

ESTIMATIVA DA DISTRIBUIÇÃO ESPECTRAL DA RADIAÇÃO SOLAR NO BRASIL UTILIZANDO MODELOS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA E ANÁLISE MULTIINSTRUMENTAL: SATÉLITE, RADIÔMETROS EM SUPERFÍCIE E RADIOSSONDAGEM

Rafael Haag – rafael.haag@ufrgs.br
Arno Krenzinger – arno.krenzinger@ufrgs.br
Labsol, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Resumo. O presente trabalho apresenta um projeto em desenvolvimento no Labsol (Laboratório de Energia Solar) na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O estudo pretende caracterizar a distribuição espectral da irradiância solar sobre o território brasileiro através de dados obtidos por instrumentos a bordo de satélites, radiômetros em superfície e radiossondagem. Estas informações formam um banco de dados sobre parâmetros atmosféricos que alteram as características espectrais da irradiância solar. Dois modelos computacionais de transferência radiativa na atmosfera, o SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) e SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) adotam este banco de dados como parâmetros de entrada e estimam a intensidade e distribuição espectral da radiação solar sobre a superfície. Pretende-se determinar as características desta distribuição espectral em diferentes regiões do país e a sua influência em sistemas que utilizam a energia produzida pelo Sol.

Palavras-chave: Radiação Solar, Distribuição Espectral, Modelos de Transferência Radiativa, Satélite, Radiômetros .

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre a intensidade e distribuição espectral da irradiância solar é extremamente importante para o correto dimensionamento de sistemas que utilizam a energia oriunda do Sol. Do mesmo modo, dados sobre as características dos diversos parâmetros atmosféricos e locais que alteram a distribuição espectral da radiação solar são vitais em inúmeras áreas da ciência e em incontáveis aplicações práticas.

Da mesma forma que alteram a distribuição espectral da irradiância solar, alguns parâmetros atmosféricos, principalmente as nuvens, aerossóis e vapor de água, modificam a relação entre as componentes da irradiância solar, ou seja, a intensidade da componente direta, difusa e global de modo diferenciado. Este fato assume relevante importância para sistemas que utilizam a irradiância direta para a conversão da energia solar, como exemplo sistemas que adotam concentração da radiação solar.

Estudos preliminares (Haag, 2007 e Haag e Krenzinger, 2008) apresentam algumas metodologias para determinação da distribuição espectral através de medidas realizadas por espectrorradiômetro e radiômetros seletivos em conjunto com modelos de transferência radiativa na atmosfera. Este trabalho busca ampliar estas metodologias e pretende analisar e caracterizar a distribuição espectral da irradiância solar sobre o território brasileiro. Para isto, são empregados dois modelos de transferência radiativa que utilizam dados de entrada obtidos por vários instrumentos de medidas. Dados fornecidos por estes instrumentos também são usados na validação dos resultados obtidos.

Este projeto e os objetivos a serem explorados, somente tornam-se viáveis, pois são concebidos em um período bastante frutífero para radiometria solar. Atualmente existem espalhadas pelo planeta inúmeras redes de instrumentos de alta qualidade destinados à obtenção de dados sobre radiação solar e análise de constituintes atmosféricos e seus dados são disponibilizados de forma quase instantânea. A rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) com 25 estações no território brasileiro, pode ser considerada a principal rede de medidas radiométricas do nosso país. Estas estações dispõem de sensores para a coleta de dados de todas as componentes da irradiação solar (difusa, direta e global); dados de iluminância e de radiação fotossinteticamente ativa (PAR). Além dos dados relativos à radiação solar, as estações da rede SONDA coletam dados meteorológicos básicos (temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica) e dados eólicos (direção e velocidade) com sensores dispostos a alturas de 25 e 50 m em relação ao solo (Martins, 2007). Encontram-se ainda outras estações automáticas operadas em parceria com a NASA e instituições de pesquisas do Brasil. Estas estações compõem as redes AERONET (AEROSOL ROBOTIC NETWORK) e SOLARNET (Solar Radiation Network). As estações da rede AERONET possuem fotômetros solares para a medida da radiação solar direta e determinação de alguns parâmetros atmosféricos como aerossóis e água precipitável. A rede SOLARNET é constituída por radiômetros de banda larga e para medida da radiação PAR.

Similarmente, há uma vasta quantidade de satélites em órbita destinados à análise de um grande número de parâmetros atmosféricos. Estas plataformas espaciais além de fornecerem dados com elevada precisão, propiciam uma

cobertura espacial e temporal suficiente para a aquisição destes parâmetros em uma região tão vasta como a do nosso território. Há Plataformas remotas de processamento prévio de dados, compostas por vários supercomputadores e grandes sistemas de armazenamento de dados (plataforma *GIOVANNI* da NASA, por exemplo), permitem a manipulação com grande rapidez de uma elevada quantidade de dados oriundos do sensoriamento a partir de satélites.

Por fim, a velocidade de processamento dos computadores atuais permite executar rapidamente rotinas de alta demanda numérica que alguns anos atrás seriam impraticáveis em razão do tempo necessário para tal realização. Isto possibilita a execução de algoritmos para resolução de equações de transferência radiativa (ETR) em uma grande escala temporal e espacial. Estes algoritmos para a resolução da ETR, apesar da sua enorme complexidade, atualmente estão consolidados, e fornecem dados com qualidade similar aos obtidos pelos melhores centros de referência em radiometria solar (Myers, D.R., 2003).

A Fig. 1 mostra um fluxograma onde é apresentada de forma resumida a metodologia empregada.

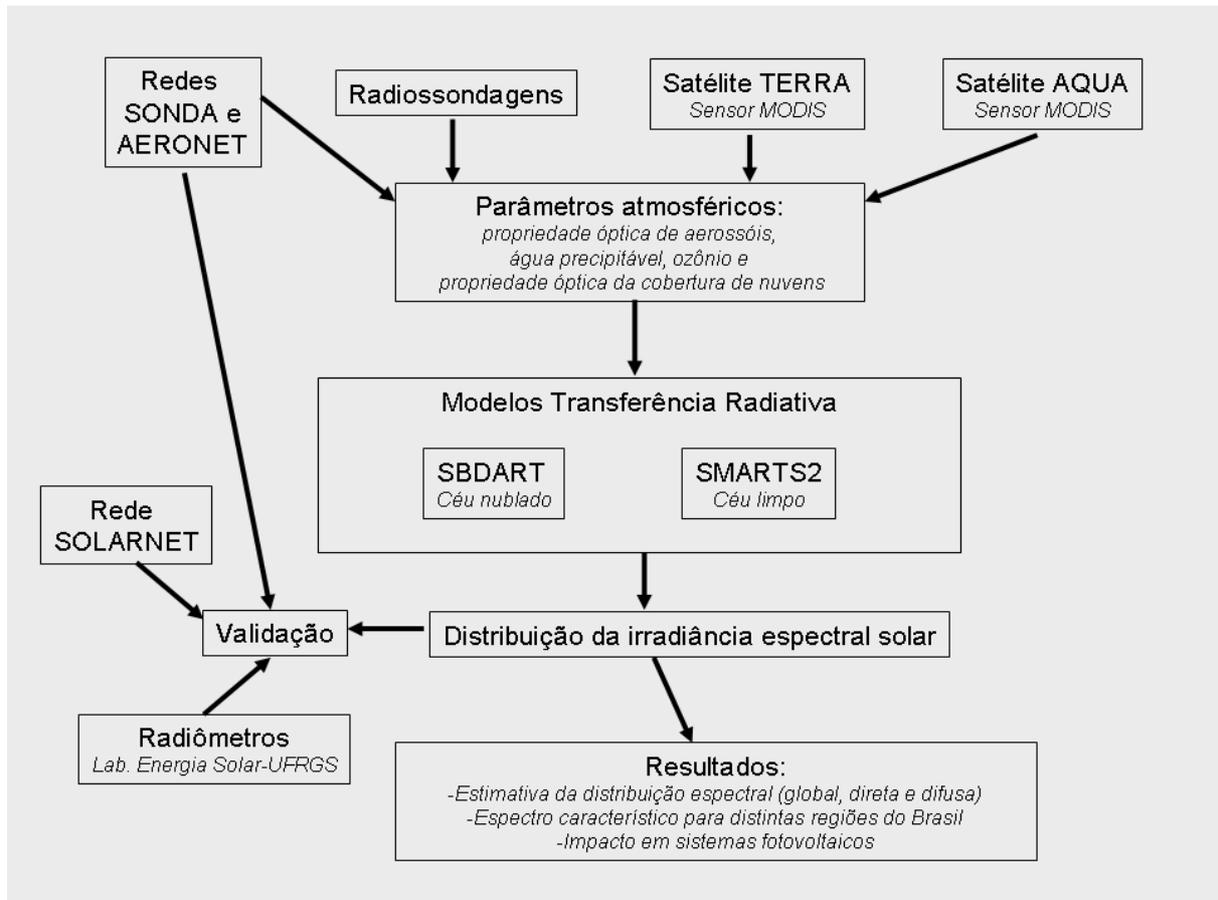


Figura 1 - Fluxograma mostrando a metodologia empregada

2. MODELOS COMPUTACIONAIS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

Modelos numéricos que buscam caracterizar a distribuição espectral da irradiância solar na superfície terrestre possuem uma vasta aplicação em inúmeras áreas, como por exemplo, em sistemas de energia solar, ciências atmosféricas, biologia, entre outros. Há basicamente dois métodos utilizados para modelar os processos de absorção molecular em segmentos discretos do espectro (CO_2 , O_2 , O_3 , etc.) e o espalhamento causado por aerossóis e moléculas. O primeiro baseia-se no cálculo da transmitância atmosférica e assume que a atmosfera terrestre é composta por uma única camada que através de vários processos de absorção e espalhamento atenua a irradiância solar. Estes modelos são baseados no trabalho pioneiro de Leckner (1978), que formulou um conjunto de equações para descrever os processos de extinção da radiação solar devido aos diversos gases que constituem a atmosfera terrestre. O segundo método, leva em conta a não-homogeneidade vertical da atmosfera terrestre e divide a atmosfera em várias camadas para calcular os processos de absorção e espalhamento. O primeiro modelo de transferência radiativa denominado de LOWTRAN, foi originado na década de 70 e foi substituído por uma nova versão, chamada de MODTRAN (Kneizys et al., 1980). Estes nomes referem-se à resolução dos modelos: LOWTRAN para uma baixa resolução e MODTRAN para resolução

moderada (0,5 e 0,05 nm respectivamente para o comprimento de onda de 500 nm). Dave (1975) formulou um modelo próprio de transferência radiativa utilizando aproximações aplicando o método matemático de *esféricos harmônicos* para computar a irradiância espectral solar das componentes direta e difusa para um conjunto de atmosferas padrão previamente determinadas. Bird et al., (1983) desenvolveu um código baseado no método de *Monte Carlo* chamado de BRITE, aplicado na determinação da transmitância atmosférica para as componentes direta e global da radiação solar. Estes modelos utilizam aproximações analíticas para a solução da equação de transferência radiativa (ETR). Como exemplo de simplificações, pode-se citar as aproximações para uma atmosfera tênue (*thin atmosphere*), a solução para espalhamento simples (*single-scatter solution*) e as várias soluções analíticas para o método de dois fluxos, tais como as muito difundidas *Eddington*, *delta-Eddington*, *Coakley-Chýlek*, entre outras (King e Harshvardhan, 1986).

Além destes, devem ser mencionados outros programas de transferência radiativa com vasta aplicação em ciências atmosféricas e energia como FASCODE, 6S, DISORT e SBDART (*Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer*) (Ricchiazzi, 1998). Pelo fato de utilizar propriedades físico-químicas fundamentais dos gases, os métodos de transferência radiativa que também são denominados de *modelos rigorosos*, fornecem resultados com grande exatidão, porém estes modelos de transferência radiativa necessitam de dados de entrada extremamente precisos e complexos, como o perfil vertical de distribuição de ozônio e vapor de água, perfil de densidade atmosférica e a distribuição vertical e tamanho de aerossóis com suas características de albedo e fator de assimetria ou função de fase entre outros. Os modelos parametrizados de transmitância atmosférica simples, por outro lado, fazem uso de uma pequena quantidade de dados que são obtidos com maior facilidade, e podem ser implementados em pequenos programas computacionais. A partir dos anos oitenta, vários pesquisadores desenvolveram trabalhos propondo modelos parametrizados simples para a caracterização da irradiância solar. Todos estes trabalhos estão fundamentados no conjunto de equações desenvolvido por Leckner (1978). Nesta mesma época, surgem os primeiros programas computacionais destinados à modelagem da irradiância espectral solar na superfície terrestre baseados no método de transmitância atmosférica simples. Pode-se citar o programa SPCTRAL2 (Bird e Riordan, 1986), SUNSPEC (McCluney e Gueymard, 1993), fundamentado em Gueymard (1993) e o programa ESPECTRO (<http://www.solar.ufgrs.br>), originado nos modelos apresentados em Iqbal (1983). A validação destes programas a partir de experimentos revelou várias discrepâncias, principalmente em regiões onde a absorção espectral altera-se rapidamente com a variação do comprimento de onda. Estes modelos simples também apresentam previsões incorretas na região do ultravioleta e para ângulos zenitais elevados.

Em virtude do avanço no conhecimento sobre o comportamento da absorção espectral de um grande número de gases que constituem a atmosfera terrestre desde o trabalho apresentado por Leckner e a obtenção de dados de grande resolução sobre a distribuição da radiação solar, Gueymard (1993) apresentou uma nova metodologia para o desenvolvimento de um programa parametrizado simples para caracterização da irradiância solar. Este modelo inicial foi denominado de SMARTS1 e após uma extensiva revisão foi aperfeiçoado, tornando-se SMARTS2 (Gueymard, 1995). Este trabalho utiliza de dois programas de transferência radiativa. O código SMARTS2 será aplicado para estimativa da irradiância espectral em atmosferas sem a presença de nuvens e o Programa SBDART será empregado para estimativa de irradiância terrestre na presença de nuvens.

2. INSTRUMENTAÇÃO EMPREGADA

A metodologia empregada neste projeto para aquisição de dados de inúmeros parâmetros atmosféricos, bem como para a validação dos resultados previstos, utilizará várias plataformas e instrumentos de medidas. A seguir é feita uma breve descrição destes instrumentos.

2.1 Satélites TERRA e AQUA: sensor MODIS

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites TERRA e AQUA é empregado para assimilação dos dados sobre as características ópticas de aerossóis, quantidade de água precipitável, concentração de ozônio e outros gases traço. Dados fornecidos por este instrumento também serão utilizados na determinação das características físicas da cobertura de nuvens sobre o território brasileiro. Parâmetros como a espessura óptica e o tamanho efetivo de partículas de nuvens, obtidos por este instrumento, fazem parte do banco de dados utilizados na determinação das características radiativas espectrais das nuvens que será empregado nos modelos de transferência radiativa (SMARTS2 e SBDART).

O satélite TERRA, lançado em 18 de dezembro de 1999, a partir do veículo Atlas IIAS, iniciou a coleta de dados em 24 de fevereiro de 2000 e marca o início do programa da NASA denominado EOS (*Earth Observing System*). O satélite TERRA, possui órbita polar hélio-síncrona com altitude média de 705 km, desta forma, o satélite mantém o seu plano de órbita fixo em relação à posição solar para um observador na superfície. A bordo do satélite TERRA além do sensor MODIS, estão presentes os sensores ASTER, CERES, MISR e MOPITT.

O satélite AQUA foi lançado na manhã do dia 4 de maio de 2002 e passou a incorporar a missão EOS da NASA, sendo em conjunto com o satélite TERRA as duas principais plataformas espaciais desta missão. O satélite AQUA foi projetado com foco principal na análise do comportamento do conteúdo de água em suas inúmeras formas no nosso planeta, desde a forma de vapor de água na atmosfera até a forma sólida nas geleiras polares. O AQUA integra a constelação de satélites denominada A-TRAIN, junto com os satélites Aura, PARASOL, Clousat e CALIPSO. Estes satélites possuem órbitas com características semelhantes e passagem equatorial em sequência com diferença de poucos

minutos. Estas plataformas espaciais transportam equipamentos e sensores sofisticados para estudo da atmosfera e clima terrestre, dentre eles espectrorradiômetros de alta resolução, LIDAR (*Light Detection And Ranging*), etc. Assim uma mesma região do planeta pode ser observada por distintos instrumentos a bordo destes satélites simultaneamente.

O satélite AQUA transporta a bordo seis instrumentos, o AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), AMSU (*Advanced Microwave Sounding Unit*), HSB (*Humidity Sounder for Brazil*) desenvolvido pelo INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e que infelizmente parou de operar após fevereiro de 2003, AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer*), CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) além do sensor MODIS. A Fig. 2 mostra o satélite AQUA e seus principais instrumentos durante a fase de preparação para lançamento.



Figura 2 - Foto do satélite AQUA na fase de preparação para o lançamento. Os dois instrumentos CERES são visíveis próximos da base do satélite e estão com a estrutura de proteção. O sensor HSB é visível acima do instrumento CERES à direita. O AIRS está posicionado logo à esquerda. Acima do HSB, pode ser visto o sensor AMSU. O instrumento MODIS está localizado no topo à esquerda. Fonte: Parkinson, C. L. 2003.

O MODIS é um instrumento desenvolvido pelo GSFC (*Goddard Space Flight Center*) na NASA e possui 36 canais espectrais em comprimentos de onda que variam de 0,4 a 14,4 μm com resolução de 12 bits e capacidade de resolução espacial que varia de 250 a 1.000 metros de acordo com canal utilizado.

O processamento dos dados atmosféricos adquiridos pelo instrumento MODIS inicia no GSFC. Neste centro os dados são separados em arquivos brutos (MOD01) que contêm informações de todas as 36 bandas (nível 1B). Em seguida, estes dados são separados em pacotes correspondentes a 5 minutos de imageamento, e então são chamados de MOD02 e MOD03, respectivamente, representando os produtos com as radiâncias calibradas e georreferenciadas.

Os dados dos sensores do instrumento MODIS inicialmente são armazenados em um banco de memória do próprio satélite e periodicamente transmitidos ao solo. Uma vez recebidos, estes dados são separados em pacotes que representam 2 horas de sondagens e enviados ao GSFC para análise posterior. A Fig. 3 apresenta de forma resumida a arquitetura de processamento dos dados atmosféricos fornecidos pelo instrumento MODIS. Os dados iniciais recebidos pelo GSFC são classificados como produtos de nível 1A (MOD01). Estes produtos representam os dados brutos transmitidos pelos 36 sensores espectrais do MODIS, junto com outras informações sobre sensores e dados de posicionamento do satélite. Em seguida, estes dados são separados em grupos de pacotes denominados grânulos com 5 minutos de imageamento (correspondendo cerca de 2000 km de extensão ao longo do rastro orbital) que passam a ser denominados nível 1B, MOD02 e MOD03, representando os produtos com as radiâncias calibradas e georreferenciadas, respectivamente. Os dados dos MOD02 são separados em arquivos com resoluções espaciais de 250 m, 500 m e 1000 m, correspondentes às resoluções espaciais das diferentes bandas espectrais. Ao longo de um dia são gerados aproximadamente 244 grânulos (ou arquivos de dados). À noite apenas os canais de infravermelho são armazenados, deste modo os grânulos MOD02 de 1 km de resolução (17 canais) apresentam maior quantidade de dados em relação aos outros canais. É importante ressaltar que os produtos de nível 1 apresentam um processo de georreferenciamento bastante simplificado. Para um geo-posicionamento com maior precisão, é aconselhável o uso dos dados de nível 2 após a aplicação do produto MOD03 que apresenta resolução espacial de 1 km, coordenadas geodésicas, elevação do solo e geometria de visada.

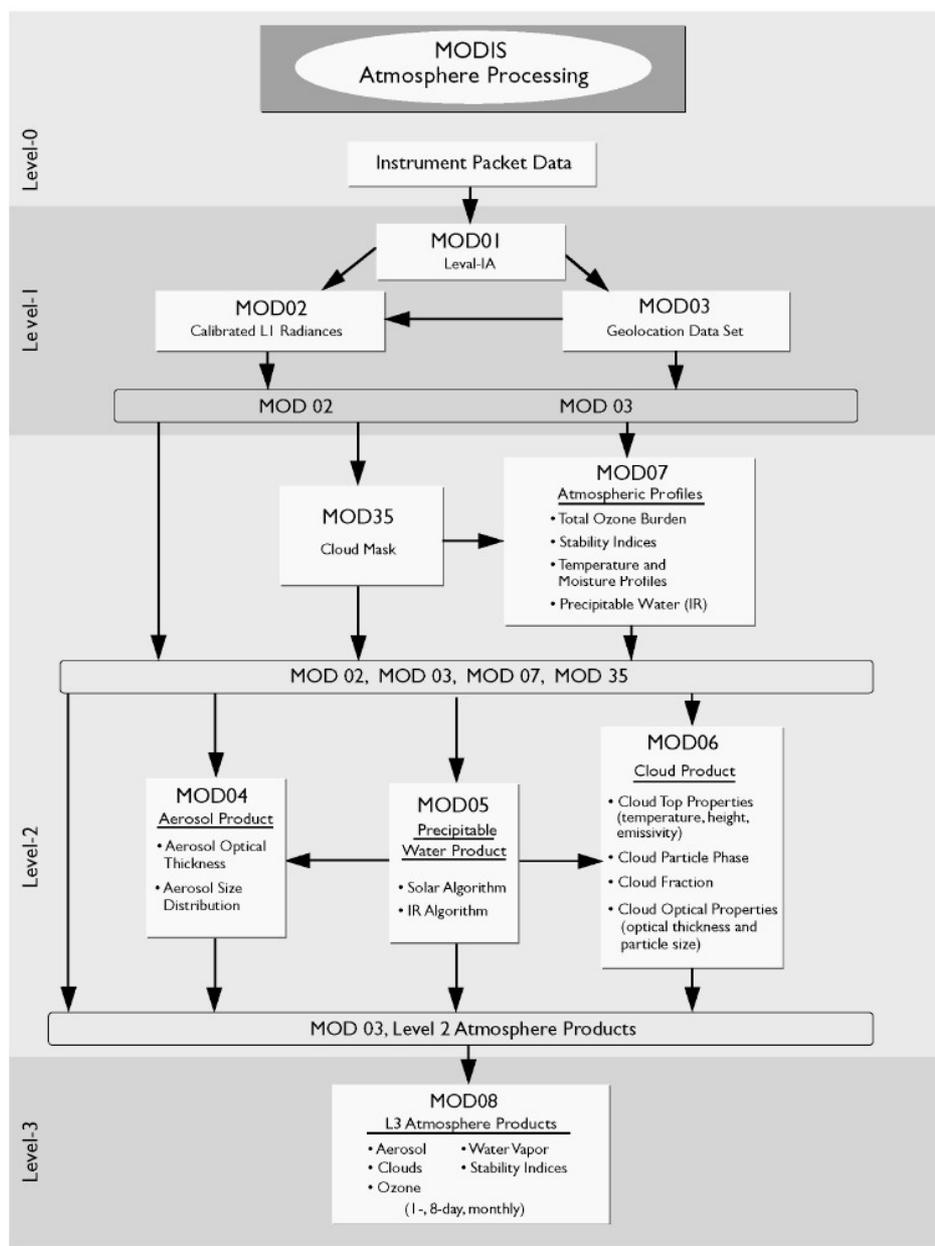


Figura 3 - Diagrama de arquitetura e processamento dos dados do instrumento MODIS. Fonte: Adaptado de King, M.D. et al., 2003.

Com a obtenção do MOD02 e MOD03, são lançados vários algoritmos para geração dos produtos atmosféricos. O algoritmo MOD35 (máscara de nuvens) realiza a separação de perfis atmosféricos de céu limpo e nublado e o MOD06 analisa as propriedades físicas das nuvens. O algoritmo MOD05 fornece informações sobre água precipitável e MOD07 perfis de vários parâmetros e constituintes atmosféricos (O_3 , H_2O , etc.).

Após esta etapa de nível 2 são originados os produtos atmosféricos de nível 3 MOD08 com resolução temporal diária, semanal (8 dias) e mensal. Todos estes produtos são arquivados e distribuídos pelo DAAC (*Goddard Distributed Active Archive Center*) da NASA.

Os produtos MODIS gerados pelo satélite TERRA são identificados pelo prefixo MODxx, os produzidos pelo satélite AQUA levam a identificação MYDxx (MYD06, por exemplo). Os instrumentos MODIS produzem aproximadamente 1,2 TB de dados diários (600 GB em cada satélite), em função desta elevada quantidade de dados, é utilizada a plataforma GIOVANNI (acrônimo para GES-DISC (*Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center*) Interactive Online Visualization AND a Nalysis Infrastructure) (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>) para a aquisição e processamento remoto destes dados.

A utilização dos parâmetros atmosféricos fornecidos pelo sensor MODIS, abre uma nova tendência de obtenção de dados mediante plataformas remotamente situadas com grande resolução espectral e radiométrica. Isto possibilita o estudo da caracterização espectral da irradiância solar na superfície terrestre através da metodologia apresentada. Tal

caracterização somente é mais confiável mediante a aplicação de modelos de transferência radiativa que por sua vez, são dependentes de dados de entrada obtidos de sondagens ou de aproximações. Os dados do instrumento MODIS, constituem uma adequada alternativa para alimentar esses modelos. Uma discussão mais detalhada sobre os produtos MODIS é encontrada em King, M.D. et al., 2003.

2.2 Radiossondagens

Dados fornecidos por radiossondas são utilizados na obtenção do conteúdo integrado de água precipitável. Estas informações serão empregadas para a caracterização do comportamento temporal e espacial deste constituinte atmosférico em algumas cidades brasileiras e também usadas na validação dos dados obtidos por satélites.

Uma radiossonda (também chamada de balão meteorológico) é composta por um conjunto de instrumentos e sensores que medem basicamente a temperatura do ar, umidade relativa e pressão atmosférica, enquanto é elevada com velocidade de ascensão entre 3 a 6 m/s na atmosfera até alturas típicas da ordem de 30 km por um balão inflado com gás hélio ou hidrogênio. O deslocamento da sonda pode ser registrado por uma antena GPS (*Global Position System*) que permite a medida da direção e velocidade do vento no percurso realizado pela sonda.

Os dados observados são enviados através de um pequeno transmissor de rádio para uma estação receptora no solo. Atualmente, as radiossondas modernas podem medir ou calcular indiretamente as seguintes variáveis: pressão atmosférica, altitude, temperatura, temperatura do ponto de orvalho e vento (velocidade e direção), umidade relativa e quantidade de água precipitável. Essas medições são realizadas em inúmeras áreas do globo terrestre, contudo, devido a custos operacionais diversas regiões ainda não apresentam uma cobertura ou periodicidade de lançamento de radiossondas satisfatória.

As radiossondas são lançadas todos os dias aproximadamente às 00h e 12h UTC (hora universal coordenada, ou horário do meridiano de Greenwich). Normalmente o balão é lançado 30 minutos antes da hora padrão para que às 00h e 12h UTC esteja cruzando o nível de 500 hPa, ou seja, altitude de 6 km. Atualmente, a rede de radiossondas no Brasil é composta por 40 estações e os lançamentos são realizados geralmente nos aeroportos e distribuída pelos órgãos operacionais: Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), do Sistema de Vigilância da Amazônia (SIVAM), da Empresa de Infra-estrutura Aeroportuária (INFRAERO), do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (DEPED) e do Centro de Hidrografia da Marinha. Neste projeto são utilizadas informações fornecidas por aproximadamente 30 cidades distribuídas em praticamente todas as regiões do território brasileiro onde são realizados os lançamentos destas radiossondas.

Os dados da maioria destas radiossondas são disponibilizados poucos minutos após o lançamento pelo banco de dados da Universidade de Wyoming, Estados Unidos (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Atualmente esta rede conta com mais de 800 estações ao redor do planeta, sendo, portanto um importante instrumento para estudo do comportamento da atmosfera.

2.3 Rede de radiômetros em superfície

A rede global de radiômetros situados em terra denominada AERONET (*AERosol RObotic NETwork*) neste projeto é utilizada para a caracterização óptica dos aerossóis e quantidade de água precipitável. A rede AERONET foi criada pela agência espacial americana, NASA, na década de 90 e hoje é operada em conjunto com a agência espacial francesa e conta com a colaboração de várias universidades e centros de pesquisas em vários países. Atualmente ela é composta por aproximadamente 800 fotômetros ópticos de superfície. A distribuição destas estações ao redor do planeta é mostrada na Fig. 4. Estes fotômetros ópticos automáticos fornecem dados obtidos em tempo quase real da profundidade óptica dos aerossóis (AOT) em distintos comprimentos de onda, distribuição de tamanho das partículas de aerossóis, e quantidade de água precipitável. A intensidade da componente direta da irradiância solar pode ser obtida a partir dos arquivos de dados utilizados para a obtenção da espessura óptica de aerossóis. As estações da rede AERONET instaladas em locais remotos e sem acesso a internet, realizam a transmissão dos dados coletados através de um sistema de transmissão de dados por meio de *transponders* a bordo de satélites geoestacionários. A rede AERONET emprega radiômetros produzidos pela empresa CIMEL com 8 canais seletivos e mostrado na Fig. 4. Este radiômetro possui um campo de visão de 1,2° e dois detectores para medidas de radiância direta do sol e de radiância difusa da região da auréola e do céu (Holben et al., 1998)

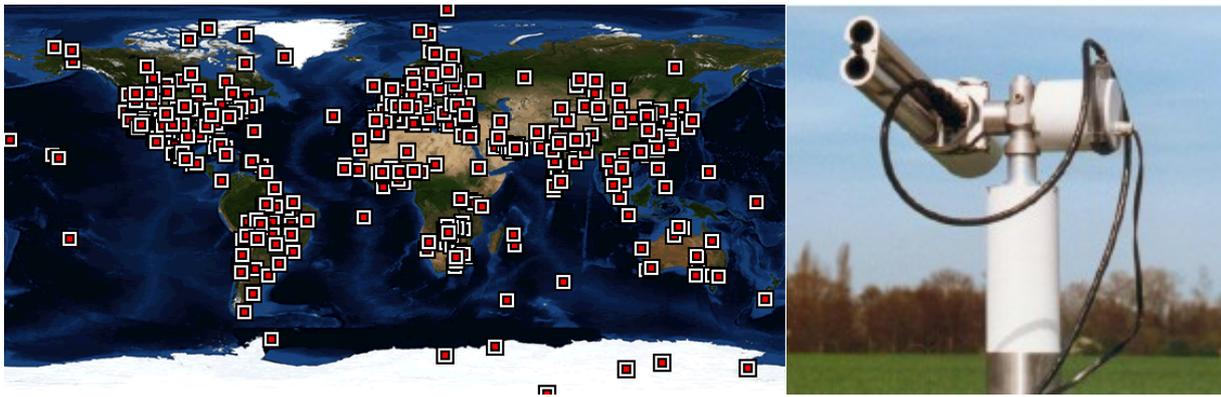


Figura 4 – À esquerda o mapa onde é visto a distribuição das estações da rede AERONET. Na direita a foto do fotômetro solar CIMEL empregado nas estações AERONET. Fonte: www.aeronet.gsfc.nasa.gov.

A rede SolRad-Net (*Solar Radiation Network*) é composta por várias estações na superfície terrestre que se destinam a medida da radiação solar. Estes dados de radiação solar coletados em intervalos de alguns minutos são enviados via satélite e disponibilizados à comunidade científica praticamente em tempo real. Esta rede foi implementada em conjunto com a rede AERONET e os instrumentos de medida da rede SolRad-Net estão instalados nos mesmos sítios. O Brasil teve uma importante participação no desenvolvimento da rede SolRad-Net, sendo que as primeiras estações desta rede mundial foram componentes do projeto LBA-ECO (*Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment*) com foco na região amazônica. As primeiras estações SolRad-Net foram preferencialmente instaladas em regiões que apresentavam regularmente efeitos originados pela queima de biomassa, como a Amazônia e parte Sub-Sahara africana. Os dados de fluxo solar adquiridos pelas estações da rede SolRad-Net são transmitidos a cada meia-hora (algumas estações transmitem em intervalos de uma hora) e tornam-se acessíveis ao público imediatamente como dados não tratados e denominados de dados de nível 1.0. Estes dados posteriormente são validados por meio de um processo de qualificação no GSFC na NASA e são classificados como nível 1.5 e também tornam-se disponíveis à comunidade científica no repositório da rede SolRad-Net. Inicialmente cada estação da rede SolRad-Net foi equipada com dois piranômetros, um modelo Kipp e Zonen CM-21 (www.kippzonen.com) (305-2800 nm) para a medida do fluxo solar total e um instrumento Skye modelo SKE-510 PAR (<http://www.skyeinstruments.com>) com resposta espectral entre 400-700 nm destinado à medida da radiação fotossinteticamente ativa abreviada por PAR (photosynthetically-active radiation). Atualmente estes sensores de radiação PAR foram substituídos pelos piranômetros Kipp e Zonen CM-21 com filtros.

A rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais para o setor de energia) é um projeto desenvolvido e coordenado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). Foi criada para implementação de uma rede de coleta de dados destinada a levantar e melhorar a base de dados sobre os recursos de energia solar e eólica no Brasil. A rede SONDA possui um total de 25 estações, sendo que algumas possuem disponibilidade de dados para um restrito período e outras se encontram em fase de implantação (Martins, 2007). A Fig. 5 apresenta o mapa com a localização das estações da rede SONDA. Algumas destas estações da rede SONDA compartilham o mesmo local de instalação com as estações da rede AERONET, como é visto na Fig. 5 que mostra a estação de referência na cidade de Brasília, DF.

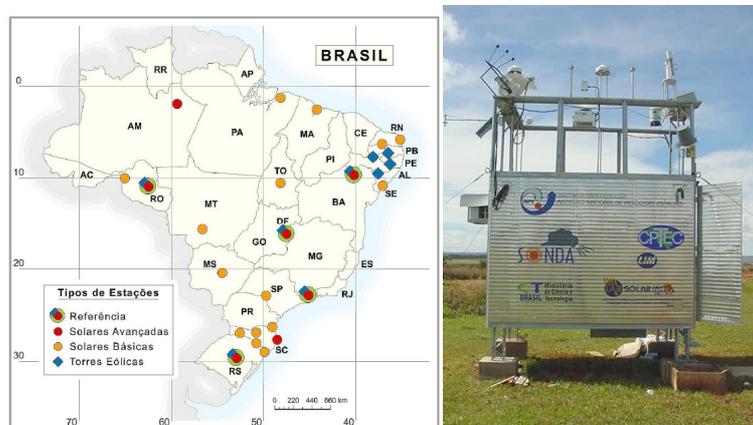


Figura 5 - Mapa com a localização das estações da rede SONDA e foto da Estação de referência na cidade de Brasília, DF. Observam-se os diversos instrumentos solarimétricos da rede SONDA e AERONET. Fonte: INPE/CPTEC.

Instrumentos instalados no Laboratório de Energia Solar da UFRGS, dentre eles piranômetros de banda larga, radiômetros espectrais e espectrorradiômetros também são usados na validação das estimativas de distribuição espectral prevista pelos modelos de transferência radiativa. A Fig. 6 apresenta a plataforma de medidas de radiação solar do Labsol/UFRGS onde são vistos alguns radiômetros utilizados.



Figura 6 - Fotografia da plataforma de medidas de radiação solar do Labsol, UFRGS. Além dos piranômetros é visto um espectrorradiômetro com anel de sombra rotativo.

3. RESULTADOS PRELIMINARES.

Como exemplo de dados obtidos pelas estações da rede AERONET, é mostrado na Fig. 7 os valores médios diários da espessura óptica de aerossóis no comprimento de onda de 675 nm e a quantidade de água precipitável obtida pela estação localizada na cidade de Alta Floresta (long = -56,104, lat = -9,871), durante os meses de abril até dezembro de 2007. A distribuição de frequência da média diária da água precipitável nesta mesma estação também é mostrada na Fig. 7.

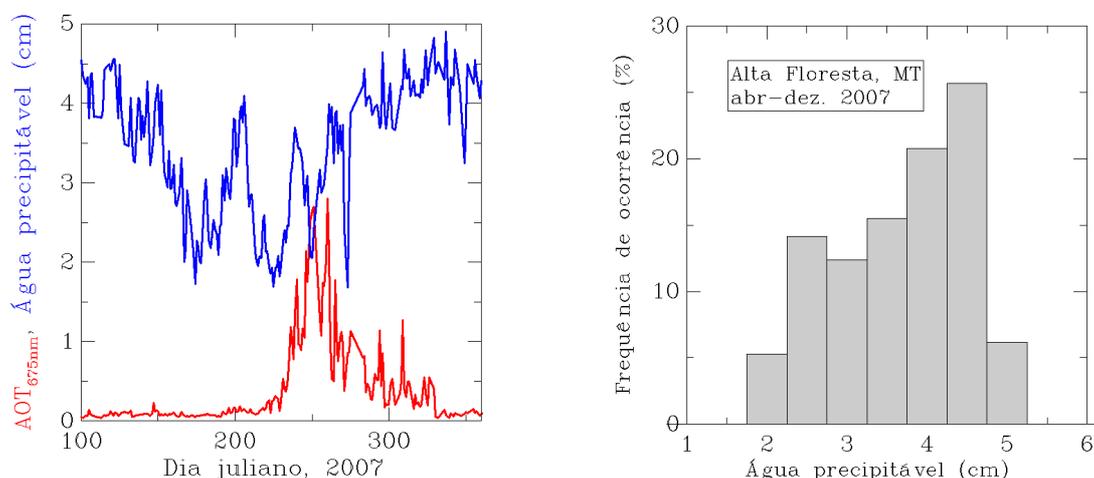


Figura 7 – Amostra de dados obtidos para a estação AERONET de Alta Floresta, MT durante abril e dezembro de 2007. No gráfico à esquerda é observado a espessura óptica de aerossóis em 675 nm (curva vermelha) e quantidade de água precipitável (curva azul). Na direita é mostrada a distribuição de frequência da média diária para a quantidade de água precipitável.

O algoritmo MOD04 do instrumento MODIS fornece características dos aerossóis atmosféricos, e como exemplo de aplicação é mostrado na Fig. 8 o comportamento temporal da espessura óptica de aerossóis sobre o estado do Rio Grande do Sul (grade limitada entre as latitudes 26°- 34° S e longitudes 49° - 57° W) durante os período 2000-2010. Estes dados foram obtidos a partir do produto MOD04 fornecido pelo satélite TERRA. Observa-se um AOT baixo sobre o estado do Rio Grande do Sul ao longo de praticamente todo o ano, exceto durante alguns períodos compreendidos entre os meses de agosto e outubro, época em que ocorrem as queimadas nas regiões centro-oeste e norte. Devido às correntes de vento em altitudes elevadas, este material particulado é transportado até o sul do país.

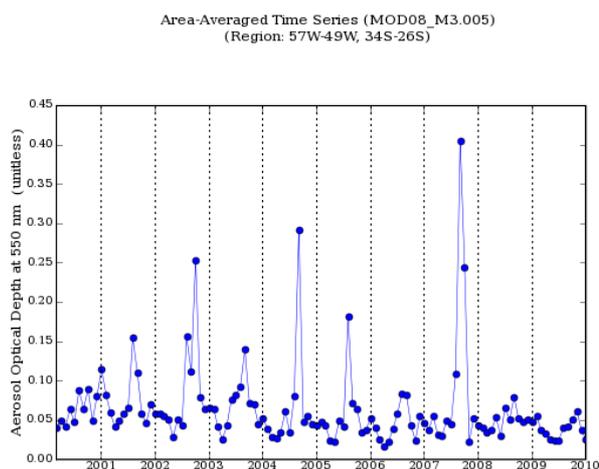


Figura 8 - Série temporal da espessura óptica de aerossóis sobre o estado do Rio Grande do Sul durante o período 2000-2010 obtida através dos dados do produto MODIS MOD04. Observa-se a baixa concentração de aerossóis ao longo deste período, exceto nos meses entre agosto-outubro quando o estado recebe material particulado originado a partir das queimadas localizadas principalmente nas regiões centro-oeste e norte.

Na Fig. 9 é mostrada a quantidade de água precipitável obtida através de radiossondagem durante o mês de julho de 2009 para a cidade de Porto Alegre. No mapa à direita na Fig. 9 é visto o valor da quantidade de água precipitável obtida pelo sensor MODIS a bordo do satélite AQUA no território brasileiro durante os meses de setembro-novembro no ano de 2009.

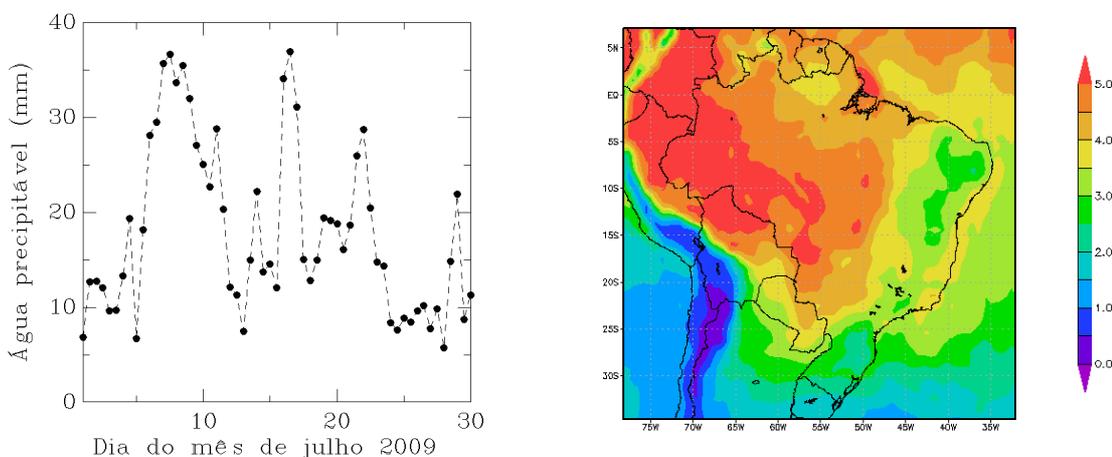


Figura 9 – À esquerda é visualizada a quantidade de água precipitável obtida através de radiossondagem durante o mês de julho de 2009 para a cidade de Porto Alegre. No mapa à direita é visto o valor da quantidade de água precipitável obtida pelo sensor MODIS a bordo do satélite AQUA no território brasileiro durante os meses de setembro-novembro no ano de 2009.

4. CONCLUSÕES

Foi apresentado o projeto em desenvolvimento no Labsol (Laboratório de Energia Solar) da UFRGS para estimativa da distribuição espectral da radiação solar no território brasileiro. Está sendo elaborado um banco de dados sobre as características dos principais parâmetros atmosféricos a partir de informações obtidas por vários instrumentos de medidas a bordo de satélites, radiômetros em superfície além de radiossondagem. Estes parâmetros servem como entrada em dois modelos de transferência radiativa que calculam a distribuição espectral da radiação solar.

Agradecimentos

Grande parte das análises e dados utilizados neste trabalho foi produzida com o sistema *GIOVANNI*, desenvolvido e mantido pela NASA GES DISC e os autores agradecem a disponibilidade desta plataforma. Agradecemos também a Enio Bueno Pereira (CPTEC/INPE) e Brent N. Holben (NASA) pelos seus esforços em desenvolver e manter as estações das redes SONDA e AERONET/SolRad-Net, utilizadas neste trabalho. Este trabalho foi parcialmente financiado com recursos do CNPq pertencentes ao edital MCT/CNPq 27/2007 e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- Bird, R. E. and R. L. Hulstrom, L. J. Lewis, 1983. Terrestrial Solar Spectral Data Sets, *Solar Energy*, Vol 30, p 563.
- Bird, R. E., Riordan, C., 1986. Simple Solar Spectral Model for Direct and Diffuse Irradiance on Horizontal and Tilted Planes at the Earth's Surface for Cloudless Atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25: 87-97
- Dave, J. V., 1975. Direct Solution of the Spherical Harmonics Approximation to the Radiative Transfer Equation for an Arbitrary Solar Elevation. Part I: Theory. *Journal of the Atmospheric Sciences* Volume 32 Issue 4.
- Gueymard, C. 1993. Mathematically integrable parameterization of clear-sky beam and global irradiances and its use in daily irradiation applications. *Solar Energy* 50 5, pp. 385–397
- Gueymard, C. 1995. SMARTS, A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment. Technical Report No. FSEC-PF-270-95. Cocoa, FL: Florida Solar Energy Center.
- Haag, R., 2007. Desenvolvimento de um Radiômetro Espectral e Metodologia para Caracterização do Espectro Solar. Dissertação de Mestrado, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre.
- Haag R., Krenzinger, A. 2008, Validação de uma metodologia para determinação da irradiância espectral solar utilizando um radiômetro espectral, XIV congresso ibérico e IX congresso iberoamericano de energia solar, Vigo, Espanha.
- Holben, B.N., D.Tanre, Y.Kaufman, A.Smirnov, T.Eck I.Slutsker, O.Dubovik, B.Markham, and N.Abuhasan, 1998. Atmospheric aerosol optical properties measured through the NASA Aerosol Robotic Network (AERONET), International Aerosol Symposium, St.Petersburg, Russia, July 6-9.
- Iqbal, M. 1983. An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, Toronto.
- King, M. D., W. Paul Menzel, Yoram J. Kaufman, Didier Tanré, Bo-Cai Gao, Steven Platnick, Steven A. Ackerman, Lorraine A. Remer, Robert Pincus, and Paul A. Hubanks, 2003. Cloud and Aerosol Properties, Precipitable Water, and Profiles of Temperature and Water Vapor from MODIS. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, vol. 41, no. 2, february.
- King, M. D., and Harshvardhan 1986. Comparative accuracy of selected multiple scattering approximations. *J. Atmos. Sci.*, 43, 784–801.
- Kneizys et al., 1980. F.X. Kneizys, E.P. Shettle, W.O. Gallery, J.H. Chetwynd, L.W. Abreu, J.E.A. Selby, R.W. Fenn and R.A. McClatchey, 1980. Atmospheric transmittance/radiance computer code LOWTRAN 5, AFGL-TR-80-00067. U.S. Air Force Environ. Res. Paper No. 697 .
- Leckner, B. 1978. The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface – Elements of a model. *Solar Energy*, 20: 143-150.
- Martins, F. R., Ricardo André Guarnieri, Rafael Carvalho Chagas, Sylvio Luis Mantelli Neto, Enio Bueno Pereira, Eliana Andrade e Celso Thomaz. 2007. PROJETO SONDA – REDE NACIONAL DE ESTAÇÕES PARA COLETA DE DADOS METEOROLÓGICOS APLICADOS AO SETOR DE ENERGIA. I CBENS - I Congresso Brasileiro de Energia Solar ABENS - Associação Brasileira de Energia Solar Fortaleza, 8 a 11 de abril de 2007
- McCluney R., Gueymard C., 1993. Selecting windows for South Florida residences. Rep. FSEC-CR-577-93, Florida Solar Energy Center, Cocoa, FL.
- Myers, D.R., 2003. Solar Radiation Modeling and Measurements for Renewable Energy Applications: Data and Model Quality, NREL/CP-560-33620.
- Parkinson, C.L., 2003. Aqua: An Earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens.*, 41(2), 173-183
- Ricchiazzi, P., S. Yang, C. Gautier, and D. Sowle, 1998. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79:2101–2114.

ESTIMATION OF SPECTRAL SOLAR RADIATION IN BRAZIL USING RADIATIVE TRANSFER MODELS AND MULTI-INSTRUMENTAL ANALYSIS: SATELLITES, SURFACE RADIOMETERS AND RADIOSONDES

Abstract. *This work presents a project in development in the Labsol (Laboratory of Solar Energy) in the Federal University of Rio Grande do Sul. This study intends to characterize the spectral distribution of the solar irradiance on the Brazilian territory through data obtained from satellites, surface radiometers and radiosondes. This data forms a database on atmospheric parameters that alter the spectral characteristics of the solar irradiance. Two computational models of atmospheric radiative transfer, the SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) and SMARTS2 (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) adopts this database as input parameters to produce estimates of intensity and spectral distribution of the solar radiation on the surface. The objective of this project is determinate the characteristics of this spectral distribution in different regions of the country and his influence on solar energy systems.*

Key words: *Solar Radiation, Spectral Distribution, Radiative Transfer Models, Satellite, Radiometers.*