

ANÁLISE DA ATENUAÇÃO DAS RADIAÇÕES SOLARES GLOBAL, DIRETA HORIZONTAL E DIFUSA HORÁRIA EM FUNÇÃO DA MASSA ÓTICA

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br

Faculdade de Tecnologia de Botucatu – FATEC/BT

Luiz Carlos Dall’Antonia Junior – e-mail: lcdajunior@fca.unesp.br

Douglas Rodrigues – e-mail: douglasrodrigues.dr@gmail.com.br

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP/Botucatu, Departamento de Recursos Naturais

Resumo. Este trabalho tem como objetivo verificar, por meio da relação entre as radiações solares global, direta e difusa com a massa ótica, a atenuação causada pelos constituintes atmosféricos. A variação da massa ótica depende da localidade e das mudanças decorridas no tempo, com influencia no fluxo radiativo direto, provocando mudanças nos valores médios. As medidas de radiação solar foram cedidas pelo Laboratório de Radiometria de Botucatu, localizado no Departamento de Recursos Naturais, Setor Ambientais, da Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP – Botucatu/SP (latitude 22,9° Sul, longitude 48,45° Oeste, altitude 745 m). O período cedido para o estudo compreendeu os anos de 2002 a 2006. A radiação solar global I_G foi medida por um piranômetro Eppley modelo PSP. A radiação solar direta na incidência I_B foi medida por um pireliômetro Eppely modelo NIP acoplado a um sistema de rastreamento solar modelo ST-3. A radiação solar difusa I_d foi calculada pela diferença entre as radiações solares global e direta horizontal. Observou-se um decréscimo das radiações solares com o aumento da massa ótica, justificado pela maior probabilidade de colisão dos raios solares com os constituintes atmosféricos. Para radiação global e massa ótica $m_o=1$, tem-se mínimo em torno de 3,1 MJ/m² e máximo de 4,1 MJ/m². Para massa ótica $m_o=2$, mínimo de 1,5 MJ/m² e máxima de 1,9 MJ/m². Para a radiação direta, tem-se mínimo de 2 MJ/m² e máximo de 3,75 MJ/m². Para massa ótica $m_o=2$, mínimo de 1 MJ/m² e máxima de 1,5 MJ/m². Para radiação difusa, tem-se mínimo de 0,1 MJ/m² e máximo de 1,5 MJ/m². Para massa ótica $m_o=2$, mínimo de 0,1 MJ/m² e máxima de 0,8 MJ/m². A combinação de dados de radiação direta e difusa permitiu entender melhor o processo de atenuação, estabelecendo relações qualitativas entre os processos de absorção, espalhamento e reflexão.

Palavras-chave: Energia Solar. Atenuação Atmosférica. Espalhamento.

1. INTRODUÇÃO

Um tema que vem sendo discutido amplamente e certamente continuará em destaque nos próximos anos é o desenvolvimento sustentável. Pautado na preservação do meio ambiente e no uso de energias renováveis limpas, uma de suas diretrizes está centrada na redução dos efeitos da poluição atmosférica, minimizando assim os impactos na mudança climática global. O aumento médio de 1° C na temperatura do planeta Terra pode causar a extinção de algumas espécies da fauna e da flora (Sala et al., 2000; Hare, 2003; Thomas et al., 2004; Miles et al., 2004; Case, 2006), trazendo impactos negativos em diversas áreas. O atual crescimento industrial alimentado pelo consumismo desenfreado pela sociedade moderna está em direção oposta à filosofia pregada pelo desenvolvimento sustentável. A mudança de paradigma para um crescimento consciente e saudável se faz necessária para preservação dos recursos naturais e para manutenção da vida na Terra. Portanto, o estudo da interação atmosfera-radiação e seu impacto no clima são importantes para a criação e a adoção de políticas ambientais direcionadas à defesa do meio ambiente.

A atmosfera é composta por gases, vapor d’água e aerossóis. Os principais gases atmosféricos são nitrogênio (78,1%) e oxigênio (20,9%), com concentrações constantes (Seinfeld e Pandis, 1998). Já o vapor d’água e os aerossóis apresentam distribuições e concentrações variáveis em função do tempo e do espaço, o que dificulta sua caracterização. Os aerossóis são partículas sólidas e líquidas em suspensão na atmosfera e sua origem está ligada a processos naturais (vulcões, ventos) ou antropogênicos (atividade industrial). Podem ser primários, emitidos na forma particulada, diretamente das fontes, tais como poeiras decorrentes de vento ou partículas de fumaça emitidas pelas indústrias, ou secundários, produzidos na atmosfera por meio de reações em fase gasosa que geram espécies condensáveis (Penner et al., 2001; Lohman e Feichter, 2005; Kaufman et al., 2002; IPCC, 2001). Seu tamanho varia de nanômetros a dezenas de micrômetros de diâmetro e podem ser classificados em moda fina e moda grossa. A moda fina compreende aerossóis de tamanhos inferiores a 2,5 µm e são formados por partículas primárias obtidas por processos de combustão da indústria e emissão veicular e por partículas secundárias como sulfatos provenientes da reação com gases com SO₂. A moda grossa compreende aerossóis de tamanho entre 2,5 µm a 10 µm e são formados por partículas primárias a partir de processos mecânicos, como ressuspensão de poeira por ventos, emissões biogênicas naturais, sal marinho, dentre outros. A soma da moda fina com a moda grossa é chamada de particulado inalável e é considerada prejudicial à saúde do ser

humano (Michelozzi et al., 1998). Enquanto a moda grossa deposita-se no trato respiratório superior, a moda fina pode atingir a região auveolar, lugar das trocas gasosas, permanecendo ali por um tempo maior e causando, portanto maiores danos à saúde (Macchione, 1999; Saldiva et al., 1992).

Os aerossóis apresentam variações quanto à forma, concentração, distribuição temporal e espacial, composição, tamanho e propriedades físicas e químicas (Ramanathan et al., 2001; Haywood et al., 2000; Andreae, 1995) e podem ser transportados a longas distâncias, afetando diretamente o balanço radiativo atmosférico nas escalas local, regional e global (Freitas et al., 2000, 2005; Andreae et al., 2001). Uma vez na atmosfera, a interação dos aerossóis provoca alterações no clima por meio de dois efeitos: direto e indireto. No efeito direto, os aerossóis interagem com a radiação solar por meio dos fenômenos de absorção e espalhamento, provocando uma redução da radiação incidente na superfície e alterando o perfil vertical da temperatura, a estabilidade atmosférica e a produção fotoquímica (ozônio) de poluentes na superfície. Os efeitos locais dessa alteração são diferenciados devido às concentrações variáveis dos aerossóis na atmosfera, podendo ser maiores em lugares de maior concentração. No efeito indireto, os aerossóis interagem no ciclo hidrológico, alterando as propriedades das nuvens. Atuando como núcleos de condensação de nuvens, modificam os mecanismos de formação de gotas (Roberts et al., 2002). Em presença dos aerossóis, o aumento da quantidade de núcleos de condensação reduz o tamanho das gotas, reduzindo assim a eficiência da precipitação. O menor tamanho das gotas causa também o aumento da refletância das nuvens na faixa visível da radiação solar (Ramanathan et al., 2001). A remoção de sulfatos e nitratos da atmosfera pela precipitação pode causar as chuvas ácidas (Gonçalves et al., 2002; Paiva et al., 1997; Leal et al., 2004).

A interação da radiação com a atmosfera é realizada por meio dos fenômenos da absorção e do espalhamento, acarretando num valor menor na superfície em relação ao total incidente no topo da atmosfera. A atenuação ocorre por absorção de gases atmosféricos, por espalhamento em moléculas e por absorção e espalhamento por aerossóis. Os principais gases atmosféricos absorvedores de radiação são O_2 e ozônio, absorvendo 100% da radiação abaixo de 290 nm (ultravioleta) e vapor d'água e dióxido de carbono, absorvendo grande parte da radiação infravermelha termal, contribuindo assim para a manutenção da temperatura do planeta pelo efeito estufa natural (Wallace & Hobbs, 1977). O espalhamento devido às moléculas, conhecido por espalhamento Rayleigh, ocorre para partículas de menor tamanho e seu efeito está associado diretamente à visibilidade (Goody e Yung, 1989). Para partículas maiores (aerossóis da moda grossa), o espalhamento recebe o nome de espalhamento Mie e apresenta comportamento direcional maior no sentido atmosfera-superfície, também conhecido como anisotropia da radiação (Dal Pai & Escobedo, 2007; Dal Pai & Escobedo, 2008).

A radiação solar que atinge a superfície terrestre recebe o nome de radiação solar global e representa a soma das radiações solares direta e difusa. A radiação solar direta é o feixe radiativo que incide na superfície sem interação com a atmosfera, enquanto que a radiação solar difusa é fruto do espalhamento da radiação pelos constituintes atmosféricos. Em dias de céu completamente nublado, a probabilidade de ocorrência de precipitação é maior, aumentando as chances de deposição dos aerossóis e favorecendo um espalhamento mais uniforme (espalhamento Rayleigh). Em dias de céu aberto a maior concentração de aerossóis aumenta a turbidez, favorecendo um espalhamento direcional (espalhamento Mie). O conhecimento das radiações solares no topo da atmosfera e direta na superfície permitem quantificar a extinção do feixe radiativo, enquanto que o conhecimento das radiações solares global e difusa fornecem indicativos sobre a composição atmosférica envolvida nos processos de absorção e de espalhamento (Ramanathan et al., 2001). Uma forma de estimar a atenuação da radiação solar causada pela atmosfera é relacionar a radiação solar com massa ótica. A massa ótica, também conhecida por espessura da atmosfera, é definida como sendo a quantidade de atmosferas de culminação zenital ao nível do mar existentes para um determinado ângulo de incidência.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi verificar, para a partição de tempo horária, a relação entre as radiações solares global, direta horizontal e difusa com a massa ótica e estabelecer relações entre os processos de atenuação atmosférica para a cidade de Botucatu.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As medidas de radiação solar foram cedidas pelo Laboratório de Radiometria de Botucatu, localizado no Departamento de Recursos Naturais, Setor Ambientais, da Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP – Botucatu/SP (latitude 22,9° Sul, longitude 48,45° Oeste, altitude 745 m). O período cedido para o estudo compreendeu os anos de 2002 a 2006.

O clima de Botucatu está classificado, segundo a classificação climática de Köppen, como sendo o Cwa, ou seja, clima temperado com duas estações bem definidas: inverno seco e verão quente/chuvoso. A Figura 1a mostra as médias mensais de precipitação e nebulosidade medidas na estação meteorológica de Botucatu, enquanto que a Figura 1b mostra as médias mensais de temperatura e umidade relativa. Nos meses de abril e maio ocorre a passagem de sistemas frontais que trazem instabilidade atmosférica, chuvas e baixas temperaturas. Já os meses de julho e agosto são caracterizados pela ação do sistema de alta pressão que atua sobre a região sudeste (anticiclone do Atlântico Sul), o que favorece a ocorrência de dias sem nuvens com grande amplitude térmica e baixa umidade relativa. Os maiores valores de precipitação e nebulosidade ocorrem para os meses de verão (dezembro, janeiro, fevereiro e março) e os menores valores para os meses do inverno (junho, julho e agosto). As temperaturas mais altas ocorrem para os meses de dezembro, janeiro e fevereiro enquanto que as menores ocorrem para os meses de junho e julho. Em relação à umidade relativa, a máxima ocorre em fevereiro e a mínima em agosto.

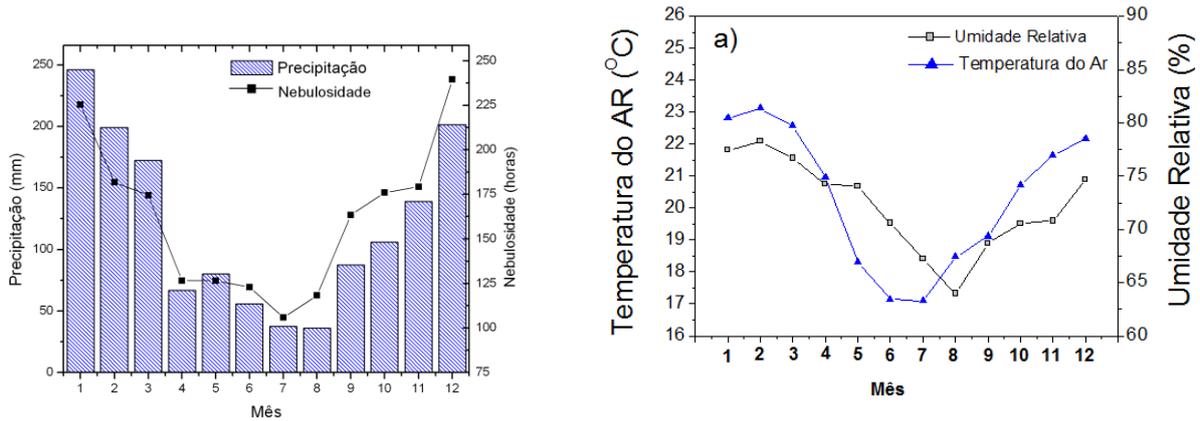


Figura 1. Médias mensais dos elementos climáticos da cidade de Botucatu-SP. A) Precipitação e nebulosidade. B) Temperatura e umidade relativa.

A radiação solar global I_G foi medida por um piranômetro Eppley modelo PSP enquanto que a radiação solar direta na incidência I_B por um pireliômetro Eppley modelo NIP acoplado a um sistema de rastreamento solar modelo ST-3. A radiação solar direta na incidência foi multiplicada pelo cosseno do ângulo zenital θ_z para cálculo da radiação direta na projeção horizontal I_{DH} (Eq 1). A radiação solar difusa I_d foi calculada pela diferença entre as radiações solares global e direta horizontal (Eq 2). A Figura 2 mostra os aparelhos utilizados na medida da radiação solar.

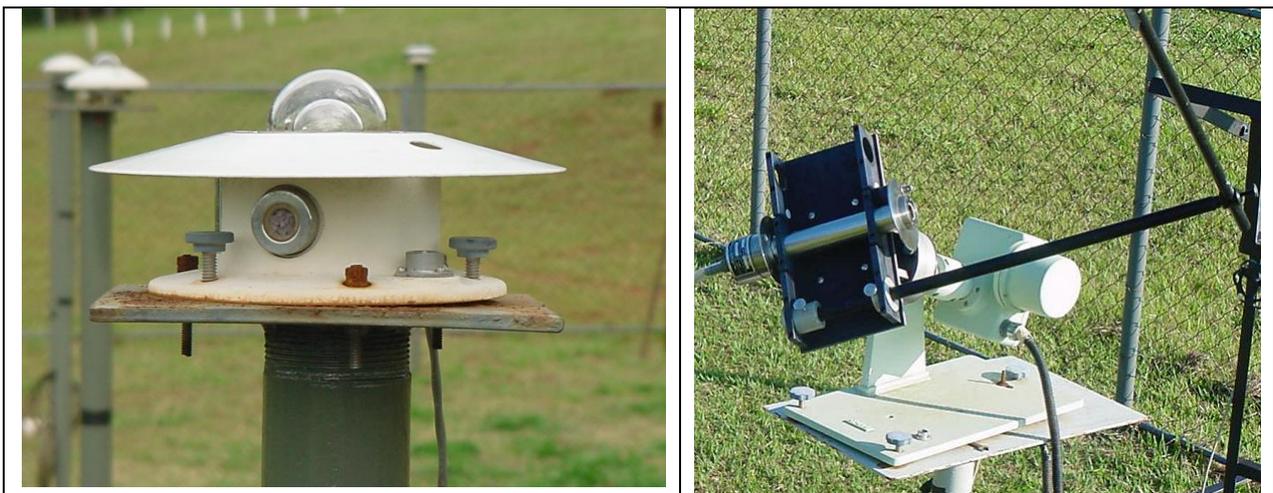


Figura 2. Aparelhos usados na medida da radiação solar. A) Piranômetro para medida da radiação solar global. B) Pireliômetro para medida da radiação solar direta na incidência.

$$I_{DH} = I_B * \cos\theta_z \quad (1)$$

$$I_d = I_G - I_{DH} \quad (2)$$

O Laboratório de Radiometria mediu a radiação solar no formato de potência por área (W/m^2) na frequência de 0,2 Hz com um sistema de aquisição de dados digital CR23X da Campbell Scientific Inc. Em seguida, integrou os valores na partição de tempo horária, gerando informações horárias de energia por área (J/m^2). Foram selecionados somente valores referentes a condições de céu aberto (Suehrcke e McCormick, 1989) caracterizados por uma transmissividade atmosférica (razão entre as radiações global e topo da atmosfera) superior a 65% no sentido de se evitar as atenuações devido a nuvens. A massa ótica foi calculada pela Eq (3):

$$ma = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (3)$$

Os dados foram agrupados em classes de massa ótica com amplitude 0,025. A Figura 2 mostra uma distribuição de frequências mostrando a quantidade de dados por classe. As classes referentes a valores de massa ótica maiores que 3 foram descartadas em função da baixa frequência de ocorrência. As classes descartadas representam ângulos zenitais maiores que 80° e não são recomendados para estudos de atenuação radiativa (Yamasoe, 1999; Schmid e Wehrli, 1995).

Para as classes restantes foram calculadas as médias e os respectivos desvios-padrão. Os gráficos foram elaborados tendo como variável dependente as radiações e variável independente as classes de massa ótica. Os cálculos e os gráficos foram elaborados na planilha gráfica eletrônica Origin, da Microcal versão 8.0.

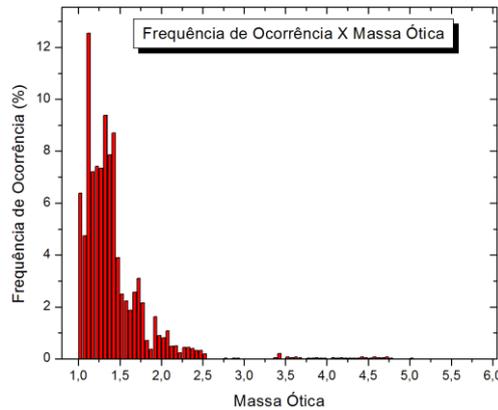


Figura 4. Distribuição de frequência percentual dos valores de radiação solar em função da massa ótica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo da atenuação da radiação solar pela atmosfera permite entender melhor a interação da radiação com os constituintes atmosféricos. A incidência de fluxo radiativo nos constituintes atmosféricos (gases, moléculas de ar, aerossóis, ozônio e vapor d água) causa fenômenos como absorção, espalhamento e reflexão, tornando variável a quantidade de energia incidente na superfície. O conhecimento dessa variação e dos valores energéticos no topo da atmosfera resulta em informações sobre concentração e distribuição desses constituintes, tornando mais precisas aplicações em projetos de modelagem atmosférica.

A atenuação atmosférica pode ser representada pela interação entre radiação solar e massa ótica. A massa ótica é um parâmetro físico que representa a espessura da atmosfera com todos os seus constituintes. Portanto, entender essa interação permite conhecer melhor como ocorrem os fenômenos de absorção, de espalhamento e de reflexão. Um fenômeno pode ocorrer com mais intensidade que outro, dependendo do valor da radiação medida em superfície e das concentrações e tipos dos constituintes atmosféricos.

A Figura 5a mostra os valores da radiação solar global horária em função da massa ótica dos anos de 2002 a 2006, enquanto que a Figura 5b mostra os valores médios da radiação solar global horária em função de intervalos discretos da massa ótica com seus respectivos desvios-padrão.

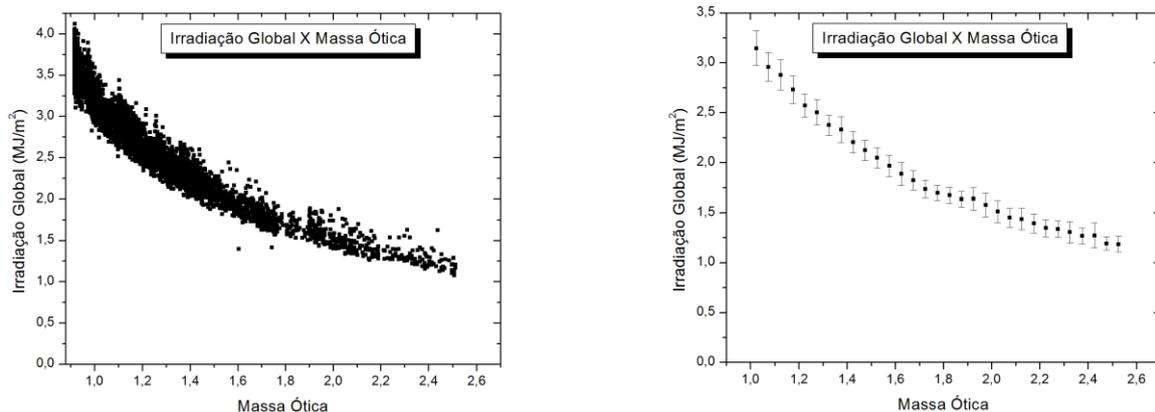


Figura 5. Irradiação solar global em função da massa ótica. A) Valores Horários. B) Valores médios e respectivo desvio padrão.

Nota-se uma relação entre a radiação global e a massa ótica, com os valores da radiação global decaindo exponencialmente na direção do aumento da massa ótica, conforme descrito pela lei de Beer-Lambert. O aumento da massa ótica representa o aumento do ângulo zenital. Portanto, os raios solares, ao penetrarem na atmosfera, precisam percorrer uma distância maior até incidirem na superfície, o que aumenta a probabilidade de colisão com os constituintes atmosféricos, justificando assim a atenuação observada nos valores da radiação global (Freitas et al.,

2005). Pela Figura 1a, para valores de massa ótica $m_o=1$ nota-se que a radiação global tem variação aproximada de 1 MJ/m^2 , com mínimo em torno de $3,1 \text{ MJ/m}^2$ e máximo de $4,1 \text{ MJ/m}^2$. Essa variação é menor para valores da massa ótica $m_o=2$, em torno de $0,4 \text{ MJ/m}^2$, com radiação global mínima de $1,5 \text{ MJ/m}^2$ e máxima de $1,9 \text{ MJ/m}^2$. Os maiores valores da radiação global para massa ótica $m_o=1$ em relação aos da massa ótica $m_o=2$ são devidos à menor probabilidade de colisão com o material presente na atmosfera, garantindo assim uma transmissão atmosférica mais efetiva. O aumento da massa ótica acarreta no aumento da probabilidade de colisão e, por conseqüência, aumenta-se a atenuação. Já a variação energética observada para um determinado valor de massa ótica está associada aos diferentes fenômenos de atenuação. A predominância de um fenômeno sobre o outro pode acarretar nas variações observadas e também revelar indicativos sobre a composição da atmosfera (Ramanathan et al, 2001; Haywood et al., 2000). A tabela 1 mostra os valores da radiação global média horária e seu desvio-padrão para intervalos discretos de massa ótica. Na média, os valores do desvio-padrão estão em torno de 6% do valor da medida. Os valores da radiação global foram agrupados sem levar em consideração a sazonalidade e, portanto, diferentes épocas do ano apresentam tipos e concentrações diferentes da atmosfera, alterando a relação do trinômio absorção-espalhamento-reflexão e explicando as variações observadas (Andreae, 1995).

Tabela 1. Radiação solar global média horária e desvio-padrão para diferentes intervalos discretos de massa ótica.

MO	Rad Global (MJ/m ²)	SD		MO	Rad Global (MJ/m ²)	SD
1,025	3,14348	0,17387		1,825	1,67176	0,0796
1,075	2,9572	0,14375		1,875	1,63217	0,07802
1,125	2,87707	0,14971		1,925	1,63731	0,11088
1,175	2,7288	0,13978		1,975	1,57613	0,11987
1,225	2,57035	0,11734		2,025	1,51045	0,10845
1,275	2,50206	0,12789		2,075	1,44828	0,09367
1,325	2,373	0,09981		2,125	1,43419	0,10623
1,375	2,32792	0,13061		2,175	1,39201	0,09434
1,425	2,20302	0,10874		2,225	1,3451	0,08661
1,475	2,12135	0,10119		2,275	1,33688	0,0839
1,525	2,04657	0,10429		2,325	1,30568	0,10633
1,575	1,96585	0,10864		2,375	1,26808	0,0802
1,625	1,88668	0,11516		2,425	1,27088	0,12434
1,675	1,82183	0,09852		2,475	1,19111	0,06588
1,725	1,733	0,08736		2,525	1,18317	0,07843
1,775	1,69513	0,07689				

No entanto, a radiação global é composta da soma da radiação direta horizontal com a radiação difusa, as quais, devido às suas naturezas diferentes, apresentam diferentes intensidades para os fenômenos de atenuação. A Figura 6a mostra os valores da radiação solar direta horizontal horária em função da massa ótica dos anos de 2002 a 2006, enquanto que a Figura 6b mostra os valores médios da radiação solar direta horizontal horária em função de intervalos discretos da massa ótica com seus respectivos desvio-padrão. Para massa ótica $m_o=1$, observa-se uma variação de $1,75 \text{ MJ/m}^2$, com mínimo de 2 MJ/m^2 e máximo de $3,75 \text{ MJ/m}^2$. Para massa ótica $m_o=2$, a variação é menor, no valor de $0,5 \text{ MJ/m}^2$, com mínimo de 1 MJ/m^2 e máximo de $1,5 \text{ MJ/m}^2$. Comparando as Figuras 1a e 2a, observa-se maior variação dos valores da radiação direta horizontal para uma massa ótica específica em relação à variação apresentada pela radiação global. Essa maior amplitude energética, principalmente para ângulos zenitais pequenos, mostra que essa componente é mais sensível aos fenômenos de atenuação, também verificado pela maior amplitude dos valores de desvio-padrão da Figura 2b.

No entanto, a atenuação causada nos valores da radiação direta horizontal não permite inferir sobre quais fenômenos ocorrem com maior frequência. A radiação direta é definida como fluxo radiativo que incide na superfície sem interação com a atmosfera e qualquer interação com os constituintes atmosféricos, seja na absorção, seja no espalhamento ou seja na reflexão, irá diminuir sua intensidade. Valores elevados de radiação direta horizontal indicam menor atenuação enquanto que valores menores indicam maior atenuação. Contudo, informações sobre radiação difusa podem complementar a análise da atenuação da radiação pela atmosfera, visto que sua intensidade é fruto do espalhamento da radiação solar com os constituintes atmosféricos. A Figura 7a mostra os valores da radiação solar difusa horária em função da massa ótica dos anos de 2002 a 2006, enquanto que a Figura 7b mostra os valores médios da radiação solar difusa horária em função de intervalos discretos da massa ótica com seus respectivos desvio-padrão.

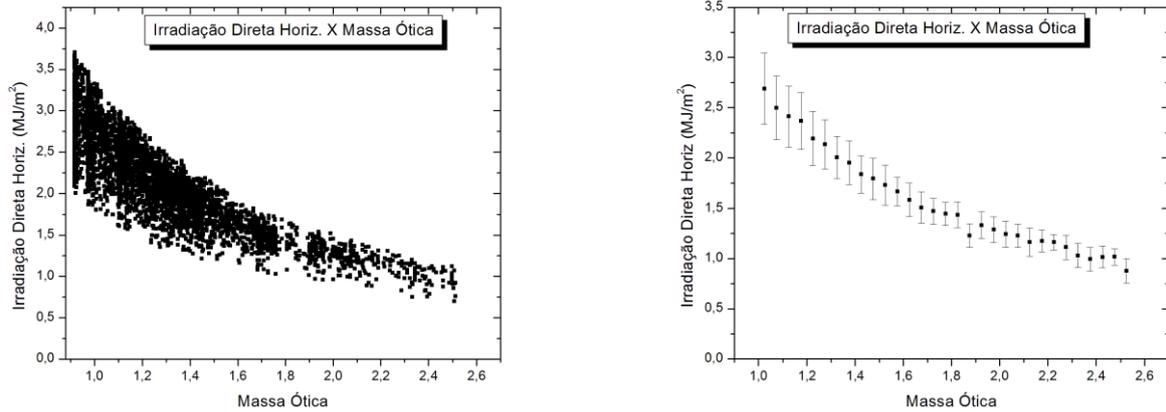


Figura 6. Irradiação solar direta horizontal em função da massa ótica. A) Valores Horários. B) Valores médios e respectivo desvio padrão.

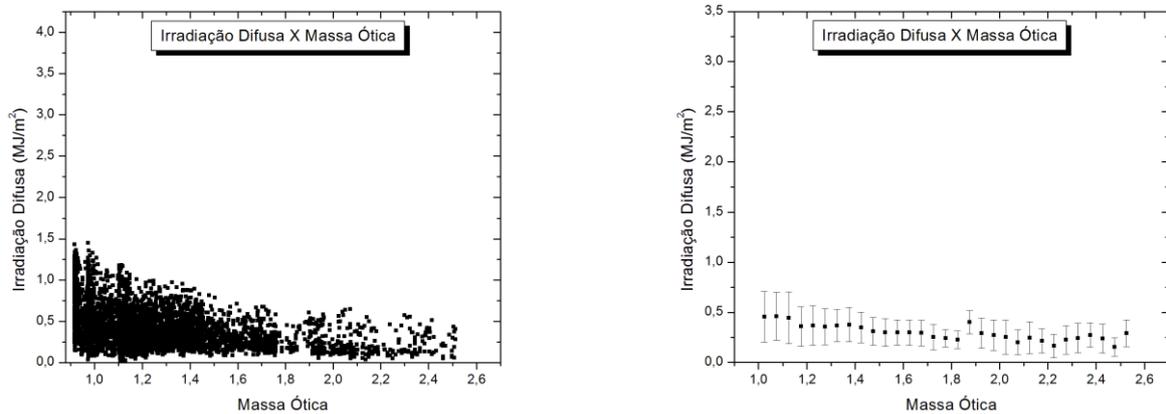


Figura 7. Irradiação solar difusa em função da massa ótica. A) Valores Horários. B) Valores médios e respectivo desvio padrão.

Verifica-se também para a radiação difusa uma grande variação nos valores energéticos em função da massa ótica, com variação em torno de $1,5 \text{ MJ/m}^2$ para massa ótica $m_o=1$ e $0,7 \text{ MJ/m}^2$ para massa ótica $m_o=2$. Para massa ótica $m_o=1$, tem-se mínimo de $0,1 \text{ MJ/m}^2$ e máximo de $1,5 \text{ MJ/m}^2$ e para massa ótica $m_o=2$, mínimo de $0,1 \text{ MJ/m}^2$ e máximo de $0,8 \text{ MJ/m}^2$. Para pequenos valores de ângulo zenital, a elevada variação dos valores da radiação difusa mostra a complexidade do fenômeno do espalhamento (Dal Pai e Escobedo, 2008). Diferentes tipos e tamanhos de partículas espalham de forma diferenciada a radiação solar. Partículas pequenas como gases e moléculas promovem espalhamento Rayleigh de características mais uniformes, enquanto que partículas maiores promovem o espalhamento Mie que é caracterizado por um espalhamento direcional.

As tabelas 2 e 3 mostram, respectivamente, os valores da radiação direta horizontal e difusa média horária e seus respectivos desvio-padrão para intervalos discretos de massa ótica. Para a radiação direta horizontal, os valores do desvio-padrão estão em torno de 11% do valor da medida, enquanto que para a radiação difusa, os valores estão em torno de 48%. Os elevados valores de desvio-padrão da radiação difusa podem ser explicados em função da ocorrência de processos de espalhamento múltiplo e efeitos de reflexão por partículas adjacentes no caminho ótico percorrido pelos raios, podendo assim aumentar a variabilidade dos valores da radiação solar difusa (Suehrcke e McCormick, 1989).

Tabela 1. Radiação solar direta horizontal média horária e desvio-padrão para diferentes intervalos discretos de massa ótica.

MO	Rad Direta Horiz (MJ/m ²)	SD		MO	Rad Direta Horiz (MJ/m ²)	SD
1,025	2,68706	0,35584		1,825	1,43585	0,12763
1,075	2,49773	0,31707		1,875	1,22993	0,11698
1,125	2,41218	0,30435		1,925	1,33266	0,13253
1,175	2,36603	0,28315		1,975	1,28828	0,12751
1,225	2,1932	0,26973		2,025	1,2426	0,12935
1,275	2,13462	0,24346		2,075	1,22702	0,11586
1,325	2,0041	0,21198		2,125	1,16271	0,14101
1,375	1,95075	0,21703		2,175	1,17646	0,10829
1,425	1,83516	0,18496		2,225	1,16325	0,07721
1,475	1,79281	0,20405		2,275	1,11233	0,12107
1,525	1,72967	0,19994		2,325	1,03103	0,11924
1,575	1,66539	0,14		2,375	0,99338	0,11834
1,625	1,58401	0,16492		2,425	1,01529	0,10984
1,675	1,50749	0,15127		2,475	1,01675	0,08222
1,725	1,47226	0,12774		2,525	0,8761	0,12126
1,775	1,44609	0,11528				

Tabela 3. Radiação solar difusa média horária e desvio-padrão para diferentes intervalos discretos de massa ótica.

MO	Rad Difusa (MJ/m ²)	SD		MO	Rad Difusa (MJ/m ²)	SD
1,025	0,5429	0,2803		1,825	0,2172	0,06862
1,075	0,53314	0,29994		1,875	0,37868	0,13284
1,125	0,50724	0,27577		1,925	0,27192	0,11501
1,175	0,39983	0,20529		1,975	0,2778	0,15655
1,225	0,38521	0,20664		2,025	0,27145	0,14628
1,275	0,34566	0,18649		2,075	0,21409	0,07949
1,325	0,34427	0,16971		2,125	0,22992	0,1016
1,375	0,38778	0,20442		2,175	0,20821	0,07424
1,425	0,32565	0,16123		2,225	0,20406	0,11421
1,475	0,30979	0,13602		2,275	0,21161	0,09451
1,525	0,29736	0,12567		2,325	0,18922	0,0681
1,575	0,29789	0,15432		2,375	0,19175	0,06057
1,625	0,28731	0,12534		2,425	0,20078	0,11538
1,675	0,2577	0,10286		2,475	0,18295	0,07771
1,725	0,25352	0,13101		2,525	0,26017	0,22457
1,775	0,25426	0,13375				

A análise conjunta da relação entre as radiações direta horizontal e difusa com a massa ótica permite estimar quais fenômenos de atenuação são mais relevantes em determinadas situações. O conhecimento de qual fenômeno é mais marcante fornece indicativos de qual tipo de constituinte é mais presente. A Figura 8 mostra os valores das radiações direta horizontal e difusa evidenciando valores máximos e mínimos. Valores elevados da radiação direta estão representados em vermelho, enquanto que os menores valores estão representados em azul. Para os maiores valores da radiação direta observam-se valores baixos da radiação difusa, o que evidencia uma atmosfera mais clara e limpa, com menor concentração de aerossóis, menor espalhamento e consequentemente menor atenuação. No entanto, alguns poucos valores de radiação difusa encontram-se mais elevados. Apesar da baixa atenuação, esse maior espalhamento, típico de coberturas de céu mais túrbidas, indica uma atmosfera com maior concentração de aerossóis (Seinfeld e

Pandis, 1998). Já os menores valores da radiação direta indicam uma maior atenuação. Neste caso, os dados associados de radiação difusa são maiores e mostram que o efeito do espalhamento é elevado. No entanto, como a atenuação é elevada, os fenômenos de absorção e reflexão também podem ser elevados. Neste caso, além das partículas de aerossóis, é provável que vapor d'água e partículas grandes, responsáveis por absorção e reflexão, tenham concentrações mais elevadas. Contudo, observam-se também valores menores da radiação difusa, indicando uma diminuição do espalhamento. Nessa situação a ação dos fenômenos de absorção e reflexão são maiores na atenuação, provavelmente indicando maior concentração de vapor d'água.

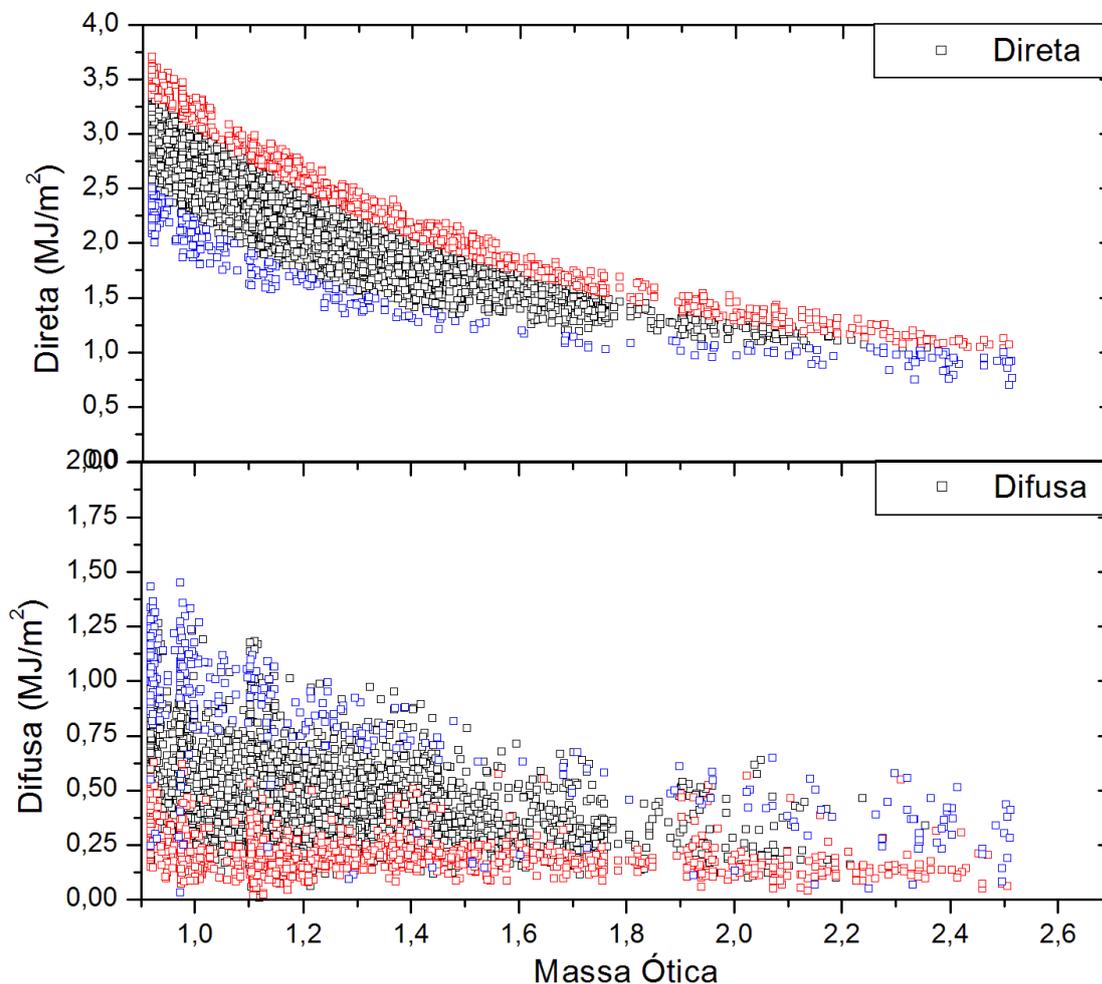


Figura 8. Radiações direta horizontal e difusa em função da massa ótica.

Para melhor caracterizar os fenômenos da atmosfera e assim obter informações sobre sua composição, além das radiações e da massa ótica, sazonalidade e dados de umidade relativa e de satélites devem ser incorporados no estudo para se compreender melhor a relação da época do ano, do vapor d'água, dos aerossóis e do ozônio nas relações de atenuação.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados pode-se concluir que a atenuação da radiação global obedece a equação de Beer-Lambert, com um decaimento exponencial da intensidade de seus valores em função da massa ótica. Quanto às radiações direta e difusa, também se observou uma atenuação nos valores medidos em função do aumento da massa ótica. O aumento do caminho ótico aumenta a probabilidade de colisão.

A análise conjunta das radiações direta e difusa permitiu sugerir possíveis comportamentos dos fenômenos de atenuação atmosférica, os quais poderão ser melhorados no futuro a partir de dados adicionais de sazonalidade, umidade relativa, aerossóis e ozônio.

REFERÊNCIAS

- ANDREAE, M.O. *Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels ch10*. In World Survey of Climatology, vol. 16, Future Climates of the World, edited by A. Henderson-Sellers, p. 341-392, **Elsevier**, New York, 1995.
- Andreae, M.O., Artaxo, P., Fischer, H., Freitas, S.R., Gregoire, J.M., Hansel, A., Hoor, P., Kormann, R., Krejci, R., Lange, L., Lelieveld, J., Lindinger, W., Longo, K., Peters, W., de Reus, M., Scheeren, B., Dias, M.A.F.S., Strom, J., van Velthoven, P.F.J., Williams, J., Transport of biomass burning smoke to the upper troposphere by deep convection in the equatorial region *Geophysical Research Letters* 28 (6): 951-954, MAR 15, 2001.
- Case, M. "Climate change impacts in the Amazon: review of scientific literature (World Wildlife Fund – WWF)". 8th Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity. 20-31 March, Curitiba, Brazil. 2006
- CODATO, G.; OLIVEIRA, A.P.; SOARES, J.; ESCOBEDO, J.F.; GOMES, E.N.; DAL PAI, A. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural áreas in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.93, n.1, p.57-73, 2008.
- DAL PAI, Alexandre ; ESCOBEDO, João Francisco . Correlação entre anisotropia da radiação solar difusa e transmissividade atmosférica, razão de insolação e profundidade ótica de aerossol. In: II Congresso de Energia Solar, 2008, Florianópolis. II Congresso Brasileiro de Energia Solar - CD Rom, 2008.
- DAL PAI, Alexandre ; ESCOBEDO, João Francisco . Modelo de estimativa anisotrópica da radiação solar difusa nas partições de tempo horária, diária e mensal. In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar - ICBENS, 2007, Fortaleza/CE. I Congresso Brasileiro de Energia Solar - ICBENS - CD Rom, 2007.
- Freitas, S.R., Dias, M.A.F.S., Dias, P.L.S., Longo, K.M., Artaxo, P., Andreae, M.O., Fischer, H., A convective kinematic trajectory technique for low-resolution atmospheric models *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105 (D19): 24375-24386 OCT 16, 2000. 213
- Freitas, S.R., Longo, K.M., Dias, M.A.F.S., Dias, P.L.S., Chatfield, R., Prins, E., Artaxo, P., Grell, G.A., Recuero, F.S.; Monitoring the transport of biomass burning emissions in South America. *Environmental Fluid Mechanics* 5 (1-2): 135-167 2005.
- GONÇALVES, F.L.T., A.R. MALHEIROS, R.S. FREITAS, M.A.F. ASSUNÇÃO, O. MASSAMBANI. *In-cloud and below-cloud numerical simulation of scavenging processes at Serra do Mar region, SE Brazil*. **Atmospheric Environment**, vol. 36, p. 5245-5255, 2002.
- Goody, R. M.; Yung, Y. L. *Atmospheric Radiation – Theoretical Basis*. Oxford University Press, New York, 1989.
- Hare, W. "Assessment of knowledge on impacts of climate change contribution to the specification of art. 2 of the UNFCCC". WBGU Potsdam, Berlin.2003.
- HAYWOOD, J., O. BOUCHER. *Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review*. **Reviews of Geophysics**, vol. 38, p. 513-543, nov 2000.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate change, Third Assessment Report, Scientific Basis*, 2001.
- Kaufman, Y. J., Tanre, D. e Boucher, O.: A satellite view of aerosols in the climate system, *Nature*, 419, 6903, 215-223, 2002.
- LEAL, T.F.M., A.P.G. FONTENELE , J. PEDROTTI, A.FORNARO. *Composição iônica majoritária de águas de chuva no centro da cidade de São Paulo*. **Química Nova**, vol. 27(6), p. 855-861, 2004.
- Lohmann, U. and Feichter, J.: Global indirect aerosol effects: a review, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 715-737, 2005.
- MACCHIONE, M. (1999). São Paulo. Dissertação de Doutorado. Instituto de Química da Universidade de São Paulo.
- Michelozzi, P; Forastiere, F.; Fusco, D.; Perucci, C. A.; Ostro, B.; Ancona, C.; Pallotti, G. Air pollution and daily mortality in Rome, Italy. *Occup. Environ. Med.*, v. 55, p. 605-610, 1998.
- Miles, L.; Grainger, A. and Phillips, O.L. "The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia". *Global Ecology and Biogeography* 13: 553-565.2004.
- PAIVA, R.P., M.A.F. PIRES, C.S. MUNITA, M.F. ANDRADE, F.L.T. GONÇALVES, O. MASSAMBANI. *A preliminary study of the anthropogenic contribution to São Paulo rainfall*. **Fresenius**, vol. 6(9-10), p. 508-513, 1997
- Penner, J.E., M.O. Andreae, H.J. Annegarn, L.A. Barrie, J. Feichter, D.A. Hegg, A. Jayaraman, R. Leaitch, D.M. Murphy, J. Nganga, and G. Pitari: Chapter 5: Aerosols, their direct and indirect effects. In: IPCC Climate Change 2001: The scientific basis [J.T. Houghton (ed.)]. Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 2001.
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., Rosenfeld, D. Aerosols, Climate and the Hydrological Cycle. *Science Compass Review.*, v. 294, p. 2119-2124, 2001.
- RAMANATHAN, V., P. J. CRUTZEN, J. T. KIEHL, D. ROSENFELD. *Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle*. **Science Compass Review.**, vol. 294, p. 2119-2124, 2001.
- Roberts, G; Artaxo, P.; Zhou, J.; Swietlicki, E.; Andreae, M. O. Sensitivity of CCN spectra on chemical and physical properties of aerosols: a case study from the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, 2002.
- Sala, O.E. et.al. "Global biodiversity scenarios for the year 2100". *Science* 287:1770-1774. 2000.
- SALDIVA, P.H.N., KING, M., DELMONTE, V.L.C., MACCHIONE, M., PARADA, M.A.C., DALIBERTO, M.L., SAKAE, R.S., CRIADO, P.M.P., SILVEIRA, P.L.P., ZIN, W.A., BOM, G.M. (1992). *Respiratory Alterations due to urban air pollution: an experimental study in rats*. **Environmental Research**, Vol.57, p.19- 33.
- SCHMID, B. E C. WEHRLI. *Comparison of Sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp*. **Applied Optics**, vol. 34, p. 4500-4512, 1995.
- SEINFELD, J.H., PANDIS, S.N. (1998). *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*. Wiley, New York, U.S.A.

- SUEHRCKE, H., McCORMICK, P. G. The distribution of average instantaneous terrestrial solar radiation over the day. *Solar Energy*, v.42, n. 4, p 303-309, 1989.
- Thomas, C.D. et.al. "Extinction risk from climate change". *Nature*, 427 (6970). pp. 145-148.2004.
- WALLACE, J.M. E P.V. HOBBS. *Atmospheric Science – An Introductory Survey*. Academic Press, Inc. San Diego, Califórnia, 1977.
- YAMASOE, M.A. *Estudo de Propriedades Ópticas de Partículas de Aerossóis a partir de uma Rede de Fotômetros*. São Paulo. **Tese de Doutorado**. Instituto de Física, USP, 1999.

ANALYSIS OF THE ATTENUATION OF THE HOURLY GLOBAL, DIRECT AND DIFFUSE SOLAR RADIATIONS IN FUNCTION OF THE OPTICS MASS

Abstract. *The objective of this work is to verify the atmospheric attenuation by means of the relationship between global solar radiation, direct and diffuse with optical mass. The optical mass depends on locality and changes in time, with direct influence on the radiative flux, causing changes in average values. The measurements of solar radiation were provided by the Laboratory of Radiometry of Botucatu, UNESP - Botucatu / SP (22.9 ° S latitude, 48.45 ° W longitude, 745 m elevation). The period used included the years 2002 to 2006. The solar radiation was measured by a Eppley pyranometer model PSP. The direct solar radiation on the incidence was measured using a model pirheliometer Eppely NIP coupled to a solar tracking system model ST-3. The diffuse solar radiation was calculated by the difference between global and direct solar radiation horizontal. There was a decrease in solar radiation with increasing optical mass, justified by the increased probability of collision of the solar rays with atmospheric constituents. For global radiation and optical mass $m_o = 1$, a minimum around 3.1 MJ/m² and maximum 4.1 MJ/m². For optical mass $m_o = 2$, minimum 1.5 MJ/m², maximum 1.9 MJ/m². For direct radiation, minimum 2 MJ/m² and maximum 3.75 MJ/m². For optical mass $m_o = 2$, minimum 1 MJ/m² and maximum 1.5 MJ/m². For diffuse radiation, minimum 0.1 MJ/m² and maximum 1.5 MJ/m². For optical mass $m_o = 2$, minimum 0.1 MJ/m², maximum 0.8 MJ/m². The combination of direct and diffuse radiation data allowed better understand of the attenuation process.*

Key words: *Solar Energy, Atmospheric Attenuation, Scattering.*