

INVESTIGANDO O CICLO DIURNO DE NUVENS E A DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DA PLUMA DE POLUIÇÃO DE MANAUS NA REGIÃO DA AMAZÔNIA CENTRAL COM DADOS DE UM CEILÔMETRO

Amanda Vieira dos Santos¹, Diego Alves Gouveia¹, Theotonio Pauliquevis² e Henrique de Melo Jorge Barbosa¹

¹Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

²Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, Brasil

Resumo

Nuvens são importantes agentes do sistema climático global. Apesar de sua importância, faltam observações com alta resolução temporal e espacial para reproduzir o seu ciclo diurno. Neste estudo, nossos principais objetivos foram investigar o ciclo diurno da cobertura de nuvens na região da Amazônia central nas estações chuvosa e seca de 2014 e 2015. Foram utilizados dados de um ceilômetro do sítio experimental T3-Manacapuru do experimento GoAmazon2014/5, a 60 km vento abaixo da cidade de Manaus. A detecção de nuvens foi feita através do uso de um algoritmo desenvolvido em nosso laboratório, adaptado para o ceilômetro. Verificamos que a ascensão do LCL coincide com o aumento da fração de cobertura de nuvens ao longo do tempo. Observou-se que a máxima fração de cobertura de nuvens em função da altitude durante a estação chuvosa é de 14%, com mais nuvens rasas (< 1 km) sendo detectadas. Durante a estação seca, a máxima fração de cobertura nuvens é de 4%, com mais nuvens sendo detectadas entre 1 e 2 km.

Palavras-chave: nuvens; lidar; Amazônia

Abstract

Clouds are important agents in the global climate system. Despite their importance, there is a lack of observations with high temporal and spatial resolutions to reproduce their diurnal cycle. In this study, our main goal was to investigate the diurnal cycle of cloud coverage in central Amazon during the wet and dry seasons of 2014 and 2015. We used data from a ceilometer located at the T3-Manacapuru experimental site of the GoAmazon2014/15 experiment, 60 km downwind from the city of Manaus. Clouds were detected by an algorithm developed at our laboratory, adapted for the ceilometer. We verified that the ascension of LCL coincides with the increase of the cloud fraction. During the wet season, we observed a maximum of cloud fraction as a function of height of 14%, with more shallow clouds (<1 km) detected than at any other height. During the dry season, the maximum cloud fraction as a function of height was around 4%, with more clouds being detected from 1 to 2 km.

Keywords: clouds; lidar; Amazon

1 Introdução

As nuvens e os aerossóis têm importante papel nos processos atmosféricos e no balanço de radiação da Terra. Nuvens baixas tendem a esfriar o planeta, pois refletem parte da radiação solar ao mesmo tempo que emitem radiação infravermelha. Já nuvens altas tendem a esquentar o planeta, pois são transparentes à radiação solar e emitem pouca radiação infravermelha. Por sua vez, a maioria dos tipos de aerossóis refletem a radiação solar, resfriando o planeta, enquanto alguns absorvem esta radiação (black carbon e brown carbon), aquecendo-o. Neste sentido, entender o ciclo de vida das nuvens e dos aerossóis é de significativa importância. A Amazônia tem intensa atividade convectiva durante todo o ano (MACHADO; LAURENT; LIMA, 2002; GOUVEIA et

al., 2017) e um papel importante no ciclo hidrológico global, com sua extensa cobertura de nuvens (BETTS et al., 2009; MACHADO et al., 2004) impactando o balanço de radiação da Terra. Com o clima global sofrendo alterações a Amazônia provavelmente sofrerá uma mudança de paradigma, com consequências significativas para o clima local e global (DAVIDSON et al., 2012). As concentrações de aerossóis na região, por exemplo, variam de condições pristinas a poluídas, seguindo o ciclo sazonal de desmatamento e queimadas (ARTAXO et al., 2013). Apesar de sua importância, modelos atmosféricos regionais e globais, com convecção parametrizadas, ainda não representam corretamente a convecção, o ciclo diurno das nuvens e a precipitação na Amazônia (e.g. BETTS; JAKOBS, 2002; GRABOWSKY et al., 2006). A falta de observações de longo prazo nas escalas convectivas (2-20 km, 5-60 min) era uma das principais dificuldades na compreensão do ciclo de vida da convecção tropical (ADAMS; SOUZA; COSTA, 2009).

O experimento Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5) aconteceu em Manacapuru-AM entre janeiro de 2014 e dezembro de 2015 (MARTIN et al., 2016) e forneceu medidas de longa duração com resolução espacial e temporal adequada para o estudo de nuvens e convecção na Amazônia. Situado 60 km vento abaixo de Manaus, o local apresenta condições poluídas quando o vento está na direção do sítio experimental, e condições pristinas quando a pluma de poluição de Manaus é desviada pelo vento para outras direções. Os dados deste experimento têm possibilitado estudar o efeito da emissão de poluentes nas propriedades dos aerossóis na floresta tropical (e.g. THALMAN et al., 2017) e das nuvens (e.g. CECCHINI et al., 2016).

Neste trabalho, utilizamos dados do GoAmazon2014/5 para investigar o ciclo diurno de nuvens na região da Amazônia Central nas estações chuvosas e secas de 2014 e 2015. Na seção 2.1, especificamos o instrumento usado para a realização das medidas e falamos sobre o sítio experimental em que foram realizadas. Na seção 2.2 apresentamos o algoritmo usado para a detecção das bases de nuvens. Os resultados são apresentados na seção 3. A seção 4 apresenta as conclusões.

2 Materiais e métodos

2.1 Sítio experimental e instrumentação

O T3-Manacapuru foi um sítio experimental do *Atmospheric Radiation Measurement* Climate Research Facility/Department of Energy (ARM/DOE) dos EUA. Está localizado a 60 km a oeste de Manaus (3°12'47.82" S, 60°35'55.32' W), com direção preferencial do vento indo de Manaus para o T3 na maior parte do tempo. Maiores detalhes do sítio experimental e do experimento GoAmazon2014/15 podem ser encontrados em Martin et al. (2016).

O instrumento utilizado aqui, um ceilometer Vaisala modelo CL31, coleta dados em uma média temporal de 16 segundos, com resolução vertical de 10 m, alcance máximo vertical de 7700 m e seu laser tem comprimento de onda de 910 nm. Seu campo de visão tem divergência de $\pm 0,83$ mrad. Os dados já são processados e são fornecidas as alturas de até três bases de nuvem. O instrumento aplica *flags* de qualidade, monitorando os valores mínimos e máximos das variáveis fornecidas.

2.2 Alturas de base e topo de nuvens

Para detectar nuvens nos perfis verticais medidos pelo ceilômetro, adaptamos um algoritmo desenvolvido em nosso laboratório para nuvens *cirrus* (GOUVEIA, 2014). No caso de nuvens baixas, o algoritmo funciona considerando que, em uma atmosfera limpa, a intensidade do sinal decresce monotonicamente com a altitude. Um incremento abrupto do sinal ocorre na presença de nuvens, e um incremento suave, na presença de aerossóis. O perfil vertical é dividido em duas regiões. Acima de 3 km, considera-se que o espalhamento por moléculas ou aerossóis é praticamente zero, assim um pico no espalhamento é considerado como nuvem. Para a região abaixo de 3 km, o espalhamento devido a nuvens é consideravelmente maior que aquele de aerossóis, sendo possível identificar o que é nuvem ao comparar com o espalhamento típico de aerossóis e nuvens na região. É feita então uma aproximação do valor esperado usando a média dos pontos acima e abaixo da altitude analisada. O limiar dessa região é definido como o valor do retroespalhamento mais um múltiplo do erro estatístico que depende da altura. Assim, a altitude da base da nuvem está onde o sinal é maior que este limiar. O topo da nuvem, por sua vez, está onde o sinal volta a estar abaixo deste limiar. É importante observar que o sinal do laser pode não atravessar uma camada de nuvem espessa, quando o topo é então considerado como aparente.

Na figura 1 estão representados os sinais em diferentes resoluções temporais: em azul, a resolução original de 16 segundos, em vermelho, o sinal após aplicar uma média de 2 minutos e, em azul, de 5 minutos. Também foram incluídos nos gráficos as alturas de bases de nuvens fornecidas pelo instrumento (preto), e as encontradas pelo nosso algoritmo de detecção (nas mesmas cores que suas respectivas resoluções temporais). A vantagem do uso desse algoritmo em comparação com os dados informados pelo fabricante, é que, além de termos a informação das alturas dos topos das nuvens, o algoritmo também permite encontrar mais que três camadas de nuvens.

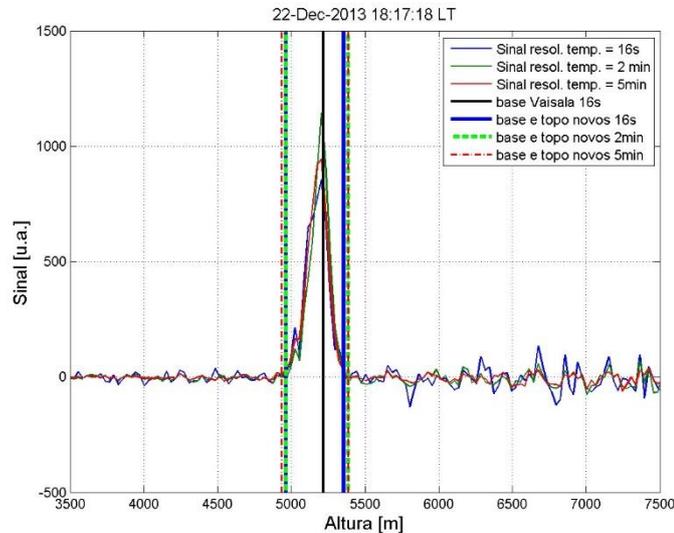


Figura 1 – Exemplo de um perfil vertical da variável de retroespalhamento com resolução temporal original de 16s (azul) e com médias temporais de 2 e 5 min (verde e vermelho), com a indicação da altura da base dada pelo instrumento em preto e a base e topo calculados pelo algoritmo de detecção para as 3 resoluções temporais.

3 Resultados e discussões

3.1 Altitudes das bases

Com o algoritmo, foram obtidas as alturas de bases de nuvens para as estações secas (julho a setembro) e chuvosas (janeiro a março) de 2014 e 2015, e foi calculado o número de bases de nuvens detectadas durante a estação seca e chuvosa dos dois anos. A figura 2 mostra o histograma de altura de bases de nuvens detectadas em função da altitude, separados em classes (intervalos) verticais de largura 125 m e com a resolução temporal original de 16 segundos. O número de bases de nuvem detectadas é consideravelmente maior durante as estações chuvosas de 2014 e 2015 do que durante as estações secas desses mesmos anos. Para os dois anos, os histogramas são surpreendentemente similares, com os picos nas mesmas altitudes, e com praticamente o mesmo número de nuvens detectadas. A exceção é a região abaixo de 1500m durante a estação seca. Esta faixa de altura (de até 1500 m) é associada a convecção local. A menor quantidade de bases de nuvens detectada nesta camada está provavelmente associada ao forte El Niño ocorrido em 2015 (BUENO, 2018), que reconhecidamente intensifica a magnitude dos períodos secos na região. Dessa, forma a subsidência em larga escala gerada pelo El Niño é a explicação mais provável para tal diferença.

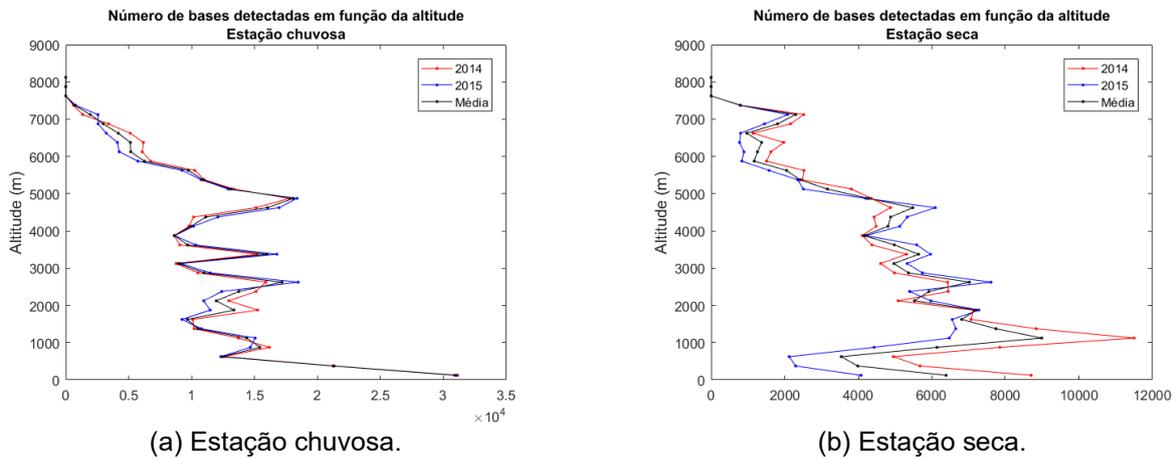


Figura 2 – Histogramas do número total de bases para 2014 e 2015. A figura 2a mostra a estação chuvosa (janeiro a março). A figura 2b mostra a estação seca (julho a setembro).

3.2 Frequência de ocorrência na vertical

Como também temos informação da altitude do topo, é possível calcular a distribuição vertical da fração de cobertura de nuvens. Para calculá-la, somamos o número de perfis em que foram detectadas nuvens e dividimos pelo número total de perfis, em cada bin de altura. A figura 3 apresenta o perfil vertical da fração de cobertura de nuvens para as estações secas e chuvosas dos dois anos de dados.

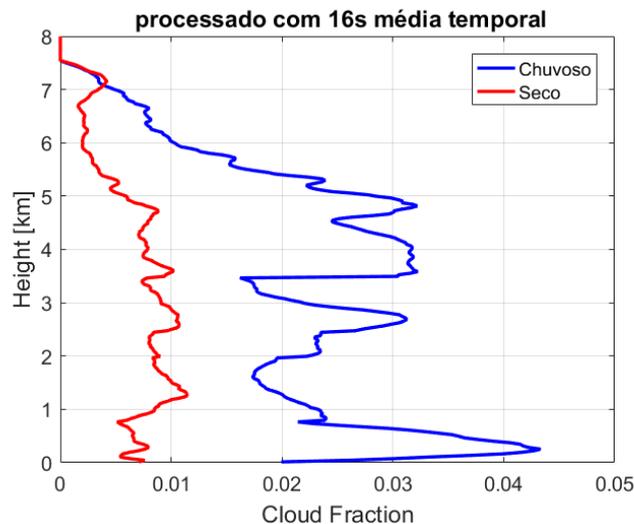


Figura 3 – Fração de cobertura de nuvens em função da altura para as estações chuvosa e seca para os dois anos de dados.

Para a estação chuvosa, a fração de cobertura média máxima é aproximadamente de 4.3% para as nuvens rasas em alturas por volta de 0.5 km. Já para a estação seca foi calculada para nuvens com altura por volta de 1.3 km, onde a fração de cobertura é aproximadamente 1.1%. Durante a estação chuvosa a maior cobertura de nuvens aconteceu em alturas mais baixas que aquelas durante a estação seca. A fração de cobertura de nuvens também tem vários máximos para a estação chuvosa, enquanto na estação seca também há vários picos, mas os valores dos máximos são menores.

3.3 Ciclo diurno e LCL

Estratificando os resultados anteriores em função da hora da observação, temos, nos gráficos da figura 4, o ciclo diurno da fração de cobertura de nuvens. Também estão indicadas as altitudes do LCL (lifted condensation level) médios nos cinco horários de lançamento das radiossondas no sítio experimental T3. Pode-se observar uma boa concordância entre LCL das radiossondas e alturas de bases após 15h (UTC), enquanto os horários mais cedo os valores da radiossonda são muito mais altos. De fato, à tarde, quando a atmosfera é mais misturada, faz muito mais sentido a concordância uma vez que as nuvens baixas são produto de ascensão de parcelas de ar. Já de noite e de manhã a convecção ainda é fraca, e claramente o LCL não é um bom estimador da altura da base das nuvens.

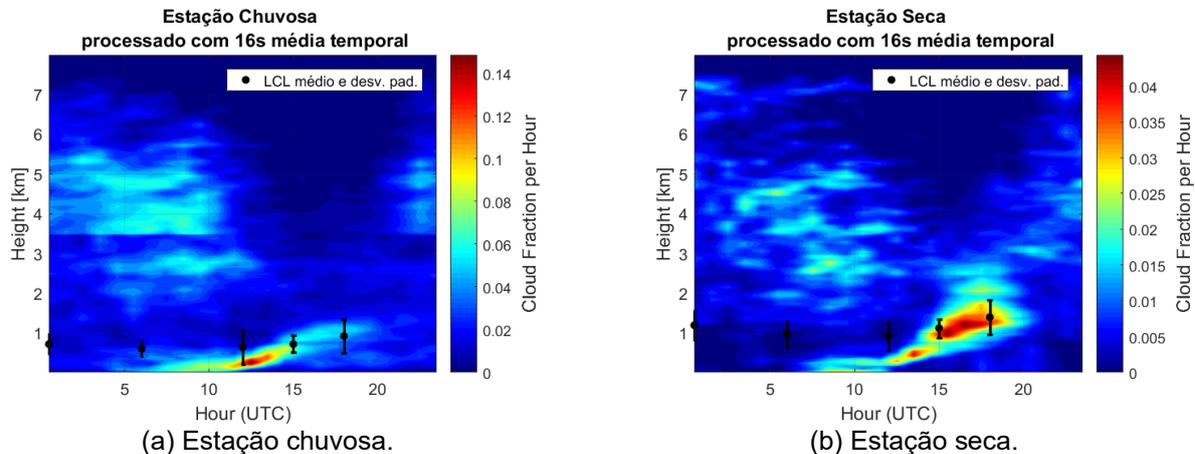
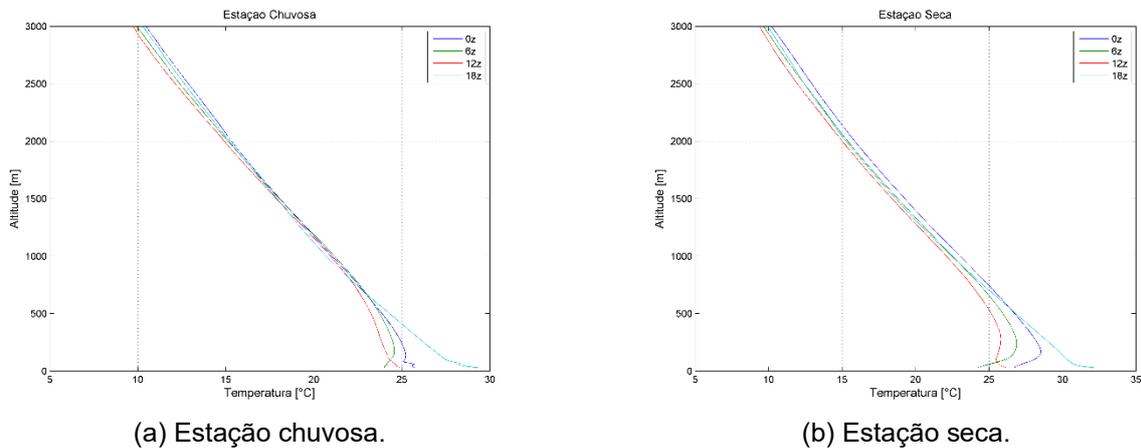


Figura 4 – Ciclo diurno das nuvens para os dois anos de dados. A figura 4a mostra a estação chuvosa (janeiro a março). A figura 4b mostra a estação seca (julho a setembro).

Durante a estação chuvosa, o máximo de fração de cobertura média chega a aproximadamente 14%, e há mais nuvens abaixo de 1 km, com formação de nuvens rasas durante a noite no horário local, e a altitude de formação de nuvens subindo ao longo do dia, com o desenvolvimento da camada limite planetária. Na estação seca a cobertura de nuvens média máxima é menor, chegando a 4%, e não se observa muitas nuvens rasas. O LCL da estação chuvosa é mais baixo que na estação seca, o que corresponde com a formação mais baixa das nuvens nessa estação. O LCL médio da estação chuvosa não varia muito, e na estação seca os valores do LCL médio, que são por volta ou acima de 1 km, aumentam ao longo do dia, coincidindo com os horários de ascensão das nuvens. A fração de cobertura por hora é menor para a estação seca que para a estação chuvosa, já que a altitude mais alta do LCL médio limita a formação de nuvens na estação seca.

A figura 5 mostra dados de temperatura obtidos por radiossondagens em Manacapuru para os dois anos de dados. A temperatura está em função da altura e da hora do dia.



(a) Estação chuvosa.

(b) Estação seca.

Figura 5 – Temperatura em função da altitude e hora do dia obtida por radiosondagem para os dois anos de dados. A figura 5a mostra a estação chuvosa (janeiro a março). A figura 5b mostra a estação seca (julho a setembro).

Na figura 5a, por volta das 18h00 UTC (14h00 hora local), a temperatura próxima do chão é aproximadamente 5 °C maior que nos outros quatro horários. A figura 4a mostra que esse é o horário em que são detectadas menos nuvens altas. Uma temperatura mais alta torna o perfil mais instável, e as nuvens baixas espessas associadas a chuva fazem com que o sinal se extinga.

Ainda na figura 5a, às 00h00 UTC (20h00 hora local), a temperatura próxima ao solo diminuiu. A figura 4a mostra que nesse horário não são detectadas muitas nuvens, e o instrumento consegue detectar tanto nuvens baixas como nuvens altas. Às 06h00 UTC, a figura 5a mostra que a temperatura próxima ao solo continuou a cair e, nesse horário, a maior cobertura de nuvens acontece para nuvens aproximadamente entre 3.5 e 5.5 km de altitude. Por último, para as 12h00 UTC (08h00 hora local), a incidência da radiação solar aumenta a temperatura próxima ao solo, e para esse horário, a maior fração de cobertura de nuvens acontece próximas ao solo.

Para a estação seca, a figura 5b mostra que, novamente, entre os 4 horários representados, a maior temperatura acontece às 18h00 UTC, sendo a temperatura perto do solo nesse horário maior para a estação seca que para a estação chuvosa. A fração de cobertura é maior para nuvens baixas, e são detectadas poucas nuvens altas. Às 00h00 UTC, a temperatura diminui e há menos instabilidade. Esse é o horário em que mais são detectadas nuvens acima de 5 km. Às 06h00 UTC, a temperatura continuou a diminuir, o perfil ficou ainda menos instável, e o ceilômetro conseguiu detectar tanto nuvens baixas, como altas. Às 12h00 UTC, com o aumento da incidência de radiação solar, a temperatura próxima ao solo começa a aumentar, e o ceilômetro mede mais nuvens baixas e poucas nuvens altas.

4 Conclusão

Foram obtidos o ciclo diurno das nuvens na região da Amazônia Central para os anos de 2014 e 2015, e o ciclo diurno e número de bases de nuvens detectadas foram comparadas para as estações chuvosa e seca dos dois anos. Foi observado que há um número consideravelmente maior de nuvens detectadas na estação chuvosa, acompanhado pelo aumento da fração de cobertura de nuvens por hora, que chega por volta de 14% na estação chuvosa e por volta de 4% na estação seca. Na estação chuvosa, há mais nuvens abaixo de 1 km, com formação de nuvens rasas à noite e com a altitude de formação aumentando durante o dia. Também foi observado que na estação seca a formação de nuvens rasas no começo da manhã é menor que durante a estação chuvosa, sendo a maior cobertura de nuvens durante o dia entre 1 e 2 km.

Referências Bibliográficas

- ADAMS, D.K.; SOUZA, E. P.; COSTA, A. A. Convecção úmida na Amazônia: implicações para modelagem numérica. **Rev. Bras. Meteorol.**, v. 24, p. 168-178, 2009.
- ARTAXO, P.; RIZZO, L. V.; BRITO, J. F.; BARBOSA, H. M. J.; ARANA A.; SENA, E. T.; CIRINO, G. G.; BASTOS, W.; MARTIN, S. T.; ANDREAE, M. O. Atmospheric aerosols in Amazonia and land

- use change: from natural biogenic to biomass burning conditions. **Faraday Discussions**, v. 165, p. 203-235, 2013.
- BECHTOLD P.; CHABOUREAU, J.-P.; BELJAARS, A.; BETTS, A. K.; KÖHLER, M.; MILLER, M.; REDELSPERGER, J.-L. The simulation of the diurnal cycle of convective precipitation over land in a global model. **Journal Research Meteorological Society**. v. 130, p. 3119-3137, 2004.
- BETTS, A. K.; JAKOBS, C. Evaluation of the diurnal cycle of precipitation, surface thermodynamics and surface fluxes in the ECMWF model using LBA data. **Journal of the Geophysical Research**, v. 107, 2002.
- BETTS, A. K.; FISCH, G.; VON RANDOW, C.; SILVA DIAS, M. A. F. The Amazonian Boundary Layer and Mesoscale Circulations. Amazonia and Global Change, M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, and P.L. Silva Dias, Eds., Vol. 186 of Geophysical Monograph Series, American Geophysical Union, Washington, D. C., p. 163–181, 2009.
- BUENO, P. B. **Sistemas meteorológicos atuantes durante o experimento GoAmazon2014/15 e impactos no conjunto de dados coletados**. 155 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.
- CECCHINI, M. A.; MACHADO, L. A. T.; COMSTOCK, J. M.; MEI, F.; WANG, J.; FAN, J.; TOMLINSON, J. M.; SCHMID, B.; ALBRECHT, R.; MARTIN, S. T.; ARTAXO, P. Impacts of the Manaus pollution plume on the microphysical properties of Amazonian warm-phase clouds in the wet season, **Atmos. Chem. Phys.**, v. 16, p. 7029-7041, 2016.
- DAVIDSON, E. A.; de ARAÚJO, A. C.; ARTAXO, P.; BALCH, J. K.; BROWN, I. F.; BUSTAMANTE, M. C.; COE, M. T.; DEFRIES, R. S.; KELLER, M.; LONGO, M.; MUNGER, J. W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B. S.; SOUZA, C. M.; WOFSY, S. C. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, p. 321 – 328, 2012.
- GOUVEIA, D. A. **Caracterização de nuvens cirrus na região da Amazônia central utilizando um lidar em solo**. 2014. 96 f. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- GOUVEIA, D. A.; BARJA, B.; BARBOSA, H. M. J.; SEIFERT, P.; BAARS, H.; PAULIQUEVIS, T.; ARTAXO, P. Optical and Geometrical Properties of *cirrus* Clouds in Amazonia Derived From 1-year of Ground-based Lidar Measurements, **Atmos. Chem. Phys.**, v. 17, p. 3619-3636, 2017.
- GRABOWSKI, W.; BECHTOLD, P.; CHENG, A.; FORBES, R.; HALLIWELL, C.; KHAIROUTDINOV, M.; LANG, S.; NASUNO, T.; PETCH, J.; TAO, W.; WONG, R.; WU, X.; XU, K. Daytime convective development over land: A model intercomparison based on LBA observations. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, p. 317-344, 2006.
- MACHADO, L.; LAURENT H.; LIMA, A. A. Diurnal march of the convection observed during TRMM-WETAMC/LBA. **J. Geophys. Res-Atmos**, v. 107, 8064, 2002.
- MACHADO, L.; LAURENT, H.; DESSAY, H.; MIRANDA, I. Seasonal and diurnal variability of convection over the Amazonia: A comparison of different vegetation types and large scale forcing. **Theor. Appl. Clim.**, v. 78, p. 61–77, 2004.
- MARTIN, S. T.; ARTAXO, P.; MACHADO, L. A. T.; MANZI, A. O.; SOUZA, R. A. F.; SCHUMACHER, C.; WANG, J.; ANDREAE, M. O.; BARBOSA, H. M. J.; FAN, J.; FISCH, G. GOLDSTEIN, A. H.; GUENTHER, A.; JIMENEZ, J. L.; PÖSCHL, U.; SILVA DIAS, M. A.; SMITH, J. N.; WENDISCH, M. Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5), **Atmos. Chem. Phys.**, v. 16, p. 4785- 4797, 2016.
- THALMAN, R.; SÁ, S. S. de; PALM, B. B.; BARBOSA, H. M. J.; PÖHLKER, M. L.; ALEXANDER, M. L.; BRITO J.; CARBONE, S.; CASTILLO, P.; DAY, D. A.; KUANG, C.; MANZI, A.; NG, N. L.; SEDLACEK III, A. J.; SOUZA, R.; SPRINGSTON, S.; WATSON, T.; PÖHLKER, C.; PÖSCHL, U.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; JIMENEZ, J. L.; MARTIN, S. T.; WANG, J. CCN activity and organic hygroscopicity of aerosols downwind of an urban region in central Amazonia: seasonal and diel variations and impact of anthropogenic emissions. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 17, p. 11779–11801, 2017.