

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES

**MEDIÇÃO, ANÁLISE E MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR UV NO ESTADO
DE PERNAMBUCO**

SÉRGIO DA SILVA LEAL

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL
OUTUBRO - 2011**

SERGIO DA SILVA LEAL

**MEDIÇÃO, ANÁLISE E MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR UV NO ESTADO
DE PERNAMBUCO**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares - PROTEN do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco para a obtenção do título de Doutor. Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

ORIENTADOR: PROF. DR. CHIGUERU TIBA
CO-ORIENTADOR: PROF. DR. RUBEN PIACENTINI

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL

OUTUBRO – 2011

Catálogo na fonte
Bibliotecária Raquel Cortizo, CRB-4 664

L435m Leal, Sérgio da Silva.
Medição, análise e mapeamento da radiação solar UV no Estado de Pernambuco / Sérgio da Silva Leal. - Recife: O Autor, 2011.
130 folhas, il., gráfs., tabs., figs.

Orientador: Prof. Dr: Chigueru Tiba
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Nuclear, 2011.
Inclui Referências Bibliográficas e anexos

1. Fontes renováveis de energia 2. Radiação solar UV.
3. Estimativa 4. Modelagem. 5. Eritema I. Tiba, Chigueru (orientador). II. Título.

621.48 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2011-235

**MEDIÇÃO, ANÁLISE E MEPEAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR UV
NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

Sérgio da Silva Leal

APROVADO EM: 19.10.2011

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chigueru Tiba
CO-ORIENTADOR: Dr. Prof. Ruben Piacentini

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE

Profa. Dra. Olga de Castro Vilela – DEN/UFPE

Prof. Dr. Alcides Codeceira Neto - CHESF

Prof. Dr. José Bione de Melo Filho - CHESF

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/UFPE – CRCN-NE/CNEN

**MEDIÇÃO, ANÁLISE E MAPEAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR UV NO ESTADO
DE PERNAMBUCO**

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	
RESUMO	
ABSTRACT	
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Radiação solar UV.....	4
2.2 Absorção da radiação solar UV através da pele.....	5
2.3 Absorção da radiação solar UV através do olho humano.....	7
2.4 Efeitos da radiação solar UV nos materiais.....	8
2.5 Interação da atmosfera terrestre com a radiação solar.....	9
2.6 Fatores que modificam o nível de radiação ultravioleta na superfície terrestre....	12
2.6.1 Camada de ozônio na atmosfera.....	12
2.6.2 Altitude solar ou ângulo de elevação.....	12
2.6.3 Latitude.....	14
2.6.4 Nuvens.....	15
2.6.5 Altitude.....	15
2.6.6 Reflexão na superfície terrestre.....	15
2.7 Efeitos biológicos da radiação ultravioleta.....	16
2.8 Medidas realizadas no Brasil.....	18
2.9 Estimativa da radiação ultravioleta.....	21
2.10 Modelos paramétricos computacionais.....	25
2.10.1 SPECTRAL2.....	26
2.10.2 SMARTS2.....	27

3 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
3.1 Sistema de medição e coleta de dados	28
3.2 Caracterização dos dados.....	34
3.3 Modelos aplicados para estimativa da radiação ultravioleta.....	35
3.3.1 Correlação entre a radiação solar UV e global.....	35
3.3.2 Correlação polinomial da fração média UV em função do índice de transmitância da radiação global.....	36
3.3.3 Regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta em função da massa de ar e do índice de transmitância da radiação solar global.....	36
3.3.4 Modelos ANN.....	38
3.4 Determinação da radiação UV (A+B) e IUV máximos mensais para outras seis localidades do estado de Pernambuco.....	39
3.5 Comparações estatísticas.....	43
4 RESULTADOS E COMENTÁRIOS.....	44
4.1 Descrição das medidas horárias, diárias e mensais da radiação UV (A+B).....	44
4.2 Frequência diária e frequência acumulada da radiação UV (A+B).....	60
4.3 Avaliação das medidas da radiação eritêmica para a cidade de Recife.....	64
4.4 Modelagem da radiação solar UV (A+B) horária com uso de correlações estatísticas e redes neurais artificiais.....	70
4.4.1 Correlação entre a radiação UV e global (modelo1).....	71
4.4.2 Correlação polinomial (modelo2).....	75
4.4.3 Regressão múltipla (modelo3).....	79
4.4.4 Redes ANN1 e ANN2.....	83
4.5 Medidor UV.....	90
4.5.1 Comparação estatística do medidor UV com o sistema de aquisição de dados CR1000 da CAMPBELL.....	91
4.5.2 Comparação entre as equações para estimativa da irradiação ultravioleta em escala de minutos, horária e diária.....	92
4.6 Radiação solar UV (A+B) e IUV máximos mensais no estado de Pernambuco.....	94

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
ANEXO I.....	107
ANEXO II.....	109
ANEXO III.....	111
ANEXO IV.....	113
ANEXO V.....	115
ANEXO VI.....	117
ANEXO VII.....	119
ANEXO VIII.....	121
ANEXO IX.....	123
ANEXO X.....	124
ANEXO XI.....	125

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Comportamento da área do buraco de ozônio na Antártida.....	5
Figura 2 - Absorção UV através da pele humana	6
Figura 3 - Absorção da radiação UV pelo olho humano	8
Figura 4 - Fissuras na superfície de um isolador polimérico.....	9
Figura 5 - Absorção da irradiação solar na atmosfera	10
Figura 6 - Ângulo de elevação ou altitude solar.....	13
Figura 7 - Massa de ar relativa em relação a um ponto P.....	13
Figura 8 – Comparação da variação da intensidade da radiação solar global para duas localidades com latitudes distintas.....	14
Figura 9 - Espectro de ação eritêmica.....	16
Figura 10 - Curva suavizada de 30 dias para os valores médios diários do índice UV para as estações de observação de Campo Grande, La Paz e Natal.....	18
Figura 11 - Correlação entre a DEM e a radiação em toda faixa UVB.....	19
Figura 12 - Índice ultravioleta para as cidades de Ilhéus e Itabuna.....	20
Figura 13 - Resultado ARD (determinação das variáveis de maior relevância).....	24
Figura 14- Mapa de Pernambuco e as respectivas estações de medição.....	28
Figura 15 - Piranômetro espectral de precisão Eppley (PSP).....	29
Figura 16 - Interior do piranômetro espectral de precisão Eppley (PSP) e suas principais partes.....	30
Figura 17 - Piranômetro Eppley preto e branco.....	31
Figura 18 - TUVR do fabricante Eppley.....	32
Figura 19 - Biômetro modelo 501 UVB.....	33
Figura 20 - Interior do biômetro modelo 501 UVB.....	33
Figura 21 - Rede artificial neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC).....	38
Figura 22 - Área de trabalho do SPECTRAL2.....	42
Figura 23 - Radiação solar UV em função do ângulo de elevação para a cidade de Recife.....	45
Figura 24 - Radiação solar global em função do ângulo de elevação para a cidade de Recife.....	45

Figura 25 - Radiação solar UV em função do ângulo de elevação para a cidade de Pesqueira.....	46
Figura 26 - Radiação solar global em função do ângulo de elevação para a cidade de Pesqueira.....	46
Figura 27 - Radiação solar UV em função do ângulo de elevação para a cidade de Araripina.....	47
Figura 28 - Radiação solar global em função do ângulo de elevação para a cidade de Araripina.....	47
Figura 29 - Radiação solar UV, global e fração UV diária para a cidade de Recife.....	49
Figura 30 - Radiação solar UV, global e fração UV diária para a cidade de Pesqueira	50
Figura 31 - Radiação solar UV, global e fração UV diária para a cidade de Araripina.	51
Figura 32 - Curva média mensal da água precipitável na cidade de Pesqueira no ano de 2005.....	52
Figura 33 - Fração solar ultravioleta diária em função do índice de transmitância global diário para as cidades de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c)..	53
Figura 34 - Índice de transmitância UV diário em função do índice de transmitância global diário para as cidades de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c)...	55
Figura 35 - Radiação solar UV (a), global (b) e fração solar ultravioleta (c) média mensal para a cidade de Recife.....	57
Figura 36 - Radiação solar UV (a), global (b) e fração solar ultravioleta (c) média mensal para a cidade de Pesqueira.....	58
Figura 37 - Radiação solar UV (a), global (b) e fração solar ultravioleta (c) média mensal para a cidade de Araripina.....	59
Figura 38 - Frequência acumulada mensal (a) e frequência acumulada total para a cidade de Recife.....	60
Figura 39 - Frequência acumulada mensal (a) e frequência acumulada total para a cidade de Pesqueira.....	61
Figura 40 - Frequência acumulada mensal (a) e frequência acumulada total para a cidade de Araripina.....	62
Figura 41 - Frequência diária para as cidade de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c).....	63

Figura 42 - Radiação eritêmica (a) e global (b) horária.....	65
Figura 43 - Radiação eritêmica diária (a), global diária (b) e o IUV diário ao meio- dia (hora padrão) (c).....	66
Figura 44 - Radiação eritêmica média mensal (a), global média mensal (b) e o IUV médio mensal (c) e sazonal (d) considerando meio-dia (hora padrão).....	68
Figura 45 - Distribuição acumulada da radiação eritêmica média horária.....	69
Figura 46 - Índice ultravioleta horário, média mensal.....	69
Figura 47 - Comparação dos índices ultravioleta medidos na estação Recife e fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.....	70
Figura 48 - Correlação entre a radiação solar UV e global para a cidade de Recife.....	72
Figura 49 - Correlação entre a radiação solar UV e global para a cidade de Pesqueira	73
Figura 50 - Correlação entre a radiação solar UV e global para a cidade de Araripina	74
Figura 51 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 2 (laranja) para a cidade de Recife.....	76
Figura 52 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 2 (laranja) para a cidade de Pesqueira.....	77
Figura 53 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 2 (laranja) para a cidade de Araripina.....	78
Figura 54 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 3 (laranja) para a cidade de Recife.....	80
Figura 55 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 3 (laranja) para a cidade de Pesqueira.....	81
Figura 56 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde). Curva gerada pelo modelo 3 em laranja para a cidade de Araripina.....	82
Figura 57 - Curvas geradas a partir de dados horários (a) e diários (b) pela rede ANN1 para a cidade de Recife. Dados experimentais em verde.....	84

Figura 58 - Curvas geradas a partir de dados horários (a) e diários (b) pela rede ANN1 para a cidade de Pesqueira. Dados experimentais em verde.....	85
Figura 59 - Curvas geradas a partir de dados horários (a) e diários (b) pela rede ANN1 para a cidade de Araripina. Dados experimentais em verde.....	86
Figura 60 - Curvas geradas a partir de dados horários (a) e diários (b) pela rede ANN2 para a cidade de Recife. Dados experimentais em verde.....	87
Figura 61 - Curvas geradas a partir de dados horários (a) e diários (b) pela rede ANN2 para a cidade de Pesqueira. Dados experimentais em verde.....	88
Figura 62 - Curvas geradas a partir de dados horários (a) e diários (b) pela rede ANN2 para a cidade de Araripina. Dados experimentais em verde.....	89
Figura 63 - Vista frontal do coletor de dados e o sensor para medição da radiação global.....	91
Figura 64 - Curvas da irradiação solar global geradas pelo coletor e o CR1000 em um período do dia juliano 303.....	92
Figura 65 - Curvas geradas por um TUVR acoplado a um CR1000 (vermelho) e pelo medidor UV a partir da radiação solar global (verde).....	93
Figura 66 - Comparação entre a radiação UV (A+B) estimada pelo SPECTRAL2 e por dados experimentais para a cidade de Pesqueira.....	96
Figura 67 - Comparação entre o IUV máximo mensal estimado pelo SPECTRAL2 e por dados experimentais para a cidade de Recife.....	97
Figura 68 - Radiação solar UV (A+B) e IUV para os meses de maio (a), junho (b) e julho (c). Em lilás IUV extremo e em vermelho IUV muito alto.....	99
Figura 69 - Radiação UV (A+B) e IUV médio anual para todas as localidades.....	99
Figura 70 - Radiação UV (A+B) e IUV máximo mensal nos meses de fevereiro (a) e outubro (b).....	100

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 – Valores percentuais do albedo UVB.....	16
Tabela 2 – Classificação do IUV e recomendações, conforme a OMS.....	17
Tabela 3 – Coordenadas geográficas das estações de medidas.....	29
Tabela 4 – Coordenadas geográficas e os períodos de medidas da radiação global.....	40
Tabela 5 – Índice de turbidez de linke TL_m para as respectivas localidades.....	40
Tabela 6 – Período de medição das estações Recife, Pesqueira e Araripina.....	44
Tabela 7 – Validação dos modelos e das redes.....	90
Tabela 8 – Valores máximos diários da radiação UV (A+B).....	95
Tabela 9 – Valores máximos de IUV diário.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AOD	Profundidade óptica de Aerossóis
ARD	Determinação Automática de Relevância
CFC	Cloro Flúor Carbono
DEM	Dose Eritematosa Mínima
f_{UV}	Fração solar ultravioleta
$\langle f_{UV} \rangle$	Fração média solar ultravioleta horária para um mesmo intervalo de k_t
H_G	Radiação solar global média diária
H_0	Radiação solar extraterrestre média diária
H_{UV0}	Radiação solar ultravioleta extraterrestre média diária
INCA	Instituto Nacional do Câncer
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IUV	Índice de radiação ultravioleta
H_G	Radiação solar global diária
H_{UV}	Radiação solar ultravioleta diária
H_{UV0}	Radiação solar ultravioleta diária extraterrestre
I_{UV}	Irradiância solar ultravioleta
I_{UV0}	Irradiância solar ultravioleta extraterrestre
I_0	Irradiância solar extraterrestre
$I_{bn\lambda}$	Irradiância solar normal direta espectral
$I_{0\lambda}$	Irradiância extraterrestre espectral
I_b	Irradiância solar direta

I_d	Irradiância solar difusa
I_G	Radiação solar global
I_{SC}	Radiação solar extraterrestre ultravioleta
I_λ	Irradiância espectral
K	Fração difusa diária
K_B	Transmitância direta
k_T	Índice de transmitância atmosférico global horário
K_T	Índice de transmitância atmosférico global diário
K_{TUV}	Índice de transmitância atmosférico ultravioleta diário
L_{DW}	Irradiação infravermelho
LOWTRAN	Low Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance
m	Massa de ar relativa
m_{12}	Massa de ar relativa ao meio dia solar
m_a	Massa óptica de aerossol
n	Dia julino
MBE	Mean Bias Error
MODTRAN	Moderate Resolution Atmospheric Radiance Transmittance Model
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OMS	Organização Mundial de Saúde
PMC	Perceptron de Múltiplas Camadas
PSP	Precision Spectral Pyranometer
Q	Radiação PAR
RH	Umidade relativa do ar (%)
RMSE	Root Mean Square Error

RNA	Redes Neurais Artificiais
S	Irradiância eritêmica
SMARTS2	Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of the Sunshine
SPECTRAL2	Simple Solar Spectral Model
SUSIM	Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor
S_{λ}	Irradiância eritêmica espectral
T	Temperatura ambiente
T_d	Temperatura de orvalho (°C)
TUVR	Total Ultraviolet Radiometer
$T_{0\lambda}$	Transmitância atmosférica devido ao ozônio
$T_{a\lambda}$	Transmitância atmosférica devido aos aerossóis
$T_{n\lambda}$	Transmitância NO ₂
$T_{R\lambda}$	Transmitância espectral através do modelo de Rayleigh
$T_{u\lambda}$	Transmitância em mistura uniforme gases
$T_{w\lambda}$	Transmitância em vapor d'água
TL _m	Índice de turbidez de linke para uma determinada massa de ar
TOM'S	Total Ozone Mapping Spectrometer
UVA	Radiação Ultravioleta tipo A
UVB	Radiação Ultravioleta tipo B
UVC	Radiação Ultravioleta tipo C
UVER	Radiação Eritêmica
UV0	Radiância ultravioleta para céu claro
W	Quantidade de água precipitável (cm)
Z	Ângulo zenital
α	Ângulo de elevação ou altitude solar

α	Coeficiente de ajuste relacionado com o tamanho dos aerossóis
β	Coeficiente de turbidez de Angstrom
δ	Declinação
ε_{λ}	Espectro de ação eritêmica
ϕ	Latitude local
λ	Comprimento de onda da radiação
Δ_a	Profundidade ótica de aerossóis.
Δ_{cda}	Profundidade ótica pancromática de uma atmosfera limpa e seca.
Δ_w	Profundidade ótica do vapor d'água pancromática
ω_s	Ângulo do nascer ou por do Sol

RESUMO

As informações referentes à radiação (UVA + UVB) e irradiância eritêmica no Brasil e ao redor do mundo são escassas e com baixa cobertura temporal e espacial. Este fato é devido principalmente aos altos custos dos equipamentos e sensores, além dos custos operacionais na implantação de uma estação de medição. O conhecimento do nível da radiação UV para uma dada região é de grande importância, uma vez que afeta tanto os seres vivos como também os materiais de uso externo (revestimentos, isoladores elétricos, madeiras, plásticos). O pequeno número de estações de medição direcionou alguns pesquisadores para a criação de modelos paramétricos espectrais computacionais e a geração de modelos estatísticos para estimativa da radiação UV a partir da medição da radiação global, estendendo as informações UV para outras localidades onde existam dados de radiação global e possuam características climáticas semelhantes. Pelo que antecede, duas estações foram instaladas em 2008, uma na cidade de Pesqueira e outra em Araripina, e em 2010 uma outra na cidade de Recife, ambas no estado de Pernambuco, para medidas simultâneas da radiação solar global e UV (A+B). Uma outra estação foi instalada em 2009, também em Recife, para realizar medidas simultâneas da radiação eritêmica e global, completando um grupo de estações que estão localizadas entre latitudes -8 e -10° e longitudes 34 para 38° W, representando o clima típico da região. Os valores horários e diários da radiação global e ultravioleta que atingem o plano horizontal em Recife, Pesqueira e Araripina foram medidos, analisados e comparados. O estudo da radiação UV (A + B) e eritêmica, para o estado de Pernambuco, mostrou uma forte dependência horária e sazonal típica da região Nordeste do Brasil, valores máximos na primavera / verão (setembro a fevereiro) e valores mínimos no outono / inverno (março a agosto). Os índices ultravioleta (IUV) médios anual ao meio-dia foram considerados extremos para todas as localidades.

Os dados coletados possibilitaram a geração de três modelos estatísticos diferentes (Modelo1: correlação linear entre a radiação UV e global; Modelo2: correlação polinomial da fração média UV em função do índice de transmitância da radiação solar global e Modelo3: regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta, índice transmitância atmosférico global e da massa de ar) e duas redes neurais artificiais (ANN1: estimativa da fração média UV considerando as mesmas variáveis físicas do modelo 2 e ANN2: estimativa do índice de transmitância ultravioleta a partir das mesmas variáveis físicas do modelo 3). Os modelos estatísticos e redes permitiram as estimativas horária e diária da radiação solar UV. Os melhores resultados foram observados no Modelo3 e ANN2, com o RMSE% inferior a 5% para valores diários e inferior a 10% para valores horários, confirmando assim, uma boa capacidade de

predição. As medições e modelos gerados possibilitaram também desenvolver um coletor de dados (Medidor UV) de baixo custo e precisão aceitável, capaz de medir a radiação global mediante o uso de um piranômetro e estimar simultaneamente a radiação ultravioleta, podendo assim, ampliar o conhecimento e pesquisas nesse segmento, permitindo uma monitoração mais ampla no estado de Pernambuco e no Brasil.

Palavras Chaves: Radiação solar UV, Estimativa, Modelagem, eritema.

ABSTRACT

Information regarding the UV(A + B) radiation and erythemic in Brazil and throughout the world is scarce and with low temporal and spatial coverage. This fact is mainly due to the high costs of equipment and sensors, besides the operational costs and the implementation of a measuring station. The knowledge of the level in the UV radiation for a given region is of great importance, as it affects both the human beings and the external use material (i.e. layers, electric insulators, wood, and plastic). The small number of measuring stations has driven some researchers to the creation of parametric spectral computational models and to the generation of statistical models for the estimate of UV radiation from the measurement of the global radiation, expanding the UV information to other sites where there are data on global radiation with similar climatic characteristics. Hence, two stations were set up to measure the global and the UV (A+B) solar radiation, in 2008: one in the city of Pesqueira and another one in Araripina, and in 2010 another one in Recife, all the cities in the state of Pernambuco. Another station was set up in 2009, also in Recife, to simultaneously measure the erythemic and global radiation, completing a group of stations located between latitude -8 and -10° and longitude 34 towards 38° W, which represent the typical climate of the region. The daily and hourly values of the global and ultraviolet radiation which reach the horizontal plan in Recife, Pesqueira and Araripina were measured, analyzed and compared. The study of the UV (A + B) and erythemic radiation, for the state of Pernambuco, has shown a strong hourly and seasonal dependency, which is typical for the Northeastern region of Brazil, maximum values in spring/summer (September to February) and minimum values in autumn/ winter (March to August). The average (IVU) ultraviolet rates at mid-day were considered extreme for all places.

The collected data have enabled the generation of three different statistical models (Model 1: linear correlation between the UV and global radiation; Model 2: polynomial correlation in the UV average fraction in function of the transmittance rate of the solar global radiation; and Model 3: multiple regressions in the ultraviolet atmospheric transmittance, global atmospheric transmittance and air mass) and also two artificial neural nets(ANN1: estimate of the average fraction UV considering the same physical variables of model 2 and ANN2: estimate of the ultraviolet transmittance from the same physical variables of model 3). The statistical models and the nets have allowed the hourly and daily solar UV radiation estimate. The best results were observed in Model 3 and ANN2, with the RMSE% inferior to 5% for daily values and inferior to 10% for hourly values, confirming therefore, a good prediction capacity. The generated measures and models have also enabled, the development of a data collector

(Measurer UV) of low cost and reasonable accuracy, able to measure the global radiation by the use of a pyranometer and to simultaneously estimate the ultraviolet radiation therefore being able to strengthen the understanding and the research in this segment, allowing a larger monitoring in the state of Pernambuco and in Brazil.

Key words: Solar radiation UV; estimative; modeling; erythema.

1 INTRODUÇÃO

A globalização acelerada das economias e o surgimento de novas tecnologias vem, ao longo dos anos, causando profundas mudanças sociais e econômicas na população mundial. Tais mudanças, porém, incidem diretamente no ecossistema do planeta, uma vez que a quantidade de poluentes jogados na atmosfera é diretamente proporcional ao grau de industrialização dos países. Esses poluentes vêm, no decorrer dos anos, causando mudanças significativas no clima da Terra, como é o caso da redução global do ozônio atmosférico com ênfase na Antártida, que é resultante da combinação de baixas temperaturas na estratosfera, da irradiação solar e da elevação dos níveis de cloro. Essa elevação é principalmente de origem antropogênica, pois foi resultante da emissão dos clorofluorcarbonetos, que eram componentes utilizados em refrigeradores e propelentes de aerossóis. Com a proibição dos clorofluorcarbonetos, que podem alcançar um tempo de vida de 100 anos, espera-se que a camada de ozônio recupere sua concentração em 60 anos. O ozônio atmosférico é responsável pela absorção parcial da radiação ultravioleta, e sua redução implica uma maior incidência dessa radiação na superfície terrestre. A exposição a pequenas quantidades de radiação ultravioleta solar (UVB), em média 15 minutos diário, entre 9:00 e 15:00 horas, considerando um dia de céu claro (DIFFEY, 1991), é benéfica à saúde do ser humano, uma vez que estimula a produção de vitamina D, porém, vários efeitos nocivos à saúde podem ser causados devido ao excesso de exposição. Sardas, eritemas (queimaduras, avermelhamento), depleção do sistema imunológico, envelhecimento precoce, catarata e câncer de pele são alguns destes efeitos (CORRÊA, 2004). O Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2009), estimou que o câncer de pele do tipo não melanoma, no ano de 2010, seria o mais incidente na população brasileira (114 mil casos novos, ou seja, 23,3% do total de novos casos de câncer no Brasil), seguido pelos tumores de próstata (52 mil), de mama feminina (49 mil), de pulmão (27 mil), de cólon e reto (28 mil), de estômago (21 mil) e colo do útero (18 mil). Com relação a estes 114 mil casos, estima-se que 53410 serão entre os homens e 60440 entre as mulheres. Estes valores correspondem a um risco estimado de 56 casos novos a cada 100 mil homens e de 61 para cada 100 mil mulheres. O melanoma de pele (1,2%) é menos frequente do que os outros tumores de pele (basocelulares e de células escamosas), no entanto, sua letalidade é mais elevada. Essas estimativas também são válidas para o ano de 2011. A Organização Mundial de Saúde (WHO, 2010) estima que, anualmente, ocorram cerca de 132 mil novos casos desse câncer no mundo. A maioria dos cânceres de pele é devida à exposição excessiva ao sol. A Sociedade Americana de Câncer estimou que em 2010, mais de 1 milhão de casos de tumores de

pele e cerca de 68 mil casos de melanoma, estariam associados, além de outros fatores, à radiação UV. Em geral, para melanoma, um maior risco inclui história pessoal ou familiar, porém outros fatores de risco devem ser incluídos, tais como a sensibilidade da pele ao sol, história de exposição solar excessiva, doenças imunossupressoras e exposição ocupacional.

A radiação ultravioleta também afeta adversamente as propriedades mecânicas de materiais comumente utilizados em construções e aplicações externas, como é o caso da madeira, dos polímeros sintéticos e plásticos. A degradação sofrida por esses materiais pode variar de uma perda de coloração até a degradação total das suas propriedades mecânicas. As elevadas temperaturas e elevados índices de radiação solar podem reduzir drasticamente o tempo de vida dos materiais, uma vez que a elevação da temperatura acelera as reações de degradação de sua estrutura. Para tentar conter os efeitos da radiação ultravioleta, as indústrias fazem uso de fotoestabilizadores, que podem representar uma elevação no custo total do produto de 30% (ANDRADY, 1998), no caso dos plásticos. Para as madeiras utilizam-se camadas protetoras, como tintas e vernizes.

O conhecimento da radiação solar UV é, então, de fundamental importância, tanto do ponto de vista científico como de aplicações práticas. Do ponto de vista científico, a radiação solar UV está intimamente relacionada com as variáveis geofísicas, ozônio e aerossóis, sendo esta última uma das incógnitas de maior interesse por sua grande variabilidade espacial e temporal e seu impacto no clima terrestre atual e futuro. Com relação às aplicações práticas, possibilita o cálculo da irradiância eritêmica e do índice UV, indicativos importantes para o estudo dos efeitos físicos e biológicos da radiação UV sobre os seres vivos e cuja prevenção poderá ser efetuada por meio de alertas à população com a intensificação da ação integrada aos programas nacionais de prevenção da cegueira e câncer de pele. É válido salientar que este trabalho poderá servir como base de conhecimento para adequação e otimização das concentrações de estabilizadores na industrialização de materiais de aplicações externas (isoladores, revestimentos, tintas e vernizes) a partir das informações referentes aos níveis de irradiação ultravioleta experimentalmente medidos e/ou extrapolados espacialmente.

Pesquisas recentes mostram, porém, que as informações referentes à radiação solar no Brasil (espectro total) são escassas, com baixa cobertura espacial e temporal (TIBA et al., 2004). As informações sobre a irradiação ultravioleta são ainda mais raras, com o agravante dessa última não fazer parte da rotina observacional das estações meteorológicas. Mediante tais fatos, o presente trabalho teve como objetivo, implantar uma mini-rede de medição da radiação solar UV, índice UV e radiação solar global no estado de Pernambuco em regiões com características climáticas diferenciadas, tais como, sertão (semi-árido), agreste (tropical equatorial semi-árido) e

litoral-continental (tropical equatorial úmido). A partir destas medições, considerando um período mínimo de um ano, disponibilizar uma base de dados para o cálculo da radiação UV (horária e diária), da radiação eritêmica e do índice UV, possibilitando a modelagem da radiação UV, por meio de modelos estatísticos e redes neurais artificiais, em outras localidades de climas característicos semelhantes, onde inexistam medidas. Conforme a modelagem da radiação UV, confeccionar um coletor de dados, de baixo custo, capaz de medir a radiação global e estimar a radiação UV por meio dos modelos aqui determinados. Também foi objetivo deste trabalho, realizar um estudo da distribuição acumulada da dose mensal e anual UV, além de estimativas da radiação UV e índice UV máximos em outras oito localidades do estado de Pernambuco, mediante o uso de um software paramétrico computacional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Radiação solar UV

A atmosfera terrestre é diariamente bombardeada por radiações eletromagnéticas provenientes do Sol. Essas radiações distinguem-se umas das outras pelos seus diferentes comprimentos de onda. Radiações solares com comprimentos de onda compreendidos em um intervalo de 100 a 400nm são classificadas como radiações ultravioleta. A radiação ultravioleta compreende uma fração relativamente estreita deste espectro, sendo subdividida em três subintervalos: UVC (100 – 280 nm); UVB (280 – 320 nm); UVA (320 – 400 nm). A irradiação UVA é pouco absorvida pelos gases presentes na atmosfera, atingindo assim, a superfície terrestre em maiores intensidades, porém com uma menor agressividade com relação aos seus efeitos biológicos. A irradiação UVB é absorvida parcialmente pelo vapor d'água, oxigênio, dióxido de carbono e, principalmente, pela camada de ozônio localizada na estratosfera, região que se situa a uma altitude compreendida aproximadamente entre 10 a 50 km. A concentração máxima de ozônio ocorre numa altitude entre 10 e 35 km (OLIVEIRA et. al., 2005). Embora a incidência da irradiação UVB seja menor que a da irradiação UVA, ela é suficiente para provocar efeitos biológicos graves como o câncer de pele. Por fim, a irradiação UVC, que é potencialmente considerada a mais danosa aos tecidos biológicos, pelo fato de possuir mais energia, é totalmente absorvida pelo oxigênio e ozônio presentes na estratosfera. Devido à emissão de gases poluentes na atmosfera, (em destaque os clorofluorcarbonetos CFC), que foram anteriormente utilizados em sistemas de refrigeração e aerossóis, observou-se nas últimas décadas, uma tendência global de redução da camada de ozônio e como consequência, um aumento na intensidade da radiação solar ultravioleta na superfície terrestre. Isto se deve a reações químicas heterogêneas envolvendo o cloro. A Figura 1 representa a evolução do comportamento do buraco de ozônio na Antártida, consequência dessas reações químicas, nas últimas duas décadas.

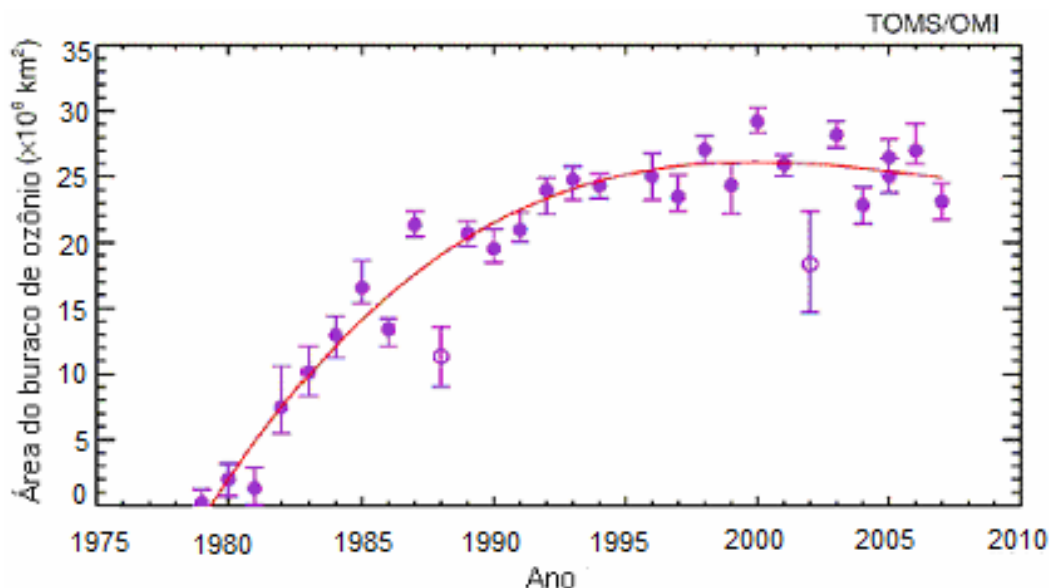


Figura 1 - Comportamento da área do buraco de ozônio na Antártida (KRUMMEL et. al., 2007)

A evolução do buraco de ozônio fez com que o mesmo alcançasse locais mais povoados de latitudes mais baixas, justificando o interesse atual por medições da radiação solar ultravioleta. Uma diminuição relativamente forte da camada de ozônio foi observada no sul do Brasil no final de outubro de 1993 (KIRCHHOFF et al., 1995). Com o tratado de Montreal, assinado em 1989, que proíbe o uso dos CFC, espera-se que ocorra uma estabilização do ozônio estratosférico em aproximadamente 2050.

2.2 Absorção da radiação solar UV através da pele

A pele é um dos maiores órgãos do corpo humano, constituindo 15% do seu peso corporal. Sua extensão média é de 1,6 m² e representa a primeira barreira de proteção do organismo contra agressões externas. A epiderme, a derme e a hipoderme representam as camadas que compõem a pele, Figura 2.

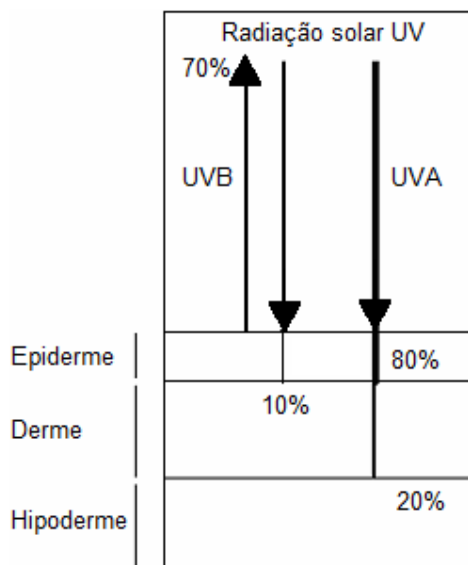


Figura 2 - Absorção UV através da pele humana.

A epiderme é a camada mais externa, composta principalmente por queratinócitos, que são células produtoras de uma proteína chamada de queratina, responsável pela proteção da pele, devido a sua resistência e impermeabilidade. Na epiderme também se localizam os melanócitos que produzem a melanina, responsável pela coloração da pele e absorção da radiação UV. Em média, 70% da radiação UVB é refletida, 30% é absorvida por essas células e dessa parcela somente 10% alcança a parte superior da derme (OLIVEIRA et. al., 2005). Na derme se localizam os vasos sanguíneos e linfáticos que vascularizam a epiderme e também os nervos e os órgãos sensoriais a eles associados. Com relação à radiação UVA, 80% alcança a parte superficial da derme e 20% a sua camada mais profunda. A camada mais interna é a hipoderme e tem como função a regulação da temperatura corporal, a absorção de choques e a fixação dos órgãos.

Com relação aos efeitos biológicos produzidos pela absorção da radiação UV, destacam-se o câncer não-melanoma e o melanoma. O câncer não-melanoma é o mais frequente e possui baixo poder de metástase. Esse tipo de câncer se divide em dois grupos: carcinomas basocelulares e carcinomas epidermóides ou espinocelulares. Os carcinomas basocelulares são mais comuns após os 40 anos, em pessoas de pele clara, e está diretamente relacionado à exposição acumulativa durante a vida. São originários da epiderme e dos apêndices cutâneos acima da camada basal e podem destruir os tecidos a sua volta e atingir cartilagens e ossos, podendo gerar deformações físicas e ulcerações graves. Os carcinomas epidermóides podem ser

originados a partir de exposição prolongada ao Sol, sem proteção adequada, manifestando-se no queratinócito da epiderme, podendo também surgir no epitélio escamoso das mucosas, e sua disseminação pode ocorrer através de gânglios e provocar metástase. Normalmente, este tipo de câncer é mais comum em adultos, com picos de incidência aos 40 anos, porém mediante hábitos culturais que relacionam um corpo bronzeado com um corpo saudável, a média de idade vem caindo devido à exposição exagerada dos jovens ao Sol (CORRÊA, 2004).

O câncer melanoma é o mais perigoso, devido ao seu alto potencial de metástase, podendo levar o indivíduo à morte se não houver um diagnóstico e tratamento precoce. Ele se origina nos melanócitos (células produtoras de melanina, substância que determina a cor da pele). Tem-se observado um expressivo crescimento na incidência deste tumor em populações de pele branca (INCA, 2009).

2.3 Absorção da radiação solar UV através do olho humano

A radiação ultravioleta pode também ocasionar ou intensificar doenças nos olhos. Quanto menor o comprimento de onda da radiação, maior o dano causado à estrutura ocular, porém menor será o poder de penetração. Baseado neste fato, os tecidos que compõem o olho humano não são igualmente atingidos pela radiação UV. A Figura 3 mostra como se dá a absorção da radiação UV através do olho humano. A córnea e o cristalino são praticamente transparentes para comprimentos de onda visíveis (> 400 nm). Comprimentos de onda abaixo dos 360 nm praticamente não atingem a retina.

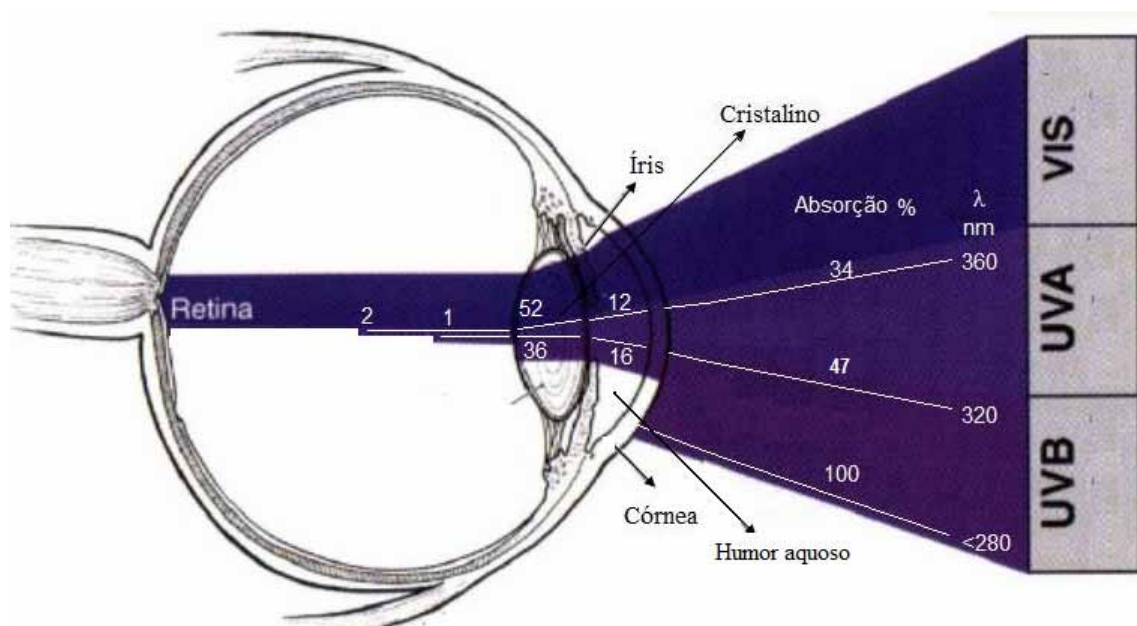


Figura 3 - Absorção da radiação UV através do olho humano

As inflamações da córnea (fotoceratite) e da conjuntiva são sequelas diretas da radiação UVB. Os sintomas de ambas as enfermidades caracterizam-se por dor, lacrimação, sensação de corpo estranho, fotofobia e possível avermelhamento das pálpebras. Já a radiação UVB juntamente com a UVA são apontadas como principais responsáveis pelo desenvolvimento de cataratas.

2.4 Efeitos da radiação solar UV nos materiais

Quando a radiação UV é absorvida por um determinado material (metais, madeiras, polímeros), podem ocorrer reações fotolíticas, fotooxidativas e termooxidativas. Essas reações são normalmente acompanhadas por uma elevação de temperatura no próprio material. Estudos mostram também que os efeitos da radiação UV aumentam com a elevação da temperatura a qual aquele material é submetido. No caso dos metais, os elétrons da camada de valência localizados na superfície do material podem ser ionizados e possivelmente capturados por moléculas de ar. A perda desse elétron causa microfissuras na superfície do material, e por sua vez, a perda de tensão e elasticidade. Os polímeros naturais e sintéticos quando submetidos à exposição UV podem sofrer alterações que variam da perda de coloração até a degradação de suas propriedades

mecânicas. A Figura 4 mostra a superfície de um isolador de alta tensão degradada devido, principalmente, à ação da radiação UV (Siemens, 2011).



Figura 4 – Fissuras na superfície de um isolador polimérico.

O uso de fotoestabilizadores nos metais e nos polímeros, possibilita reduzir os efeitos da radiação UV. O uso do silicone, por exemplo, proporciona uma grande estabilidade ao material polimérico, elevando drasticamente o seu tempo de vida.

2.5 Interação da atmosfera terrestre com a radiação solar

A radiação solar que chega à superfície terrestre sofre atenuações por diversos processos que se produzem ao longo de sua trajetória. Esses processos são classificados como absorção seletiva por gases e vapores de água, dispersão molecular (espalhamento Rayleigh) pelos mesmos componentes e dispersão e absorção por aerossóis (GALLEGOS, 2005). A parcela da radiação proveniente do Sol que se mantém na mesma direção é classificada como radiação direta e a outra parte dispersada pelo ar e nuvens e que por sua vez, perde a direção original é denominada de radiação difusa.

Com relação ao espectro eletromagnético solar, 7% da radiação total é relativa ao espectro ultravioleta, 45% ao espectro visível e 48% ao infravermelho. Os principais absorvedores atmosféricos são o vapor d'água, dióxido de carbono, moléculas de ozônio, além do oxigênio molecular e nitrogênio. A Figura 5 mostra os principais elementos na atmosfera responsáveis pela atenuação da radiação solar que chega à superfície terrestre. Observa-se que as atenuações no espectro ultravioleta são devidas, principalmente, à presença do ozônio contido na

atmosfera. Com relação ao espectro infravermelho, observa-se a forte absorção devido à presença de vapor d'água e do dióxido de carbono.

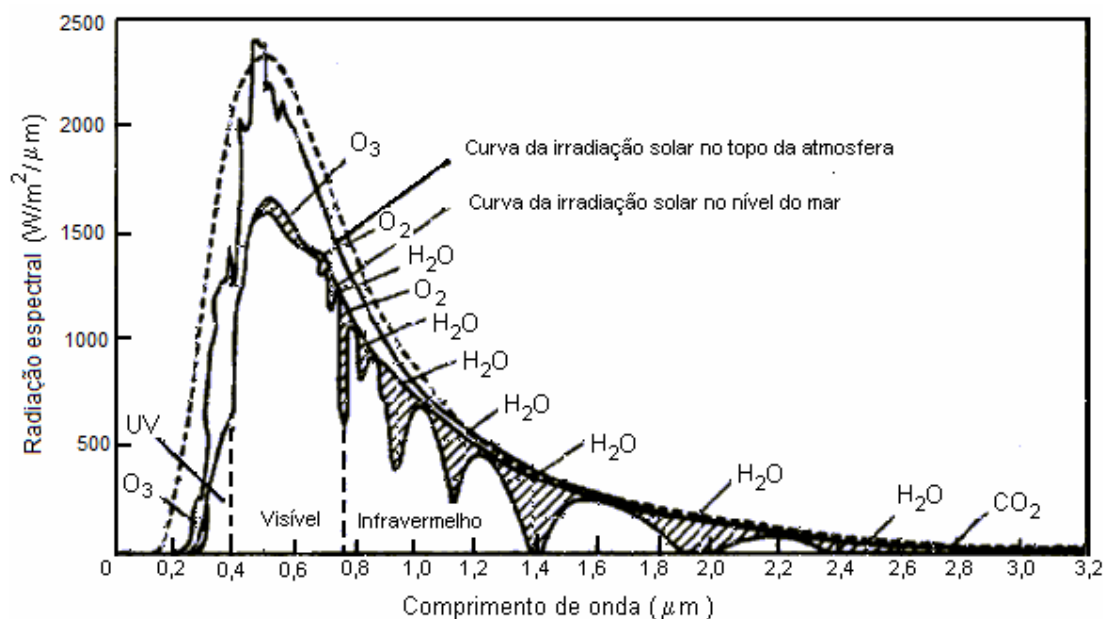


Figura 5 - Absorção da irradiação solar na atmosfera (áreas sombreadas) (DUFFIE et. al., 1991).

Diante desse fato, os diferentes modelos utilizados para o estudo da irradiância espectral solar levam em consideração a água precipitável, existente na atmosfera, a qual pode ser calculada a partir da temperatura de orvalho, que é a temperatura que um volume de ar deve atingir para tornar-se saturado a uma mesma pressão. A quantidade de água precipitável pode ser estimada conforme ParoScientific (2004) mediante a expressão:

$$W = \exp[0,07T_d - 0,075] \quad (1)$$

onde,

W = Quantidade de água precipitável (cm);

T_d = Temperatura de orvalho ($^{\circ}\text{C}$).

A temperatura de orvalho por sua vez, pode ser calculada segundo ParoScientific (2004), através da expressão:

$$T_d = \frac{b \cdot \beta(T, RH)}{a - \beta(T, RH)} \quad (2)$$

$$\beta(T, RH) = \frac{a \cdot T}{(b + T)} + \ln(RH) \quad (3)$$

onde,

$$a = 17,27;$$

$$b = 237,7;$$

RH = Umidade relativa do ar;

T = Temperatura ambiente.

A umidade relativa e a temperatura ambiente são parâmetros facilmente obtidos e normalmente medidos em estações meteorológicas.

Além dos processos de absorção, a radiação solar sofre processos de dispersão (espalhamento) ao penetrar na atmosfera terrestre. Esse processo é mais importante para o espectro visível. Se o comprimento de onda da luz é maior que o tamanho das partículas, como ocorre com as moléculas dos gases atmosféricos, a radiação espalhada é simétrica e inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda (espalhamento Rayleigh). Contudo, quando o comprimento de onda da luz é inferior ao tamanho da partícula ocorre o espalhamento conhecido como dispersão de Mie. É o caso dos aerossóis, que são partículas sólidas ou líquidas suspensas em um meio gasoso, a intensidade relativa da luz espalhada não é simétrica e depende fortemente da razão do tamanho da partícula e o comprimento de onda da radiação incidente (ECHER e SOUZA, 2001). Uma aproximação utilizada para estimar os efeitos desta dispersão é a equação da transmitância de aerossol de Angstrom:

$$T_{a,\lambda} = \exp(-\beta\lambda^{-\alpha}m) \quad (4)$$

onde,

$T_{a,\lambda}$ é a transmitância atmosférica devido aos aerossóis;

λ é o comprimento de onda da radiação;

β é o coeficiente de turbidez de Angstrom varia de 0 (para uma atmosfera limpa) a 0,4 (para uma atmosfera muito nublada);

α é o coeficiente de ajuste relacionado com o tamanho dos aerossóis (em média 1,3);

m é a massa de relativa do ar.

As principais fontes naturais de aerossóis são as erupções vulcânicas, queimadas, poeira do solo, grãos de pólen e reações entre emissões gasosas.

2.6 Fatores que modificam o nível de radiação ultravioleta na superfície terrestre.

Na superfície terrestre a radiação ultravioleta é modificada por fatores temporais, geográficos e meteorológicos. Entre esses fatores destacam-se a camada de ozônio na atmosfera, o ângulo de elevação, a latitude, nuvens e reflexão especular.

2.6.1 Camada de ozônio na atmosfera

A camada de ozônio está localizada na estratosfera, em uma faixa que se situa a uma altitude compreendida entre 10 a 35 km. Ela exerce uma forte atenuação sobre o nível de radiação ultravioleta. Considerando uma altitude solar (ângulo de elevação) superior a 20°, e selecionando os comprimentos de onda de 400 nm, 320 nm e 290 nm da radiação solar que atinge a superfície terrestre, observa-se que as ondas eletromagnéticas de 320 nm sofrerão uma atenuação três vezes mais intensa, quando comparadas com as atenuações sofridas pelas ondas eletromagnéticas de 400 nm. As ondas eletromagnéticas de 290 nm sofrerão uma atenuação nove vezes mais intensa para a mesma comparação (DIFFEY, 1991).

2.6.2 Altitude solar ou ângulo de elevação

O nível de radiação global (que atinge um determinado ponto geográfico da superfície terrestre) depende da posição momentânea do Sol. O ângulo formado pelo Sol em relação a um ponto qualquer em um plano horizontal na superfície terrestre é definido como altitude solar ou ângulo de elevação, conforme Figura 6, a seguir.

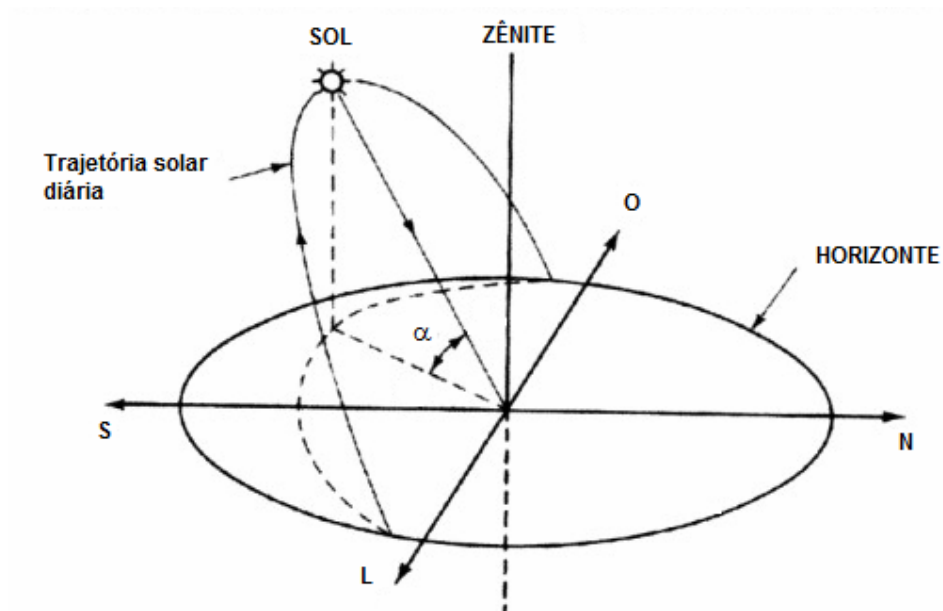


Figura 6 - Ângulo de elevação ou altitude solar (α)

Ele atinge o ponto mais elevado no céu ao meio dia solar e neste ponto tem-se a intensidade máxima diária da radiação solar. Este fato se deve à redução da massa de ar relativa, conforme pode ser visto na Figura 7.

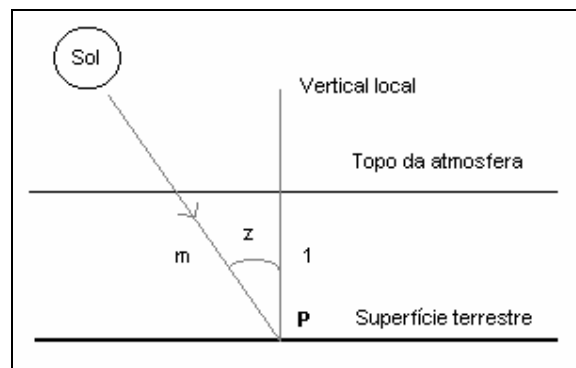


Figura 7 - Massa de ar relativa em relação a um ponto P.

A massa de ar relativa pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$m = \frac{1}{\cos z} \quad (5)$$

onde,

z é o ângulo zenital que é definido pela vertical local e o raio do Sol, sendo o complemento da altitude solar (α)

Considerando um dia de verão, setenta e cinco por cento da radiação ultravioleta total diária é recebida entre 9:00 e 15:00horas (DIFFEY, 1991).

2.6.3 Latitude

O fluxo anual da radiação ultravioleta reduz-se com o aumento da distância em relação à linha do equador. Este fato se deve a uma menor elevação média do Sol em relação ao plano horizontal. Quanto menor for a altitude solar, menor será o nível de radiação global, pois, maior será a massa de ar relativa. Esse fato pode ser observado na Figura 8, que mostra o comportamento anual da radiação solar global estimada para duas localidades com latitudes distintas na faixa intertropical do hemisfério Sul, ao nível do mar e com ausência de nuvens (SILVA, 2006).

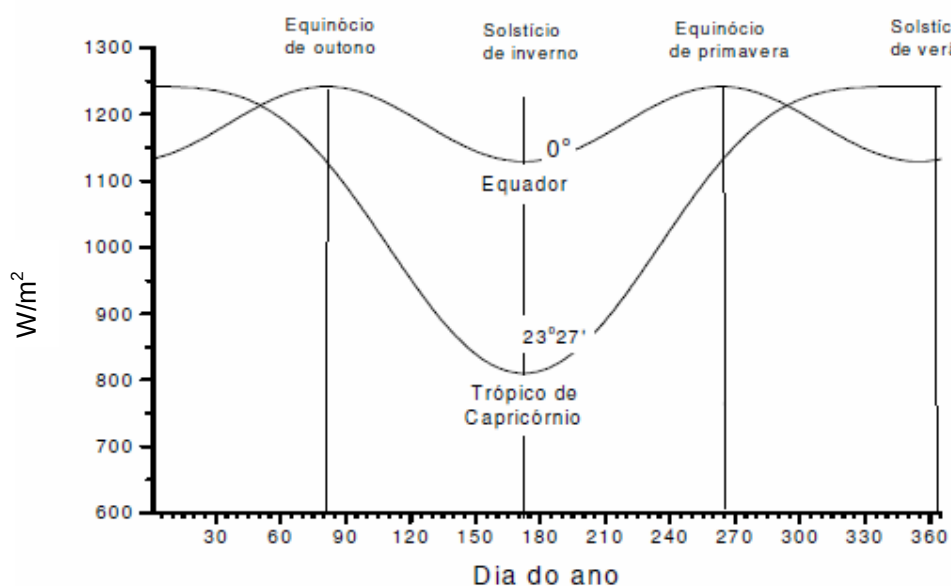


Figura 8 – Comparação da variação da intensidade da radiação solar global para duas localidades com latitudes distintas.

2.6.4 Nuvens

As nuvens reduzem a radiação solar global que atinge a superfície terrestre, porém para o espectro ultravioleta esta redução é bem menor quando comparada com a redução no espectro infravermelho. Devido a este fato, o risco de exposição aumenta, uma vez que a sensação de advertência do calor é reduzida. Considerando-se um dia com nuvens pesadas, a intensidade da componente solar ultravioleta é, em média igual a 10% do seu valor, quando comparada a um dia de céu claro. No entanto, em situações específicas, cujo céu não está totalmente encoberto e quando as nuvens não ocultam o disco solar, a radiação global pode atingir níveis mais elevados, quando comparado com um dia de céu claro, chegando em média a 25% (PIACENTINI et. al., 2011). Estudos mostram, para essas situações, que em média, os níveis da radiação UVB sofrem uma elevação maior quando comparados com os níveis da UVA (SABBURG e PARISI, 2006).

2.6.5 Altitude

Em geral para cada 1000 m de altitude a radiação ultravioleta sofre um acréscimo de 6% em sua intensidade. Isto ocorre devido à redução da distância percorrida pela radiação solar através da atmosfera.

2.6.6 Reflexão na superfície terrestre

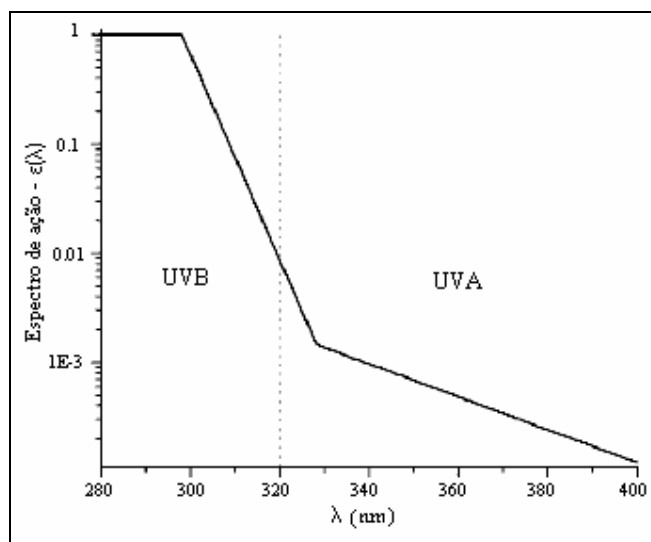
Parte substancial da energia recebida sobre a superfície terrestre é reenviada para o espaço sob a forma de energia refletida. A reflexão ocorre entre dois meios diferentes. A fração da radiação incidente refletida por uma superfície é conhecida como albedo. Esta reflexão depende das características físicas da superfície. Uma areia limpa pode refletir cerca de 30% da radiação que incide na superfície terrestre. No caso do mar, sua reflexão é normalmente inferior a 7% e, na neve, pode atingir 80%. A Tabela 1 mostra os valores percentuais do albedo da radiação UVB em determinadas superfícies (CORRÊA et. al., 2008)

Tabela 1 – Valores percentuais do albedo UVB.

Superfície	Albedo %
Água	4,8
Asfalto	5,5
Neve	79,2
Gramma verde	1,3
Terra	2,2

2.7 Efeitos biológicos da radiação ultravioleta

Os efeitos da radiação ultravioleta em sistemas biológicos mostram uma forte dependência em relação ao comprimento de onda. Para o estudo de efeitos biológicos utilizam-se fatores de ponderação, aos 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 que pode ser referido para efeitos ao nível molecular, como os danos no DNA ou ao nível de organismo inteiro, como no caso de plantas. O espectro de ação é determinado através de experimentos que analisam o efeito biológico de diferentes comprimentos de onda de radiação em tecidos (KIRCCHOFF et al, 2000). A Figura 9 representa o espectro de ação eritêmica que é o efeito biológico na pele humana.

**Figura 9** - Espectro de ação eritêmica (Diffey, 1991).

A irradiância solar espectral na superfície terrestre é medida em termos de potência por unidade de área e por comprimento de onda, em unidades, $W/(m^2nm)$, ou em banda integrada em W/m^2 . A irradiância espectral I_λ ponderada pelo espectro de ação eritêmica ϵ_λ , resulta na irradiância eritêmica espectral S_λ , em $W/(m^2 nm)$.

$$S_\lambda = I_\lambda \epsilon_\lambda \quad (6)$$

Integrando-se a irradiância eritêmica espectral S_λ , para intervalos 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.

$$S = \int_{280}^{400} I_\lambda \epsilon_\lambda d\lambda \quad (7)$$

A partir da irradiância eritêmica criou-se o IUV (índice ultravioleta), índice relacionado aos níveis de irradiação UV que induzem à formação de eritemas na pele humana. Cada unidade do IUV corresponde a $25mW/m^2$. O IUV não depende das características subjetivas dos indivíduos e varia de 1 a 11, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação do IUV e recomendações, conforme a OMS.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	>11
BAIXO		MODERADO			ALTO		MUITO ALTO			EXTREMO	
NENHUMA PRECAUÇÃO NECESSÁRIA		NECESSÁRIA PROTEÇÃO (PROTETOR SOLAR, CHAPÉU, CAMISA, PERMANECER NA SOMBRA)									

Experimentalmente, a obtenção da irradiância eritêmica é possível a partir de equipamentos que forneçam a medida da radiação UV para cada comprimento de onda, ou a partir de equipamentos de banda larga cuja resposta já é ponderada. Como primeiro exemplo tem-se o espectrofotômetro de Brewer, que efetua medidas de irradiância ultravioleta para diferentes comprimentos de onda, podendo ser ponderadas com espectro de ação eritêmica.

Outro instrumento seria o biômetro, que é um medidor da intensidade da radiação UV biologicamente ativa para a pele humana (irradiância eritêmica). Isto é possível devido a um elemento composto de fósforo com um diodo de arseneto de gálio (AsGa). A radiação solar que atinge o domo do radiômetro é parcialmente filtrada, de modo que a luz que excita o componente de fósforo corresponda à irradiação UV na faixa de 280-320 nm.

2.8 Medidas realizadas no Brasil

Com o objetivo de analisar as séries temporais de máxima dose diária de radiação UVB, estudar a variação sazonal e calcular o Índice UV, Kirchhoff et al. (2000) realizaram medidas, em 1999, através de uma rede de biômetros operada pelo Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE localizadas nas cidades de Ribeirão Preto (SP), Porto Alegre (RS), Natal (RN), Campo Grande (MS), Cachoeirinha Paulista (SP) e Blumenau (SC). Duas outras estações fora do Brasil foram utilizadas: a de La Paz, na Bolívia e a de Punta Arenas, no Chile. Com base no resultado deste trabalho, constatou-se a forte dependência da variação imposta à radiação UV eritêmica pela latitude, conforme pode ser visto na Figura 10. Os maiores valores são encontrados nas regiões de La Paz devido à sua elevada altitude (3660 m), que supera o efeito latitudinal; Natal, devido à sua baixa latitude, e em Campo Grande, embora possua uma latitude superior à da cidade de Natal, localiza-se a uma altitude de (700 m).

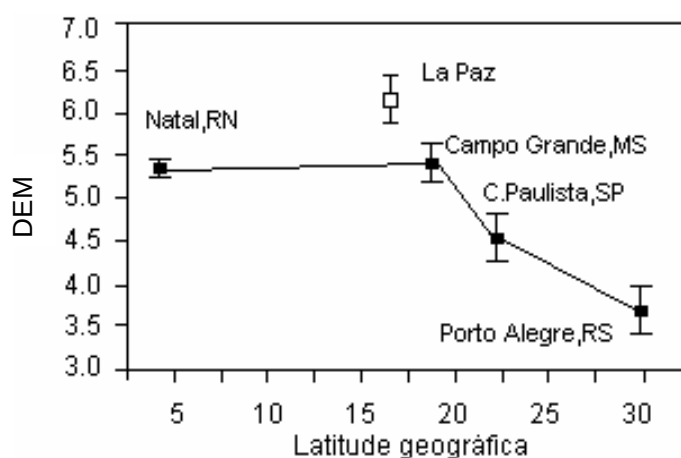


Figura 10 – Média solistial de verão da irradiação UV eritêmica em função da latitude geográfica.

Carbone et. al. (2005) realizaram um estudo com dados coletados por um biômetro 501 A e um radiômetro MS 210W, no período de junho e novembro de 2003, localizados no Observatório Espacial do Sul, na cidade de São Martinho da Serra (RS). Este estudo permitiu correlacionar as medidas de dose eritematosa mínima - DEM (biômetro) com a radiação em toda faixa UVB (radiômetro) e encontrar um modelo empírico local para a determinação do índice UV, (Figura 11).

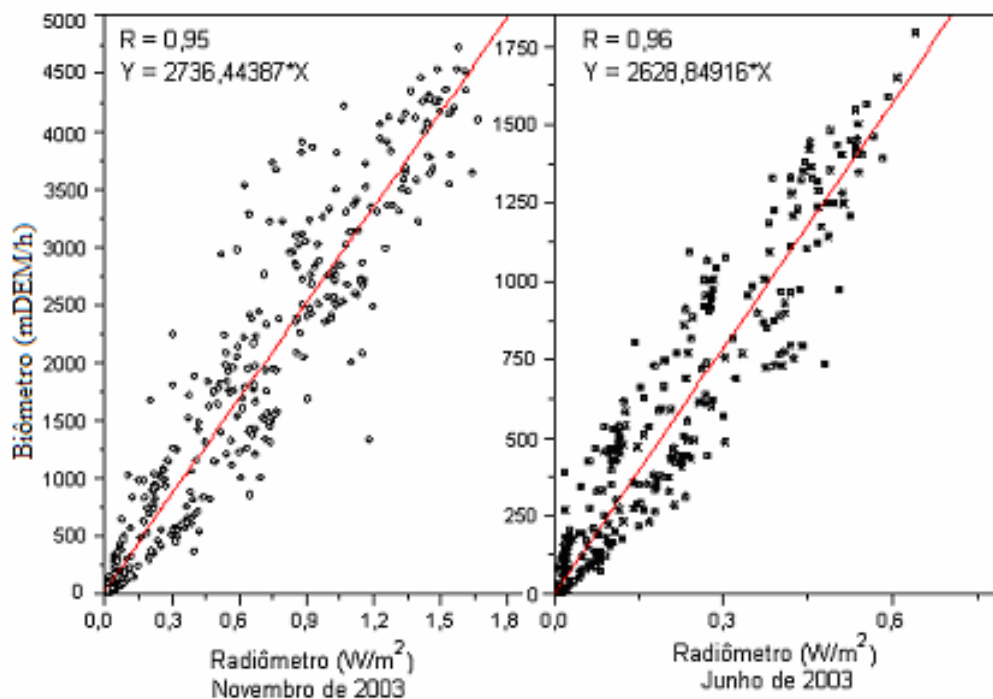


Figura 11 - Correlação entre a DEM e a radiação em toda faixa UVB.

Corrêa et. al. (2006) realizaram medidas da irradiância eritêmica a partir de biômetros do tipo 501 A nas cidades de Ilhéus e Itabuna, no Sul da Bahia, nos meses de inverno e verão de 2006. Estas medições possibilitaram uma avaliação das características dos aerossóis na região e determinação dos índices ultravioleta (IUV) para as duas localidades, conforme Figura 12.

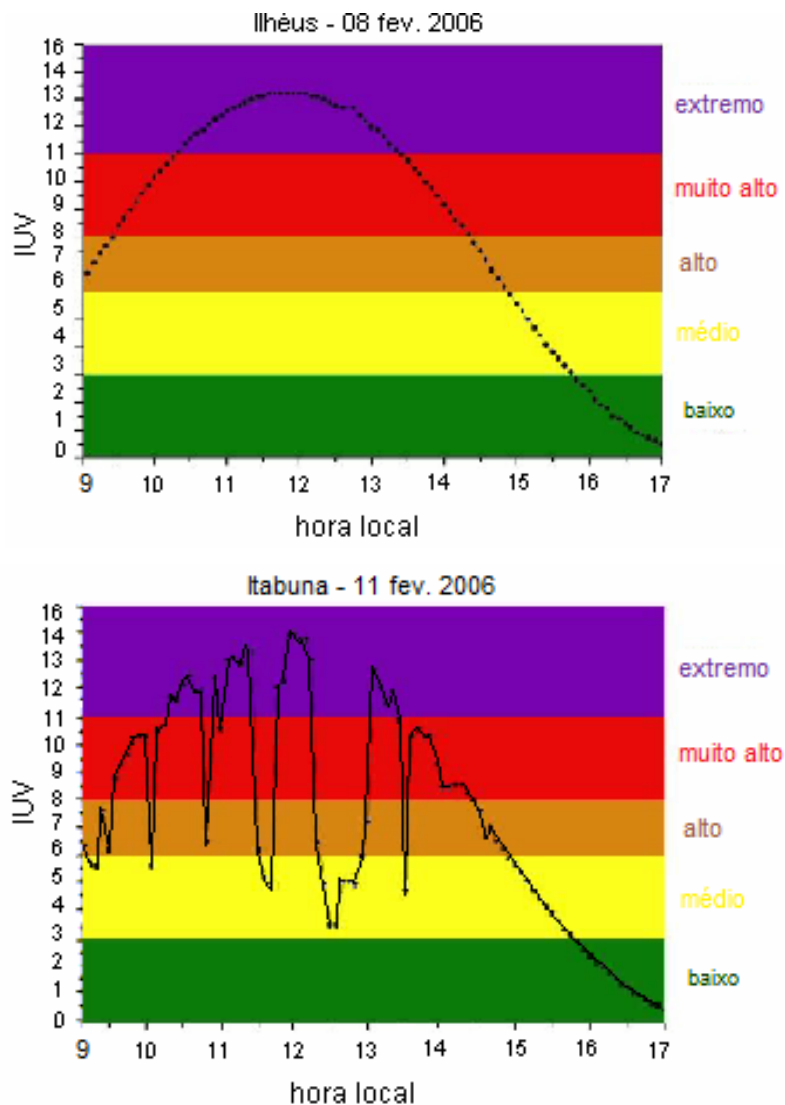


Figura 12 - Índice ultravioleta para as cidades de Ilhéus e Itabuna (CORRÊA, 2006).

Escobedo et al. (2007) estudaram e modelaram equações polinomiais de estimativa das frações horárias e diárias ultravioleta a partir de medições realizadas nos anos de 2001 a 2005, em Botucatu (SP). Para medição da irradiância global solar foi utilizado um piranômetro Eppley PSP e para irradiância ultravioleta (toda a faixa UV), um radiômetro CUV-3 da Kipp-Zonen. É válido salientar que as medidas experimentais, são poucas e pontuais e, por isso, apresentam grande fragmentação espacial e temporal.

2.9 Estimativa da radiação ultravioleta

Informações sobre radiação solar global podem ser utilizadas para estimativas da radiação ultravioleta. A relação entre a radiação ultravioleta e a radiação global, 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 ela, embora existam dados sobre radiação solar global. Nesses casos, a radiação ultravioleta poderá ser facilmente calculada pela seguinte expressão:

$$I_{UV} = f_{UV} \cdot I_G \quad (8)$$

Onde I_{UV} é a irradiância ou radiação horária ultravioleta e I_G é a irradiância solar global. Contudo, este método possui limitações que se restringem ao local de origem das medidas ou a regiões com características climáticas semelhantes. Dessa forma, a utilização de um modelo estatístico obtido por correlações entre as irradiações (solar e UV) não pode ser estendida a outros locais com diferenças climáticas bastante significativas (ESCOBEDO et. al., 2007). Adicionalmente, cabe ressaltar que diferenças orográficas, fitogeográficas e o grau de poluição, sejam por queimadas ou pela queima de combustíveis fósseis, também afetam a radiação solar UV de forma significativa. A retirada da componente determinística das radiações mediante o uso do índice de transmitância atmosférico da radiação global k_T torna os modelos estatísticos menos dependentes do local.

$$k_T = \frac{I_G}{I_0} \quad (9)$$

onde,

I_G é a irradiância global na superfície terrestre

I_0 é a irradiância solar no topo da atmosfera (extraterrestre)

Existem numerosos modelos empíricos para a estimativa da radiação ultravioleta (FOYO-MORENO et. al., 1998; ROBBA, 2004; BARBERO et. al., 2006; ESCOBEDO et. al., 2007).

Foyo-Moreno et. al. (1998) realizaram medições de irradiância ultravioleta e global, a partir de duas estações localizadas em regiões com condições climáticas distintas, na Espanha. A primeira estação foi instalada na cidade de Granada e a segunda em Almería. Com base nos dados horários obtidos no período de 1994 a 1995 para Granada e 1993 a 1995 para Almería, foi proposto um modelo empírico para obtenção da irradiância ultravioleta global a partir de duas variáveis: irradiância ultravioleta para céu claro, que pode ser calculada por modelos paramétricos computacionais (SMARTS2 ou SPECTRAL2), e o índice de transmitância K_t .

$$I_{UV} = a + b(k_T UV_0) \quad (10)$$

onde,

a e b representam coeficientes locais.

UV_0 é a irradiância ultravioleta para céu claro.

k_T é o índice de transmitância atmosférico da radiação global horária.

Barbero et. al. (2006) estudaram dois diferentes métodos para estimativa da radiação solar UV diária. O primeiro permite estimar a irradiação UV a partir do índice de transmitância da radiação UV diária (K_{TUV}) e da massa de ar (m). O segundo, foi baseado em redes neurais. Ambos os modelos foram desenvolvidos utilizando medidas feitas em Almería (Espanha), clima semi-árido costeiro e verificados com dados experimentais de Table Mountain (Golden, CO, USA), clima montanhoso e seco. A expressão obtida mediante regressões múltiplas com uso desses dados locais resultou no seguinte modelo:

$$K_{TUV} = A.K_T^B.m^{-C} \quad (11)$$

onde,

A, B e C são coeficientes locais

m é a massa de ar relativa

K_{tUV} é o índice de transmitância atmosférico UV diário

K_T é a relação entre a radiação solar global média diária medida na superfície terrestre pela radiação solar global média diária extraterrestre ($K_T = H_G / H_0$).

K_{UV} é resultante da relação entre a radiação ultravioleta na superfície terrestre e a radiação ultravioleta extraterrestre.

$$K_{TUV} = \frac{H_{UV}}{H_{UV0}} \quad (12)$$

H_{UV} é a radiação ultravioleta média diária na superfície terrestre

H_{UV0} é a radiação ultravioleta extraterrestre média diária

A partir do índice de transmitância médio diário (K_T), da massa de ar (m) ao meio dia solar e da radiação ultravioleta extraterrestre de uma região, pode-se estimar a radiação ultravioleta média diária (H_{UV}). Com relação ao segundo método de estimativa da radiação UV, fez-se uso de redes neurais artificiais (ANN) do tipo PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas). A rede utilizava o processo de treinamento ARD (Determinação Automática de Relevância) que considera uso de hiperparâmetros (α). Os pesos correspondentes a cada variável de entrada têm um hiperparâmetro distinto, de forma que quando associados a valores grandes de (α) têm uma tendência maior de decair a zero, indicando a pouca relevância desta variável. Foram utilizados como dados de entrada, a irradiação global diária (H_G), índice de transmitância global diário (meio dia solar) (K_T), irradiação infravermelho (L_{DW}), fração difusa diária (K), transmitância direta (K_B), radiação PAR (Q), umidade relativa do ar (Φ), temperatura (T), água precipitável (W), massa de ar (m_r), fração de brilho do Sol (S), Figura 13.

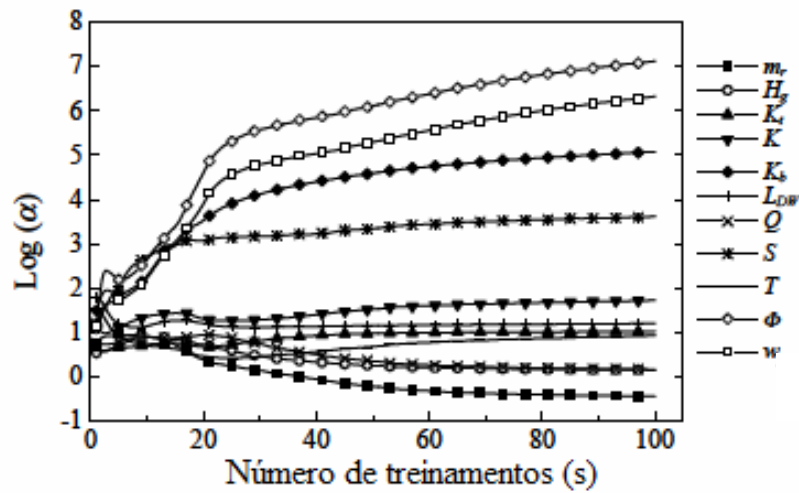


Figura 13 – Resultado ARD (determinação das variáveis de maior relevância).

Conforme os treinamentos da rede foi possível observar que, com exceções da radiação global diária, massa de ar óptica relativa e índice de claridade diário, os outros parâmetros de entradas foram considerados supérfluos ou redundantes. Os resultados obtidos através dos dois métodos foram posteriormente comparados e apresentaram um bom desempenho estatístico.

Escobedo et al. (2007) desenvolveram um modelo polinomial para estimativa da radiação ultravioleta horária e média diária com medidas feitas em Botucatu, SP, Brasil. O modelo baseado na proposta de Liu-Jordan (1960), permite determinar a fração média solar ultravioleta horária $\langle f_{UV} \rangle$ a partir do índice de transmitância k_t .

$$\langle f_{UV} \rangle = A - B.(k_T) + C.(k_T)^2 - D.(k_T)^3 \quad (13)$$

onde,

A, B, C e D são coeficientes locais

A fração média solar ultravioleta é resultante da relação da irradiância ultravioleta média pela irradiância global média para um mesmo intervalo de índice de transmitância (k_T).

Canãda et. al., (2008) realizaram medidas da radiação eritêmica (UVER), UV(A+B) e global para a cidade de Valência, em um período entre 2003 e 2005. Essas medições possibilitaram estabelecer uma relação entre a UVER, UV(A + B) e global conforme a seguinte correlação:

$$Y = aX^b \quad (14)$$

A partir desse modelo foi possível obter as seguintes expressões para estimativa da irradiação UVER horária a partir da irradiação UV (A + B) e global e da irradiação UV(A + B) horária a partir da irradiação global para a cidade de Valência:

$$UVER = a[UV(A + B)]^b \quad (15)$$

$$UVER = c(I_G)^d \quad (16)$$

$$UV(A + B) = e(I_G)^f \quad (17)$$

onde,

a, b ,c, d, e, f são coeficientes locais.

UV(A+B) é a radiação ultravioleta.

I_G é a radiação global horária

2.10 Modelos paramétricos computacionais

A escassez de informações referentes à irradiância solar espectral, devido ao pequeno número de estações de medição, direcionou os pesquisadores para a criação de modelos paramétricos espectrais computacionais, para previsão ou análise da irradiação solar incidente na superfície terrestre. Existem modelos com códigos computacionais mais sofisticados e modelos paramétricos simples. Entre os mais sofisticados destaca-se o LOWTRAN (Low Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance), criado há mais de vinte anos, que possibilita o cálculo da transmitância atmosférica e irradiância nas faixas espectrais do ultravioleta, visível, infravermelho e microondas, para várias condições atmosféricas. A versão mais atual deste modelo, LOWTRAN7, foi superada por um código mais detalhado chamado MODTRAN (Moderate Resolution Atmospheric Radiance Transmittance Model), que teve como objetivo

gerar um algoritmo com melhor resolução espectral, modelar a absorção atmosférica molecular como função da temperatura e pressão, calcular parâmetros de modelos de banda de doze moléculas e proporcionar a integração do LOWTRAN7 em novos algoritmos. O MODTRAN requer entradas de dados detalhadas, como tipo da atmosfera, caracterização de aerossóis, perfis de moléculas pesadas, nuvens, tornando-o às vezes um instrumento não apropriado em certas aplicações. Como uma forma alternativa, foram desenvolvidos outros modelos paramétricos mais simples, baseados em dados de entrada mais facilmente obtíveis em estações meteorológicas convencionais e expressões algébricas. Entre esses destacam-se dois modelos paramétricos para a estimativa da irradiância espectral:

- SPECTRAL2 (Simple Solar Spectral Model).
- SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine)

2.10.1 SPECTRAL2

É um modelo experimental proposto por Bird e Riordan (1986), que utiliza como parâmetros de entrada a constante solar, o ângulo zenital, a pressão atmosférica superficial, o albedo, a quantidade de água precipitável, concentração de ozônio e a turbidez atmosférica (profundidade óptica de aerossóis). O SPECTRAL2 gera um banco de dados que contém os valores da irradiância direta e difusa no intervalo de 300 a 4000 nm. A partir destes dados, considerando o intervalo de comprimento de onda ultravioleta, é possível determinar-se a irradiância UV e o índice UV, fazendo uso do espectro de ação eritêmica padrão.

Para o cálculo da irradiância direta, o SPECTRAL2 leva em consideração o espalhamento Rayleigh, o espalhamento por aerossol, a absorção por ozônio, a absorção por vapor d'água, a transmitância por mistura uniforme de gases e a absorção por dióxido de nitrogênio. A equação é dada por:

$$I_{bn\lambda} = I_{0\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{0\lambda} T_{w\lambda} T_{u\lambda} \quad (18)$$

onde,

$I_{bn\lambda}$ é a irradiância normal direta espectral

$I_{0\lambda}$ é a irradiância extraterrestre espectral

$T_{R\lambda}$ é a transmitância espectral através do modelo de Rayleigh

$T_{a\lambda}$ é a transmitância atmosférica devido aos aerossóis

$T_{0\lambda}$ é a transmitância atmosférica devido ao ozônio

$T_{w\lambda}$ é a transmitância em vapor d'água

$T_{u\lambda}$ é a transmitância em mistura uniforme de gases

Para o cálculo da irradiância difusa, o software faz uso da seguinte equação:

$$I_{d\lambda} = I_{R\lambda} + I_{a\lambda} + I_{g\lambda} \quad (19)$$

sendo,

$I_{d\lambda}$ é a irradiância difusa

$I_{R\lambda}$ é o espalhamento por Rayleigh

$I_{a\lambda}$ é o espalhamento por aerossol

$I_{g\lambda}$ é a componente de múltiplas reflexões de irradiância céu-terra

2.10.2 SMARTS2

Este modelo espectral de parametrização, proposto por Gueymard (1995), calcula a radiação solar direta e difusa a partir dos mesmos dados de entrada do modelo SPECTRAL2, porém com a vantagem de também calcular o índice de radiação ultravioleta (IUV) automaticamente sem a necessidade de recorrer a cálculos extras.

O SMARTS2 utiliza um espectro solar extraterrestre, composto por dados experimentais do satélite SUSIM (Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor), compreendido entre os comprimentos de onda de 280 a 4020 nm (FOYO-MORENO, et al., 2000). Os valores da irradiância para os respectivos comprimentos de onda são encontrados nas tabelas do manual do usuário, com uma resolução de 1nm.

Para o cálculo da irradiância direta, o SMARTS2 só difere do SPECTRAL2 em relação ao fator de transmitância NO_2 ($T_{n\lambda}$).

$$I_{bn\lambda} = I_{0\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{0\lambda} T_{w\lambda} T_{u\lambda} T_{n\lambda} \quad (20)$$

Para o cálculo da irradiância difusa o SMARTS2 utiliza a mesma expressão do SPECTRAL2:

$$I_{d\lambda} = I_{R\lambda} + I_{a\lambda} + I_{g\lambda} \quad (21)$$

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Sistema de medição e coleta de dados

Com o objetivo de obter informações sobre o comportamento da irradiância solar UV e da radiação solar na região Nordeste, sensores de medição foram acoplados a um sistema de aquisição de dados instalados em Recife, Pesqueira e Araripina de características climáticas distintas no Nordeste do Brasil, cujas localizações estão indicadas na Figura 14.



Figura 14 - Mapa de Pernambuco e as respectivas estações de medição

A cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, possui um clima tropical úmido, com temperatura média anual de 25,5 °C, umidade relativa do ar de 79,8% e precipitação pluviométrica anual média de 2458 mm/ano (INMET, 1961 – 1990).

A cidade de Pesqueira fica a 214 km de Recife, possui um clima tropical semi-árido, pertencendo, assim, à zona do Agreste. A temperatura média anual é de 22,9 °C, umidade relativa de 69,6% e precipitação pluviométrica anual de 694 mm/ano.

A cidade de Araripina fica localizada no sertão do estado de Pernambuco, a 690 km da capital Recife, nas imediações da Chapada do Araripe. Possui um clima tropical semi-árido quente, apresentando uma temperatura média de 24 °C e precipitação pluviométrica anual de 700 mm/ano. As coordenadas geográficas das estações instaladas podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 - Coordenadas geográficas das estações de medidas.

Estação	Coordenadas geográficas			Precipitação pluviométrica anual (mm)
	Latitude	Longitude	Altitude (m)	
Recife-PE	-8°03'	-34°55'	7	2458
Pesqueira -PE	-8°24'	-36°46'	639	694
Araripina -PE	-7°34'	-40°29'	622	700

Para se obter os dados da irradiação global foi utilizado para a estação Recife, um piranômetro PSP (Precision Spectral Pyranometer) do fabricante Eppley, apresentado na Figura 15.

**Figura 15** - Piranômetro espectral de precisão Eppley (PSP)

Esse piranômetro é composto de duas cúpulas transparentes de quartzo. A cúpula externa serve de proteção mecânica e a interna envolve um prato circular metálico pintado com laca preta, que absorve quase todas as radiações. Um anel metálico altamente refletivo circunda o prato central. A radiação produz, então, temperaturas diferentes entre o prato circular e o anel. Para manter o isolamento térmico destes dois elementos, entre as cúpulas existe vácuo. Uma termopilha produz uma tensão proporcional à diferença de temperatura entre o prato e o anel em torno de $9 \mu\text{V}$ por cada W/m^2 . A função de resposta do piranômetro cobre a radiação solar que

atinge a superfície terrestre em um intervalo de comprimento de onda de 300 a 3000 nm e sua precisão está em torno de 3 %. Conforme a Organização Meteorológica Mundial (OMM) é um instrumento classificado como de primeira classe. A Figura 16 mostra as principais partes do piranômetro.

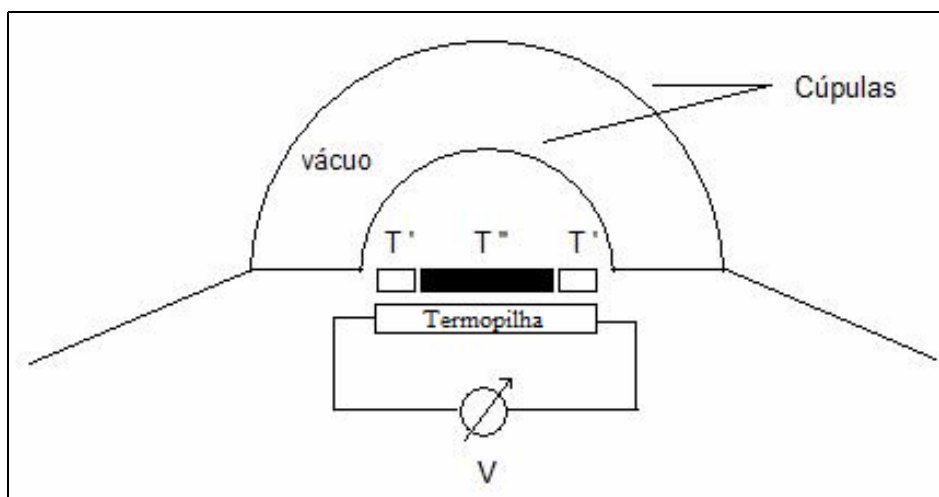


Figura 16 – Interior do piranômetro espectral de precisão Eppley (PSP) e suas principais partes.

Os dados de radiação global para as cidades de Pesqueira e Araripina foram obtidos mediante o uso de um piranômetro do tipo preto e branco (B&W), também do fabricante Eppley, como pode ser visualizado na Figura 17. Seu princípio de funcionamento é semelhante ao piranômetro PSP, porém seus detectores são pintados alternadamente em forma de estrela. Sua precisão gira em torno de 5 % e é considerado pela OMM como um instrumento de classe 2.



Figura 17 – Piranômetro Eppley preto e branco.

Para coletar dados referentes à radiação UV (A+B), foram instalados nas três estações, radiômetros do tipo TUVR (The Total Ultraviolet Radiometer) do fabricante Eppley. A Figura 18 mostra o aspecto físico de um piranômetro do TUVR, que mede a radiação ultravioleta para o intervalo de comprimento de onda compreendido entre 295 a 385 nm. Esse instrumento possui uma célula de selênio hermeticamente fechada e protegida por uma janela de quartzo. Externamente, um difusor de teflon reduz o fluxo radiante para níveis aceitáveis, além de melhorar o efeito cosseno.



Figura 18 - TUVR do fabricante Eppley
(EPPLEY, 2010)

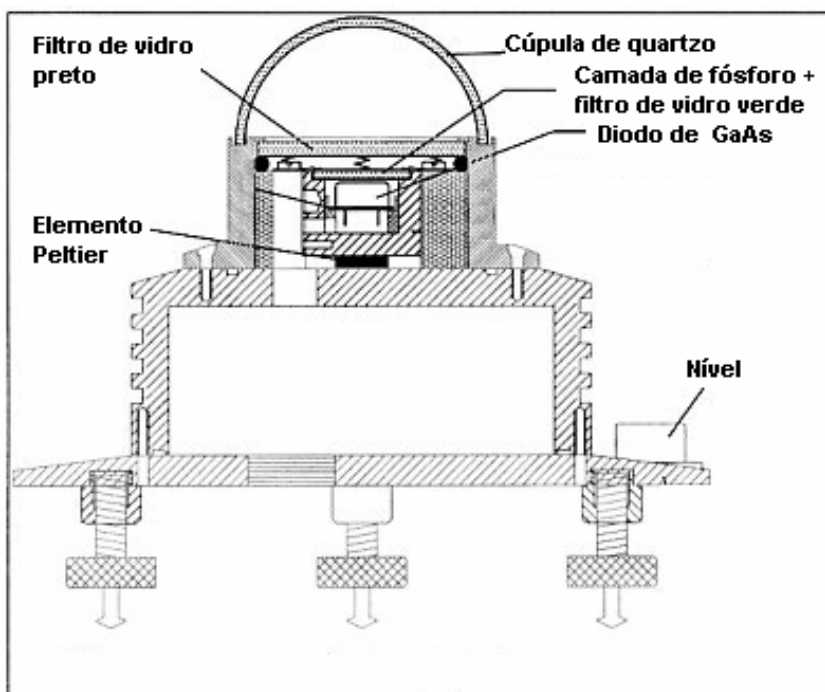
Uma segunda estação, em Recife, também foi destinada para medir a radiação eritêmica. As medidas da radiação solar eritêmica foram realizadas a partir do biômetro modelo 501 UV-B da Solar Light (Solar light, 2011), Figura 19, que opera na faixa de 280 a 320 nm, cuja resposta se aproxima da pele humana exposta à radiação solar. A Figura 20 mostra as partes internas do biômetro. O filtro de vidro (preto) elimina praticamente toda a luz visível e o restante da radiação contendo o espectro inteiro da radiação UV atinge a camada de fósforo. Este material absorve a radiação UV e a emite como uma luz visível com uma cor predominantemente verde. A luz visível emitida pelo fósforo é detectada por um diodo de arseneto de gálio (GaAs). A temperatura do diodo e da camada de fósforo é controlada por meio de um elemento Peltier. A corrente gerada pelo diodo é amplificada e convertida em frequência, como também a temperatura. Essas informações são transmitidas e armazenadas no módulo microcontrolado que acompanha o biômetro. A efetividade da radiação biológica é medida em DEM / HORA (Dose Eritematosa Mínima por Hora).

$$1 \text{ DEM} = 21 \text{ mJ} / \text{cm}^2$$

$$1 \text{ DEM} / \text{HORA} = 5,83 \times 10^{-6} (\text{W} / \text{cm}^2)$$



Figura 19 - Biômetro modelo 501 UVB



Solar Light, 2007

Figura 20 – Interior do biômetro modelo 501 UVB (SOLAR LIGHT, 2007)

Para a leitura e coleta dos dados medidos pelos sensores, foi escolhido o equipamento datalogger modelo CR10X para a cidade de Pesqueira e CR1000X para Recife e Araripina, ambos da Campbell Scientific. O CR10X disponibiliza um total de seis canais para leituras analógicas de sinais de tensão, limitados a valores de $\pm 2,5$ volts por canal e o CR1000X disponibiliza oito canais. Estes instrumentos foram programados para realizar leituras instantâneas a cada segundo totalizando 60 leituras por minuto. Posteriormente, calcula-se a média aritmética de cada conjunto composto de 60 leituras e os respectivos valores médios são armazenados em seu sistema de memória.

Desta forma, para cada dia de medição, tem-se um total de 1440 valores armazenados em tempo real, correspondentes às médias aritméticas de cada uma das variáveis, no intervalo de 1 minuto. Toda a monitoração é feita pelo computador através do software que acompanha o datalogger, com interface gráfica própria, padrão Windows, com até 222 instruções, destinadas à configuração de sensores, ao controle de processos, processamento das medidas e outros. Esses instrumentos possuem um sistema de memória capaz de armazenar 1.000.000 de registros, além de baterias recarregáveis, de tensão 12 volts, para o caso de falta temporária no fornecimento de energia elétrica.

3.2 Caracterização dos dados.

Os dados medidos em escala de minuto resultaram num valor médio em torno de uma dada hora solar, considerando os 30 minutos anteriores e posteriores à mesma. Ao valor médio deste conjunto será atribuída a irradiância UV ou irradiância global solar horária correspondente à citada hora solar. Estes dados fornecidos pelas estações de medição possibilitaram os cálculos médios diários, mensais, anuais e um estudo da frequência acumulada mensal e anual UV para as três respectivas regiões de características climáticas distintas já mencionadas. Os valores da frequência acumulada da irradiância UV indicam qual o percentual desta irradiância que excede um valor limite durante um mês ou durante o ano. A frequência acumulada permite uma primeira estimativa da probabilidade a que um trabalhador no campo se expõe a um dado nível máximo de irradiação solar UV. Com relação à irradiação eritemica medida pela estação Recife, a função distribuição acumulada é útil porque permite realizar estimativas da DEM (dose eritematosa mínima), que é a quantidade mínima de energia (21 mJ/cm^2) capaz de causar um eritema.

3.3 Modelos aplicados para estimativa da radiação ultravioleta

Conforme os dados experimentais coletados pelas três estações de medição (Recife, Pesqueira e Araripina), foi possível gerar três modelos estatísticos diferentes para a estimativa da irradiação solar UV horária e diária a partir da radiação global: a) correlação linear entre a radiação UV e a global (modelo 1), b) correlação polinomial da fração média UV em função do índice de transmitância da radiação solar global (K_T) (modelo 2) e c) regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta (K_{TUV}) e da massa de ar (m_r) em função de (K_T) (modelo 3). Além disso, foram modelados mediante duas redes neurais artificiais: a) estimativa do $\langle F_{UV} \rangle$, considerando as mesmas variáveis físicas do modelo 2 (modelo ANN1) e b) estimativa do (K_{TUV}) a partir das mesmas variáveis físicas do modelo 3 (modelo ANN2).

3.3.1 Correlação entre a radiação solar UV e global (modelo 1)

Embora a correlação entre a radiação solar UV e a global (F_{UV}) se restrinja ao local de origem das medidas ou a regiões com características climáticas muito semelhantes, esse modelo foi gerado e testado para as três localidades devido a sua simplicidade e boa capacidade de estimativa local. Foram gerados modelos horários e diários conforme expressões abaixo:

$$I_{UV} = A I_G \quad (22)$$

$$H_{UV} = A H_G + B \quad (23)$$

onde,

I_{UV} e I_G são respectivamente a radiação solar UV e global horária

H_{UV} e H_G são radiações solar UV e global diária

A e B são os coeficientes locais

3.3.2 Correlação polinomial da fração média UV em função do índice de transmitância da radiação solar global (modelo 2)

Uma forma de tornar os modelos estatísticos menos dependente do local é a retirada da componente determinística das radiações solar mediante o uso do índice de transmitância para radiação solar global (k_T) e o índice de transmitância UV (k_{TUV}). No caso da correlação polinomial 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.

O intervalo total do índice de transmitância entre 0 e 1 foi sub-dividido em 100 partes. Para cada sub-intervalo deste índice, foi calculada a irradiância média global e a irradiância média ultravioleta através da média aritmética dos valores horários. O modelo horário e diário pode ser visualizado nas expressões (24) e (25).

$$\langle f_{UV} \rangle = A - B.(k_T) + C.(k_T)^2 - D.(k_T)^3 \quad (24)$$

$$\langle F_{UV} \rangle = A - B.(K_T) + C.(K_T)^2 - D.(K_T)^3 \quad (25)$$

onde,

$\langle f_{UV} \rangle$ é a fração média ultravioleta horária

$\langle F_{UV} \rangle$ é a fração média ultravioleta diária

k_T é o índice de transmitância global horário ($k_T = I_G/I_0$)

K_T é o índice de transmitância global diário ($K_T = H_G/H_0$)

A, B, C e D são coeficientes locais

3.3.3 Regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta (K_{TUV}) em função da massa de ar (m_r) e do K_T (modelo 3)

Os índices de transmitância ultravioleta foram determinados a partir de regressões múltiplas, fazendo uso de dados locais (índice de transmitância da radiação global e a massa de ar), resultando nas expressões:

$$k_{TUV} = A.k_T^B.m^{-C} \quad (26)$$

$$K_{TUV} = A.K_T^B.m_{12}^{-C} \quad (27)$$

onde,

k_T é o índice de transmitância global horário

K_T é o índice de transmitância global diário

k_{TUV} é o índice de transmitância ultravioleta horário ($k_{TUV} = I_{UV}/I_{UV0}$)

K_{TUV} é o índice de transmitância ultravioleta diário ($K_{TUV} = H_{UV}/H_{UV0}$)

$$H_{0UV} = \frac{24}{\pi} I_{SC}(UV) \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \left[\cos \delta \cos \Phi \cos \omega_s + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \delta \sin \Phi \right] \quad (28)$$

onde,

$I_{SC}(uv) = 80,83 \text{ W m}^{-2}$ (Constante solar UV)

n é o dia juliano

ϕ é a latitude local

δ é a declinação

ω_s é o ângulo do nascer ou por do Sol

m é a massa de ar horária e z o ângulo zenital

m_{12} é a massa de ar ao meio dia solar

3.3.4 Modelos ANN

As redes neurais artificiais são ferramentas poderosas para a estimativa da radiação UV. Foi utilizada neste trabalho uma rede artificial do tipo PMC (Perceptron de Múltiplas Camadas). A camada de entrada possui um número de neurônios definidos pela quantidade de variáveis de entrada utilizadas, a camada oculta possui um número de neurônios definidos empiricamente em função do tamanho do grupo de treinamento e a camada de saída é composta de um único neurônio, que é responsável pela estimativa da irradiação UV. Uma rede PMC tem seus neurônios (unidades de processamento de informações) organizados em camadas sem conexões laterais e os sinais de entrada propagam de trás para frente pela rede que é treinada por um algoritmo de retro-propagação. Nas redes neurais do tipo PMC, Figura 21, a ativação dos neurônios nas camadas ocultas e de saída são alcançadas com o uso da função de ativação tipo sigmoid (ϕ).

$$\phi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad a > 0 \quad -\infty < v < +\infty \quad (29)$$

onde,

v é o campo local induzido do neurônio

a é o parâmetro de inclinação

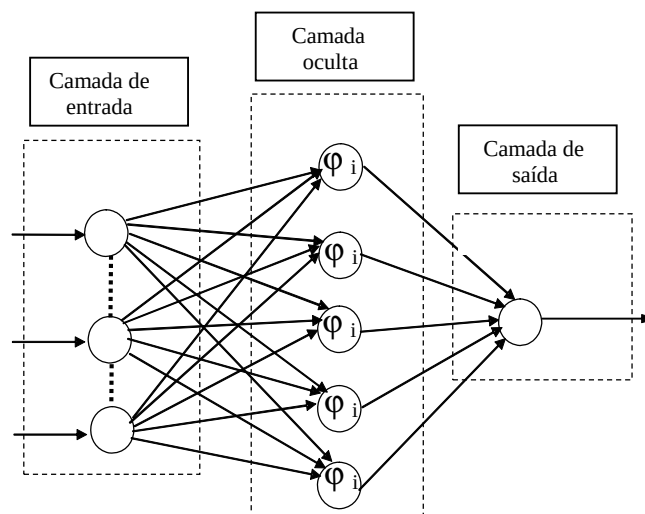


Figura 21 - Rede artificial neural Perceptron de Múltiplas Camadas (PMC).

O número de neurônios na camada oculta foi definido como dez vezes menor que o número de exemplos disponíveis para o treinamento. Para as três localidades foram utilizados dados distribuídos aleatoriamente, referentes aos respectivos períodos de medição, sendo 50% deste período para treinamento da rede e geração dos outros modelos, 25% para validação da rede e os 25% restantes para testar e comparar o desempenho estatístico da rede com os outros modelos. É válido salientar que os 25% dos dados utilizados no teste da rede e dos modelos são totalmente distintos, não exercendo nenhuma influência nos modelos e redes geradas. Fazendo uso das mesmas variáveis utilizadas nos modelos 2 (polinomial) e 3 (regressão) foram geradas, respectivamente, as redes ANN1 e ANN2 para ambas as localidades. As redes ANN1 e ANN2 são igualmente do tipo PMC, porém utilizam dados de entrada diferentes.

3.4 Determinação da radiação UV (A+B) e IUV máximos mensais para outras seis localidades do estado de Pernambuco.

As medições possibilitaram a criação de modelos para calcular a radiação UV (A+B) nas regiões circunvizinhas, conhecendo-se a radiação global. Contudo, devido a grande diversidade climática do estado, utilizou-se o modelo paramétrico computacional SPECTRAL2 para calcular os níveis máximos de radiação UV (A+B), além do índice ultravioleta (IUV) para outras seis localidades, inclusive a capital Recife. Para o cálculo da radiação UV (A+B) e IUV máximos, o modelo necessitou de dados de entrada, como profundidade ótica de aerossóis (AOD), concentração de ozônio, entre outros. Para o cálculo da profundidade ótica de aerossóis foi utilizada uma equação empírica, a partir do índice de turbidez de linke para a massa de ar 2 (TL_m), profundidade ótica do vapor d'água e da atmosfera limpa e seca. A Tabela 4 mostra as coordenadas geográficas e os períodos de medidas das estações. As medidas realizadas nestes períodos referem-se à radiação global.

Tabela 4 - Coordenadas geográficas e os períodos de medidas da radiação global.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período de medição
Araripina	-7,46	-40,42	624	2000-2007
Arcoverde	-8,43	-37,05	716	2000-2007
Caruaru	-8,24	-35,91	488	1999-2007
Floresta	-8,60	-38,57	316	2002-2007
Ouricuri	-7,87	-40,09	451	2002-2007
Petrolina	-9,15	-40,37	366	1998-2002/2005-2007
Recife	-8,06	-34,92	10	1999-2005
S Talhada	-7,92	-38,29	430	2001-2004

O método usado para o cálculo do TL_m foi o seguinte: a partir de uma grande série temporal de radiação solar diária (mais de 5 anos) foi escolhida a radiação solar diária mais elevada de cada mês e de cada ano. Para cada localidade e cada mês, um modelo de céu claro foi processado para um TL_m , variando de 2 a 8 gerando 12 valores médios mensais de TL_m para o estado de Pernambuco (TIBA et. al., 2009).

A Tabela 5 mostra os índices de turbidez de linke mensais calculados, conforme descrito, para as respectivas localidades.

Tabela 5- Índice de turbidez de linke TL_m para as respectivas localidades

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ann
Araripina	4,9	5,6	4,5	4,2	3,5	3,2	2,6	2,5	3,1	3,4	4,1	4,1	3,8
Arcoverde	3,6	4,5	3,8	3,4	3,3	3,7	2,9	2,7	3,0	3,0	3,1	3,9	3,4
Caruaru	4,2	5,2	4,1	4,1	4,0	4,6	4,1	4,3	4,5	4,4	3,9	4,7	4,3
Floresta	4,5	4,6	3,7	4,1	3,8	4,3	3,7	3,4	3,8	4,0	4,2	4,4	4,0
Ouricuri	4,8	5,0	4,6	4,6	4,5	4,4	3,5	3,4	3,6	4,0	4,3	4,5	4,3
Petrolina	4,4	4,5	4,5	4,3	4,0	3,7	3,5	3,2	3,9	3,9	3,9	4,3	4,0
Recife	4,6	4,0	4,0	4,6	4,4	4,6	4,2	3,9	4,2	4,1	3,9	4,8	4,3
S Talhada	4,7	4,4	4,1	4,2	3,8	4,0	3,5	3,6	3,7	3,9	4,0	4,1	4,0

Para o cálculo da profundidade ótica foi utilizada a expressão (Molineaux, 1998):

$$T_{L2}(\Delta_a, W) = (9.4 + 0.9 * m) * (\Delta_{cda} + \Delta_w + \Delta_a) \quad (30)$$

onde,

Δ_a é a profundidade ótica de aerossóis.

Δ_{cda} é a profundidade ótica pancromática de uma atmosfera limpa e seca, que é dada por:

$$\Delta_{cda} = -0.101 + 0.235 * m^{-0.16} \quad (31)$$

m é a massa de ar ($m = 2$)

Δ_w é a profundidade ótica do vapor d'água pancromático.

$$\Delta_w = 0.12 * m^{-0.55} * W^{0.34} \quad (32)$$

W é a água precipitável contida na atmosfera (cm).

As profundidades óticas calculadas para as 8 localidades, a partir dos índices de turbidez de linke para massa de ar 2 (Tabela 5), juntamente com outros dados como latitude, longitude, concentração de ozônio, pressão atmosférica, entre outros, serviram de dados de entrada para o modelo paramétrico computacional SPECTRAL2, Figura 22. Para o cálculo da radiação UV (A+B) e IUV máximos mensais, foram considerados os dias julianos médios de cada mês. Para esses dias foram determinados os índices de ozônio, por meio dos dados do satélite da NASA - Total Ozone Mapping Spectrometer (TOM'S), considerando a média dos três últimos anos.

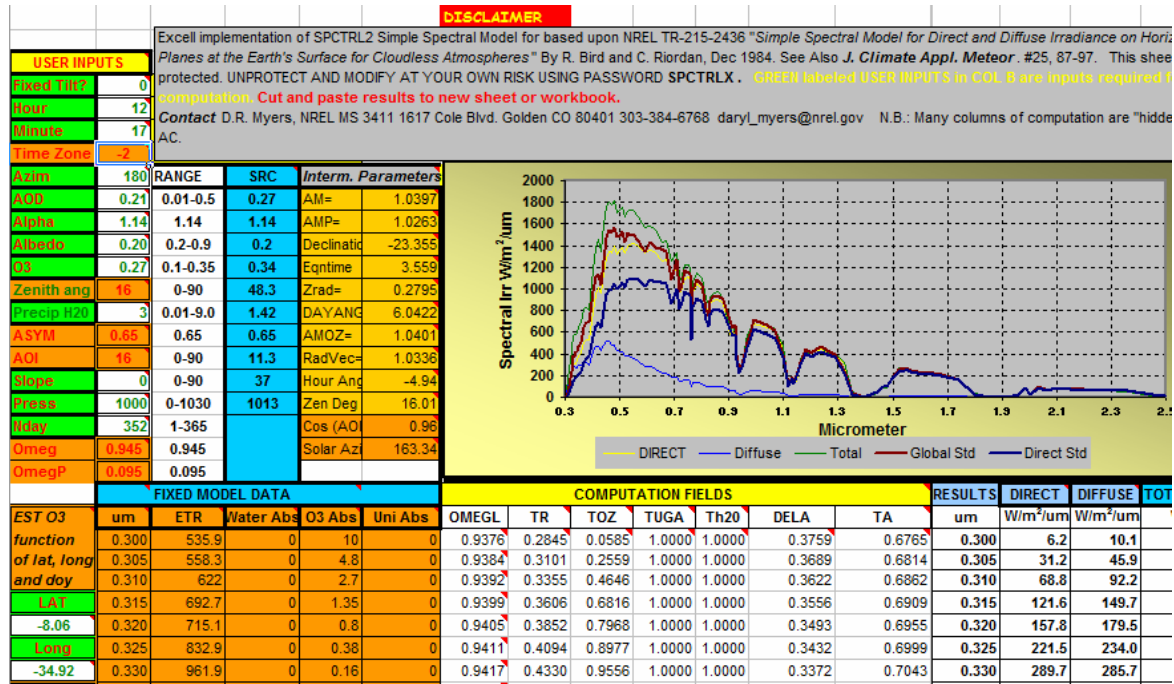


Figura 22- Área de trabalho do SPECTRAL2

A radiação UV (A+B) estimada pelo SPECTRAL2 para o dia médio juliano juntamente com os outros dados de entrada, resultou na radiação UV (A+B) diária máxima que é considerado o valor máximo mensal. As radiações UV(A+B) máximas foram calculados para ambas as localidades e para cada mês. O IUV máximo (meio-dia) foi determinado conforme as seguintes expressões:

$$I_{UV} = K_{\lambda} \int_{280nm}^{400nm} I_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda \quad (33)$$

onde,

K_{λ} é uma constante igual $40 \text{ m}^2/\text{W}$

S_{λ} é espectro de ação para eritema, dado:

$$S_{\lambda}(\lambda) = 1 \rightarrow 250nm < \lambda < 298nm$$

$$S_{\lambda}(\lambda) = 10^{0.094(298-\lambda)} \rightarrow 298nm < \lambda < 328nm$$

$$S_{\lambda}(\lambda) = 10^{0.015(139-\lambda)} \rightarrow 328nm < \lambda < 400nm$$

3.5 Comparações estatísticas

Os desempenhos estatísticos entre os modelos e redes foram obtidos e comparados a partir dos indicadores estatísticos MBE% (mean bias error) e RMSE% (root mean square error):

$$MBE = 100 \frac{\sum_n (H_{UV, \text{calculado}} - H_{UV, \text{medido}})}{\sum_n H_{UV, \text{medido}}} \% \quad (34)$$

$$RMSE = 100 \frac{\sqrt{\frac{\sum_n (H_{UV, \text{calculado}} - H_{UV, \text{medido}})^2}{n}}}{\sum_n \frac{H_{UV, \text{medido}}}{n}} \% \quad (35)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Descrição das medidas horárias, diárias e mensais da radiação UV (A+B)

A disponibilidade de dados medidos de radiação UV, em conjunto com uma análise das suas principais características estatísticas, são imprescindíveis para entender e alertar a população dos efeitos causados por essa irradiação no Estado de Pernambuco. Os resultados das medidas realizadas neste trabalho são produtos da aquisição de dados da radiação UV e global no plano horizontal minuto a minuto, feita sistematicamente nas estações descritas na Tabela 6.

Tabela 6 - Período de medição das estações Recife, Pesqueira e Araripina.

Estação	Período de medidas
Recife-PE - 1	dezembro 2009 / dezembro 2010
Recife-PE - 2	outubro 2010 / março 2011
Pesqueira -PE	setembro 2008 / abril 2011
Araripina -PE	julho 2008 / março 2011

Os dados medidos em escala de minuto e agrupados em torno de uma dada hora solar, considerando a meia hora anterior e posterior à mesma, foram integrandos ao longo das horas do dia resultando na radiação diária (MJ/m^2). Devido a problemas operacionais foram desconsiderados os dias julianos 318 de 2008; 90, 254 e 257 de 2009; 43 a 55, 124 a 135 e 254 de 2010 para a cidade de Pesqueira. Para a cidade de Araripina foram excluídos os dias 237, 318, 319 de 2008; 60 a 92 de 2009 e 48, 294 a 365 de 2010; 27 a 31 de 2011. A estação Recife-PE-1 foi responsável pela medição e coleta da radiação global e eritêmica, e a estação Recife-PE-2 pela medição da radiação global e UV (A+B). Foram desconsiderados da estação Recife-PE-1 os dias 356 a 365. As Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28 mostram o comportamento da radiação solar ultravioleta e global horárias para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina, respectivamente.

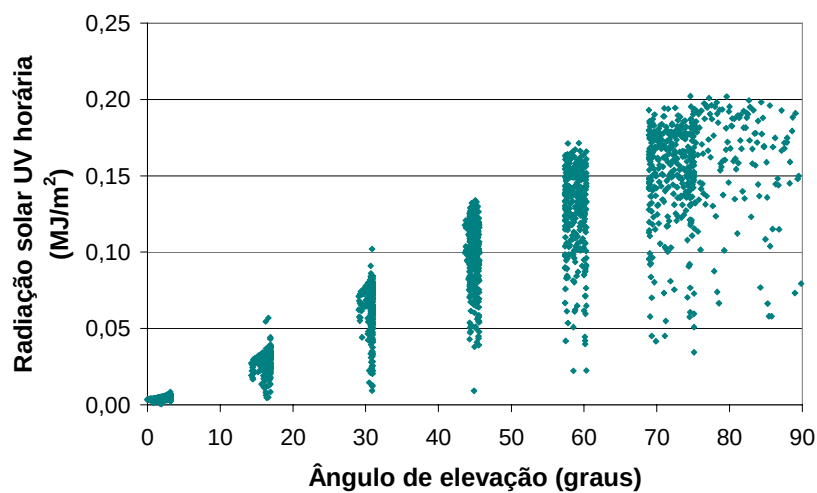


Figura 23 - Radiação solar UV em função do ângulo de elevação para a cidade de Recife

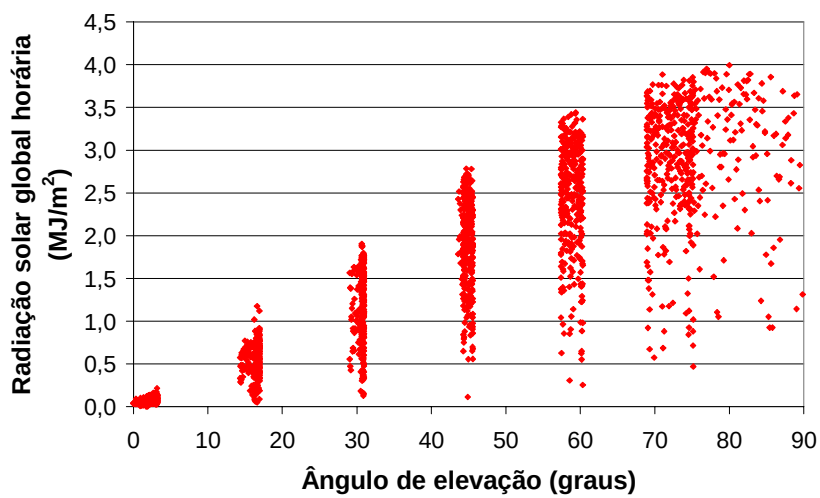


Figura 24 - Radiação solar global em função do ângulo de elevação para a cidade de Recife

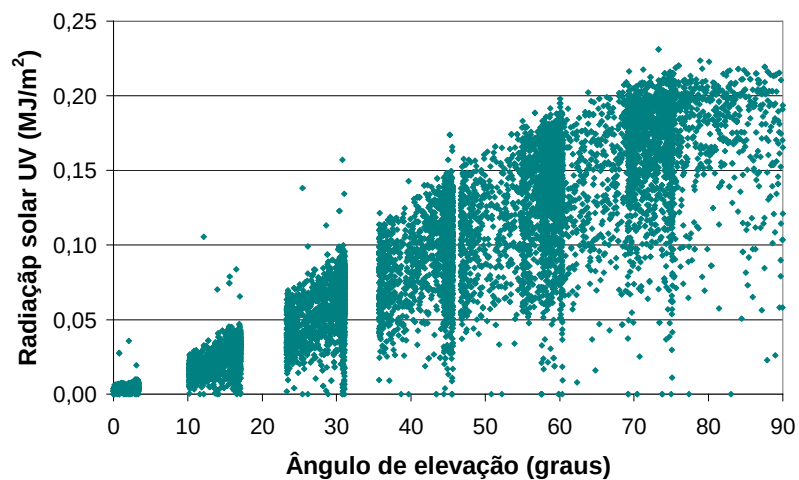


Figura 25 - Radiação solar UV em função do ângulo de elevação para a cidade de Pesqueira

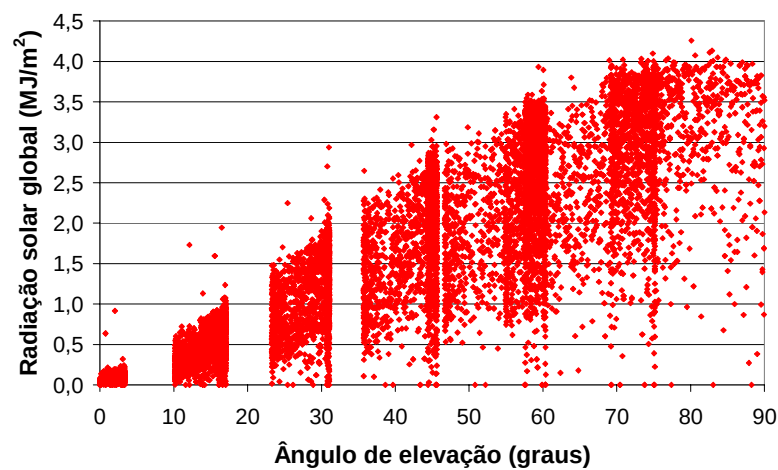


Figura 26 - Radiação solar global em função do ângulo de elevação para a cidade de Pesqueira

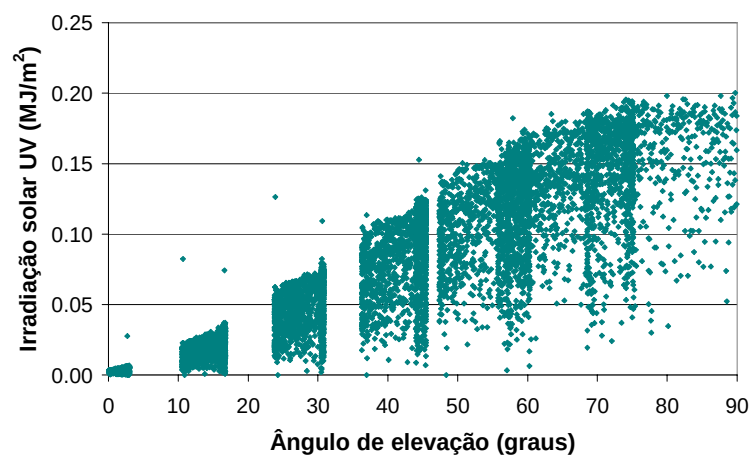


Figura 27 - Radiação solar UV em função do ângulo de elevação para a cidade de Araripina

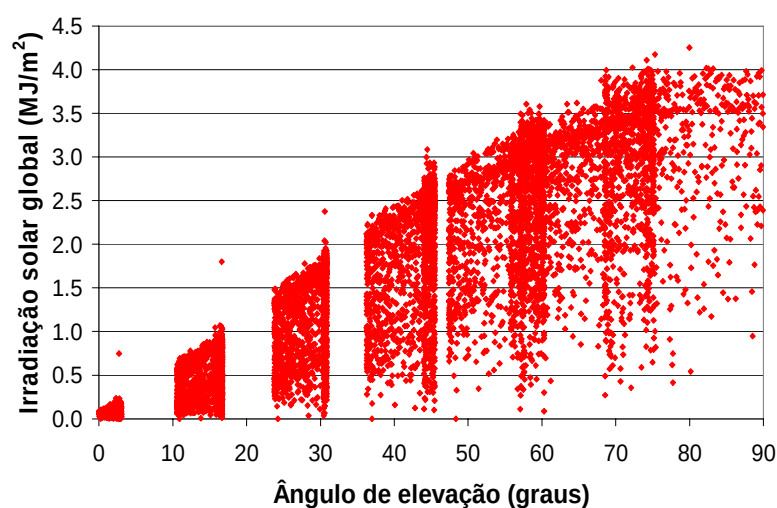


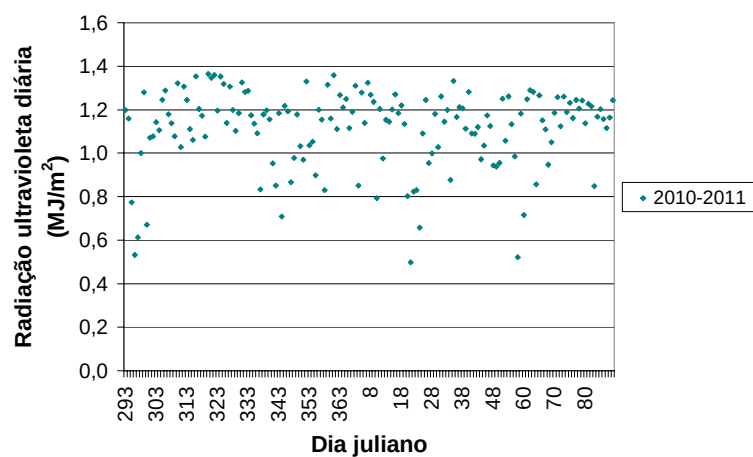
Figura 28 - Radiação solar global em função do ângulo de elevação para a cidade de Araripina

A análise das Figuras 23, 24, 25, 26, 27 e 28 permite as seguintes conclusões:

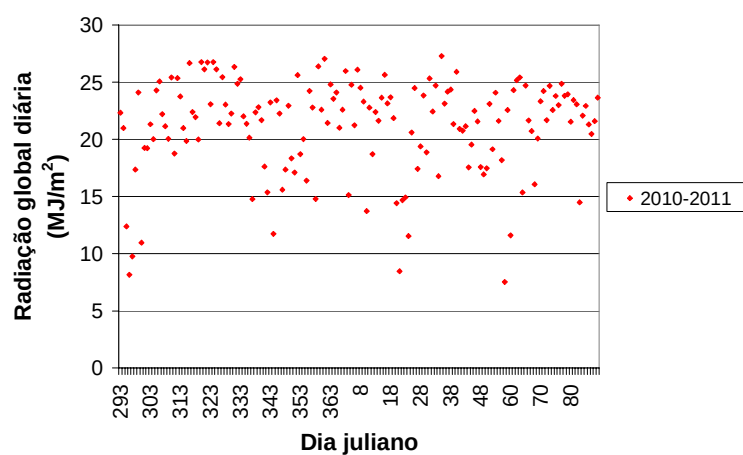
- O comportamento da radiação solar global horária e UV (A+B) horária em função do ângulo de elevação são bastante semelhantes;
- Para um mesmo ângulo de elevação existe uma dispersão muito grande de pontos, indicando a grande diversidade da condição horária do céu;

- A radiação solar ultravioleta horária atinge valores máximos próximos a $0,22 \text{ MJ/m}^2$ para a cidade de Pesqueira, $0,20 \text{ MJ/m}^2$ para a cidade de Recife e $0,20 \text{ MJ/m}^2$ para a cidade de Araripina. Esta diferença de aproximadamente 10 % entre as cidades de Pesqueira e Araripina está relacionada com a quantidade de partículas suspensas na atmosfera decorrente do extrativismo do gesso. Em relação à cidade de Recife é devida à diferença de altitude e da quantidade de água precipitável.

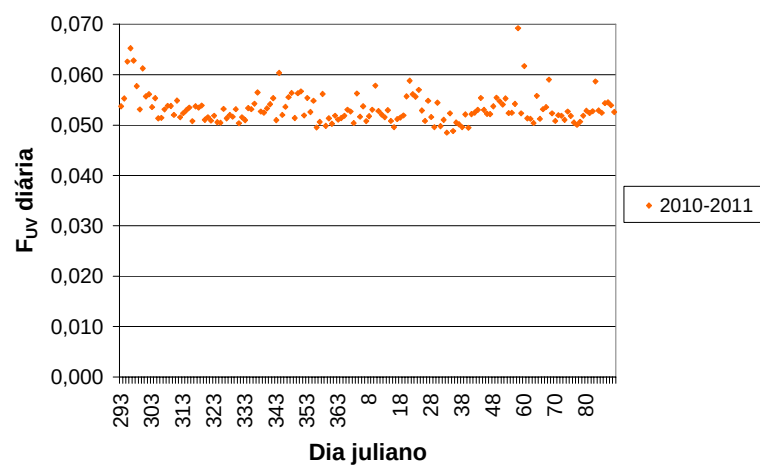
Os resultados da radiação solar UV (a), global (b) e fração UV (c) diárias para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina são mostrados, respectivamente nas Figuras 29, 30 e 31.



(a)

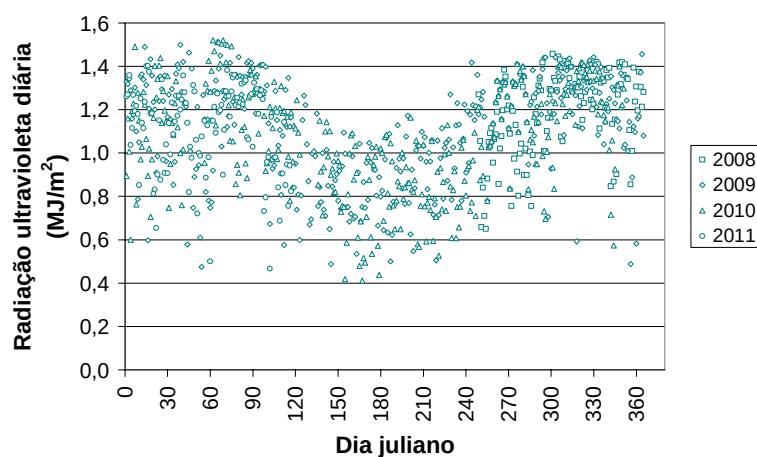


(b)

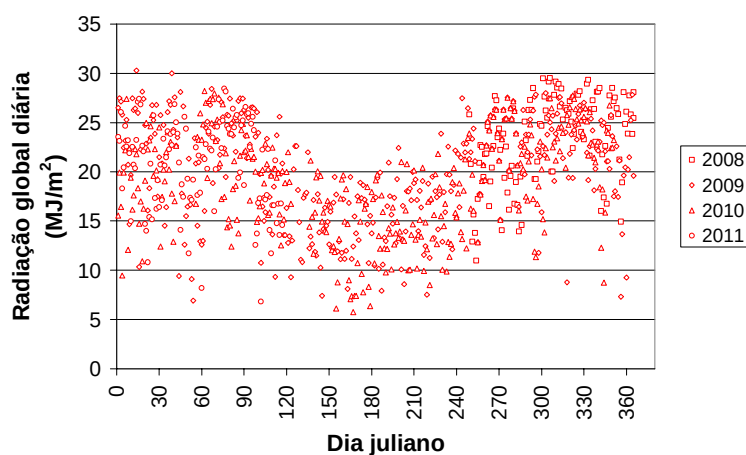


(c)

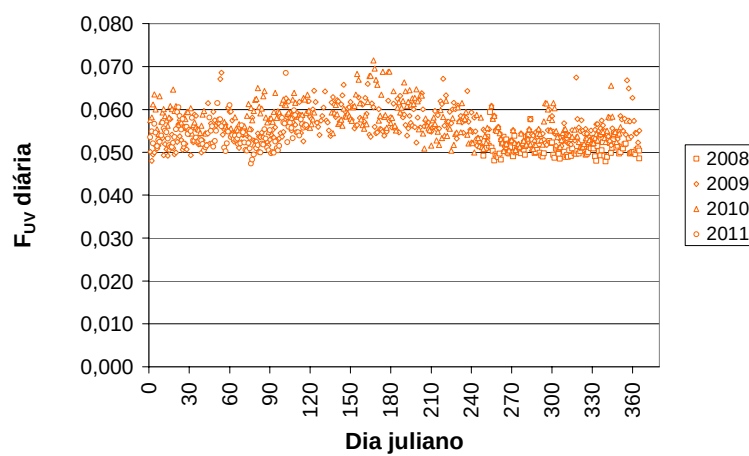
Figura 29 - Radiação solar UV, global e fração UV diária para a cidade de Recife.



(a)

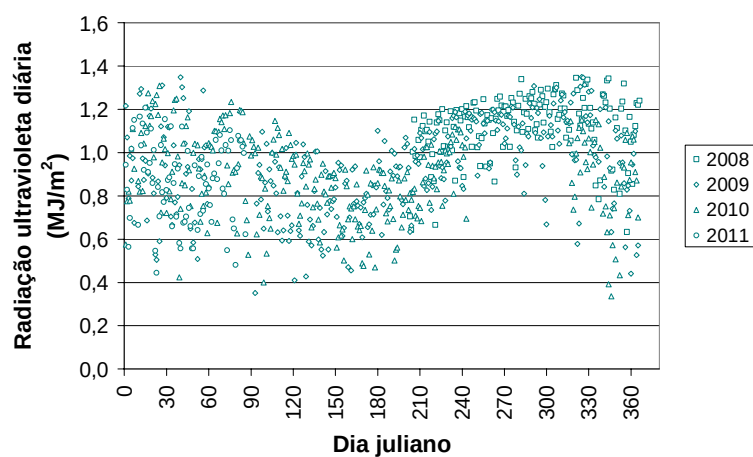


(b)

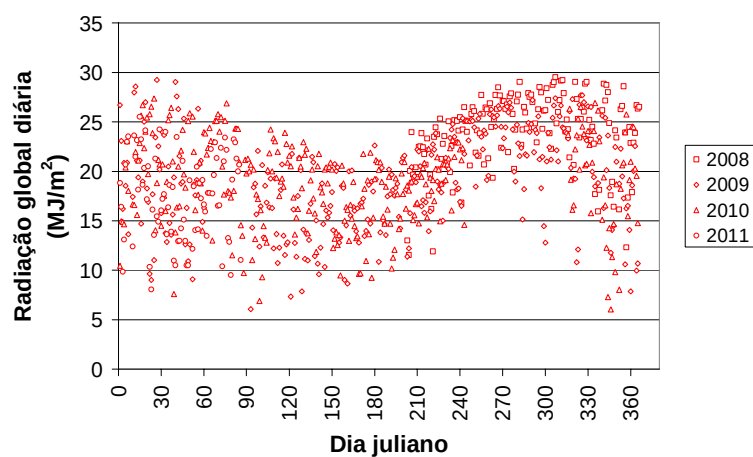


(c)

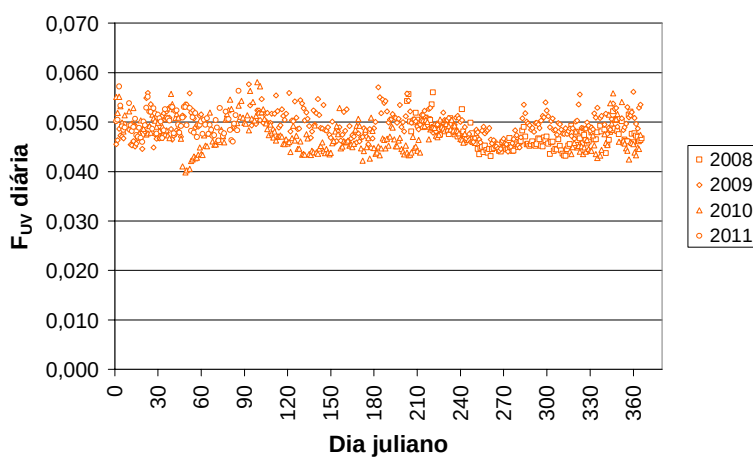
Figura 30 - Radiação solar UV, global e fração UV diária para a de
Pesqueira



(a)



(b)



(c)

Figura 31 - Radiação solar UV, global e fração UV diária para a cidade de Araripina

A radiação diária exibida em ambas as figuras mostra o comportamento típico no Nordeste do Brasil, valores diários máximos na primavera / verão (setembro a fevereiro) e mínimos no outono / inverno (março a agosto). A fração UV mostra valores diários mais elevados no outono / inverno devido à maior quantidade de vapor d'água na atmosfera, que exerce uma atenuação mais pronunciada na faixa do espectro infravermelho. Nessa situação, a atenuação do espectro global é muito maior que o espectro UV. A Figura 32 exibe a curva média mensal da água precipitável na cidade de Pesqueira no ano de 2005. Pode-se observar que os valores maiores são constatados durante o inverno entre os meses de março a junho.

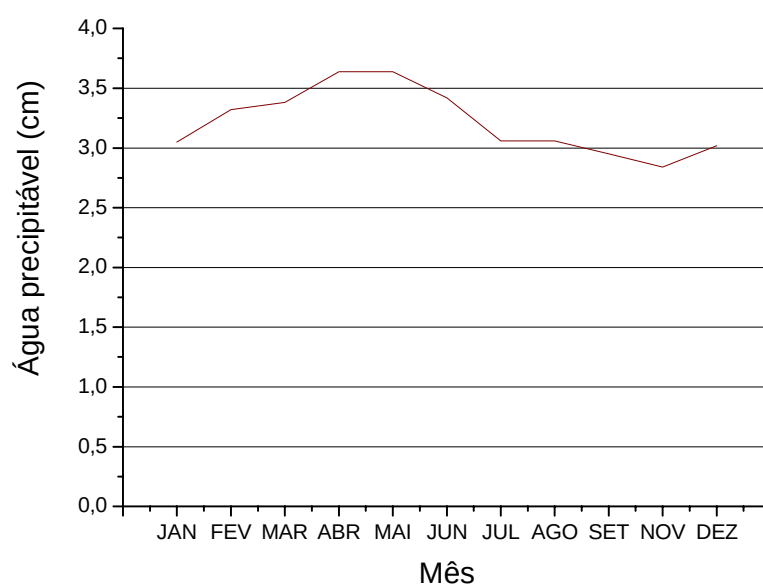
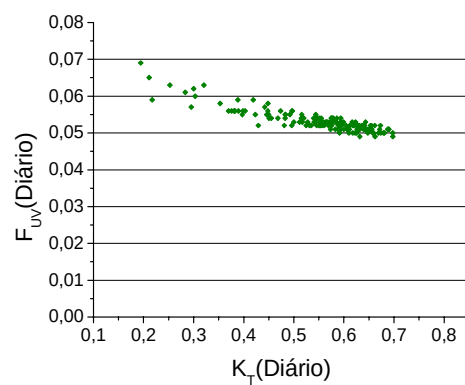
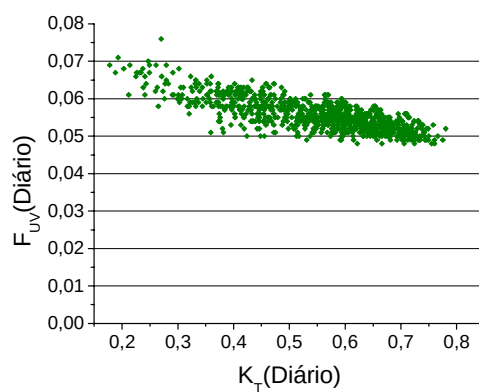


Figura 32 - Curva média mensal da água precipitável na cidade de Pesqueira no ano de 2005

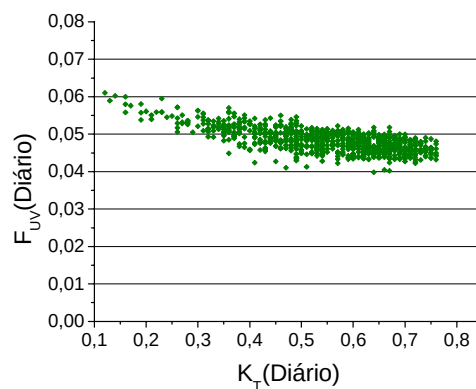
A Figura 33 mostra o comportamento da fração solar ultravioleta diária em função do índice de claridade diário para as cidades de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c).



(a)



(b)

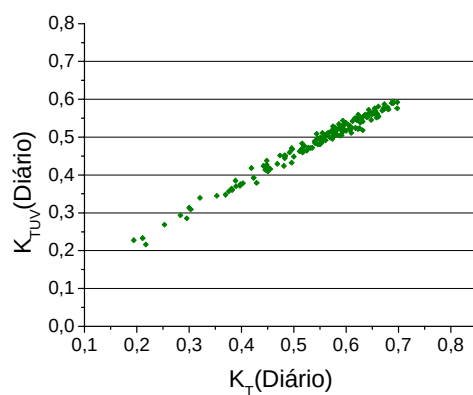


(c)

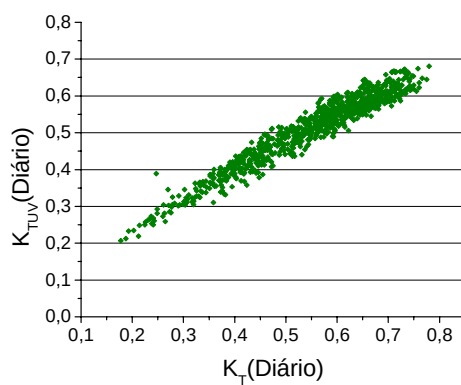
Figura 33 - Fração solar ultravioleta diária, em função do índice de transmitância global diária, para as cidades de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c)

Observa-se que a fração ultravioleta aumenta com a diminuição do índice de transmitância (K_T). A situação onde ocorre um K_T baixo normalmente tem mais nebulosidade e, portanto, maior concentração de vapor d'água na atmosfera. Nessas circunstâncias a componente global é mais atenuada que a UV. Como foi citada anteriormente, a estação de Araripina, embora situada à altitude e clima similares a de Pesqueira, apresenta fração UV e irradiação solar UV 10% inferior. Essa situação é confirmada em (TIBA E PIMENTEL, 2009) onde são apresentados valores de profundidade ótica de aerossóis, para Araripina, de 3,8 e de Pesqueira de 3,4. Provavelmente, o valor mais alto de Araripina decorre do impacto da indústria de extração de gesso.

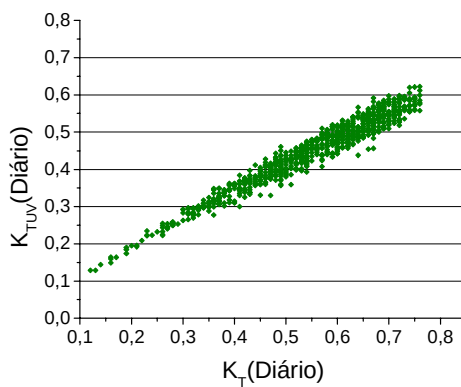
As Figuras 34 (a), 34 (b) e 34 (c) mostram o índice K_{TUV} em função do índice de transmitância global para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina. Valores maiores de K_T implicam em uma maior fração K_{TUV} .



(a)



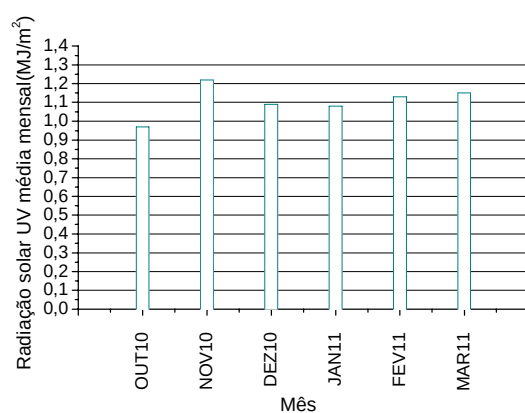
(b)



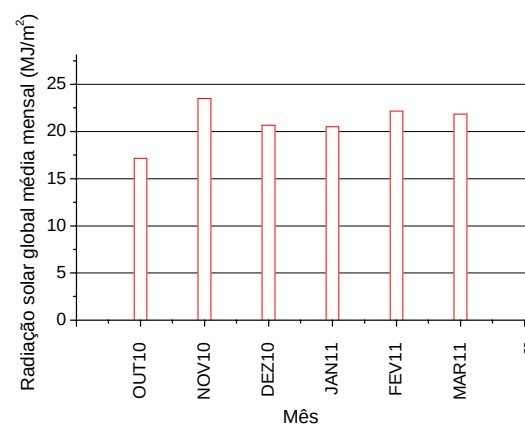
(c)

Figura 34 – Índice de transmitância solar UV diário em função do índice de transmitância global diário para as cidades de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c)

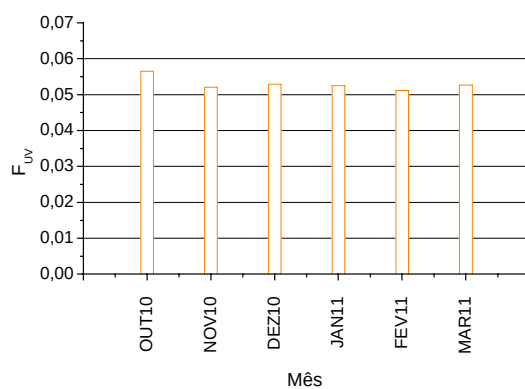
As medidas diárias permitiram a análise média mensal da radiação solar UV e global, que podem ser visualizadas nas Figuras 35, 36 e 37 que mostram respectivamente, a radiação UV (a), global (b) e a fração solar ultravioleta (c) média mensal para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina.



(a)

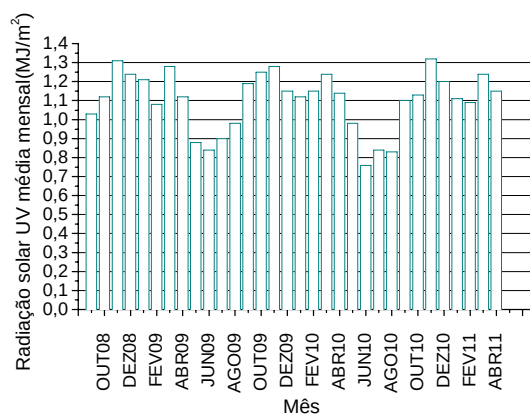


(b)

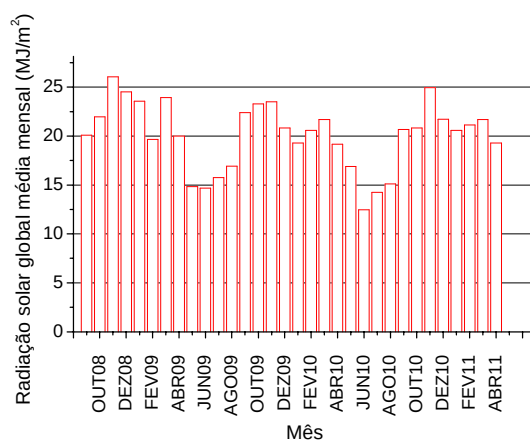


(c)

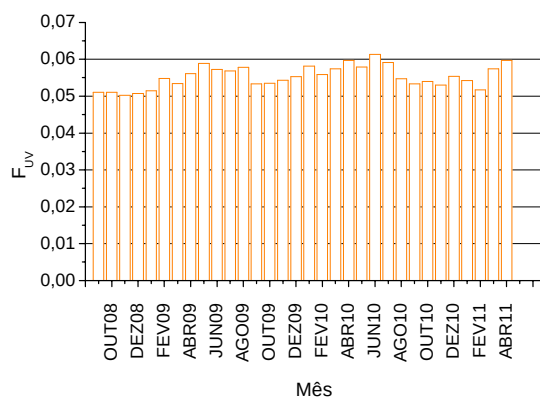
Figura 35 - Radiação solar UV (a), global (b) e fração solar ultravioleta (c) média mensal para a cidade de Recife.



(a)

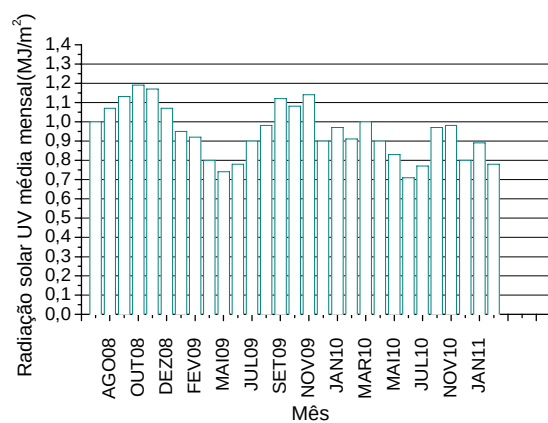


(b)

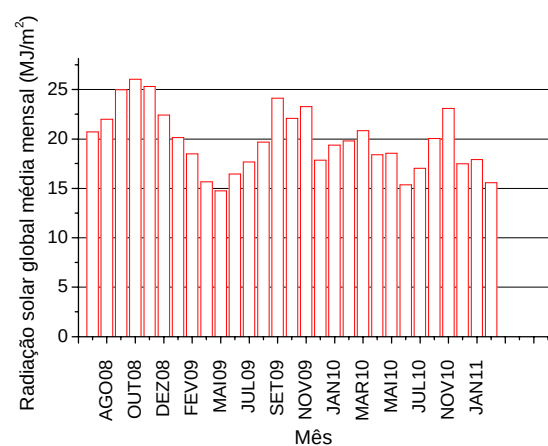


(c)

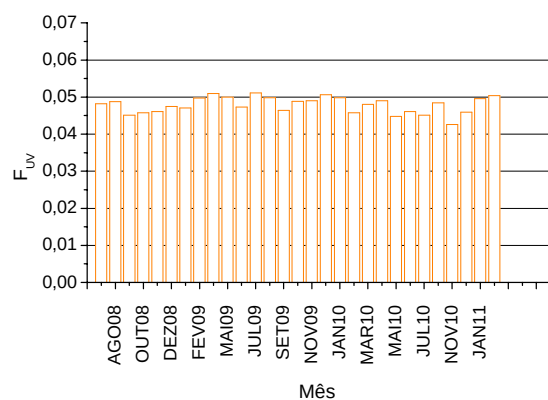
Figura 36 - Radiação solar UV (a), global (b) e fração solar ultravioleta (c) média mensal para a cidade de Pesqueira



(a)



(b)



(c)

Figura 37 - Radiação solar UV (a), global (b) e fração solar ultravioleta (c) média mensal para a cidade de Araripina

As curvas confirmaram o comportamento típico sazonal da região e um nível médio de irradiação ultravioleta inferior para a cidade de Araripina.

4.2 Frequência diária e frequência acumulada da radiação UV (A+B)

Os valores da frequência acumulada da radiação UV (A+B) indicam qual o percentual dessa radiação horária que excede um valor limite durante um mês ou ano. As Figuras 38, 39 e 40 representam graficamente tais frequências em bases mensais, para um determinado ano (a) e a frequência acumulada envolvendo todo o período de medição (b) para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina.

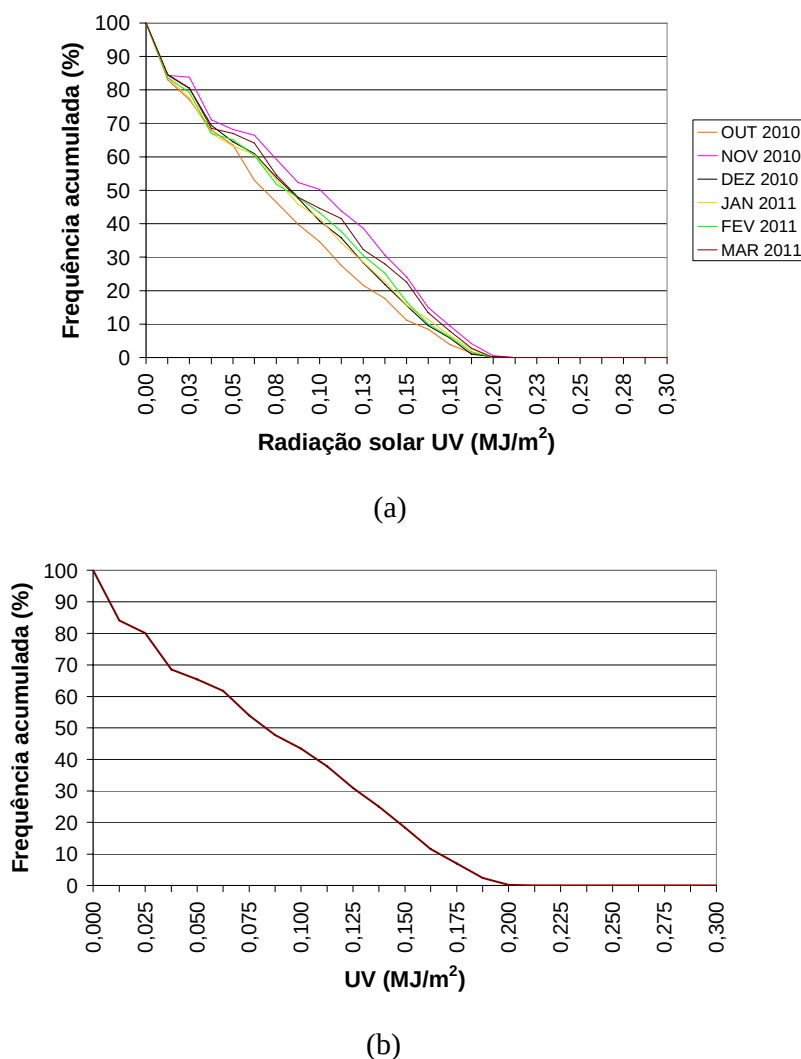
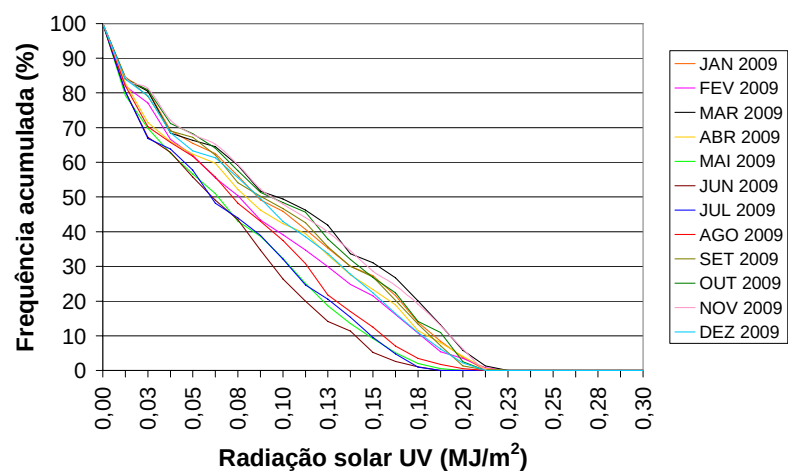
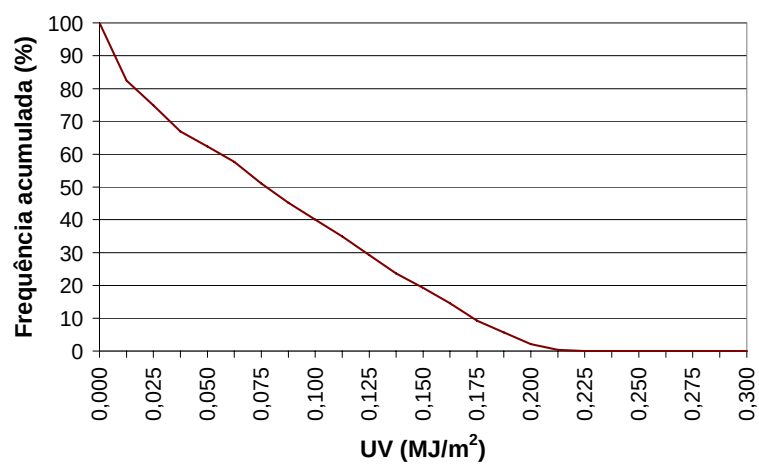


Figura 38 – Frequência acumulada mensal (a) e frequência acumulada total (b) para a cidade de Recife.



(a)



(b)

Figura 39 – Frequência acumulada mensal (a) e frequência acumulada total (b) para a cidade de Pesqueira.

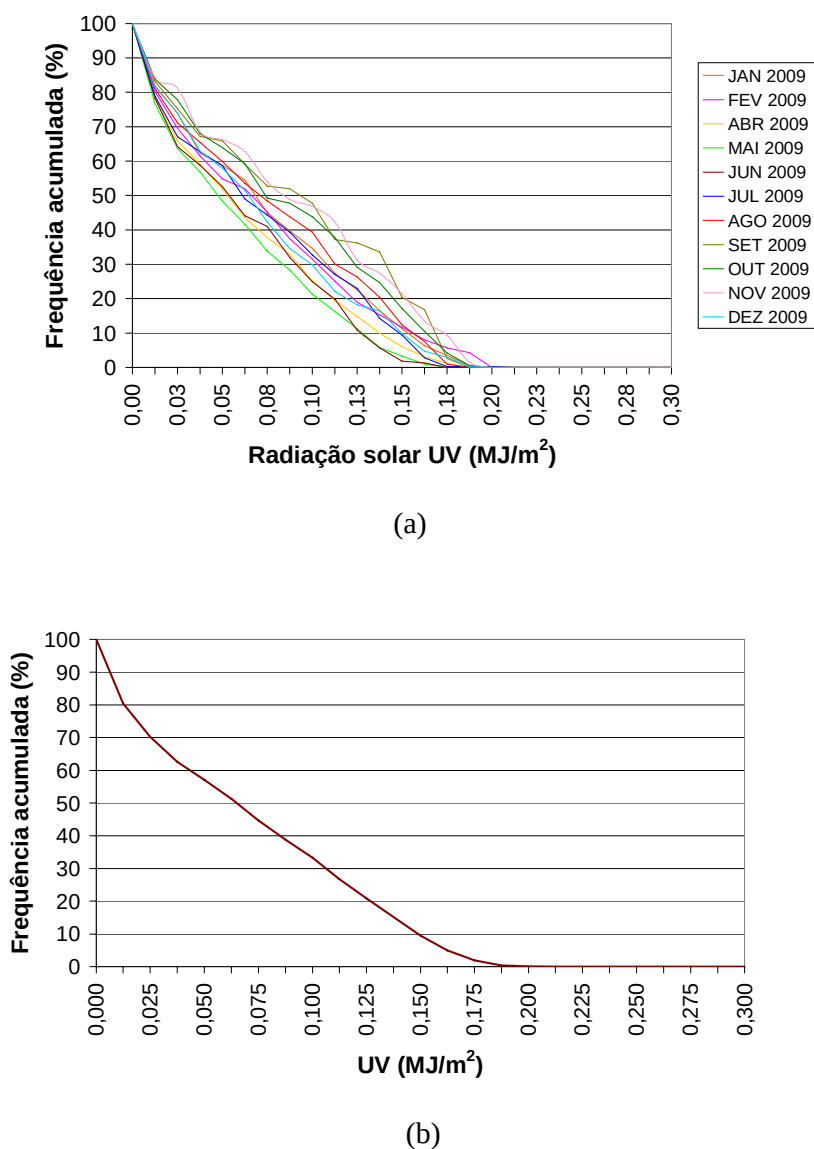
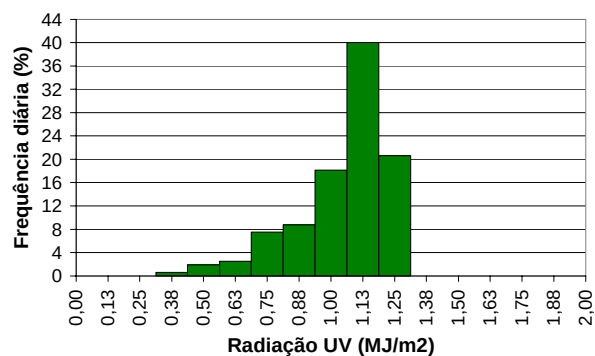


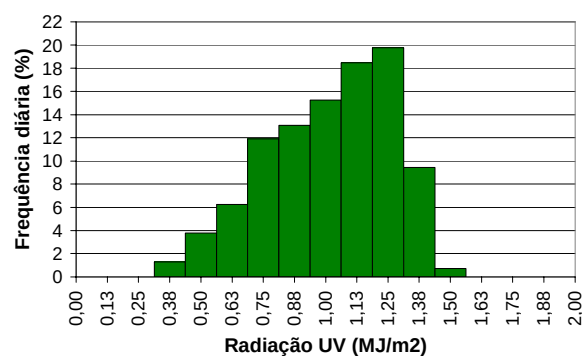
Figura 40 – Frequência acumulada mensal (a) e frequência acumulada total (b) para a cidade de Araripina.

A frequência acumulada é útil para avaliar o grau de severidade que um determinado material de uso externo (tintas, vernizes, polímeros), será submetido quando exposto à radiação solar UV. Por exemplo, conforme as Figuras 39 (b) e 40 (b), na cidade de Pesqueira 20 % das horas diurnas anuais possuem valores da radiação UV (A+B) superiores ou iguais a 0,15 MJ/m² e na cidade de Araripina esse percentual é inferior a 10 %. Uma comparação semelhante pode ser feita em relação à frequência diária da radiação solar UV para uma determinada localidade,

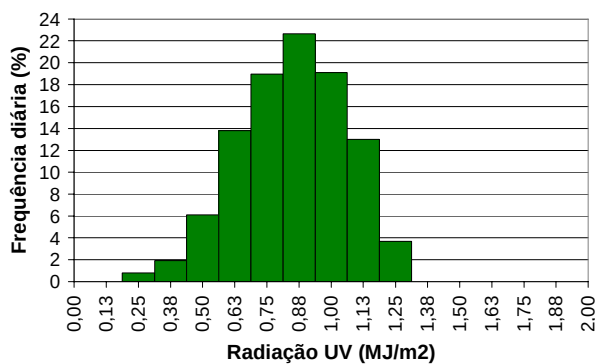
como pode ser visto na Figura 41. Enquanto a cidade de Pesqueira (b) apresenta uma radiação de $1,25 \text{ MJ/m}^2$ em aproximadamente 20% dos dias, a cidade de Araripina (c), para um mesmo período, apresenta um valor inferior a 4%.



(a)



(b)



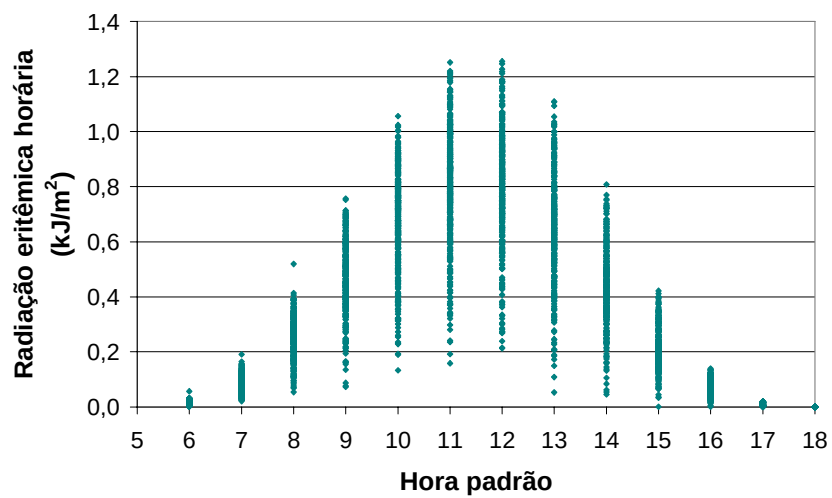
(c)

Figura 41 – Frequência diária para as cidade de Recife (a), Pesqueira (b) e Araripina (c).

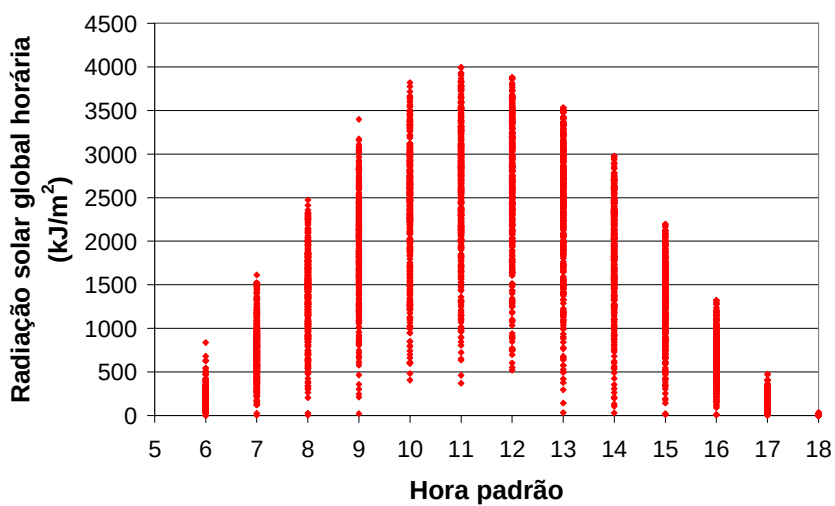
4.3 Avaliação das medidas da radiação eritêmica para a cidade de Recife

Além de realizar medidas da radiação UV (A+B), a estação Recife também foi preparada para medir a radiação eritêmica mediante um biômetro modelo 501 UV-B da Solar Light (Solar light, 2011), que opera na faixa de 280 a 320 nm, cuja resposta se aproxima da pele humana exposta à radiação solar. Os dados medidos compreendem um intervalo entre 01 de dezembro de 2009 a 31 de dezembro de 2010.

A Figura 42 mostra o comportamento da radiação eritêmica (a) e global (b) em função da hora padrão. Os valores máximos observados próximos ao meio-dia, são devidos aos dias de céu claro e maiores ângulos de elevação implicando, portanto, em uma massa de ar menor. A variação vertical observada para uma mesma hora é devida às variações das condições atmosféricas. Na Figura 43, pode-se visualizar o comportamento da radiação eritêmica (a) e global (b) diária e o índice ultravioleta diário ao meio-dia (hora padrão) (c). O gráfico (c) mostra os valores extremos do índice ultravioleta ($IUV = 14$) alcançados entre os meses de fevereiro e março de 2010 e alertados pelos meios de comunicação. O comportamento da irradiação global (b) para este mesmo período de medição foi semelhante ao da irradiação eritêmica.

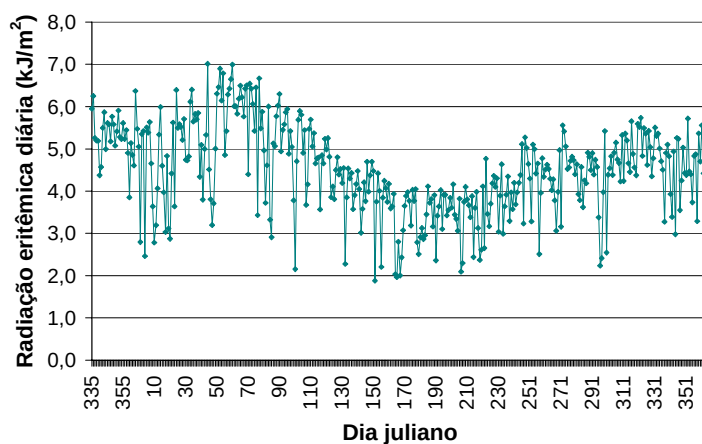


(a)

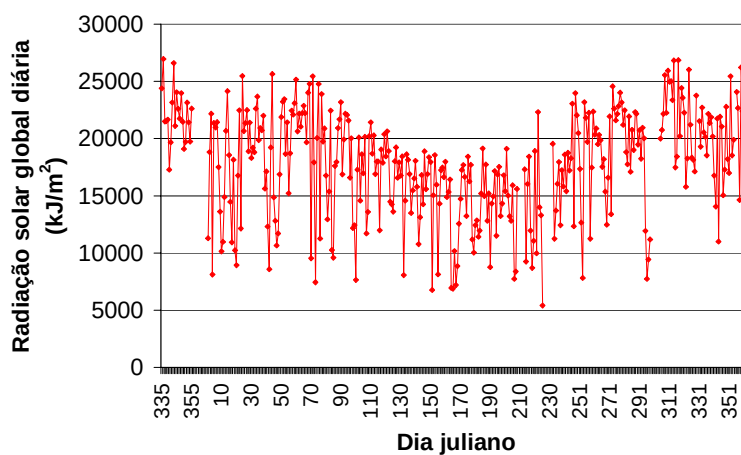


(b)

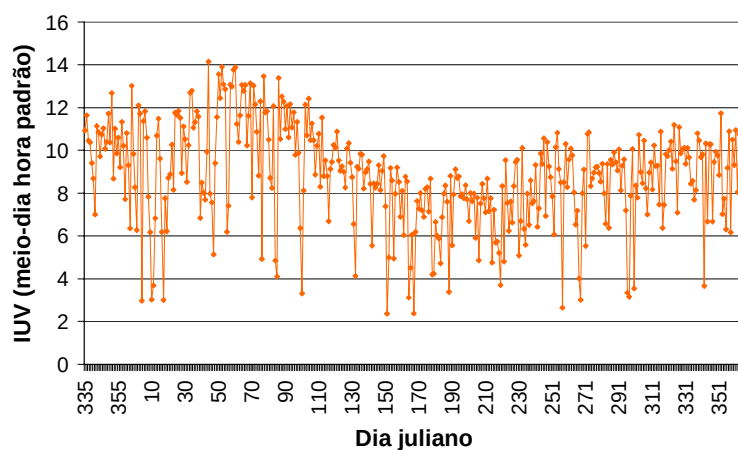
Figura 42- Radiação eritêmica horária (a) e global horária (b).



(a)



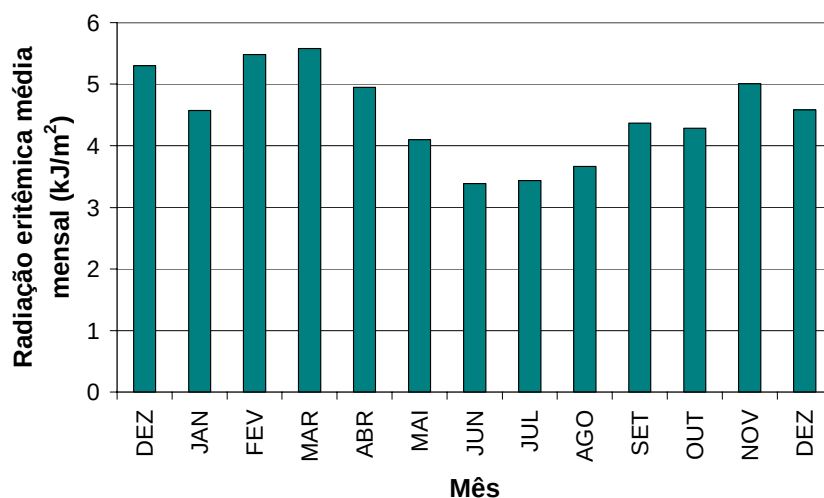
(b)



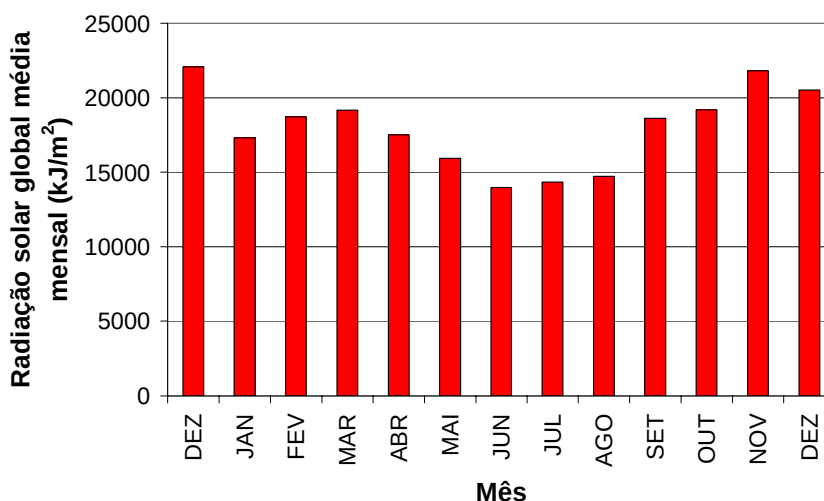
(c)

Figura 43 - Radiação eritêmica diária (a), global diária (b) e o IUV diário ao meio-dia (hora padrão) (c).

A Figura 44 confirma o comportamento sazonal, semelhante, entre a radiação média mensal eritêmica (a) e global (b). Os valores mínimos são observados nos meses de junho e julho. Os dados referentes ao mês de dezembro não foram considerados no gráfico da irradiação global devido às falhas operacionais citadas anteriormente. Ainda, na Figura 44, podem ser visualizados os índices ultravioleta (ao meio-dia) médios mensais (c) e sazonais (d) para todas as condições de céu ao meio-dia (hora padrão) observadas entre os meses de dezembro de 2009 e julho de 2010. O mês de março apresentou valores médios mais elevados de radiação eritêmica e índice ultravioleta quando comparado aos outros meses. É válido salientar que o índice ultravioleta médio, para a cidade de Recife, ao meio dia, é alto até mesmo no período de inverno, conforme pode ser visto na Figura 44 (d).



(a)



(b)

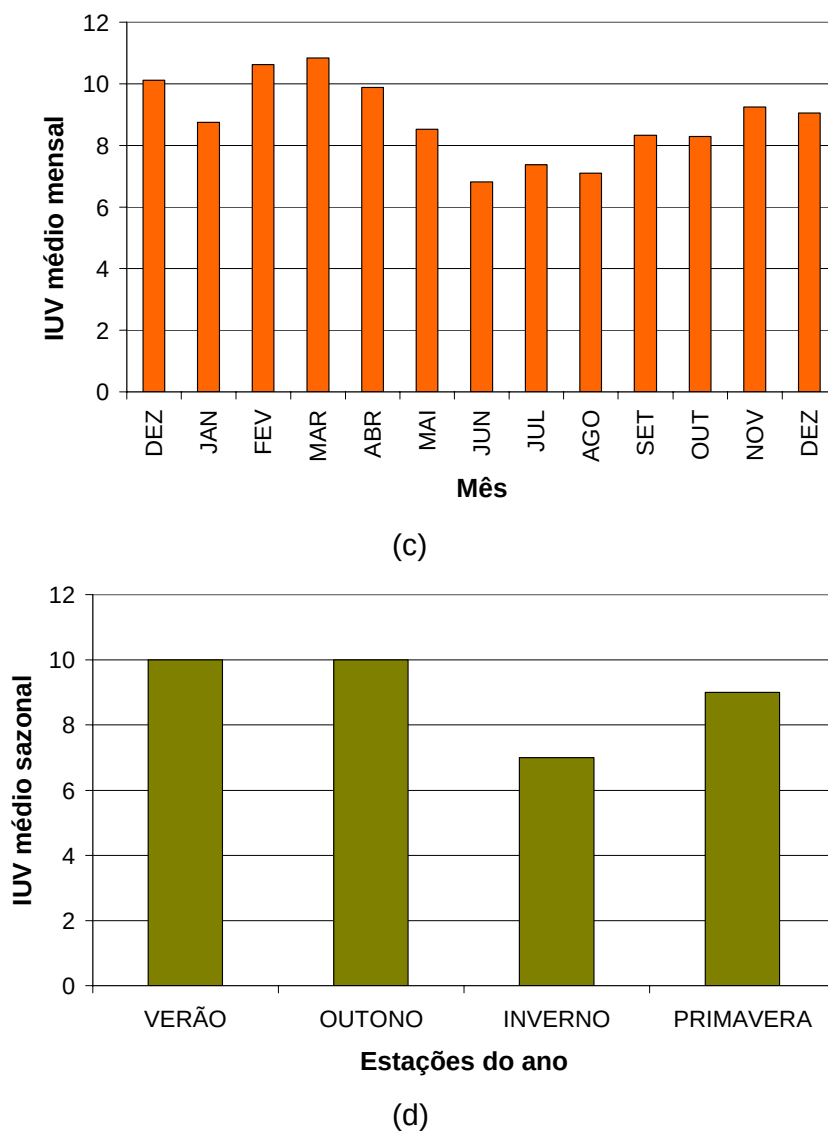


Figura 44 - Radiação eritêmica média mensal (a), global média mensal (b) e o IUV médio mensal (c) e sazonal (d) considerando meio-dia (hora padrão).

Os efeitos causados pela irradiação eritêmica são também acumulativos. Um indivíduo exposto a essa irradiação pode perceber seus efeitos após muitos anos. O conhecimento da distribuição acumulada possibilita conhecer a quantidade média de energia recebida pelos organismos vivos. A Figura 45 mostra a distribuição acumulada da irradiação eritêmica horária média mensal.

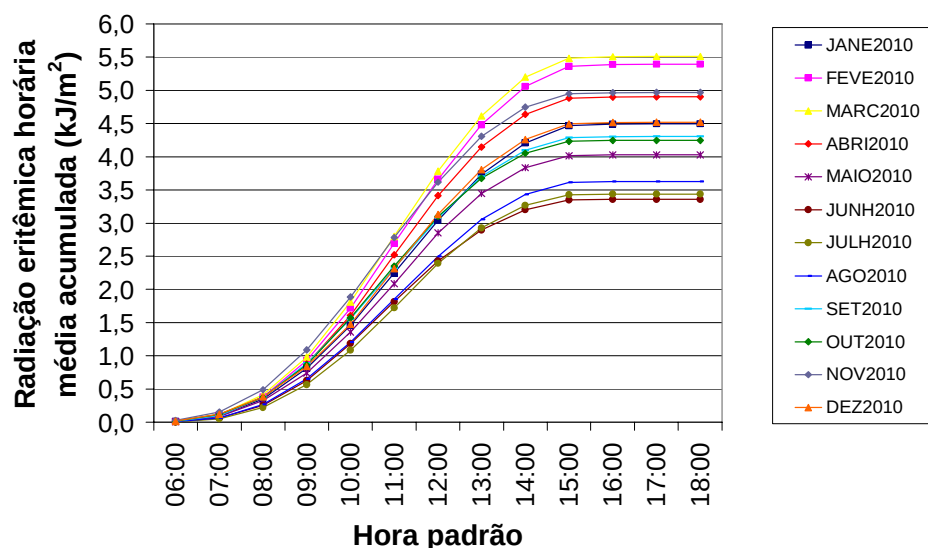


Figura 45 - Distribuição acumulada da radiação eritêmica média horária.

As curvas indicam que se um indivíduo permanecer exposto das seis às treze horas nos meses de março e fevereiro, por exemplo, estará se submetendo a uma dose média de 4,5 kJ / m² diária. Isto implicaria em uma dose de aproximadamente 21 DEM, que é extremamente alta.

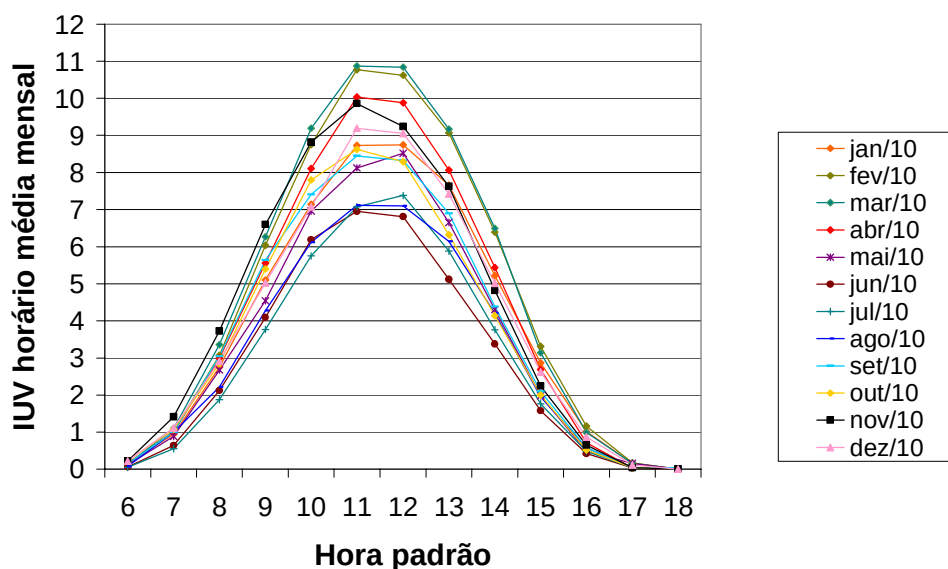


Figura 46 - Índice ultravioleta horário, média mensal.

A Figura 46 mostra o índice ultravioleta horário, média mensal. Observa-se que para os meses de novembro, fevereiro e março o IUV atinge valores altos a partir das nove horas da manhã.

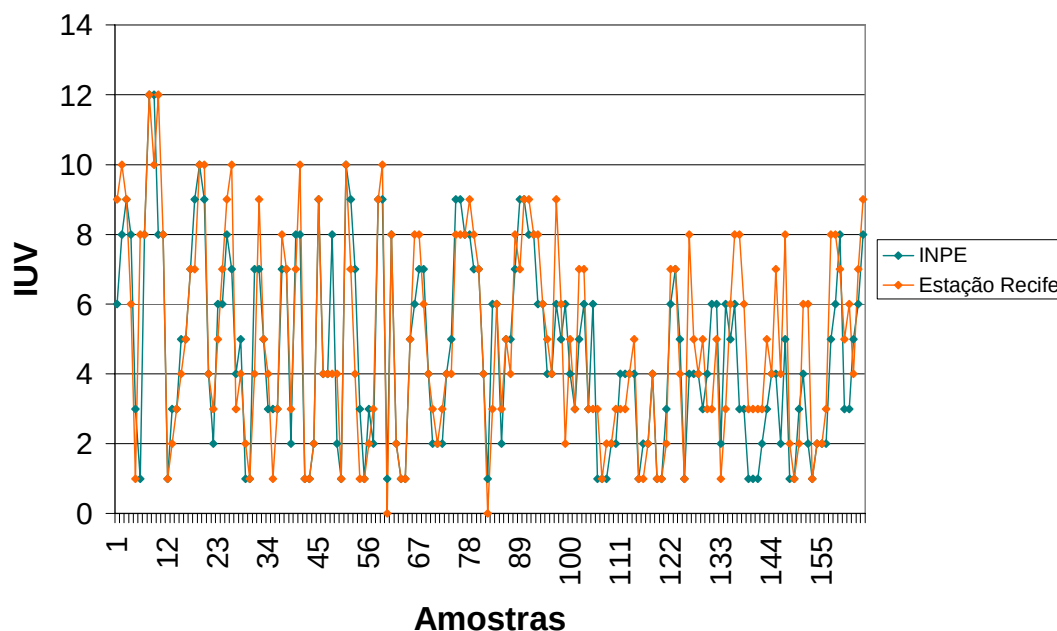


Figura 47 - Comparação dos índices ultravioleta medidos na estação Recife e fornecido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2010) disponibiliza diariamente os valores do índice ultravioleta, na Internet, com o objetivo de informar e alertar a população para os riscos desta irradiação. Estes dados são gerados a partir de imagens de satélites e modelagens computacionais, para inserir efeito das nuvens. A Figura 47 mostra a comparação entre amostras medidas e escolhidas aleatoriamente da estação Recife e do site do INPE considerando todas as condições de céu. Os pontos não coincidentes podem ser explicados porque a área de abrangência utilizada pelo INPE, para o cálculo do IUV, foi muito maior que a da cidade de Recife, enquanto a medida foi realizada em um ponto específico dessa cidade. As situações, onde ocorrem uma boa coincidência, refletem dias extremos.

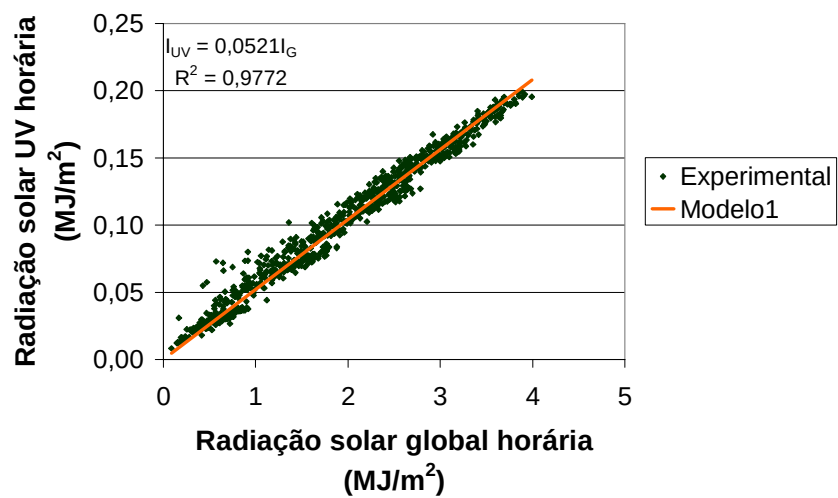
4.4 Modelagem da radiação solar UV (A+B) horária com uso de correlações estatísticas e redes neurais artificiais

Para determinar um melhor modelo de estimativa da radiação UV, para uma determinada localidade, é de fundamental importância as comparações e análises estatísticas entre os mesmos. Neste trabalho, foram escolhidos e analisados três modelos estatísticos para a estimativa da

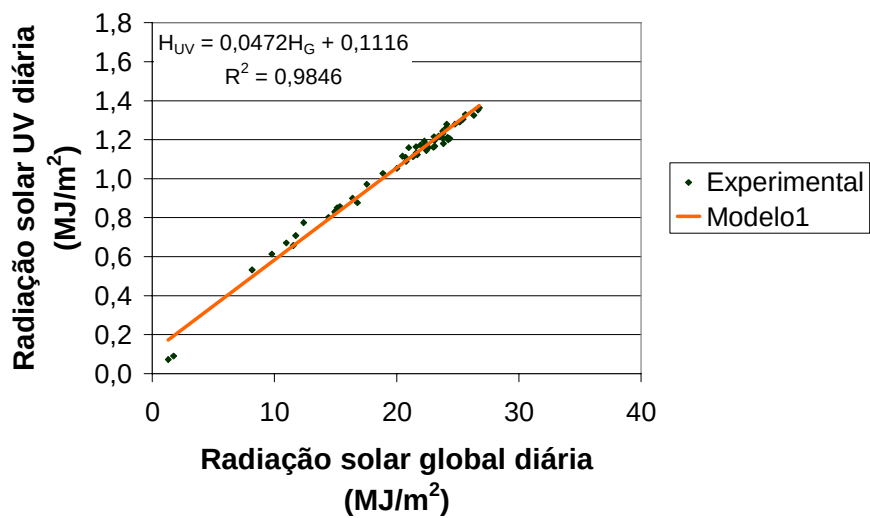
irradiação solar UV a partir da radiação global : a) correlação linear entre a radiação UV e a global (modelo 1); b) correlação polinomial da fração média $\langle F_{UV} \rangle$ em função do índice de transmitância da irradiação solar global $\langle K_T \rangle$ (modelo 2) e c) regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta $\langle K_{TUV} \rangle$ e da massa de ar $\langle m_r \rangle$ em função $\langle K_T \rangle$ (modelo 3). Além disso, foram modelados mediante duas redes neurais artificiais: a) estimativa do (F_{UV}) , considerando as mesmas variáveis físicas do modelo 2 (modelo ANN1) e b) estimativa do (K_{TUV}) a partir das mesmas variáveis físicas do modelo 3 (modelo ANN2).

4.4.1 Correlação entre a radiação UV e a global (modelo1)

As Figuras 48, 49 e 50 mostram a correlação entre a radiação solar UV e global horária (a) e diária (b) para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina, respectivamente.

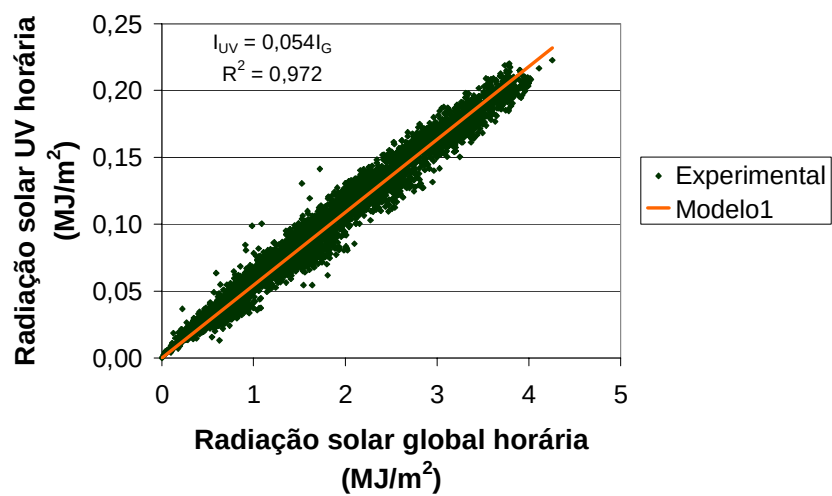


(a)

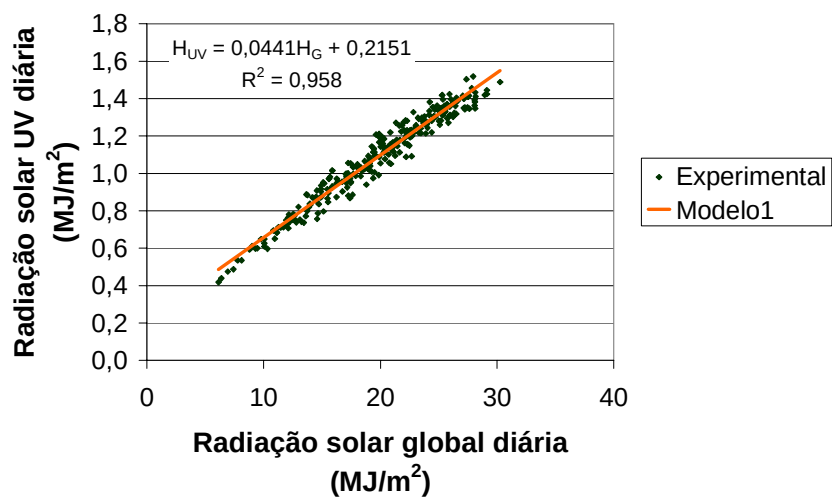


(b)

Figura 48 - Correlação entre a radiação solar UV e global para a cidade de Recife.

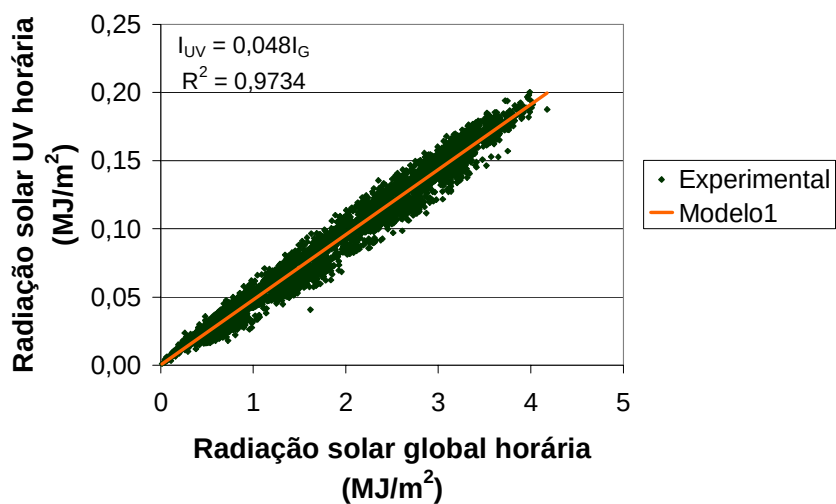


(a)

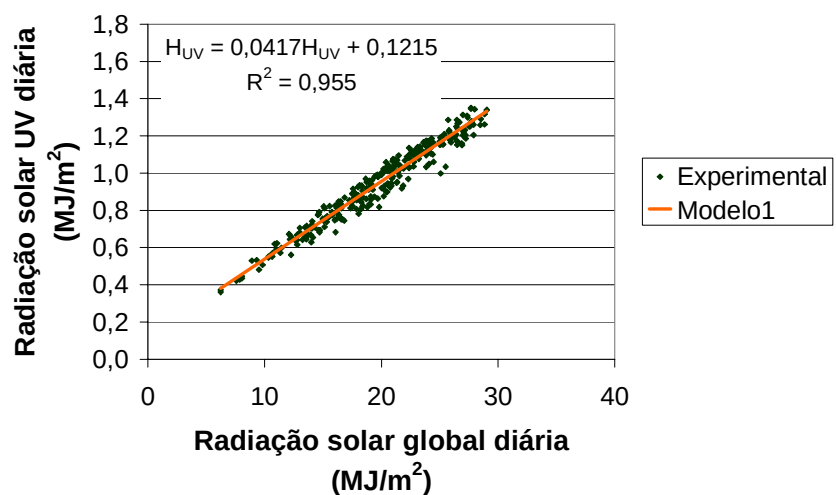


(b)

Figura 49 - Correlação entre a radiação solar UV e global para a cidade de Pesqueira.



(a)



(b)

Figura 50 - Correlação entre a radiação solar UV e global para a cidade de Araripina.

As correlações resultaram nas equações de estimativa da radiação UV horária 36, 38, 40 e diária 37, 39, 41 para ambas localidades.

Recife	$I_{UV} = 0,052I_G$	$R^2 = 0,98$	(36)
	$H_{UV} = 0,0472H_G + 0,1116$	$R^2 = 0,98$	(37)

Pesqueira	$I_{UV} = 0,054I_G$	$R^2 = 0,96$	(38)
	$H_{UV} = 0,0441H_G + 0,2125$	$R^2 = 0,98$	(39)

Araripina	$I_{UV} = 0,048I_G$	$R^2 = 0,97$	(40)
	$H_{UV} = 0,0417H_G + 0,1215$	$R^2 = 0,96$	(41)

A comparação estatística dos modelos para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina mostrou, respectivamente, um MBE% de -1,23%, 2,95%, 0,42% e um RMSE% de 7,40%, 9,99% e 9,54% para as correlações horárias e um MBE% de -0,72%, -0,26%, -0,32% e um RMSE% 2,29%, 4,48%, 4,50% para as correlações diárias. Outros trabalhos publicados anteriormente apresentaram desempenhos estatísticos semelhantes e frações médias de mesma ordem de grandeza (Martinez-Lozano et. al., 1999; Canadã et. al. 2003; Escobedo et. al., 2007).

4.4.2 Correlação polinomial (modelo 2)

As equações abaixo representam os modelos polinomiais para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina. 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 Figuras 51, 52 e 53 mostram os pontos experimentais de validação e as curvas geradas pelos modelos horários e diários, respectivamente, para ambas às localidades.

Recife	$\langle f_{UV} \rangle = -0,0164K_T^3 + 0,0936K_T^2 - 0,1099K_T + 0,0864$	$R^2 = 9,98$	(42)
--------	--	--------------	------

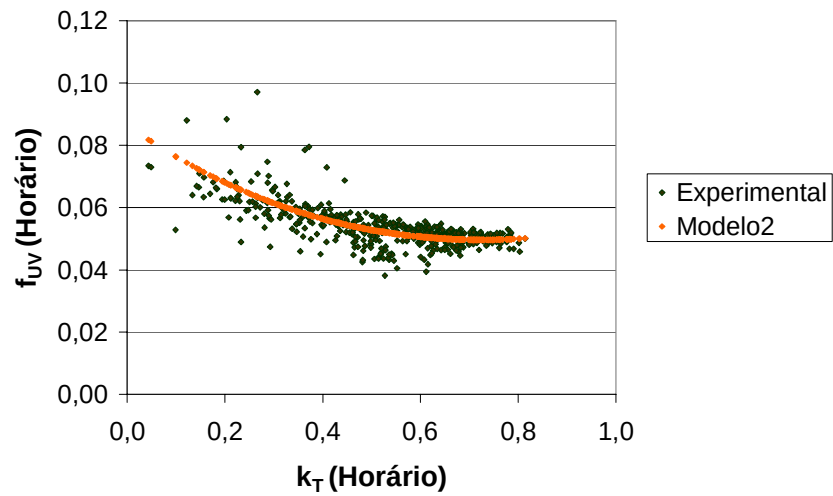
	$\langle F_{UV} \rangle = -0,0134K_T^3 + 0,24691K_T^2 - 0,1643K_T + 0,0905$	$R^2 = 0,93$	(43)
--	---	--------------	------

Pesqueira	$\langle f_{UV} \rangle = -0,0305K_T^3 + 0,089K_T^2 - 0,0878K_T + 0,0803$	$R^2 = 0,82$	(44)
-----------	---	--------------	------

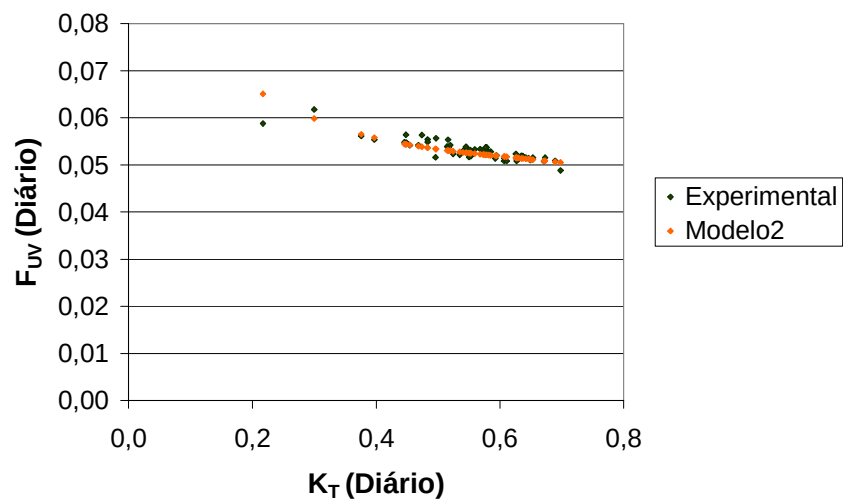
	$\langle F_{UV} \rangle = -0,0429K_T^3 + 0,0902K_T^2 - 0,0854K_T + 0,0823$	$R^2 = 0,92$	(45)
--	--	--------------	------

Araripina $\langle f_{UV} \rangle = 0,0386K_T^3 - 0,0868K_T^2 - 0,0409K_T + 0,0647$ $R^2 = 0,87$ (46)

$\langle F_{UV} \rangle = -0,0429K_T^3 + 0,0911K_T^2 - 0,0741K_T + 0,0683$ $R^2 = 0,89$ (47)

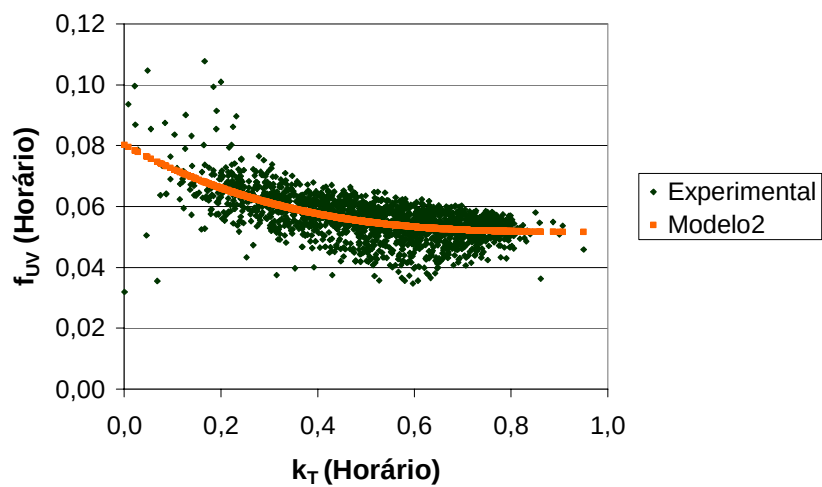


(a)

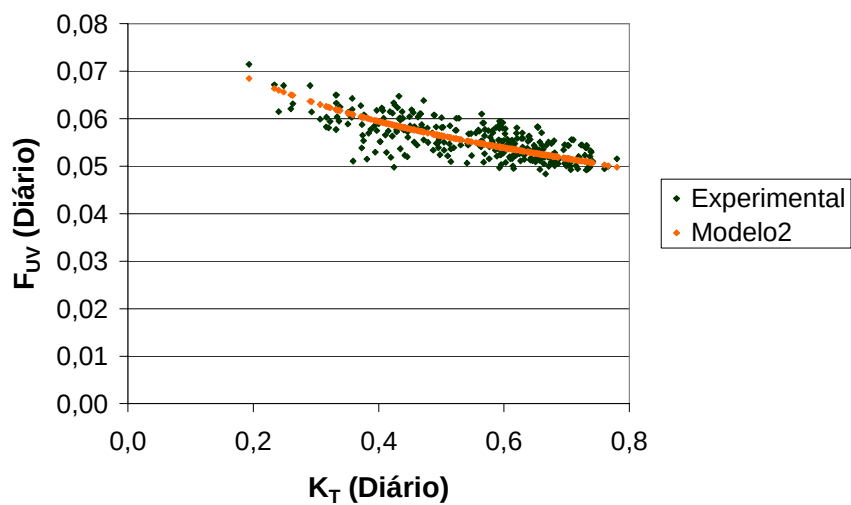


(b)

Figura 51 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 2 (laranja) para a cidade de Recife.

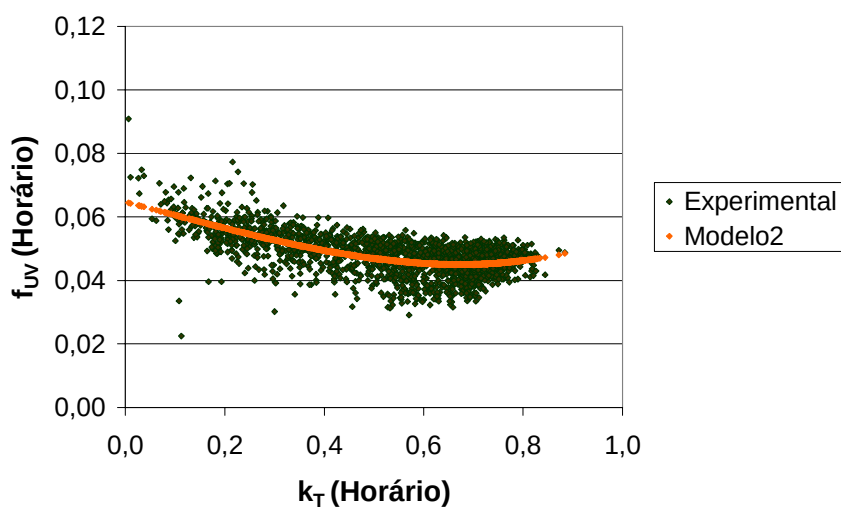


(a)

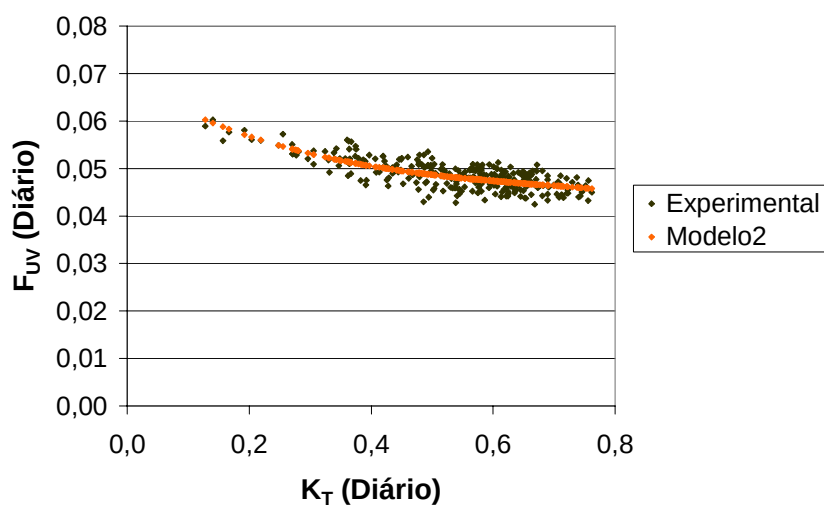


(b)

Figura 52 – Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 2 (laranja) para a cidade de Pesqueira.



(a)



(b)

Figura 53 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 2 (laranja) para a cidade de Araripina.

No caso do modelo 2 obteve-se, respectivamente para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina, um MBE% de 0,42%; 0,00%; -0,04% um RMSE% de 9,98%; 10,90% e 11,00% para as correlações horárias e um MBE% de -0,56%; -0,23%; -0,22% um RMSE% de 2,53%; 4,96% e 4,14%, para as correlações diárias.

4.4.3 Regressão múltipla (modelo 3)

Os índices de transmitância ultravioleta horários e diários foram determinados a partir de regressões múltiplas, fazendo uso de dados locais (índice de transmitância atmosférico e massa de ar), resultando nas expressões abaixo. Para os modelos diários foi considerada a massa de ar m_r ao meio dia solar.

$$\text{Recife} \quad k_{TUV} = 0,781K_T^{0,720}m_r^{-0,112} \quad (48)$$

$$K_{TUV} = 0,840K_T^{0,954}m_r^{0,839} \quad (49)$$

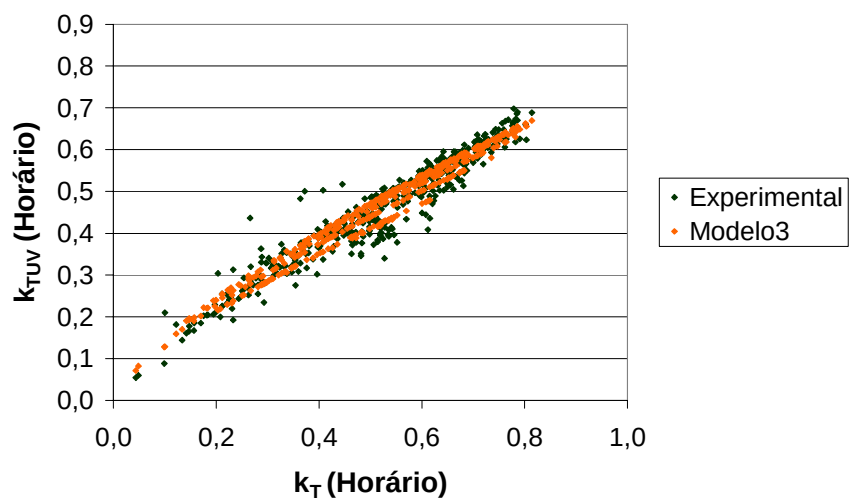
$$\text{Pesqueira} \quad k_{TUV} = 0,864K_T^{0,781}m_r^{-0,147} \quad (50)$$

$$K_{TUV} = 0,798K_T^{0,813}m_r^{0,392} \quad (51)$$

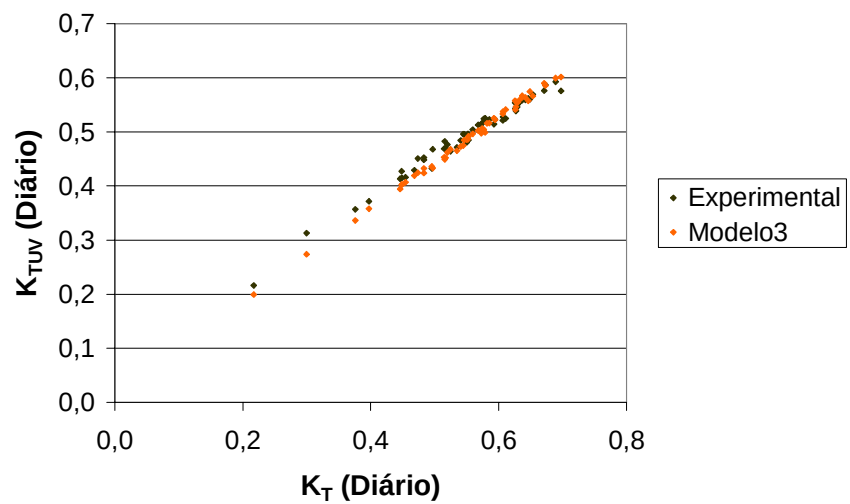
$$\text{Araripina} \quad k_{TUV} = 0,757K_T^{0,793}m_r^{-0,182} \quad (52)$$

$$K_{TUV} = 0,743K_T^{0,845}m_r^{0,065} \quad (53)$$

Os dados experimentais de validação e as curvas geradas pelo modelo para Recife, Pesqueira e Araripina são mostradas nas Figuras 54, 55 e 56, respectivamente.

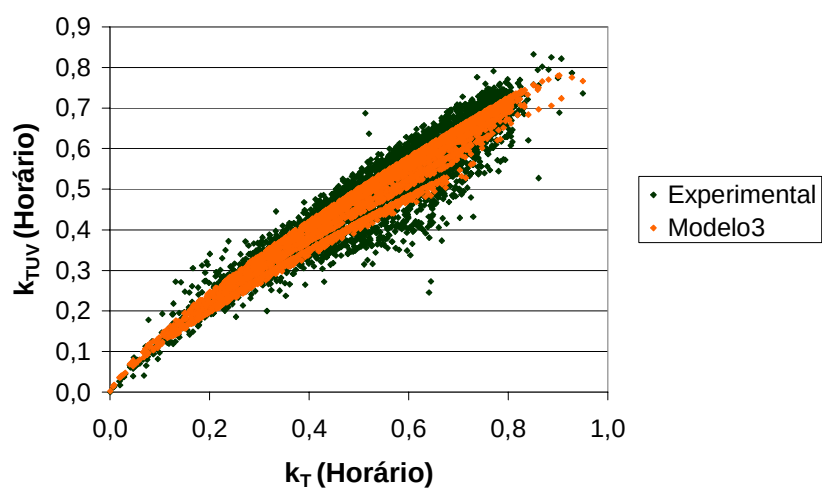


(a)

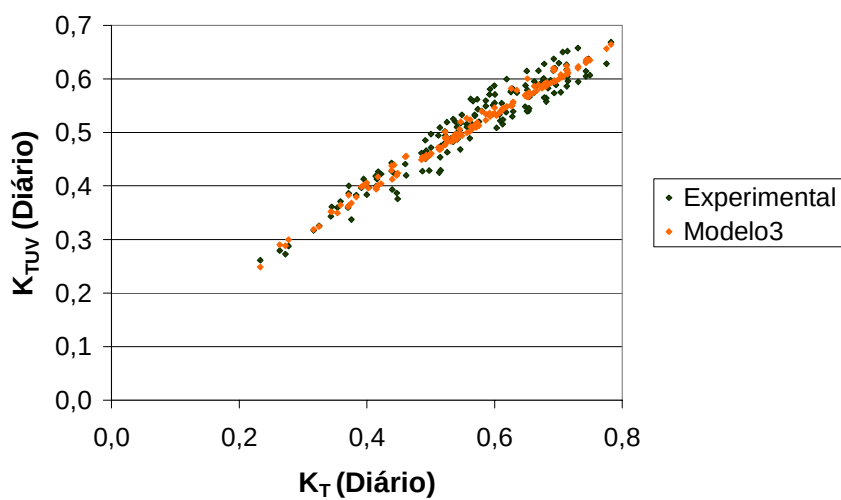


(b)

Figura 54 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 3 (laranja) para a cidade de Recife.

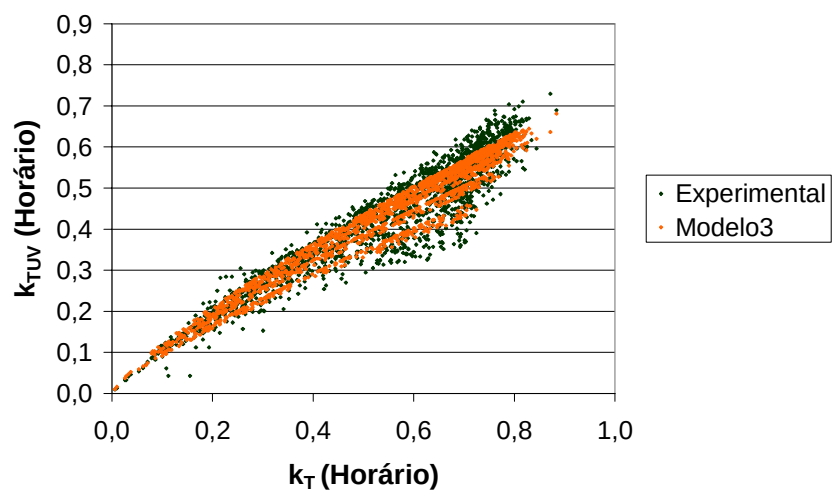


(a)

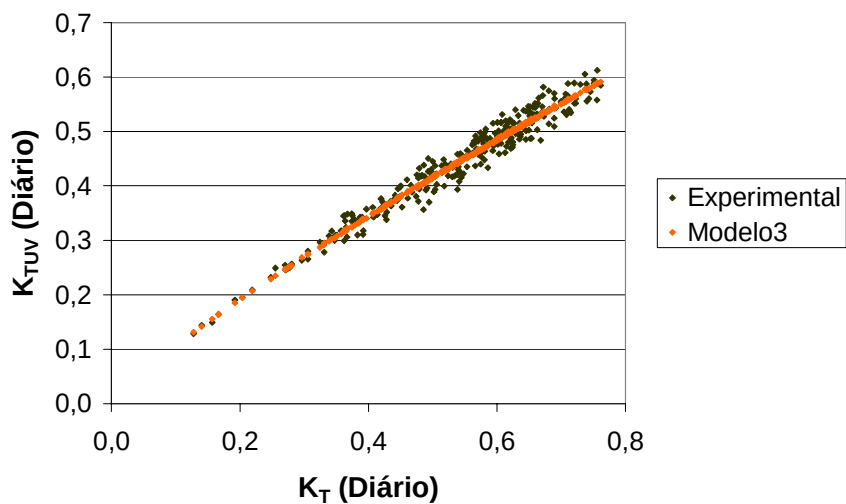


(b)

Figura 55 - Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde) e pelo modelo 3 (laranja) para a cidade de Pesqueira.



(a)



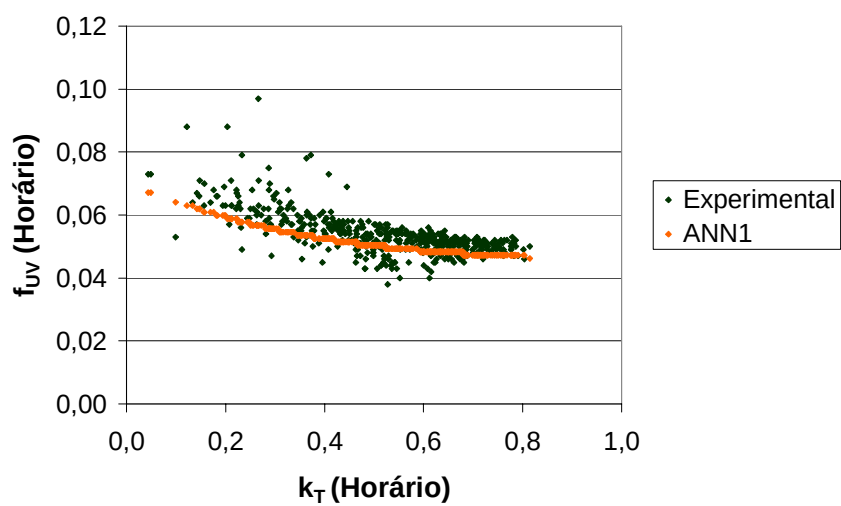
(b)

Figura 56 – Gráficos gerados a partir de dados experimentais horários (a) e diários (b) para validação (verde). Curva gerada pelo modelo 3 em laranja para a cidade de Araripina.

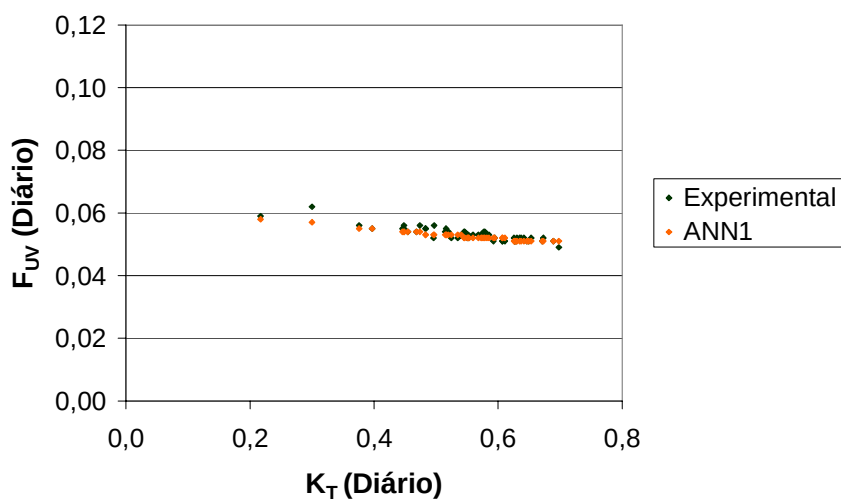
Para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina, o modelo 3 apresentou respectivamente um MBE% de 0,16%, 0,60%, -0,44% e um RMSE% de 5,83%, 7,10% e 6,77% para a correlação horária e um MBE% de -1,33%, -0,09%, -0,44% e um RMSE% 3,71%, 4,45%, 4,32% para as correlações diárias.

4.4.4 Redes ANN1 e ANN2

Como foi citado no item 3.3.4, os dados utilizados para as três localidades foram distribuídos aleatoriamente, sendo 50% deste período para treinamento da rede e geração dos outros modelos, 25% para validação da rede e os 25% restantes para testar e comparar o desempenho estatístico da rede com os outros modelos. É válido salientar que os 25% dos dados utilizados no teste da rede e dos modelos são totalmente distintos, não exercendo nenhuma influência nos resultados obtidos por meio dos indicadores estatísticos. Fazendo uso das mesmas variáveis utilizadas nos modelos 2 (polinomial) e 3 (regressão), foram respectivamente geradas as redes ANN1 e ANN2 para ambas as localidades. As Figuras 57, 58, 59, 60, 61 e 62 mostram os pontos experimentais para a validação, bem como os pontos experimentais utilizados para o treinamento das redes ANN1 e ANN2, para as cidades Recife, Pesqueira e Araripina.

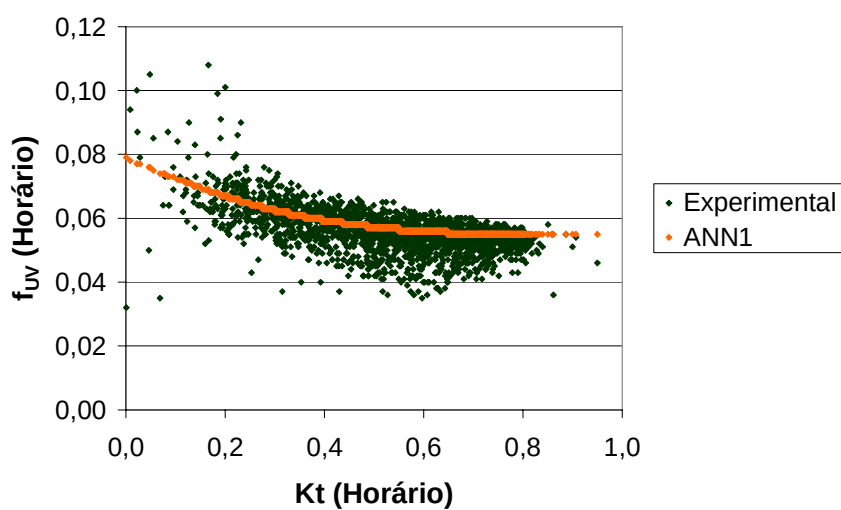


(a)

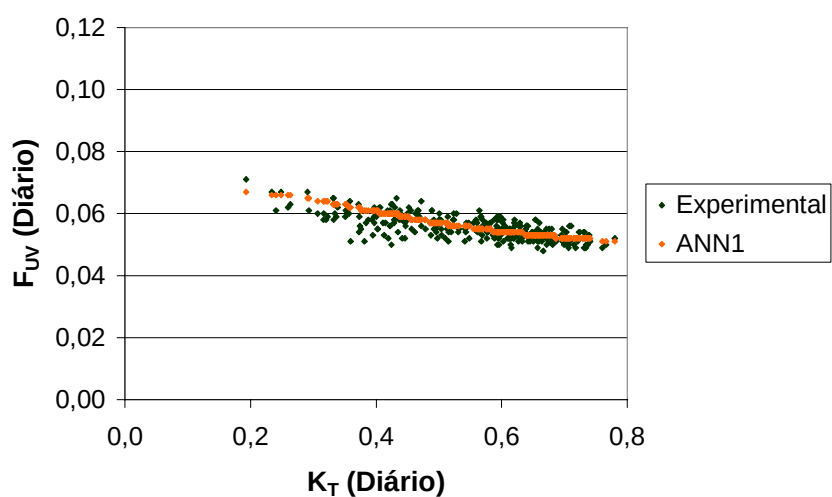


(b)

Figura 57 - Curvas geradas pela rede ANN1 a partir de dados horários (a) e diários (b) para a cidade de Recife. Dados experimentais em verde.

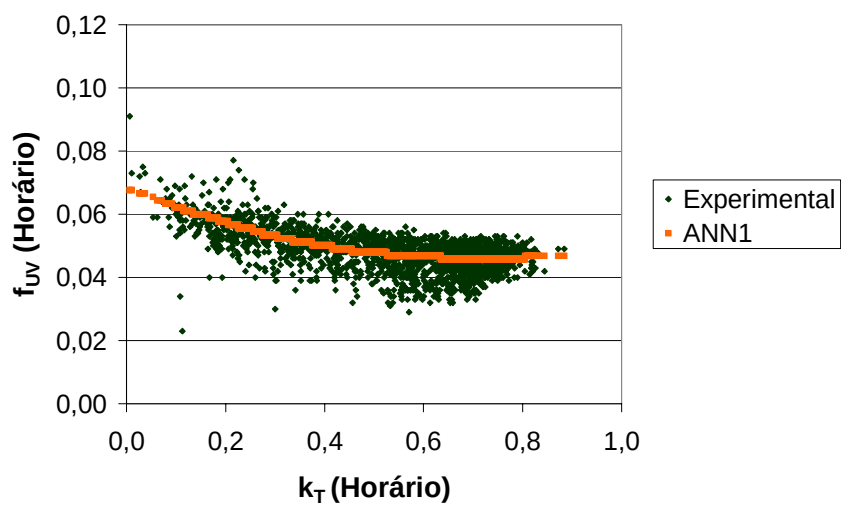


(a)

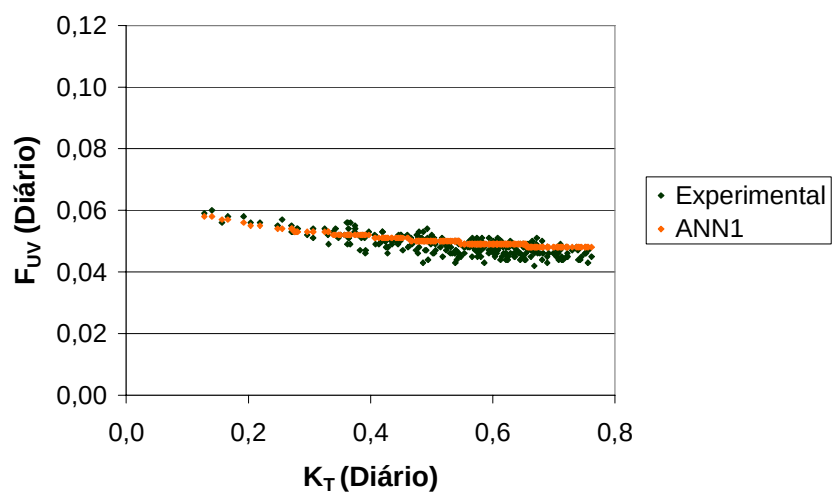


(b)

Figura 58 – Curvas geradas pela rede ANN1 a partir de dados horários (a) e diários (b) para a cidade de Pesqueira. Dados experimentais em verde.

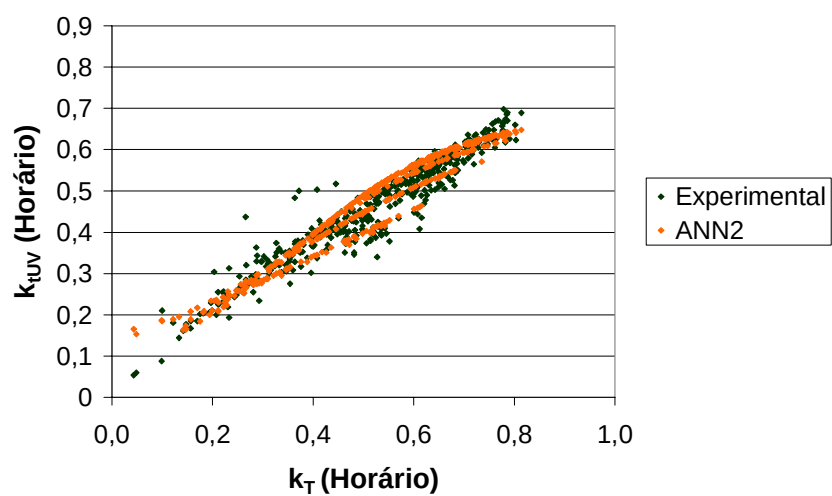


(a)

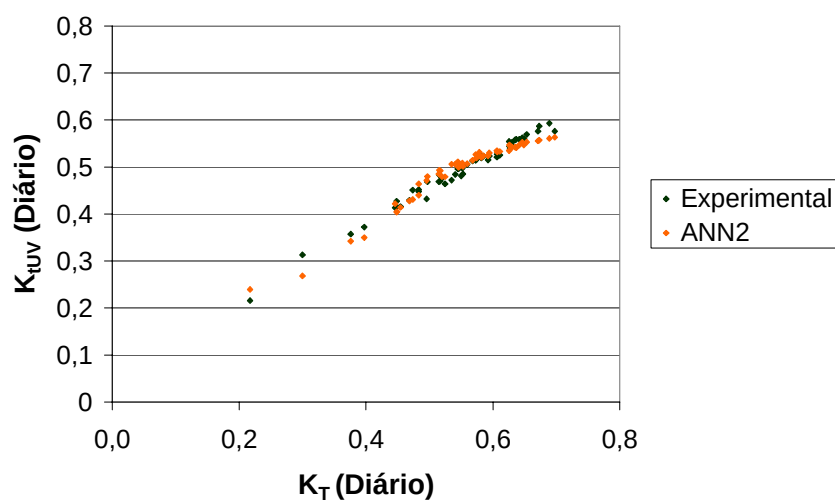


(b)

Figura 59 – Curvas geradas pela rede ANN1 a partir de dados horários (a) e diários (b) para a cidade de Araripina. Dados experimentais em verde.

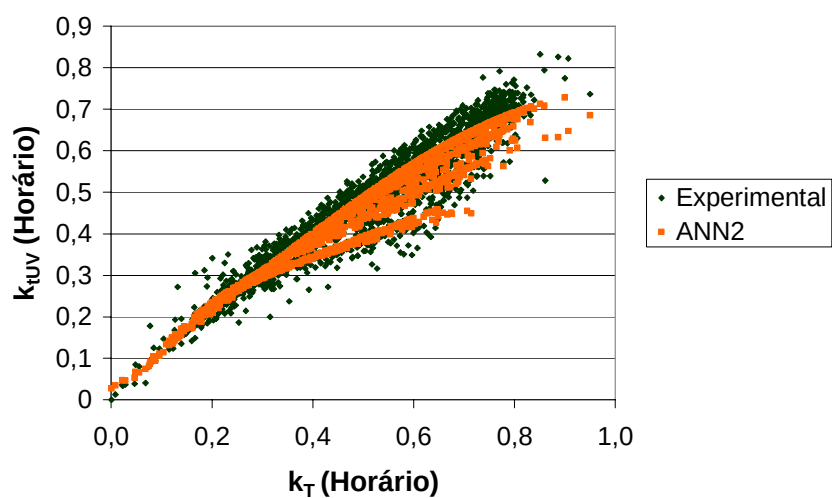


(a)

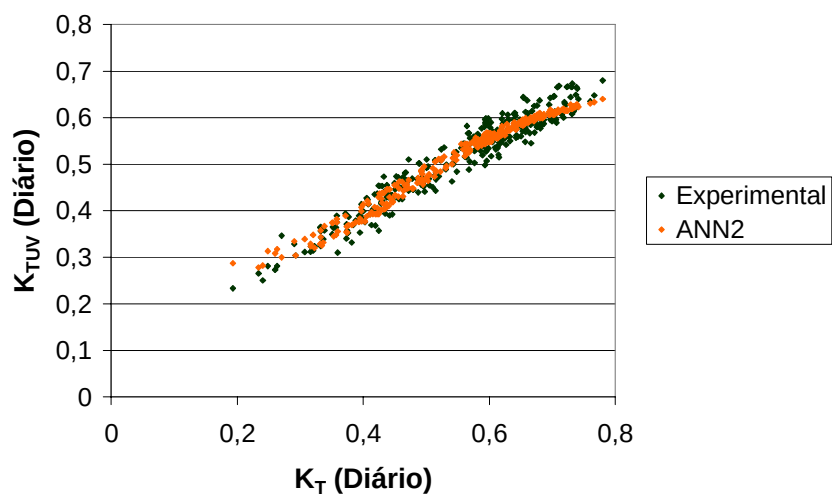


(b)

Figura 60 - Curvas geradas pela rede ANN2 a partir de dados horários (a) e diários (b) para a cidade de Recife. Dados experimentais em verde.

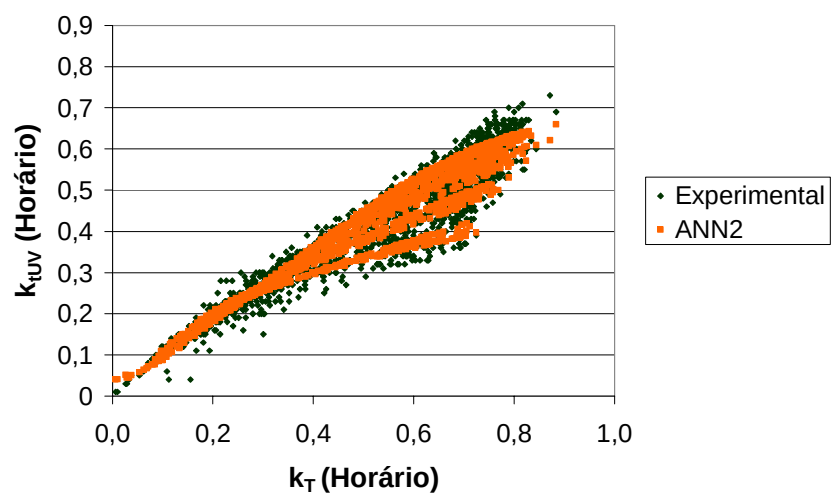


(a)

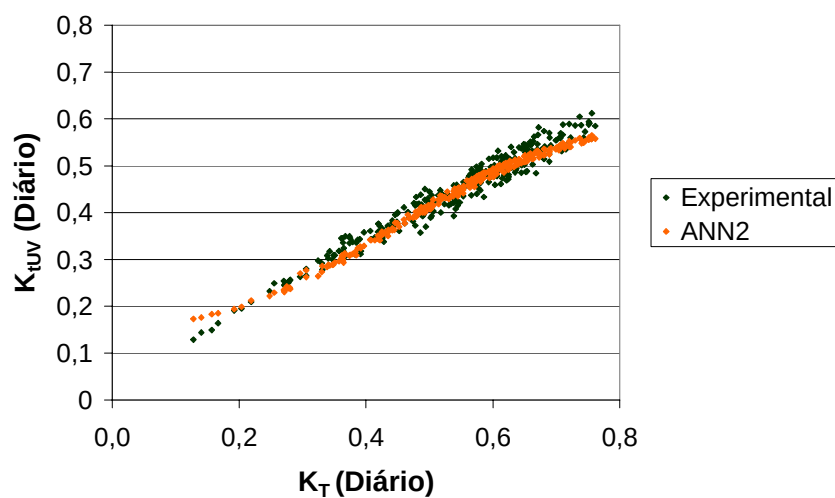


(b)

Figura 61 – Curvas geradas pela rede ANN2 a partir de dados horários (a) e diários (b) para a cidade de Pesqueira. Dados experimentais em verde.



(a)



(b)

Figura 62 – Curvas geradas pela rede ANN2 a partir de dados horários (a) e diários (b) para a cidade de Araripina. Dados experimentais em verde.

A Tabela 7 resume o desempenho estatístico dos modelos estatísticos e ANN que foram validados com 25% dos dados experimentais, não utilizados no processo de geração dos mesmos. Na maioria das situações a rede ANN2 apresentou um melhor desempenho estatístico para ambas as localidades, quando comparada com a rede ANN1 para estimativas da radiação

UV horárias e diárias. A exceção ocorreu para a cidade de Recife com relação à estimativa diária. Entre os modelos estatísticos, o Modelo3 apresentou os melhores resultados para estimativa horária da radiação UV e este fato era esperado devido à presença da massa de ar ótica relativa como uma segunda variável. Em resumo, o modelo3 e a rede ANN2 apresentaram um desempenho estatístico inferior a 5% para estimativa diária e inferior a 10% para estimativa horária, sendo assim um resultado bastante satisfatório para a estimativa da irradiação UV para as cidades de Recife, Pesqueira e Araripina e localidades circunvizinhas.

Tabela 7 – Validação dos modelos e das redes

Local	MBE%						RMSE%				
		Modelo1	Modelo2	Modelo3	ANN1	ANN2	Modelo1	Modelo2	Modelo3	ANN1	ANN2
Recife	Dia	-0,72	-0,56	-1,33	1,32	-0,01	2,29	2,53	3,71	2,60	3,42
	Hora	-1,23	0,42	0,16	-5,76	1,47	7,40	9,98	5,83	10,99	6,47
Pesqueira	Dia	-0,29	0,42	-0,13	1,04	0,14	4,48	4,96	4,45	5,32	4,70
	Hora	2,95	0,00	0,60	3,89	-2,05	9,99	10,90	7,10	11,69	6,90
Araripina	Dia	-0,32	-0,22	-0,44	2,40	-1,54	4,50	4,14	4,32	5,15	4,76
	Hora	0,42	-0,04	-0,18	1,41	1,21	9,54	11,00	6,77	10,70	6,51

4.5 Medidor UV

Um dos grandes motivos da escassez de informações sobre a radiação UV no Brasil está relacionado aos elevados custos operacionais na implantação de uma estação de medição. Os equipamentos como sensores e coletores de dados representam grandes investimentos. Mediante tal fato, foi possível desenvolver um coletor de dados portátil e de baixo custo para coletar a radiação global a partir de um piranômetro e estimar a radiação UV (A+B). A Figura 63 mostra o aspecto físico do coletor e o sensor utilizado na coleta de dados.



Figura 63 – Vista frontal do coletor de dados e do sensor para medição da radiação global.

4.5.1 Comparação estatística entre o coletor e o sistema de aquisição de dados CR1000 da CAMPBELL

O coletor foi calibrado para trabalhar com um piranômetro espectral de precisão (PSP) do fabricante Eppley. Para medir o desempenho estatístico do coletor, um segundo sensor PSP também do fabricante Eppley foi acoplado a um sistema de medição CR1000 do fabricante CAMPBELL. As medidas simultâneas de ambos os equipamentos resultaram no gráfico visto na Figura 64.

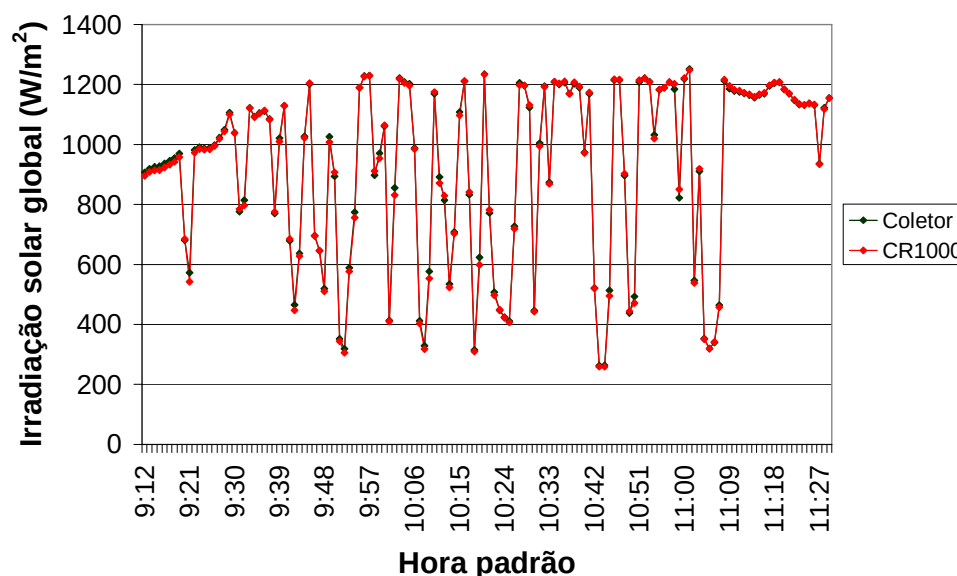
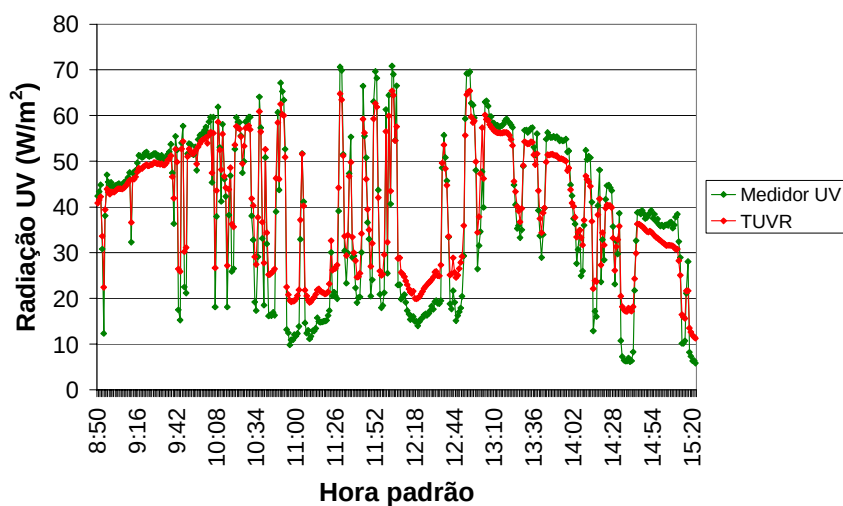


Figura 64 – Curvas da irradiação solar global geradas pelo coletor e o CR1000 em um período do dia juliano 303.

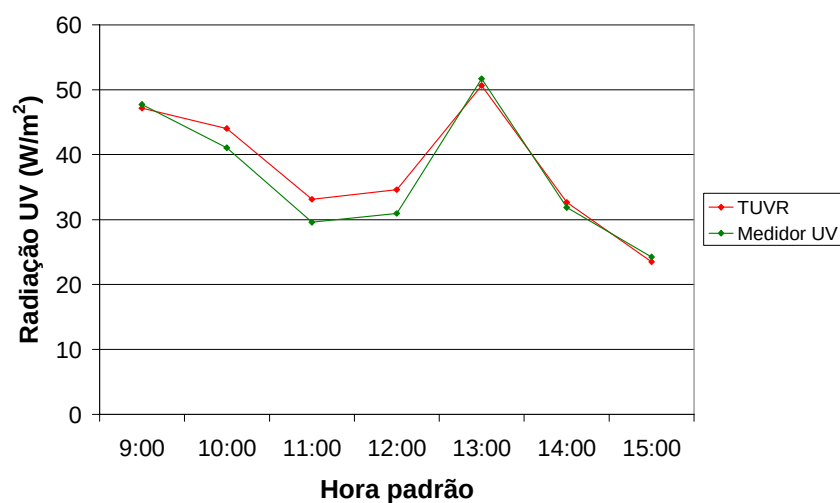
O coletor apresentou um bom desempenho estatístico quando comparado ao CR1000. Os dados coletados em escala de minutos apresentaram um MBE% = -0,298% e um RMSE% = 0,99%, que são valores bastante aceitáveis quando se leva em consideração a precisão de cada sensor.

4.5.2 Comparação entre as equações para estimativa da irradiação ultravioleta em escala de minutos, horária e diária.

Mediante a correlação da radiação UV e global em escala de minutos, horas e dias, geradas a partir dos dados experimentais da estação Pesqueira, foi possível encontrar um fator de conversão para ser adotado pelo medidor UV. Os modelos em escala de minutos, horas e dias apresentaram respectivamente um MBE% igual a 2,87%, 2,95%, 0,4% e um RMSE% de 16,10%, 9,99% e 6,34%. Espera-se desta forma, que os dados calculados pelo coletor apresente um desempenho estatístico semelhante aos modelos. As Figuras 65 (a) e (b) mostram respectivamente as curvas em escala de minuto e hora geradas pelo coletor (verde) na cidade de Pesqueira no período de 8:50 horas a 15:20 do dia juliano 55 de 2011. Em vermelho destaca-se a curva gerada por um TUVR acoplado a um sistema de aquisição de dados CR1000.



(a)



(b)

Figura 65 – Curvas geradas por um TUVR acoplado a um CR1000 (vermelho) e pelo medidor UV a partir da radiação solar global (verde).

Os dados fornecidos em escala de minuto pelo medidor apresentaram um $MBE\% = 3,46\%$ e um $RMSE\% = 13,01\%$, quando comparados com os dados gerados pelo TUVR. Os valores médios horários apresentaram um $MBE\% = 3,20\%$ e um $RMSE\% = 6,90\%$. Estes resultados são aceitáveis, uma vez que os modelos mostrados anteriormente indicavam um $RMSE\% = 16,10\%$

e 9,99%. Devido ao seu baixo custo, portabilidade e simplicidade, o medidor UV pode ser utilizado para coletar informações sobre a radiação global e UV (A+B) nas mais diversas localidades, podendo assim, ser considerado um equipamento de boa confiabilidade.

4.6 Radiação solar UV (A+B) e IUV máximos mensais no estado de Pernambuco.

O conhecimento dos índices ultravioleta (IUV) permite comparar e entender o grau de agressividade da radiação eritêmica em uma determinada localidade. O uso do modelo paramétrico computacional SPECTRAL2 possibilitou neste trabalho, o cálculo da radiação UV (A+B) e IUV máximos em outras localidades por meio de dados de entrada descritos anteriormente. Com o objetivo de comparar os resultados estimados pelo SPECTRAL2 e confirmar a boa qualidade dos dados de entrada, os resultados de radiação UV (A+B) obtidos foram comparados com os dados experimentais disponíveis e com o modelo diário (Modelo3) para estimativa da radiação UV (A+B), desenvolvido para cidade de Pesqueira e apresentado anteriormente.

$$< K_{TUV} > = 0,798 K_T^{0,813} m_r^{0,392} \quad (54)$$

Foi também realizada uma comparação entre os IUV máximos estimados pelo SPECTRAL2 com os dados medidos pela estação Recife. Os indicadores estatísticos utilizados foram também o MBE% (mean bias error) e RMSE% (root mean square error). A Tabela 8 mostra os valores de radiação UV(A+B) máximos mensais calculados pelo SPECTRAL2 para o estado de Pernambuco.

Tabela 8 – Valores máximos mensais (W/m^2) da radiação UV (A+B)

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ann
Araripina	28,9	28,5	29,3	27,3	25,2	23,9	25,5	28,3	30,1	31,2	30,1	29,8	28,2
Arcoverde	31,3	30,2	30,3	28,3	25,9	22,8	24,6	27,7	30,2	31,9	32,1	30,5	28,8
Caruaru	30,0	28,7	29,6	27,0	24,0	21,5	22,7	25,0	27,6	29,4	30,4	29,0	27,1
Floresta	29,5	29,6	30,0	26,8	24,1	21,7	23,0	26,1	28,5	29,9	29,8	29,3	27,3
Ouricuri	29,0	29,4	28,9	26,5	23,6	22,0	23,7	26,8	28,6	30,2	30,3	29,5	27,4
Petrolina	29,8	29,9	28,8	26,4	23,6	22,2	23,0	26,2	28,2	30,0	30,4	29,6	27,4
Recife	29,0	30,2	29,4	26,1	23,3	21,4	22,4	25,3	27,8	29,5	30,0	28,5	26,9
S Talhada	29,2	30,1	29,7	27,0	24,5	22,4	23,7	26,1	28,9	30,2	30,2	29,8	27,6

Os dados medidos pela estação Pesqueira, localizada a 45 km da cidade de Arcoverde e que possui condições climáticas semelhantes, foram comparados aos valores da radiação UV (A+B) estimadas pelo SPECTRAL2. Foram selecionados os valores máximos de radiação UV (A+B) de cada mês do ano de 2009. Estes dados foram obtidos pela estação Pesqueira através de um sensor TUVR (Total Ultraviolet Radiometer). Mediante uso da profundidade ótica determinada para a cidade de Arcoverde, considerando as coordenadas geográficas da cidade de Pesqueira e utilizando o SPECTRAL2, foi possível estimar a radiação UV (A+B) máxima para a cidade de Pesqueira. A Figura 66 mostra as curvas resultantes. A curva em azul é resultante do modelo gerado para a cidade de Pesqueira.

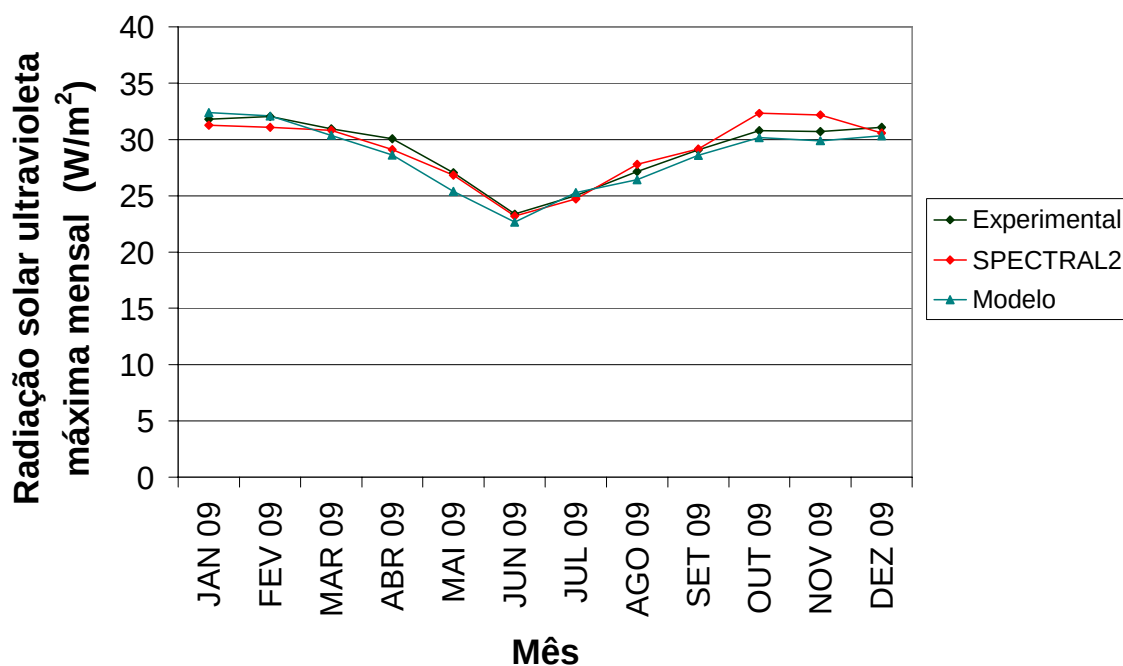


Figura 66 – Comparação entre a radiação UV (A+B) estimada pelo SPECTRAL2, por dados experimentais e pelo modelo estatístico gerado para a cidade de Pesqueira.

O gráfico mostra que os níveis de radiação UV (A+B) máximos mensais, no ano de 2009, ocorreram na primavera / verão (setembro a fevereiro) e mínimos no outono / inverno (março a agosto), mostrando mais uma vez, o comportamento típico no Nordeste do Brasil. Os valores estimados pelo SPECTRL2 apresentaram um MBE% = -0,016% e um RMSE% = 2,7% e o modelo um MBE% = -1,98% e um RMSE% = 2,86%, quando comparados com os dados experimentais, confirmando sua boa capacidade de predição para dias de céu claro. É válido salientar que os bons resultados estão diretamente relacionados à boa qualidade dos dados referentes às profundidades ópticas de aerossóis estimadas. A Tabela 9 representa os índices ultravioleta máximos estimados pelo SPECTRAL2 para as diversas localidades.

Tabela 9 – Valores máximos do IUV mensal (meio-dia).

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ann
Araripina	12	13	13	12	11	10	10	12	14	14	13	13	12
Arcoverde	13	14	13	12	11	9	10	12	14	15	14	12	12
Caruaru	13	12	13	12	10	8	9	10	12	13	13	12	11
Floresta	12	13	13	12	10	9	9	11	13	14	13	12	12
Ouricuri	12	13	13	12	10	9	10	12	13	14	13	12	12
Petrolina	12	13	13	12	10	9	9	11	13	13	13	12	12
Recife	12	14	14	12	10	9	9	11	13	14	13	12	12
S Talhada	12	14	13	12	10	9	9	11	13	13	13	12	12

Um processo semelhante foi feito para estimar o IUV (meio-dia) para os meses de máxima radiação UV (A+B) no ano de 2010 na cidade de Recife, Figura 67.

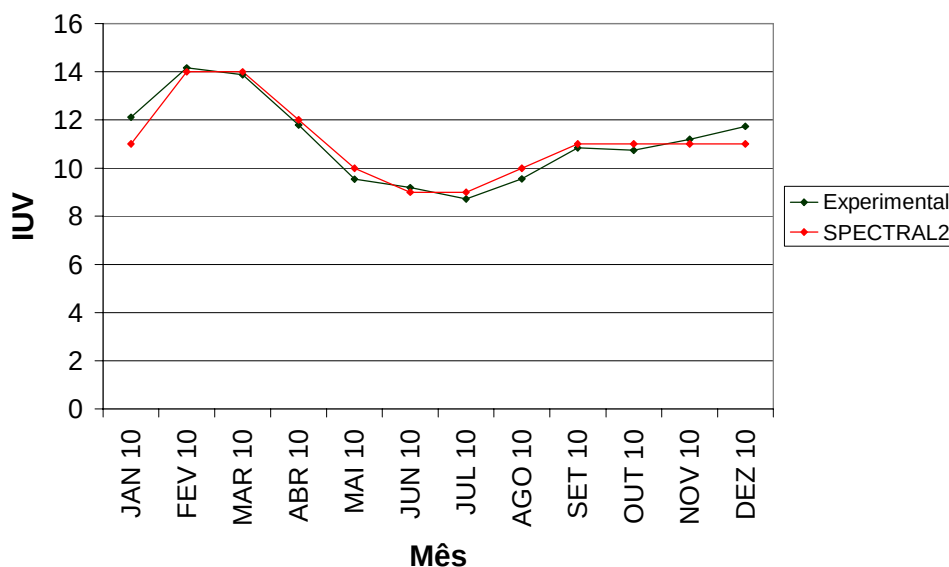
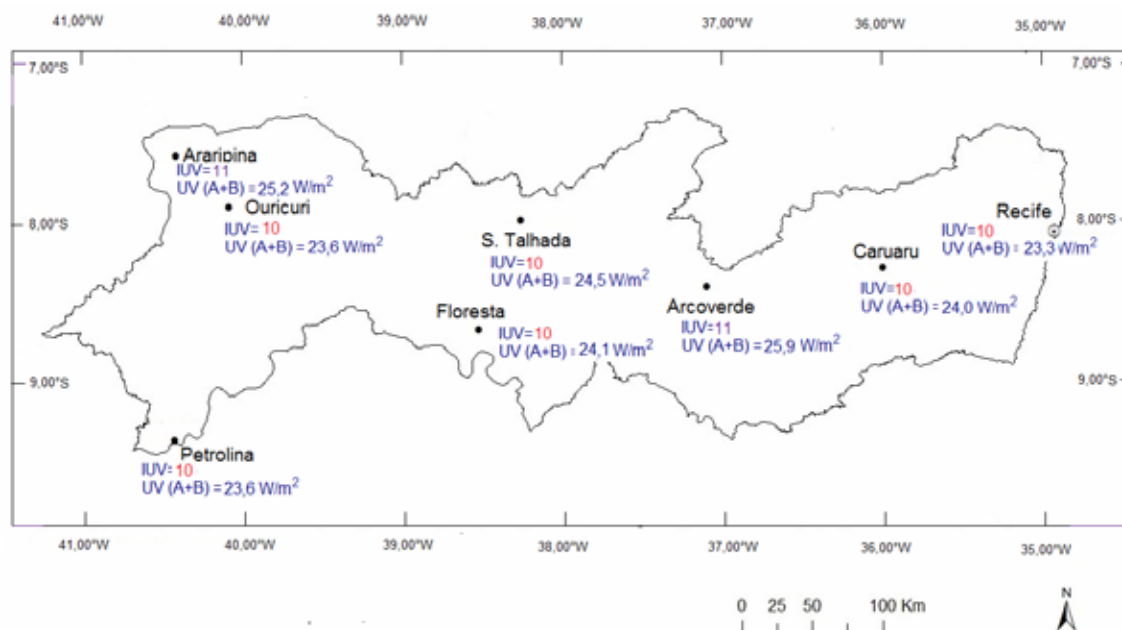


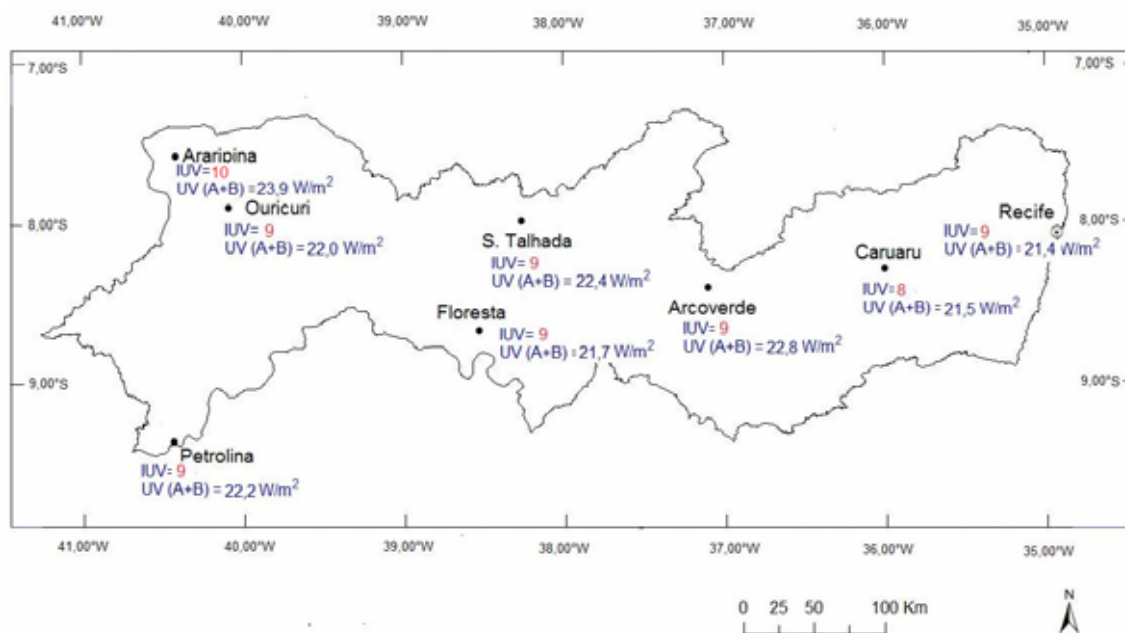
Figura 67 – Comparação entre o IUV máximo mensal estimado pelo SPECTRAL2 e por dados experimentais para a cidade de Recife.

Para a cidade de Recife os valores máximos de IUV (meio-dia) mensais ocorreram nos meses fevereiro e março, onde foram observados índices de ozônio e profundidade ótica de aerossóis com valores um pouco mais reduzidos. Os valores estimados, e também comparados com os dados experimentais apresentaram um MBE% = -2,95 %, e um RMSE% = 4,10 %. Estes resultados confirmam, mais uma vez, uma boa confiabilidade dos valores estimados. Ainda com

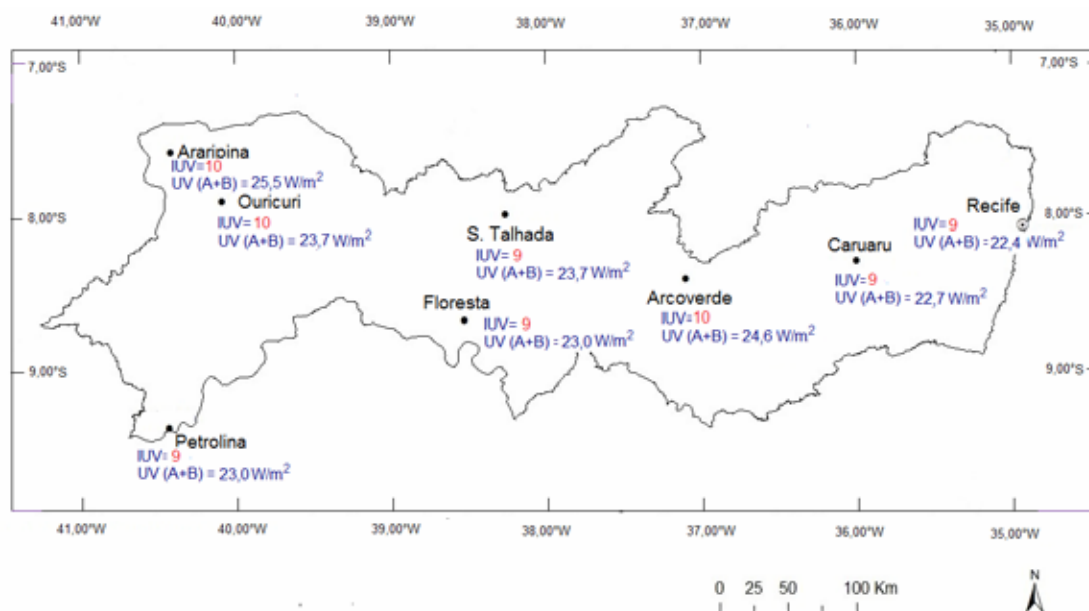
relação aos dados obtidos pelo SPECTRAL2 observa-se que os níveis de radiação solar UV (A+B) máximos mensais se mostram elevados para todos os meses no estado de Pernambuco. Mediante a Figura 68 pode-se perceber que mesmo nos meses de inverno (maio, junho e julho) os índices ultravioleta ainda são classificados como muito altos.



(a)



(b)



(c)

Figura 68 – Radiação solar UV (A+B) e IUV para os meses de maio (a), junho (b) e julho (c). Em lilás IUV extremo e em vermelho IUV muito alto.

O IUV máximo médio anual é considerado extremo para todas as localidades, Figura 69.

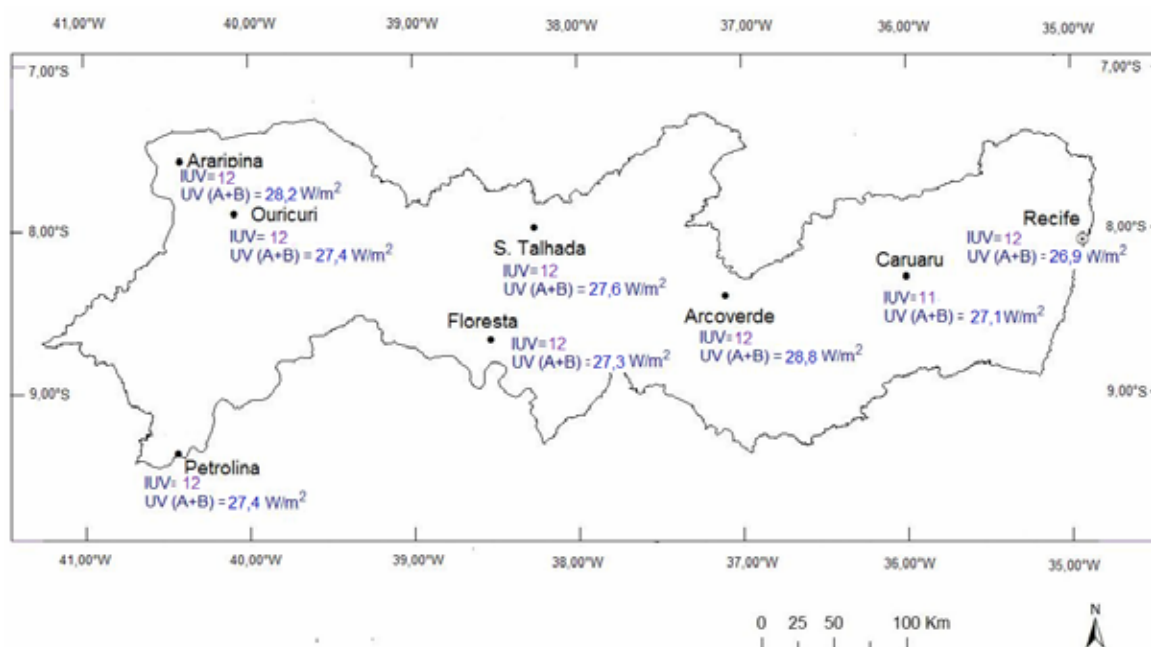
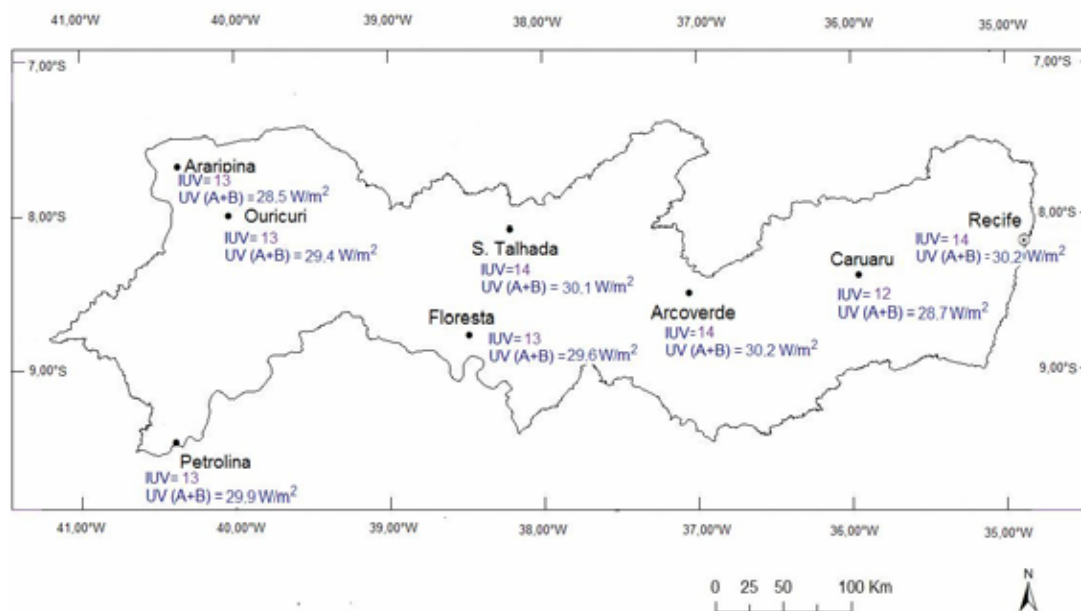
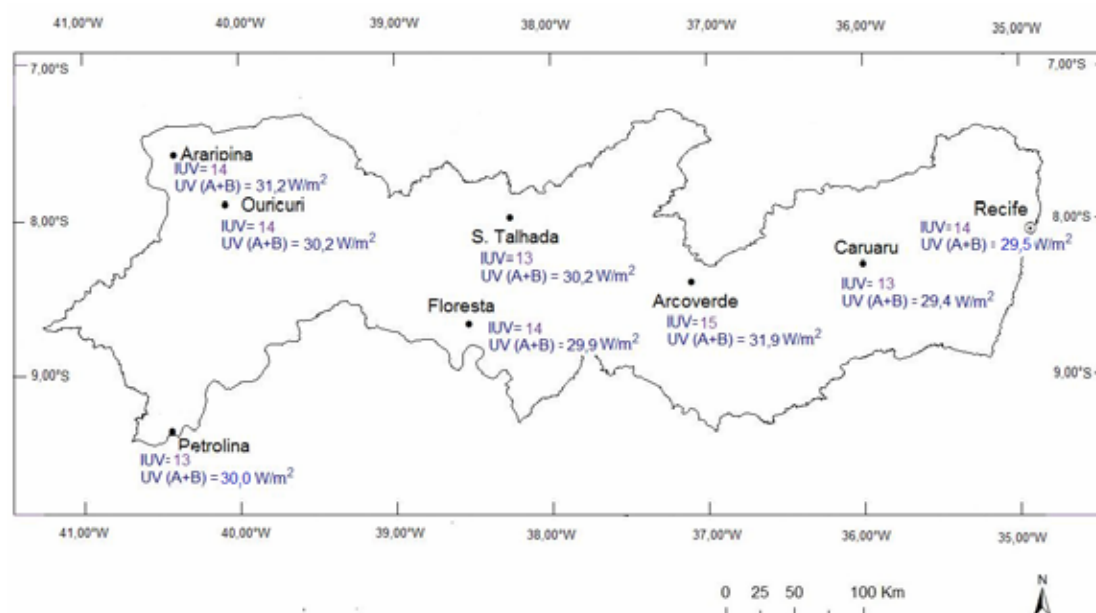


Figura 69 – Radiação UV (A+B) e IUV médio anual para todas as localidades.

Os níveis de radiação UV (A+B) máximos mensais ocorrem, para a maioria das localidades, nos meses de fevereiro e outubro, conforme a Figura 70.



(a)



(b)

Figura 70 – Radiação UV (A+B) e IUV máximo mensal nos meses de fevereiro (a) e outubro (b).

Os dados estimados juntamente com a análise realizada neste trabalho transmitem boa confiabilidade, precisão aceitável e confirmam os elevados níveis de radiação UV no estado de Pernambuco.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo da radiação UV (A+B) e eritêmica para o estado de Pernambuco mostrou uma forte dependência horária e sazonal típica da região Nordeste do Brasil. Os níveis de radiação UV mais elevados são alcançados ao meio-dia e nos períodos de baixa nebulosidade (verão). As medidas horárias mostraram que os níveis da radiação UV (A+B) são mais elevados para a cidade de Pesqueira e 10% superior em relação às cidades de Araripina e Recife. Este fato se deve à quantidade de partículas suspensas, devido ao extrativismo do gesso na cidade de Araripina e no caso da cidade de Recife, à sua baixa altitude e maior quantidade de água precipitável. Contudo, para a capital Recife, o estudo mostrou, que no geral, o IUV horário médio mensal, para qualquer condição de céu, é considerado alto a partir das 9:00 da manhã (hora padrão) no verão e mesmo nos períodos de inverno ao meio-dia, ou seja, a proteção efetiva contra a irradiação eritêmica deve ser adotada pela população recifense ao longo de todo ano. Grande parte dos dados medidos e estimados para as diversas localidades do estado de Pernambuco, apresentaram um IUV extremo ao meio-dia na maioria dos meses, alcançando em alguns casos o valor 14 e no caso específico da cidade de Arcoverde, o valor 15.

Os modelos gerados mediante a relação entre a radiação solar diária UV (A+B) pela radiação solar diária global (modelo1), correlação polinomial da fração solar média ultravioleta em função do índice de transmitância da irradiação solar global (modelo 2), as regressões múltiplas do índice de transmitância atmosférico ultravioleta e da massa de ar em função do índice de transmitância da irradiação solar global (modelo 3) e os modelos ANN1 e ANN2, possibilitam a estimativa da radiação solar ultravioleta diária em regiões circunvizinhas às cidades de Recife, Pesqueira e Araripina, cujas disponibilidades destes dados são inexistentes. Conforme os indicativos estatísticos conclui-se que o Modelo3 apresenta os melhores resultados para estimativa horária da radiação UV e este fato era esperado devido à presença da massa de ar ótica relativa como uma segunda variável. Na maioria das situações a rede ANN2 apresentou um melhor desempenho estatístico para ambas as localidades, quando comparada com a rede ANN1 para estimativas da radiação UV horárias e diárias. Em resumo, o modelo3 e a rede ANN2 apresentaram um RMSE% 5% para estimativa diária e inferior a 10% para estimativa horária, sendo considerados dessa forma, resultados bem satisfatórios. Como resultado dos estudos e modelos gerados, foi possível também, confeccionar um medidor UV de baixo custo e de

precisão aceitável e que poderá ampliar o conhecimento e as pesquisas nesse segmento, permitindo uma monitoração ampla a nível do estado e do Brasil.

Por fim, as medições realizadas neste trabalho indicam a necessidade de continuar e ampliar a rede de medição, além de intensificar as campanhas públicas educativas de prevenção contra o câncer de pele e cataratas a partir do uso de protetores solar, períodos de exposição e conscientização dos riscos à qual a população está sendo submetida em nosso estado. Como continuidade deste trabalho, devido a grande diversidade climática do estado de Pernambuco, pretende-se expandir os pontos de coleta de dados, fazendo uso do medidor UV desenvolvido, e assim obter informações mais precisas, possibilitando a elaboração de um mapa UV mais detalhado para o estado de Pernambuco.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CANCER SOCIETY. Cancer facts & figures (2007). Disponível em: <http://www.cancer.org/downloads/STT/CAFF2007PWSecured.pdf>. Acesso em: ago. 2008.
- ANDRADY, A. L.; HAMID, S. H.; HU, X.; TORIKAI, A. *Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials*. Journal Photochemistry and Photobiology, v. 46, p. 96 – 103, 1998.
- BARBERO, F. J.; LOPEZ, G.; BATLLES, F.J. *Determination of daily solar ultraviolet radiation using statistical models and artificial neural networks*. Annales Geophysicae, v. 24, p.2105-2114, 2006.
- BIRD, R.; RIORDAN, C. *Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres*. Solar Energy, v.25, p. 87-97, 1986.
- CAÑADA, J.; PEDROS, G.; BOSCA, J. V., Relationships between UV (0,290 – 0,385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. Energy, v. 28, p.199 – 217, 2003.
- CAÑADA, J.; ESTEVE, A. R.; MARÍN, M. P.; UTRILLAS, M. P.; TENA, F.; MARTÍNEZ-LOZANO, J. A. *Study of erythemal, UV (A+B) and global solar radiation in Valência (Spain)*. International Journal of Clomatology, v.28, p.693 – 702, 2008.
- CARBONE, S.; MANFRO, R. L.; PERES, R.; BERTAGOLLI, C.; PINHEIRO, D. K.; SCHUCH, A. M. P.; KAYANO, M. T.; FERREIRA, N. J.; MAKITA, K.; SCHUCH, N. *Modelo empírico para determinação do índice UV, obtido com dados do radiômetro e do biômetro para o Observatório Espacial do Sul*. 9º International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Salvador, 2005.
- CORRÊA, M. P. *A divulgação do índice ultravioleta como prevenção ao excesso de exposição ao sol: uma contribuição da meteorologia para o desenvolvimento de políticas públicas para a saúde no País*. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza, 2004. Anais. CD-ROM (2004a).
- CORRÊA, M. P.; FAUSTO, A. M. F.; OKUNO, E.; MOL, A. W.; MOTTA, B. G.; CORREIA, A.; MORÉGULA, A.; SANTOS, J. C.; ANDRADE, M. E. A.; SANTOS, C. M. B.; COSTA, JR. J. F. S.; COSTA, R. N.; MAGALHÃES, E. R. *Resultados preliminares do projeto integrado de medidas de radiação ultravioleta do Sul da Bahia*. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis, 2006.
- CORRÊA, M. P.; CEBALLOS, J. C. *UVB surface albedo measurements using biometers*. Revista Brasileira de Geofísica, v.26, n. 4, p.411-416, 2008.
- DIFEY, B. L. *Solar ultraviolet radiation effects on biological systems – A Review*. Phys. Med. Bio., v. 36, n. 3, p. 299-328, 1991.

DUFFIE, J. A.; WILLIAM A. *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley – Interscience, 2° ed., 1991. 919p.

ENCHER, E.; SOUZA, M. P. *A lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 276-282, 2001.

EPPLEY, *The Eppley laboratory, inc*. Disponível em: <http://www.eppleylab.com>. Acesso: dez. 2010.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES E. N.; PAI, A. D.; OLIVEIRA A. P.; SOARES J. *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, 2007.

ESCOBEDO, J. F.; GOMES E. N.; OLIVEIRA A. P.; SOARES J. *Fração solar K_{UV} , K_{PAR} e K_{IV} : Análise variacional e equações de estimativa em função de K_T* . I CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza, 2007.

FOYO-MORENO, I.; VIDA, J.; OLMO F.J.; ALADOS-ARBOLETAS L. *A simple all weather model to estimating ultraviolet solar radiation (290-385 nm)*. Journal of Applied Meteorology, v.38, p. 1020-1026, 1998.

FOYO-MORENO, I.; VIDA, J.; OLMO F.J.; ALADOS-ARBOLETAS L. *Estimating solar ultraviolet irradiance (290-385 nm) by means of the spectral parametric models: SPCTRAL2 and SMARTS2*. Annales Geophysicae, v.18, p. 1382-1389, 2000.

GALLEGOS H. G. *Curso sobre radiação solar avaliação e sua medição*. II Jornada de energia solar (Sol para todos). Recife, 2005.

GUEYMARD, C. *SMART2, A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: Algorithms and performance assessment*, Florida Solar Energy Center, FSEC-PF-270-95, 1995.

INCA – Instituto Nacional de Câncer. *Incidência de câncer no Brasil*. Disponível em: <http://www.inca.gov.br/estimativa/2009>. Acesso em: mar. 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. *Fontes normais climatológicas (1961-1990)*. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. *Centro de previsão de tempo e estudos climáticos*. Disponível em: <http://www.tempo1.cptec.inpe.br/cidades/previsão>. Acesso: 30 /07/10

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N. J.; PINHEIRO D. K. *Evidence for an ozone hole perturbation at 30° south*. Elsevier Science, v. 30, n. 1, p. 1481 – 1488, 1995.

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E.; PAES LEME, N.; SILVA, A. A. *A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa*. Brazilian Journal Geophysics, v. 18, n. 1, p. 63-73, 2000.

KRUMMEL, P.; FRASER, P. *2007 Antarctic ozone hole summary report – 22 october 2007*. Csiro Marine and Atmospheric Reseach. Disponível em: <http://environment.gov.au/atmosphere/ozone/publications/pubs/ozone-reports22oct07.pdf>. Acesso em: out. 2008.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. *The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation*. Solar Energy, v.3, n.4, p. 1-19, 1960.

MARTINEZ-LOZANO, J. A.; TENA, F.; UTRILLAS M. P. *Ratio of UV global broad band irradiation in Valencia, Spain*. International Journal of Climatology, v.19, p. 903 – 911, 1999.

MOLINEAUX, B.; INEICHEN, P.; O'NEIL, N. *Equivalence of pyrheiliometric and monochromatic aerosol optical depths at a single key wavelenght*. Applied Optics v.37, p. 7008-7018, 1998.

OLIVEIRA, G. F.; CAMPOS, R. L. C.; TEMPORAL, W. F. *Efeitos da Radiação Ultravioleta nas Atividades Aéreas e Terrestres*. RMAB, v. 55, n.1/2, p. 19-26, 2005.

PAROSCIENTIFIC, Inc. (2004). *Met3A calculation of dew point*. Disponível em: www.paroscientific.com/dewpoint.htm. Acesso em: set. 2008.

PIACENTINI, R.; SALUM, G. M.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. *Extreme total irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil*. Renewable Energy, v. 36, p.409 – 412, 2011.

ROBAA, S. M. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban área, Egypt. Solar Energy, v. 77, p. 251 – 259, 2004.

SABURRG, J. M.; PARISI, A. V. *Spectral dependency of cloud enhanced UV irradiance*. Elsevier, n.81, p.206-214, 2006.

SIEMENS, *Isoladores poliméricos*. Disponível em: www.energy.siemens.com/hq/apps/search/en/index.php. Acesso em: jun. 2011

SILVA, R. G. *Predição da configuração de sombras de árvores em pastagem para bovinos*. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, Sp, v.26, p.268-281, 2006.

SOLARLIGHT, *Atmospheric instrumentation*. Disponível em: www.solarlight.com/products/products.html. Acesso em: jul. 2011.

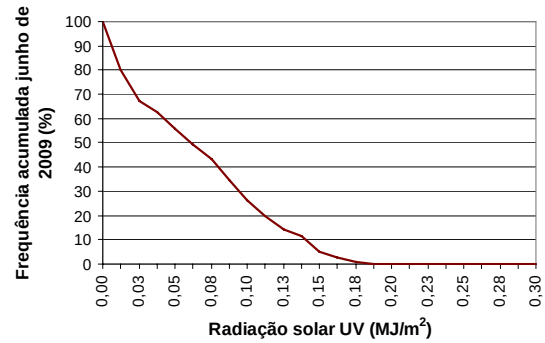
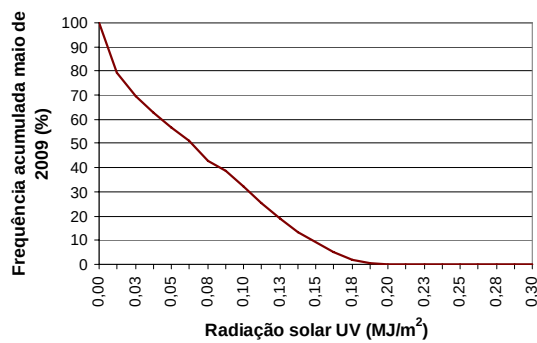
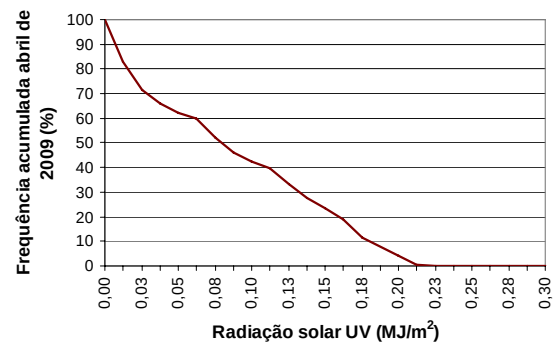
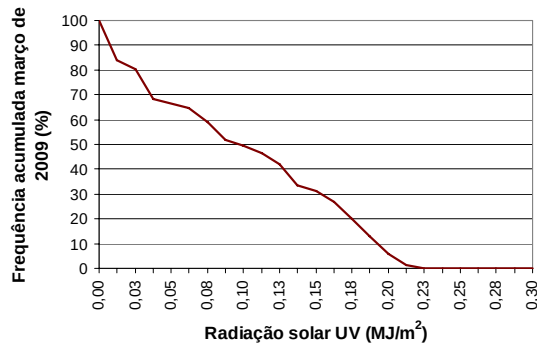
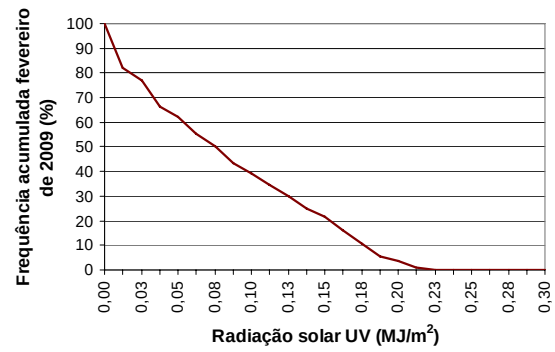
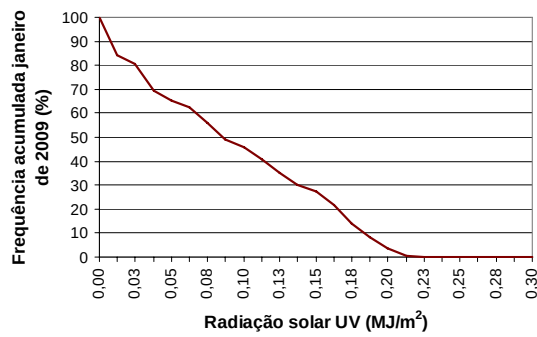
TIBA, C.; LEAL, S.; BARBOSA, E.; MELO, R. *Luminous efficacy of solar radiation for the northeast of Brazil*. World Renewable Energy Congress VIII. Denver, 2004.

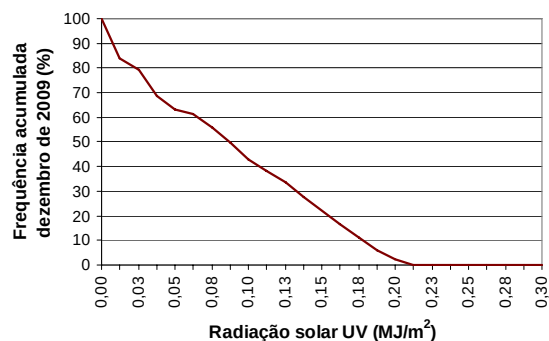
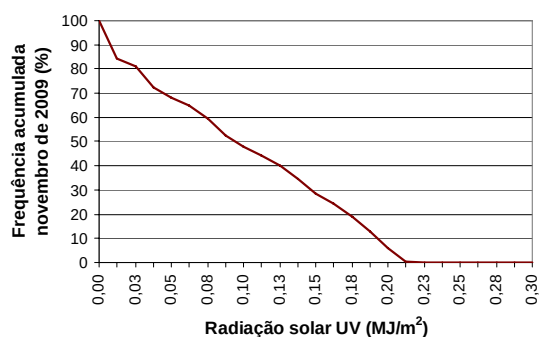
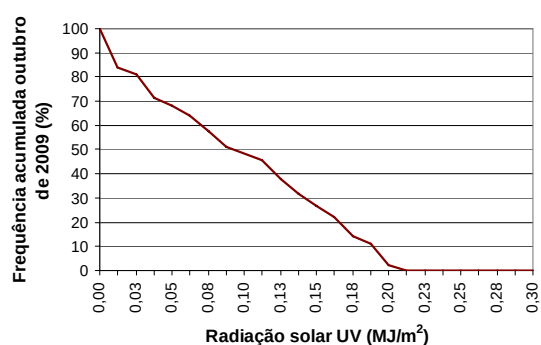
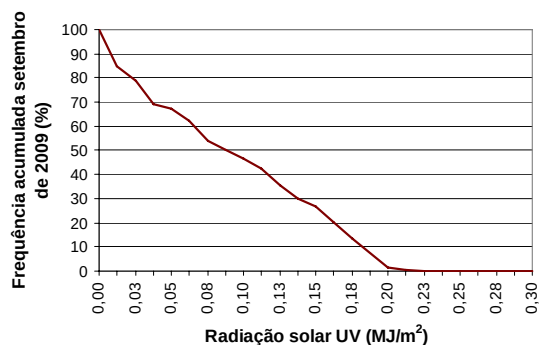
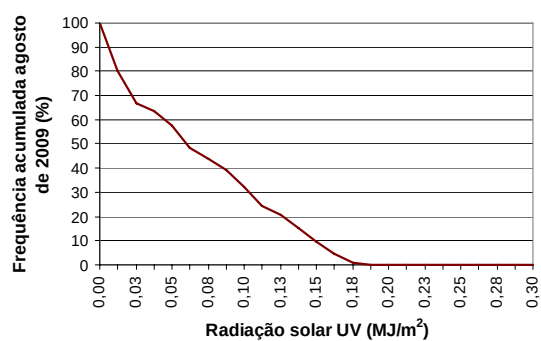
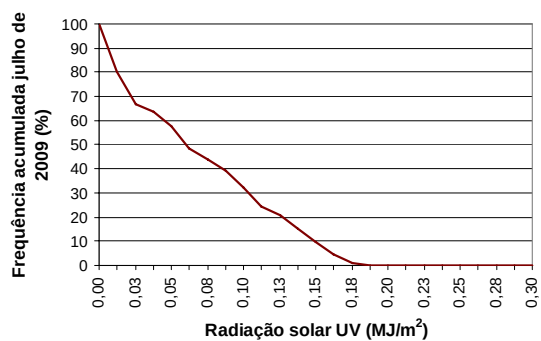
TIBA, C., PIMENTEL, V. M. *Estimating atmospheric Linke turbidity index from climatic dat for Pernambuco*. ISES Solar World Congress 2009, Johnnesburg -South Africa, 2009.

WORLD HEALT ORGANIZATION 2010 – WHO, *Sunbeds, tanning and UV exposure*. Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs287/en>. Acesso em: jun 2011.

ANEXO I

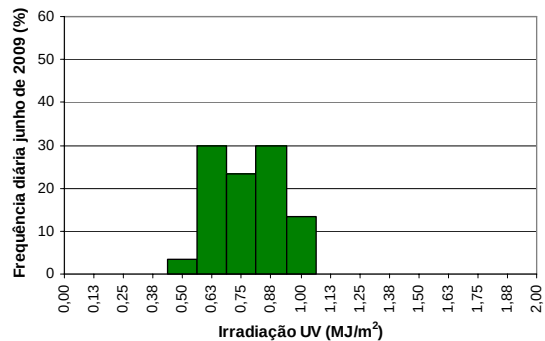
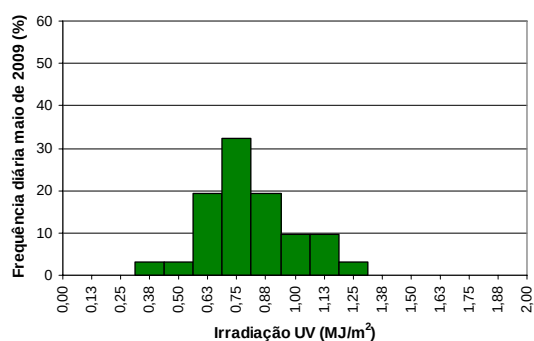
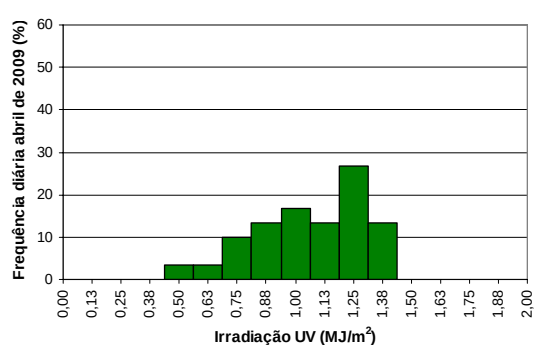
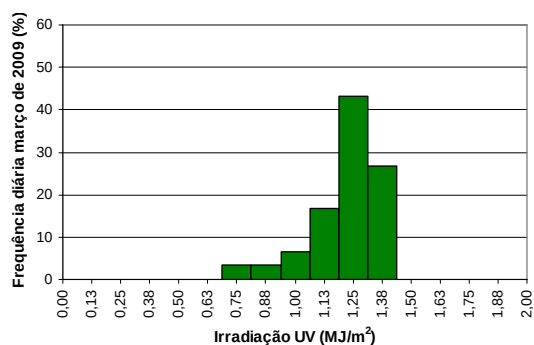
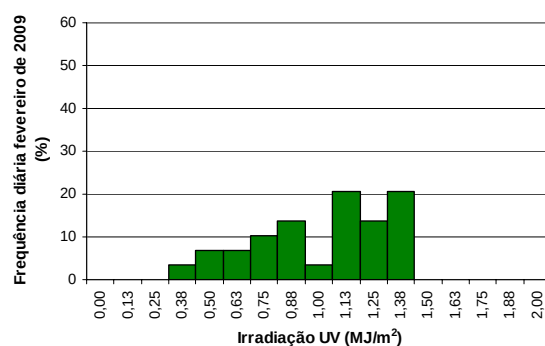
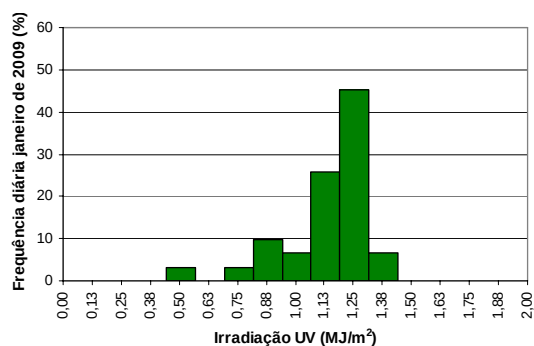
Frequência acumulada da radiação UV (A+B) horária, para a cidade de Pesqueira, de janeiro a dezembro de 2009

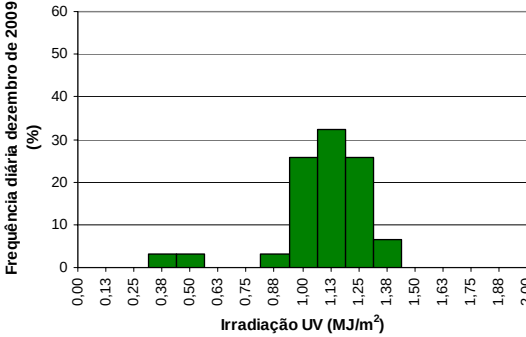
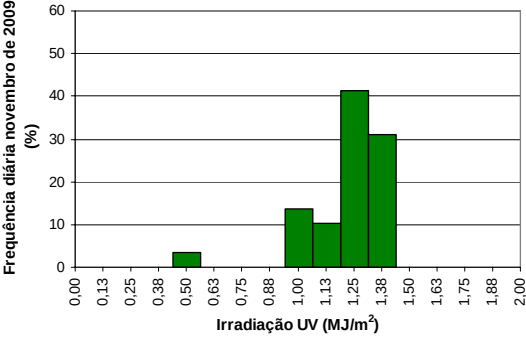
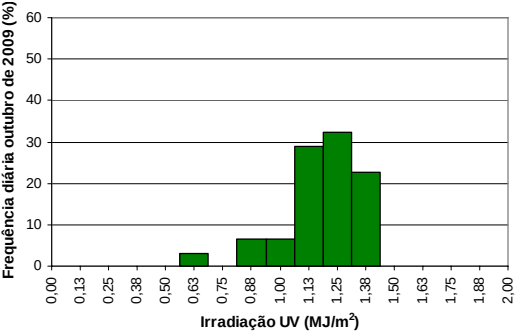
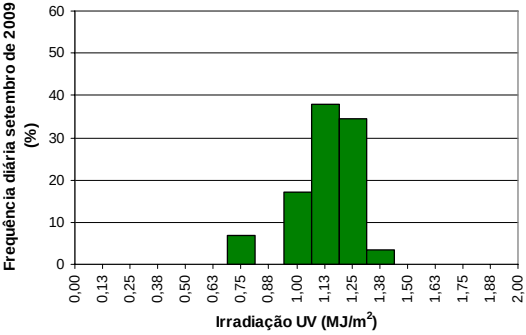
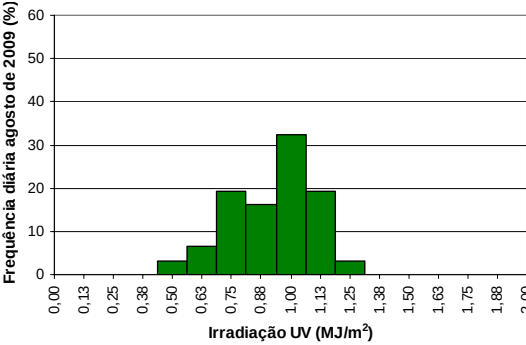
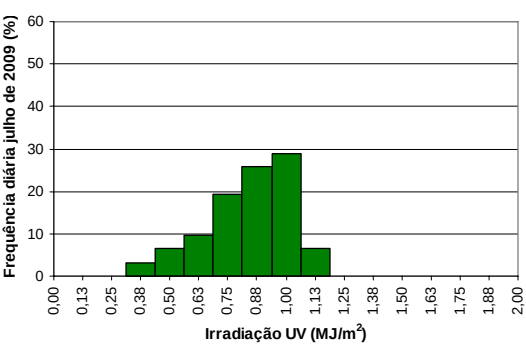




ANEXO II

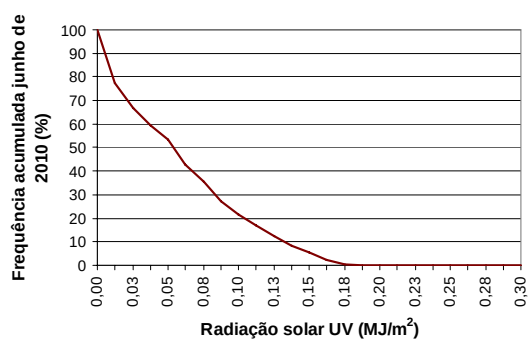
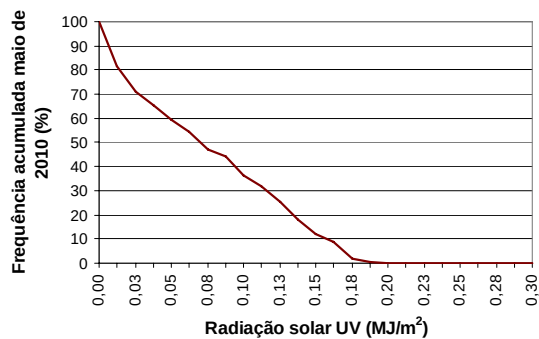
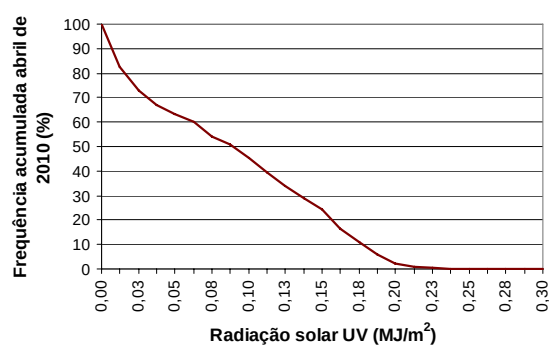
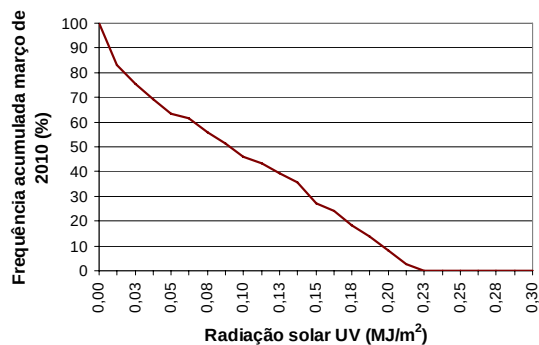
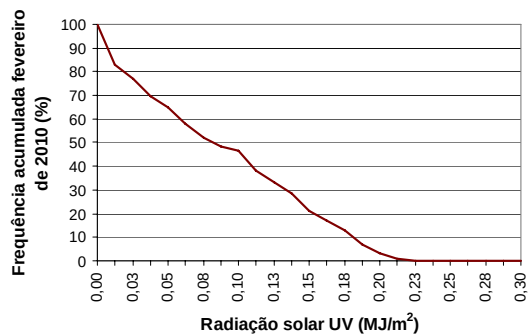
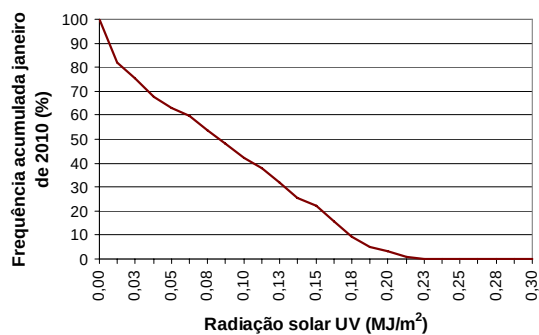
Frequência diária da radiação UV (A+B), de janeiro a dezembro de 2009, para a cidade de Pesqueira

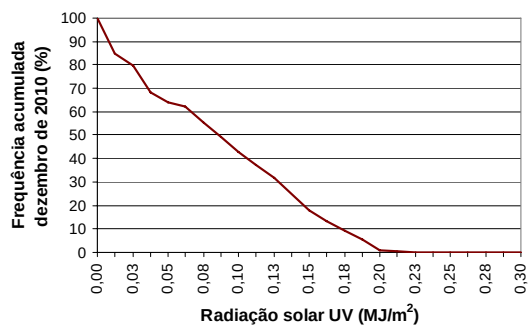
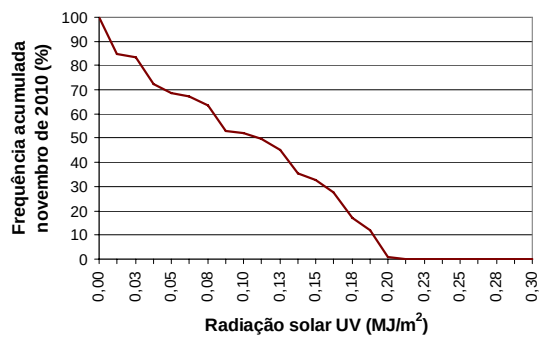
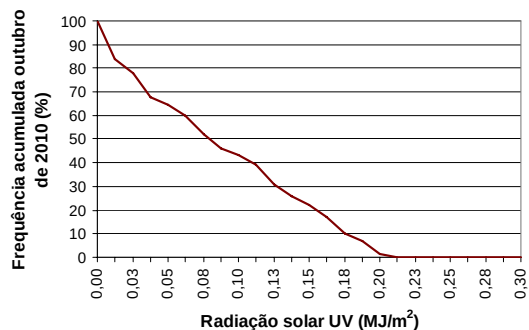
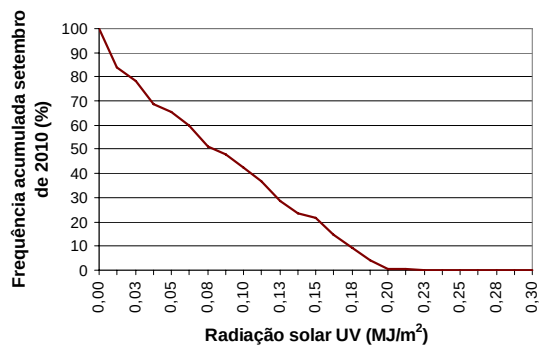
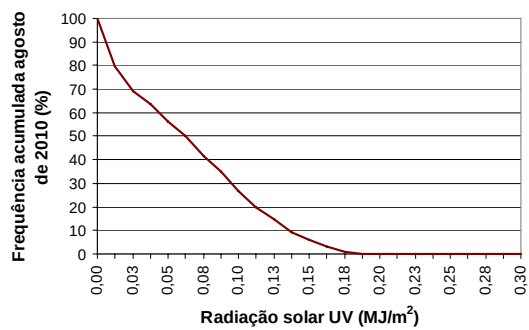
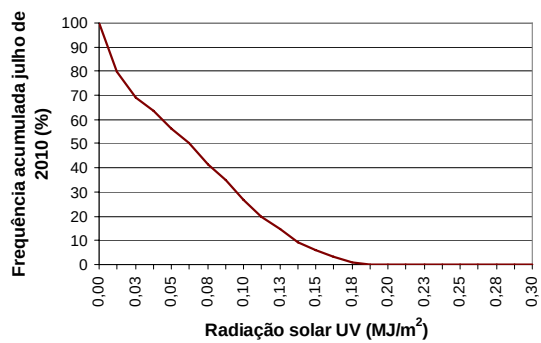




ANEXO III

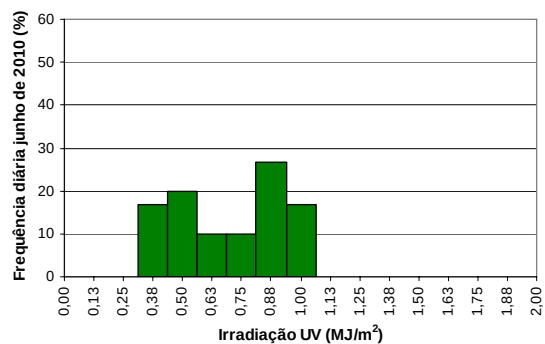
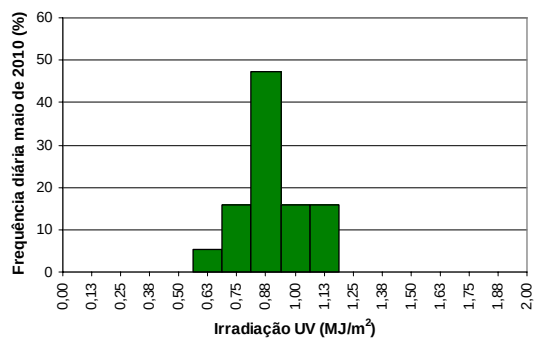
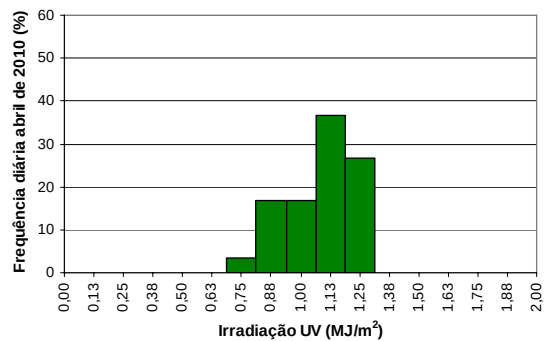
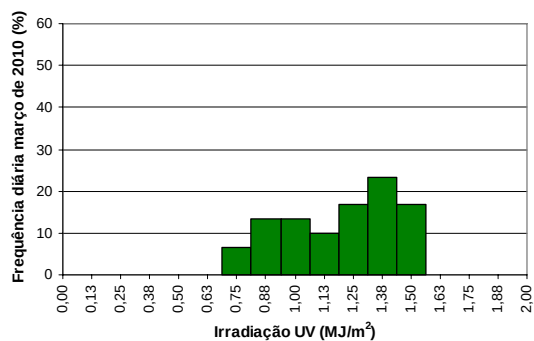
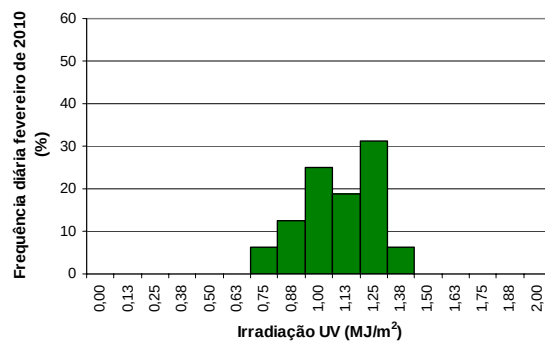
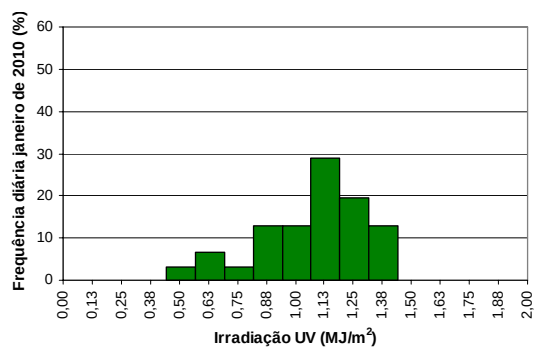
Frequência acumulada da radiação UV (A+B) horária, para a cidade de Pesqueira, de janeiro a dezembro de 2010

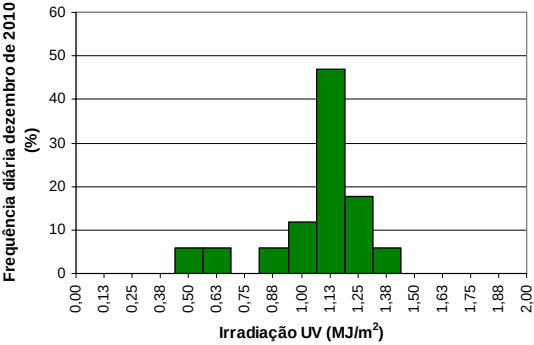
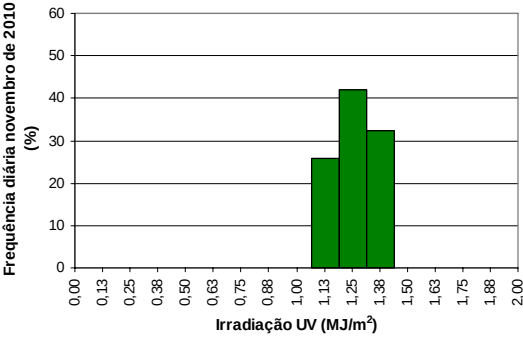
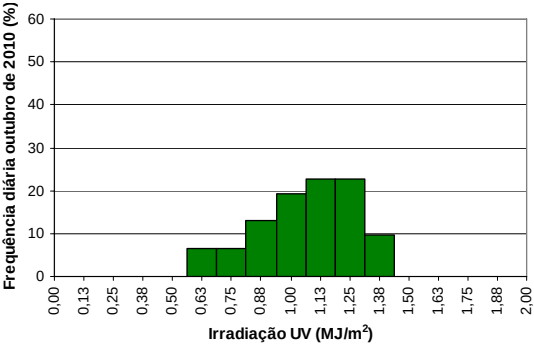
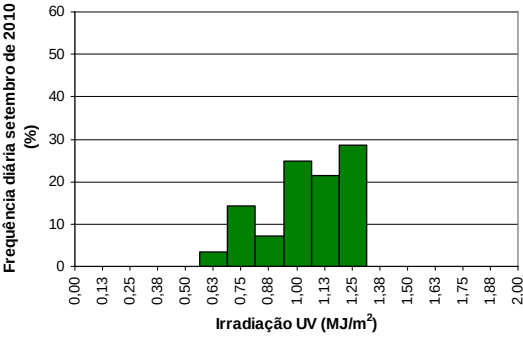
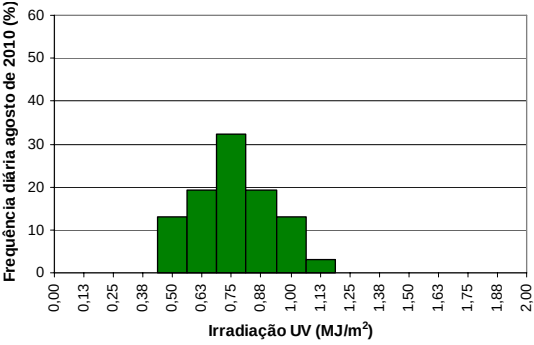
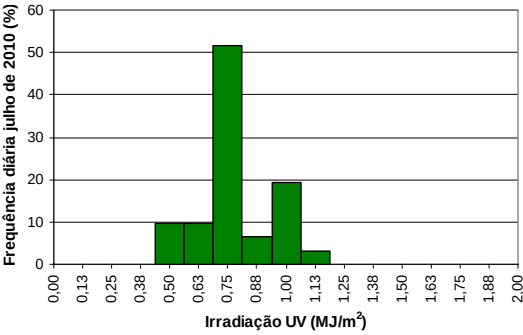




ANEXO IV

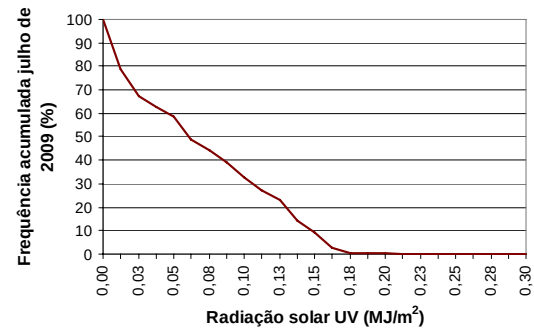
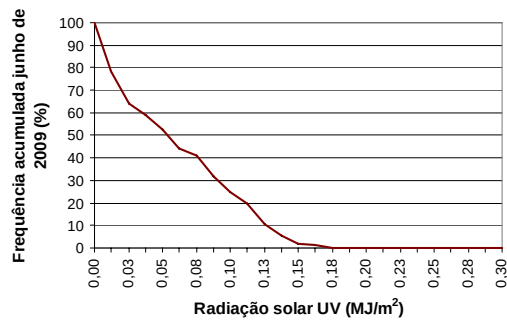
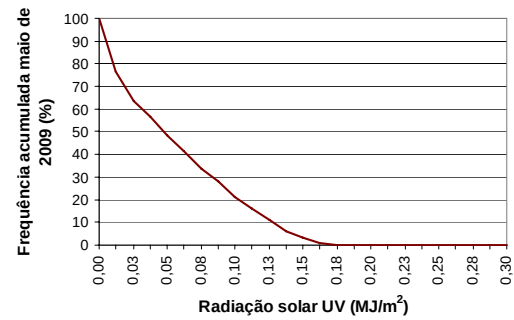
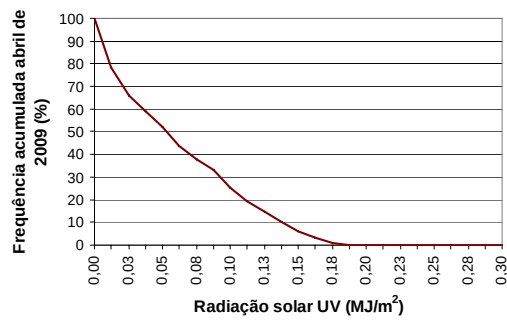
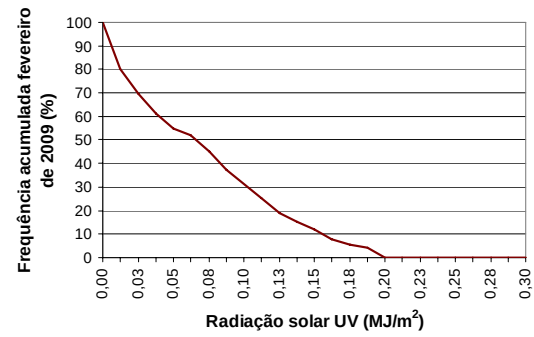
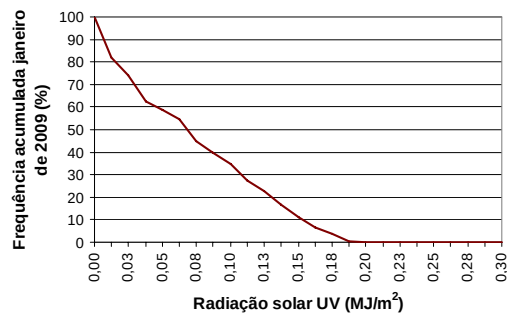
Frequência diária da radiação UV (A+B), de janeiro a dezembro de 2010, para a cidade de Pesqueira

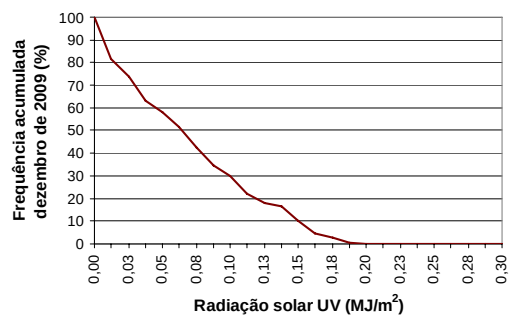
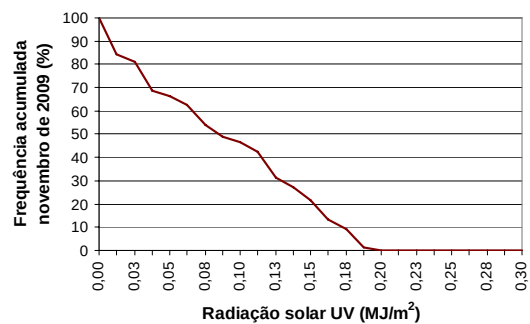
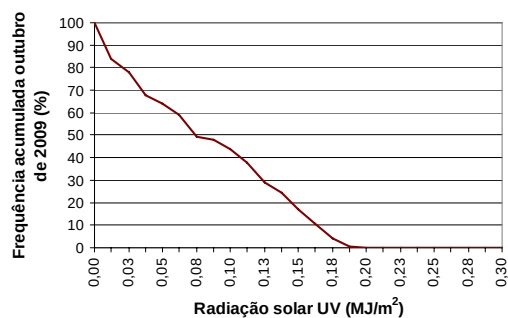
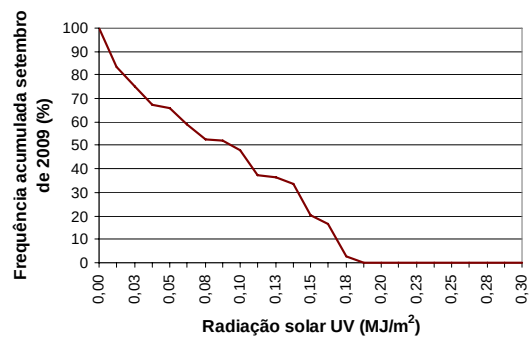
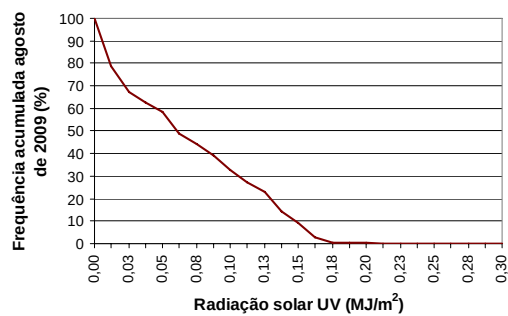




ANEXO V

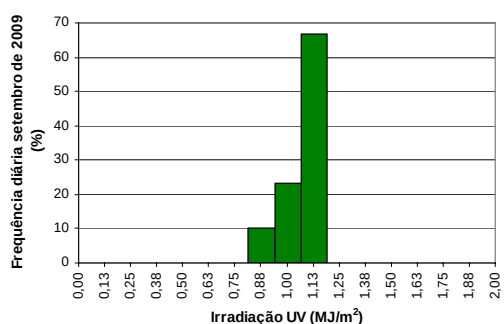
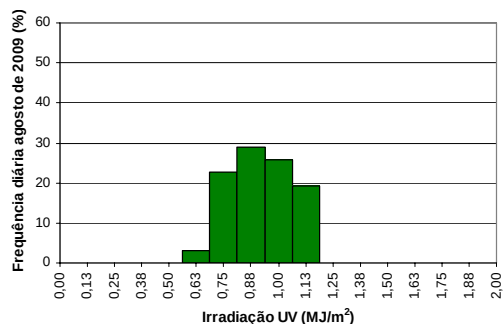
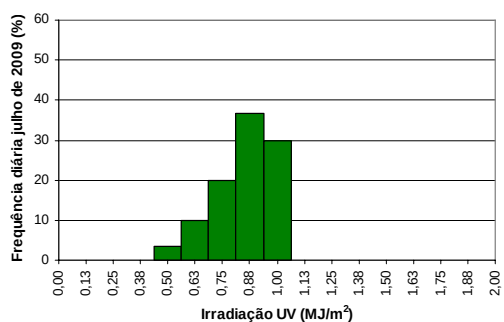
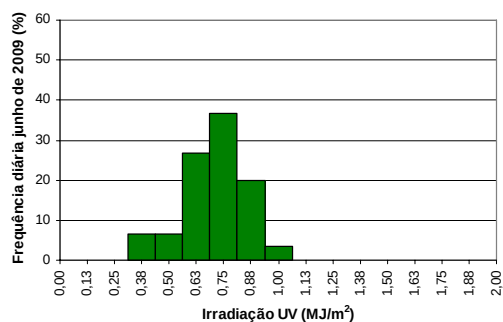
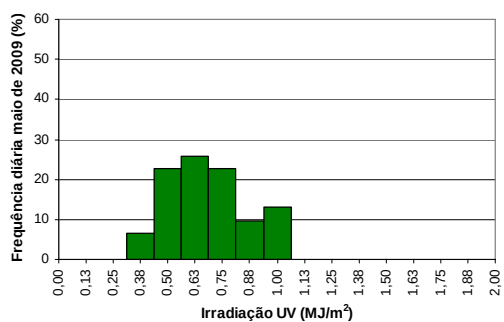
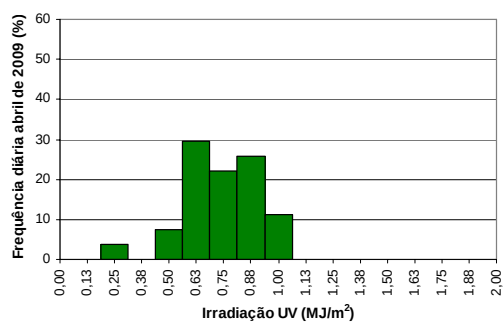
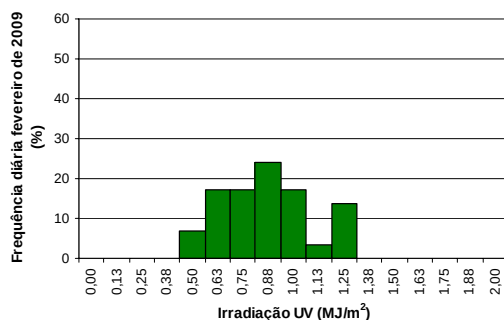
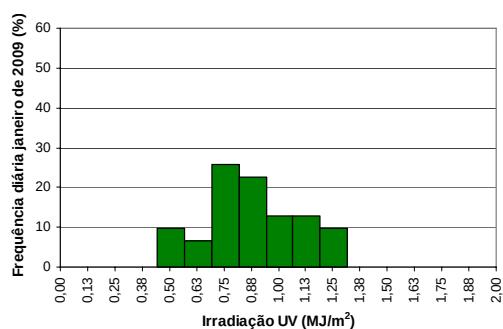
Frequência acumulada da radiação UV (A+B) horária, para a cidade de Araripina, de janeiro a dezembro de 2009

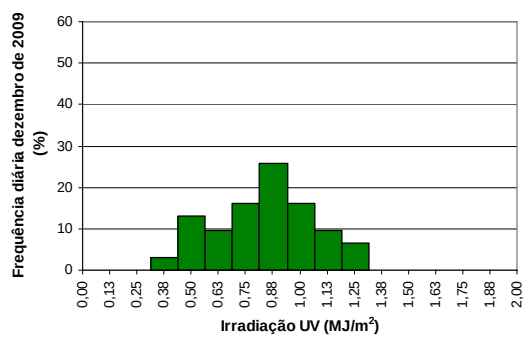
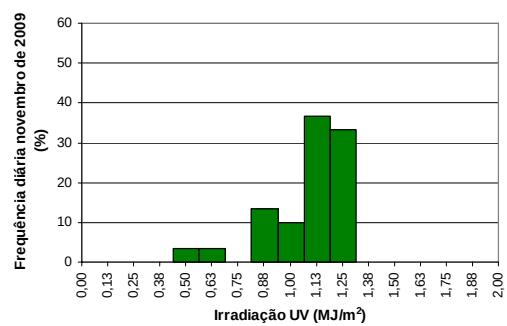
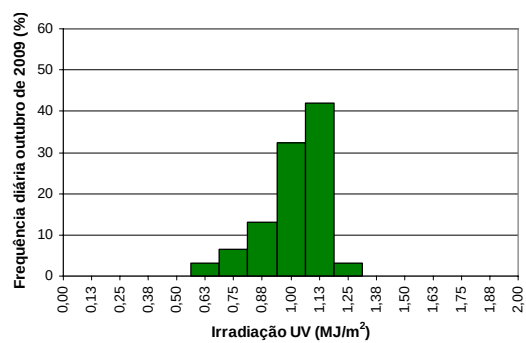




ANEXO VI

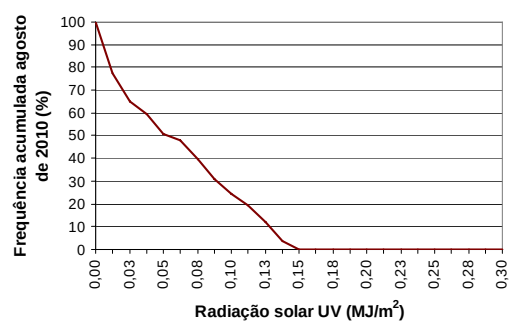
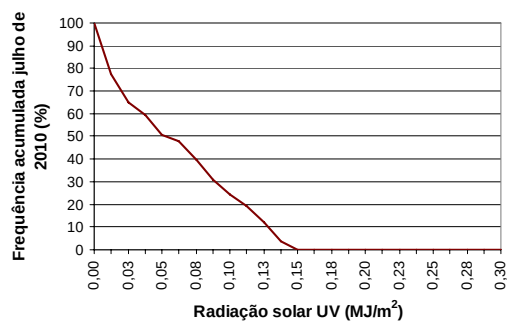
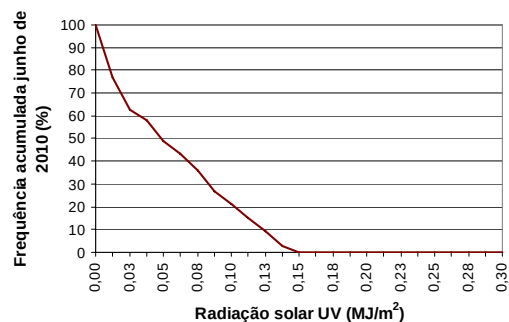
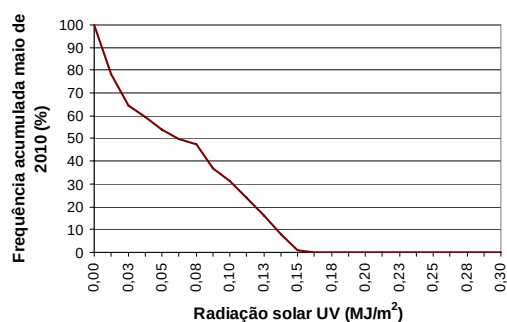
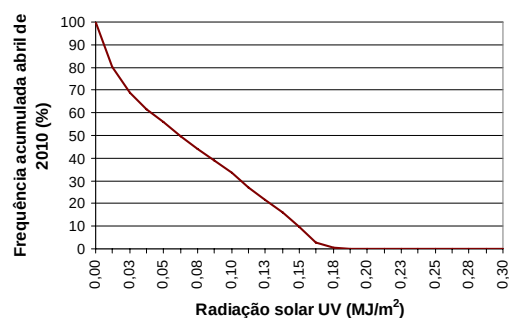
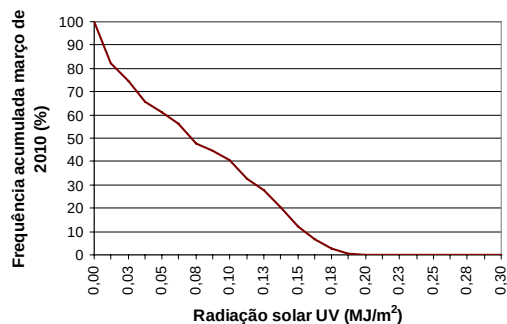
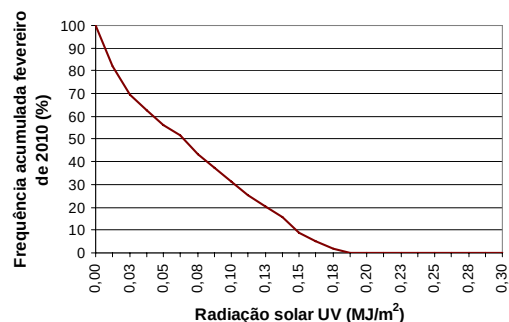
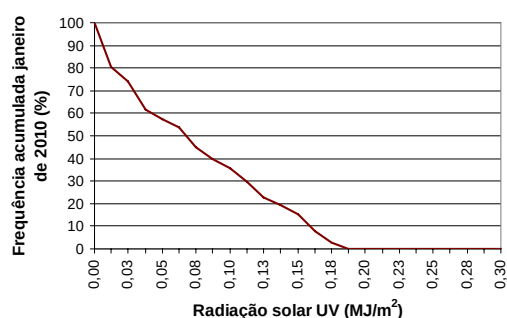
Frequência diária da radiação UV (A+B), de janeiro a dezembro de 2009, para a cidade de Araripina

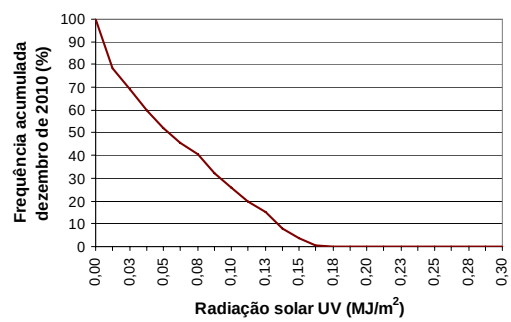
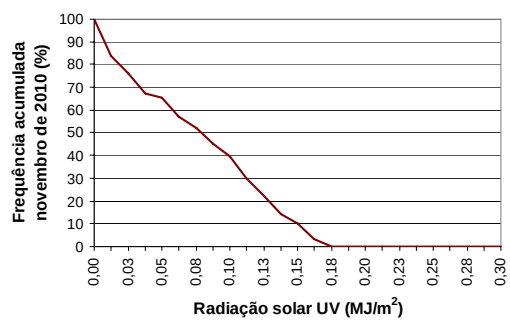




ANEXO VII

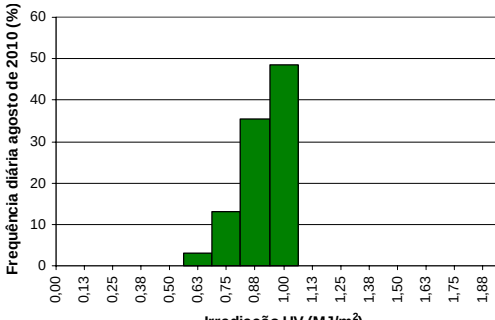
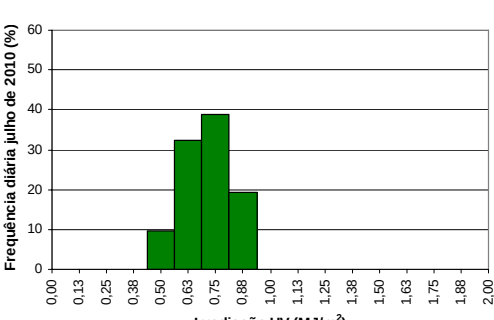
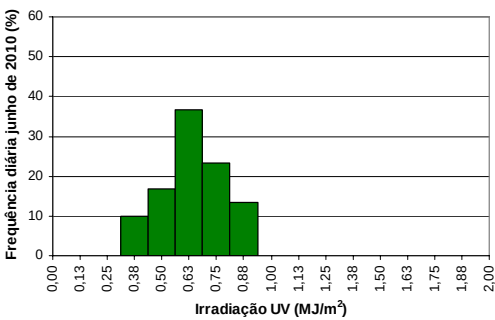
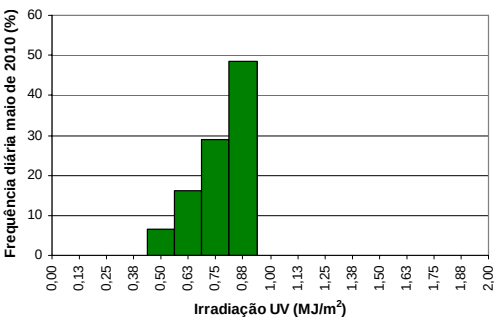
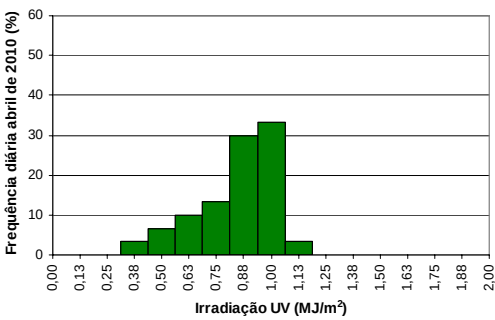
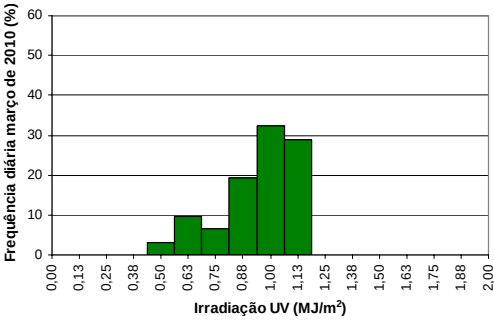
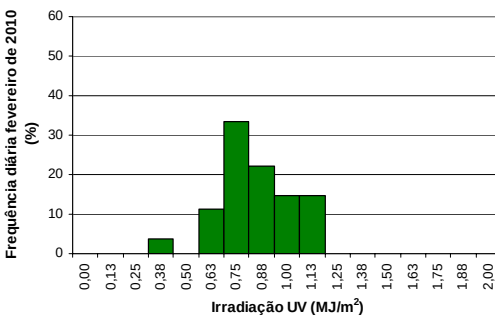
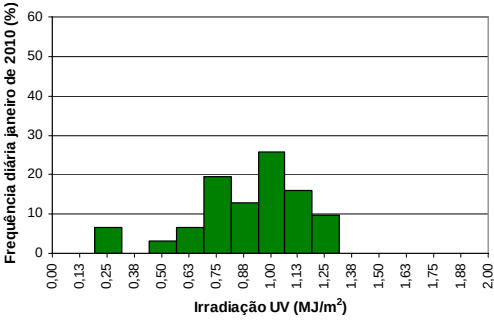
Frequência acumulada da radiação UV (A+B) horária, para a cidade de Araripina, de janeiro a dezembro de 2010

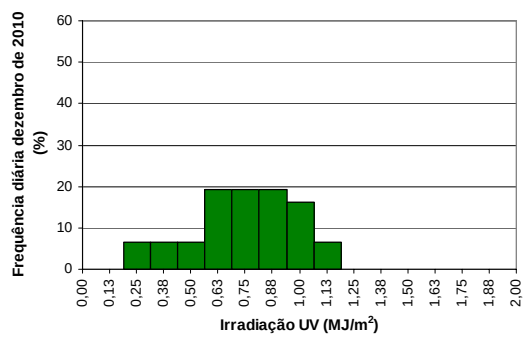
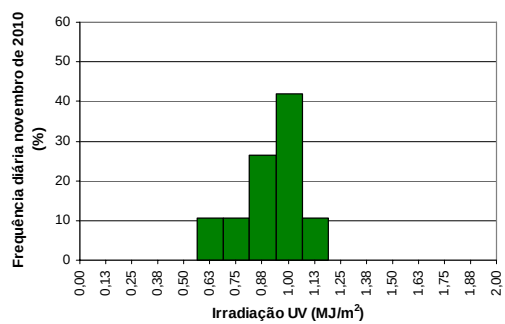




ANEXO VIII

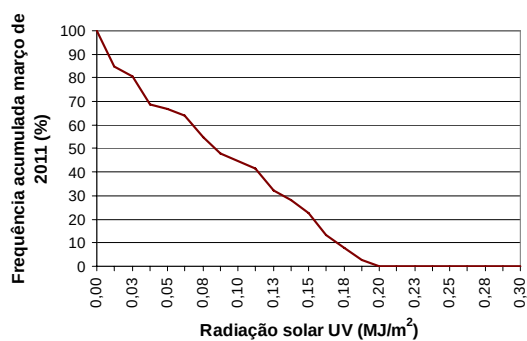
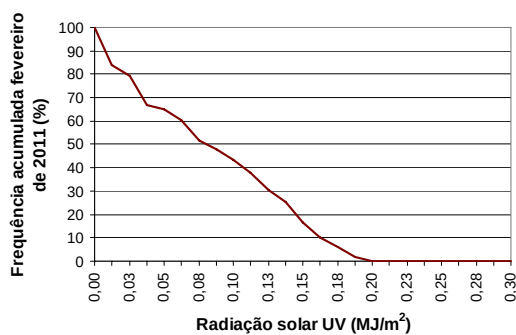
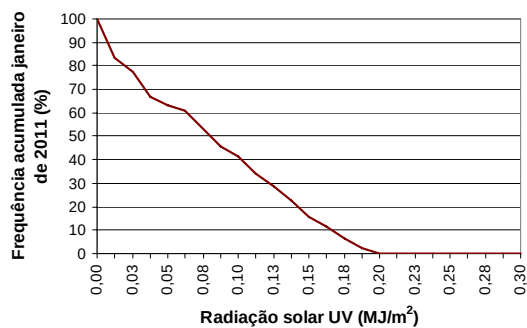
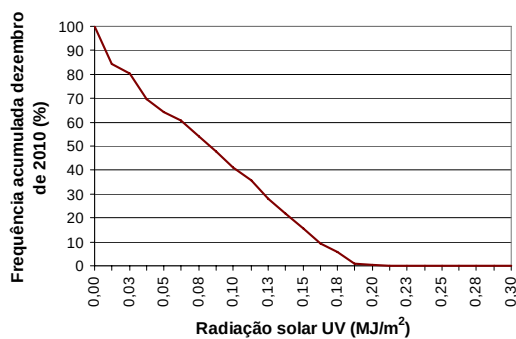
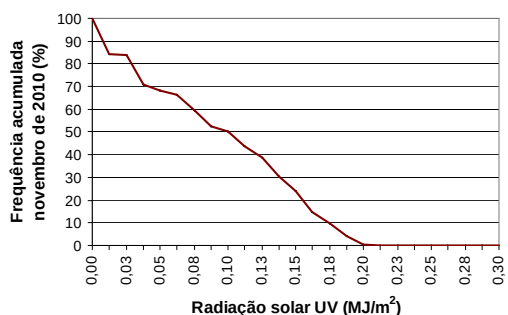
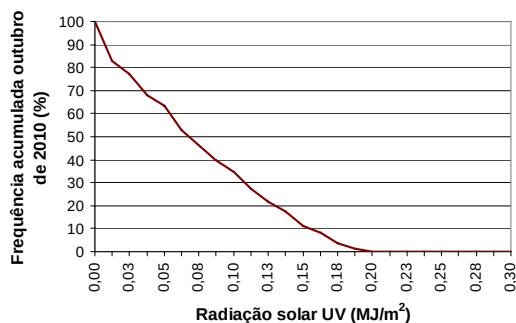
Frequência diária da radiação UV (A+B), de janeiro a dezembro de 2010, para a cidade de Araripina





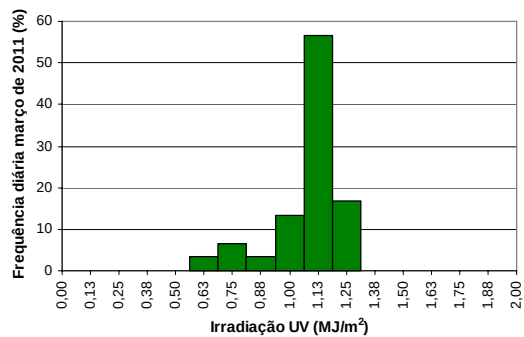
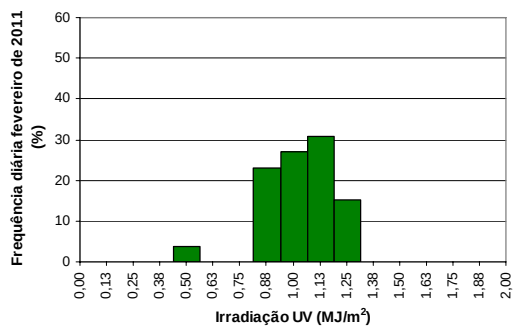
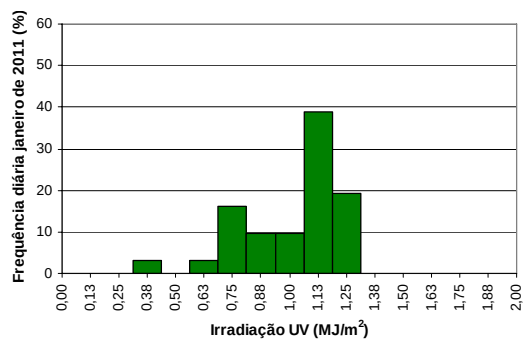
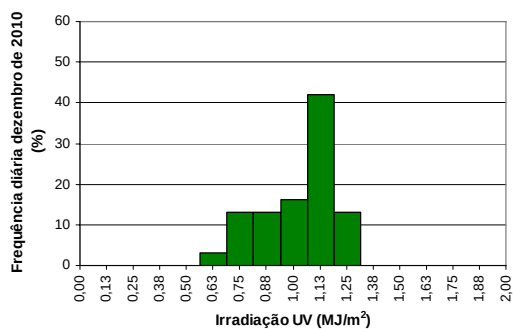
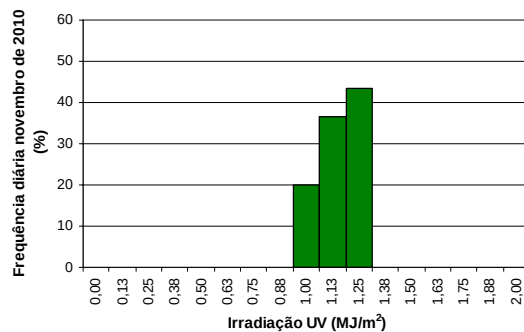
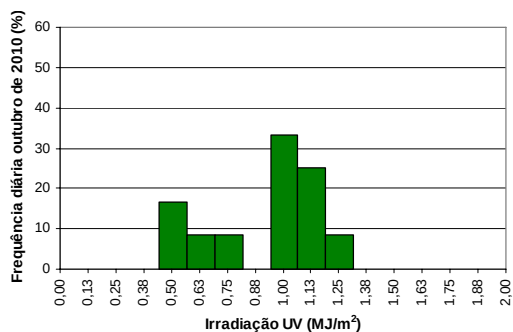
ANEXO IX

Frequência acumulada da radiação UV (A+B) horária, para a cidade de Recife, de outubro de 2010 a março de 2011



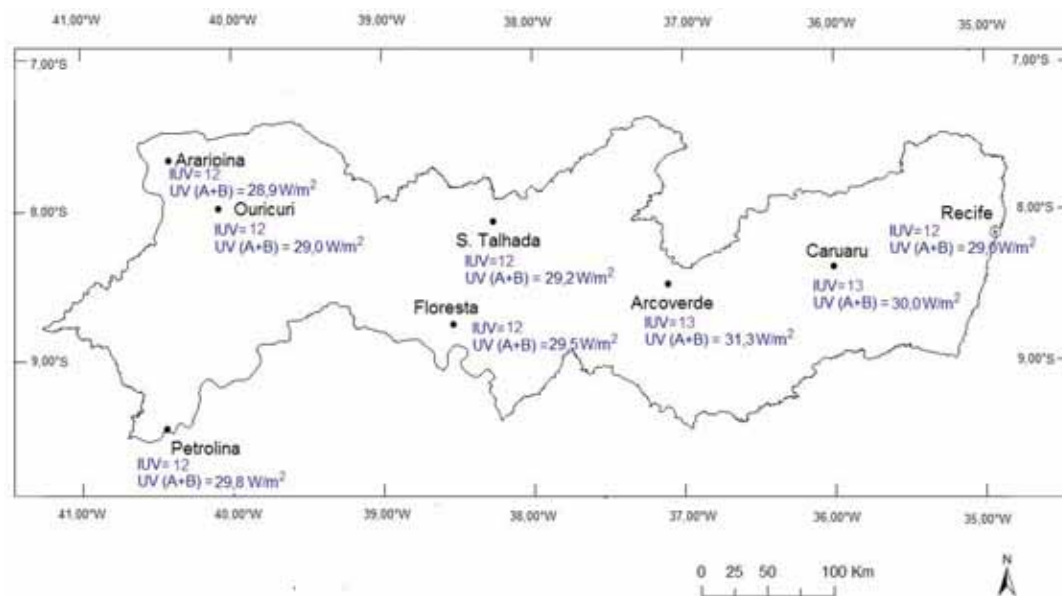
ANEXO X

Frequência diária da radiação UV (A+B), de outubro de 2010 a março de 2011, para a cidade de Recife

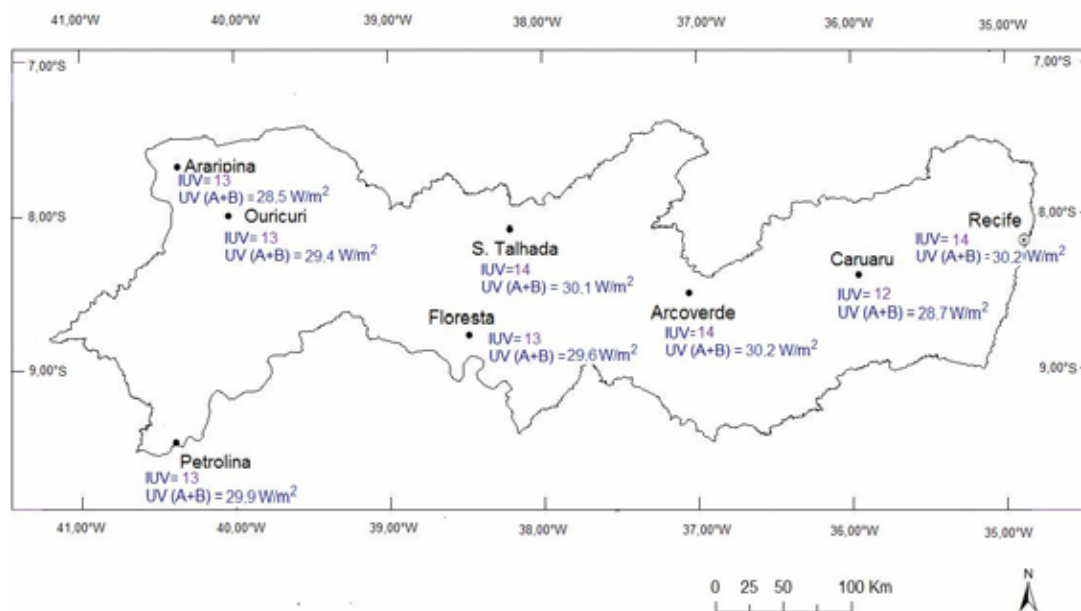


ANEXO XI

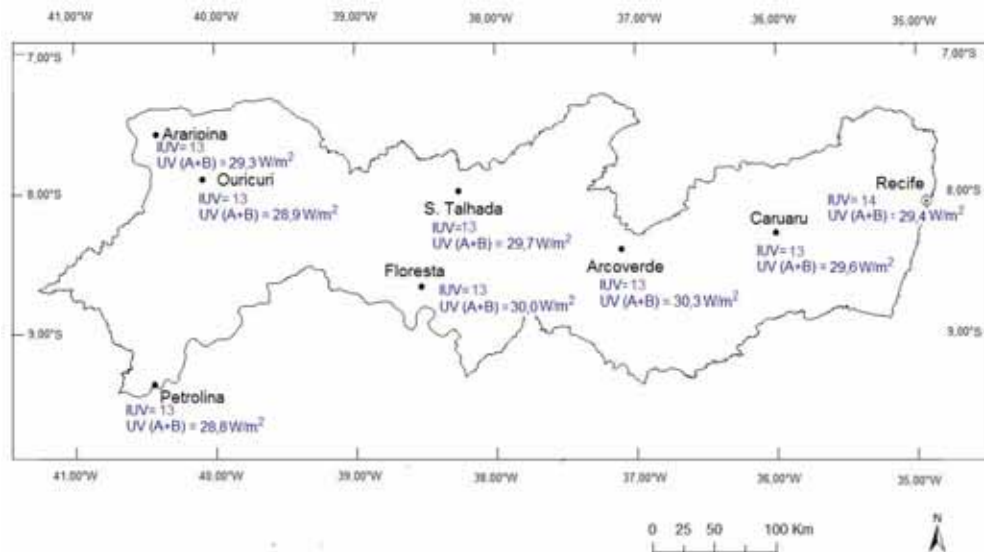
Radiação solar UV (A+B) e IUV máximos todos meses no estado de Pernambuco



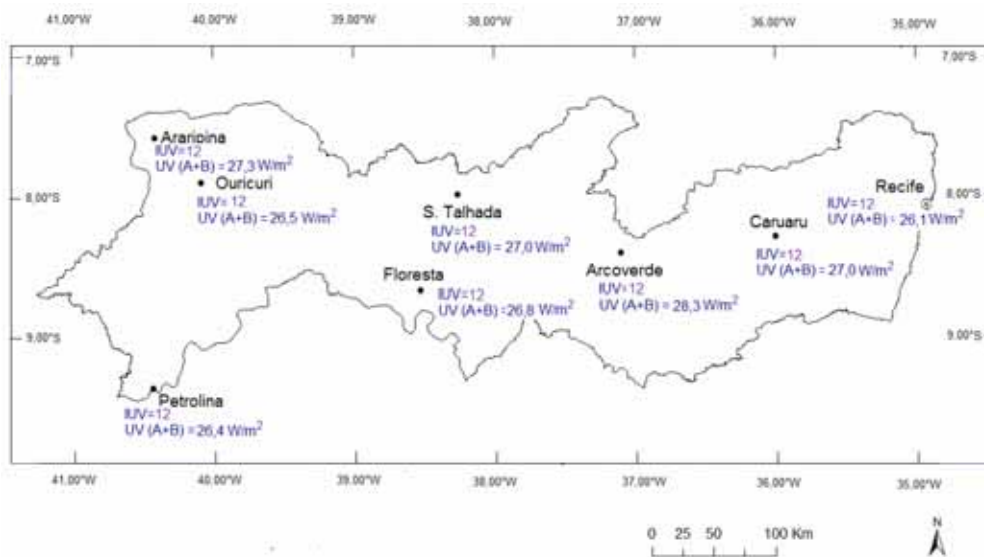
Janeiro



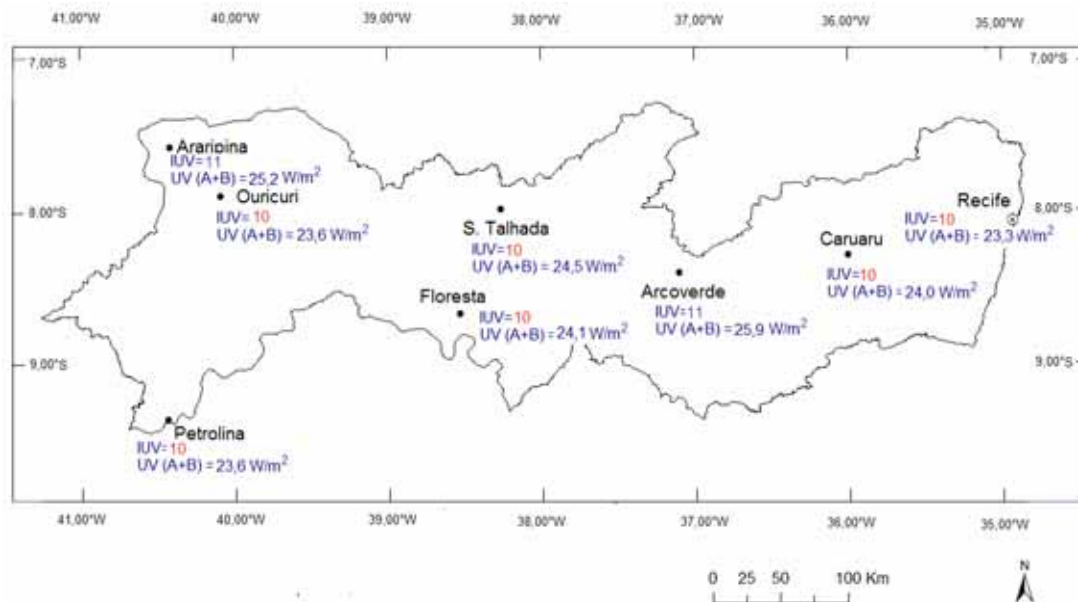
Fevereiro



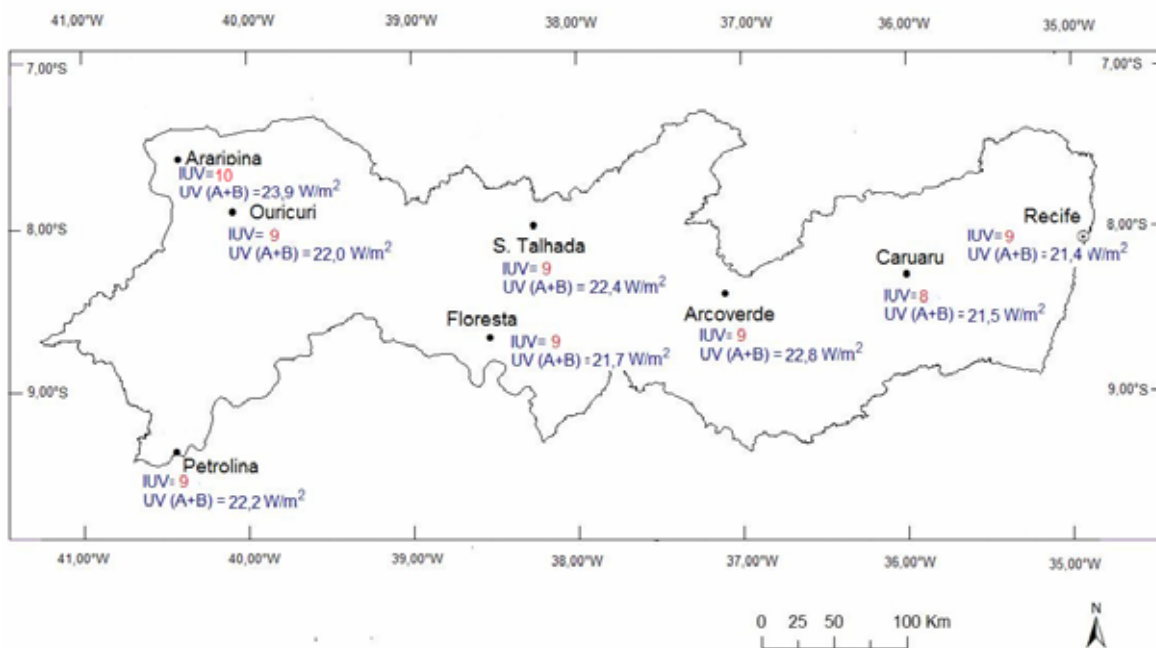
Março



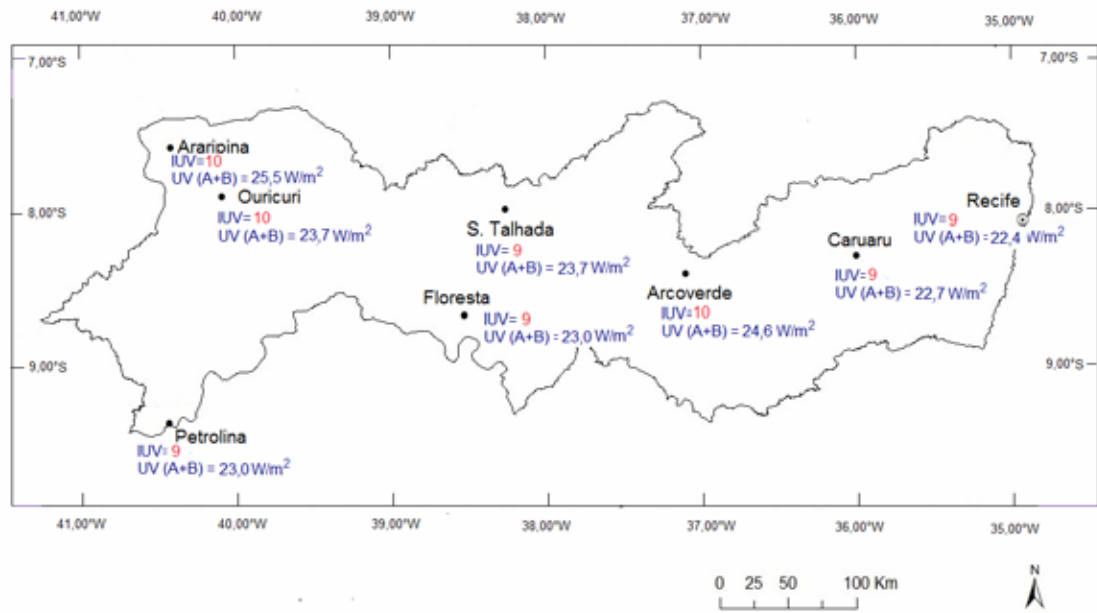
Abril



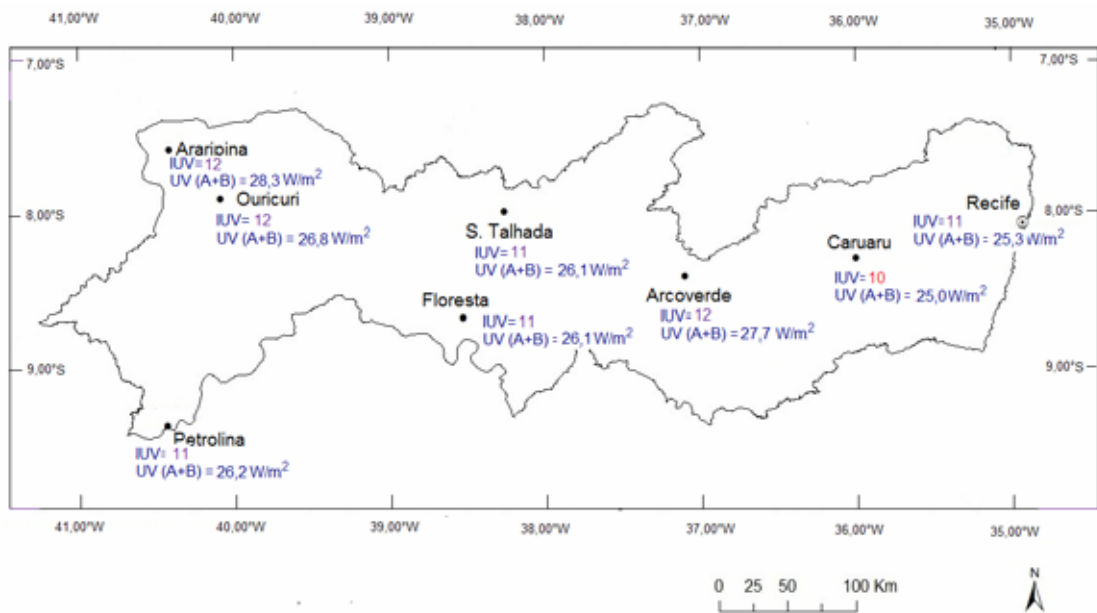
Maio



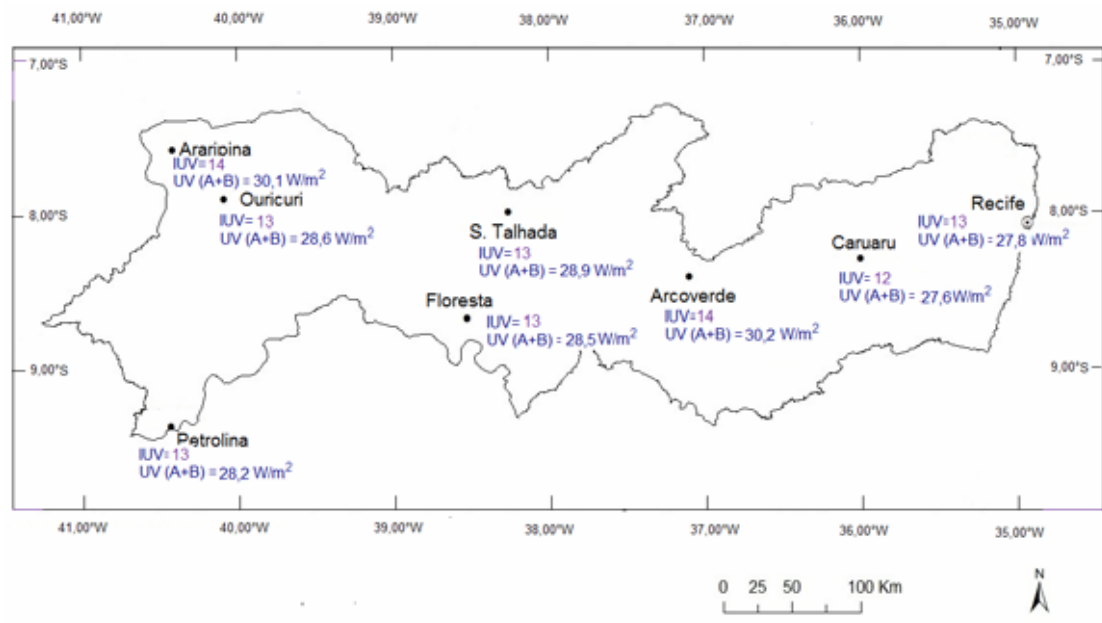
Junho



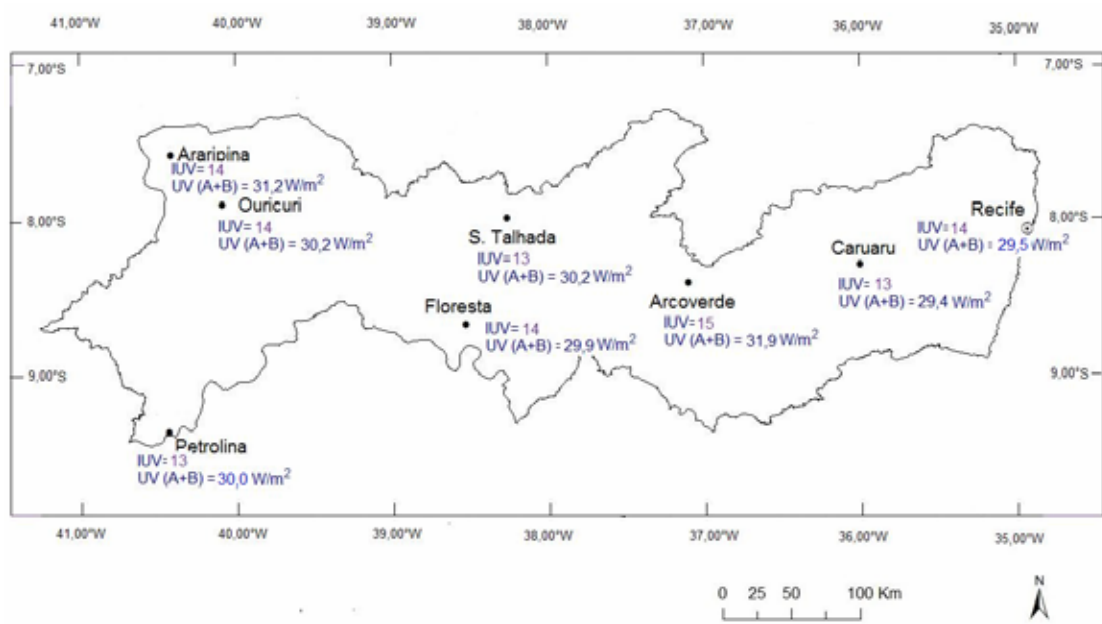
Julho



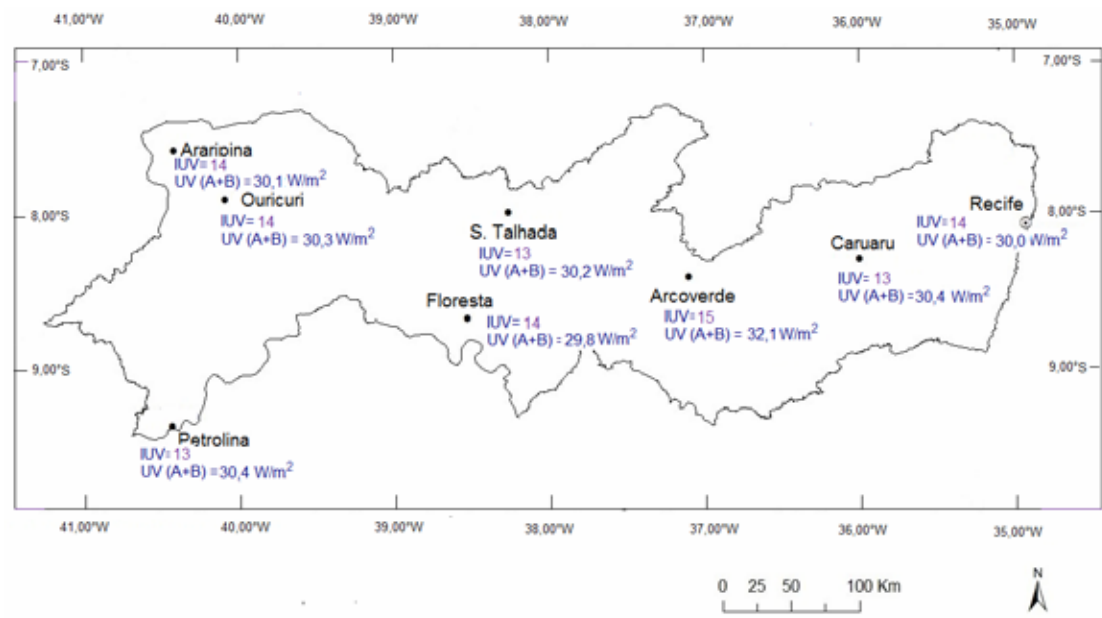
Agosto



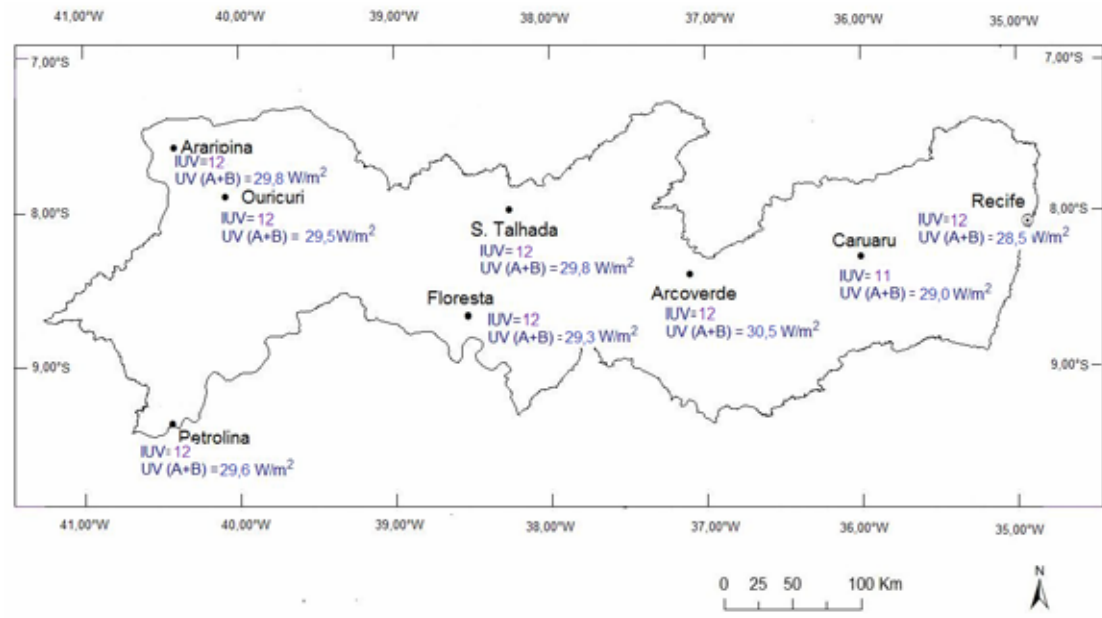
Setembro



Outubro



Novembro



Dezembro