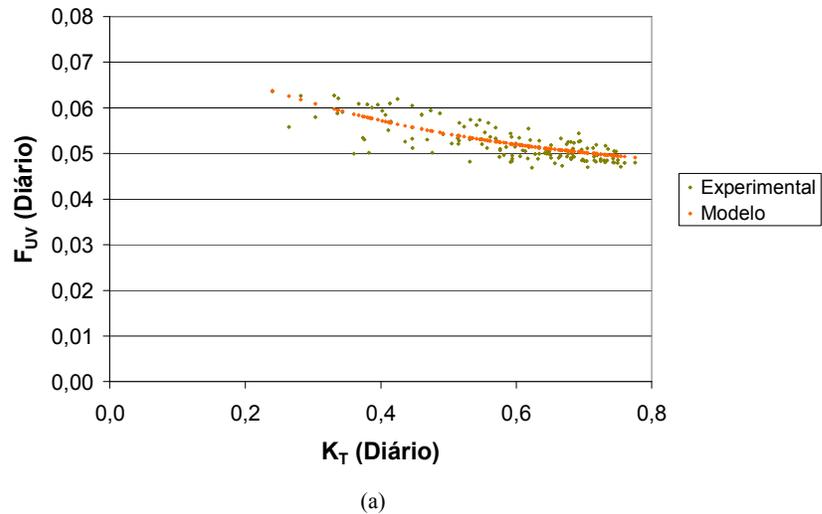
Figura 2 – Fração K_{TUV} em função do índice de claridade centesimal para as cidades de Pesqueira (a) e Araripina (b).

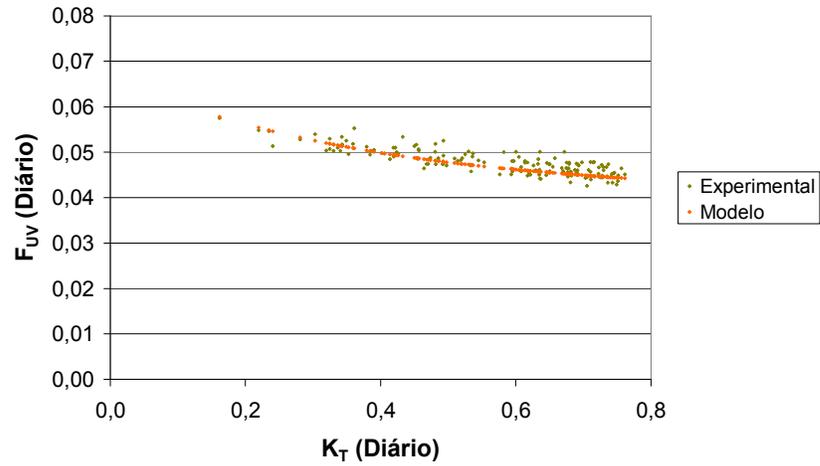
Correlações polinomiais

Para modelagem da fração média $\langle F_{UV} \rangle$, adotou-se o procedimento que consiste em calcular as frações médias para cada intervalo centesimal, considerando o intervalo de K_T variando de 0 a 1. As expressões polinomiais (6) e (7) foram geradas respectivamente para Pesqueira e Araripina.. Na Fig. 3 podem ser vistas as curvas modeladas e os pontos experimentais para as duas estações.

$$\text{Pesqueira} \quad \langle F_{UV} \rangle = -0,0262K_T^3 + 0,0730K_T^2 - 0,0795K_T + 0,0790 \quad R^2 = 0,92 \quad (7)$$

$$\text{Araripina} \quad \langle F_{UV} \rangle = -0,0262K_T^3 + 0,0640K_T^2 - 0,0625K_T + 0,0663 \quad R^2 = 0,90 \quad (8)$$





(b)

Figura 3–Correlação polinomial com dados locais para estimativa da fração média de $\langle F_{UV} \rangle$ para cidade de Pesqueira (a) e Araripina (b).

As correlações polinomiais foram aplicadas para series temporais anteriormente não utilizadas para a geração dos modelos e os resultados apresentaram um bom desempenho estatístico, conforme pode ser visto na Tabela 3.

Estações	MBE%	RMSE%
Pesqueira -PE	0,65	4,82
Araripina -PE	-1,33	3,67

Tabela 3 –Validação das correlações polinomiais

Regressão múltipla

Utilizando-se os dados locais e a partir de regressões múltiplas, foram determinadas as expressões (8) e (9) para Pesqueira e Araripina. A Figura 4 mostra as curvas modeladas (em laranja) e os pontos experimentais para as duas estações.

$$K_{TUV} = 0,780K_t^{0,834} m_r^{0,791} \quad (9)$$

$$K_{TUV} = 0,717K_T^{0,829} m_r^{0,169} \quad (10)$$

onde, m_r é a massa de ar relativa referente ao meio dia solar, sendo obtida a partir do ângulo zenital (z), conforme a seguinte expressão:

$$m_r = \frac{1}{\cos(z)} \quad (11)$$

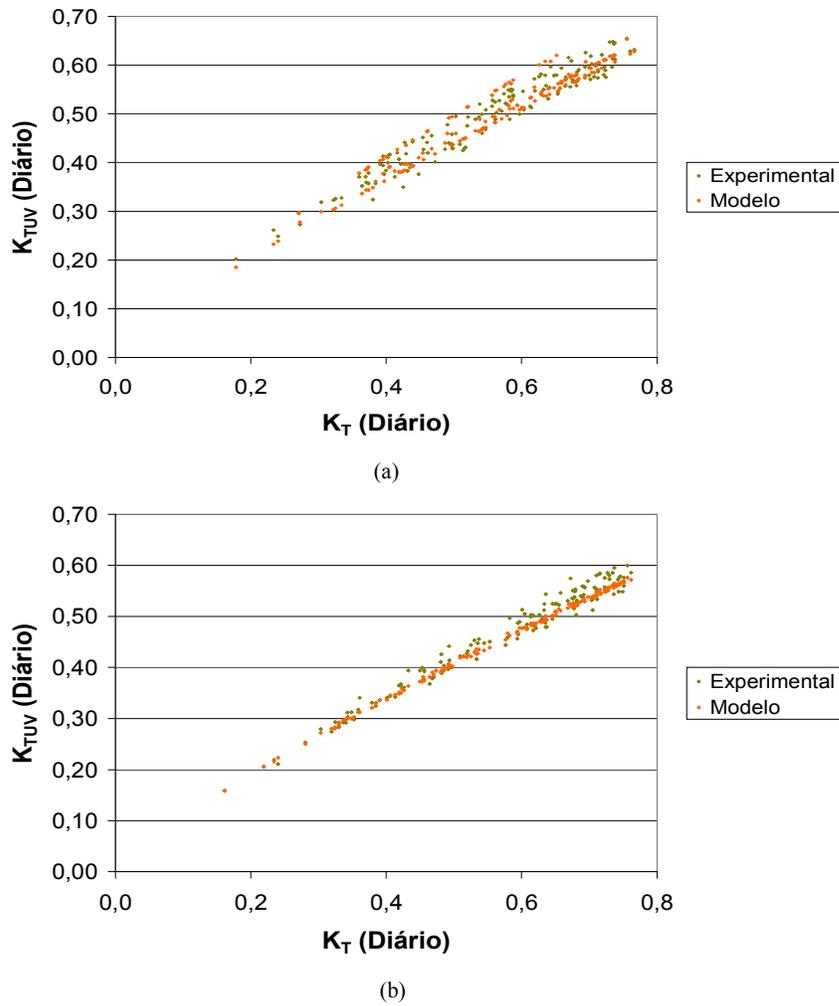


Figura 4 – Modelo de regressão múltipla para estimativa da fração K_{TUV} para cidade de Pesqueira e Araripina

As regressões múltiplas foram aplicadas para series temporais anteriormente não utilizadas para a geração dos modelos e os resultados apresentaram um bom desempenho estatístico, conforme pode ser visto na Tabela 4.

Estações	MBE%	RMSE%
Pesqueira -PE	-0,12	4,30
Araripina -PE	-1,88	3,65

Tabela 4 – Validação dos modelos de regressão múltipla

Correlações polinomiais e múltiplas regressões foram desenvolvidas no Brasil e exterior (ESCOBEDO et. al., 2007; BARBERO, et. al., 2006), gerando as seguintes expressões, respectivamente:

$$\langle F_{UV} \rangle = -0,03478K_T^3 + 0,06743K_T^2 - 0,05908K_T + 0,06006, \text{ Botucatu-SP} \quad (12)$$

$$K_{TUV} = 0,712K_t^{0,771} m_r^{-0,254}, \text{ Almeria- Espanha} \quad (13)$$

A aplicação dessas relações para estimativas da irradiação UV em Araripina e Pesqueira, produzem resultados com altos valores de MBE e RMSE. Para a cidade de Pesqueira, por exemplo, a primeira relação apresentou um MBE de -21% e RMSE

de 19%, a segunda relação -10,6% e 11,5%. Esses valores indicam a necessidade da calibração local para correlações deste tipo.

CONCLUSÕES

As correlações polinomiais e com múltiplas regressões mostraram uma boa acurácia de predição da irradiação ultravioleta diária. O modelo estatístico polinomial apresentou um MBE% de 0,65% e 1,33% e um RMSE% de 4,82% e 3,67% para as cidades de Pesqueira e Araripina respectivamente. Para a correlação com múltipla regressão, MBE% foi de -0,12% e -1,88% e o RMSE% 4,30% e 3,65% respectivamente. Essas correlações embora desazonalizadas ainda requerem de uma calibração local para ajustar o índice de massa de ar. A utilização desses modelos com o conhecimento da irradiação solar diária seja medida ou estimada, permitirá conhecer o valor correspondente da irradiação UV em regiões circunvizinhas com similaridades climáticas e fitogeográficas às cidades de Pesqueira e Araripina ampliando desta forma de modo significativo e o conhecimento da irradiação UV na região.

REFERÊNCIAS

- ANDRADY, A. L.; HAMID, S. H.; HU, X.; TORIKAI A.(1998) Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. *Journal Photochemistry and Photobiology*, v. 46, p. 96 – 103.
- BARBERO, F. J.; LOPEZ, G.; BATLLES, F.J. (2006) Determination of daily solar ultraviolet radiation using statistical models and artificial neural networks. *ANNALES GEOPHYSICAE*, v. 24, p.2105 - 2114.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES E. N.; PAI, A. D.; OLIVEIRA A. P.; SOARES J.(2007) Equações de estimativa diária para as radiações UV, PAR e IV em função da radiação global para cobertura atmosférica parcial total. I CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza.
- TIBA, C., PIMENTEL, V. M. (2009). Estimating atmospheric Linke turbidity index from climatic data for Pernambuco. In: ISES Solar World Congress 2009, 2009, Johannesburg -South Africa. Proceedings of ISES Solar World Congress 2009. Johannesburg - South Africa : International Solar Energy Society, 2009

ABSTRACT

The daily measurements of solar global and ultraviolet irradiation (UVA + UVB) by two stations in the state of Pernambuco, located in Pesqueira and Araripina enabled the construction of statistical models to estimate the solar ultraviolet irradiation. The following statistical models were constructed: polynomial correlation to estimate daily average fraction <FUV> dependent on the index of transmittance of global solar irradiation, K_T and another based in multiple regression for the estimate the index of atmospheric transmittance of ultraviolet, K_{TUV} . The multiple regression model depend on the K_T and the air mass, m . The polynomial modeling resulted in MBE% of 0.65% and -1.33% and RMSE of 4.82% and 3.67% respectively for Pesqueira and Araripina. The multiple regression modeling resulted in MBE of -0.12% and -1.88% and RMSE of 4.30% and 3.65%. Statistical correlations were compared with results obtained by other authors in other locations.

Keywords: UV, Relationship between global and UV solar irradiation, Statistical modeling.