



Influência de queimadas na redução da incidência de radiação solar observada por estações do Projeto SONDA no território brasileiro.

Rodrigo Brackmann (1), Daniel Vinícius Fiorin (1), Fernando Ramos Martins (2), Nelson Jorge Schuch (1), Marcio Ceconi (1), Enio Bueno Pereira (2).

(1) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/INPE-MCT em colaboração com o Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT-UFSM, Santa Maria, RS, Brasil.

(2) Divisão de Clima e Meio Ambiente – DMA/CPTEC/INPE – MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

During the biomass burning process several aerosol particles are emitted to the atmosphere. These particles attenuate the global solar radiation that reaches the Earth's surface. Concerning it, this work, developed in the Laboratory of Renewable Energy Resources of the Southern Regional Space Research Center (LRER/CRS/INPE-MCT), aims the study of the relationship between the Aerosol Optical Thickness (AOT) with the decreasing of the incident global solar radiation in cloudless sky days. Global and diffuse solar radiation data were collected by the SONDA stations of Cuiabá – MT, Campo Grande – MS, Petrolina – PE and by the AERONET station of Alta Floresta – MT. AOT data were available by the Aerosol Robotic Network (AERONET). Through regressions analysis, linear and exponential models were developed to correlate the cloudiness index (Kt) with the AOT values for the stations of Alta Floresta and Cuiabá. For the Alta Floresta site, the exponential model showed better agreement with the measured values than the linear model. However, for the Cuiabá site, the correlation coefficients obtained through both models were equals. In the near future, the data base will be extended to improve the models reliability, and mixed regressions will be tested.

Introdução

O mundo se depara com um crescimento acelerado do consumo de energia, necessário para sustentar o atual desenvolvimento socioeconômico. Além disso, o esgotamento dos recursos hídricos e a queima de combustíveis fósseis têm causado danos irreversíveis ao meio-ambiente, comprometendo a qualidade de vida das gerações futuras. Estes fatores vêm levando o homem a pesquisar, desenvolver e utilizar fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ao meio-ambiente (Martins et al., 2004).

Neste contexto, os recursos energéticos solares e eólicos se apresentam como alternativas limpas, não danosas ao meio-ambiente e de caráter renovável. No entanto, a atração de investimentos e a realização de ações efetivas ao desenvolvimento tecnológico e científico de novas

fontes energéticas requerem a realização de estimativas da disponibilidade e distribuição dos seus recursos ao longo do território nacional, além do estabelecimento de um banco de dados acessível e confiável (Pereira et al., 2006).

No Brasil, o CPTEC/INPE – MCT desenvolve o Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais voltado para o setor de energia) com o intuito de realizar medidas solarimétricas, eólicas e de variáveis climatológicas necessárias ao estabelecimento do referido banco de dados. Para tanto, o Projeto configurou, instalou e opera uma rede de estações de superfície espalhadas pelo território nacional, utilizando equipamentos de primeira linha para a aquisição dos dados (Martins et al., 2007).

As principais fontes de incertezas nos valores de irradiação solar na superfície estimados por modelos matemáticos são resultados da variabilidade geográfica dos aerossóis na atmosfera juntamente com incertezas sobre a variabilidade da cobertura de nuvens (Pinker and Laszlo, 1989). Desta forma, informações sobre as propriedades ópticas e a distribuição geográfica dos aerossóis atmosféricos exercem grande influência na confiabilidade das estimativas de irradiação solar (Box et al., 1996).

Aerossol é o nome atribuído às partículas sólidas ou líquidas relativamente estáveis suspensas em um meio gasoso. Estas partículas podem ser oriundas de fontes naturais ou emitidas por atividades antropogênicas, como é o caso das queimadas, e possuem a propriedade de absorver e/ou refletir a radiação solar, podendo atenuar a radiação solar global incidente na superfície terrestre. Adicionalmente os aerossóis influenciam fortemente a química da atmosfera, o clima, a visibilidade e a saúde das pessoas expostas às altas concentrações destas partículas (Artaxo et al., 2006).

À quantidade total de aerossóis presente na coluna atmosférica integrada é dado o nome de espessura ótica de aerossóis (AOT, da sigla em inglês). No Brasil, ocorre uma grande variação sazonal da espessura ótica dos aerossóis, em virtude do aumento do número de queimadas nas estações secas, principalmente nos meses de agosto e setembro (Eck et al., 2003; Procópio et al., 2003; 2004). É nesta época que a série temporal das medidas de AOT apresenta picos acentuados.

O presente trabalho, desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul

de Pesquisas Espaciais (LRER/CRS/INPE – MCT), em Santa Maria – RS, tem por objetivo o estudo da relação existente entre a ocorrência de focos de queimadas e o déficit da radiação solar global incidente na superfície terrestre em dias de céu claro, através da análise de medidas de AOT e radiação solar global. Este estudo contribui para um melhor entendimento da influência dos aerossóis sobre a radiação solar, favorecendo o aperfeiçoamento dos modelos de transferência radiativa, o que resulta em uma maior precisão na avaliação da disponibilidade dos recursos de energia solar no Território Brasileiro.

Metodologia

Os dados de radiação solar utilizados neste trabalho foram coletados nas estações SONDA de Petrolina – PE (Lat.: 09° 04' 08" S Lon.: 40° 19' 11" O), Campo Grande – MS (Lat.: 20° 26' 18" S Lon.: 54° 32' 17" O) e Cuiabá – MT (Lat.: 15° 33' 19" S Lon.: 56° 04' 12" O). Dados de radiação também foram adquiridos junto à rede AERONET através do endereço eletrônico <http://solrad-net.gsfc.nasa.gov/> para as cidades de Alta Floresta – MT (Lat.: 09° 52' 15" S Lon.: 56° 06' 14" O) e Cuiabá a fim de expandir o período de dados utilizados.

As estações SONDA são dotadas de Piranômetros CM 21 (Kipp & Zonen), que realizam medidas de irradiância solar global na faixa espectral de 0,3 a 2,8 μm e Piranômetros CM 22 (Kipp & Zonen) para a realização de medidas de irradiância solar difusa na faixa de 0,2 a 3,6 μm. Estes sensores medem valores de irradiação a cada segundo, sendo armazenado o valor médio de cada minuto, totalizando, dessa maneira, 1440 medidas diárias. A rede AERONET realiza as medições de radiação solar global utilizando o mesmo Piranômetro CM 21 utilizado no Projeto SONDA.

A seleção dos dias de céu claro, necessária para a eliminação das incertezas provenientes da influência da nebulosidade sobre a radiação solar, é realizada através da análise e qualificação dos dados de radiação solar global e difusa.

As medidas de irradiância solar global e difusa são plotadas temporalmente ao longo de cada dia, obtendo-se as curvas diárias de radiação solar global e difusa. Um dia de céu claro é caracterizado por uma curva suave de traço contínuo, com simetria perfeita e com pico máximo próximo ao meio-dia do horário solar local, conforme ilustra a Figura 1. Os dias cujas curvas diárias de irradiância solar global e/ou difusa apresentam variações abruptas, como ilustrado na Figura 2, são excluídos da análise. Os dados de radiação obtidos pela rede AERONET passaram por essa seleção, porém foram analisadas apenas as curvas diárias de radiação solar global, pois não se dispunha de dados de irradiância solar difusa provenientes deste banco de dados. Os dias selecionados tiveram seus respectivos índices de nebulosidade (Kt) e parâmetros de radiação difusa (Kd) calculados de acordo com Iqbal (1983), através das Equações 1 e 2, respectivamente.

$$K_t = \frac{H}{H_0} \tag{1}$$

$$K_d = \frac{H_d}{H_0} \tag{2}$$

onde H é a integral diária de radiação solar global, H_d é a integral diária de radiação solar difusa, e H₀ representa a integral diária de radiação incidente no topo da atmosfera (TOA, da sigla em inglês), sendo que H₀ é obtido de acordo com Iqbal (1983) a partir da seguinte equação:

$$H_0 = \frac{I_{sc}}{\pi} \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 [h_0 \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(h_0)] \tag{3}$$

onde I_{sc} é a constante solar, convencionada em 1368 W.m⁻², (d_m/d)² é o fator de correção de excentricidade, d_m é a distância média entre o Sol e a Terra, d é distância entre o Sol e a Terra para um dia específico, φ representa a latitude do sítio observado, δ é a declinação solar e h₀ é o ângulo horário.

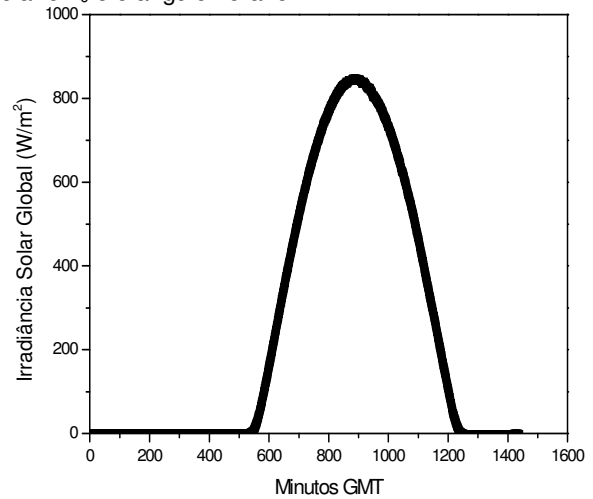


Figura 1 – Curva diária de radiação solar global obtida em 18/07/05 (dia de céu claro) na estação de referência SONDA de Petrolina – PE.

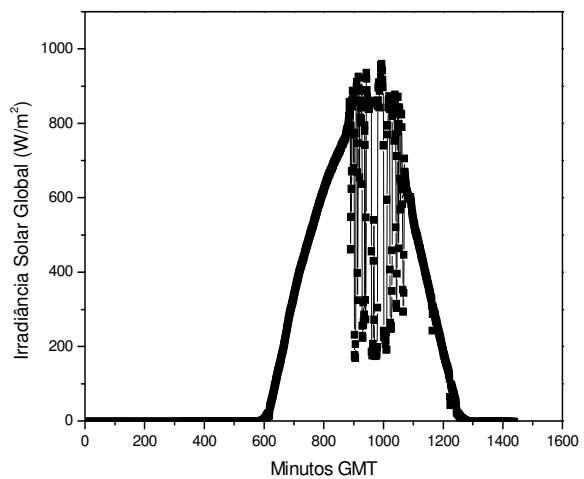


Figura 2 – Curva diária de radiação solar global obtida no dia 12/05/07 na estação SONDA de Campo Grande - MS.

Os dados de espessura óptica de aerossóis foram obtidos do sítio da *NASA Goddard Space Flight Center*, que em colaboração com outras instituições internacionais implantou uma rede de radiômetros solares e terrestres em todo globo, a AERONET (Aerosol Robot Network) cujo objetivo é monitorar e caracterizar as propriedades ópticas das partículas de aerossóis provenientes de diferentes fontes (Holben et al., 1998). Os dados coletados contemplam a média diária da espessura óptica de aerossóis.

Os valores diários de K_t referentes aos dias selecionados foram diagramados em função das médias diárias de espessura óptica de aerossóis nos comprimentos de onda de 500 (675 para a estação de Alta Floresta), 870 e 1020 nm para as diferentes estações coletoras de dados. Em seguida, através de análises de regressões lineares e exponenciais, foram desenvolvidos modelos matemáticos que relacionam o índice de nebulosidade à espessura óptica de aerossóis em diferentes comprimentos de onda para as estações de Alta Floresta e Cuiabá.

Adicionalmente as médias diárias de AOT coletadas nas estações estudadas foram diagramadas ao longo do tempo, obtendo-se as séries temporais de AOT. Essas séries são importantes, pois facilitam a visualização da variação dos valores de AOT em um determinado período, além de permitirem uma melhor identificação dos picos de AOT.

Nos dias em que se verificaram picos nos valores de AOT, foram realizadas investigações qualitativas das trajetórias retroativas das massas de ar num período de sete dias anteriores ao do referido pico a fim de se verificar se realmente houve o transporte de particulados oriundos de queimadas para a região dos sítios de coleta de dados. Um estudo de caso relacionando as queimadas a um pico nos valores de AOT será apresentado neste trabalho

Os dados de queimadas, fornecidos pelo CPTEC/INPE (<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas>), contemplam o número diário e a localização dos focos de queimadas ocorridos no Brasil registrados pelas imagens termais dos satélites meteorológicos NOAA, quatro vezes ao dia, do GOES, oito vezes ao dia, do TERRA e do AQUA, ambos duas vezes por dia.

Resultados

Os períodos de dados de radiação solar global e difusa coletados nas estações SONDA e AERONET e o número de dias de céu claro para cada uma delas são apresentados na Tabela 1.

Os modelos que relacionam o fator K_t e a espessura óptica de aerossóis, desenvolvidos no LRER/CRS/INPE – MCT, para as estações de Alta Floresta e Cuiabá são apresentados nas Tabelas 2, 3, 4 e 5 juntamente com os respectivos coeficientes de correlação obtidos e o desvio estatístico RMSE (*root mean square error*).

Adicionalmente, um estudo de caso foi realizado para a estação de Alta Floresta. Diagramou-se a série temporal das médias diárias de espessura óptica de aerossóis registradas nesta estação em diferentes comprimentos de onda para o mês de setembro de 2005, conforme

ilustrado na Figura 7. O dia que apresentou o maior pico nos valores de AOT foi 18/09/2005.

A fim de se verificar a razão da ocorrência deste pico, optou-se por verificar os focos de queimadas ocorridos no Brasil no período de 11 a 18 de setembro de 2005. Estes dados, disponibilizados pelo CPTEC/INPE – MCT contemplam as imagens termais de todos os satélites disponíveis conforme a Figura 8. Na Figura 9, estão ilustradas as trajetórias retroativas das massas de ar para o mesmo período em diferentes altitudes.

Tabela 1 - Informações relativas à seleção de dias de céu claro nas estações SONDA e AERONET.

Estação	Período de dados analisados	Dias de céu claro
Campo Grande-MS (SONDA)	Abril a Junho de 2007	13
Cuiabá – MT (SONDA E AERONET)	2001 - 2007	84
Petrolina – PE (SONDA)	Julho de 2004 a Maio de 2005; 2007	36
Alta Floresta – MT (AERONET)	2000 - 2008	99

Os dias selecionados tiveram seus respectivos índices de nebulosidade (K_t) diagramados em função da média diária da espessura óptica de aerossóis conforme ilustram as Figuras 3, 4, 5 e 6.

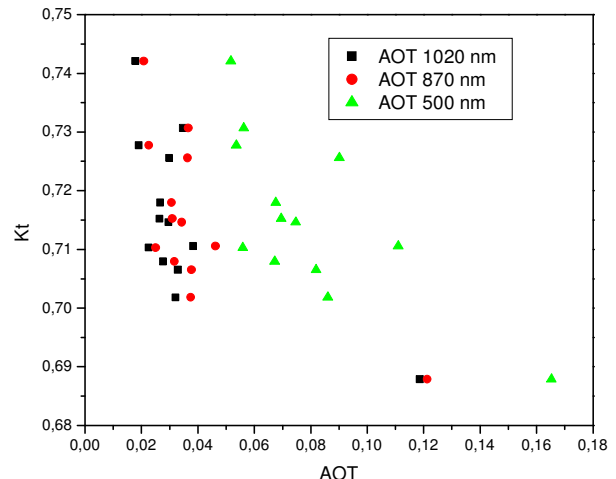


Figura 3 – Índice de nebulosidade em função da espessura óptica de aerossóis em Campo Grande – MS.

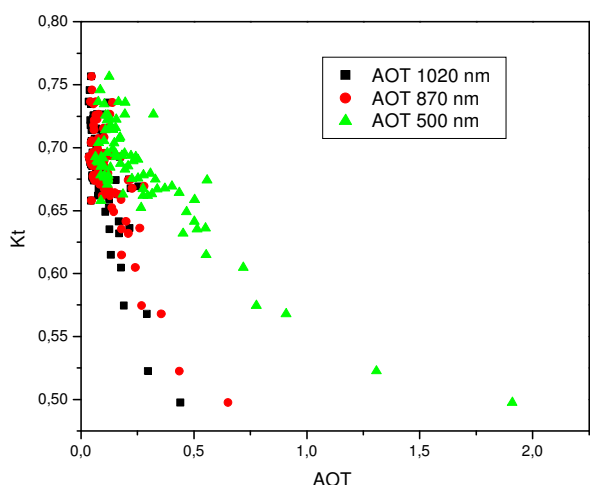


Figura 4 – Relação entre Kt e espessura ótica de aerossóis para os comprimentos de onda de 500, 870 e 1020 nm em Cuiabá – MT.

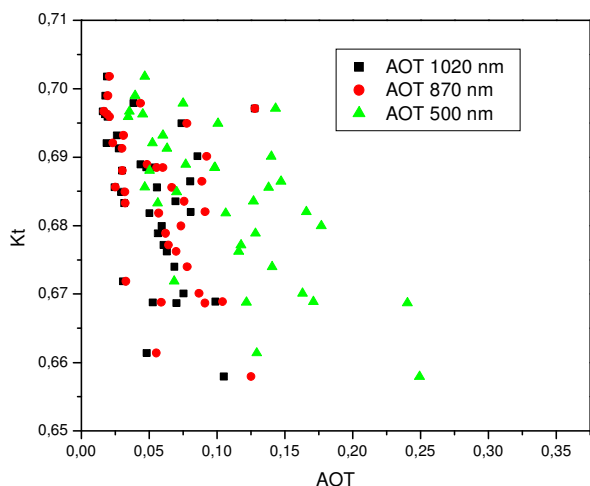


Figura 5 – Kt em função de AOT para Petrolina – PE.

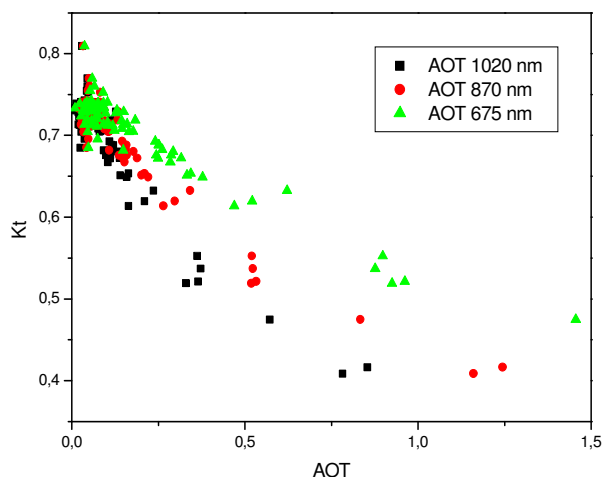


Figura 6 – Relação entre Kt e AOT para Alta Floresta – MT.

Tabela 2 – Equações, coeficientes de correlação e RMSE obtidos através de ajustes lineares aos dados de Alta Floresta – MT.

AOT (nm)	Modelo Linear	R ²	RMSE (%)
AOT 1020	$Kt = -0,46541 \cdot AOT + 0,74541$	0,89	3,35
AOT 870	$Kt = -0,31703 \cdot AOT + 0,74208$	0,9	3,13
AOT 675	$Kt = -0,17935 \cdot AOT + 0,73803$	0,91	2,95

Tabela 3 – Modelos exponenciais desenvolvidos com a utilização de dados da estação de Alta Floresta.

AOT (nm)	Modelo Exponencial	R ²	RMSE (%)
AOT 1020	$Kt = 0,22765 + 0,53188 \cdot e^{-AOT/0,73729}$	0,91	2,94
AOT 870	$Kt = 0,28981 + 0,46815 \cdot e^{-AOT/0,87037}$	0,94	2,48
AOT 675	$Kt = 0,28935 + 0,46132 \cdot e^{-AOT/1,55044}$	0,95	2,3

Tabela 4 - Equações e coeficientes de correlação obtidos através de ajustes lineares aos dados de Cuiabá.

AOT (nm)	Modelo Linear	R ²	RMSE (%)
AOT 1020	$Kt = -0,48695 \cdot AOT + 0,72802$	0,61	3,96
AOT 870	$Kt = -0,37184 \cdot AOT + 0,72439$	0,67	3,65
AOT 500	$Kt = -0,13468 \cdot AOT + 0,71629$	0,74	3,23

Tabela 5 – Modelos exponenciais desenvolvidos com a utilização de dados da estação de Cuiabá.

AOT (nm)	Modelo Exponencial	R ²	RMSE (%)
AOT 1020	$Kt = -112,6611 + 113,389 \cdot e^{-AOT/234,083}$	0,61	3,96
AOT 870	$Kt = -15,107 + 15,831 \cdot e^{-AOT/42,66}$	0,67	3,65
AOT 500	$Kt = 0,18162 + 0,54 \cdot e^{-AOT/3,212}$	0,74	3,18

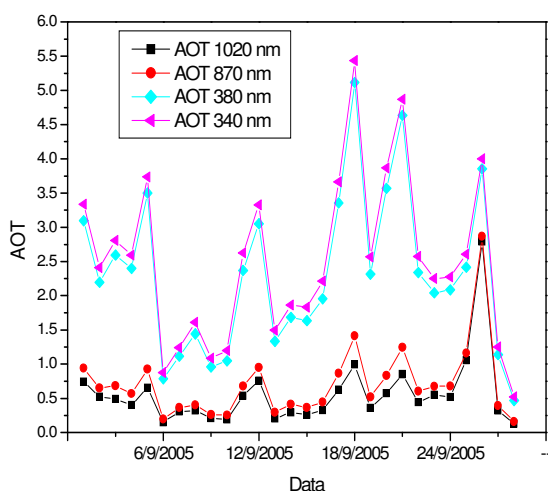


Figura 7 – Série temporal das médias diárias de AOT registradas na estação de Alta Floresta no mês de setembro de 2005.

Pela análise da Figura 8, pode-se perceber que a maior parte dos eventos de queimadas se concentrou na Região Centro - Norte do Brasil durante esse período. A Figura 9 revela que as massas de ar que chegaram no dia 18/09/2005 à estação de Alta Floresta se deslocaram pela Região Centro-Norte nos dias antecedentes.

Conclusões

A análise dos dados de radiação solar medidos nas estações SONDA e AERONET e a aquisição de dados de aerossóis permitiram concluir que realmente um aumento na espessura ótica dos aerossóis atmosféricos (AOT) resulta em uma diminuição do índice de nebulosidade (Kt). Para a estação de Alta Floresta, pôde-se perceber que o modelo exponencial desenvolvido para relacionar estas variáveis se ajustou melhor aos dados em relação ao modelo linear. Em contrapartida, no caso de Cuiabá, os dois modelos gerados apresentaram os mesmos coeficientes de correlação. O desvio estatístico RMSE calculado sempre assumiu um valor igual ou menor para os modelos exponenciais em relação aos lineares.

Através do estudo de caso apresentado, verificou-se que provavelmente o pico nos valores de AOT, determinado no dia 18/09/2005 na estação de Alta Floresta, está relacionado à ocorrência de queimadas visto que as massas de ar se deslocaram pela Região Centro-Norte, onde foi registrado o maior número de focos de queimadas neste período, antes de chegarem à estação. Na continuidade deste trabalho, será ampliada a base de dados, visando uma maior confiabilidade dos modelos desenvolvidos, e o desenvolvimento de novos modelos, inclusive modelos mistos que relacionem o fator Kt à espessura ótica de aerossóis.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP/MCT e à Petrobrás pelo financiamento do Projeto SONDA (Processo nº. 22.01.0569.00) e ao Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa.

Referências

- Martins, F.R, Pereira, E.B., Echer, M.P.S., 2004. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário – o Projeto Swera. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 2, p. 145-159.
- Pereira, E. B., Martins, F.R., Abreu S. L., Rüther, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar, São José dos Campos, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2006. (disponível em www.cptec.inpe.br/sonda).
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., Pereira, E. B., Mantelli, S., Chagas, R. C., Thomaz, C., Andrade, E. Projeto SONDA - Rede Nacional de Estações para a coleta de dados meteorológicos aplicados ao setor de energia. In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007, Fortaleza. Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2007.
- Pinker, R.T., Laszlo, I., 1989. Derivation of surface solar radiation on a continental scale with the ISCCP B3 data. *IRS_88 Current Problems*, 272–274.
- Box, M.A., Beck, S., Trautmann, T., 1996. Computational techniques to incorporate aerosol variability in climate models. *J. Geophys. Res.* 101 (D14), 19293–19297.
- Artaxo, P., Oliveira, P. H., Lara, L.H., Pauliquevis, T.M., Rizzo, L.V., Junior, C.P., Paixão, M.A., Longo K.M., Freitas, S. e Correia, A.L. 2006. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.21, n.3a, 168-22, 2006.
- Eck, T. F.; Holben, B. N.; Reid, J. S.; O’neill, N. T.; Schafer, J.; Dubovik, O.; Smirnov, A.; Yamasoe, M.A.; Artaxo, P. High aerosol optical depth biomass burning events: a comparison of optical properties for different source regions. *Geophysical Research Letters*, v.30, n.20, p.2.035-2.048, 2004. doi: 10.1029/2003GL017861.
- Procopio, A. S.; Remer, L. A.; Artaxo, P.; Kaufman, Y. J.; Holben, B. N. Modeled spectral optical properties for smoke aerosols in Amazonia. *Geophysical Research Letters*, v.30, n.24, p.2.265–2.270, 2003. doi: 10.1029/2003GL018063.
- Procopio, A. S.; Artaxo, P.; Kaufman, Y. J.; Remer, L. A.; Schafer, J. S.; Holben, B. N. Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. *Geophysical Research Letters*, 31, L03108–L03112, 2004. doi:10.1029/2003GL018646.
- Iqbal, M. An Introduction to Solar Radiation, Toronto, Academic Press Canada, 390p., 1983.
- Holben, B.N.; Eck, T. F.; Slutsker, I.; Tanre, D.; Buis, J. P.; Setzer, A.; Vermote, E.; Reagan, J. A.; Kaufman, Y. J.; Nakajima, T.; Lavenu, F.; Jankowiak, I.; Smirnov, A. AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of the Environment*, v.66, p.1–16, 1998.

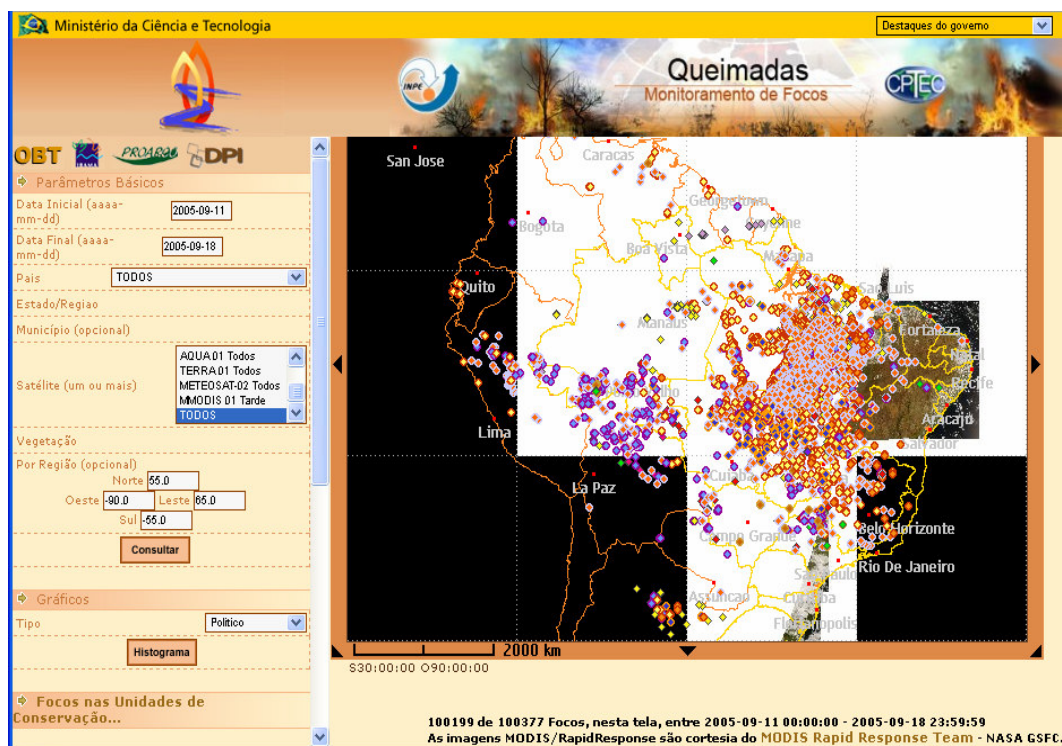


Figura 8 – Focos de queimadas registrados no território brasileiro pelos satélites disponibilizados pelo CPTEC/INPE – MCT no período de 11 a 18 de setembro de 2005.

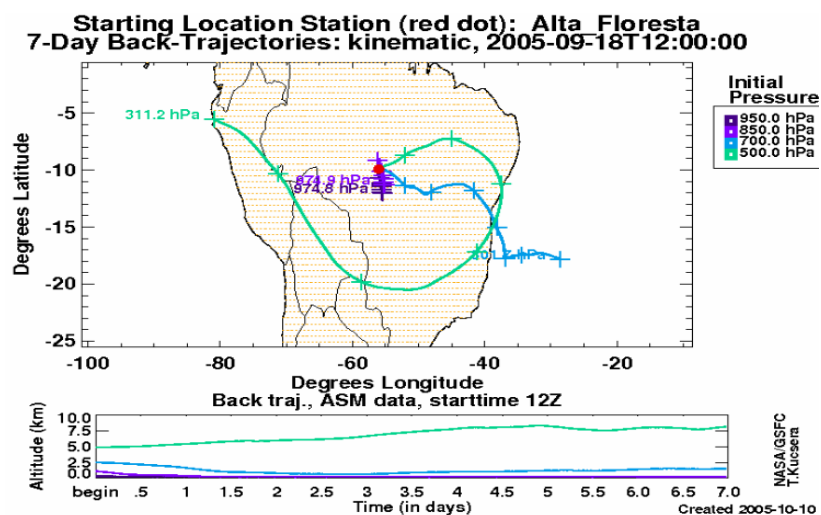


Figura 9 – Trajetórias retroativas das massas de ar em diferentes altitudes no período de 11 a 18 de setembro de 2005.