

## ESTIMAÇÃO DO IUV MÁXIMO MENSAL NO SEMI-ÁRIDO DO NORDESTE DO BRASIL – ESTUDO DE CASO ÁGUA BRANCA - AL

R.C. Andrade<sup>1</sup>, C. Tiba<sup>1</sup>, N. Fraidenraich<sup>1</sup>, J. L. Souza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)  
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU - CEP 50.740-540, Recife, PE, Brasil  
Tel.:+5581 3453 6019, Fax: +55 81 32718250 e-mail: ricardo.andrade@ufpe.br;

<sup>2</sup>Laboratório de Agrometeorologia e Radiometria Solar, Inst. de Ciências Atmosféricas, UFAL, Maceió

*Recibido 15/08/13, Aceptado 24/09/13*

**RESUMO:** O código computacional, SPCTRL2, foi utilizado para estimar a irradiação solar ultravioleta na localidade de Água Branca - AL (Longitude -37° 56' e Latitude -9° 15'), região semiárida do Nordeste do Brasil, para o ano de 2008. O software requer poucos parâmetros de entrada e fáceis de obter: ângulo zenital, pressão atmosférica, quantidade de água precipitável, o ozônio total e a profundidade óptica de aerossóis (AOD). Todas essas variáveis são medidas em estações meteorológicas convencionais, com exceção da profundidade óptica de aerossol(AOD). A AOD utilizada para a simulação foi estimada à partir do índice de turbidez de Linke calculado pelo modelo ESRA (European Solar Radiation Atlas). As estimativas realizadas mostraram um IUV no período das 9 às 17 horas elevados praticamente durante todo o ano e índices extremos iguais a 13 nos meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

**Palavras-chave:** SPCTRL2, ESRA, IUV, Brasil, Água Branca - AL

### INTRODUÇÃO

Diversos efeitos nocivos à saúde podem ser causados pelo excesso de exposição à radiação ultravioleta (UV) solar, tais como queimaduras, sardas, debilitação do sistema imunológico, envelhecimento precoce, catarata e câncer de pele. O Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2012) previu para o Brasil, o surgimento de 518.510 novos casos de câncer para 2012 e válidos também para 2013. O número de casos novos de câncer de pele não melanoma estimados para a população brasileira em 2012 foi de 62.680 em homens e de 71.490 em mulheres. Quanto ao melanoma, a previsão da sua incidência foi de 3.170 casos novos em homens e 3.060 casos novos em mulheres nessa mesma população de indivíduos.

Para o estudo de efeitos biológicos a irradiação solar UV utilizam-se fatores de ponderação, os quais atribuem-se pesos maiores para comprimentos de onda de maior interação biológica. A resposta biológica aos diferentes comprimentos de onda é descrita por um espectro de ação. O espectro de ação é determinado através de experimentos médicos que analisam o efeito biológico de diferentes comprimentos de onda de radiação (Kirchhoff et. al., 2000). A Fig. 1 representa o espectro de ação eritêmica para pele humana.

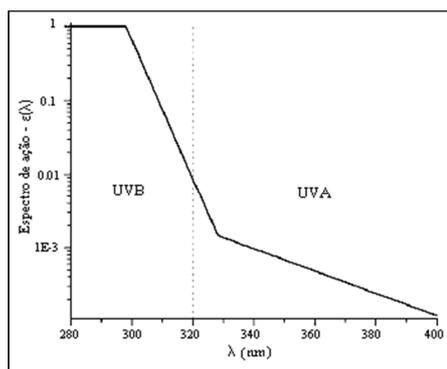


Figura 1: Espectro de ação eritêmica (Diffey, 1991).

<sup>1</sup> Pesquisador

<sup>2</sup> Pesquisador

A irradiância espectral  $I_\lambda$  ponderada pelo espectro de ação  $\epsilon_\lambda$ , resulta na irradiância eritêmica espectral  $S_\lambda$ , em  $W / (m^2 nm)$ . Integrando-se a irradiância eritêmica espectral  $S_\lambda$ , para intervalo de comprimentos de onda referentes à radiação ultravioleta, obtém-se a irradiância biologicamente ativa  $S$ , que no caso dos seres humanos, também é chamada de irradiância eritêmica.

$$S = \int_{280}^{400} I_\lambda \epsilon_\lambda d\lambda \quad (1)$$

A unidade da irradiância eritêmica é dada em DEM (dose erimatososa mínima), que equivale aproximadamente a  $210J/m^2$ . O índice ultravioleta (IUV), relacionado aos níveis de irradiação UV que induzem à formação de eritemas na pele humana, é determinado a partir da irradiância eritêmica (WHO, 2002).

Pelo que antecede é necessário, ou mais, é imperativo, a implementação e intensificação de ação integrada aos programas nacionais de prevenção de cegueira e ao câncer de pele (CSP, 2004), seja pelas consequências econômicas que pressionam o sistema público de saúde brasileiro (SUS), seja pelas consequências adversas ao nível individual. O conhecimento da exposição à irradiação solar UV seria o primeiro passo para uma política pública de prevenção e mitigação do problema, porém, a medições da irradiação solar UV no Brasil são muito raras, seja porque os equipamentos são muito caros, seja porque os estudos dos efeitos maléficos da irradiação solar UV são relativamente recentes. A alternativa para essa situação é a estimação da irradiação UV através modelos computacionais devidamente calibrados com parâmetros locais. Devido a estes fatos, o principal objetivo do presente trabalho é estimar o índice ultravioleta máximo, usando a modelagem da irradiância solar espectral, ESRA e o software SPCTRL2, os quais apresentam simplicidade, precisão e uma relativa facilidade na obtenção dos dados meteorológicos.

## MODELOS DE CÉU CLARO ESRA

Modelagens de irradiância solar espectral são necessários em muitas aplicações, tais como ciências atmosféricas, biologia, física médica e tecnologias energéticas (sistemas fotovoltaicos, iluminação natural, sistemas para aquecimento de água e ar, dentre outros). Destacam-se, dois tipos de modelagem da irradiância solar espectral: códigos computacionais detalhados e sofisticados, e modelos paramétricos simples (Gueymard, 1993). O primeiro tipo considera a atmosfera constituída de diferentes camadas, e usa medidas do perfil vertical de gases e aerossóis constituintes. Este código requer muitas variáveis de entrada, e além disso, o tempo de execução e algumas limitações de entrada o tornam um instrumento não apropriado para certas aplicações, particularmente em engenharia (Anderson, 1993). Já o segundo tipo são modelos de parametrização simples, e que necessitam de poucos dados meteorológicos, facilmente disponíveis (Bird, 1986). O ESRA (European Solar Radiation Atlas) é um exemplo bem conhecido do segundo tipo de modelagem e foi criado há mais de 27 anos atrás (Kasten, 1984), que foi atualizado em 1994 para o Novo Atlas Solar Europeu (Scharmer, 1994).

O ESRA é um algoritmo baseado em um modelo simples que utiliza os seguintes parâmetros de entrada para a estimação da irradiância solar no plano horizontal: longitude, latitude, altitude, constante solar, ângulo zenital e fator de turbidez Linke. Este modelo é inteiramente baseado em expressões algébricas que estão descritos mais detalhadamente abaixo:

### Irradiância solar no plano horizontal

A irradiância solar direta recebida por uma superfície horizontal para um dia de céu claro é dado por

$$I_{cs} = I_0 \epsilon \exp[-0.8662m T_{LK} \delta_R(m)] \cos \zeta_s \quad (2)$$

onde  $I_0$  é a constante solar,  $\epsilon$  a excentricidade da órbita terrestre,  $T_{LK}$  é o fator de turbidez de Linke,  $\delta_R(m)$  é a profundidade ótica de Kasten – Raleigh,  $m$  é a massa de ar e  $\zeta_s$  é o ângulo zenital.

A massa de ar  $m$ ,  $\Delta\gamma_{ref}$ ,  $\delta_R(m)$  e  $\epsilon$  são expressas respectivamente por:

$$m = \left(1 - \frac{z}{10^4}\right) \left[ \sin \gamma_s^{true} + 0.50572 \left(57.29578 \gamma_s^{true} + 6.07995\right)^{-1.6364} \right] \text{ para } z < 4000 \text{ metros} \quad (3)$$

onde,  $z$  a altitude em relação ao nível do mar,  $\gamma_s^{true}$  e  $\Delta\gamma_{ref}$  são:

$$\gamma_s^{true} = \gamma_s + \Delta\gamma_{ref} \quad (4)$$

$$\Delta\gamma_{ref} = 0.061359 \frac{0.1594 + 1,1203\gamma_s + 0.06565\gamma_s^2}{1 + 28.9344\gamma_s + 277.3971\gamma_s^2} \quad (5)$$

e  $\gamma_s$  é o ângulo de elevação solar.

A profundidade ótica de Kasten – Raleigh,  $\delta_R(m)$  é dada por

$$\delta_R(m) = \begin{cases} 1/(6.62960 + 1.75130m - 0.12020m^2 + 0.00650m^3 - 0.00013m^4) & \text{para } m \leq 20 \\ 1/(10.4 + 0.718m) & \text{para } m > 20 \end{cases}$$

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cos\left(\frac{2\pi j}{365.25}\right) \quad (6)$$

onde j é o dia juliano

A irradiância solar extraterrestre  $I_{ET}$  pode ser estimada a partir da seguinte expressão

$$I_{ET} = I_0 \varepsilon \cos \zeta_s \quad (7)$$

### Irradiância solar difusa

A irradiância solar DIFUSA recebida numa superfície horizontal aos raios solares para um dia de céu claro é dado por

$$D_c = I_0 \varepsilon F_d(\gamma_s) Tn(T_{LK}) \quad (8)$$

onde  $F_d(\gamma_s)$  é chamada de função de elevação solar, pois depende apenas da elevação solar  $\gamma_s$ ,  $Tn(T_{LK})$  é chamada de função de transmissão difusa, a qual depende exclusivamente do fator de turbidez de Linke  $T_{LK}$ .

A função de elevação solar  $F_d(\gamma_s)$ , e a função de transmissão difusa  $Tn(T_{LK})$ , são expressas respectivamente por:

$$Tn(T_{LK}) = -0.015843 + 0.030543T_{LK} + 0.0003797T_{LK}^2 \quad (9)$$

$$F_d(\gamma_s) = A_0 + A_1 \sin \gamma_s + A_2 \sin^2 \gamma_s \quad (10)$$

onde,  $A_0$  ,é expresso a partir da condição estabelecida pelo produto de  $A_0^*$  e  $Tn(T_{LK})$

$$A_0^* = 0.26463 - 0.061581T_{LK} + 0.0031408T_{LK}^2 \quad (11)$$

Se  $A_0^* Tn(T_{LK}) < 0.0022$ ,  $A_0 = 0.0022/Tn(T_{LK})$

Se  $A_0^* Tn(T_{LK}) \geq 0.0022$ ,  $A_0 = A_0^*$

onde,  $A_1$  e  $A_2$  é dada por:



$$TL_m = -(9.4 + 0.9M) * (\Delta_{cda} + \Delta_w + \Delta_a) \quad (15)$$

onde, M é a massa de ar 2

$\Delta_a$  é a profundidade ótica de aerossóis,

$\Delta_{cda} = -0.101 + 0.235 * M^{-0.16}$ , profundidade ótica pancromática de uma atmosférica límpida e seca

$\Delta_w = 0.112 * M^{-0.55} * w^{0.34}$ , profundidade ótica devido a água precipitável

A partir da equação (15) podemos calcular o AOD em termos do fator de Turbidez de Linke, da massa de ar e da quantidade de água precipitável w. A quantidade média horária de água precipitável foi calculada utilizando as equações 16, 17 e 18 (ParoScientific, 2004). A temperatura média horária e a umidade relativa foram obtidas na localizdo na Cidade de Água Branca – AL.

$$\beta(T, RH) = \frac{aT}{(b+T)} + \ln(RH) \quad (16)$$

$$T_d = \frac{b \cdot \beta(T, RH)}{a - \beta(T, RH)} \quad (17)$$

onde T é a temperatura ambiente e RH é a umidade relativa, com a=17.27e b=237.7

$$W = \exp[0,07.T_d - 0,075] \quad (18)$$

Sendo W a quantidade de água precipitável (cm) e T<sub>d</sub> a temperatura de orvalho (oC)

#### Utilização do modelo ESRA para obtenção do fator de Linke

Para a obtenção do fator de Linke (TL<sub>m</sub>) construiu-se um software implementado em JAVA, o qual utiliza as equações apresentadas para o modelo ESRA.

Os dados de entrada requeridos pelo modelo do ESRA para a estimação da irradiância solar total em um plano horizontal na superfície terrestre em condição de céu claro são: latitude, longitude e altitude do local especificado, dia Juliano, hora solar e índice de Linke para massa de ar 2. Na Fig. 3 vemos, como exemplo, um gráfico gerado pelo software para o dia 4 de fevereiro do ano de 2008, onde o mesmo, apresenta em azul, a irradiância solar total simulada para a condição extraterrestre, em verde para a condição de céu claro, e por fim, em vermelho os dados medidos.

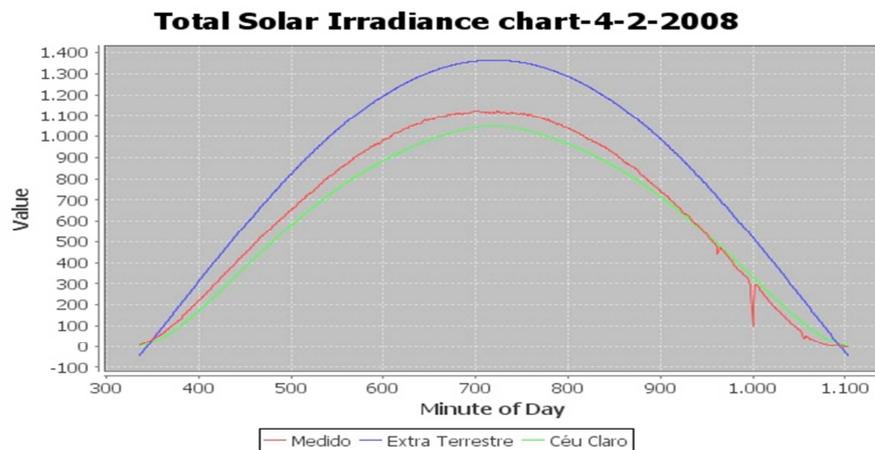


Figura 3: Irradiância solar total para o dia 4 de fevereiro do ano de 2008 para a localidade de Água Branca – AL. Em azul temos a irradiância solar total estimada para a condição extraterrestre, em verde a simulação para o dia de céu claro e em vermelho os valores medidos pelo piranômetro da Eppley – PSP.

Para determinar o índice de Linke, considerando-se o dia mais claro de cada mês, variou-se o índice de turbidez de Linke até que a curva simulada pelo modelo ESRA (em verde) coincidissem com a curva dos dados medidos (em vermelho).

De posse dos fatores de turbidez de Linke e da quantidade de água precipitável, calculada com a equação (18) utilizou-se a equação (15) para calcular o AOD para o dia mais claro de cada mês do ano de 2008. A Tabela 1 apresenta a profundidade óptica de aerossóis (AOD) para o dia mais claro de cada mês do ano de 2008, para a localidade e Água Branca – AL. Os meses de maio e julho não apresentaram dias de céu claro.

Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
AOD	0,10	0,05	0,05	0,08	-	0,09	-	0,07	0,09	0,07	0,05	0,05

Tabela 1: Profundidade óptica de aerossóis para o dia mais claro de cada mês do ano de 2008, para a localidade de Água Branca – AL.

### Cálculo do índice UV

Para o cálculo da irradiância UV e do Índice de Radiação Ultravioleta (IUV) usando o software SPCTRL2 são necessários os seguintes dados de entrada: hora local, profundidade óptica de aerossóis, pressão atmosférica superficial, albedo, ozônio total, quantidade de água precipitável, dia Juliano, latitude e longitude do local especificado. O índice de ozônio médio mensal foi obtido a partir dos dados do satélite TOMS (Total Ozone Measurement Spectrometer).

O SPCTRL2 não calcula diretamente o IUV. Ele somente gera valores da irradiância direta e difusa no intervalo de 300 a 400nm. Assim, foi utilizado o espectro de ação padrão para eritema na pele humana ISO 17166 (1999/CIE S007/E-1998), definido para uma superfície horizontal. O IUV é uma quantidade não dimensional definida por:

$$I_{UV} = Ker \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} Ser(\lambda) d\lambda \quad (19)$$

onde  $E_{\lambda}$  é a irradiância solar espectral expressa em  $W/(m^2nm)$ , Ker é uma constante igual a  $40 m^2/W$  e o  $Ser(\lambda)$  é o espectro de ação padrão para eritema, definido abaixo por:

$$Ser(\lambda) = 1 \text{ quando } 250nm < \lambda < 298nm$$

$$Ser(\lambda) = 10^{0,094(298-\lambda)} \text{ quando } 298nm < \lambda < 328nm$$

$$Ser(\lambda) = 10^{0,015(139-\lambda)} \text{ quando } 328nm < \lambda < 400nm$$

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores das estimativas da irradiância ultravioleta obtidos à partir do software SPCTRL2 podem ser visto na Tabela 2. Nessa Tabela é apresentada o IUV para a localidade de Água Branca – AL para o dia mais claro de cada mês do ano de 2008 para o intervalo de 9:00 às 17:00 horas (horário local).

horas	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
jan	4	7	10	12	12	11	8	4	2
fev	4	7	11	13	13	12	9	5	2
mar	4	7	11	13	13	12	8	5	2
abr	3	7	10	12	12	10	7	4	1
mai	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jun	2	5	7	8	8	7	4	2	1
jul	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ago	3	6	9	11	11	9	6	3	1
set	4	8	11	12	12	10	7	3	1
out	5	9	12	13	12	10	7	3	1
nov	5	9	12	13	13	10	7	3	1
dez	5	8	11	13	12	10	7	4	1

Tabela 2: IUV para os meses do ano de 2008 compreendido no intervalo de 9:00 às 17:00 (horário local) para Água Branca – AL

Em Andrade (2007) são encontrados os desempenhos estatísticos para as simulações do IUV utilizando o SPCTRAL2 para uma metodologia similar.

Na Fig. 4 foi feito um gráfico 3D para visualizar melhor os resultados obtidos. Conforme esperado, o valor do IUV máximo foi alcançado próximo ao meio dia solar e seus valores foram superiores a 8 para todos os dias mais claros do ano de 2008. Esses valores são considerados muito altos ou extremos pela classificação da WHO (Fig.5). Também pode se observar, o comportamento e sazonal da variação da radiação UV, associada ao ciclo anual do ângulo solar zenital.

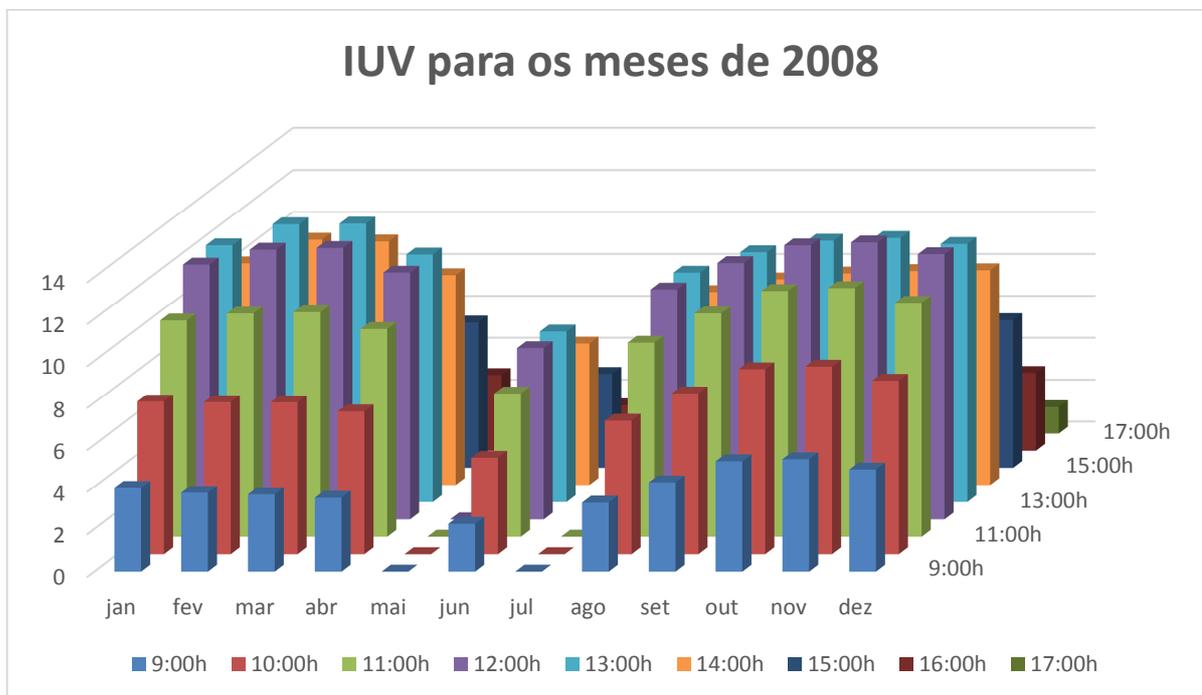


Figura 4: IUV para a localidade de Água Branca – AL para todos os meses do ano de 2008 para o intervalo compreendido entre 9 e 15 horas.

BAIXO		MODERADO			ALTO		MUITO ALTO			EXTREMO	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	>11
Nenhuma precaução necessária		Precauções Requeridas					Extra Proteção!!!				
Você pode permanecer no sol o tempo que quiser!		Em horários próximos ao meio-dia procure locais sombreados Procure usar camisa e boné Use o protetor solar					Evite o sol ao meio-dia Permaneça a sombra Use camisa, boné e protetor solar				

Figura 5: Classificação do IUV e recomendações (adaptado da WHO, 2002).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada é uma alternativa para estimar a irradiação solar ultravioleta máxima para localidades que tenham somente medidas de irradiância solar total. A metodologia é simples, na medida em que todas as variáveis de entrada são obtidas em estações meteorológicas convencionais, com exceção do AOD, a qual pode ser estimada a partir do conhecimento do fator de turbidez de Linke, obtido através do modelo ESRA. As estimativas realizadas mostraram um IUV no período das 10 às 15 horas elevados praticamente durante todo o ano e índices extremos iguais a 13 nos meses de fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro.

### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, PróEngenharías (CAPES) pelo suporte às pesquisas relacionadas a Energia Solar.

## REFERÊNCIAS

- Andrade, R.C. (2007). Estimativa da irradiância solar ultravioleta horária no semi-árido Pernambuco, Dissertação de Mestrado, PROTEN-DEN-UFPE, Brasil, p.70.
- Anderson, G. P. (1993). Suitability for remote sensing, Proc. Conf. Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, A. Kohnle and W. B. Miller eds., Orlando, SPIE 1968, 514-525.
- Bird, R. E. (1981). A Simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces, SERI – Solar Energy Research institute
- Bird, R. E. (1986). Simple solar spectra model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. J. Clim. Appl. Meteorol 25, 87-97.
- CSP - CADERNO DE SAÚDE PÚBLICA. Disponível em: <http://www.scielosp.org>. Acesso em: jun. 2004.
- DIFFEY, B. L. (1991). Solar ultraviolet radiation effects on biological systems – A Review, Phys. Med. Bio., 36, 3, 299-328.
- Gueymard, C. (1993). Development and performance assessment of a clear sky spectra radiation model, Proc. 22ndASES Conf., Solar, Washington, DC, American Solar Energy Society 433-438.
- INCA – Instituto Nacional de Câncer. Incidência de câncer no Brasil. Disponível em: <http://www.inca.gov.br/estimativa/2012>. Acesso em: jul. 2012.
- Kasten, F. e Dolchert, H. J. (1984). European Solar Radiation Atlas, Commission of the European Communities, Vol.1. Cologne.
- Kirchhoff, V. W. J. H. (2000). A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa, Brazilian Journal of Geophysics 18, 1, 63-73.
- PAROSCIENTIFIC, Inc. (2004). Met3A calculation of dew point. Disponível em: [www.paroscientific.com/dewpoint.htm](http://www.paroscientific.com/dewpoint.htm). Acesso em: set. 2008.
- Ineichen, P., (2005), Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks, Solar Energy, Vol. Completar
- Scharmer, K., (1994). ESRA HANDBOOK, International Journal of Solar Energy 15, 3, 81-87.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. (2002). Global solar UV index: A practical guide. WHO/SDE/OEH/02.2, Genebra, Suíça, p.28.

## ABSTRACT

The computational code, SPCTRL2, was used to estimate the solar ultraviolet irradiation in the town of Água Branca - AL (Longitude -37 ° 56 ' Latitude and -9 ° 15'), semi-arid region of Northeast Brazil, for the year 2008. The software requires few input parameters and easy to obtain: zenith angle, atmospheric pressure, amount of precipitable water, total ozone and aerosol optical depth (AOD). All these variables are measured in conventional meteorological stations, with the exception of the aerosol optical depth (AOD). AOD used for the simulation was estimated from the turbidity Linke calculated by the ESRA model (European Solar Radiation Atlas). The estimates made in the period showed an UVI from 9 to 17 o'clock high during the whole year and extreme rates equal to 13 in February, March, October, November and December.

**Keywords:** SPCTRL2, ESRA, IUV, Brasil, Alagoas