

ESTUDO DA VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA PROFUNDIDADE ÓPTICA DO AEROSSOL OBTIDA COM O MODIS SOBRE A REGIÃO AMAZÔNICA

VINÍCIUS ROGGÉRIO DA ROCHA, MARCIA AKEMI YAMASOE

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), São Paulo, SP, Brasil

viniroger@model.iag.usp.br, akemi@model.iag.usp.br

Recebido Agosto de 2012 - Aceito Setembro de 2012

RESUMO

Realizou-se um estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol (AOD) e sua homogeneidade espacial com o objetivo de descrever e quantificá-la em cinco pontos da região amazônica, dos quais quatro sofrem com emissões de queimadas, utilizando uma longa série de dados. Os dados foram obtidos a partir do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites Terra e Aqua, entre 2000 e 2011. Foi realizada análise da homogeneidade espacial dos valores de AOD e de sua variabilidade diurna, assim como foram calculados os valores médios anuais e mensais de AOD e definidos períodos de altos valores para os sítios do arco do desmatamento. Observou-se que a AOD variou pouco com o aumento da área, indicando que as camadas de aerossol são bastante misturadas. As flutuações nas médias anuais de AOD apresentaram comportamento semelhante nos sítios do arco do desmatamento, sendo que Manaus apresentou influências desse padrão em anos mais secos e São Gabriel da Cachoeira apresentou apenas valores baixos (AOD entre 0,1-0,2). O número de dias com AOD maior no período da tarde é consideravelmente maior, provavelmente pelas queimadas ocorrerem principalmente à tarde. Os períodos de altos valores (AOD entre 1-3) começaram no fim da estação seca e terminaram no início da estação chuvosa, sendo a duração estimada entre 69 e 79 dias.

Palavras-chave: profundidade óptica do aerossol, queimadas na Amazônia, sensoriamento remoto da atmosfera.

ABSTRACT: STUDY OF THE SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF THE AEROSOL OPTICAL DEPTH OBTAINED WITH MODIS OVER THE AMAZON REGION

A study of the temporal and spatial variability of the aerosol optical depth (AOD) and its spatial homogeneity was performed in order to describe and quantify the AOD at five locations at the Amazon region, four of them present strong influence of biomass burning emission, using a long time series of data. Data were obtained from the MODIS sensor (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), onboard the Terra and Aqua satellites, from 2000 to 2011. Spatial analysis was performed to verify the homogeneity of the AOD values. Mean AOD values were calculated for distinct area sizes and a study of the diurnal and annual variability was performed. Mean AOD presented little variation with increasing area, indicating that the aerosol layers are very well mixed. Annual AOD average fluctuations showed similar behavior in the sites of the deforestation arc. A similar behavior was observed in Manaus only during drier years, and São Gabriel da Cachoeira presented only low AOD values, meaning that this portion of the Amazon region is not affected by smoke plumes (AOD between 0,1-0,2). Comparing morning and afternoon data periods, the number of days with higher AOD values in the afternoon was higher, probably because burnings occur mainly during the afternoon. Periods of high AOD values (AOD between 1-3) lasted from the end of the dry season to the beginning of the rainy season, and the estimated duration was between 69 and 79 days.

Keywords: aerosol optical depth, Amazon burning, atmosphere remote sensing.

1. INTRODUÇÃO

Os aerossóis afetam o clima de modo direto e indireto. No processo direto, a camada de aerossóis absorve a radiação solar, gerando um aquecimento nessa camada de ar e resfriando nas inferiores, assim como espalhando parte da radiação solar de volta ao espaço. Desse modo, a radiação incidente em superfície diminui e pode causar alterações no perfil termodinâmico da atmosfera, modificando os fluxos de calor sensível e latente e de CO₂, o processo de formação de nuvens, altura da camada limite, taxas de evaporação e os padrões de circulação regional (Procópio et al., 2004). Ocorre um aumento da fração difusa da radiação solar (Yamasoe e Rosário, 2009), que, particularmente na região espectral fotossinteticamente ativa, pode aumentar a capacidade de fotossíntese, pois a radiação penetra de modo mais eficiente no dossel e atinge folhas que estariam sombreadas (Yamasoe et al., 2006). O processo indireto está relacionado ao fato de que o aerossol também pode atuar como núcleo de condensação de nuvens, alterando propriedades das nuvens como refletância, tempo de vida, fase, tamanho e precipitação (Koren et al., 2007; Rocha, 2011).

O aumento na concentração de aerossóis atmosféricos provoca uma alteração no saldo de radiação, denominada forçante radiativa do aerossol. Para os estudos envolvendo os aerossóis da Amazônia, é necessário conhecer sua distribuição temporal e espacial em uma longa série de dados. Neste trabalho, é realizado um estudo da variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol (AOD) e sua homogeneidade espacial, necessário para avaliar o impacto radiativo das partículas de aerossol de queimadas. A região estudada é a amazônica, que possui uma época de seca com intensas queimadas, e foram escolhidas cinco localidades para o estudo, que possuem torres micrometeorológicas: Ilha do Bananal (9°49,268'S; 50°08,922'O), que fica em área de transição entre floresta tropical e cerrado, e permanece inundada durante a estação úmida; Reserva Biológica do Jaru (10°04,706'S; 61°56,009'O), que é coberta por floresta primária, porém sofre impacto das queimadas locais e de transporte; São Gabriel da Cachoeira (0°12,740'N; 66°45,884'O), região que sofre muito pouco impacto de queimada e ainda apresenta vegetação de floresta tropical primária intacta; Sinop (11°24,750'S; 55°19,500'O): transição entre floresta tropical e cerrado; Manaus (2,60907°S; 60,20917°O), região distante de grandes queimadas, porém com terreno significativamente urbanizado nas proximidades. As localidades da Ilha do Bananal (BAN), Sinop (SIN) e Rebio Jaru (JRO) fazem parte do chamado Arco de Desflorestamento, que é a região da Amazônia que faz fronteira com outros biomas e é alvo de intenso desmatamento e queimadas. São Gabriel da Cachoeira (SGC) e Manaus (MAN) estão distantes dessa região (Figura 1). O objetivo deste trabalho fundamentou-se em

descrever e quantificar a AOD nesses cinco pontos da região amazônica em uma longa série de dados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados foram obtidos a partir do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo dos satélites Terra e Aqua. O algoritmo operacional da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) corresponde à coleção 5.1 do grupo de aerossóis (*AQUA/TERRA Forward and Reprocessing*) e fornece, para cada passagem, arquivos diários com valores de profundidade óptica do aerossol com resolução espacial de 10 km x 10 km sobre o oceano e o continente (Remer et al., 2006). O satélite Terra passa sobre a região amazônica no período da manhã (por volta de 10h30min, hora local) e o satélite Aqua passa no período da tarde (por volta de 13h30min, hora local) (NASA, 2011). A profundidade óptica do aerossol está disponível para três comprimentos de onda: 470, 550 e 660 nm. Os cálculos apresentados neste trabalho foram realizados para 550 nm, sendo os resultados para os outros comprimentos de onda proporcionais (maior é o valor de AOD quanto menor o comprimento de onda), levando-se em conta a dependência espectral da interação do aerossol de queimadas com a radiação solar (Liou, 1980).

Foram calculados os valores médios e respectivos desvios padrão da AOD no momento da passagem do satélite em áreas que compreendem aproximadamente círculos com raio de 10, 30 e 50 km, o que corresponde a quadrados de 20x20, 60x60 e 100x100 km. Os valores utilizados para o cálculo da média no raio de 10 km não foram utilizados no cálculo das médias dos outros raios, evitando uma correlação artificial. Foi feito um levantamento dos dias sem passagem de satélite na área abrangida pelo quadrado centrado na localidade e dias sem valores de AOD, possivelmente contaminados com nuvens.

Para avaliar a variabilidade espacial da AOD no momento da passagem, utilizou-se a área com 10 km de raio, como referência, e foi calculada a diferença absoluta entre o

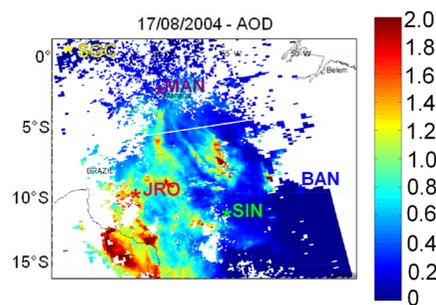


Figura 1 - Mapa com distribuição dos valores de AOD do dia 230 de 2004 (17/08/2004) obtido com a passagem do satélite Aqua e comprimento de onda 550 nm.

valor de referência e os valores médios de AOD para raios 30 e 50 km, para comparação com o desvio padrão dos respectivos raios. Quanto maior o desvio padrão, maior a dispersão e mais afastados da média estão os eventos extremos. Caso a diferença absoluta seja menor do que o seu desvio padrão, há homogeneidade espacial dos dados. Contou-se o número de passagens de satélite com valores cuja diferença absoluta seja maior ou menor do que o seu desvio padrão, para as comparações de raio 30 e 50 km, para as cinco localidades. Visando complementar essa análise, foram colocados em gráficos os valores médios de AOD para o raio de 30 e de 50 km em função da AOD média para o raio de 10 km e, para efeito de comparação, as retas de incerteza experimental para a AOD sobre o continente também foram incluídas: $\Delta\tau = \pm 0,05 \pm 0,15\tau$ (Remer et al., 2006). Com o mesmo fim, foram calculados os coeficientes de variação (razão entre desvio padrão e o valor médio) para cada valor médio de AOD de cada raio. Coeficiente maior que 0,5 indica que a variabilidade da distribuição de aerossol é significativa (Kaufman et al., 1997).

Foram feitos cálculos do valor médio da AOD para cada ano e localidade para visualizar como evoluiu a média anual em cada sítio e compará-los entre si, com o intuito de analisar a sua variabilidade interanual. As médias anuais de profundidade óptica podem indicar a quantidade relativa de aerossóis entre os sítios, ou também qual é mais poluído.

Visando estudar a variabilidade diurna, foram comparados os valores das passagens dos satélites Terra (manhã) e Aqua (tarde) nos dias que passavam pelos locais de estudo. Para tanto, foram selecionados os dias com valores médios de AOD para ambas as passagens (raio de 10 km), sendo calculada a diferença absoluta de tais valores médios e comparada com a soma dos respectivos desvios padrão para verificação de sua representatividade (caso a diferença seja menor do que o desvio padrão, a diferença absoluta pode ser apenas uma flutuação ao

redor da média). Foi também calculada a diferença entre o valor da AOD associada à passagem do Terra (período da manhã) menos a AOD obtida com o Aqua (período da tarde), ou seja, diferenças absolutas positivas revelam AOD maior no período da manhã, e negativas, AOD maior à tarde.

Foi verificado se os sítios apresentavam um ciclo anual bem definido, com um período de altos valores de AOD. Caso observado, a duração desse período (em dias) foi estimada visualmente, ano a ano, para cada sítio. Para isso, foram utilizadas médias móveis com o objetivo de localizar os limites desses períodos. A média móvel é a soma dos valores do período divididos pelo mesmo número de dias que foram somados (n), sendo que o primeiro dia é eliminado e o último dia é acrescentado a cada avanço de n dias. Foi calculada a média móvel para curto prazo (2 dias com dados) e longo prazo (7 dias com dados). Quando a média móvel de curto prazo está acima da média móvel de longo prazo, a tendência é de alta. Caso contrário, a tendência é de baixa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Grandes áreas apresentaram valores de profundidade óptica do aerossol acima de 1,0 durante o período seco, indicando áreas fortemente impactadas com a poluição dos aerossóis. Foram observados altos valores de AOD, principalmente na região da fronteira entre Rondônia (Brasil) e Bolívia (Figura 1), que podem estar relacionados a focos de queimadas. Conforme aumentaram a distância desses pontos, o valor de AOD caiu, devido à dispersão das partículas pela ação do vento.

Foram construídas séries temporais anuais com valores diários das médias de AOD, para cada sítio, raio de abrangência e satélite, assim como médias mensais, sendo que essas últimas podem ser observadas nas Figuras 2a e 2b e Tabelas 1 a 3, calculadas para um raio de 10 km. Foi observado que

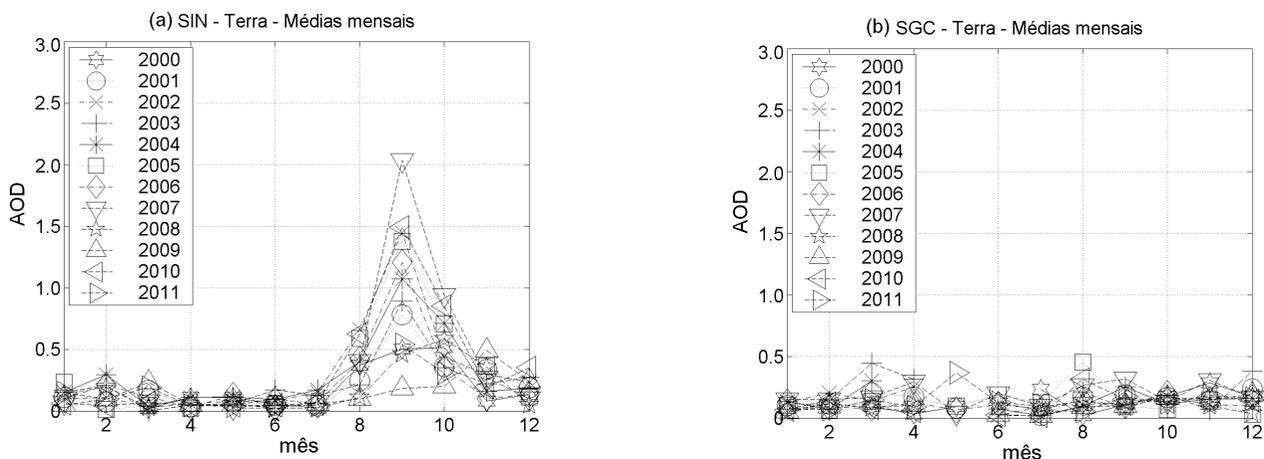


Figura 2 - Médias mensais de AOD para Sinop (a) e São Gabriel da Cachoeira (b), obtidas com o satélite Terra, calculadas para raio de 10 km.

Tabela 1 - Valores médios mensais de AOD para cada ano em Ilha do Bananal (satélite Terra e Aqua) calculadas em um raio de 10 km para um mínimo de 3 valores de médias diárias.

BAN Terra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	---	---	0,21	0,14	0,13	0,02	0,05	0,26	0,40	0,63	0,21	0,15
2001	0,15	0,36	0,18	0,12	0,10	0,05	0,04	0,17	0,82	0,64	0,55	0,22
2002	0,19	0,16	0,17	0,14	0,08	0,07	0,09	0,21	1,04	0,56	0,37	0,28
2003	0,22	0,22	0,15	0,15	0,14	0,07	0,02	0,14	0,45	0,44	0,28	0,21
2004	0,13	0,09	0,20	0,14	0,06	0,03	0,06	0,21	0,60	0,67	0,36	0,33
2005	0,16	0,40	0,16	0,11	0,10	0,04	0,04	0,29	0,82	0,64	0,39	0,21
2006	0,11	0,12	0,18	0,20	0,12	0,07	0,08	0,18	0,29	0,57	0,25	0,34
2007	0,15	0,12	0,17	0,11	0,09	0,03	0,07	0,19	0,69	0,96	0,57	0,20
2008	0,15	0,15	0,28	0,15	0,11	0,04	0,02	0,09	0,32	0,44	0,36	0,18
2009	0,10	0,30	0,20	0,22	0,07	0,08	0,03	0,10	0,27	0,29	0,39	0,21
2010	0,08	0,15	0,14	0,10	0,08	0,03	0,04	0,18	0,61	0,88	0,27	0,17
2011	0,14	0,15	0,20	0,23	0,09	0,12	0,05	0,05	0,31	0,34	0,22	0,13

BAN Terra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	---	---	0,21	0,14	0,13	0,02	0,05	0,26	0,40	0,63	0,21	0,15
2001	0,15	0,36	0,18	0,12	0,10	0,05	0,04	0,17	0,82	0,64	0,55	0,22
2002	0,19	0,16	0,17	0,14	0,08	0,07	0,09	0,21	1,04	0,56	0,37	0,28
2003	0,22	0,22	0,15	0,15	0,14	0,07	0,02	0,14	0,45	0,44	0,28	0,21
2004	0,13	0,09	0,20	0,14	0,06	0,03	0,06	0,21	0,60	0,67	0,36	0,33
2005	0,16	0,40	0,16	0,11	0,10	0,04	0,04	0,29	0,82	0,64	0,39	0,21
2006	0,11	0,12	0,18	0,20	0,12	0,07	0,08	0,18	0,29	0,57	0,25	0,34
2007	0,15	0,12	0,17	0,11	0,09	0,03	0,07	0,19	0,69	0,96	0,57	0,20
2008	0,15	0,15	0,28	0,15	0,11	0,04	0,02	0,09	0,32	0,44	0,36	0,18
2009	0,10	0,30	0,20	0,22	0,07	0,08	0,03	0,10	0,27	0,29	0,39	0,21
2010	0,08	0,15	0,14	0,10	0,08	0,03	0,04	0,18	0,61	0,88	0,27	0,17
2011	0,14	0,15	0,20	0,23	0,09	0,12	0,05	0,05	0,31	0,34	0,22	0,13

Tabela 2 - Valores médios mensais de AOD para cada ano em Rebio Jaru (satélite Terra e Aqua) calculadas em um raio de 10 km para um mínimo de 3 valores de médias diárias.

JRO Terra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	---	---	---	0,04	0,15	0,05	0,08	0,25	0,41	0,41	0,18	0,12
2001	0,03	0,36	0,16	0,13	0,08	0,05	0,07	0,38	0,57	0,51	0,41	0,05
2002	0,24	0,15	0,06	0,13	0,07	0,11	0,22	1,05	0,80	0,37	0,41	0,40
2003	0,20	0,05	0,09	0,07	0,06	0,13	0,15	0,57	1,03	0,42	0,48	0,11
2004	0,24	---	0,18	0,08	0,07	0,06	0,22	1,04	1,18	0,35	0,25	0,28
2005	0,15	0,04	---	0,06	0,05	0,06	0,14	1,10	1,32	0,57	0,31	0,37
2006	0,02	0,24	0,18	0,04	0,05	0,06	0,09	0,57	1,12	0,38	0,17	0,19
2007	0,15	---	0,10	0,08	0,04	0,04	0,08	0,66	2,08	1,07	0,68	0,08
2008	---	0,08	0,20	0,09	0,07	0,05	---	0,40	0,59	0,56	0,18	---
2009	0,17	0,08	0,06	0,35	0,03	0,04	0,05	0,18	0,25	0,41	0,36	---
2010	0,01	0,12	0,06	0,08	0,08	0,09	0,09	0,75	1,33	0,45	---	0,14
2011	0,11	0,03	---	0,02	0,05	0,06	0,07	0,12	0,37	0,18	---	---

JRO Aqua	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	---	---	---	---	---	---	0,23	1,23	0,85	0,39	0,41	0,29
2003	0,13	0,14	0,19	0,12	0,07	0,16	0,17	0,55	1,21	0,51	0,29	0,24
2004	0,21	0,20	0,27	0,16	0,12	0,12	0,22	0,85	1,41	0,91	0,25	0,21
2005	0,28	---	0,14	0,19	0,11	0,09	0,20	1,02	2,01	0,49	0,30	0,17
2006	0,21	0,10	0,23	0,09	0,06	0,07	0,09	0,42	0,94	0,25	0,18	0,28
2007	0,20	0,35	0,15	0,09	0,13	0,07	0,08	0,60	2,12	0,72	0,36	0,13
2008	0,09	0,09	0,11	0,11	0,09	0,10	0,04	0,35	0,55	0,80	0,26	0,21
2009	0,18	0,11	0,16	0,09	0,12	0,20	0,09	0,14	0,24	0,55	0,44	0,19
2010	0,09	0,04	0,13	0,16	0,14	0,06	0,05	0,66	1,25	0,58	0,21	0,10
2011	---	0,10	0,11	0,13	0,11	0,06	0,06	0,12	0,54	0,23	0,22	0,16

Tabela 3 - Valores médios mensais de AOD para cada ano em Sinop (satélite Terra e Aqua) calculadas em um raio de 10 km para um mínimo de 3 valores de médias diárias.

SIN Terra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2000	---	---	0,02	0,11	0,11	0,06	0,03	0,37	0,50	0,52	0,08	0,14
2001	0,11	0,08	0,17	0,04	---	0,05	0,04	0,25	0,78	0,36	0,34	0,19
2002	0,10	0,11	0,03	0,06	0,08	0,09	0,15	0,66	1,45	0,44	0,30	0,23
2003	0,15	0,21	0,00	0,05	0,06	0,17	0,13	0,22	0,89	0,35	0,22	0,28
2004	0,15	0,30	0,04	0,11	0,12	0,10	0,18	0,40	1,07	0,71	0,16	0,19
2005	0,24	0,02	0,05	0,02	0,08	0,06	---	0,59	1,38	0,71	0,37	0,12
2006	0,10	0,21	0,12	0,03	0,13	0,03	---	0,42	1,21	0,35	0,10	0,14
2007	0,07	---	0,08	---	0,03	0,02	0,08	0,41	2,04	0,94	0,27	0,10
2008	0,14	0,20	0,03	---	0,06	0,02	0,03	0,11	0,46	0,59	0,36	0,05
2009	0,05	0,10	0,24	0,06	0,05	0,10	0,06	0,10	0,18	0,20	0,49	0,24
2010	0,06	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,07	0,63	1,49	0,85	0,20	0,35
2011	0,15	0,10	0,20	0,05	0,04	0,04	0,05	---	0,54	0,31	---	---

SIN Aqua	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	---	---	---	---	---	---	0,16	0,62	1,31	0,50	0,29	0,25
2003	0,22	0,08	0,10	0,11	0,09	0,15	0,11	0,23	1,29	0,25	0,24	0,17
2004	0,29	0,09	0,07	0,07	0,11	0,11	0,16	0,48	1,11	0,67	0,27	0,23
2005	0,06	0,12	0,05	0,17	0,05	0,03	0,05	0,61	1,23	0,68	0,24	0,11
2006	0,14	0,12	0,22	0,09	0,08	0,05	0,02	0,36	1,14	0,51	0,14	0,15
2007	0,12	0,15	0,13	0,11	0,05	0,04	0,08	0,40	1,85	1,19	0,21	0,15
2008	0,14	0,13	0,27	0,14	0,09	0,04	0,03	0,08	0,41	0,60	0,24	0,12
2009	0,11	0,02	0,08	0,15	0,10	0,06	0,03	0,06	0,18	0,21	0,40	0,15
2010	0,11	0,07	0,18	0,08	0,05	0,03	0,06	0,51	1,26	0,58	0,11	0,11
2011	0,04	0,12	0,14	0,13	0,09	0,03	0,04	0,08	0,51	0,29	0,18	0,20

todas as localidades pertencentes ao arco do desflorestamento (BAN, JRO e SIN) possuem um período em que os valores médios de AOD são bem mais altos. A Figura 2a ilustra esse comportamento para SIN. O setor sul da Amazônia tem o período de chuvas entre novembro e março e o período de seca entre maio e setembro, sendo abril e outubro meses de transição. No período de seca, a região Amazônica, principalmente na parte central, está sob domínio do ramo descendente da célula de Hadley, o que induz a estiagem (CPTEC e INMET, 2005). A maioria dos períodos de altos valores de AOD (valores entre 1 e 3 ou maiores) começa em agosto e setembro, ou seja, no final do período de seca, quando a floresta está mais seca e favorecendo as queimadas. O término do período de altos valores acontece em outubro e novembro, quando recomeça o período chuvoso. Setembro foi o mês que apresentou os mais altos valores de AOD de todos os anos, correspondendo ao valor médio de $2,0 \pm 0,5$ no ano de 2007. No restante do ano, a atmosfera é limpa devido à ocorrência de precipitação e, na ausência de outras fontes significativas emissoras de aerossóis, as baixas concentrações resultam em baixos valores de AOD, com valores por volta de 0,1-0,2, o que pode ser observado também em Paixão (2011).

Em BAN, a magnitude da AOD durante o período de altos valores diminui de forma mais lenta com o tempo. Geralmente BAN apresenta altos valores também em novembro, e em certos anos a queda avança até aproximadamente o dia 150

do ano seguinte. Em 2007, a queda já ocorre antes do fim do ano. Analisando os mapas com número de focos de queimadas, é possível observar, a partir de outubro, um aumento no número de focos em uma faixa que vai do centro-leste do Pará, extremo norte do Tocantins e centro do Maranhão (CPTEC/INPE, 2008). O aumento das queimadas coincide com a temporada de preparação das lavouras, e a maioria dos agricultores ainda faz uso das queimadas na preparação do solo.

Em MAN, foram observados períodos de altos valores no segundo semestre, somente nos anos de 2005, 2007 e 2011. Todo o restante do período estudado apresentou valores mais baixos, com alguns valores altos isolados. Uma possível explicação é a de que tenha ocorrido transporte dos produtos das queimadas do arco do desmatamento para a região durante a estação seca dos anos mencionados (transporte também observado para a região do cerrado nos anos de 2005 e 2007 por Paixão (2011)).

Em SGC, são observados valores mais altos de AOD nos primeiros meses do ano, que são meses quando ocorre a estação seca no norte da Amazônia e provável transporte dos aerossóis de queimadas ocorridas em Roraima. Particularmente, maiores valores foram observados em 2003, em que houve influência do El Niño gerando baixos índices pluviométricos. Em janeiro de 2003 ocorreram 3.769 focos de incêndio no Brasil (número duas vezes maior que em janeiro do ano anterior), boa parte deles no norte do Pará e Roraima (CPTEC/INPE, 2008). SGC

não tem um período de altos valores, mantendo sempre baixos valores de AOD. Foram obtidos alguns valores próximos a 1, que podem estar relacionados ao transporte de aerossóis ou também a altos valores na região da borda de nuvens (*twilight zone*, Koren et al., 2007). A máscara de nuvem distingue entre regiões com e sem nuvens, mas existe uma região em volta da nuvem com fragmentos de nuvem se formando ou evaporando e aerossóis hidratados que se estendem por dezenas de quilômetros. Por exemplo, no dia 250 do ano 2007 (07/09/07) SGC apresentou AOD média de $0,91 \pm 0,29$ em um raio de 10 km na passagem do Terra (manhã) e $0,61 \pm 0,09$ na passagem do Aqua (tarde). Observando-se a imagem do visível (Figura 3), pode-se notar a passagem de uma pluma de transporte de aerossóis de queimada sobre a região de SGC, mais notadamente a sudeste e a presença de várias nuvens. Também pode ser vista uma região com uma pluma de poluentes mais ao sul, na região do arco do desflorestamento, provavelmente a região emissora da pluma. Verificou-se que vários valores de AOD para este dia foram rejeitados pelo algoritmo de máscara de nuvem, por serem extremamente altos. Dessa forma, um efeito combinado entre o transporte de fumaça e o *twilight zone* pode ter causado o aumento da AOD observado sobre SGC nesse dia.

Para visualizar a evolução temporal anual, foram feitos cálculos do valor médio da AOD para cada ano (Figura 4 e Tabela 4). O sítio de JRO apresenta as maiores médias anuais, seguido por SIN e BAN. Isso pode ser visto como um reflexo

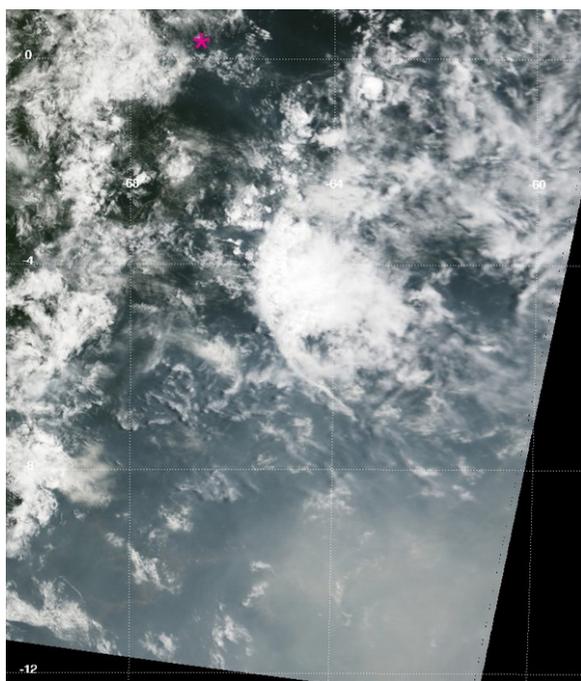


Figura 3 - Recorte da passagem no visível do satélite Terra do dia 250 de 2007 (07/09/2007) nas proximidades de São Gabriel da Cachoeira. SGC está sinalizada em magenta.

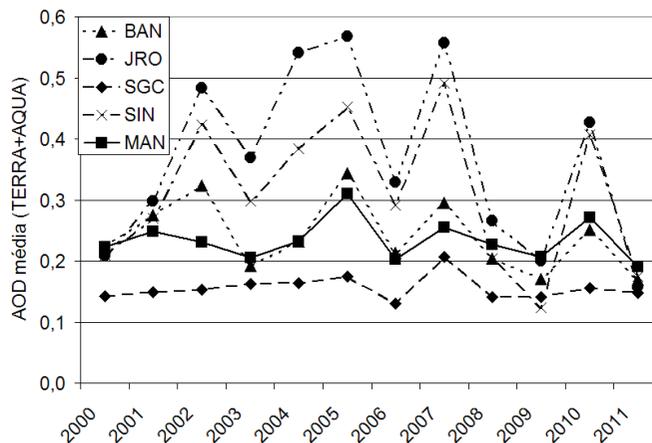


Figura 4 - Evolução temporal das médias anuais, calculadas a partir da AOD média para raio de 10 km.

Tabela 4 - Valores médios de AOD para cada ano e local (valores apresentados no gráfico da figura 3.4) calculadas em um raio de 10 km para um mínimo de 3 valores de médias diárias.

	BAN	JRO	MAN	SGC	SIN
2000	0,22	0,21	0,22	0,14	0,21
2001	0,28	0,30	0,25	0,15	0,27
2002	0,32	0,48	0,23	0,15	0,42
2003	0,19	0,37	0,21	0,16	0,30
2004	0,23	0,54	0,23	0,16	0,38
2005	0,34	0,57	0,31	0,17	0,45
2006	0,21	0,33	0,20	0,13	0,29
2007	0,30	0,56	0,26	0,21	0,49
2008	0,20	0,27	0,23	0,14	0,20
2009	0,17	0,20	0,21	0,14	0,12
2010	0,25	0,43	0,27	0,16	0,41
2011	0,17	0,16	0,19	0,15	0,17

da distribuição dos focos de incêndio na região e da circulação atmosférica, atuando no transporte dos aerossóis.

Houve um comportamento semelhante na evolução da AOD média anual para os sítios pertencentes ao arco do desflorestamento (BAN, JRO e SIN): crescimento nos anos de 2000 a 2002, queda em 2003, alta em 2004 e 2005, uma grande queda em 2006, outro aumento em 2007 e nova queda em 2008-2009, aumento em 2010 e queda em 2011 a valores próximos aos de 2009. Como a profundidade óptica está relacionada proporcionalmente à quantidade de aerossóis na atmosfera, provavelmente essas variações estão relacionadas ao aumento e diminuição no ritmo de queimadas na região. Porém, para explicar totalmente essas variações são necessários maiores estudos visando encontrar uma correlação entre os valores de profundidade óptica do aerossol e variáveis como número de focos de incêndio e área desmatada, com a ressalva de que os valores locais de AOD podem estar relacionados a plumas transportadas de regiões vizinhas.

Em SGC, houve flutuação ao redor da média (sem alteração no período). A constância em seu valor médio revela o quase nulo impacto de queimadas nos valores de profundidade óptica do aerossol. A região possui a floresta amazônica mais protegida e isolada do que os outros sítios, sendo cercada pelo Parque Nacional do Pico da Neblina, unidades de conservação e terras indígenas. Além disso, a região apresenta precipitação média de 3500 mm por ano e não possui período de seca (Fisch et al., 1998). Uma flutuação maior dessa regularidade ocorre entre os anos de 2006-2007, quando aparentemente segue o padrão dos sítios do arco do desflorestamento. Devido ao menor número de dados e eventos singulares de transporte de poluentes, a AOD média de 2007 ficou acima da média de modo mais pronunciado.

Em MAN, as médias anuais de AOD foram similares às de BAN e também segue o padrão de altas e quedas da AOD média anual ao longo do período estudado, apesar de não pertencer ao Arco do Desmatamento. Os maiores valores também ocorrem nos anos de 2005 e 2007. Analisando-se as imagens com a distribuição dos valores de AOD, geralmente não são observadas áreas com altos valores de AOD nas proximidades de MAN. Assim, os valores médios de AOD encontrados provavelmente são fruto do transporte dos produtos de queimada de outras regiões e, localmente, do hábito de queimar lixo doméstico e folhas secas.

No ano de 2005, a região amazônica sofreu uma grande seca. Analisando-se os dados de precipitação no setor sul da Amazônia, a estação chuvosa, que na realidade se estendeu de dezembro de 2004 a março de 2005, verificou-se uma redução de até 350 mm em relação à média histórica. Uma das possíveis causas estaria relacionada ao aumento da temperatura da superfície do mar no Atlântico tropical norte, o que intensificou o movimento ascendente de ar no ramo ascendente da célula de Hadley, que está no Atlântico norte equatorial, e consequentemente intensificou o ramo descendente sobre o sudoeste da Amazônia, ocasionando supressão ao desenvolvimento de nuvens e precipitação (CPTEC e INMET, 2005). Adicionalmente, a intensificação do Anticiclone do Atlântico Sul, que se estendeu até o continente, também contribuiu para a geração de uma estabilidade atmosférica que não favoreceu a formação de nebulosidade. Outros fatores que poderiam contribuir estão relacionados a uma redução da reciclagem de vapor d'água ocasionado pela própria estiagem e devido à queima de biomassa, cuja fumaça altera a microfísica da formação de nuvens com gotículas menores e com maior tempo de vida. Em 2005 notou-se uma forte estiagem em todos os meses do ano, favorecendo a ocorrência de queimadas e produção de aerossol. O déficit das chuvas na região sul da Amazônia também foi observado em 2004, porém com menor intensidade (CPTEC e INMET, 2005). Assim, em 2004 e 2005 podem ser observados maiores valores de AOD em todos os sítios.

Em 2006 houve uma forte queda nos valores de AOD média. Esse ano apresentou uma grande queda no número de focos de queimadas, que pode estar associada à retração no avanço do desmatamento da Amazônia resultante do desaquecimento mundial do comércio de soja e agronegócios (CPTEC/INPE, 2008). No primeiro semestre, foram também observadas anomalias positivas de precipitação, inibindo as queimadas. O contrário ocorreu em 2007, quando choveu abaixo da média histórica. Um exemplo se dá no sudeste do Amazonas, quando a situação de chuvas abaixo da média histórica atingiu o sexto mês consecutivo em março. Nessa área e no sul do Pará, as chuvas estiveram até 200 mm abaixo da média, situação que perdurou até abril, com valores abaixo da média inclusive em junho (CPTEC/INPE, 2009).

A primeira quinzena de setembro de 2007 apresentou intensa circulação anticiclônica na baixa troposfera sobre grande parte do Brasil, o que inibiu a formação de nuvens e causou déficit de chuva na maior parte do país. Essa circulação anticiclônica anômala esteve associada à formação de um bloqueio atmosférico sobre o Pacífico Sudeste, por sua vez decorrente da intensificação do fenômeno La Niña. A região Centro-oeste registrou um déficit de chuvas e baixos índices de umidade relativa, favorecendo as queimadas. Assim, com as condições atmosféricas favorecendo a propagação de incêndios, registrou-se um maior número de focos de queimadas. O satélite NOAA-15 registrou 27.200 focos de queimadas no Brasil, 63% maior do que em setembro do ano anterior. Houve aumento de 120% no número de focos de queimadas na Bolívia, 148% no Mato Grosso, 168% no Pará e 230% no Tocantins (CPTEC/INPE, 2008).

Em 2009, toda região sul da Amazônia apresentou anomalias positivas de precipitação durante o mês de agosto, causadas principalmente devido à ocorrência de dois sistemas frontais e uma área de convergência de umidade na região que persistiu durante vários dias no final do mês (SIPAM, 2009). Com a vegetação mais úmida, isso pode influenciar para menor quantidade e intensidade de queimadas resultando em menores valores de AOD, conforme foi observado. Já em agosto e setembro de 2010, os estados de Mato Grosso, Tocantins, leste do Pará e centro-sul de Rondônia apresentaram índices pluviométricos excessivamente baixos (abaixo de 50 mm/mês ou mesmo sem registro de precipitação), devido à intensificação do anticiclone no Brasil central e consequente redução na formação de nebulosidade (SIPAM, 2010).

Quanto à análise espacial, a Figura 5 mostra que, com o aumento de área, as médias tendem a permanecer próximas da reta de correlação total, onde a média para os raios maiores seria a mesma que a do raio de referência. Somente entre 2 e 3% dos dados, em média, saem da área entre as retas de incerteza experimental. Os valores com as distâncias de maior magnitude

das retas, geralmente estavam relacionados a valores muito altos de AOD média (acima de 2,5). Também foi realizado um estudo dos coeficientes de variação para cada um dos valores de AOD média. Considerando-se os dados dos satélites Terra e Aqua, os coeficientes estiveram abaixo de 0,5 em 65 e 57% de todos os dados para raio de 30 e 50 km, respectivamente, para BAN; 79 e 73% para JRO; 88 e 81% para MAN; 81 e 78% para SGC e 67 e 58% para SIN; para raio de 10 km, todos os sítios apresentaram mais de 87% de coeficientes abaixo de 0,5. A grande maioria dos coeficientes de variação calculados estão abaixo de 0,5, o que indica que a variabilidade da distribuição de aerossol não é significativa.

Observou-se que a grande maioria do número de dias possui uma diferença absoluta entre seu valor médio de AOD para raio 10 km e para 30 km com magnitude menor do que o seu desvio padrão. O mesmo ocorre quando comparado o valor médio de AOD, para raio de 50 km, em relação ao valor médio de AOD, para raio de 10 km. Assim, aumentando-se a área de estudo, a diferença entre o valor da área menor com o da área maior é menor que o desvio padrão. Lembrando-se que o desvio padrão representa a dispersão dos valores de profundidade óptica que compuseram o cálculo da AOD média dessa área, pode-se inferir que a variação não foi realmente significativa com o aumento da área de estudo e que a situação é favorável à homogeneidade na distribuição espacial dos valores de AOD. Todas essas análises sugerem que as camadas de aerossol são bem misturadas e que possuem um impacto regional.

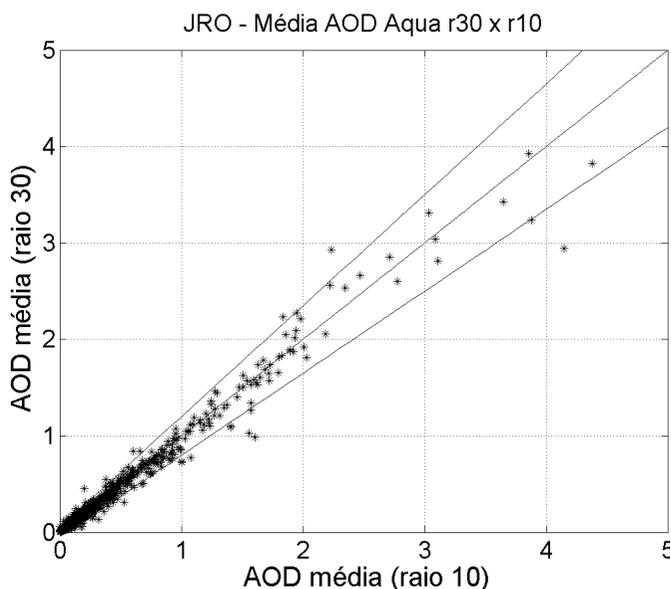


Figura 5 - AOD média calculada para raio de 30 km versus AOD média para raio de 10 km, obtidas a partir de dados do satélite Aqua, para Rebio Jaru. A reta central serve de referência para o caso da AOD média continuar a mesma ao se aumentar a área analisada e as retas laterais correspondem à incerteza experimental.

A quantidade de dias com valores de AOD é limitada, dentro do período estudado, ou porque não houve passagem do satélite dentro da área de estudo, ou principalmente pela possibilidade de estarem contaminados por nuvens. Após o lançamento do Aqua, comparando-se o número de dias com dados obtidos através do satélite Terra e o número de dias com dados obtidos através do Aqua, notou-se que o número de dias com dados de AOD com as passagens do Terra é maior que do Aqua para todos os sítios, exceto em SGC. Ou seja, existem mais dias com dados no período da manhã do que à tarde. Trabalhos sobre o ciclo diurno da precipitação mostram que no período da tarde (entre 13h e 18h) são registrados acima de 30% dos eventos de precipitação, devido ao ciclo de insolação e aquecimento da superfície e formação de nuvens convectivas (Fisch et al., 1998), o que indica maior nebulosidade no período da tarde.

Para a análise da variabilidade diurna (Figura 6), é possível observar que o número de dias em que o desvio absoluto é maior do que a soma dos desvios padrão em SIN e JRO é quase o dobro dos dias que possuem diferença absoluta menor, e em MAN e SGC corresponde ao triplo. Assim, a diferença absoluta entre os valores de AOD obtidos com as passagens dos satélites Aqua e Terra é uma grandeza considerável, conforme o esperado.

Também é apresentado, para cada localidade, o número de dias em que a AOD obtida na passagem do Terra (manhã) é maior, ou menor, do que a obtida na passagem do Aqua (tarde). O número de dias cujo valor da profundidade óptica é maior no período da manhã é consideravelmente menor do que o número de dias cuja AOD é maior no período da tarde para as localidades BAN, JRO, MAN e SGC. Uma possível explicação para os valores maiores de profundidade óptica do aerossol à tarde é devido ao pico de queimadas ocorrer à tarde, aumentando a concentração de aerossol na atmosfera. Em contrapartida, SIN tem um comportamento ligeiramente oposto, com a AOD maior no período da manhã. Sendo uma diferença relativamente pequena, são necessários maiores estudos para explicar esse comportamento. O módulo da grande maioria das diferenças não passa de 1, enquanto que em SGC não chega a 0,5. Isso mostra uma maior homogeneidade da atmosfera em SGC durante o dia quanto à distribuição temporal de aerossol, reflexo da não ocorrência local de queimadas e céu mais limpo. As diferenças de maior magnitude estão ligadas a eventos de queimadas próximas ao sítio estudado, por volta do horário da passagem do satélite, ou também devido à passagem de uma pluma muito intensa sobre a região. Caso esse evento ocorra entre as passagens, isso refletirá em uma AOD média maior à tarde que no período da manhã (ou seja, diferença absoluta negativa). Os casos de diferenças absolutas positivas de grande magnitude (ou seja, AOD maior pela manhã) provavelmente estão ligados à dispersão da poluição local ao longo do dia.

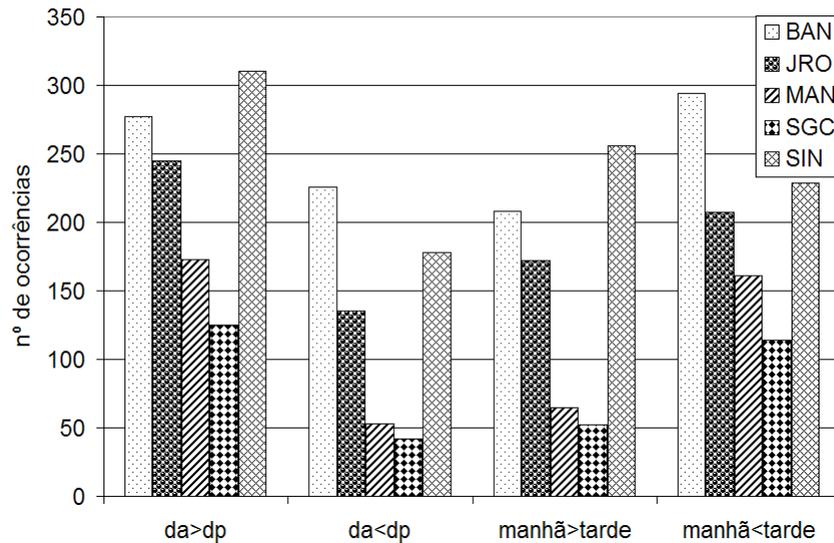


Figura 6 - Gráfico com as comparações entre o desvio absoluto e desvio padrão dos valores de AOD, assim como entre as passagens do Terra (manhã) e Aqua (tarde), conforme legenda a seguir: da>dp – desvio absoluto é maior que a soma do desvio padrão da AOD obtida na pas-sagem no Terra e do Aqua, da<dp – desvio absoluto é menor que a soma do desvio padrão da AOD obtida na pas-sagem no Terra e do Aqua, manhã>tarde – AOD da passagem do Terra é maior que a da passagem do Aqua, manhã<tarde – AOD da passagem do Terra é menor que a da passagem do Aqua.

Foram calculadas as médias móveis de curto e de longo prazo para estimar visualmente o início e o término dos períodos de altos valores de AOD, determinando assim a sua duração, para cada ano e localidade (Figura 7). Eventualmente, havia a ocorrência de picos de valores de AOD muito altos em um curto período de tempo (1 ou 2 dias). Após o pico, os valores sofriam uma queda suave ou se mantinham em um regime de altos valores, ou também esse pico poderia estar isolado temporalmente, ou seja, com valores baixos de AOD antes e depois do dia de ocorrência. Essas ocorrências dificultaram a determinação precisa do início e término dos períodos de altos valores. No caso em que os picos de AOD estiveram próximos ao patamar do período de altos valores, foram incluídos ao período, pois apontaram para o início ou continuidade de queimadas. Em casos de picos mais distanciados, poderiam representar eventos isolados e não o início ou término real do período, e portanto não foram contabilizados. Um exemplo disso ocorreu no dia 241 de 2007 (29/08/07), em BAN, o qual apresentou AOD média de $1,52 \pm 0,12$ durante passagem do satélite Terra (raio de 10 km). Os valores médios antes e após esse evento foram de $0,41 \pm 0,04$ e $0,38 \pm 0,02$, respectivamente.

O período de altos valores de AOD sempre começou primeiro em JRO, depois em SIN e por último em BAN. O período médio de altos valores de AOD estimado para BAN foi de 79 dias, para JRO foi de 75 e SIN foi de 69. Os valores encontrados são bastante próximos, e, considerando-se que representam pontos distantes do arco de desflorestamento,

podem caracterizar a duração média para o período de altos valores de profundidade óptica do aerossol para toda a região.

MAN apresentou um período do ano com valores mais altos somente durante as estações secas de 2005, 2007 e 2010, que foram os anos mais secos e mais poluídos. Mesmo assim, ou a magnitude dos valores não era muito mais alta ou, se os valores eram altos, estavam muito isolados dos outros, o que pode ter sido causado pela passagem de alguma pluma isolada ou ocorrência de queimada nas proximidades. Foi difícil caracterizar um período de altos valores de AOD nesses anos também devido ao grande número de dados possivelmente contaminados por nuvens.

4. CONCLUSÕES

Foi observado que o número de dias com dados obtidos com as passagens do Terra é maior que do Aqua para quatro sítios. Uma possível explicação é que a nebulosidade é maior no período da tarde. A grande maioria dos valores médios de AOD variou menos do que o seu desvio padrão para um aumento da área estudada, ou seja, não houve variação significativa considerando áreas maiores, o que indica que as camadas de aerossol são bastante misturadas e com um impacto regional.

Para BAN, JRO e SIN (Arco do Desmatamento), houve um comportamento semelhante na evolução da AOD média anual: crescimento nos anos de 2000 a 2002, queda em 2003, alta em 2004 e 2005, uma grande queda em 2006, outro aumento em 2007 e nova queda em 2008-2009, aumento em 2010 e queda

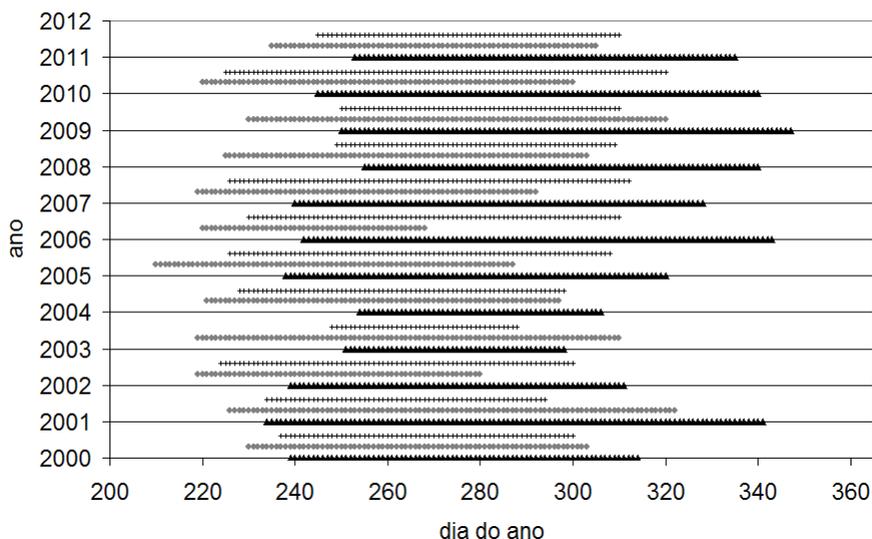


Figura 7 - Gráfico dos períodos de altos valores (em dias) de AOD para cada ano dos sítios do arco do desmatamento: Ilha do Bananal (BAN, linha dentada), Rebio Jaru (JRO, círculos cinzas) e Sinop (SIN, cruzes).

em 2011 a valores próximos de 2009. Em SGC, houve pouca alteração no período analisado. Apesar de distante do Arco do Desmatamento, MAN sofreu influência do transporte de poluentes dessa região, apresentando variações anuais similares dos valores de AOD.

Quanto à variabilidade diurna, ocorrem mais dias em que a diferença absoluta entre os valores obtidos com o Terra e com o Aqua é maior do que a soma dos desvios padrão. O número de dias cujo valor da AOD é maior de manhã (passagem do Terra) é consideravelmente menor do que o número de dias cuja AOD é maior no período da tarde (passagem do Aqua) para BAN, JRO, MAN e SGC. Uma possível explicação é que valores maiores da profundidade óptica do aerossol à tarde ocorrem devido ao pico de queimadas ocorrer nesse horário, aumentando a concentração de aerossol na atmosfera. SIN tem um comportamento ligeiramente oposto, porém são necessários mais estudos devido à pequena diferença.

Os sítios estudados apresentam AOD entre 0,1-0,2 no período úmido e os sítios do arco do desmatamento possuem um período de altos valores (AOD entre 1-3) no final da estação seca. A maioria dos períodos de altos valores de AOD começa em agosto e setembro, ou seja, no final do período de seca, e o término do período ocorre em outubro e novembro, quando recomeça o período chuvoso. O período médio de altos valores de AOD estimado para BAN foi de 79 dias, para JRO foi de 75 e SIN foi de 69. SGC não possui períodos com altos valores. BAN apresentou uma queda mais lenta do período, adentrando até aproximadamente o dia 150 do ano seguinte. MAN apresentou um período do ano com valores mais altos somente durante as estações secas de 2005, 2007 e 2010, que foram os anos mais secos e mais poluídos.

Através do estudo aqui desenvolvido, foi definida a variabilidade temporal da profundidade óptica do aerossol para o período de 2000 a 2011 na Amazônia. Foi observado um aumento significativo da AOD durante o período de queimadas em praticamente todos os anos sobre os sítios localizados no arco do desmatamento e a influência em sítios mais distantes. Utilizando-se dois satélites, foi possível também definir a variabilidade diurna. Os sítios sobre os quais foi realizado o estudo são representativos de diferentes biomas e possuem torres micrometeorológicas, o que permitirá uma análise futura do efeito dos aerossóis de queimadas sobre o balanço de radiação em superfície e sobre os fluxos turbulentos de calor latente, sensível e de CO₂ nessas localidades.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processos n^{os} 503731/2007-2, 306481/2006-5) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (06/56550-5) pelo auxílio financeiro. Agradecem também ao Prof. Dr. Carlos Augusto Rodriguez Morales (IAG-USP), pelo auxílio nas análises de variabilidade espacial, e à equipe de profissionais do MODIS, pelo suporte à base de dados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CPTEC/INPE (2008), Focos de Calor, <http://www.cptec.inpe.br/products/queimadas/texto_climan.html>.
 CPTEC/INPE (2009), Climanálise - Boletim, <<http://www6.cptec.inpe.br/revclima/boletim/>>.

- CPTEC e INMET (2005) Seca da Amazônia em 2005. Nota ao público em geral elaborada pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) em conjunto com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Agência CT. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasil. <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=492>.
- FISCH, G., MARENGO, J. A., NOBRE, C. A.: Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 28, n. 2, p.101-126. 1998.
- KAUFMAN, Y. J., TANRÉ, D., REMER, L. A., VERMOTE, E. F., CHU, A., HOLBEN, B. N.: Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. D14, p. 17051-17067, 1997.
- KOREN, I., MARTINS, J. V., REMER, L. A. e AFARGAN, H. Smoke Invigoration Versus Inhibition of Clouds over the Amazon. *Science* v. 321, p. 946-949, 2007.
- LIU, K. N., **An Introduction to Atmospheric Radiation**. Academic Press. Inc., 1980.
- NASA, **MODIS Website - Components of MODIS**. Disponível em: <<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>>, acesso em 18/08/2011.
- PAIXÃO, M. M. de A. Propriedades ópticas de aerossóis naturais e de queimadas da Amazônia. 2011. Dissertação (Mestrado em Física) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-30092011-150552/>>.
- PROCOPIO, A. S., ARTAXO, P., KAUFMAN, Y. J., REMER, L. A., SCHAFER, J. S. and HOLBEN, B. N.: Multiyear analysis of amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate. *Geophysical Research Letters*, v. 31, L03108, doi:10.1029/2003GL018646, 2004.
- REMER, L. A., TANRÉ, D., KAUFMAN, Y. J.: **Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 005** (Product ID: MOD04/MYD04). NASA, 2006. <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/MOD04-MYD04_ATBD_C005.pdf>.
- ROCHA, V. R.: **Análise de propriedades de nuvens em função da profundidade óptica do aerossol a partir de produtos derivados pelo MODIS da região amazônica durante a estação seca**. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-24012012-122502/>>.
- SIPAM, CTO-MN, DMET: **Boletim Climatológico da Amazônia**. 2009 a 2010. Disponível em: <www.sipam.gov.br>.
- YAMASOE, M. A.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. et al.: Effect of Smoke on the Transmissivity of Photosynthetically Active Radiation Inside the Canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, Alemanha, v. 6, p. 1646-1656, 2006.
- YAMASOE, M. A. ; ROSARIO, N. M. E.: **Changes in solar radiation partitioning reaching the surface due to biomass burning aerosol particles in the Amazon Basin**. In: International Radiation Symposium - IRS2008, Foz do Iguaçu. Current Problems in Atmospheric Radiation (IRS2008) Proceedings of the International Radiation Symposium (IRC/IAMAS). Melville, New York : American Institute of Physics, 2008. v. 110. p. 657-660, 2009.