

VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA PROFUNDIDADE ÓTICA DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS SOBRE A AMAZÔNIA

Rayanna de Oliveira Costa¹

Rafael da Silva Palácios¹

Jorge de Almeida Menezes¹

Anna Carolina Albino Santos¹

Fernando da Silva Sallo¹

Karen Francielli Alves Pereira Sallo²

José de Souza Nogueira¹

RESUMO

As propriedades físicas de aerossóis atmosféricos, entre elas a sua profundidade ótica (AOD), possuem importância para os processos de interação entre a superfície e a atmosfera. A atmosfera da Amazônia brasileira sofre mudanças significativas em termos das propriedades físicas de aerossóis devido a grandes quantidades de partículas emitidas pela queima de biomassa, porém, carece de estudos que avaliem sua variabilidade espacial e temporal. Nesse sentido, esse trabalho objetivou analisar e quantificar a AOD na faixa de 550 nm (AOD 550 nm), a partir dos produtos de sensoriamento remoto, MOD04_L2 e MOD08_D3, para aerossóis do sensor MODIS, para o período de 2010 a 2014, sobre as regiões de Manaus, Santarém, Porto Velho, Rio Branco, Ji Paraná e Cuiabá. Foi constatado que, em todas as regiões analisadas, a AOD 550 nm apresentou variação sazonal com os máximos atingidos na estação seca. A variabilidade espaço-temporal evidenciou que as regiões de Manaus e Santarém são menos impactadas pelo aumento da AOD 550 nm que as demais regiões. Em Manaus, as médias para todo o período de estudo foram de 0.24 ± 0.26 e 0.20 ± 0.16 para as estações seca e chuvosa respectivamente, enquanto que para Ji Paraná as médias de todo o período de estudo foram de 0.34 ± 0.43 e 0.14 ± 0.08 , chegando a atingir uma média de 0.75 ± 0.69 para a estação seca de 2010. Foi constatado que a variabilidade espacial e temporal estão diretamente relacionadas em todas as regiões.

Palavras-chave: AOD; Sensor MODIS; MOD04_L2, MOD08_D3; Variação Sazonal.

ABSTRACT

Spatio-temporal variability of aerosols optical depth over Amazon. The physical properties of atmospheric aerosols, among them the optical depth (AOD) has importance for the processes of interaction between the surface and the atmosphere. The atmosphere of the Brazilian Amazon suffers significant changes in terms of the physical properties of aerosols due to large quantities of particles emitted by biomass burning, however, lack of studies that assess their spatial and temporal variability. In this sense this study aimed to analyze and quantify the AOD in the range of 550 nm (AOD 550 nm), from the products of remote

¹ PPG em Física Ambiental, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Cuiabá, MT, Brasil. E-mail para correspondência: rafael.pgfa@gmail.com.

² Curso de Geografia, Cidade Universitária, Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Cuiabá, MT, Brasil.

sensing, MOD04_L2 AND MOD08_D3 for aerosols MODIS sensor for the years 2010 to 2014, on the regions of Manaus, Santarém, Porto Velho, Rio Branco, Ji Parana and Cuiabá. It was noted that in all regions analyzed ODA 550 nm showed seasonal variation with the peaks reached in the dry season. The variability of space-temporal showed that regions of Manaus and district are less impacted by the increase of AOD 550 nm than other regions. In Manaus the averages for the entire period of study were 0.24 ± 0.26 and 0.20 ± 0.16 for the wet and dry seasons respectively, while for Ji Parana the averages for the entire period of study were 0.34 ± 0.43 and 0.14 ± 0.08 , reaching an average of 0.75 ± 0.69 for the dry season of 2010. It was noted that the spatial and temporal variabilities are directly related in all regions.

Keywords: AOD; MODIS Sensor; MOD04_L2; MOD08_D3; Seasonal Variation.

INTRODUÇÃO

O estudo da poluição atmosférica, assim como das alterações climáticas registradas ao longo das últimas décadas têm recebido uma atenção especial da comunidade científica. A presença de contaminantes ou substâncias em suspensão na atmosfera pode ocasionar diversos problemas de saúde e bem-estar, bem como provocar alterações locais, regionais e globais no meio ambiente (Seinfeld e Pandis, 2006). Os denominados aerossóis, material particulado em suspensão na atmosfera, são uma mistura complexa e extremamente variável de constituintes sólidos ou líquidos em suspensão no ar, tais composições podem incluir sais inorgânicos como nitratos, sulfatos e amônia, além de conter vários compostos de carbono (carbono elementar e carbono orgânico) (Seinfeld e Pandis, 2006).

As variações das propriedades óticas dos aerossóis atmosféricos influenciam fortemente os processos de transferência da radiação solar ao longo da atmosfera (Wright *et al.*, 2010; Alam *et al.*, 2011; Kumar, 2014; Kumar *et al.*, 2014). Os aerossóis atuam diretamente sobre o clima por meio da absorção e do espalhamento da radiação solar e indiretamente através da atuação como núcleos de condensação, o que pode modificar as propriedades físicas das nuvens e alterar os regimes de precipitação (Artaxo *et al.*, 2006; Wright *et al.*, 2010; Murthy *et al.*, 2014).

Através dos efeitos diretos (absorção e espalhamento), os aerossóis podem modificar os fluxos de energia sobre a superfície. A diminuição da radiação solar impacta diretamente o saldo de radiação livre aos processos físicos que ocorrem na superfície, de forma que os fluxos de calor sensível e latente possam também ser modificados. Tais alterações podem atingir o sistema hidrológico local através das alterações nos regimes de evapotranspiração (Artaxo *et al.*, 2006; Murthy *et al.*, 2014).

As regiões Norte e Central do Brasil são influenciadas significativamente pelas variações sazonais das concentrações e propriedades óticas dos aerossóis atmosféricos (Sena *et al.*, 2013). Na estação seca, os altos registros de queima de biomassa alteram fortemente as propriedades óticas dos aerossóis locais (Palácios *et al.*, 2014; Palácios *et al.*, 2015a; Palácios *et al.*, 2015b). A análise das variações locais das propriedades físicas dos aerossóis atmosféricos é de extrema importância para o entendimento dos processos de transferência de energia no sistema Terra-atmosfera. Tais análises podem ser realizadas por meio da profundidade ótica dos aerossóis (Balakrishnaiah *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2014).

A profundidade ótica dos aerossóis, AOD (do inglês, *Aerosol Optical Depth*), representa a atenuação

da radiação solar ao longo da coluna atmosférica em faixas específicas do comprimento de onda (Zhang *et al.*, 2014). Essa variável representa de forma satisfatória a variabilidade das propriedades físicas dos aerossóis.

A deficiência na instrumentação em campo para as mensurações das propriedades óticas dos aerossóis torna o sensoriamento remoto por satélites uma importante ferramenta para a estimativa e recuperação de medidas de aerossóis (Alam *et al.*, 2011). O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) tem se destacado em estudos de aerossóis atmosféricos (Remer *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2010).

Os registros da AOD sobre as regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil atingem valores máximos no período crítico da estação seca, geralmente no mês de setembro de cada ano (Sena *et al.*, 2013; Palácios *et al.*, 2014). Os máximos ocorrem justamente pelo alto índice de focos de queimadas sobre essas regiões para esse período (Palácios *et al.*, 2015a).

As médias de AOD variam significativamente de estação seca para estação chuvosa por conta das ocorrências de queimadas no Brasil (Artaxo *et al.*, 2013; Sena *et al.*, 2013). Apesar destas conhecidas variações periódicas, são escassos estudos que avaliam se a AOD vem se alterando nos últimos anos na Amazônia e se as variações ocorrem espacialmente de forma heterogênea. Nesse sentido, este trabalho objetivou analisar a variabilidade espaço-temporal da AOD 550 nm sobre a Amazônia através de produtos de sensoriamento remoto, quantificando as médias anuais das estações seca e chuvosa de diversas regiões na Amazônia Legal entre os anos 2010 e 2014.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A Amazônia brasileira (Figura 1) possui aproximadamente 5,5 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 60% da extensão territorial do Brasil. Esta região desempenha um papel crucial na regulação do clima (Holanda, 2015). Nesse estudo, foram abordadas 6 regiões dentro da Amazônia Legal: Manaus, Santarém, Porto Velho, Ji Paraná, Rio Branco e Cuiabá. Sobre essas regiões (Figura 1), foi extraído o produto de profundidade ótica de aerossóis AOD 550 nm do sensor MODIS. Sobre cada região, foi delimitado um retângulo de 2° por 2°, do qual foram extraídas as séries temporais de AOD 550 nm de 1 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2014.

A tabela 1 representa as coordenadas geográficas dos retângulos delimitadores de cada região abordada nesse estudo. Todas as regiões deste estudo pertencem à Amazônia Legal, entretanto, a região de Cuiabá está localizada no cerrado, enquanto as demais se encontram no bioma Amazônico com formações de florestas.

A estatística descritiva apresentada neste trabalho analisou a série temporal da AOD 550 nm para todo período em cada uma das regiões, assim como analisou as médias anuais para as estações seca e chuvosa de cada ano. A estação seca considerou os meses de agosto, setembro e outubro, e a estação chuvosa, os meses de fevereiro, março e abril.

O Produto MODIS para Profundidade Ótica de Aerossóis

O sensor MODIS está a bordo dos satélites Terra e Aqua, foi lançado através do programa EOS (*Earth Observing System*), da NASA, para obter medidas remotas das propriedades da atmosfera e da superfície sobre o continente e o oceano, e também para melhor compreender as quantificações dos aerossóis atmosféricos (Remer *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2010). Esse sensor possui dois algoritmos distintos e independentes para a obtenção da profundidade ótica dos aerossóis (AOD), um sobre o oceano (Tanré *et al.*, 1997; Tanré *et al.*, 1999) e o outro sobre os continentes (Kaufmam *et al.*, 1997).

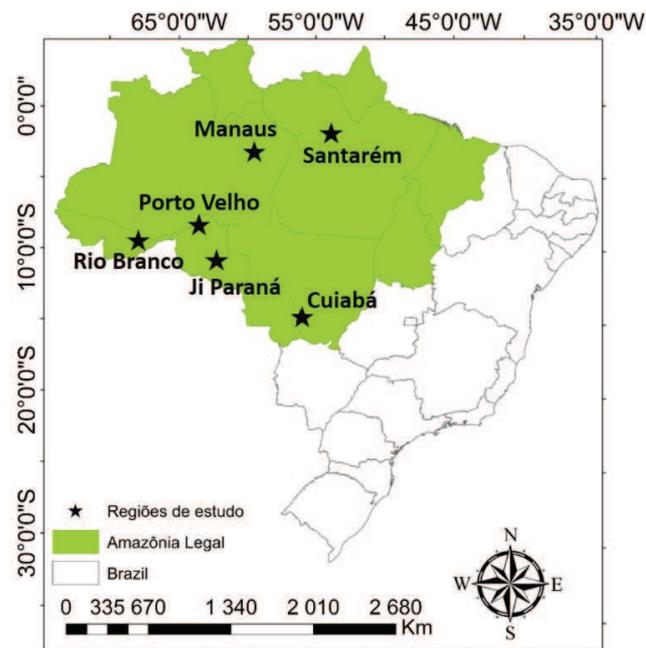


Figura 1. Representação das regiões abordadas nesse estudo dentro da Amazônia Legal.

Tabela 1. Coordenadas dos vértices dos retângulos delimitadores das regiões abordadas nesse estudo.

Região	Coordenadas	
	Sul (°)	Oeste (°)
Manaus	02,00 – 04,00	59,00 – 61,00
Santarém	02,00 – 04,00	54,00 – 56,00
Porto Velho	08,00 – 10,00	63,00 – 65,00
Ji Paraná	10,00 – 12,00	61,00 – 63,00
Rio Branco	09,00 – 11,00	67,00 – 69,00
Cuiabá	15,00 – 17,00	55,00 – 57,00

A obtenção da AOD através desses algoritmos resulta em um produto cuja resolução espacial é de 10 km por 10 km. O algoritmo do MODIS para aerossóis sobre o continente é baseado na técnica de ‘alvos escuros’, ou seja, baseia-se na detecção de superfícies escuras (Kaufmam *et al.*, 1997). A técnica faz o uso de três relações empíricas: (I) o efeito dos aerossóis na radiação solar decresce com o comprimento de onda em uma lei de potências de primeiro e segundo grau; (II) o efeito radiativo líquido sobre superfícies escuras indica que o espalhamento da radiação é predominante; e (III) a refletância de superfície, entre as

distintas faixas do espectro solar, apresenta graus de correlação bem definidos.

O método de detecção dos aerossóis é baseado em resultados empíricos. Para tanto, primeiramente determinam-se os pixels escuros da imagem no canal do infravermelho (2,1 μm), pela correlação existente entre o canal infravermelho e o visível. Assim, estima-se a refletância da superfície nos canais azul (0,47 μm) e vermelho (0,66 μm) (Kaufman *et al.*, 1997; Artaxo *et al.*, 2006). Dessa forma, determinam-se os tipos de aerossóis a partir de informações de sua distribuição média global e por meio das refletâncias do aerossol dos canais vermelho e azul (Artaxo *et al.*, 2006).

Neste trabalho, foram adquiridos os produtos de AOD 550 nm da coleção C005 (versão 5.1) de nível 2 e 3 do MODIS, adquiridos através da página do MODIS, disponível em <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>. O produto MOD04_L2 foi utilizado para caracterizar a distribuição espacial da AOD 550 nm em alguns dias de céu limpo, ou seja, sem a cobertura de nuvens para a área de estudo, este produto possui resolução espacial de 10 km por 10 km. Para a extração das séries temporais nas regiões específicas, foi utilizado o produto MOD08_D3 que possui resolução espacial de 1° por 1°, este produto apresenta um nível a mais de processamento, além de médias para análises globais com resolução temporal de um dia.

Processamento dos Dados MODIS para Aerossóis

Os arquivos fornecidos para o produto MOD04_L2 do sensor MODIS possuem o formato HDF (*Hierarchical Data Format*). Este arquivo possui um conjunto de dados de muitas variáveis organizadas no formato de matriz. Pastas contidas nesse arquivo fornecem as informações necessárias para localização geográfica de cada pixel, assim como para os fatores de conversão e os limites máximo e mínimo para cada variável. Este produto foi utilizado para representar alguns dias particulares para a distribuição espacial da AOD 550 nm com resolução espacial de 10 km por 10 km. As figuras geradas a partir deste produto foram desenvolvidas através de códigos de programação (MATLAB), conforme o trabalho de Castanho (2005).

As séries temporais obtidas para todas as regiões em estudo foram adquiridas através do produto MOD08_D3, também resultado das medidas do sensor MODIS (resolução espacial de 1° por 1°), extraídos diretamente através do aplicativo Giovanni da NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/documents/ag/user-manual>). As séries temporais foram tratadas utilizando estatística descritiva para as estações seca e chuvosa de cada região em estudo.

Modelo de Trajetórias para Aerossóis

Para analisar a variabilidade espacial da AOD 550 nm, este trabalho também utilizou o modelo de trajetórias HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrate Trajectory Model*), modelo utilizado para o cálculo de trajetórias e simulações de dispersão e deposição de partícula atmosférica (Draxler e Rolph, 2003). O modelo foi executado de forma interativa através da web (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). A versão disponível via web possui algumas limitações para evitar a saturação computacional do sistema. Entretanto, existe a opção do modelo na forma de código executável disponíveis para os sistemas

MS Windows e MACOS (Palácios *et al.*, 2016b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as regiões analisadas apresentaram uma clara variação sazonal para a AOD 550 nm (Figura 2), onde os máximos são atingidos na estação seca de cada ano. O ano de 2010 chama a atenção para os valores máximos da AOD 550 nm para praticamente todas as regiões, entretanto, para as regiões de Porto Velho, Rio Branco e Cuiabá, os valores máximos foram significativamente mais elevados.

A variabilidade sazonal da AOD 550 nm sobre a Amazônia já foi bem consolidada nos trabalhos de Artaxo *et al.* (2013) e Sena *et al.* (2013), e, embora a região de Cuiabá seja caracterizada por vegetação típica de cerrado (Rodrigues *et al.*, 2014), os trabalhos de Palácios *et al.* (2015a e 2016a) já constataram a influência dos aerossóis da região conhecida como “arco do desflorestamento” sobre a região sul do estado de Mato Grosso. O que chama a atenção na figura 2 é a intensidade dos valores de algumas regiões como Porto Velho, Rio Branco e Cuiabá com relação às demais.

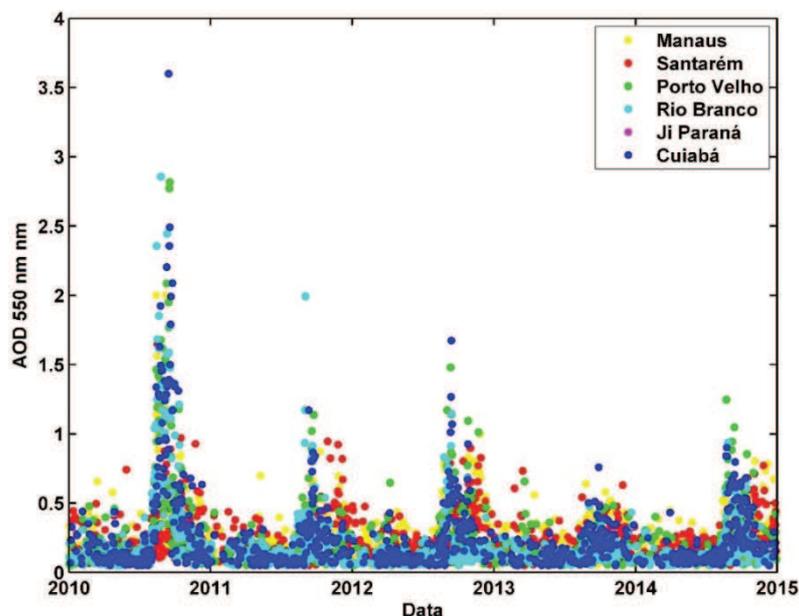


Figura 2. Distribuição temporal dos valores de AOD 550 nm (valores diários) sobre as regiões abordadas nesse estudo.

A distribuição temporal da AOD 550 nm (Figura 2) evidencia que, após os altos registros na estação seca de 2010, os valores da estação seca de 2011 sofreram uma pequena redução comparados ao ano anterior (Palácios *et al.*, 2015b). Estes registros voltaram a se elevar no ano de 2012 mantendo-se estável até 2014. A variabilidade dos valores de AOD 550 nm para as estações seca e chuvosa média e desvio padrão são representadas nas tabelas de 2 e 3.

A tabela 2 apresenta os valores de média e desvio padrão (DP) para as estações seca e chuvosa na região de Manaus. As estatísticas descritivas comprovam os resultados visualizados na Figura 2. Observa-se uma redução gradativa para os valores de AOD 550 nm de 2010 a 2014, que acontece tanto na estação seca como na estação chuvosa. A Tabela 2 ainda evidencia um maior valor de desvio padrão em todos os anos

para a estação seca, que ocorre devido principalmente a alta variabilidade da concentração de aerossóis devido a contribuição de partículas de queimadas na estação seca (Sena *et al.*, 2013).

A média da AOD 550 nm, com seu respectivo desvio padrão para Manaus, no ano de 2010, foi de 0.40 ± 0.41 na estação seca e de 0.22 ± 0.16 na estação chuvosa, evidenciando que, além do aumento dos valores da média da estação seca em relação a estação chuvosa, a variabilidade na estação seca é consideravelmente mais elevada, fato constatado pela análise dos valores de desvio padrão. Para o ano de 2011, a média para a estação seca, com seu respectivo desvio padrão, foi de 18 ± 0.18 , ou seja, menor que a média para a estação chuvosa do ano anterior. Como exposto por Palácios *et al.* (2015), este fenômeno está ligado à ocorrência dos focos de queimadas no Brasil para os anos de 2010 e 2011, ou seja, a redução dos registros de queimadas em 2011 quando comparado ao ano anterior.

Ainda para Manaus, observa-se (Tabela 2) a elevação para a média da AOD 550 nm no ano de 2012 com relação a 2011, seguido de uma redução em 2013 que se mantém em 2014. A média para a estação seca para todo o período de estudo foi de 0.24 ± 0.26 e para a estação chuvosa foi de 0.20 ± 0.16 . Comparando esses valores entre si, observa-se que praticamente não existe diferença entre as médias da estação seca e chuvosa, entretanto, os valores de desvio padrão evidenciam a grande variabilidade dos valores de AOD 550 nm para a estação seca.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para os valores diários de AOD 550 nm para as estações seca e chuvosa para a região de Manaus, Santarém e Porto Velho.

	Manaus	Santarém	Porto Velho
	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP
2010	0.4079±0.4162	0.3788±0.2486	0.6962±0.6241
2011	0.1805±0.1851	0.2417±0.1731	0.2287±0.2396
2012	0.3604±0.1804	0.3193±0.1623	0.2969±0.2944
2013	0.2446±0.1253	0.1572±0.1458	0.2047±0.0922
2014	0.2174±0.1682	0.1621±0.1591	0.2780±0.2573
Todo período de seca	0.2479±0.2623	0.2883±0.1844	0.3271±0.3990
2010	0.2247±0.1470	0.2228±0.0989	0.1850±0.1222
2011	0.0350±0.0720	0.1799±0.1038	0.1305±0.0711
2012	0.0728±0.1220	0.0614±0.1131	0.1601±0.1404
2013	0.0521±0.1067	0.0673±0.1373	0.1929±0.1412
2014	0.1916±0.1098	0.1704±0.0604	0.1596±0.0992
Todo Período de chuva	0.2053±0.1155	0.2050±0.1163	0.1676±0.1200

Para a região de Santarém (Tabela 2), o comportamento da AOD 550 nm é semelhante ao da região de Manaus. Percebe-se que os baixos valores encontrados para estas regiões, comparados aos das demais regiões, deve-se ao grande impacto dos aerossóis de queimadas levados através do transporte na atmosfera para as demais regiões. Na estação chuvosa, percebe-se baixos valores de desvio padrão, uma vez que praticamente não existe variabilidade dos valores de AOD 550 nm (Artaxo *et al.*, 2013).

Para Santarém, a média da AOD 550 nm para a estação seca de 2010, com seu respectivo desvio padrão, foi de 0.37 ± 0.24 e para a estação chuvosa, 0.22 ± 0.09 , ou seja, valores próximos aos encontrados

em Manaus. As médias para 2011 foram 0.24 ± 0.17 e 0.17 ± 0.10 para as estações seca e chuvosa, respectivamente. Observa-se que, assim como em Manaus, houve uma redução significativa dos valores de AOD 550 nm na estação seca de 2010 para 2011. A partir de 2012, a média para a estação seca volta a se elevar (Tabela 2), sobre uma pequena diminuição em 2013 e se mantém em 2014.

A média para todo período de estação seca em Santarém foi de 0.28 ± 0.18 e para a estação chuvosa 0.20 ± 0.11 , ou seja, quando comparado a região de Manaus verifica-se que, além da variabilidade da estação seca, essa região apresentou um maior valor de média para a estação seca quando comparada à estação chuvosa. A análise dos valores de desvio padrão deixa claro que na estação chuvosa, além dos baixos valores para as médias de todos os anos e para todo o período, praticamente não existe variabilidade para a AOD 550 nm.

Para as regiões de Porto Velho e Rio Branco (Tabelas 2 e 3), as médias anuais, tanto para a estação seca quanto para a estação chuvosa, são maiores do que das regiões de Manaus e Santarém, o que indica que estas regiões são mais impactadas tanto por aerossóis de queimadas locais como também por aerossóis de transporte na atmosfera (Palácios *et al.*, 2016b). As tabelas 4 e 5 representam as estatísticas descritivas para essas regiões. As médias para a AOD 550 nm de Porto Velho para 2010 foram 0.69 ± 0.62 e 0.18 ± 0.12 para as estações seca e chuvosa, respectivamente, ou seja, valores significativamente maiores que os encontrados para Manaus e Santarém.

O comportamento da AOD 550 nm ao longo da série temporal foi semelhante ao das regiões de Manaus e Santarém, diminuindo em 2011, se elevando em 2012, com uma pequena redução em 2013, que se mantém em 2014. As médias para todo o período para Porto Velho foram de 0.32 ± 0.39 e 0.16 ± 0.12 para as estações seca e chuvosa, respectivamente.

Para Rio Branco, a média para a estação seca de 2010 foi semelhante à de Porto Velho, 0.65 ± 0.62 , entretanto, não foi observado para esta região o mesmo comportamento que as demais regiões. No caso de Rio Branco, houve uma redução gradativa a partir de 2010 para os valores de AOD 550 nm.

As médias para todo o período foram de 0.27 ± 0.39 e 0.12 ± 0.06 para as estações seca e chuvosa, respectivamente. Assim como nas regiões analisadas anteriormente, observa-se uma alta variabilidade da AOD 550 nm na estação seca e pouca variação, quase nula, na chuvosa. A variação das médias da AOD 550 nm de região para região evidencia que o impacto das partículas de queima de biomassa atua de forma diferente de região para região, devido a movimentação das massas de ar e da direção predominante do vento na estação seca. O trabalho de Palácios *et al.* (2016b) retrata a influência do transporte de partículas na atmosfera e de como estas partículas podem influenciar regiões distantes de sua fonte de origem.

Para a região de Ji Paraná (Tabela 2), a média para a estação seca de 2010 atingiu 0.75 ± 0.69 , a maior média encontrada para a estação seca de todas as regiões estudadas; já para a estação chuvosa de 2010, a média foi de 0.16 ± 0.10 . Assim como para Porto Velho (região pertencente ao mesmo estado, Rondônia), observa-se que a AOD 550 nm sofreu uma redução significativa na estação seca de 2011 atingindo uma média de 0.22 ± 0.30 . Para o ano de 2012, os valores de AOD 550 nm voltam a se elevar na estação seca atingindo 0.39 ± 0.29 , diminuindo no ano seguinte (0.14 ± 0.15) e sofrendo, novamente, uma pequena elevação em 2014, atingindo 0.17 ± 0.20 . Ainda para a região de Ji Paraná, observa-se valores muito baixos

para a estação chuvosa, com baixos valores de desvio padrão, o que indica que praticamente não ocorre variabilidade para a AOD 550 nm na estação chuvosa, nessa região.

Tabela 3. Estatísticas descritivas para os valores diários de AOD 550 nm para as estações seca e chuvosa para a região de Rio Branco, Ji Paraná e Cuiabá.

	Rio Branco	Ji Paraná	Cuiabá
	Média ± DP	Média ± DP	Média ± DP
2010	0.6554±0.6235	0.7562±0.6960	0.6979±0.9117
2011	0.2233±0.3037	0.2209±0.2362	0.1852±0.2479
2012	0.2156±0.2494	0.3960±0.2952	0.4431±0.3429
2013	0.1644±0.0904	0.1454±0.1555	0.2601±0.1993
2014	0.1761±0.2035	0.1761±0.2035	0.3981±0.2319
Todo período de seca	0.2719±0.3965	0.3405±0.4345	0.3056±0.5126
2010	0.1322±0.0993	0.1683±0.1059	0.0701±0.1003
2011	0.0389±0.0685	0.1499±0.0729	0.1334±0.1017
2012	0.0244±0.0518	0.1419±0.0889	0.0639±0.1169
2013	0.0281±0.0588	0.1127±0.0606	0.1312±0.0941
2014	0.0949±0.0423	0.0949±0.0423	0.1496±0.0947
Todo Período de chuva	0.1227±0.0681	0.1456±0.0885	0.0553±0.0963

Já para a região de Cuiabá, os resultados encontrados (Tabela 2) se assemelham aos resultados encontrados para Ji Paraná, entretanto, observa-se que os valores para o desvio padrão são mais elevados na estação seca, o que indica que a variabilidade sobre essa região é ainda mais elevada que as demais regiões. A média para todo o período seco em Cuiabá chegou a 0.30 com um desvio padrão de 0.51. Já na estação chuvosa, observa-se que Cuiabá também apresentou baixa variabilidade para os valores de AOD 550 nm.

Um diferencial da região de Cuiabá com relação às demais regiões é que as características das propriedades de superfície são bem distintas. Para as regiões de Manaus e Santarém, embora regiões urbanas, a maior parte da área estudada tem característica de vegetação densa, floresta. Já Porto Velho, Rio Branco e Ji Paraná, embora os altos índices de desmatamento ocorridos nas últimas décadas, também possuem características gerais de floresta densa. Cuiabá é uma região com característica predominante de cerrado com uma mistura de floretas e vegetação rasteira, o que pode interferir no tipo de material particulado emitido pelas queimadas locais.

As variabilidades espacial e temporal da AOD 550 nm podem ser explicadas em função dos registros de queimadas e das movimentações das massas de ar no Brasil, a análise conjunta das figuras 3 e 4 deixa claro que tanto as regiões de floresta na Amazônia quanto as regiões de cerrado são impactadas diretamente pela queima de biomassa. Na figura 3, a somatória dos registros de queimadas dos meses de setembro para os anos 2010 e 2014 são evidenciados. Diferentemente da relação com as taxas de desflorestamento sobre a Amazônia legal, citado por Sena *et al.* (2013), os registros de queimadas explicam com muita eficiência as variações anuais da AOD sobre a região norte do Brasil.

De forma ilustrativa, a figura 4 representa a distribuição espacial para a média da AOD 550 nm para setembro dos anos 2010 e 2014. A figura evidencia como o ano de 2010 foi crítico para a elevação

dos valores máximos atingidos pela AOD 550 nm. Há alta variabilidade dos valores de desvio padrão encontrados na estação seca para todas as regiões em estudo. Praticamente todas as regiões em estudo foram fortemente influenciadas pela seca de 2010. O trabalho de Fuzzi *et al.* (2007) reporta a grande variabilidade da composição química dos aerossóis sobre a região Sul da Amazônia na estação seca devido a queima de biomassa na região do “arco do desflorestamento”, fato esse completamente relacionado à variabilidade da AOD sobre essa região.

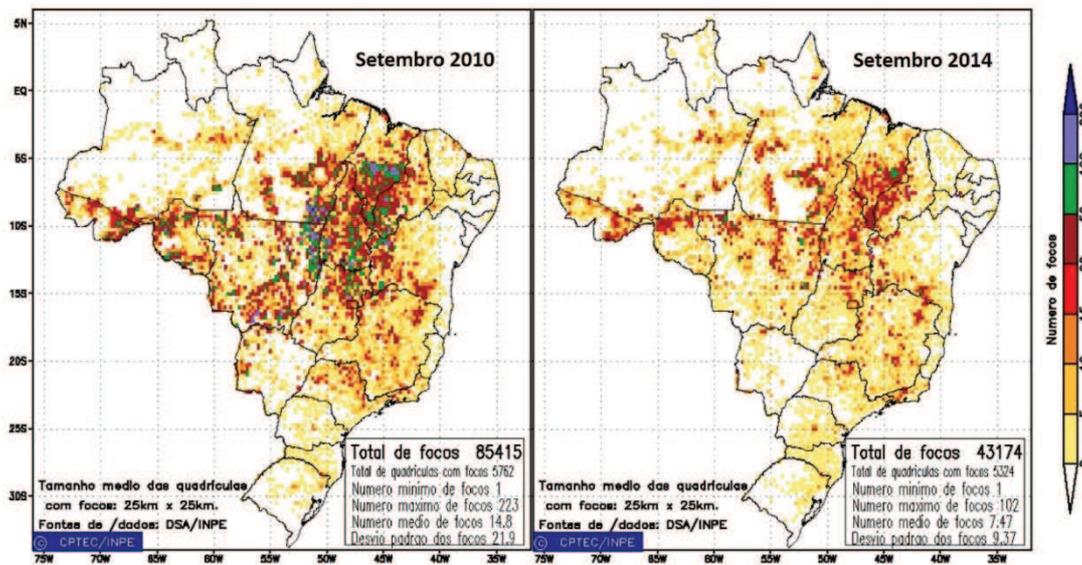


Figura 3. Focos de queimadas, registros acumulados para os meses de setembro dos anos 2010 e 2014, registros obtidos pelo satélite de referência AQUA_M-T (INPE, 2015).

Para o ano de 2010, a grande seca que atingiu o Brasil é particularmente reportada pelo trabalho de Marengo *et al.* (2011), assim como a grande quantidade de carbono lançado na atmosfera nesse ano. Os valores de AOD 550 nm encontrados nesse trabalho são consistentes quando comparados aos valores de AOD 550 nm divulgados no trabalho de Hoelzemann *et al.* (2009) sobre as regiões de Alta Floresta, Rio Branco e Cuiabá para o período de 2001 a 2007.

Os altos valores encontrados para o desvio padrão sobre todas as regiões comprovam a alta variabilidade da AOD sobre as regiões Norte e Centro-Oeste de Brasil, tanto na estação seca como na estação chuvosa. Em Ji Paraná e Cuiabá, ocorreram as maiores variações da AOD 550 nm. O trabalho de Sena *et al.* (2013) encontrou uma média de 0.31 para a AOD 550 nm sobre região de floresta na bacia Amazônica entre 2000 e 2009. Já o trabalho de Hoelzemann *et al.* (2009) obteve valores maiores para o período de 2001 a 2007, sobre todos os sítios abordados nesse estudo.

O motivo de tais variações pode ser explicado em função do período no qual é realizada a análise. Para o intervalo de 2001 a 2007, duas grandes secas ocorreram nos anos de 2005 e 2007 (Hoelzemann *et al.*, 2009), o que evidentemente elevou as médias da AOD. Já para o período de 2000 a 2009, os baixos registros de queimadas nos anos de 2008 e 2009 (Sena *et al.*, 2013) provocaram uma suave baixa nas médias da AOD sobre a mesma região.

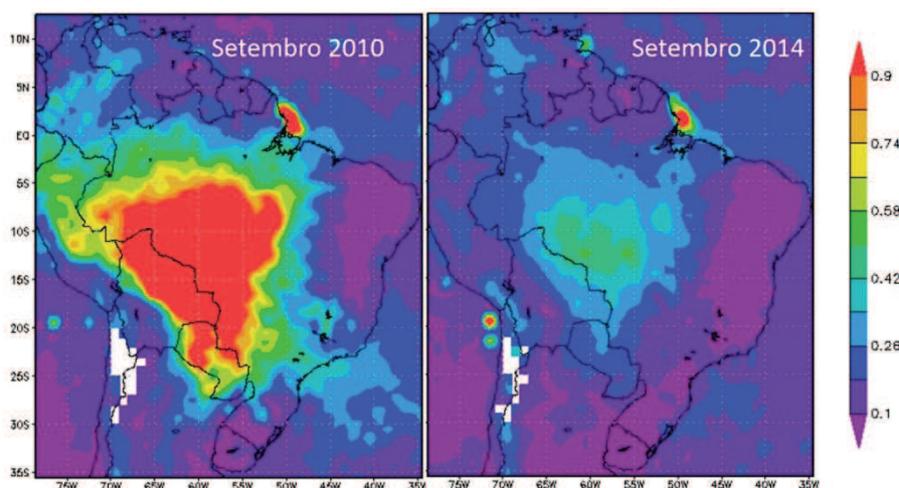


Figura 4. Produto de AOD 550 nm MOD08_D3 (resolução 1°) com médias dos meses de setembro para os anos de 2010 e 2014. Figura gerada pela plataforma Giovanni da NASA (http://disc.gsfc.nasa.gov/gesNews/giovanni_3_end_of_service/instance_id=MODIS_DAILY_L3).

Em um estudo local no Pantanal brasileiro, o trabalho de Palácios *et al.* (2016b) constatou que a variabilidade espacial da AOD 550 nm está associada diretamente à variabilidade temporal, que, por sua vez, é governada principalmente pelos registros de queimadas em todo o Brasil. Os altos registros de queimadas no Brasil (Figura 3) associadas a movimentação atmosférica tornam extremamente variável a distribuição espacial da AOD 550 nm em todo o Brasil.

A distribuição espacial da AOD 550 nm, com resolução espacial de 10 km por 10 km para os dias Julianos 258, 259 e 260, para os anos de 2010 e 2014, é apresentada na Figura 5. A distribuição espacial para o ano de 2010 evidencia e justifica todas as médias encontradas para a estação seca em todas as regiões de estudo para esse ano.

A distribuição espacial da AOD 550 nm para o ano de 2010 (Figura 5) evidencia os altos valores para a estação seca desse ano sobre todas as regiões abordadas nesse estudo, entretanto, foi observado que estatisticamente as regiões localizadas ao Oeste e ao Sul da Amazônia são mais impactadas pela variabilidade da AOD na estação seca. Na evolução de três dias (258-260), percebe-se uma pequena movimentação para os registros da AOD 550 nm em direção à região Centro-Oeste da Amazônia, o que explica os maiores registros e variações da AOD 550 nm sobre localizações próximas a Ji Paraná.

Assim como no trabalho de Palácios *et al.* (2016b), para os anos de maior variabilidade temporal, também houve maior variabilidade espacial. Esse fato é explicado a partir da comparação dos anos de 2010 e 2014 na figura 5. De modo geral, observa-se uma redução significativa dos valores da AOD 550 nm de 2010 para 2014 e, conseqüentemente, uma redução significativa da variabilidade espacial.

A aplicação do modelo de trajetórias HYSPLIT (Figura 6) para o dia 29 de setembro dos anos 2010 e 2011 evidencia que a direção predominante de vento e, conseqüentemente, a contribuição de aerossóis transportados na atmosfera praticamente não variam de ano para ano. Embora não estejam representados na figura, foram encontrados nos anos de 2011, 2012 e 2013. Observa-se na figura 6 que a movimentação das massas de ar e, portanto, o fluxo de aerossóis provenientes do transporte de longa distância entram ao Leste da atmosfera Amazônica seguindo em direção ao Oeste. Essa massa de ar, ao incidir na Cordilheira dos Andes, ganha uma componente sul se deslocando para a região central do Brasil. Esse fato justifica os

altos valores encontrados na região de Ji Paraná e Cuiabá, pois toda a emissão de aerossóis de queimadas na região Norte do estado de Mato Grosso e Sul do Amazonas impacta diretamente essas localidades. A movimentação predominante das massas de ar no período de estação seca juntamente com os altos registros de focos de queimadas explica porque a variabilidade espacial da AOD 550 nm é mais intensa nas regiões localizadas mais ao Oeste e Centro-Oeste da Amazônia.

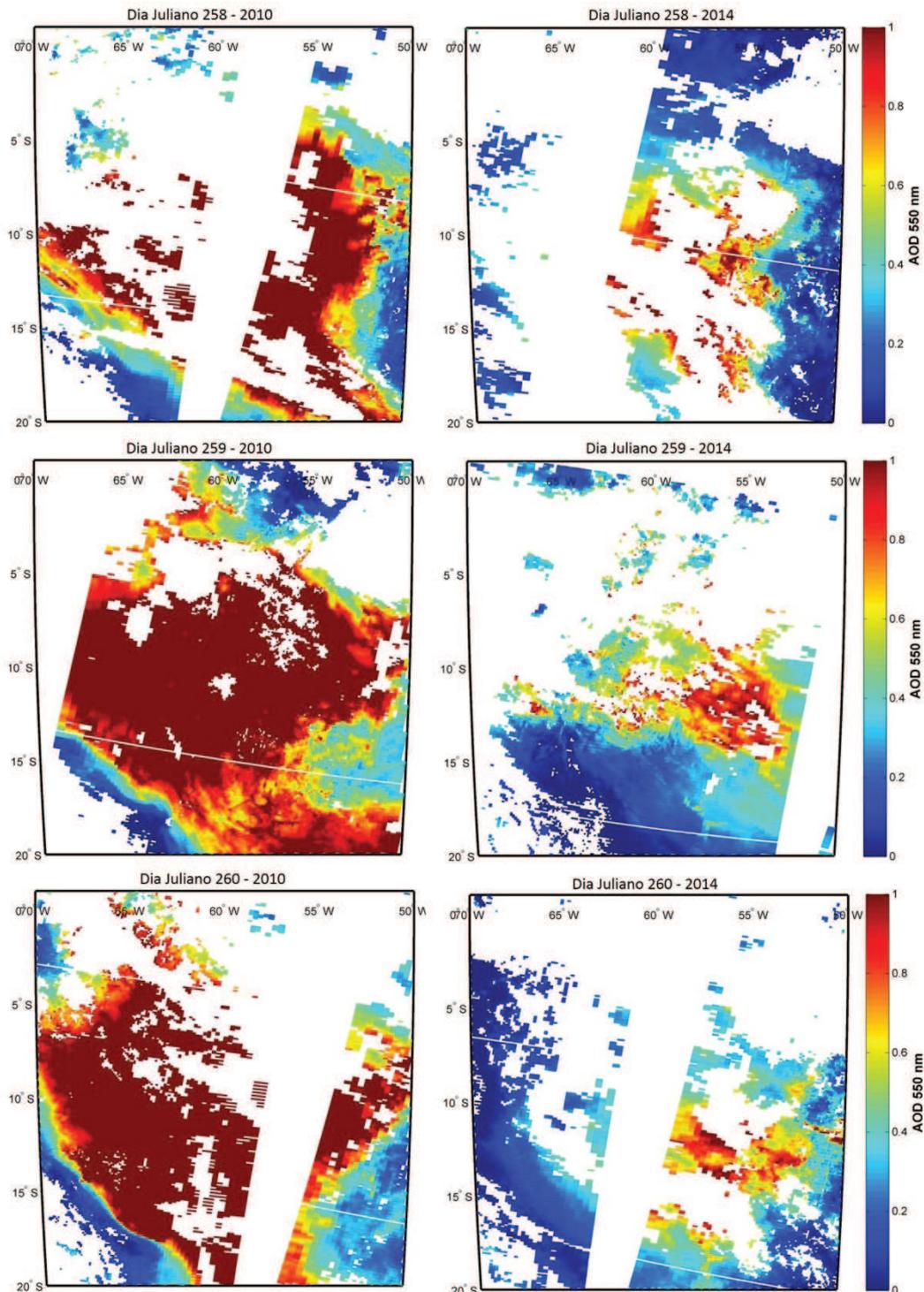


Figura 5. Distribuição espacial dos valores de AOD 550 nm extraídos do produto MOD04_L2 com resolução espacial de 10 km para os dias Julianos 258, 259 e 260, para os anos de 2010 e 2014.

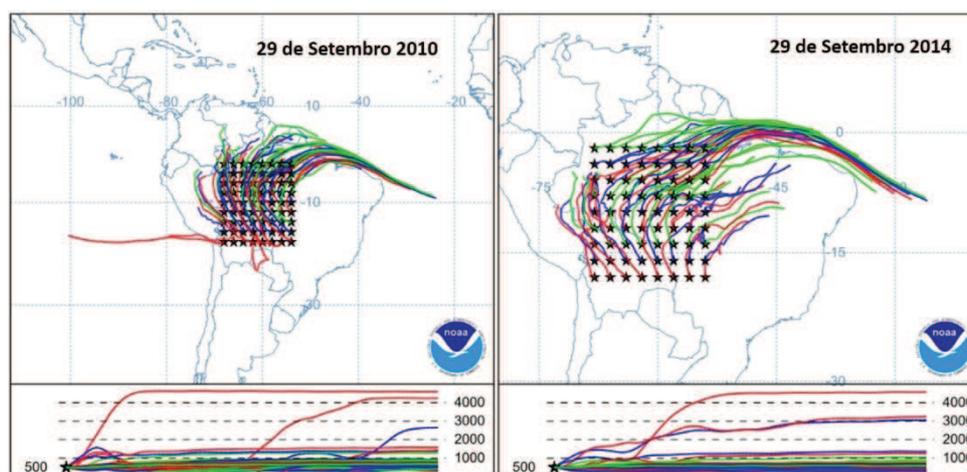


Figura 6. Matriz de trajetórias calculadas pelo NOAA HYSPLIT MODEL, Backward trajectories, para toda a área de estudo para os dias 29 de setembro de 2010 e 2014, integração para o cálculo de cada trajetória foi de 90 horas.

CONCLUSÕES

Foi verificado que, em todas as regiões analisadas, a AOD 550 nm apresentou variação sazonal com os máximos atingidos na estação seca. A análise da variabilidade espaço-temporal evidenciou que as regiões de Manaus e Santarém são menos impactadas pelo aumento da AOD 550 nm que as demais regiões. Em Manaus, as médias para todo o período de estudo foram de 0.24 ± 0.26 e 0.20 ± 0.16 para as estações seca e chuvosa, respectivamente; enquanto que, para Ji Paraná, as médias para todo o período de estudo foram de 0.34 ± 0.43 e 0.14 ± 0.08 para as estações seca e chuvosa, respectivamente, chegando a atingir uma média de 0.75 ± 0.69 para a estação seca de 2010. A região de Cuiabá apresentou médias semelhantes as de Ji Paraná, também com altos valores para o desvio padrão na estação seca, o que caracterizou a alta variabilidade da AOD 550 nm sobre essa região.

A evolução temporal da AOD 550 nm para praticamente todas as regiões estudadas apresentou um comportamento semelhante na estação seca, com as maiores médias em 2010, seguidas de uma significativa redução em 2011. No ano de 2012, os registros de AOD 550 nm voltaram a se elevar, reduzindo-se em 2013 e permanecendo praticamente constante em 2014. Nesse trabalho, foi constatado que a variabilidade espacial da AOD 550 nm possui uma estreita relação com a variabilidade temporal, que por sua vez está diretamente relacionada aos registros de queimadas no Brasil.

As médias para todo o período de estudo das estações seca e chuvosa para todas as regiões evidenciaram que, para a estação chuvosa, praticamente não existe variabilidade da AOD 550 nm, de modo que todas as regiões apresentaram valores de média extremamente baixos para a estação chuvosa.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES, pelo apoio financeiro (Processo nº 01439213127), ao grupo de pesquisa do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, Projeto de processo 457824/2013-1 aprovado na Chamada Nº 68/2013 MCTI/CNPq/FNDCT - Ação Transversal/LBA.

REFERÊNCIAS

- ALAM, K.; TRAUTMANN, T.; BLASCHKE, T. 2011. Aerosol optical properties and radiative forcing over mega-city Karachi. **Atmospheric Research**, **101**:773-782.
- ARTAXO, P. et al. 2006. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, **21**:167-189.
- ARTAXO, P. et al. 2013. Atmospheric aerosol in Amazonia and land use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, **13**:203-235.
- BALAKRISHNAIAH, G. et al. 2011. Analysis of optical properties of atmospheric aerosols inferred from spectral AODs and Ångström wavelength exponent. **Atmospheric Environment**, **45**:1275-1285.
- CASTANHO, A. D. A. 2005. **Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo**. Tese (Doutorado em Física) – Universidade de São Paulo, USP, 210 p.
- DRAXLER, R. R.; ROLPH, G. D. 2003. **HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) model access via NOAA ARL READY Website**. NOAA Air Resources Laboratory; Silver Spring; MD. Disponível em: <<http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>>. Acesso em: 25 nov 2015.
- FUZZI, S. et al. 2007. Overview of the inorganic and organic composition of size-segregated aerosol in Rondônia, Brazil, from the biomass-burning period to the onset of the wet season, **Journal of Geophysical Research**, **112**:D01201.
- HOELZEMANN, J. J. et al. 2009. Regional representativity of AERONET observation sites during the biomass burning season in South America determined by correlation studies with MODIS Aerosol Optical Depth. **Journal of Geophysical Research**, **114**:D13301.
- HOLANDA, B. A. 2015. **Absorção da radiação por aerossóis na Amazônia**. Dissertação (Mestrado em Física), São Paulo – Universidade de São Paulo, USP, 93p.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2015. **Portal do monitoramento de queimadas e incêndios**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/queimadas>>. Acesso em: 29 mar. 2015.
- KAUFMAN, Y. J. et al. 1997. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. **Journal of Geophysical Research**, **102**:17051-17067.
- KUMAR, A., 2014. Long term (2003-2012) spatio-temporal MODIS (Terra/Aqua level 3) derived climatic variations of aerosol optical depth and cloud properties over a semi arid urban tropical region of Northern India. **Atmospheric Environment**, **83**:291-300.
- KUMAR, K. R. et al. 2014. Long-term (2003-2013) climatological trends and variations in aerosol optical parameters from MODIS over three stations in South Africa. **Atmospheric Environment**, **95**:400-408.
- MARENGO, J. A. et al. 2008. Hydro-climatic and ecological behaviour of the drought of Amazonia in 2005, **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, **363**:1773-1778.
- MURTHY, B. S.; LATHA, R.; MANOJ KUMAR, M. N. C. 2014. Effect of aerosols on evapo-transpiration. **Atmospheric Environment**, **89**:109-118.
- PALÁCIOS, R. S. et al. 2016b. Variabilidade da profundidade ótica de aerossóis atmosféricos sobre o pantanal brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, **18**:27-37.
- PALÁCIOS, R. S.; SALLO, F. S.; NOGUEIRA, J. S. 2015b. Caracterização sazonal e interanual da profundidade ótica de aerossóis em região de transição Pantanal-cerrado no estado de Mato Grosso, Brasil. **HOLOS Environment**, **15**:92-99.
- PALÁCIOS, R. S.; SALLO, F. S.; NOGUEIRA, J. S. 2016a. Variability of aerosol optical depth over Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Environment and Ecology Research**, **4**:99-105.

- PALÁCIOS, R. S. et al. 2014. Análise da profundidade ótica de aerossóis e coeficiente de Angstrom no cerrado Mato-grossense. **Revista Brasileira de Climatologia**, **14**:173-185.
- PALÁCIOS, R. S. et al. 2015a. Estimativa da forçante radiativa de aerossóis sobre a superfície em região de transição Pantanal-Cerrado no estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, **16**:132-141.
- REMER, L. A. et al. 2005. The MODIS Aerosol Algorithm, products and validation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, **62**:847-973.
- RODRIGUES, T. R. et al. 2014. Seasonal variation in energy balance and canopy conductance for a tropical savana ecosystem of South central Mato Grosso, Brazil. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, **119**:1-13.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. 2006. **Atmospheric Chemistry and Physics: from air pollution to climate change**. New York: John Wiley & Sons, 1152p.
- SENA, E. T.; ARTAXO, P.; CORREIA, A. L. 2013. Spatial variability of the direct radiative forcing of biomass burning aerosol and the effects of land use change in Amazonia. **Atmospheric Chemistry and Physics**, **13**:1261-1275.
- TANRÉ, D. et al. 1997. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. **Journal of Geophysical Research**, **102**:16971-16988.
- WANG, L. et al. 2010. Assessment and comparison of three years of Terra and Aqua MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval (C005) in Chinese terrestrial regions. **Atmospheric Research**, **97**:229-240.
- WRIGHT, M. E. et al. 2010. Extensive aerosol optical properties and aerosol mass related measurements during TRAMP/TexAQS 2006 – Implications for PM compliance and planning. **Atmosphere Environment**, **44**:4035-4044.
- ZHANG, Z. et al. 2014. The contribution of different aerosol sources to the Aerosol Optical Depth in Hong Kong. **Atmospheric Environment**, **83**:145-154.