

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS  
ENERGÉTICAS E NUCLEARES

**ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR ULTRAVIOLETA  
HORÁRIA NO SEMI-ÁRIDO PERNAMBUCANO**

RICARDO CESAR DE ANDRADE

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL  
AGOSTO – 2007

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**RICARDO CESAR DE ANDRADE**

**ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR ULTRAVIOLETA  
HORÁRIA NO SEMI-ÁRIDO DO PERNAMBUCANO**

Dissertação submetida ao programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares – PROTEN do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia.

Orientador: **Prof. Dr. Chigueru Tiba**

RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL  
AGOSTO – 2007

**A553e**

**Andrade, Ricardo César.**

**Estimativa da irradiância solar ultravioleta horária no semi-árido pernambucano / Ricardo César de Andrade. - Recife: O Autor, 2007. x, ix, 81 folhas, il : figs., tabs.**

**Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares , 2007.**

**Inclui bibliografia e Anexos.**

**1. Radiação ultravioleta. 2. Índice de radiação ultravioleta. 3. Fotômetro LED  
I. Título.**

**UFPE**

**621.042**

**CDD (22. ed.)**

**BCTG/2007-141**

# ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR ULTRAVIOLETA HORÁRIA NO SEMI-ÁRIDO PERNAMBUCANO

Ricardo Cesar de Andrade

APROVADO EM: 28.08.2007

ORIENTADOR: Prof. Dr. Chiguera Tiba

COMISSÃO EXAMINADORA:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias – DECART/UFPE

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

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral – DEN/UFPE

Visto e permitida a impressão

  
\_\_\_\_\_  
Coordenador do PROTENDEN/UFPE

*Aos meus pais, Djalma Rodrigues, Maria  
José e a minha vovozinha Dadai*

*Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em especial ao Departamento de Energia Nuclear, pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico – CNPq, por minha bolsa de mestrado, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Chigueru Tiba, pela orientação, pelo meu desenvolvimento pessoal e aprendizado.

Aos Professores Ana Lúcia, Alderico Colaço, Olga Vilela, Rajendra Narain e Romilton dos Santos pelas preciosas sugestões e críticas construtivas.

Aos colegas Adalberto, Bráulio, Carlos, Eudes, Ricardo, Milton e Tito pela amizade, sugestões e conselhos.

A todos os integrantes do Grupo FAE, Aguiar, Eric, Jane, Marcelo e Rinaldo, pela amizade e sugestões.

Aos amigos do DEN, os quais sempre me trataram com carinho e respeito.

Aos amigos do Departamento de Física, Antônio Carvalho, Gerson, Tâmara, Antônio Mário, Augusto César, Vladimir dos Passos, Carlos Eduardo, Paulo Peixoto, Sérgio Trajano, Marcus Aurélio, Patrícia Façanha e Paula Frassinete, pela amizade e companheirismo.

Aos meus Amigos do Karatê, Luís Cassiano, Iraquitan Barbosa, Célia, Nido, Eduardo, Celso, Tarcísio e do Aikido, Carlos Henrique, Edvaldo, Mito e Ricardo, pela amizade, respeito, bons valores e aprendizado de vida.

À minha namorada Waldizia Maria, por estar sempre presente na minha vida, pelo apoio e conselhos nas horas difíceis e sua irmã Walquíria, pelas correções de português.

Aos meus irmãos, José Renato, Hugo Cezar, Cezar Augusto, Daniela Fernanda, por serem meus irmãos e estarem presentes na minha vida.

Por fim agradeço a Deus por tudo e por mais essa etapa vencida na minha vida.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1 – Espectro eletromagnético. ....	4
2 – Anatomia do olho humano. ....	5
3 – Absorção do UV nas partes do olho. ....	5
4 – Anatomia da pele humana ....	7
5 – Absorção do UV nas partes da pele.....	8
6 – Posição relativa do Sol no céu.....	11
7 – Variação da intensidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre na faixa intertropical do Hemisfério Sul no nível do mar ...	12
8 – Influência da altitude em relação ao nível de radiação UV.....	13
9 – Valores de albedo. ....	16
10 – Espectro de ação eritêmica ....	18
11 – Biômetro ....	19
12 – TURV (The Total Ultraviolet Radiometer) da Eppley.....	20
13 – Localização geográfica das estações ....	23
14 – Média sosticial de verão da radiação UV – Eritema em função da latitude geográfica para as estações de observações de Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista e Porto Alegre.....	24
15 – Curvas suavizadas de 30 pontos para os valores médios diários do Índice UV para as estações de observações de Campo Grande, La	

Paz e Natal.....	24
16 – Diagrama esquemático de efeito para a radiação total.....	27
17 – Geometria Terra-Sol, coordenadas locais.....	50
18 – Espectro de emissão de alguns LED.....	55
19 – Espectro de absorção de alguns LED.....	55
20 – Circuito esquemático do fotômetro.....	56
21 – Área de trabalho do SPCTRAL2.....	57
22 – Apresentação do SMARTS2.....	60
23 – Janela de acesso para configuração dos dados de entrada.....	61
24 – Mapa de Pernambuco apresentando a localização de Pesqueira.....	62
25 – Piranômetro TUVR da Eppley e sistema de aquisição de dados da Estação Pesqueira.....	63
26 – Vista do bloco “E” do CEFET UNED Pesqueira e localização do TURV.....	63
27 – Vista frontal do fotômetro montado.....	64
28 – Vista traseira do fotômetro sem a tampa em detalhes.....	65
29 – Intervalos de medições com o aparelho.....	66
30 –Exemplo da aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar direta medido pelo fotômetro no dia 22 de dezembro de 2006 em função da massa de ar para determinação da profundidade óptica de aerossóis.....	68
31 – Simulações com o SPCTRAL2 e SMARTS2 comparados com o piranômetro TURV.....	69

32 – Simulação do IUV horário médio mensal do mês de dezembro de 2006 através do SPCTRAL2 e SMARTS2.....	72
33 –Classificação do IUV e recomendações (adaptado da OMS, 2002)..	73

## LISTA DE TABELAS

	PÁGINA
Tabela – 1 Localização geográfica das estações de observações .....	22
Tabela – 2 Perfis verticais e abundâncias efetivas para atmosfera tropical .....	29
Tabela – 3 Coeficientes para massas ópticas de ar .....	31
Tabela – 4 Resumo dos principais componentes das equações dos modelos computacionais para irradiância direta.....	33
Tabela – 5 Coeficientes para diferentes modelos aerossóis.....	36
Tabela – 6 Resumo dos principais componentes das equações dos modelos computacionais para irradiância difusa sobre uma superfície horizontal .....	41
Tabela – 7 Coeficientes para determinação do fator de assimetria aerossol .....	45
Tabela – 8 Medidas realizadas no dia 22 de dezembro de 2006 para a região de Pesqueira-PE .....	67
Tabela – 9 Profundidades ópticas de aerossóis.....	68
Tabela – 10 Desempenho estatístico dos resultados – AOD diário.....	70

Tabela –11 Índice de radiação ultravioleta horário médio mensal do Mês de dezembro de 2006 para a localidade de Pesqueira- PE.....	72
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CFC	Cloro Flúor Carbono
CPNM	Câncer de pele não melanômico
IUV	Índice de radiação ultravioleta
LED	Diodo Emissor de Luz
MBE	Mean Bias Error
MED	Minimum Eythema Dosis
OMS	Organização Mundial de Saúde
RH	Umidade relativa
RMSE	Root Mean Square Error
UVA	Radiação Ultravioleta tipo A
UVB	Radiação Ultravioleta tipo B
UVC	Radiação Ultravioleta tipo C
D	Fator de correção para a distância sol-terra
d	Dia Juliano
$E_{t\lambda}$	Irradiância total
$E_{bn\lambda}$	Irradiância normal direta
$E_{s\lambda}$	Irradiância difusa
$E_{o\lambda}$	Irradiância extraterrestre

$E_{R\lambda}$	Irradiância de espalhamento Rayleigh
$E_{a\lambda}$	Irradiância de espalhamento aerossol
$E_{g\lambda}$	Componente de múltiplas reflexões de irradiância Céu-Terra
$E_{a\lambda}$	Espalhamento da irradiância aerossol
$E_{b\lambda}$	Componente de múltiplas reflexões
$E_{\lambda}$	Irradiância monocromática que ingressa em um dado meio
$E_{\lambda}^0$	Irradiância espectral extraterrestre
$E_{on\lambda}$	Irradiância extraterrestre corrigida para a atual distância terra-sol
$F_a$	Fração do fluxo de espalhamento
$g$	Fator aerossol assimétrico
$H_R$	Altura da atmosfera
$I_{\lambda}$	Irradiação espectral
$k_{a\lambda}$	Coefficientes absorção aerossol
$L$	Livre caminho
$m$	Massa de ar
$m_R$	Massa óptica (Rayleigh)
$m_a$	Massa óptica (aerossol)
$m_n$	Massa óptica ( $NO_2$ )
$m_o$	Massa óptica (ozônio)

$m_u$	Massa óptica (mistura de gases)
$m_w$	Massa óptica (vapor de água)
$N(x)$	Densidade numérica por volume de átomos ou moléculas opticamente ativos
$N_0$	Densidade numérica de moléculas
$n_0$	Índice de refração do ar
$P_0$	Pressão superficial ao nível do mar
$P$	Pressão superficial
$r_{g\lambda}$	Albedo para superfície terrestre
$s_{a\lambda}$	Coefficientes de espalhamentos aerossol
$S_{er}(\lambda)$	Espectro de ação padrão para eritema
$S_\lambda$	Irradiância eritêmica espectral
$S$	Irradiância eritêmica
$T_{R\lambda}$	Transmitância (Espalhamento Rayleigh)
$T_{a\lambda}$	Transmitância (Atenuação por aerossol)
$T_{w\lambda}$	Transmitância (Absorção por vapor de água)
$T_{o\lambda}$	Transmitância (Absorção por ozônio)
$T_{u\lambda}$	Transmitância (Absorção por mistura uniforme de gases)
$T_{n\lambda}$	Transmitância (Absorção por $NO_2$ )
$T^*$	Temperatura média diária do ar
$T_{eo}$	Temperatura nominal ou efetiva do ozônio

$T_{as\lambda}$	Transmitância para o espalhamento aerossol
T	Temperatura ambiente
$T_d$	Temperatura de orvalho
W	Quantidade de água precipitável
z	Altitude
Z	Ângulo Zenital
$\delta$	Fator de despolarização
$\varepsilon_\lambda$	Espectro de ação
$\varphi$	Ângulo diário
$\kappa_\lambda$	Coefficiente de absorção volumétrica
$\mu$	Definida como a massa de ar óptica
$\rho_{b\lambda}$	Reflectância espectral para a radiação direta
$\rho_{d\lambda}$	Equivalente para a radiação difusa
$\rho_{s\lambda}$	Reflectância total do céu
$\sigma_\lambda$	Seção transversal de extinção
$\Gamma_{o\lambda}$	Transmitância efetiva de ozônio para espalhamento para baixo
$\tau_\lambda$	Espessura óptica
$\omega_\lambda$	Espalhamento único de albedo

# ESTIMATIVA DA IRRADIÂNCIA SOLAR ULTRAVIOLETA HORÁRIA NO SEMI-ÁRIDO PERNAMBUCANO

Autor: Ricardo Cesar de Andrade

Orientador: Chigueru Tiba

## RESUMO

Dois códigos computacionais, SPCTRAL2 e SMARTS2, foram utilizados para estimar a irradiância solar ultravioleta e o índice de irradiação ultravioleta em uma localidade do semi-árido do Nordeste do Brasil. Os softwares apresentam simplicidade de uso, precisão e relativa facilidade na obtenção das variáveis de entrada: ângulo zenital, pressão atmosférica em relação ao nível do mar, umidade relativa do ar, temperatura do ar, quantidade de água precipitável, ozônio total e a profundidade óptica de aerossóis (AOD). Todas essas variáveis são medidas em estações meteorológicas convencionais, exceto a profundidade óptica dos aerossóis. A profundidade óptica de aerossóis foi medida com um aparelho construído com um sensor LED (Light-Emitting Diode) de banda estreita, centrada em 555nm que mede a transmitância da radiação monocromática através da atmosfera terrestre, a qual pode ser descrita pela lei de Beer.

Para as simulações realizadas a partir da utilização do AOD diário, os resultados das simulações da irradiância solar ultravioleta mostrou um erro máximo de 6,4% para o meio dia solar, e um erro máximo entre 10 e 12% para 09:00h da manhã e 15:00h, respectivamente, quando comparados com os valores medidos com o piranômetro TUVR.

**Palavras-chave:** radiação ultravioleta, índice de radiação ultravioleta, fotômetro LED, SPCTRAL2, SMARTS2.

# **ESTIMATION OF HOURLY ULTRAVIOLET SOLAR IRRADIANCE IN THE SEMI-ARID REGION OF PERNAMBUCO**

Author: Ricardo Cesar de Andrade

Work Leader: Chiguera Tiba

## **ABSTRACT**

Two computational codes, SPCTRAL2 and SMARTS2, were used for estimating ultraviolet solar irradiance in a locality of the semi-arid region of the Northeast of Brazil. The softwares presented simplicity of use, precision and relative ease in obtaining the input variables: zenith angle, atmospheric pressure in relation to sea level, relative humidity of the air, amount of precipitable water, total ozone and the aerosol optic depths (AOD). All these variables are measured in conventional meteorological stations, except for the aerosol optic depth. The AOD was measured with an apparatus that was constructed with a narrow band LED (Light-Emitting Diode) sensor, centered in 555nm which measures the monochromatic radiation transmission through the terrestrial atmosphere, which can be described by Beer's law.

For the simulations carried out arising from the use of daily AOD, the results of the ultraviolet solar irradiance and the ultraviolet radiation index simulations show a maximum error of 6% for solar midday, and a maximum error between 10 and 12% for 9 o'clock AM and 3 o'clock PM, respectively, when compared with the values measured with a TURV pyranometer.

**Key works:** ultraviolet radiation, ultraviolet radiation index, LED photometer, SPCTRAL2, SMARTS2.

# SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>2</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>3</b>
2.1 Importância do conhecimento da radiação solar UV .....	3
2.1.1 Absorção dos raios ultravioletas pelo globo ocular.....	5
2.1.2 Absorção dos raios ultravioletas pela pele .....	6
2.2 Informações sobre medidas de UV .....	10
2.2.1 Fatores ambientais que interferem com o nível de radiação ultravioleta .....	10
2.2.2 Sensibilidade biológica da radiação ultravioleta .....	17
2.2.3 Biômetro .....	19
2.2.4 Piranômetro .....	20
2.2.5 Medidas realizadas no Brasil.....	21
2.3 Levantamentos dos softwares paramétricos existentes .....	25
2.3.1 Softwares SPCTRAL2 “ Simple Solar Spectral Model ” e SMARTS2 “A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine”.....	26
2.3.2 Irradiação normal direta .....	32
2.3.3 Irradiação difusa sobre uma superfície horizontal .....	40
2.3.4 Lei de Beer e método de Langley .....	48
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1 Cálculo da irradiância UV e do Índice de Radiação Ultravioleta (IUV) usando o software SPCTRAL2 .....	53

3.1.1 Dados de entrada .....	53
3.1.2 Obtenção dos dados de entrada do SPCTRAL2 .....	53
3.1.3 IUV no SPCTRAL2 .....	58
3.2 Cálculo da irradiância UV e do IUV usando o software SMARTS2 .....	59
3.2.1 Dados de entrada .....	59
3.3 Medidas da irradiância UV .....	62
<b>4 COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS COM ÀS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS .....</b>	<b>64</b>
4.1 Obtenção da profundidade óptica de aerossóis diária .....	64
4.2 Resultados e comparações obtidas a partir dos softwares, SMARTS2 e SPCTRAL2 .....	69
4.3 IUV através do SPCTRAL2 e SMARTS2 .....	71
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
<b>7 ANEXOS .....</b>	<b>78</b>

## INTRODUÇÃO

Diversos efeitos nocivos à saúde podem ser causados pelo excesso de exposição à radiação ultravioleta (UV) solar, tais como queimaduras, sardas, debilitação do sistema imunológico, envelhecimento precoce, catarata e câncer de pele (CORRÊA, 2004a).

Estimativas da Organização Mundial de Saúde (OMS) apontam que a catarata é a causa mais prevalente de perda visual mundialmente, e a responsável por metade de todos os indivíduos cegos. Segundo levantamentos do início da década de 90, estimava-se haver cerca de 350 mil cegos decorrentes da catarata no Brasil. O Instituto Nacional do Câncer (INCA, 2006) previu o surgimento de 116.000 novos casos de câncer para 2006. Considera-se, ainda, o agravamento da situação, no futuro, porque a população brasileira com mais de 50 anos de idade deverá aumentar de três a cinco vezes até o ano 2020, conseqüentemente com o aumento proporcional da incidência de catarata na população.

O número de casos novos de câncer de pele não-melanoma estimados para o Brasil em 2006 foram de 55.480 em homens e de 61.160 em mulheres. Esses valores corresponderam a um risco estimado de 61 novos casos a cada 100 mil homens e de 65 para cada 100 mil mulheres. Quanto ao melanoma, a previsão da sua incidência foi de 2.710 casos novos em homens e 3.050 casos novos em mulheres nessa mesma população de indivíduos (INCA, 2006).

Pelo que antecede é necessário, ou mais, é imperativo, a implementação e intensificação de ação integrada aos programas nacionais de prevenção de cegueira e ao câncer de pele (Cadernos de Saúde Pública, 2004), seja pelas conseqüências econômicas que pressionam o sistema público de saúde brasileiro (SUS), seja pelas conseqüências

adversas ao nível individual. O conhecimento da exposição à irradiação solar UV seria o primeiro passo para uma política pública de prevenção e mitigação do problema, porém, a medições da irradiação solar UV no Brasil são muito raras, seja porque os equipamentos são muito caros, seja porque os estudos dos efeitos maléficos da irradiação solar UV são relativamente recentes. A alternativa para essa situação é a estimação da irradiação UV através modelos computacionais devidamente calibrados com parâmetros locais.

## **OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO**

Estimar a irradiância solar ultravioleta utilizando os softwares SPCTRAL2 e SMARTS2, medir a irradiância solar ultravioleta utilizando piranômetro TURV e construir um fotômetro de baixo custo com sensor LED para medir a profundidade óptica de aerossóis. Como área de teste utilizou-se a localidade de Pesqueira-PE (semi-árido do Nordeste do Brasil).

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Importância do conhecimento da radiação solar UV**

A radiação ultravioleta faz parte do espectro solar que atinge a superfície do nosso planeta. O espectro da irradiação ultravioleta (UV) abrange comprimentos de onda de 100 a 400nm e normalmente é subdividido em três subintervalos: UVA: entre 320 e 400nm; UVB: entre 280 e 320nm; e UVC: entre 100 e 280nm (Fig.1).

A UVC é potencialmente a mais danosa aos tecidos biológicos, por possuir maior quantidade de energia, porém essa radiação é totalmente absorvida pelo oxigênio e ozônio presentes nas camadas superiores da atmosfera. A radiação UVB é absorvida parcialmente pelo vapor de água, oxigênio e dióxido de carbono e ozônio presente na estratosfera. Atinge a superfície terrestre em quantidades pequenas, porém suficientes para provocar efeitos biológicos. Por fim, a UVA é pouco absorvida pelos gases presentes na atmosfera e atinge a superfície terrestre em maiores quantidades, porém tem menor efeito agressivo do ponto de vista biológico (CORRÊA, 2004b). Assim, a radiação ultravioleta que incide na superfície terrestre caracteriza-se por grandes quantidades de UVA e pequena porção de UVB (OLIVEIRA et al., 2005).

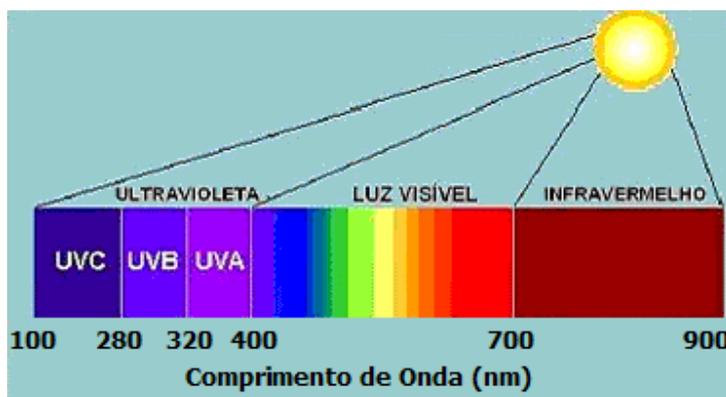


Figura 1 – Espectro eletromagnético.  
Agência de proteção contra radiação do governo Australiano - 1999

As observações realizadas nas últimas duas décadas (FARMAN et al., 1985; SOLOMON et al., 1986) levaram à conclusão de que houve uma tendência global de redução do ozônio atmosférico (buraco de ozônio antártico) e, com isso, um aumento na intensidade de radiação ultravioleta (UV) solar na superfície terrestre e conseqüentemente houve um aumento dos riscos e efeitos danosos à saúde humana. O buraco de ozônio evoluiu e estendeu-se a latitudes mais baixas e mais povoadas (KIRCHHOFF et al., 1996). Conseqüentemente o interesse por medidas de radiação UV solar vem crescendo nas comunidades mais afetadas (KIRCHHOFF et al., 1997a, 1997b, 1997c).

O ozônio absorve fortemente o UVB solar e assim uma redução significativa no ozônio total pode acarretar um aumento apreciável no fluxo do UVB solar, na superfície terrestre. Estima-se que uma redução de 1% no ozônio total poderia causar um aumento de 1,2% na radiação UV biologicamente ativa (KRZÝSCIN, 1996).

### 2.1.1 Absorção dos raios ultravioletas pelo globo ocular

Quanto maior o comprimento de onda da radiação ultravioleta, maior é seu poder de penetração nas sucessivas estruturas do globo ocular, que se inicia através da córnea (OLIVEIRA et al., 2005). Na figura 2 podem ser visualizadas as estruturas que compõem o globo ocular e, na figura 3, como cada parte pode ser afetada pelos três tipos de UV.

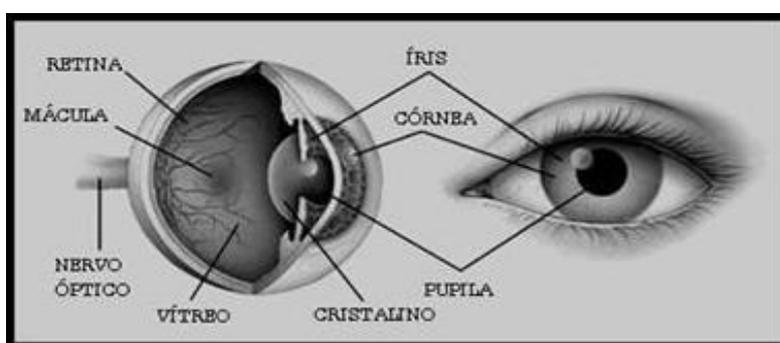


Figura 2 – Anatomia do olho humano (adaptado da Associação de Retinopatia de Portugal)

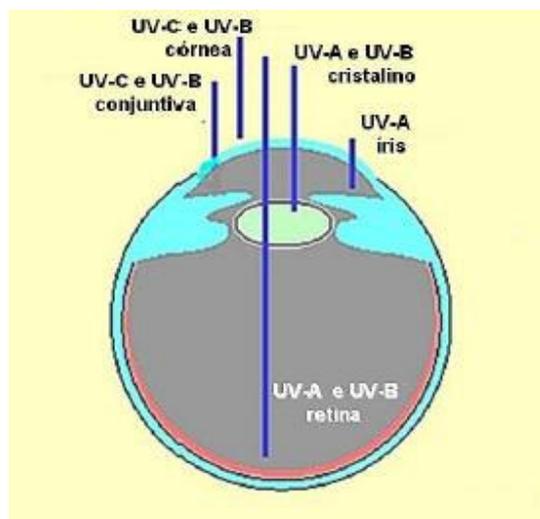


Figura 3 – Absorção do UV nas partes do olho humano (OLIVEIRA et al., 2005)

Convém ressaltar que caso a UVC não fosse totalmente absorvida pelo oxigênio e o ozônio presente nas camadas superiores da atmosfera, ela seria integralmente absorvida pela córnea. Para a UVB, a córnea e a conjuntiva absorvem a maior parte dessa radiação; já a parte remanescente consegue atingir o cristalino e uma parte menor ainda alcança a retina. Em se tratando da radiação UVA, ela consegue penetrar mais profundamente no olho devido ao seu comprimento de onda ser maior do que os outros dois tipos já citados. Como a radiação UVA apresenta uma predominância em relação a UVB, ela atinge a retina em maior quantidade.

### **2.1.2 Absorção dos raios ultravioleta pela pele**

Além de ser um bom reflexo da saúde, a pele é a primeira barreira do organismo contra as agressões externas. Ela é uma membrana flexível e muito resistente à tração, cobre a superfície do corpo, prolongando-se pelos orifícios naturais até as zonas protegidas pelas mucosas. Numa pessoa adulta, a extensão média da pele é de 1,6m<sup>2</sup>. Sua espessura oscila entre 0,5 e 4 mm, dependendo da parte considerada. Na figura 4 podem ser vistas as três camadas superpostas que compõem a pele, tendo cada qual funções e estruturas específicas: a epiderme ou camada exterior, a derme ou camada interna e a hipoderme ou camada profunda. Sua coloração varia, dependendo principalmente da raça, da idade, da parte do corpo e da exposição ao sol. O pigmento que dá a cor à pele é a melanina.

Além de proteger o organismo do meio externo, a pele intervém no processo de regulação da temperatura corporal e recolhe informações do meio externo através dos sentidos cutâneos. Esses sentidos permitem conhecer a forma e a consistência dos objetos

bastando tocá-los. Ao mesmo tempo, eles transmitem sensações de calor, frio, pressão, prazer e dor, originadas na pele.

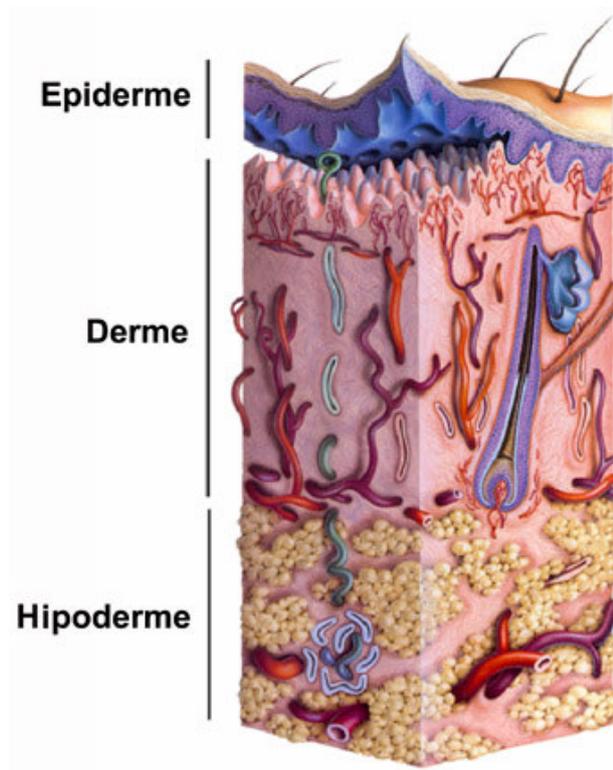


Figura 4 – Anatomia da pele humana (adaptado de Collection Mémoires et Thésés Électroniques)

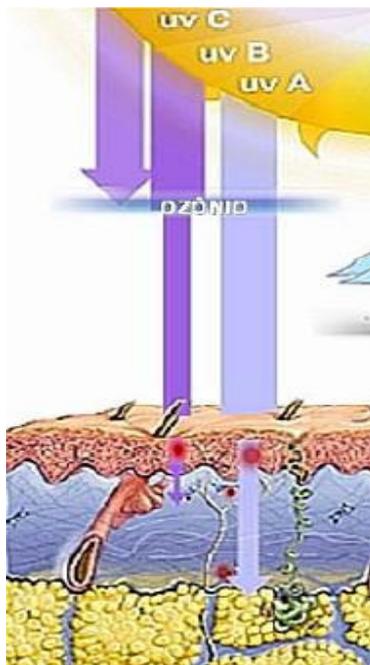


Figura 5 – Absorção do UV nas partes da pele humana (OLIVEIRA et al., 2005)

Dentre os efeitos nocivos mais preocupantes sobre a pele destaca-se o Câncer, o qual é o crescimento anormal e descontrolado das células que compõem a pele. As células da pele dispõem-se formando camadas e, dependendo da camada afetada, teremos os diferentes tipos de câncer. Os mais comuns e com baixo poder de metástase são os carcinomas basocelulares e os carcinomas epidermóides ou espinocelulares. Também chamados de Câncer de Pele Não-Melanoma (CPNM), são os tipos de câncer de pele mais frequentes (70% e 25%, respectivamente) (SBD, 2006). O mais perigoso é o melanoma, com alto potencial de produzir metástase, e que pode levar à morte se não houver diagnóstico e tratamento precoce. Tem-se observado um expressivo crescimento na incidência deste tumor em populações de pele branca (INCA, 2006). O câncer de pele não-melanoma, apesar das altas taxas de incidência, apresenta altos índices de cura principalmente devido à facilidade do diagnóstico precoce. Embora de baixa letalidade, em

alguns casos esse tipo de câncer pode levar a deformidades físicas e ulcerações graves. Os carcinomas basocelulares são mais comuns após os 40 anos, em pessoas de pele clara. Seu surgimento está diretamente ligado à exposição solar acumulativa durante a vida. Pode destruir os tecidos à sua volta, atingindo até cartilagens e ossos. São originários da epiderme e dos apêndices cutâneos acima da camada basal, como os pêlos, por exemplo. Já o carcinoma espinocelular é segundo tipo mais comum de câncer da pele, podendo se disseminar por meio de gânglios e provocar metástase. Entre suas causas estão às exposições prolongadas ao sol, principalmente sem a proteção adequada. Tem origem no queratinócio da epiderme, podendo também surgir no epitélio escamoso das mucosas. Indivíduos que trabalham com exposição direta ao sol são mais vulneráveis ao câncer de pele não-melanoma. Esse tipo de câncer é mais comum em adultos, com picos de incidência por volta dos 40 anos. Porém, com a intensificação da exposição pelos jovens, decorrentes de padrões de beleza, a média de idade dos pacientes vem diminuindo. Por essas razões, essas doenças, geralmente, além de acarretarem prejuízos ao indivíduo, também têm agravado financeiramente aos serviços de saúde (CORRÊA, 2004).

A melhor maneira de evitar que o câncer de pele se manifeste é por meio de sistemas preventivos simples, como: chapéu, guarda-sol, óculos escuros e filtros solares com fator de proteção 15 ou mais, dependendo das características individuais de cada um. A exposição ao sol deve ser evitada no período das 10h às 16h e mesmo durante o horário adequado é necessário utilizar os sistemas preventivos citados acima. As pesquisas realizadas pela Sociedade Brasileira de Dermatologia (SBD), mostram que as medidas preventivas tomadas pelos pais reduzem em até 85% as chances de desenvolvimento do câncer de pele se forem adotadas desde a infância.

## **2.2 Informações sobre medidas de UV**

### **2.2.1 Fatores ambientais que interferem com o nível de radiação ultravioleta**

A medida de radiação UV solar na superfície terrestre é muito difícil devido a sua pequena intensidade, à rápida variação da intensidade espectral com o comprimento de onda, e à escassez de radiômetros calibrados e sensíveis apenas ao UV solar. Além das dificuldades instrumentais, deve-se também considerar o fato da radiação solar UV na superfície terrestre ser função de muitas variáveis como, o ângulo solar zenital, a altitude em relação ao nível do mar, o ozônio total, a coluna atmosférica de aerossóis, a nebulosidade e o albedo superficial, entre outros (KIRCHHOFF et al, 2000).

#### **Ângulo do Sol**

A incidência da irradiação solar, em qualquer localidade do planeta, depende da posição instantânea do sol no céu, conforme pode ser vista na figura 6. A altura do sol é máxima quando atinge o ponto mais elevado no céu ao meio dia solar. Essa posição é conhecida como zênite. Quando o sol está no zênite a irradiação solar UV que atinge a superfície é máxima porque, nessa situação, a sua trajetória através da atmosfera é mais curta. O que foi dito acima poderia ser melhor compreendido através da equação massa de ar geométrica, o qual é o inverso do co-seno do ângulo zenital. Sendo a massa de ar igual a 1 próximo do meio dia solar e maior que 1 para horários diferentes do meio dia solar.

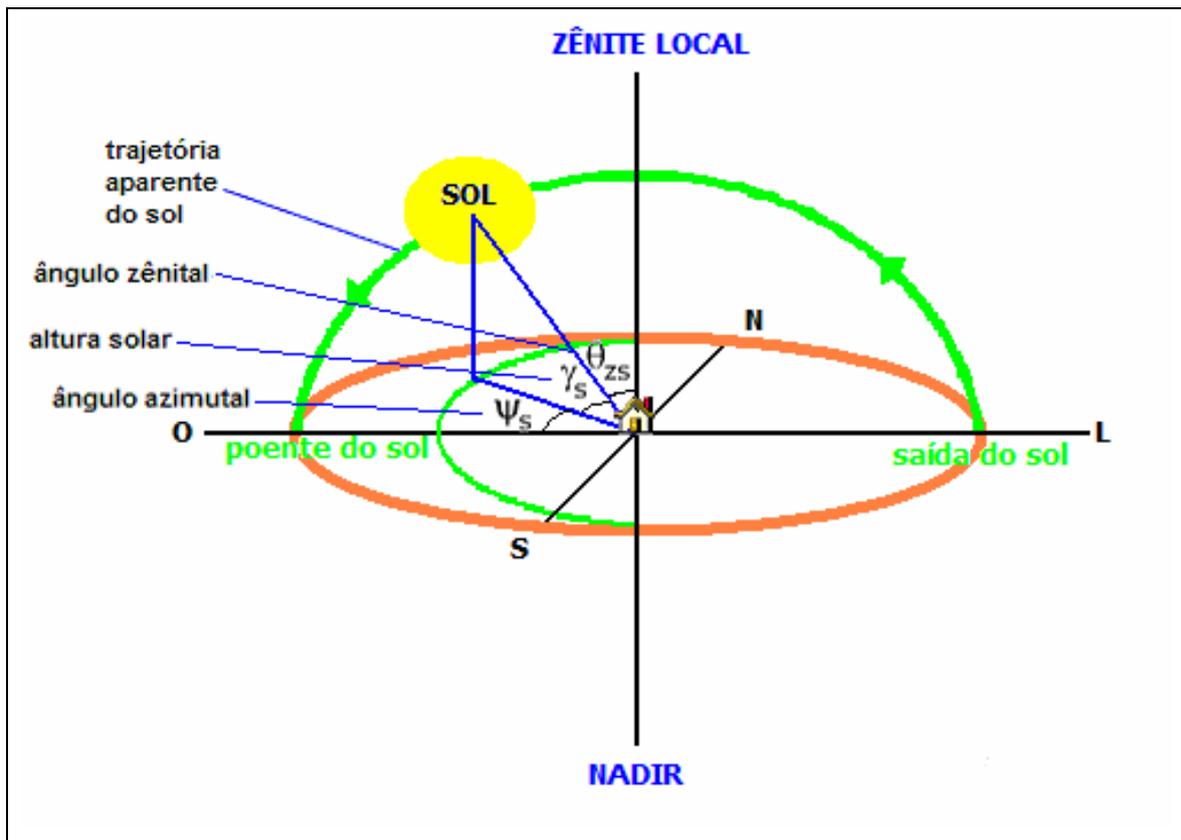


Figura 6 – Posição relativa do Sol no céu

## Latitude

Os níveis de radiação solar que chega à superfície terrestre depende muito da latitude, isto é, da posição geográfica do local. A razão pela qual a intensidade da radiação solar diminui à medida que aumenta a latitude, é que os raios solares atingem a Terra na faixa do equador com maior elevação média em relação ao plano do horizonte. Desse modo, os mesmos atravessam uma camada mínima de atmosfera antes de atingir a superfície terrestre. Porém, à medida que o local é mais afastado do equador, a altura do Sol sobre o horizonte se reduz e os raios solares percorrem um trajeto mais longo na atmosfera

antes de chegar ao solo (SILVA, 2006). Na figura 7, mostra-se que o máximo de radiação é recebido na linha do equador, na maior parte do ano. Note-se que há pouca diferença na intensidade de radiação solar ao longo do ano em uma região equatorial, onde é mais elevada nos equinócios de primavera (22 de setembro) e de outono (21 de março). No limite da zona intertropical, o Trópico de Capricórnio (paralelo de 23°27' latitude sul), a quantidade de radiação solar é alta apenas durante os meses de verão, reduzindo-se bastante (para 800 W/m<sup>2</sup> ou menos) no resto do ano. Em uma região temperada típica, a 40° de latitude, a radiação solar é mais baixa ainda. Conseqüentemente o Brasil, a Austrália e alguns países da América Latina e da África são mais expostos ao ultravioleta (OLIVEIRA et al., 2005).



Figura 7 – Variação da intensidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre na faixa intertropical do Hemisfério Sul no nível do mar (SILVA, 2006).

## Altitude

A cada 305m de altura, eleva-se o nível de exposição em 4%, uma consequência da gradual redução da camada atmosférica que filtra os raios UVB, o que aumenta progressivamente os níveis de irradiação. Ou seja, em altitudes mais elevadas a radiação UV viaja por uma distância menor através da atmosfera, Figura 8.



Figura 8 – Influência da altitude em relação ao nível de radiação UV

## **Camada de Ozônio**

A camada de ozônio situa-se numa faixa de 25 a 30 km da estratosfera - a parte da atmosfera que vai de 12 a 40 km. Os níveis de ozônio variam com a época do ano e, ou, até mesmo do dia, e de acordo com os padrões de circulação da atmosfera (OLIVEIRA et al., 2005). Os cientistas apontam os clorofluorcarbonos (usados em aerossóis, em geladeiras e aparelhos de ar-condicionado), também chamados CFC, como os responsáveis pelo desaparecimento de ozônio em áreas sobre a Antártida, amplas áreas do Chile e da Argentina.

## **Nuvens**

Nuvem é um conjunto visível de partículas minúsculas de água líquida ou de gelo, ou de ambas ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera. Este conjunto pode também conter partículas procedentes de vapores industriais, fumaças ou poeiras. Os principais fatores que intervêm na descrição do aspecto de uma nuvem são suas dimensões, sua forma, sua estrutura e sua textura, assim como sua luminância e cor. Estes fatores serão levados em consideração na descrição de cada uma das formas características das nuvens. As nuvens são o principal atenuador da irradiação solar e também da irradiação UV solar. São elas que tornam a irradiação solar de caráter estocástico.

## **Reflexão especular**

A reflexão ocorre na interface entre dois meios diferentes, quando parte da radiação que atinge esta interface é enviada de volta. Nessa interface o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (lei da reflexão). A fração da radiação incidente que é refletida por uma superfície é conhecida como albedo. A reflexão da radiação ultravioleta pelo mar tem em média albedo de 0,25, já pela neve possui o valor 0,8, para a areia 0,17, portanto, dependendo do meio ambiente o efeito da reflexão do UV pode ser muito intensificado, como por exemplo, no Ártico ou no Antártico. Na figura 9 podem ser vistos valores de albedo para diversas superfícies.

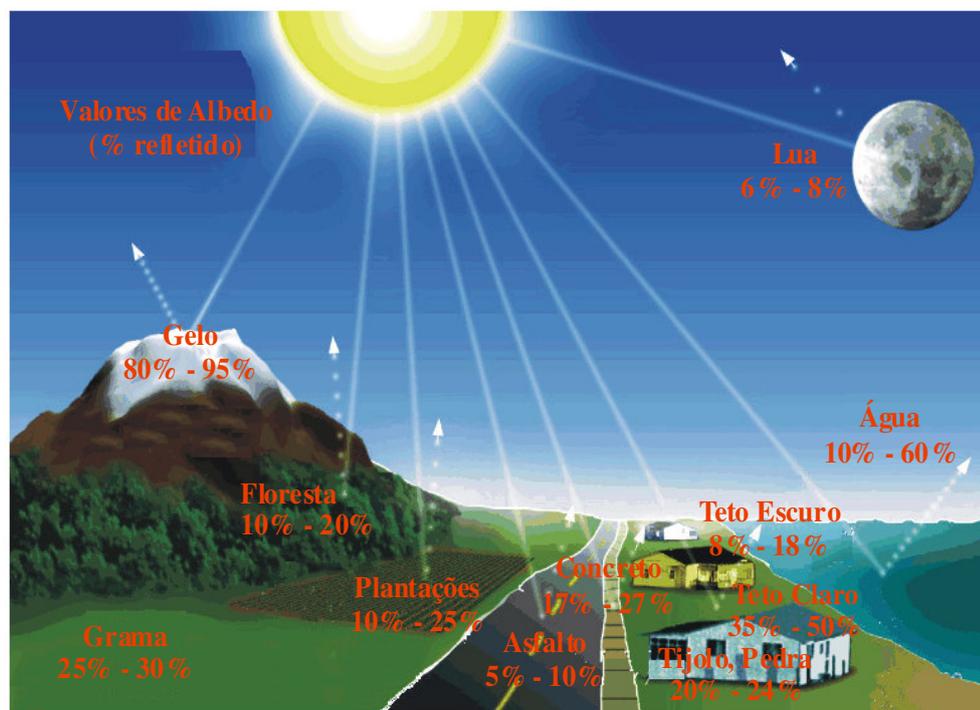


Figura 9 – Valores de albedo (adaptado de Lexique de Géologie)

### 2.2.2 Sensibilidade Biológica da Radiação Ultravioleta

A irradiância solar espectral na superfície terrestre é medida em termos de potência por unidade de área e por unidade de comprimento de onda, em unidades  $W/(m^2nm)$ , ou em banda integrada em  $W/m^2$ . Os modelos de efeito biológico da UV precisam retratar funções espectrais de resposta biológica aos estímulos da radiação, ou seja, a irradiância espectral UV deve ser ponderada pelo espectro de ação, de modo a se obter a irradiância biologicamente ativa, chamada irradiância eritêmica, no caso de seres humanos (MCKINLAY & DIFFEY, 1987). Sendo  $I_\lambda$  a irradiação espectral e  $\epsilon_\lambda$  o espectro de ação, então a irradiância eritêmica espectral  $S_\lambda$  será dada por:

$$S_\lambda = I_\lambda \epsilon_\lambda \quad [W/m^2nm]$$

Integrando-se  $S_\lambda$ , na região UV, tem-se S, a irradiância eritêmica:

$$S = \int_{280nm}^{400nm} I_\lambda \epsilon_\lambda d\lambda \quad [W/m^2] \quad (1)$$

Essa ponderação atribui fatores com pesos maiores ao comprimento de onda de maior interação biológica. Um espectro de ação é definido como uma relação numérica de resposta biológica relativa sob exposição a uma série de radiações monocromáticas em uma determinada faixa espectral (MADRONICH, 1993). O espectro de ação é determinado por meio de experimentos médicos que analisam o efeito biológico de diferentes comprimentos de onda de radiação. Na figura 10 é visto o espectro de ação eritêmica:

O índice ultravioleta (IUV) é uma forma de padronização da irradiância eritêmica por uma escala numérica, tal que  $1 \text{ IUV} = 25 \text{ mW/m}^2$  (WHO, 2002). Este é o índice UV divulgado amplamente pelos canais do tempo.

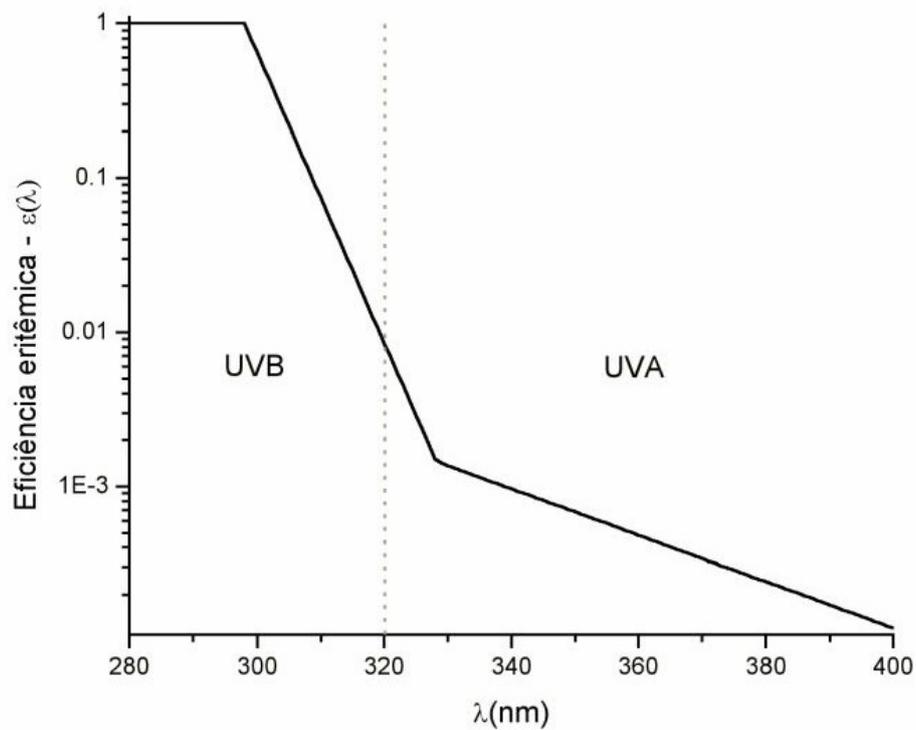


Figura 10 – Espectro de ação eritêmica

### 2.2.3 Biômetro

O biômetro é um medidor da intensidade da radiação UV biologicamente ativa para a pele humana, Figura 11. Ele foi utilizado com sucesso para correlacionar a ocorrência de câncer de pele com a radiação UV, em diferentes locais (WEATHERHEAD et al., 1997). Seu princípio de medição baseia-se na detecção da luz emitida por um elemento composto de fósforo com um diodo de arseneto de gálio (GaAs). A radiação solar que atinge o domo do radiômetro é parcialmente filtrada de modo que a luz que excita o componente de fósforo corresponde à irradiação UV na faixa de 280-380nm. A irradiação medida é convoluída com o espectro de ação de eritema de McKinlay & Diffey (1987), segundo a equação (1).



Figura 11 – Biômetro

### 2.2.4 Piranômetro

O piranômetro é um instrumento que mede a radiação global e caracteriza-se pelo uso de uma termopilha que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, uma pintada de preto e outra pintada de branco igualmente iluminadas. A expansão sofrida pelas superfícies provoca um diferencial de potencial que, ao ser medida, mostra o valor instantâneo da energia solar. Outro modelo de piranômetro é aquele que utiliza uma célula fotovoltaica de silício monocristalino. Estes piranômetros são largamente utilizados, pois apresentam custos bem menores do que os equipamentos tradicionais. Pelas características da célula fotovoltaica, este aparelho possui limitações por apresentar sensibilidade espectral que corresponde a apenas 60% da radiação solar incidente.

O piranômetro conhecido como TURV (The Total Ultraviolet Radiometer) da Eppley, figura 12, mede a irradiação integral (UVA+UVB) que vai de 295 a 385 nm, sendo um instrumento para medidas de radiação UV (PIRANÔMETRO, 2007).



Figura 12 – TURV (The Total Ultraviolet Radiometer) da Eppley

## 2.2.5 Medidas realizadas no Brasil

Kirchhoff (2000) fez medições com biômetros para as estações de Blumenau (SC), Cachoeira Paulista (SP), Campo Grande (MS), Natal (RN), Porto Alegre (RS) e Ribeirão Preto (SP) no Brasil, La Paz na Bolívia e Punta Arenas no Chile, no ano de 1999, vistas na figura 13. Na Tabela 1 são apresentadas as coordenadas geográficas das estações. Verificou-se o caráter marcadamente sazonal da variação da Radiação UV-B Eritema, associada ao ciclo anual do ângulo solar zenital, visto que a maior variação imposta ao UV-B não é devida ao ozônio e sim ao ângulo solar zenital. Tal efeito implica em radiação mais intensa em menores latitudes; por exemplo, maior na região de Campo Grande e de Natal do que nas regiões de Cachoeira Paulista e de Porto Alegre. Os mesmos níveis de radiação para Natal e Campo Grande são causados pela maior altitude de Campo Grande (700m) em relação a Natal (30m) o que supera o efeito latitudinal. Já para La Paz, tendo maior altitude (3660m) em relação as outras localidades, tem seus níveis de radiação superior, Figura 14. O gráfico da figura 14 está em função de MED (Minimum Erythema Dosis) que é a quantidade de energia mínima capaz de causar um eritema e equivale a  $23\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ , sendo esta definição válida para o fototipo de pele humana mais sensível à radiação solar (KIRCHHOFF et al., 1996; KRZÝSCIN, 1996). Observaram-se também o efeito da altitude com as doses de radiação da região de La Paz superando as da região de Campo Grande, com ambas as estações de observações na mesma faixa latitudinal, devido à diminuição da atenuação de radiação por espalhamento, causada por uma coluna de ozônio proporcionalmente menor e uma troposfera mais rarefeita. Figura 15.

Tabela 1 – Localização geográfica das estações de observações.

Estações de observação	Latitude S	Longitude W
Natal, RN	5,84°	35,21°
La Paz, Bolívia	16,54°	68,06°
Campo Grande,MS	19,25°	54,34°
Ribeirão Preto*,SP	21,17°	47,70°
Cachoeira Paulista,SP	22,70°	45,00°
Blumenau*, SC	26,92°	49,05°
Porto Alegre, RS	30,47°	50,38°
Punta Arenas*, Chile	53,20°	70,90°

As estações que estão marcadas com (\*), estão com seus biômetros desativados. São os Biômetros de Ribeirão Preto, Blumenau e Punta Arenas, os quais estiveram em funcionamento até 25/10/1995, 22/01/1997 e 30/11/1997, respectivamente.



Figura 13 – Localização geográfica das estações.

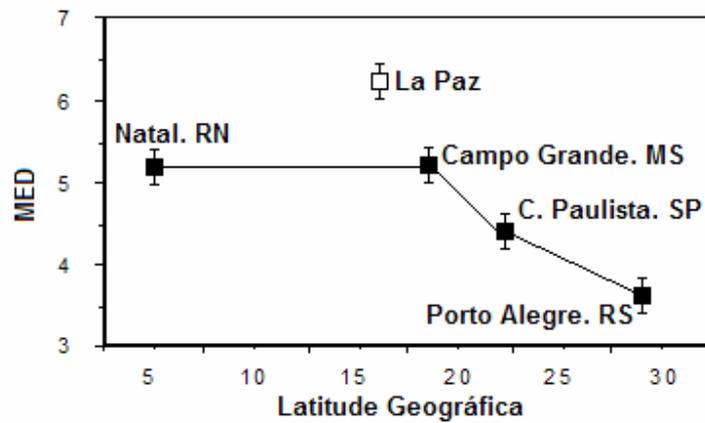


Figura 14 – Média sosticial de verão da radiação UV – eritema em função da latitude geográfica para as estações de observações de Natal, Campo Grande, Cachoeira Paulista e Porto Alegre.

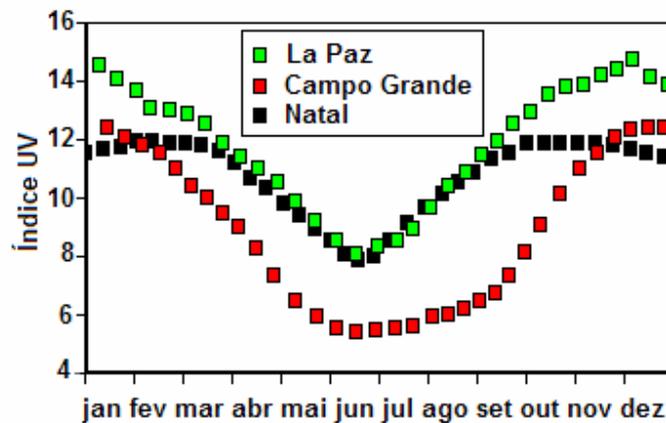


Figura 15 – Curva suavizada de 30 dias para os valores médios diários do Índice UV para as estações de observações de Campo Grande, La Paz e Natal.

### **2.3 Levantamentos dos softwares paramétricos existentes**

Modelos de irradiância solar espectral são necessários em muitas aplicações e disseminadas em diferentes disciplinas, tais como ciências atmosféricas, biologia, física médica e tecnologias energéticas (sistemas fotovoltaicos, iluminação natural, sistemas para aquecimento de água e ar, dentre outros). Dois tipos de modelos de irradiância espectral podem ser usados para previsão e ou análise da irradiação solar incidente na superfície terrestre: códigos computacionais rigorosos e sofisticados e modelos paramétricos simples (GUEYMARD, 1993).

A família LOWTRAN é um exemplo bem conhecido do primeiro tipo, criado há mais de 20 anos atrás. O mesmo foi recentemente superado por um código mais detalhado chamado MODTRAN (ANDERSON et al., 1993; BERK et al., 1989). Este modelo considera a atmosfera constituída de diferentes camadas, e usa medidas do perfil vertical de gases e aerossóis constituintes. Este código requer entradas de dados detalhadas; além disso, o tempo de execução e algumas limitações de entrada o tornam um instrumento não apropriado para certas aplicações, particularmente em engenharia. A alternativa são modelos de parametrização simples em comparação ao modelo MODTRAN. Pois o critério usado para o cálculo e formulação desses modelos tem sido: simplicidade, precisão e fácil adequação com dados meteorológicos disponíveis.

Desde os anos 80 apareceram na literatura modelos simples (BIRD, 1984; BIRD & RIORDAN, 1986; BRINE & IQBAL, 1983; GUEYMARD, 1993; JUSTUS & PARAI, 1985; MATTHEWS et al., 1987; NANN & RIORDAN, 1991). Para o presente estudo foram escolhidos dois softwares computacionais que apresentam os critérios mencionados: o SPCTRAL2 (BIRD, 1986) e o SMARTS2 (GUEYMARD, 1993).

### 2.3.1 Softwares SPCTRL2 “Simple Solar Spectral Model” e SMARTS2 “A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine”

O SPCTRL2, também conhecido como modelo *Bird Model*, é um software baseado em um modelo simples que utiliza os seguintes parâmetros de entrada: constante solar, ângulo zenital, pressão atmosférica superficial, albedo, quantidade de água precipitável, ozônio total e turbidez atmosférica para  $0.5\mu\text{m}$ . Este modelo é inteiramente baseado em expressões algébricas simples.

O SMARTS2 é um modelo espectral de parametrização de transmitância simples usado para calcular a radiação direta e difusa (GUEYMARD, 1993), o qual utiliza parâmetros de entrada iguais aos utilizados no software SPCTRL2. Este modelo é inteiramente baseado em expressões algébricas.

Na Figura 16 são apresentados os principais fenômenos de espalhamento e absorção da irradiância extraterrestre através da atmosfera até atingir a superfície terrestre. A compreensão desses fenômenos é essencial para que métodos matemáticos e computacionais para o cálculo da radiação que atinge a superfície terrestre, tais como os softwares citados, sejam desenvolvidos.

Na equação (2) podem ser vistas as partes constituintes da irradiância total,  $E_{t\lambda}$ , sendo a mesma a soma das irradiâncias normal direta,  $E_{bn\lambda}$  com a irradiância difusa,  $E_{s\lambda}$ . Onde estas são os valores de saída obtidos através das simulações para um plano horizontal.

$$E_{t\lambda} = E_{bn\lambda} + E_{s\lambda} \quad (2)$$

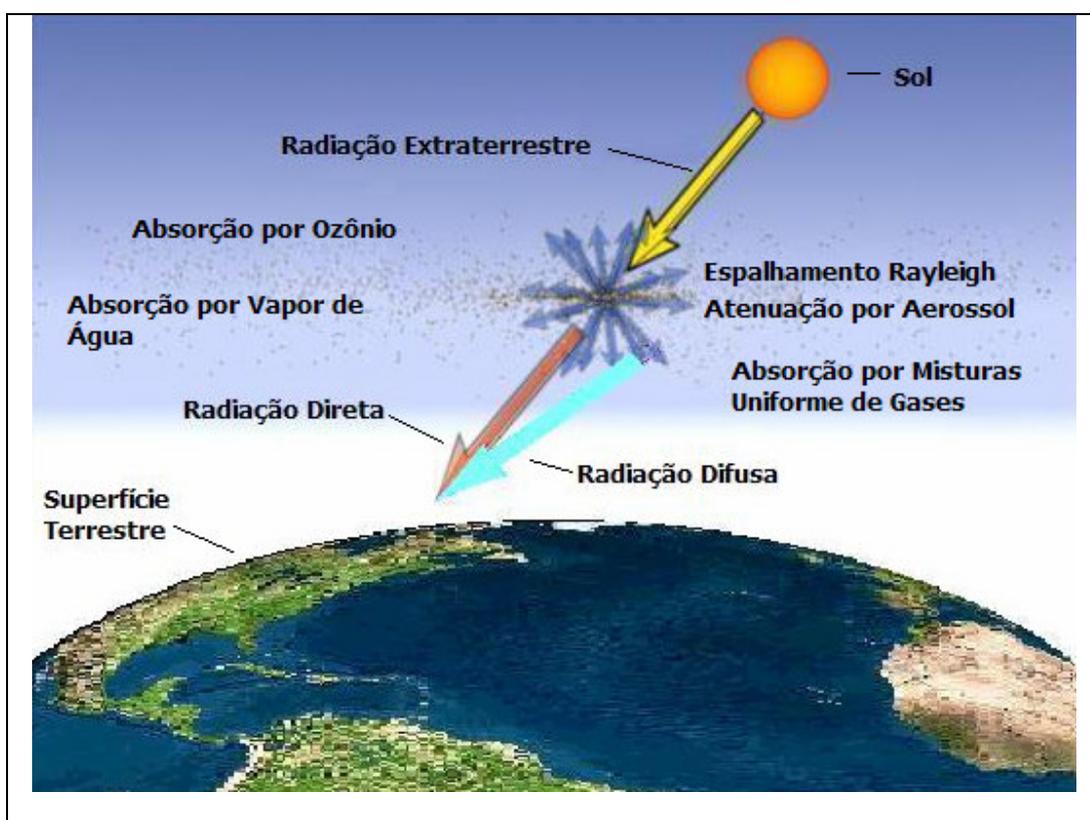


Figura 16 – Diagrama esquemático de efeito para a radiação total.

Na seção seguinte será apresentada uma descrição detalhada das equações algébricas que compõem os softwares SPCTRAL2, o qual foi construído a partir do modelo Bird (BIRD, 1981) e do SMARTS2 (GUEYMARD, 1995).

## **Espectro Solar dos softwares**

O SMARTS2 usa um espectro solar modificado. Esse espectro é composto pelos dados experimentais do satélite SUSIM (Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor) para comprimentos de onda compreendidos no intervalo de 280 a 412nm. Para 412 a 825nm utiliza o espectro proposto por Nicolet (1989), e de 825 a 2495, o proposto por Arvesen et al (1969) e finalmente para 2495 a 4000nm o espectro usado é o WRC85 proposto por Wehrli (1985). Seus respectivos valores da irradiância para seus comprimentos de onda são encontrados tabelados no manual do usuário, para intervalos de resolução de 1nm.

O parâmetro  $E_{o\lambda}$  que é a irradiância extraterrestre, usado no SPCTRAL2, foi obtido de Fröhlich & Wehrli (1981) do World Radiation Center. O principal segmento deste espectro que é utilizado neste modelo foi tirado do espectro de Neckel & Labs (1981). A resolução da versão de 10 nm deste espectro é encontrada no manual do usuário, para os 122 comprimentos de onda usados.

## **Atmosfera de Referência**

No SMARTS2 existem dez atmosferas de referências para o usuário. Elas consistem de diferentes perfis verticais de temperatura, pressão e concentrações dos principais gases da atmosfera. Seis delas são descritas por Anderson et al. (1986). Quatro atmosferas complementares tem sido construídas para este modelo, SMARTS2, de outros perfis básicos de referência (Anon, 1966). Todos os perfis são definidos com incrementos verticais geralmente de 1km. Para os primeiros 4km da estratosfera usaram-se os

parâmetros encontrados na Tabela 2. Nesta tabela encontra-se a abundância do ozônio e do dióxido de nitrogênio, ao nível do mar. Como estes constituintes variam apreciavelmente com a altitude  $z$ , o seguinte fator de correção é utilizado:

$$C_t = 1 - 0.00898z \quad (3)$$

A temperatura nominal ou efetiva do ozônio que é definida como o peso médio de concentração e temperatura discretizada de uma atmosfera de referência é obtida:

$$T_{eo} = a_o + a_1 T^* \quad (3)$$

Onde  $a_o = 332.41K$  e  $a_1 = -0.34467$  no verão e  $a_o = 142.68K$ ,  $a_1 = 0.28498$  no inverno e  $T^*$  é a temperatura média diária do ar. Sabendo-se que interpolações são feitas para os valores fora dos resultados encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Perfis verticais e abundâncias efetivas para atmosfera tipo tropical

Perfis Verticais					Abundâncias Efetivas				
z (km)	T <sub>a</sub> (K)	T <sub>eo</sub> (K)	p (mb)	RH (%)	O <sub>2</sub> (km)	CO <sub>2</sub> (km)	H <sub>2</sub> O (cm)	O <sub>3</sub> (atm-cm)	NO <sub>2</sub> (atm-cm)
0	299,7	229,7	1013	74,9	4,9313	4,9539	4,117	0,2773	2,11E-04
1	293,7	226,9	904	72,3	3,9769	3,9407	2,494		
2	287,7	224,3	805	74,2	3,1925	3,1498	1,441		
3	283,7	221,8	715	47,8	2,5502	2,4572	0,735		
4	277,0	219,6	633	34,7	2,0309	1,9237	0,432		

## Posição Solar e Massa Óptica

No SMARTS2 a posição aparente do Sol é definida pelo ângulo zenital e seu azimute. Estes ângulos são obtidos em função da declinação e ângulo horário através do algoritmo descrito pelo Astronomical Almanac (NAUTICAL ALMANAC OFFICE, 1992).

Muitos modelos simplificados usam a massa óptica, a qual é função do ângulo zenital, definida por Kasten e Young (1989):

$$m_i = \left[ \cos Z + a_{i1} Z^{a_{i2}} (a_{i3} - Z)^{a_{i4}} \right]^{-1} \quad (4)$$

Onde  $m_i$  representa:  $m_R$  (Rayleigh),  $m_a$  (aerosol),  $m_n$  ( $NO_2$ ),  $m_o$  (ozônio),  $m_u$  (mistura de gases) ou  $m_w$  (vapor de água),  $Z$  é o ângulo zenital, e os  $a_{ij}$  são os coeficientes propostos por Kasten e Young (1989) apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes para massas ópticas de ar

Processos	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	$m_i$ ( $Z=90^\circ$ )
Rayleigh	4,5665E-01	0,07	96,4836	-1,6970	38,136
Ozônio	2,6845E+02	0,50	115,4200	-3,2922	16,601
NO2	6,0230E+02	0,50	117,9600	-3,4536	17,331
Mistura de Gases	4,5665E-01	0,07	96,4836	-1,6970	38,136
Vapor de Água	3,1141E-02	0,10	92,4710	-1,3814	71,443
Aerossóis	3,1141E-02	0,10	92,4710	-1,3814	71,443

No SPCTRAL2 a massa de óptica de ar  $m$  que é dada por Kasten (1966):

$$m = \left| \cos Z + 0.15(93.885 - Z)^{-1.253} \right|^{-1} \quad (5)$$

### 2.3.2 Irradiação normal direta

Um feixe de irradiância recebida na superfície terrestre por uma superfície normal de raios solares ( ou feixe de irradiância normal), para um dado comprimento de onda  $\lambda$ , é dado por

$$E_{bn\lambda} = E_{on\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{o\lambda} T_{w\lambda} T_{u\lambda} T_{n\lambda} \quad (6)$$

Onde  $E_{on\lambda}$  é a irradiância extraterrestre corrigida para a atual distância terra-sol, sendo este parâmetro obtido no SPCTRAL2 pelo produto da irradiância extraterrestre  $E_{o\lambda}$  pelo fator de correção para a distância sol-terra  $D$ . Esse último, pode ser obtido como função do ângulo diário ( $\varphi$ ) (SPENCER, 1971) como:

$$D = 1.00011 + 0.034221 \cos \varphi + 0.00128 \sin \varphi + 0.000719 \cos 2\varphi + 0.000077 \sin 2\varphi \quad (7)$$

O ângulo diário  $\varphi$  em radianos é representado por:

$$\varphi = 2\pi \frac{(d-1)}{365} \quad (8)$$

onde  $d$  é o número do dia do ano (1 a 365).

Na Tabela 4 pode ser visto o resumo dos principais componentes da irradiância direta normal que constituem os modelos dos softwares.

Tabela 4 – Resumo dos principais componentes das equações dos modelos computacionais para irradiância direta.

Componente	SPCTRAL2	SMARTS2
Irradiância normal direta	$E_{bn\lambda} = E_{on\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{o\lambda} T_{w\lambda} T_{u\lambda}$	$E_{bn\lambda} = E_{on\lambda} T_{R\lambda} T_{a\lambda} T_{o\lambda} T_{w\lambda} T_{u\lambda} T_{n\lambda}$
Espalhamento Rayleigh	$T_{R\lambda} = \exp\left\{-\frac{mP}{P_0} / [a_1 \lambda^4 + a_2 \lambda^2]\right\}$	$T_{R\lambda} = \exp\left[-m_R P / (a_1 \lambda^4 + a_2 \lambda^2 + a_3 + a_4 \lambda^{-2})\right]$
Espalhamento Aerossol	$T_{a\lambda} = \exp(-m \tau_{a\lambda})$	
Absorção por Ozônio	$T_{o\lambda} = \exp(-m_o o_3 A_{o\lambda})$	
Absorção em Vapor de Água	$T_{w\lambda} = \exp\left -0,2385 A_{w\lambda} Wm / (1 + 20,07 A_{w\lambda} Wm)^{0,45}\right $	$T_{w\lambda} = \exp\left\{-[(m_w W)^{1,05} f_w^n B_w A_{w\lambda}]^k\right\}$
Transmitância por mistura uniforme de gases	$T_{u\lambda} = \exp\left -1,41 A_{u\lambda} \frac{mP}{P_0} / \left(1 + 118,3 A_{u\lambda} \frac{mP}{P_0}\right)^{0,45}\right $	$T_{u\lambda} = \exp\left[-(m_u u_u A_{u\lambda})^a\right]$
Absorção por Dióxido de Nitrogênio	-	$T_{n\lambda} = \exp(-m_n u_n A_{n\lambda})$

Os outros fatores são as transmitâncias para os diferentes processos considerados na equação (6) são: espalhamento Rayleigh ( $T_{R\lambda}$ ), atenuação aerossol ( $T_{a\lambda}$ ), absorção de ozônio ( $T_{o\lambda}$ ), absorção em vapor de água ( $T_{w\lambda}$ ), misturas uniforme de gases ( $T_{u\lambda}$ ), e finalmente,  $NO_2$  ( $T_{n\lambda}$ ), respectivamente. Onde o ultimo fator de transmitância,  $NO_2$ , só encontra-se presente na equação do SMARTS2.

## **Espalhamento Rayleigh**

O espalhamento Rayleigh se aplica ao estudo do espalhamento de partículas muito menores que o comprimento de onda da radiação incidente (partículas com raio menor que  $0,1\text{\AA}$ ), visto que na atmosfera é promovido basicamente pelas moléculas de  $N_2$  e  $O_2$  por serem as mais abundantes. É por consequência desse espalhamento que a cor do Céu é azul e no nascente e ocaso do sol, sua coloração torna-se avermelhada, devido ao termo inversamente proporcional de quarta potencia nas equações presente na tabela 4. Sendo  $P$ , definida como pressão superficial e  $P_0$ , pressão superficial ao nível do mar. Os coeficientes ( $a_1$  e  $a_2$  para o SPCTRAL2 e  $a_1, a_2, a_3$  e  $a_4$  para o SMARTS2 ) presentes nas equações são valores empíricos, tabelados e encontrados no manual do usuário.

## Espalhamento e Absorção por Aerossol

Os aerossóis são importantes nos processos de espalhamento e absorção de radiação solar, os quais são definidos como partículas sólidas e ou líquidas em suspensão em um meio gasoso. Na atmosfera, o meio gasoso é o próprio ar. Suas características dependem basicamente de suas fontes de emissão e dos processos de evolução ou "envelhecimento" na atmosfera. O intervalo de tamanho varia desde aglomerados de moléculas a partículas com raio de algumas dezenas de micrômetros ( $\sim 5 \times 10^{-3} \mu\text{m}$  a  $20 \mu\text{m}$ ).

As principais fontes naturais são suspensão de poeira do solo, erupções vulcânicas, queimadas, grãos de pólen e reações entre emissões gasosas (processo denominado conversão gás-partícula). Dentre as fontes antropogênicas destacam-se a queima de combustíveis fósseis, processos industriais, poeira de ruas pavimentadas ou não, transporte, queima de biomassa.

Como foi proposto por Bird (1984), usou-se a expressão de transmitância de aerossol de Angstrom, encontrada nos dois softwares, a qual é da forma:

$$T_{a\lambda} = \exp(-m\tau_{a\lambda}) \quad (9)$$

com

$$\tau_{a\lambda} = \beta_i (\lambda)^{-\alpha_i} \quad (10)$$

fazendo  $\alpha_i = \alpha_1$  e  $\beta_i = 2^{\alpha_2 - \alpha_1} \beta$  se  $\lambda < 0,5 \mu\text{m}$ , como  $\tau_{a,5} = 2^{\alpha_2} \beta$ , o qual é a profundidade óptica para  $0,5 \mu\text{m}$ , faz com que  $\tau_{a\lambda}$  assumam a forma:

$$\tau_{a\lambda} = \tau_{a0,5} \left( \frac{\lambda}{0,5} \right)^{-\alpha_1} \quad (11)$$

Para o SMARTS2 :  $m = m_a$  que é a massa óptica de aerossol, e os valores de  $\alpha_1$  serão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes para diferentes modelos aerossóis

Umidade relativa		0%	50%	70%	80%	90%	95%	98%	99%
Rural	$\alpha_1$	0,933	0,932	0,928	0,902	0,844	0,804	0,721	0,659
	$\alpha_2$	1,444	1,441	1,428	1,376	1,377	1,371	1,205	1,134
Urbano	$\alpha_1$	0,822	0,827	0,838	0,829	0,779	0,705	0,583	0,492
	$\alpha_2$	1,167	1,171	1,186	1,229	1,256	1,252	1,197	1,127

Para o SPCTRAL2 :  $m$  é a massa óptica de ar e o valor de  $\alpha_1$  utilizado na equação (11) é igual a 1,140.

## Absorção por Ozônio

A equação de transmitância do ozônio encontrada nos manuais dos dois softwares é da forma:

$$T_{o\lambda} = \exp(-A_{o\lambda}o_3m_o) \quad (12)$$

onde  $A_{o\lambda}$  é o coeficiente de absorção espectral do ozônio tabelados para os dois softwares,  $o_3$  é a quantidade de ozônio (atm-cm), e  $m_o$  é a massa de ozônio. A expressão da massa de ozônio utilizada no SPCTRAL2 é:

$$m_o = (1 + h_o/6370)/(\cos^2 Z + 2h_o/6370)^{0.5} \quad (13)$$

Onde o parâmetro  $h_o$  é a altura máxima da concentração de ozônio, que é aproximadamente 22 km. Tendo em vista que a altura do ozônio varia com a altitude e tempo do ano.

Já a expressão da massa óptica de ozônio utilizada no SMARTS2 é:

$$m_o = \left[ \cos Z + 2684,5Z^{0.5}(115,42 - Z)^{-3,2922} \right]^{-1} \quad (14)$$

## **Transmitâncias para Absorção em Vapor de Água e Absorção de Mistura Uniforme de Gases**

As equações para a transmitância em vapor de água presentes nos modelos dos softwares SPCTRAL2 e SMARTS2 e vistas na tabela 4 têm valor igual a 1 para o intervalo de comprimento de onda compreendido para a radiação ultravioleta. Pois seus coeficientes  $A_{w\lambda}$  tabelados para esse intervalo são iguais a zero para os dois modelos, cancelando as outras grandezas constituintes da exponencial das equações citadas.

O mesmo pode ser dito para as equações de transmitância de absorção de mistura uniforme de gases. Pois seus coeficientes  $A_{u\lambda}$  são iguais a zero para os dois modelos.

## Absorção do Dióxido de Nitrogênio

A lei de Bouguer para o  $NO_2$  é dada por:

$$T_{n\lambda} = \exp(-m_n u_n A_{n\lambda}) \quad (15)$$

onde  $m_n$  é massa óptica para o dióxido de nitrogênio,  $u_n$  caminho reduzido ( em atm-cm), e

$A_{n\lambda}$  é o coeficiente de absorção espectral, dado pela equação abaixo:

$$A_{n\lambda}(T_{en}) = \text{Max} \left\{ 0, A_{n\lambda}(T_m) \left[ 1 + (T_{en} - T_m) \sum_{i=0}^{i=5} f_i \lambda^i \right] \right\} \quad (16)$$

Onde  $T_{en}$  é a temperatura nominal ou efetiva e  $T_m$  é a temperatura de referência do laboratório que é igual a 243,2K e seus coeficientes de absorção são:

$$f_0 = 0,69773, \quad f_1 = -8,1829, \quad f_2 = 37,821, \quad f_3 = -86,136, \quad f_4 = 96,615, \quad f_5 = -42,635,$$

para  $\lambda < 0,625 \mu m$ , se não  $f_0 = 0,03539$ ,  $f_1 = -0,04985$ , e  $f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0$ .

Os valores de  $u_n$  são inseridos a partir da escolha do tipo de atmosfera padrão utilizado no programa. Para o presente estudo o tipo de atmosfera utilizado foi o Tropical e o valor de  $u_n$  é igual a  $2,11 \cdot 10^{-4}$ .

### 2.3.3 Irradiação Difusa sobre uma superfície horizontal

A irradiância difusa é difícil de determinar com precisão com simples métodos de parametrização, como os que foram usados para o cálculo direto da irradiância normal na seção anterior. A irradiância difusa sobre uma superfície horizontal é dividida dentro de três componentes: (1) componente de espalhamento Rayleigh  $E_{R\lambda}$ ; (2) componente de espalhamento aerossol  $E_{a\lambda}$ ; e (3) componente que representa múltiplas reflexões de irradiância entre a terra e o ar  $E_{g\lambda}$ . O espalhamento de irradiância total  $E_{s\lambda}$  é então dado pela soma:

$$E_{s\lambda} = E_{R\lambda} + E_{a\lambda} + E_{g\lambda} \quad (17)$$

Na Tabela 6 pode ser visto o resumo dos principais componentes da irradiância difusa sobre uma superfície horizontal, os quais constituem os modelos dos softwares.

Tabela 6 – Resumo dos principais componentes das equações dos modelos computacionais para irradiância difusa sobre uma superfície horizontal.

Componente	SPCTRAL2	SMARTS2
Irradiância difusa	$E_{s\lambda} = E_{R\lambda} + E_{a\lambda} + E_{g\lambda}$	
Espalhamento Rayleigh	$E_{R\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z T_{o\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{R\lambda}^{0,95}) 0,5$	$E_{R\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z \Gamma_{o\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{n\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{R\lambda}^{0,9}) F_R$
Componente de espalhamento aerossol	$E_{a\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z T_{o\lambda} T_{R\lambda}^{1,5} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{as\lambda}) F_a$	$E_{a\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z \Gamma_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{n\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{as\lambda}) F_a$
Componente de múltiplas reflexões de irradiância Céu-Terra	$E_{g\lambda} = (E_{bn\lambda} \cos Z + E_{R\lambda} + E_{a\lambda}) \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda} C_s / (1 - \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda})$	$E_{g\lambda} = (E_{bn\lambda} \cos Z + E_{d0\lambda}) \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda} / (1 - \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda})$

## Espalhamento Rayleigh

O espalhamento Rayleigh presente no manual do SMARTS2 é da forma:

$$E_{R\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z \Gamma_{o\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{n\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{R\lambda}^{0,9}) F_R \quad (18)$$

Onde  $F_R = F_{R1} F_{R2}$  é a fração da radiação que vai para baixo,  $F_{R1} = 0.5$  é o espalhamento para baixo para um único espalhamento Rayleigh na atmosfera, e  $F_{R2}$  é dado como:

$$F_{R2} = 1 \text{ se } \tau_{R\lambda} < \tau_{Rm} \quad (19)$$

do contrário

$$F_{R2} = \exp \left[ - \left( \frac{\tau_{R\lambda} - \tau_{Rm}}{\sigma_R} \right)^{0,72 + \cos Z} \right] \quad (20)$$

Onde

$$\sigma_R = 3,65 - 2,3 \exp(-4 \cos Z) \quad (21)$$

$$\tau_{Rm} = 0,17 [1 - \exp(-8 \cos Z)] \quad (22)$$

A transmitância de absorção de aerossol,  $T_{aa\lambda}$ , que é definida como:

$$T_{aa\lambda} = \exp[-m_a (1 - \omega_\lambda) \tau_{a\lambda}] \quad (23)$$

sendo  $\omega_\lambda$  é o espalhamento único de albedo e dado por:

$$\omega_\lambda = 0,9441 - 0,08817 \exp(1 - 3,3815\lambda) \quad (24)$$

para  $\lambda < 2 \mu m$ ,

ou então,

$$\omega_\lambda = 0,8569 + 0,0436\lambda \quad (25)$$

Todas as outras transmitâncias da eq.(18) foram definidas, exceto  $\Gamma_{o\lambda}$ , que é a transmitância efetiva de ozônio para espalhamento para baixo,  $\Gamma_{o\lambda}$ , que é dada por:

$$\Gamma_{o\lambda} = \exp(-\gamma_1 \tau_{o\lambda}^{0,95} - \gamma_2 \tau_{o\lambda}) \quad (26)$$

para  $\tau_{o\lambda} \leq 2$

Ou então

$$\Gamma_{o\lambda} = \exp[-\gamma_3 - \gamma_4(\tau_{o\lambda} - 2)] \quad (27)$$

Onde

$$\gamma_1 = (-11,012 + 12,392m_o)/(1 + 0,23644m_o) \quad (28)$$

$$\gamma_2 = 3,2656[1 - \exp(-0,46464m_o^{1,25})] - 0,965936\gamma_1 \quad (29)$$

$$\gamma_3 = 1,93187\gamma_1 + 2\gamma_2 \quad (30)$$

$$\gamma_4 = \exp(0,31045 + 0,001684m_o - 0,28549m_o^{-4}) \quad (31)$$

e  $\tau_{o\lambda} = m_o o_3$ , ou seja o produto entre a massa de ozônio pela quantidade de ozônio, parâmetros já definidos.

A expressão constituinte para o termo de espalhamento Rayleigh presente no SPCTRAL2 é semelhante ao do SMARTS2, tendo como diferença o fator multiplicativo  $F_R$  ser igual a 0,5, e a transmitância de ozônio no lugar da transmitância efetiva de ozônio para espalhamento para baixo e o termo de transmitância Rayleigh ser elevado a 0,95 em lugar de 0,9.

$$E_{R\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z T_{o\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{R\lambda}^{0,95})^{0,5} \quad (32)$$

com  $T_{aa\lambda}$  da mesma forma que para o modelo do SMARTS2, onde  $m_a = m$  e  $\omega_\lambda$  é o espalhamento único de albedo, tabelado no manual do SPCTRAL2 em função do comprimento de onda.

## Componente de Espalhamento Aerossol

O espalhamento da irradiância aerossol para o modelo do SMARTS2 encontrado no manual é calculado como:

$$E_{a\lambda} = E_{on\lambda} \cos Z \Gamma_{o\lambda} T_{R\lambda} T_{u\lambda} T_{w\lambda} T_{n\lambda} T_{aa\lambda} (1 - T_{as\lambda}) F_a \quad (33)$$

Onde  $T_{as\lambda}$  é a transmitância para o espalhamento aerossol, tal que

$$T_{as\lambda} = \frac{T_{a\lambda}}{T_{aa\lambda}} = \exp(-m\omega_\lambda\tau_{a\lambda}) \quad (34)$$

e  $F_a$  é a fração do fluxo de espalhamento que é transmitido para baixo, o qual é definido como o produto entre  $F_s$  e  $C_s$ , onde  $F_s$  é a fração de espalhamento simples e  $C_s$  é o fator de correção de múltiplo espalhamento, dado por:

$$F_s = 1 - 0,5 \exp[(a_{s0} + a_{s1} \cos Z) \cos Z] \quad (35)$$

onde

$$a_{s0} = [1,459 + (0,1595 + 0,4129F_g)F_g]F_g \quad (36)$$

$$a_{s1} = [0,0783 - (0,3824 + 0,5874F_g)F_g]F_g \quad (37)$$

$F_g = \ln(1 - g)$ , sendo  $g$  o fator de assimetria de aerossol

e

$C_s = 1$  para  $\tau_{as\lambda} \leq 2$  se não

$$C_s = \exp\left[-\left(\frac{\tau_{as\lambda} - 2}{\sigma_a}\right)^\zeta\right] \quad (38)$$

onde

$$\sigma_a = \text{Max}\{1; 3,5 - (4,53 - 0,82\tau_{as\lambda}) \cos^2 Z\} \quad (39)$$

$$\zeta = -0,5 + \exp[0,24(\cos Z_0)^{-1,24}] \quad (40)$$

$$\cos Z_0 = \text{Max}(0,05; \cos Z) \quad (41)$$

$$g = \text{Max}\left(0,99; \sum_{i=0}^{i=4} \kappa_i \lambda^i\right) \quad (42)$$

Tabela 7 – Coeficientes para determinação do fator de Assimetria Aerossol

Tipo de aerossol	Urbano
$\kappa_0$	6,6851E-01
$\kappa_1$	-2,0657E-01
$\kappa_2$	1,4680E-01
$\kappa_3$	-4,0565E-02
$\kappa_4$	3,8811E-03

Todos os componentes apresentados para a equação de espalhamento aerossol no modelo do SMARTS2 são iguais para o SPCTRAL2, exceto o fator de correção de múltiplo espalhamento,  $C_s$ , definido como:

$$C_s = (\lambda + 0,55)^{1,8} \text{ para } \lambda \leq 0,45 \mu m \quad (43)$$

$$C_s = 1,0 \text{ para } \lambda > 0,45 \mu m \quad (44)$$

## Componente de Múltiplas Reflexões de Irradiância Céu-Terra

A componente de múltiplas reflexões apresentada no manual do SMARTS2 é da forma:

$$E_{g\lambda} = (E_{bn\lambda} \cos Z + E_{d0\lambda}) \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda} / (1 - \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda}) \quad (45)$$

O parâmetro  $\rho_{g\lambda}$  é o albedo para superfície terrestre, “ground albedo”, que é uma função do comprimento de onda,  $\rho_{s\lambda}$  é a refletividade do céu.

A refletividade do céu é calculada através da equação (46):

$$\rho_{s\lambda} = T_{u\lambda}^{\Delta} T_{w\lambda}^{\Delta} T_{aa\lambda}^{\Delta} T_{n\lambda}^{\Delta} \left[ (1 - F_R^{\Delta}) (1 - T_{R\lambda}^{\Delta}) S_{0\lambda} \sqrt{T_{as\lambda}^{\Delta}} + (1 - F_a^{\Delta})^{0.9} (1 - T_{as\lambda}^{\Delta 2}) \right] \quad (46)$$

onde cada termo com subscrito  $\Delta$  é calculado com as equações originais para massa de ar igual a 1.66 para a radiação difusa, e

$$S_{0\lambda} = \exp \left[ - (4.8344E5 + 2.3088E6 o_3) (\lambda - 0.38)^{5.8} \right] \quad (47)$$

para  $\lambda \leq 0.38$ , e  $S_{0\lambda} = 1$ , caso contrario.

O parâmetro  $E_{d0\lambda}$  é da forma:

$$E_{d0\lambda} = \frac{E_{bn\lambda} \cos Z}{R}$$

sendo  $R$  um parâmetro tabelado no manual do SMARTS2.

A equação para a componente que representa múltiplas reflexões de irradiância céu-terra é bem semelhante ao encontrado no modelo do SMARTS2. Porém os termos de transmitância principal são a transmitância regular atmosférica calculada para  $m = 1,8$ .

$$E_{g\lambda} = (E_{bn\lambda} \cos Z + E_{R\lambda} + E_{d\lambda}) \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda} C_s / (1 - \rho_{s\lambda} \rho_{g\lambda}) \quad (48)$$

$$\rho_{s\lambda} = T'_{o\lambda} T'_{w\lambda} T'_{aa\lambda} [0,5(1 - T'_{R\lambda}) + (1 - F'_s) T'_{R\lambda} (1 - T'_{as\lambda})] \quad (49)$$

$$F'_s = 1 - 0,5 \exp(|(a_{s0} + a_{s1} / 1,8) / 1,8|) \quad (50)$$

## A Irradiação Total sobre uma Superfície Horizontal

A partir do que foi apresentado anteriormente, a irradiância global para uma superfície horizontal é simplesmente:

$$E_{\lambda} = E_{bn\lambda} \cos Z + E_{d\lambda} \quad (51)$$

### **2.3.4 Lei de Beer e método de Langley**

O grande número de propriedades físicas atmosféricas torna a transmitância da radiação solar na atmosfera um processo complexo e de difícil descrição. Contudo, a transmitância da radiação monocromática através da atmosfera terrestre pode ser determinada pela lei de Beer. Essa lei demonstra que um feixe de luz monocromático, ao atravessar um meio opticamente ativo, sofrerá atenuação de forma exponencial. O coeficiente de atenuação é determinado a partir dos processos de espalhamento e absorção da radiação solar, os quais dependem do tipo de gases e aerossóis presentes na atmosfera. Portanto, com boa aproximação a lei de Beer é usada como ferramenta física para descrever a atenuação da radiação solar em seu trajeto na atmosfera terrestre. Ademais, aplicando o método de Langley pode-se obter a espessura óptica de aerossóis. (ENCHER & SOUZA, 2001).

#### **2.3.4.1 Derivação da lei de Beer**

A espessura óptica indica a quantidade de material absorvedor e espalhador opticamente ativos encontrados no caminho atravessado pelo feixe de radiação, sendo adimensional. É expressa como a integral ao longo do caminho óptico do produto da quantidade total de moléculas presentes no meio e a seção transversal de extinção para cada comprimento de onda. A espessura óptica é expressa por:

$$\tau_{\lambda} = \int \sigma_{\lambda} N(x) dx \quad (81)$$

onde  $\sigma_{\lambda}$  é a seção transversal de extinção,  $dx$  o caminho de integração e  $N(x)$  a densidade numérica por volume de átomos ou moléculas opticamente ativos [partículas  $\text{cm}^{-2}$ ].

Se a irradiância monocromática que ingressa no meio é  $E_{\lambda}$  e após atravessar uma espessura  $ds$  do meio a intensidade que sai é  $E_{\lambda} + dE_{\lambda}$ , a atenuação da radiação pode ser expressa na forma:

$$dE_{\lambda} = -\kappa_{\lambda} E_{\lambda} ds \quad (82)$$

sendo  $\kappa_{\lambda}$  o coeficiente de absorção volumétrica [ $\text{cm}^{-1}$ ]. Esta expressão indica que o feixe radiativo sofre atenuação proporcional à intensidade do próprio feixe e à quantidade de matéria opticamente ativa no caminho. Isto indica que a atenuação da radiação solar depende linearmente da quantidade total de atenuadores no caminho.

O coeficiente de absorção volumétrico relaciona-se com a seção transversal de extinção através de:

$$\kappa_{\lambda} = \sigma_{\lambda} N \quad (83)$$

Integrando-se a Eq. (82), e utilizando-se a Eq. (83) obtém-se

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp\left(-\int \sigma_{\lambda} N ds\right) \quad (84)$$

Na Eq. (84),  $E_{\lambda}^0$  pode representar a irradiância espectral extraterrestre ou no topo da atmosfera terrestre. De acordo com a figura 17, conclui-se que

$$ds = dz \sec(Z) \quad (85)$$

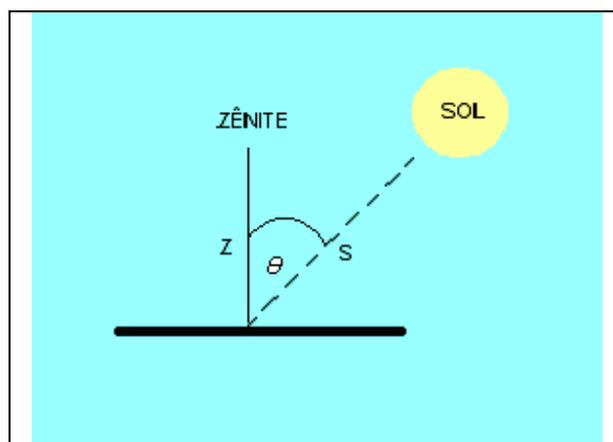


Figura 17 – Geometria Terra-Sol, coordenadas locais.

Substituindo a Eq. (85) na Eq.(84), obtemos

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp\left(-\sec(Z) \int \sigma_{\lambda} N dz\right) \quad (86)$$

onde  $\mu$  é definida como a massa de ar óptica que é dada por

$$\mu = \sec(Z) \quad (87)$$

Substituindo a Eq.(81) e a Eq.(87) na Eq.(86) obtém-se

$$E_{\lambda} = E_{\lambda}^0 \exp(-\tau_{\lambda}\mu) \quad (88)$$

onde a Eq.(88) é conhecida como lei de Beer.

#### **2.3.4.2 Obtenção da espessura óptica a partir do método de Langley**

Aplicando-se o operador (ln) na Eq.(86) obtém-se

$$\ln(E_{\lambda}) = \ln(E_{\lambda}^0) - \tau_{\lambda}\mu \quad (89)$$

que é da mesma forma que a equação da reta

$$Y = A + B * X \quad (90)$$

onde  $E_{\lambda}^0 = e^A$  e  $\tau_{\lambda} = -B$ . O processo de linearização para a obtenção da estimativa da irradiância no topo da atmosfera e da espessura óptica de aerossol é conhecido como método de Langley. Para sua aplicação, deve-se, além de medir a radiação direta, de banda estreita, quase monocromática, as medidas devem ser efetuadas ao longo de um mesmo dia, para evitar grandes variações na transparência atmosférica.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Cálculo da irradiância UV e do Índice de Radiação Ultravioleta (IUV) usando o software SPCTRAL2

#### 3.1.1 Dados de entrada

Os dados de entrada requeridos pelo programa são: hora local, profundidade óptica de aerossóis, pressão atmosférica superficial, albedo, ozônio total, quantidade de água precipitável, dia Juliano, latitude e longitude do local especificado. Todas essas variáveis são medidas em estações meteorológicas convencionais, exceto a profundidade óptica dos aerossóis.

#### 3.1.2 Obtenção dos dados de entrada do Spctral2

**Ozônio:** O índice de ozônio médio mensal foi obtido a partir dos dados do satélite TOMS (Total Ozone Measurement Spectrometer).

**Água Precipitável:** A quantidade de água precipitável é igual a zero, devido ao que foi mencionada na seção 2.3.2 na parte correspondente a transmitância em vapor de água. Pois essa quantidade não interfere nos resultados das simulações para o intervalo compreendido entre 280 a 300 nm.

**Profundidade óptica de aerossol:**

A profundidade óptica de aerossóis foi medida com um aparelho construído com um sensor LED (Light-Emitting Diode) de banda estreita, centrada em 555nm que mede a transmitância da radiação monocromática através da atmosfera terrestre, a qual pode ser descrita pela lei de Beer. O LED de 555nm (verde) foi utilizado, pois há uma correspondência apresentada na equação (11) o qual utiliza a profundidade óptica para 500nm na falta da profundidade óptica de aerossóis. Tendo em vista que a utilização de LED's como sensores de radiação vem sendo utilizadas em fotômetros solares desde 1992. Onde o aparelho foi construído a partir de Brooks (2001).

Um LED pode ser um bom detector de radiação e sua resposta está associada à faixa de frequência que ele emite. Pois sua condutividade aumenta à medida que fótons de energia correspondente a sua "banda de emissão" incidem sobre ele. Observa-se experimentalmente que a maior sensibilidade de absorção ocorre num comprimento de onda menor em relação ao comprimento de onda de máxima emissão do LED. Por exemplo, um LED verde que emite sua intensidade máxima em 555 nm, tem sua resposta em absorção máxima em 525 nm. Sua resposta espectral é da ordem de 10 a 35 nm, permitindo selecionar adequadamente o comprimento de onda da radiação a ser analisada (CAVALCANTI & HAAG, 2005). A Figura 18 apresenta o espectro de emissão de alguns LED's e na Figura 19 os espectros de absorção de alguns LED's, sendo os mesmos usados como sensores de radiação.

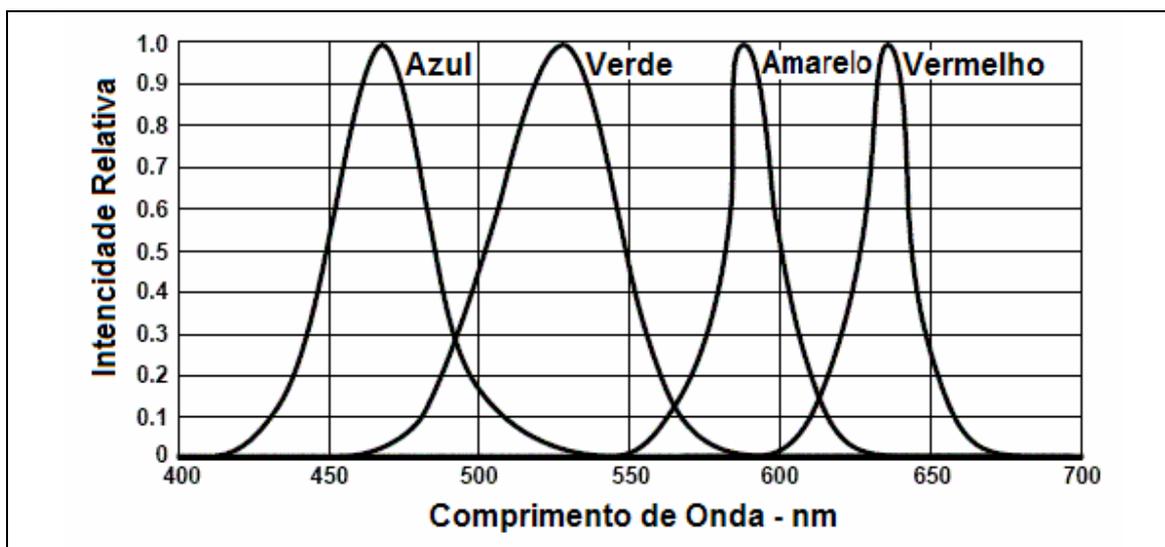


Figura 18 – Espectro de emissão de alguns LED's

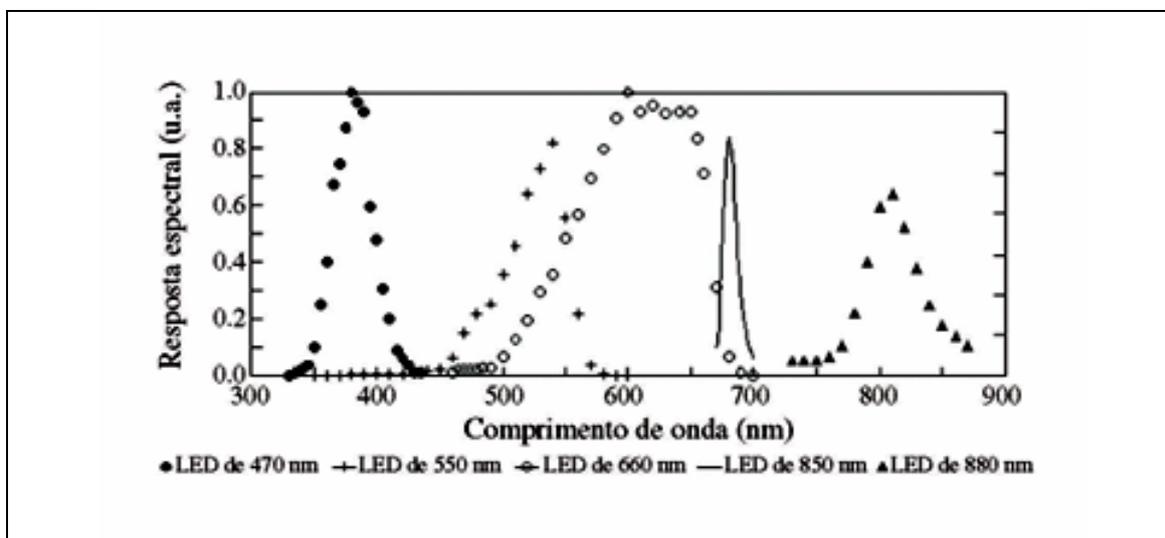


Figura 19 – Espectro de absorção de alguns LED's

Quando o sensor LED fica alinhado na direção radial do sol, gera uma corrente elétrica em seus terminais que é linearmente proporcional à intensidade da radiação recebida. No fotômetro foi utilizado um conversor "corrente × tensão", onde a corrente gerada pelo LED é convertida em tensão por um amplificador operacional. O qual é conectado a um display de cristal líquido que tem a função de voltímetro, que dará a leitura dos valores para coleta de dados. O circuito esquemático do aparelho é visto na figura 20.

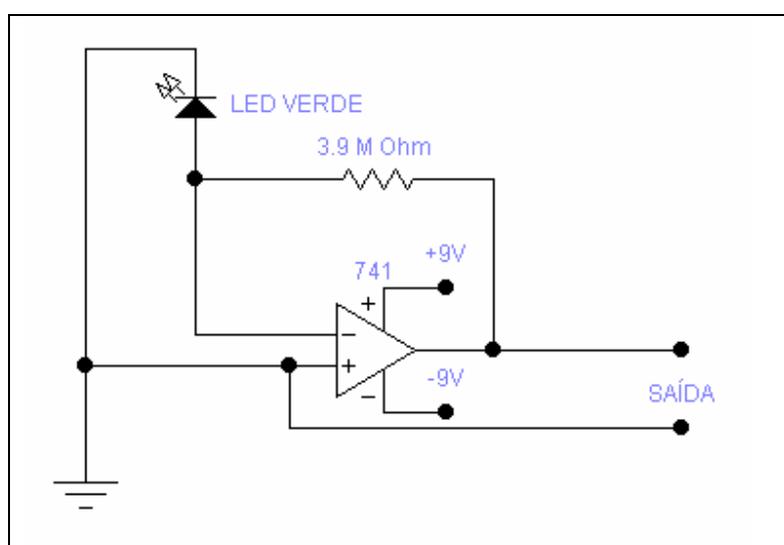


Figura 20 – Circuito esquemático do fotômetro.

Na figura 21 vemos a área de trabalho do SPCTRAL2 desenvolvido em planilha Excel. Em verde encontra-se a área para a inserção dos dados, em laranja as áreas dos cálculos intermediários realizados pelo código computacional, em azul são apresentados os valores de condições padrões para o espectro de atmosfera de referencia ASTM e em branco estão localizados os resultados das simulações realizados pelo SPCTRAL2, onde são apresentados os diversos valores da irradiância ultravioleta para os diversos comprimentos de onda.

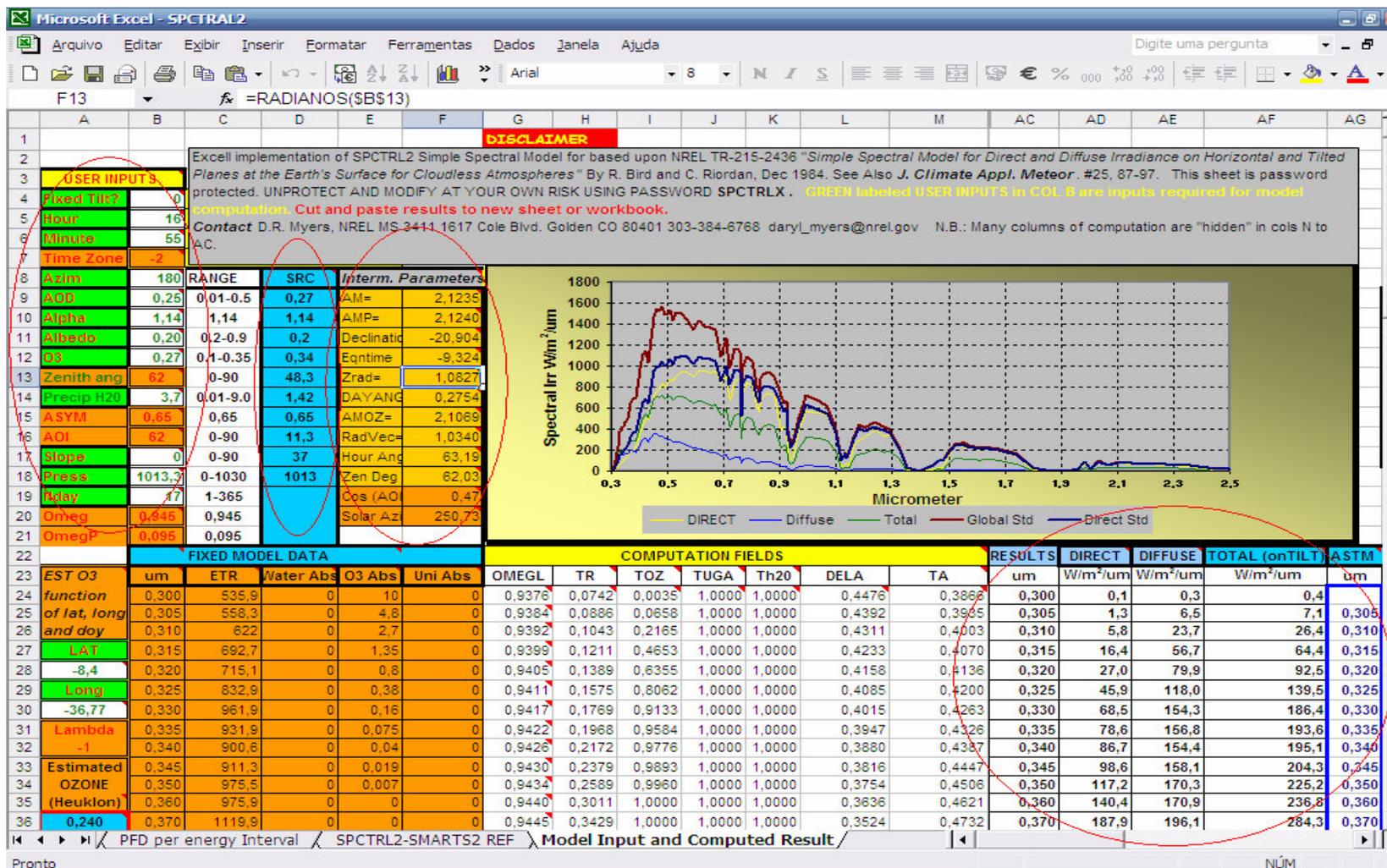


Figura 21- Área de trabalho do SPCTRAL2

### 3.1.3 IUUV no SPCTRAL2

O SPCTRAL2 não calcula diretamente o IUUV. Ele gera um banco de dados que contém valores da irradiância direta e difusa no intervalo de 300 a 400nm. Assim, foi utilizado o espectro de ação padrão para eritema na pele humana ISO 17166 (1999/CIE S007/E-1998), definido para uma superfície horizontal. O IUUV é uma quantidade não dimensional definida por:

$$I_{UV} = \kappa_{er} \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} S_{er}(\lambda) d\lambda \quad (94)$$

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

$$\begin{aligned} S_{er}(\lambda) &= 1 \text{ quando } 250nm < \lambda < 298nm \\ S_{er}(\lambda) &= 10^{0.094(298-\lambda)} \text{ quando } 298 < \lambda < 328nm = S_{\lambda_1} \\ S_{er}(\lambda) &= 10^{0.015(139-\lambda)} \text{ quando } 328 < \lambda < 400nm = S_{\lambda_2} \end{aligned}$$

## **3.2 Cálculo da irradiância UV e IUV usando o software SMARTS2**

### **3.2.1 Dados de entrada**

O SMARTS2 foi programado em FORTRAN e esta versão é compilada em Excel. Na Fig. 22 pode ser vista a tela de apresentação do programa. A Fig. 23 mostra a janela de configuração para a entrada de dados que permite configurar 17 janelas secundárias de entradas (Cartão). Os dados de entrada requeridos pelo SMARTS2 são os mesmos obtidos anteriormente pelo SPCTRAL2, tendo a vantagem de o mesmo calcular o índice de radiação UV automaticamente sem a necessidade de recorrer a cálculos extras.

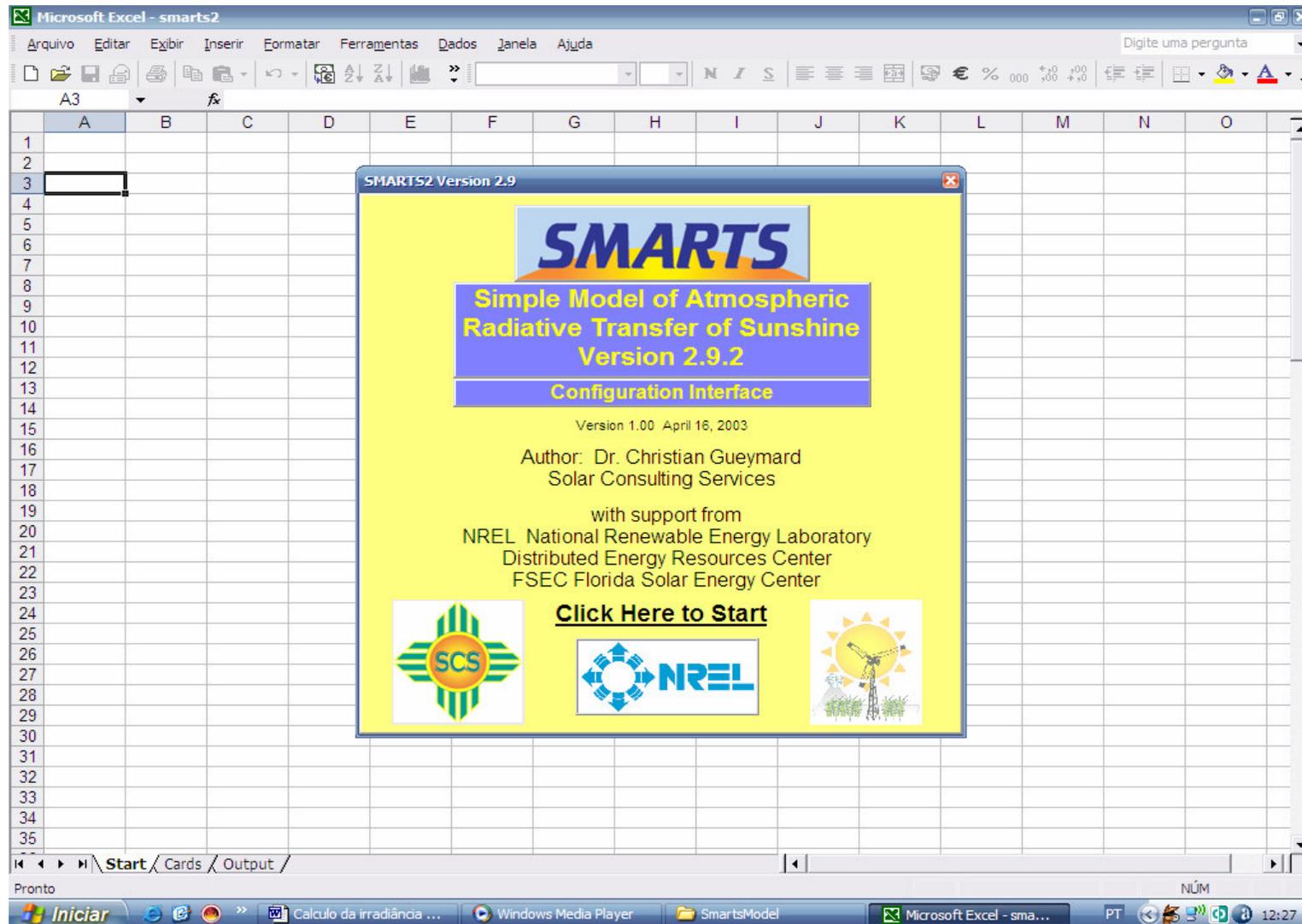


Figura 22 – Apresentação do SMARTS2

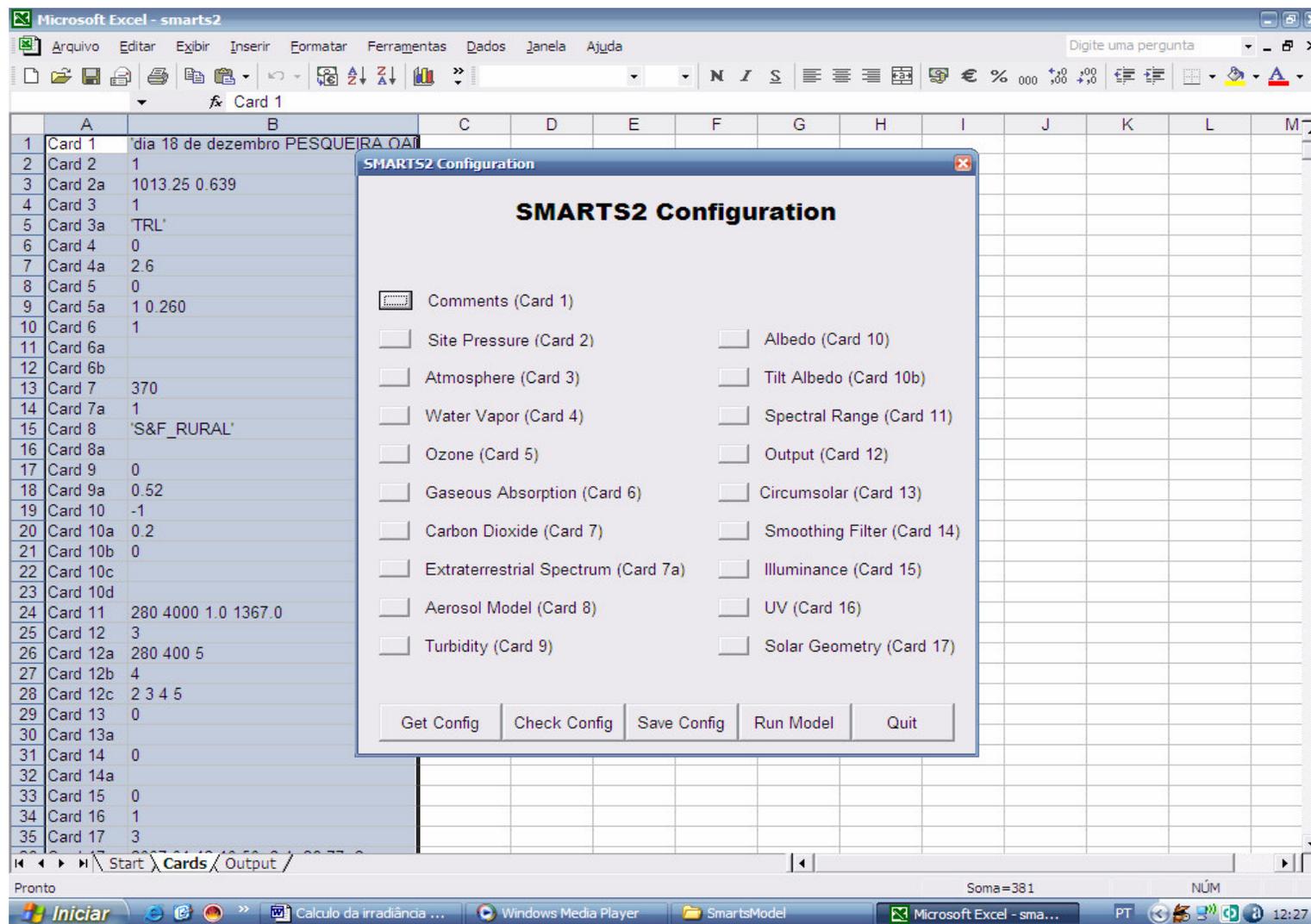


Figura 23 – Janela de acesso para configuração dos dados de entrada.

### 3.3 Medidas da Irradiação UV

As medidas da irradiância solar ultravioleta foram obtidas através do piranômetro TUVR (Total Ultraviolet Radiometer) da Eppley. Localizado na Cidade de Pesqueira-PE (longitude de  $-36,77^\circ$  e latitude de  $-8,4^\circ$ ), região semi-árida de Pernambuco, Figura 24. Essa região possui uma área de  $1032\text{km}^2$  situada a uma altitude de  $655\text{m}$ . O Equipamento encontra-se instalado no CEFET UNED Pesqueira (Centro Federal de Educação Tecnológica Unidade Educacional Pesqueira), o qual realiza uma nova medida a cada um minuto de intervalo. O valor das medidas estão em unidade de  $\text{W}/\text{m}^2$ . Na Figura 25 é mostrado o piranômetro TURV e o sistema de aquisição de dados da Estação Pesqueira e na figura 26 pode ser vista a localização o piranômetro TURV, o qual foi instalado no Bloco E do CEFET Pesqueira.



Figura 24 – Mapa de Pernambuco apresentando a localização de Pesqueira.

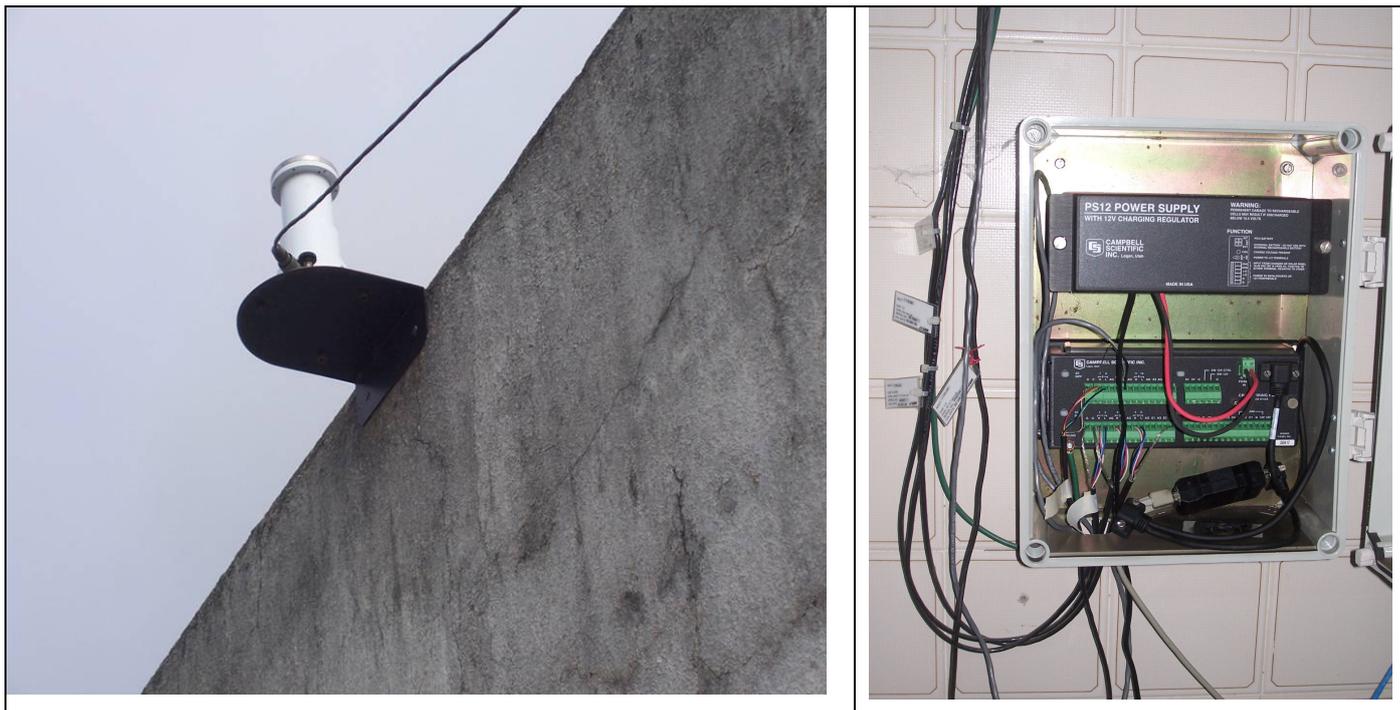


Figura 25 – piranômetro TUVR da Eppley e sistema de aquisição de dados da Estação Pesqueira.



Figura 26 – Vista do bloco “E” do CEFET UNED Pesqueira e localização do TURV

## 4 COMPARAÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS COM AS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

### 4.1 Obtenção da profundidade óptica de aerossóis diária

As medidas para obtenção da profundidade óptica dos aerossóis foram obtidas através do aparelho mencionado na seção 3.1.2. Na figura 27 é apresentada à vista frontal do fotômetro. Já na figura 28 podem ser observados detalhes do fotômetro montado, tais como: mira do fotômetro, barra de contenção do sensor LED, display de cristal líquido, banco de baterias, circuito amplificador e finalmente os raios solares, um que será alinhado com a mira do fotômetro e outro que chega ao sensor LED, o qual é paralelo ao primeiro raio, dando a certeza do alinhamento do segundo raio com o sensor LED.



Figura 27 – Vista frontal do fotômetro montado

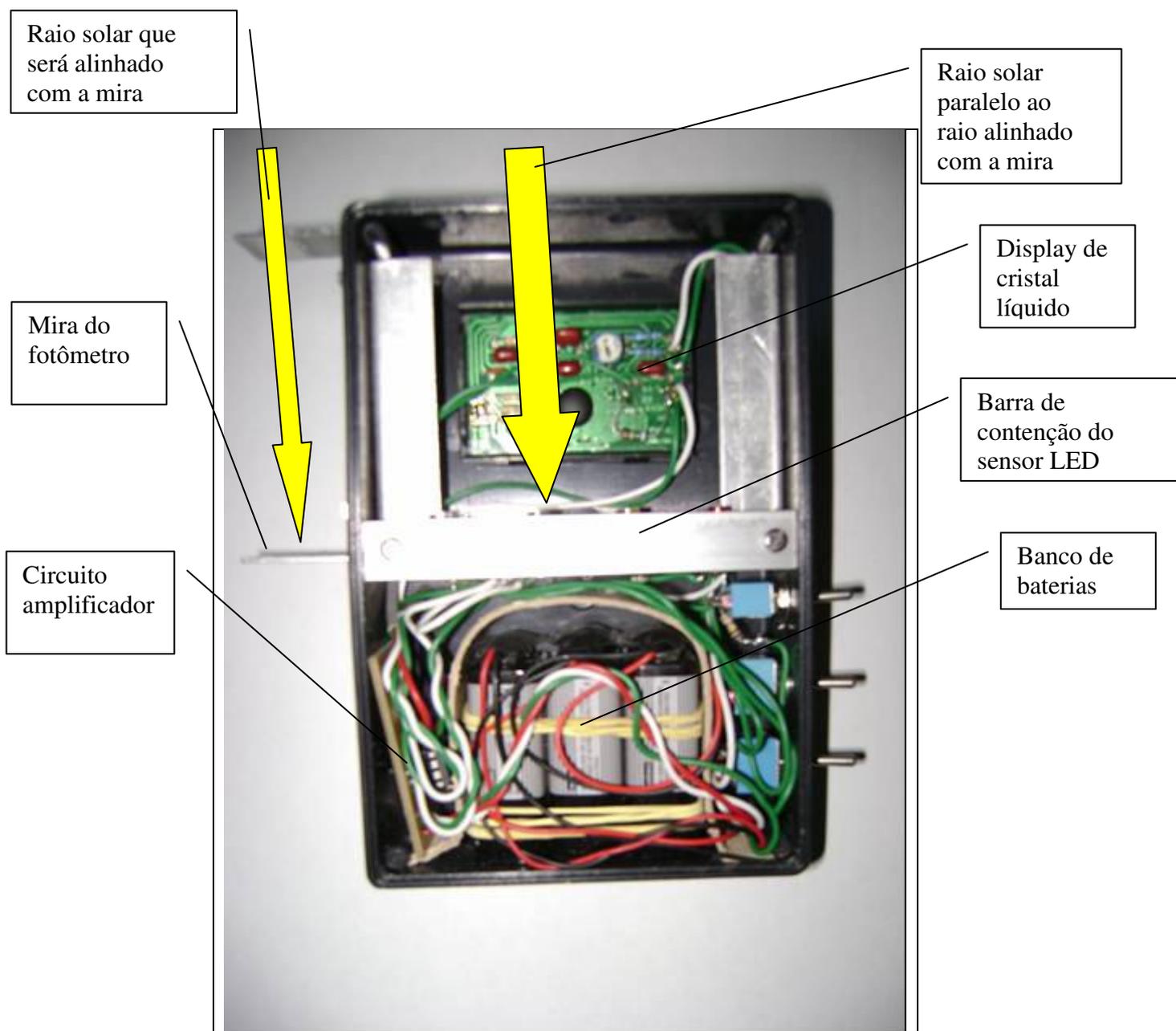


Figura 28 – Vista traseira em detalhes do fotômetro sem a tampa.

Deve-se ter em vista que o fotômetro utilizou componentes de baixo custo e ampla comercialização, tornando-o um equipamento de fácil construção e simplicidade de uso. Maiores detalhes sobre a construção do fotômetro podem ser encontrados em Brooks (2001).

Foram realizadas medidas com o fotômetro durante o mês de dezembro de 2006 e janeiro de 2007 para Pesqueira-PE (longitude de  $-36.77^\circ$  e latitude de  $-8.4^\circ$ ), região semi-árida de Pernambuco, em intervalos de 10 em 10 minutos. Onde cada valor espaçado de 10 minutos é a média de 3 valores consecutivos com intervalos de aproximadamente 2 minutos. O que foi dito pode ser melhor compreendido através da figura 29.

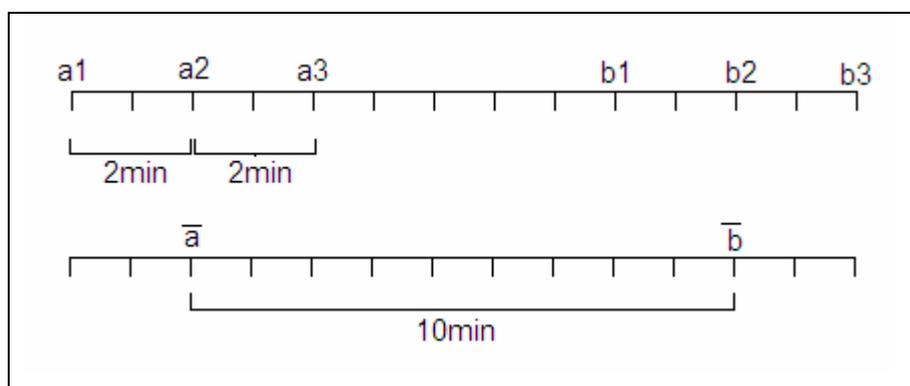


Figura 29 – Intervalos de medições com o aparelho.

Realizou-se a coleta dos valores medidos com o aparelho a partir das 12:00 horas até 17:10. Tirou-se o logaritmo neperiano dos valores do aparelho e calculou-se a massa de ar correspondente para cada intervalo horário (Tabela 8).

Tabela 8 - Medidas realizadas no dia 22 de dezembro de 2006 para a região de Pesqueira-PE.

mV	ln(mV)	1/(cosZ)	mV	ln(mV)	1/(cosZ)
4430	8,40	1,048	3900	8,27	1,226
4410	8,39	1,043	3830	8,25	1,261
4410	8,39	1,037	3800	8,24	1,300
4390	8,39	1,036	3720	8,22	1,344
4340	8,38	1,037	3660	8,21	1,394
4330	8,37	1,041	3600	8,19	1,451
4340	8,38	1,046	3480	8,15	1,514
4270	8,36	1,053	3300	8,10	1,587
4200	8,34	1,077	3170	8,06	1,670
4220	8,35	1,088	3000	8,01	1,765
4190	8,34	1,104	2820	7,94	1,875
4150	8,33	1,122	2560	7,85	2,004
4100	8,32	1,144	2300	7,74	2,155
4040	8,30	1,168	1960	7,58	2,335
3970	8,29	1,195	1470	7,29	2,553

A partir do conjunto de dados medidos construiu-se a curva do logaritmo neperiano da radiação solar direta, a qual foi mensurada em mV pelo fotômetro, em função da massa de ar. Procurou-se a reta que melhor representa a curva “plottada”, onde o coeficiente angular das mesmas é numericamente igual à profundidade óptica de aerossóis ( $\tau_\lambda$ ). Na figura 30 é mostrado, como exemplo, a aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar direta medido pelo fotômetro no dia 22 de dezembro de 2006 em função da massa de ar para determinação da profundidade óptica de aerossóis. Na tabela 9 é visto os valores das profundidades de aerossóis medidos.

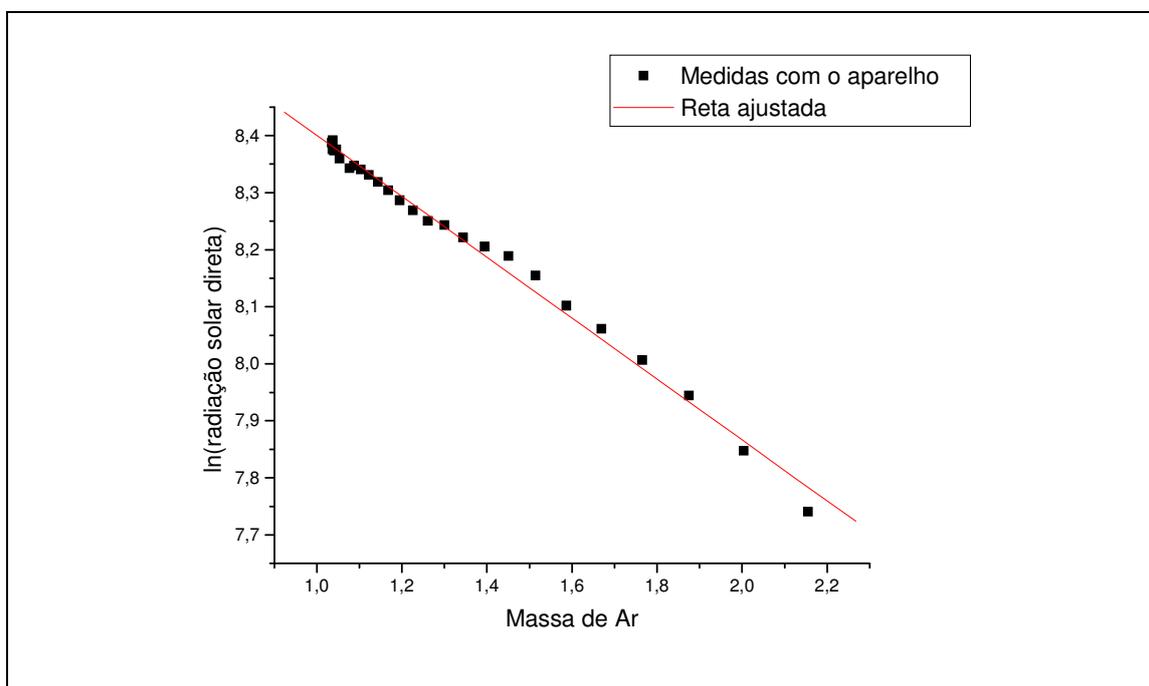


Figura 30 - Exemplo da aplicação do método de Langley aos dados de radiação solar direta medido pelo fotômetro no dia 22 de dezembro de 2006 em função da massa de ar para determinação da profundidade óptica de aerossóis.

Tabela 9 – Profundidades ópticas de aerossóis

Dias	18/12/2006	21/12/2006	22/12/2006	18/01/2006
AOD	0,53	0,53	0,53	0,56

## 4.2 Resultados e comparações obtidos a partir dos softwares,

### SMARTS2 e SPCTRAL2

As simulações computacionais para a obtenção da irradiância ultravioleta foram comparadas com os dados experimentais do piranômetro TUVR (Total Ultraviolet Radiometer) da Eppley, localizado em Pesqueira-PE (longitude de  $-36,77^\circ$  e latitude de  $-8,4^\circ$ ), região semi-árida de Pernambuco.

As simulações computacionais com SPCTRAL2 e SMARTS2 foram realizadas para as horas correspondentes ao intervalo de 09:00h a 15:00h para dias de céu claro do mês de dezembro de 2006 e janeiro de 2007.

Utilizando-se os valores diários médios de AOD, isto é, os valores encontrados na tabela 9, houve uma boa concordância com as simulações que foram realizadas para o período compreendido entre 09:00h as 15:00h. Como exemplo pode ser visto na figura 31 as simulações realizadas para o dia 22 de dezembro de 2006.

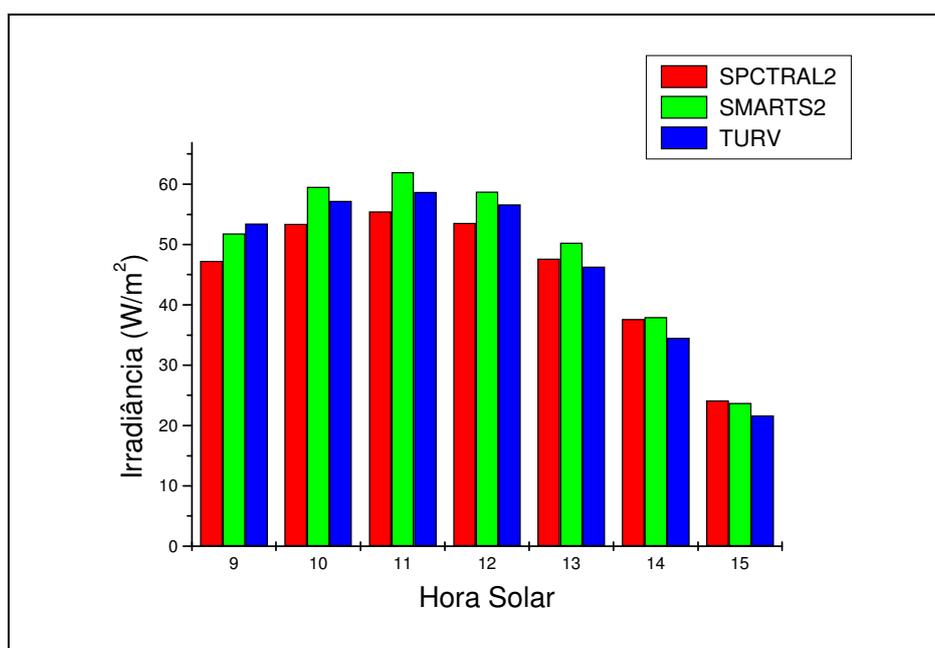


Figura 31 – Simulações com o SPCTRAL2 e SMARTS2 comparados com o piranômetro TURV.

As irradiâncias UV medidas com o piranômetro TURV foram filtradas para obter sub-conjuntos de medidas diárias ou horárias caracterizadas por céu claro.

Os desempenhos das simulações foram avaliados estatisticamente utilizando-se o “*mean bias error*” (MBE) e o “*root mean square error*” (RMSE) que são da forma:

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{UV_{SIMULADO,i} - UV_{MEDIDO,i}}{UV_{MEDIDO,i}} \quad (95)$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{UV_{SIMULADO,i} - UV_{MEDIDO,i}}{UV_{MEDIDO,i}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (96)$$

Na Tabela 10 são apresentados os desempenhos estatísticos das comparações entre as medidas realizadas pelo TURV e as simulações. Os resultados das simulações da irradiância solar ultravioleta mostraram um erro máximo de 6,4% para o meio dia solar, e de 12% no fim da tarde, quando comparados com os valores medidos pelo piranômetro TURV. As simulações com o SMARTS apresentaram menores erros do que as realizadas com o SPCTRAL2.

Tabela 10 – Desempenho estatístico dos resultados – AOD diário

Horário Solar	SPCTRAL2		SMARTS2	
	MBE(%)	RMSE(%)	MBE(%)	RMSE(%)
09:00	-9,7	10,4	-1,4	4,4
10:00	-7,3	7,7	3,1	4,0
11:00	-5,1	6,1	5,8	6,8
12:00	-4,1	5,4	5,1	6,4
13:00	1,7	2,8	7,4	7,7
14:00	6,9	7,8	7,8	8,6
15:00	11,3	11,8	9,1	9,6

### 4.3 IUV através do SPCTRAL2 e SMARTS2

Na Figura 32 pode ser visto o gráfico do índice de radiação ultravioleta horário médio mensal do mês de dezembro de 2006, para os dias de céu claro para a localidade de Pesqueira-PE. Devido à forte dependência com o ângulo zenital o valor do IUV máximo foi alcançado próximo ao meio dia solar e seu valor foi de 12 para o SMARTS2 e de 11 para o SPCTRAL2 utilizando-se o AOD diário, consultando a classificação IUV da OMS, Figura 33 verifica-se que para este horário ocorreram valores classificados como extremos.

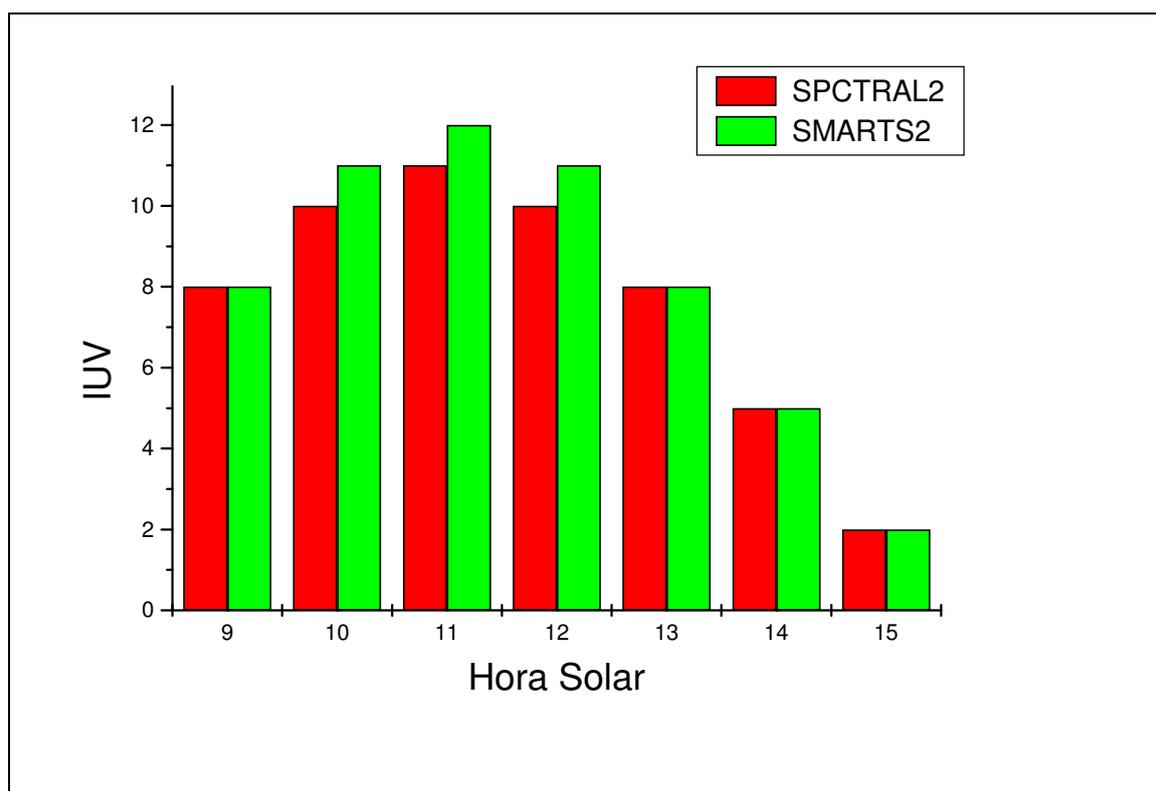


Figura 32 – Simulação do IUV horário médio mensal do mês de dezembro de 2006 através do SPCTRAL2 e SMARTS2.

Baixo		Moderado			Alto		Muito alto			Extremo	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	>11
Nenhuma precaução necessária		Precauções Requeridas					Extra Proteção!!!				
Você pode permanecer no sol o tempo que quiser !		Em horários próximos ao meio-dia procure locais sombreados Procure usar camisa e boné Use o protetor solar.					Evite o sol ao meio-dia Permaneça na sombra Use camisa, boné e protetor solar				

Figura 33 – Classificação do IUV e recomendações ( adaptado da OMS, 2002)

Na Tabela 11 encontramos valores do índice de radiação ultravioleta para as simulações realizadas para as horas médias mensais do mês de dezembro de 2006 correspondentes ao intervalo de 09:00h a 15:00h para dias de céu claro, os quais podem ser considerados como alto e ou extremo no intervalo horário compreendido entre 9 e 13 horas.

Tabela 11 – Índice de radiação ultravioleta horário médio mensal do mês de dezembro de 2006 para a localidade de Pesqueira-PE.

Horário Solar	SPCTRAL2 AOD diário	SMARTS2 AOD diário
09:00	8	8
10:00	10	11
11:00	11	12
12:00	10	11
13:00	8	8
14:00	5	5
15:00	2	2

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia apresentada neste trabalho é uma alternativa conveniente para a estimativa da máxima irradiância solar ultravioleta em locais onde não existam medidas experimentais. Pois utiliza dois códigos computacionais, SPCTRAL2 e SMARTS2, os quais são softwares que apresentam simplicidade de uso, precisão e relativa facilidade na obtenção das variáveis de entrada. Tais variáveis são medidas rotineiramente em estações meteorológicas convencionais, exceto a profundidade óptica de aerossóis, o qual pode ser medido com um fotômetro construído com sensor LED de banda estreita, que utiliza componentes de baixo custo e de ampla comercialização, tornando-o um equipamento de fácil construção.

Para as simulações realizadas a partir da utilização do AOD diário, os resultados das simulações da irradiância solar ultravioleta mostraram um erro máximo de 6,4% para o meio dia solar, e um erro máximo entre 10 e 12% para 09:00h da manhã e 15:00h, respectivamente, quando comparados com os valores medidos com o piranômetro TUVR. Para os índices de radiação ultravioleta (IUV) estimados, obtiveram-se valores classificados como altos ou extremos no intervalo de 09:00h as 13:00h, alcançando valores extremos em torno do meio dia solar, quando comparados com a tabela de classificação do IUV da OMS (Organização Mundial de Saúde). Estes resultados evidenciam que nesta localidade as pessoas ao se exporem ao sol no intervalo mencionado de forma prolongada e freqüente, seja por motivos profissionais, seja por motivos de lazer, constitui um grupo de maior risco de contrair catarata ou câncer de pele.

A metodologia proposta permitirá o mapeamento amplo do IUV no estado de Pernambuco, com a utilização do fotômetro LED de baixo custo e simplicidade de uso.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, G. P.; CLOUGH, S. A.; KNEIZYS, F. X.; CHETWYND, J. H.; SHETTLE, E. P. AFGL atmospheric constituent profiles (0-120 km), tech. rep. AFGL-TR-86-0110, Air Force Geophysics Lab., Hanscom AFB, MA (1986).

ANDERSON, G.P.; CHETWYND, J.H.; THERIAULT, J.M.; ACHARYA, P.; BERK, A.; ROBERTSON, D.C.; KENIZYS, F.X.; HOKE, M.L.; ABREU, L. W. MODTRAN2: Suitability for remote sensing, Proc. Conf. Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, A. Kohnle and W.B. Miller eds., Orlando, SPIE, vol. 1968, pp. 514-525 (1993).

ANON., U.S. Standard Atmospheric supplements, 1966, ESSA/ NASA/ USAF, U.S. Gov. Printing Office, Washinton, DC, (1966).

BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ROBERTSON, D. C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN7, Rep. GL-TR-89-0122, Air Force Geophysical Lab., Hanscom, MA (1989).

BIRD, R. E. A Simplified clear sky model for direct and difuse insolation on horizontal surfaces, SERI – Solar Energy Research institute (1981).

BIRD, R. E. A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance, Solar Energy **32**, 461-471 (1984).

BIRD, R. E.; RIORDAN, C. Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres, J. Clim. Appl. Meteorol. **25**, 87-97 (1986).

BRINE, D. T.; M. IQBAL. Solar Spectral Diffuse Irradiance Under Cloudless Skies. Solar Energy, Vol. 30, pp. 447-453 (1983).

BROOKS D. R, MIMS F. M. III. Develoment of a inexpensive handheld LED – based sun photometer for the GLOBE program. Journal of Geophysical Research 106, DS, pp. 4733-4740.

CADERNO DE SAÚDE PÚBLICA. Disponível em: <[http://www.scielosp.org/scielo.php?pid=S0102-311X2004000100048&script=sci\\_arttext](http://www.scielosp.org/scielo.php?pid=S0102-311X2004000100048&script=sci_arttext)>. Acesso em: 30 maio 2006. (2004).

CAVALCANTI, MARISA A.; HAAG, RAFAEL. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. Revista Brasileira Ensino de Física. Vol.27 no.3, pp. 343-348 (2005).

CORRÊA, M. P.; DUBUISSON, P.; PLANA-FATTORI, A. An overview of the ultraviolet index and the skin câncer cases in Brazil, Photochemistry and Photobiology, Vol. 78, No. 1, pp. 49-54 (2003).

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. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza. Anais. CD-ROM (2004a).

CORRÊA, M. P. Algoritmos para cálculos de transferência radiativa na região ultravioleta do espectro eletromagnético. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2004, Fortaleza. Anais. 2004. CD-ROM. (2004b).

ENCHER, E.; SOUZA, M. P. A Lei de Beer Aplicada na Atmosfera Terrestre. Revista Brasileira Ensino de Física. Vol.23 no.3, pp. 276-283 (2001).

FARMAN, J. C.; GARDINER, B. G.; SHANKLIN, J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO/NO<sub>2</sub> interaction. Nature, No **315**, pp. 207- 210 (1985).

FRÖHLICH, C.; C. WEHRLI, World Radiation Center, Davos, Switzerland, magnetic tape received by personal communication (1981).

GUEYMARD, C. Development and performance assessment of a clear sky spectral radiation model. Proc. 22<sup>nd</sup> ASES Conf., Solar, Washington, DC, American Solar Energy Society, pp. 433-438 (1993).

GUEYMARD, C. SMARTS2, A simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer. Professional Paper, dezembro (1995).

INCA – Instituto Nacional de Câncer. Incidência de câncer no Brasil. Disponível em: <<http://www.inca.gov.br/estimativa/2006>>. Acesso em: 30 maio. 2006.

JUSTUS, C. G.; M. V. PARIS, "A Model for Solar Spectral Irradiance at the Bottom and Top of a Cloudless Atmosphere," submitted to J. of Climate and Applied Meteorology, (1984).

KASTEN, F. A New Table and Approximate Formula for Relative Optical Air Mass. Arch. Meteorol. Geophys. Bioclimatol., Ser. B14, pp. 206-223 (1966).

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SCHUCH, N. J.; PINHEIRO, D. K.; HARRIS, J. M. Evidence for an Ozone Hole Perturbation at 30° South. Atmospheric Environment, 30(9): 1481-1488. (1996).

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; CASICCIA, C. A. R.; ZAMORANO, F. The ozone hole over Punta Arenas, Chile. J. Geophys. Res., 102(D7): 8945-8953 (1997a).

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; SAHAI, Y.; CASICCIA, C.; ZAMORANO, F.; VALDERRAMA, V. Observations of the 1995 ozone hole over Punta Arenas, Chile. J. Geophys. Res. (102): 16109-16120. (1997b).

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ZAMORANO, F.; CASICCIA, C. UV-B enhancements at Punta Arenas, Chile. *J. Photochem. Photobiol.* 38: 174-177 (1997c).

KIRCHHOFF, V. W. J. H.; ECHER, E.; PAES LEME, N.; SILVA, A. A. A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18, No. 1, pp. 63-73 (2000).

KRZÝSCIN, J. UV controlling factors and trends derived from the ground-based measurements taken at Belsk, Poland, 1976-1994. *J. Geophys. Res.*, 101(D11): 16797-16805 (1996).

MADRONICH, S. UV radiation in the natural and perturbed atmosphere, In *UV-B Radiation and Ozone Depletion*. . Tevini, M. ed. Lewis Publisher, pp. 17-69 (1993).

MCKINLAY, A.F.; B.L. DIFFEY. A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin. *CIE J.*, 6(1), pp.17-22 (1987).

NANN, S.; RIORDAN, C. Solar spectral irradiance under clear and cloudy skies: Measurements and a semiempirical model, *J. Appl. Meteorol.* 30, pp. 447-462 (1991).

NAUTICAL ALMANAC OFFICE. The astronomical almanac. Washington & London (1992).

NECKEL, H.; D. LABS, "Improved Data of Solar Spectral Irradiance from 0.33 to 1.25  $\mu\text{m}$ ," *Solar Phys.*, Vol. 74, pp. 231-249 (1981).

NICOLET, M. Solar spectral irradiances with their diversity between 120 and 900 nm. *Planet. Space Sci.* 37, pp. 1249-1289 (1989).

OLIVEIRA, G. F.; CAMPOS, R. L. C.; TEMPORAL, W. F. Efeitos da Radiação Ultravioleta nas Atividades Aéreas e Terrestres. *RMAB*, Vol. 55, No. ½, pp. 19-26 (2005).

PIRANÔMETRO. Disponível em: <<http://www.eppleylab.com>>. Acesso em: 10 maio 2007.

SBD - Sociedade Brasileira de Dermatologia. Câncer de Pele. Disponível em: <<http://www.sbd.org.br/publico/cancer/campanha.aspx>>. Acesso em: 28 de maio 2006.

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

SPENCER, J. W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. *Search*, Vol. 2, p. 172 (1971).

SOLOMON, S., GARCIA, R. R., ROWLAND, F. S. & WUIBBLES, D.J. On the depletion of Antarctic ozone. *Nature*, 321(19): pp.755-758 (1986).

WEATHERHEAD, E. C.; TIAO, G. C.; REINSEL, G. C.; FREDERICK, J. E.; DELUISI, J. J.;, CHOI, D. & TAM, W. Analysis of long-term behavior of ultraviolet radiation measured by Robertson-Berger meters at 14 sites in the United States. J. Geophys. Res. 102(D7): 8737- 8754 (1997).

WEHRLI, C. Extraterrestrial solar spectrum. Pub. No. 615, World Radiation Center, Davos, Switzerland (1985).

WHO – World Health Organization. Global solar UV index: A practical guide. WHO/SDE/OEH/02.2, Geneva, Suíça, p.28 (2002).

YOUNG, A. T. On the Rayleigh-scattering optical optical depth of the atmosphere. J. Appl. Meteorol. 20, pp. 328-330 (1981).

## **7. ANEXOS**

### **ANEXO A**

#### **RESULTADOS OBTIDOS A PARTIR DO SOFTWARE SMARTS2 E SPCTRAL2 COMPARADOS COM O PIRANÔMETRO TURV**

**LISTA DE FIGURAS**

FIGURA	PÁGINA
1 - Dia 18 de dezembro de 2006, Pesqueira (AOD diário).....	83
2 - Dia 21 de dezembro de 2006, Pesqueira (AOD diário).....	83
3 - Dia 22 de dezembro de 2006, Pesqueira (AOD diário).....	84
4 - Dia 18 de janeiro de 2007, Pesqueira (AOD diário) .....	84

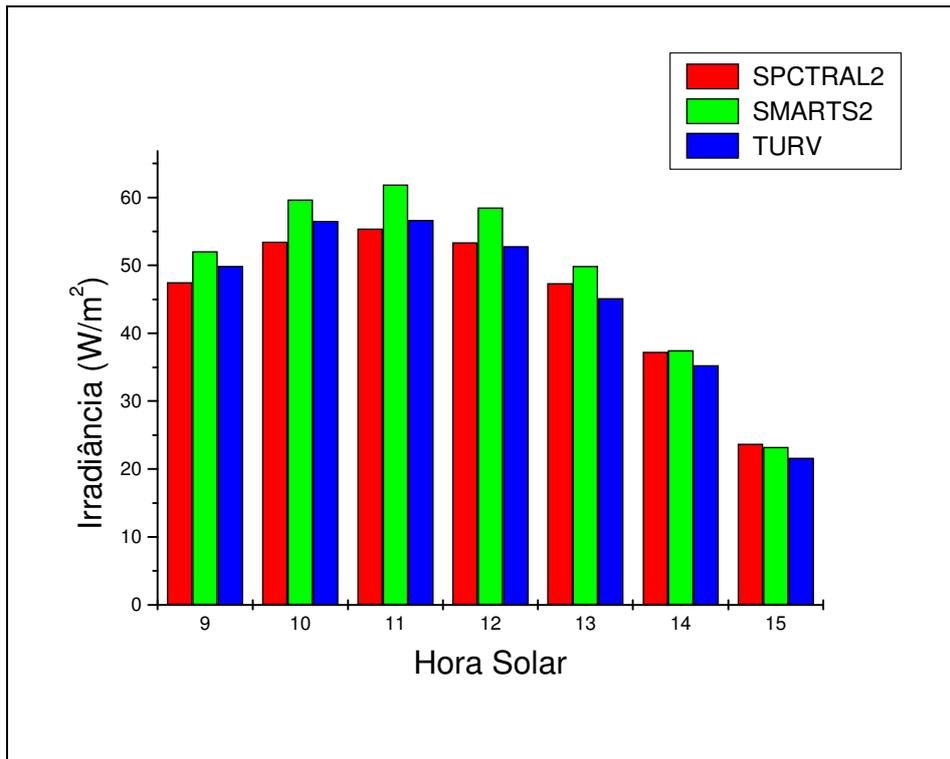


Figura 1 - Dia 18 de dezembro de 2006, Pesqueira (AOD diário).

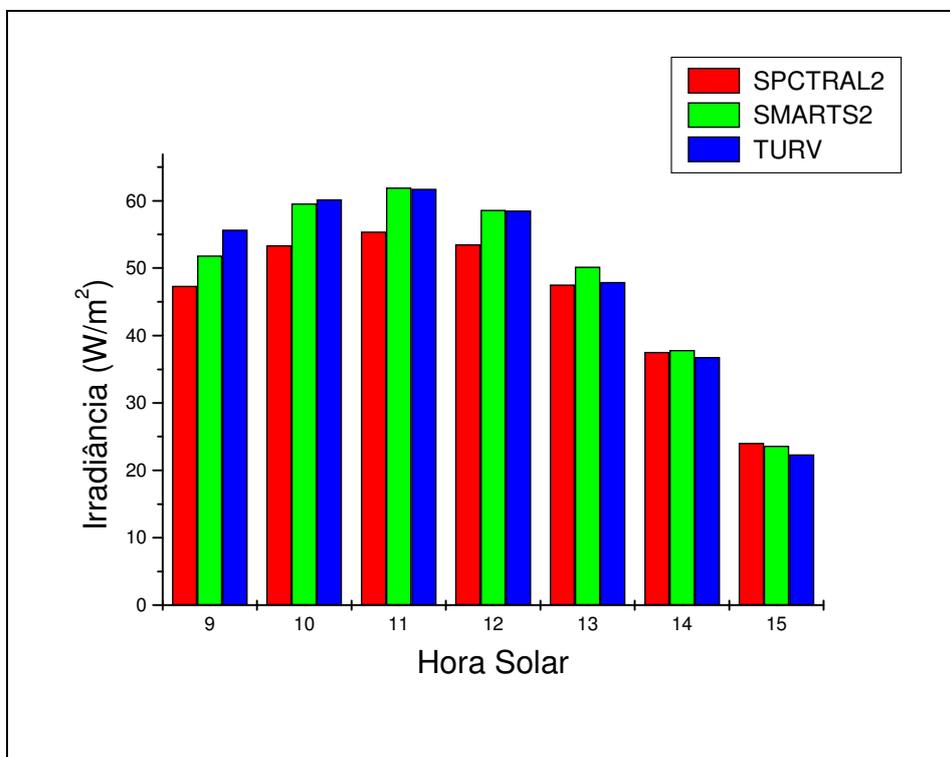


Figura 2 - Dia 21 de dezembro de 2006, Pesqueira (AOD diário).

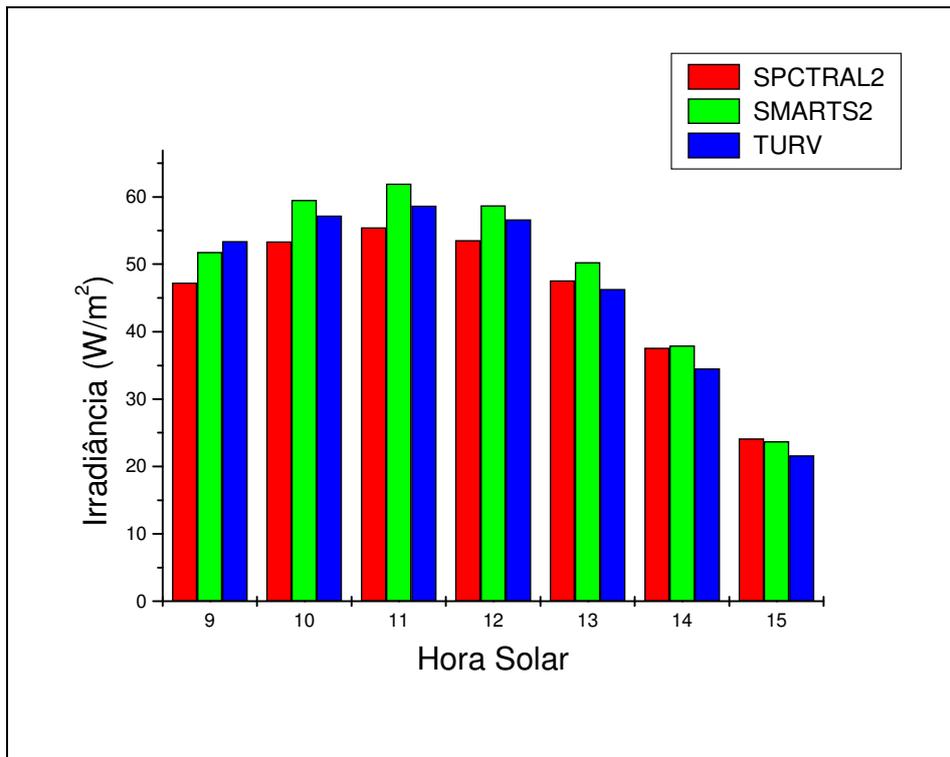


Figura 3 - Dia 22 de dezembro de 2006, Pesqueira (AOD diário).

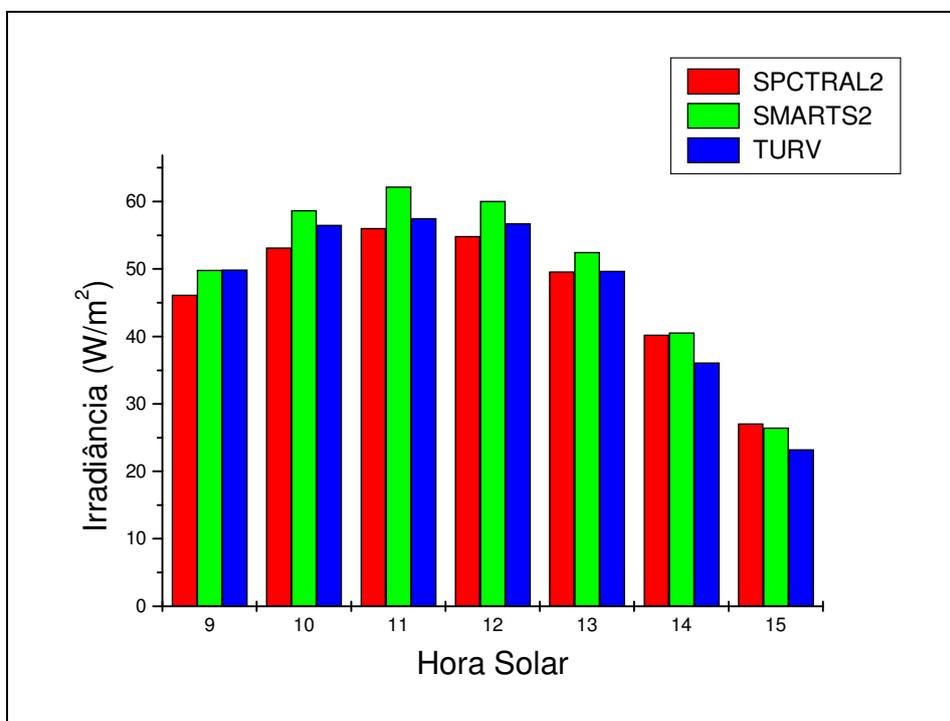


Figura 4 - Dia 18 de janeiro de 2006, Pesqueira (AOD diário).

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)