



## Comparação das Propriedades Microfísicas de Diferentes Tipos de Nuvens em Duas Regiões Tropicais com Ecossistemas Distintos Usando Dados do Satélite CloudSat

Comparison of Microphysical Properties of Clouds in Two Regions Tropical With Distinct Ecosystems Using Satellite Data from CloudSat

Leonardo Abreu Jorge Justo & Jose Ricardo de Almeida França

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,  
Departamento de Meteorologia. 21.941-916. Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
E-mails: leonardo\_ajj@hotmail.com; jricardo@igeo.ufrj.br*

Recebido em: 18/05/2015 Aprovado em: 21/12/2015

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2016\\_1\\_111\\_126](http://dx.doi.org/10.11137/2016_1_111_126)

### Resumo

A metodologia abordada neste trabalho tem como objetivo representar o comportamento médio da estrutura microfísica de diferentes tipos de nuvens formadas em duas regiões com ecossistemas distintos. As regiões escolhidas foram localizadas no Centro-Oeste do Brasil (coordenadas: 12-18 °S e 46-58 °O) e sobre o Oceano Atlântico Sul (coordenadas: 12-25°S e 9-30°O). Para a realização deste trabalho foram utilizados dados do satélite CloudSat, coletados dentro de um período de aproximadamente 5 anos (06/2006-04/2011). Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que, há pouca variação na estrutura microfísica entre as nuvens continentais e marinhas nas regiões analisadas. A média do raio efetivo da gota (partícula de gelo) feita em todos os tipos de nuvens analisados foi de 12,4 μm (71,9 μm) nas nuvens marinhas e 11,0 μm (72,9 μm) nas nuvens continentais. A distribuição do tamanho das partículas (concentração em função do tamanho) nas nuvens se mostrou mais eficiente para discriminar as características microfísicas de cada tipo de nuvem, tornando possível identificar as particularidades na estrutura microfísica de cada tipo de nuvem. Os resultados mostraram que mesmo no período com maior concentração de aerossóis observado no Centro-Oeste brasileiro (na primavera), não há uma diferença significativa na distribuição de tamanho das partículas das nuvens nas regiões estudadas. Estes resultados indicam que outros agentes externos (além da concentração total de aerossóis integrada na coluna atmosférica), estejam atuando de forma mais significativa para modular a distribuição das partículas dentro das nuvens na região Centro-Oeste.

**Palavras-chave:** microfísica de nuvens; aerossol; CloudSat

### Abstract

The approach used in this work's methodology looks to represent the average microphysical structure of different types of clouds formed in two different ecosystems. The selected regions were located in the Midwest of Brazil (coordinates: 12-18 ° S and 46-58 ° W) and the South Atlantic Ocean (coordinates: 12-25 ° S and 9-30 ° W). In order to accomplish the proposed goal, data from CloudSat satellite from a period of approximately five years are used (from June 2006 to April 2011). The results show that there is little variation in microphysical structure between continental and maritime clouds in the studied regions. The mean droplet (ice particle) effective radius obtained in all the cloud types analyzed was 12.4 μm (71.9 μm) for maritime clouds and 11.0 μm (72.9 μm) for continental clouds. Particle size distribution (concentration as a function of size) was the most efficient parameter to distinguish cloud types, making it possible to identify particularities of each type. The results showed that even in the period with the highest concentration of aerosols observed in the Central-West region of Brazil (spring), there is a significant difference in the cloud particle size distribution in the regions studied. These results indicate that other external agents (besides the total concentration of aerosol integrated in the atmospheric column) are acting more significantly to modulate the particles distribution within the clouds in the Central-West region.

**Keywords:** cloud microphysics; aerosol; CloudSat

## 1 Introdução

As nuvens exercem um papel importante no balanço de energia da Terra. Ao provocar mudanças na reflexão, na absorção e na transmissão da radiação incidente através da atmosfera e também emitir radiação principalmente no infravermelho térmico, as nuvens afetam diretamente o tempo e o clima. Ao refletir parte da energia solar de volta para o espaço, as nuvens diminuem a quantidade de energia solar que chega à superfície, contribuindo para a manutenção da temperatura média do planeta.

Na atmosfera, apenas a presença de vapor de água, não garante a formação de nuvens em condições de ar limpo. A formação e o crescimento de gotículas que sejam visíveis a olho nu, dando origem às nuvens, exigem a presença de partículas suspensas na atmosfera, chamadas de aerossóis atmosféricos. Uma fração dos aerossóis presentes na atmosfera pode servir como núcleos de condensação de nuvens (NCN). Segundo Berner & Berner (1987), do total de aerossóis presentes na atmosfera, cerca de 27%, são formados por sais marinhos transportados pelo vento, 17% de sais solúveis de sulfatos, nitratos e amônia, formados por emissões gasosas naturais ou antropogênicas e 41% de poeira do solo e das rochas.

Segundo Rosenfeld & Lensky (1998), a taxa de formação de chuva em nuvens quentes pode variar geograficamente, devido às diferenças na composição e concentração dos NCN e outros fatores que podem influenciar na formação da nuvem e conseqüentemente da precipitação. Portanto, os resultados encontrados por estes autores, indicam que as diferenças na população e no tipo de NCN encontradas em regiões continentais e oceânicas, podem ser responsáveis por diferenças na estrutura microfísica das nuvens nestas regiões.

Squires (1958) foi o primeiro a realizar experimentos comparativos em nuvens cumulus sobre o efeito dos aerossóis marinhos e continentais. Os resultados encontrados por este autor mostraram que a concentração de gotas (CG) em nuvens marítimas era significativamente menor (em média  $100 \text{ cm}^{-3}$ ) quando comparadas com nuvens continentais (em média  $900 \text{ cm}^{-3}$ ). Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores como Borovikov *et al.* (1963) e Hobbs *et al.* (1980). Squires (1958) mostrou ainda que mesmo em regiões

fontes do mesmo tipo de núcleo de condensação e sob a influência da mesma massa de ar, a relação entre o tamanho das gotas e sua concentração varia consideravelmente para os diferentes tipos de cumulus e stratus, devido à particularidade de formação de cada uma destas nuvens.

Infelizmente, a maior parte dos experimentos com medidas de microfísica das partículas de nuvens ficaram restritos a nuvens cumulus e estratiformes baixas. Esta dificuldade se deve principalmente ao elevado custo envolvido nesses experimentos, que geralmente conta com o auxílio de aeronaves e instrumentos de alto custo. Neste contexto, o objetivo geral deste trabalho, é iniciar uma caracterização da estrutura microfísica de diferentes tipos de nuvens em duas regiões distintas da América do Sul, utilizando a técnica de sensoriamento remoto através dos dados do satélite de alta precisão CloudSat. A principal desvantagem para a utilização da técnica de Sensoriamento Remoto em estimativas das propriedades de nuvens está associada com a relativa baixa resolução espacial dos dados, especialmente para representação de nuvens pequenas, como a cumulus de bom tempo. Além disso, as propriedades dos hidrometeoros medidos são geralmente obtidas de forma indireta, por estimativas de refletância do radar ou irradiância das nuvens, e não pela medida direta do parâmetro de interesse. No entanto, embora os erros associados às estimativas de satélites ainda sejam relativamente altos quando comparado com medidas *in situ*, espera-se que a grande quantidade de dados coletados e analisados neste trabalho, torne a metodologia uma escolha viável e satisfatória, compensando as desvantagens do procedimento.

## 2 Metodologia e Dados

Neste trabalho, com o objetivo de investigar a diferença na constituição microfísica entre nuvens marinhas e continentais foram selecionadas duas regiões sobre a América do Sul, com ecossistemas distintos. As regiões escolhidas foram localizadas no Centro-Oeste do Brasil (coordenadas: 12-18 °S e 46-58 °O) e sobre o Oceano Atlântico Sul (coordenadas: 12-25°S e 9-30°O). A região Centro-Oeste foi escolhida para representar uma superfície continental, onde a priori, espera-se pouca ou nenhuma influência de aerossóis marinhos. A região sobre o Oceano Atlântico Sul foi escolhida com o

intuito de representar uma atmosfera representativa de uma superfície marinha. Como pode ser notado comparando o tamanho das áreas escolhidas para o estudo (por meio das coordenadas) foi utilizada uma área maior sobre o oceano. Este procedimento foi adotado, devido à baixa frequência de dados coletados sobre a região marinha quando foi utilizado áreas com o mesmo tamanho. Neste último caso, apenas cerca de 14% dos dados das propriedades das nuvens foram coletados sobre a região marinha. Este aumento na área de estudo nas direções sul e oeste, proporcionou um acréscimo na quantidade de nuvens do tipo nimbostratus (Ns) e profunda (Pf) devido a um ligeiro aumento na frequência de passagens de sistemas frontais e linhas de instabilidade sobre a região marinha estudada.

Os dados com os parâmetros microfísicos apresentados neste trabalho, assim como a classificação de nuvens e a refletividade do radar foram obtidos através do satélite de órbita heliossíncrona CloudSat (Stephens *et al.*, 2002), coletados dentro de um período de aproximadamente cinco anos (06/2006-04/2011). O CloudSat possui o primeiro radar banda-W (94-GHz) a bordo de um satélite. Com um ângulo de visada no nadir, o CloudSat possui uma resolução vertical de 240 m (resolução horizontal de 1,1 km), entre a superfície e aproximadamente a altitude de 30 km, originando 125 níveis ao longo da coluna atmosférica.

Nos dados de microfísica das nuvens utilizados neste trabalho, a fase líquida e sólida dos hidrometeoros são obtidas separadamente para cada parâmetro (raio efetivo e concentração de partículas). Este procedimento é empregado, devido ao fato de não haver uma forma independente de determinar a fase das partículas da nuvem apenas pela medida de refletância do radar. Os dois perfis resultantes (líquido e sólido) são obtidos usando um esquema simples baseado na temperatura do ar. Este esquema, considera que para temperaturas maiores que 0 °C, a coluna na nuvem contém apenas água líquida, e então, é aplicada nessa coluna, a solução para água líquida. Em temperaturas menores que -20 °C, o esquema considera que a coluna da nuvem é composta apenas por partículas de gelo, e a solução para gelo é aplicada. No intervalo entre 0°C e -20°C os perfis resultantes são combinados através de uma interpolação simples (linear) baseada na

temperatura, de modo que o conteúdo de água líquida, gradualmente diminui até desaparecer em -20°C, e da mesma forma, o conteúdo de gelo desapareça em 0°C (Wood, 2008). Na presente pesquisa, também foram utilizados dados de profundidade óptica do sensor MISR (*Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*) a bordo do satélite TERRA para o período entre 2000 e 2013. A profundidade óptica de aerossóis é dada, pela quantidade de aerossóis integrada na coluna atmosférica, obtida indiretamente, por meio da fração do sinal do radar que foi atenuado pelos aerossóis.

A classificação de nuvens em seus diferentes gêneros (stratus, stratocumulus, cumulus, etc.) foi feita utilizando os dados do produto do Cloudsat 2B-CLDCLASS. Este produto, combina dados, tanto dos perfis verticais dos satélites CloudSat (radar) e CALIPSO (Lidar), quanto dos perfis horizontais estimadas pelo satélite AQUA (Sensores Passivos). No presente trabalho, foi obtida do produto 2B-CLDCLASS, a classificação para sete tipos diferentes de nuvens: stratocumulus (Sc), cumulus (Cu), nimbostratus (Ns), altocumulus (Ac), altostratus (As), profundas (Pf) e altas. A classe de nuvens altas inclui os gêneros: cirrus (Ci), cirrostratus (Cs) e cirrocumulus (Cc). A classe Cu abrange os gêneros: cumulus de bom tempo e cumulus congestus.

Em nuvens com a presença de precipitação, a onda eletromagnética com comprimento de onda de milímetros utilizada no radar a bordo do CloudSat (3,2 mm), sofre forte atenuação devido a presença de gotas e partículas de gelo muito grandes. Neste caso, a atenuação no sinal do radar por partículas grandes nas nuvens poderia comprometer a acurácia dos resultados apresentados neste trabalho, fazendo com que os parâmetros analisados nas nuvens Cu, Ns e principalmente Pf, apresentassem valores subestimados. Assim sendo, foi desenvolvido para esta pesquisa, um algoritmo para detectar e excluir da análise, os dados que tiveram os seus valores subestimados devido à atenuação no sinal do radar. A principal dificuldade encontrada para a elaboração do algoritmo consistia em identificar apenas os dados onde o sinal do radar foi efetivamente comprometido. Neste trabalho, o algoritmo empregado faz a detecção e a exclusão dos dados mencionados, com base nas estimativas do radar onde:

1. há precipitação líquida ou sólida;
2. a refletividade é menor que 10 dBZ ao longo da coluna da nuvem;
3. a temperatura é maior que  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
4. foi detectada a presença de nuvens Cu, Ns ou Pf;
5. a refletividade do radar na superfície é menor que 10 dBZ.

Desta forma, o algoritmo irá fazer a detecção e exclusão dos dados, somente para as estimativas do radar onde todas as cinco condições forem atendidas. Na Figura 1 é mostrado um estudo de caso onde foi utilizado o algoritmo mencionado, referente a um aglomerado de nuvens ocorrido no dia 10/04/2008, entre às 04:59:12 e 05:02:23 horas (UTC). A Figura 1 contém perfis verticais do produto de classificação de nuvens do CloudSat (Figura 1A) e da refletividade do radar (Figura 1B), refletividade do radar na superfície (Figura 1C) e os perfis do raio efetivo das partículas de gelo (Figura 1D) e das gotas (Figura 1E). O critério cinco foi adotado devido a sua forte correlação com regiões de forte atividade convectiva dentro da nuvem e, portanto, em áreas com forte precipitação. Isto pode ser verificado comparando as Figuras 1B e 1C, onde é possível notar que, aproximadamente, as duas primeiras estimativas de refletância do radar próxima a superfície (Figura 1B), sofre forte atenuação na região convectivamente ativa da nuvem, fazendo com que o sinal do radar fique abaixo de 10 dBZ (Figura 1C).

### 3 Resultados

Para iniciar as análises das propriedades microfísicas das nuvens, a Figura 2 mostra a distribuição de frequência da CG para diferentes tipos de nuvens, formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul). Nos resultados apresentados nas Figuras 2 e 3, foi extraído do espaço amostral, 15% dos dados contidos no limite superior da distribuição para a concentração de partículas de gelo em todos os tipos de nuvens e 7% nas nuvens Pf para o raio efetivo da partícula de gelo. Esta escolha foi adotada, para não comprometer a visualização, portanto, a análise dos resultados que são apresentados nas figuras, devido à presença de valores muito elevados contidos

em intervalos de classe de baixíssima frequência encontrados nestes parâmetros. Ademais, em todos os outros resultados que serão apresentados nesta pesquisa foi considerada a exclusão de 5% dos dados contidos nos limites inferior e superior da distribuição. Os primeiros resultados encontrados mostram que as regiões continental e marinha pesquisadas, surpreendentemente, apresentam características consideravelmente semelhantes em relação à distribuição de frequência da CG. Estes resultados encontrados, não corroboram com diversos estudos publicados. No entanto, mesmo que a diferença entre nuvens continentais e marinhas não seja tão grande como foi observado em outras regiões por outros estudos, verifica-se pela Figura 2, que com exceção das nuvens As, todos os outros tipos de nuvens apresentaram máximo de frequência distintos entre si. Ademais, também se destaca na Figura 2, o fato de que todos os tipos nuvens marinhas analisadas (exceto as nuvens altas, formadas predominantemente por partículas de gelo), apresentaram valores iguais ou superiores de máximos de frequência em comparação às nuvens continentais. Estes máximos nas nuvens marinhas (continentais) foram de 14 (14)  $\mu\text{m}$  nas nuvens As, 80 (70)  $\mu\text{m}$  nas nuvens Ac, Sc, Cu e Ns e 70 (51)  $\mu\text{m}$  nas nuvens Pf. Estes resultados também são diferentes dos encontrados por outros autores, onde a princípio, eram esperados valores mais elevados de CG sobre o continente.

Com exceção das nuvens Sc e Altas, todos os demais tipos de nuvens que são alvos de estudo neste trabalho são formados, tanto por gotas, quanto por partículas de gelo. Estes tipos de nuvens são chamadas de *nuvens mistas*. Portanto, é necessário que a nuvem seja analisada em toda a sua extensão vertical, tanto em sua distribuição de gotas, quanto em sua distribuição de partículas de gelo. À vista disso, a distribuição de frequência (%) da concentração de partículas de gelo (CPG) [\*100] sobre o oceano e continente é mostrada na Figura 3. A análise destes resultados em conjunto com os apresentados previamente, comprova a semelhança apreciável, existente entre as nuvens marinhas e continentais nas regiões de estudo. Em todos os tipos de nuvens verificados, constituídas por partículas de gelo (Alta, As, Ac, Cu, Ns e Pf), podem ser observados valores idênticos de máximo de frequência, além de uma forte correlação na amplitude (diferença entre o máximo e mínimo

Comparação das Propriedades Microfísicas de Diferentes Tipos de Nuvens em  
 Duas Regiões Tropicais com Ecossistemas Distintos Usando Dados do Satélite CloudSat  
 Leonardo Abreu Jorge Justo & Jose Ricardo de Almeida França

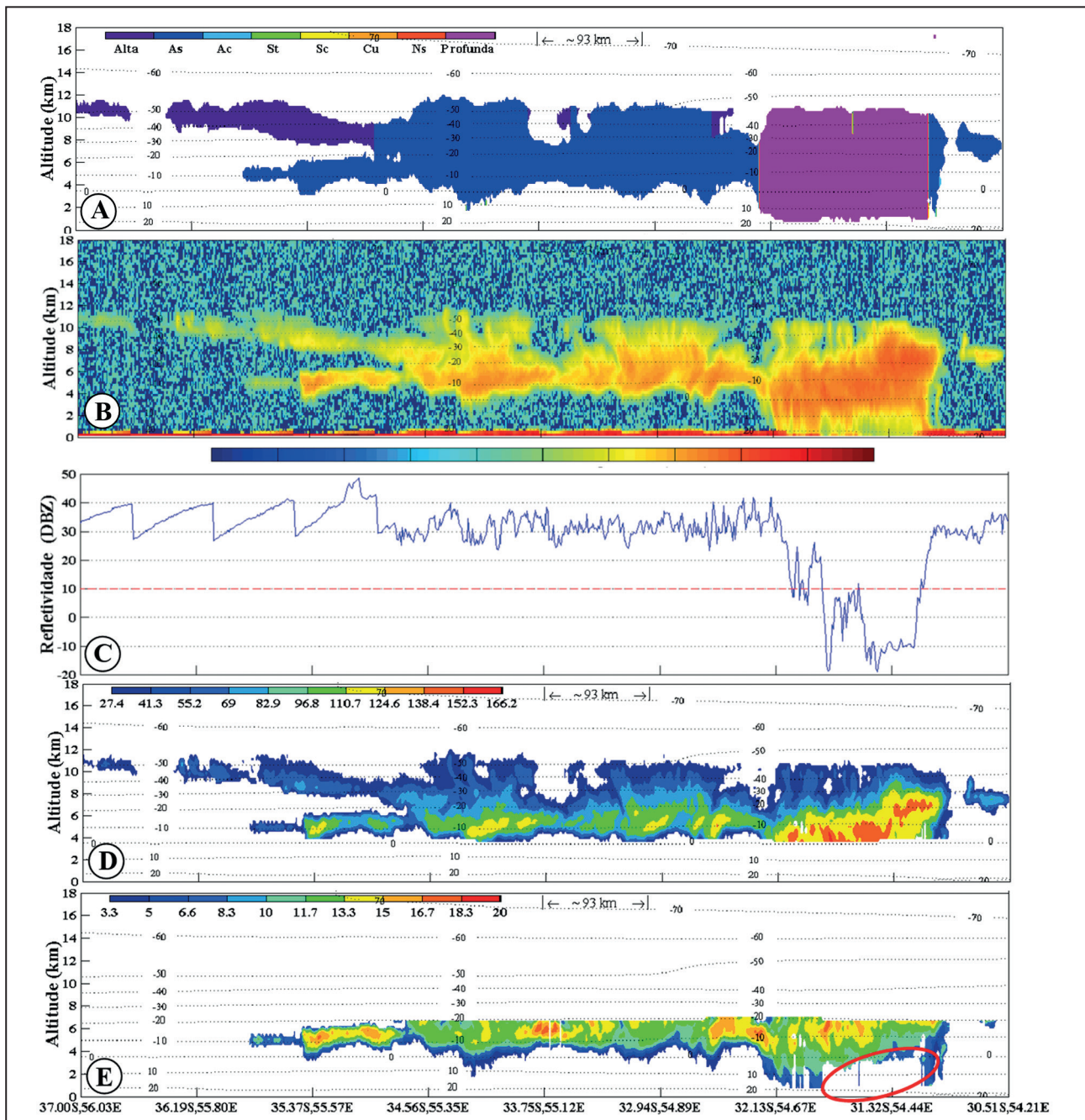


Figura 1 Perfis verticais do parâmetro de classificação de nuvens (A) e refletividade do radar (dBZ) (B); refletividade do radar na superfície (dBZ) (C) e os perfis verticais do raio efetivo das gotas ( $\mu\text{m}$ ) (D) e das partículas de gelo (E) presentes na nuvem. Os dados foram obtidos do satélite CloudSat, para o dia 10/04/2008, entre 04:59:12 e 05:02:23 horas (UTC).

valor da distribuição) da distribuição de partículas de gelo. Destaca-se na Figura 3, um estreitamento na distribuição de partículas de gelo nas nuvens Altas, Cu e principalmente Ac. Neste último caso, as nuvens são formadas predominantemente por partículas de gelo com concentrações da ordem de  $0,01$  partículas por  $\text{cm}^3$  (correspondente a  $1 \cdot 100^{-1} \text{ cm}^{-3}$  na Figura 3). Estes resultados são notáveis, uma vez que, em esquemas mais sofisticados de

parametrização da microfísica das nuvens, poderiam ser considerados valores fixos de CPG nas nuvens Cu e Ac com um baixo erro associado. No entanto, ao contrário das nuvens citadas, as nuvens Pf são caracterizadas por uma população de partículas de gelo significativamente mais heterogênea, apresentando valores de CPG que variam de  $0,01$  a  $0,27$  partículas por  $\text{cm}^3$  ( $\cdot 100^{-1}$ ), como pode ser observado pela distribuição de frequência

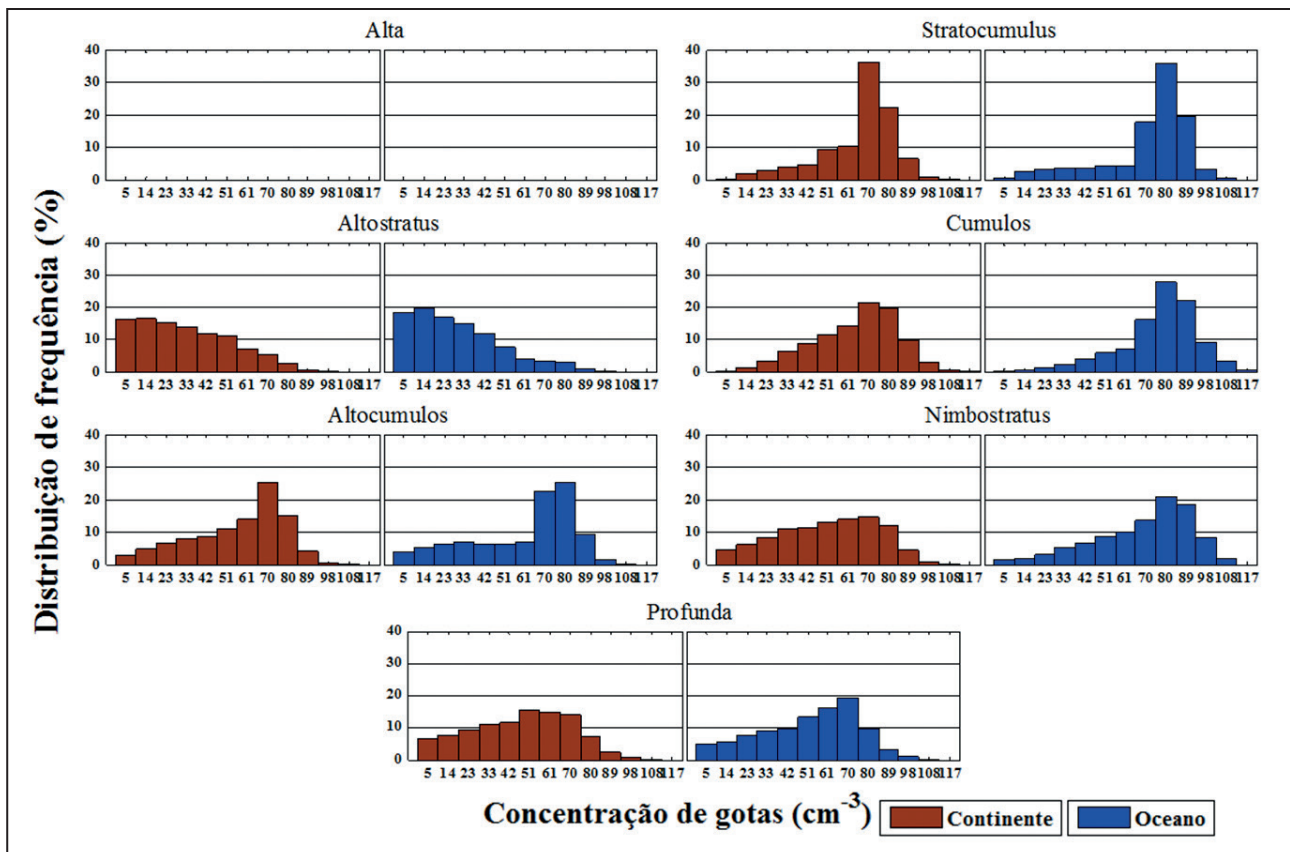


Figura 2 Distribuição de frequência (%) da concentração de gotas (cm<sup>-3</sup>) em diferentes tipos de nuvens, formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul) para o período entre 06/2006 e 04/2011.

das nuvens continentais. Mecanismos dinâmicos relacionados com os processos de crescimentos das partículas de gelo (processos acreção e agregação) no interior destas nuvens contribuem diretamente para o alargamento da distribuição. A colisão entre as partículas propicia tanto o surgimento de partículas pequenas, formadas pela quebra de partículas maiores durante a colisão, quanto para a formação de partículas maiores, devido aos mecanismos de acreção (interação entre partículas de gelo e as gotículas super-resfriadas) e agregação (interação entre partículas de gelo). Outro aspecto que chama a atenção nos resultados é a grande disparidade na ordem de valores entre CG (Figura 2) e CPG. No primeiro caso, foram observados valores superiores a 117 gotas por cm<sup>3</sup> (Cu), enquanto que no segundo, os valores ficaram abaixo de 0,5 (\*100<sup>-1</sup>) partículas por cm<sup>3</sup> em todos os casos analisados, ou seja, menos que uma partícula de gelo por centímetro cúbico. Portanto, os resultados mostram que se analisarmos em toda a extensão de uma nuvem convectiva de fase mista, sua população de partículas de gelo

será notadamente mais uniforme em comparação à população de gotículas. No entanto, com partículas de gelo de tamanho maior (como será mostrado adiante). A principal causa para essa baixa CPG se deve ao número muito reduzido de núcleos de congelamento em comparação a quantidade de NCN na atmosfera. De fato, apenas uma partícula de gelo, pode estar rodeada por centenas de milhares de gotículas de água super-resfriadas, o que explica a grande diferença entre CG e CPG.

A relativa semelhança observada na distribuição de frequência da CG e da CPG sobre o continente e o oceano, também puderam ser observadas na distribuição de frequência do raio efetivo da gota (REG) mostrada na Figura 4. Com relação à comparação entre nuvens marinhas e continentais, estes resultados se mostram importantes, pois apresentam mais indícios, sobre a considerável paridade entre nuvens marinhas e continentais nas regiões observadas. Contudo, como já era esperado, mesmo apresentando pequena diferença na distribuição de gotas, as nuvens marinhas sempre

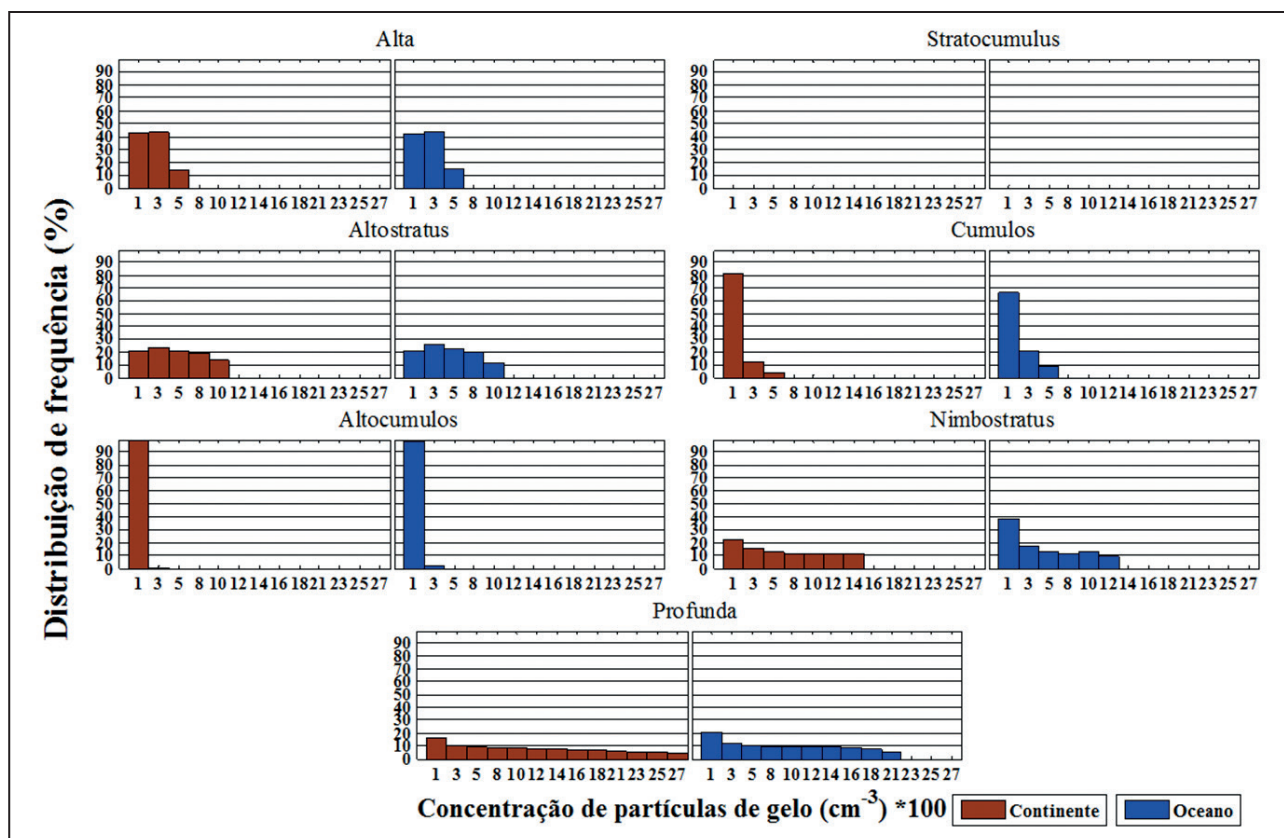


Figura 3 Distribuição de frequência (%) da concentração de partículas de gelo (cm<sup>-3</sup>) [\*100] em diferentes tipos de nuvens, formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul) para o período entre 06/2006 e 04/2011. Os valores de concentração de partículas de gelo foram multiplicados por 100 para facilitar a visualização no gráfico.

apresentam máximos de frequência com valores maiores ou iguais às nuvens continentais, em todos os casos analisados. Muito embora, esta diferença seja relativamente pequena em comparação a encontrada por outros autores (por exemplo, no trabalho de Lewis, 1951). Foram obtidos valores iguais de máximos de frequência entre as nuvens marinhas e continentais para o REG nas As (9 μm), Ac (9 μm), Sc (9 μm) e Ns (12 μm). Foram obtidos máximos de frequência superiores nas nuvens marinhas (continentais) Cu e Pf, com ambos os valores de 12 (9) μm de raio efetivo. A média do REG feita nos seis tipos de nuvens analisados com presença de gotas foi de 12,5 μm (desvio padrão de 3,6 μm) nas nuvens marinhas e 11,0 μm (desvio padrão de 3,5 μm) nas nuvens continentais. Em estudos clássicos de microfísica de nuvens, as nuvens marinhas são formadas por gotas maiores em comparação as nuvens continentais, devido à menor quantidade de NCN para competir por vapor d'água. Além disso, aerossóis marinhos, compostos por substâncias de sal como cloreto de sódio, são mais efetivos para

atuar como NCN, se comparados com os aerossóis de origem continental.

A distribuição de frequência do raio efetivo da partícula de gelo (REPG) é mostrada na Figura 5. Os resultados mostram que há uma clara diferença no tamanho das partículas de gelo (máximo de ~132 μm para a nuvem continental Pf), em relação ao tamanho das gotas (sendo o mesmo máximo de ~28 μm) mostrado na figura anterior. Nos níveis mais altos da atmosfera, o vapor d'água disponível é distribuído (principalmente por deposição no processo de Bergeron) para um número muito menor de partículas embrionárias de gelo (chamadas de núcleos de congelamento), devido a sua baixa concentração. Os resultados mostraram também, que existe uma diferença maior nas distribuições de partículas de gelo entre os diferentes tipos de nuvens, em relação à distribuição de gotas. Por exemplo, as nuvens Cu, Ns e principalmente Pf, apresentaram uma distribuição de partículas de gelo mais ampla se comparado com os outros tipos de nuvens analisados. Este comportamento é causado, principalmente

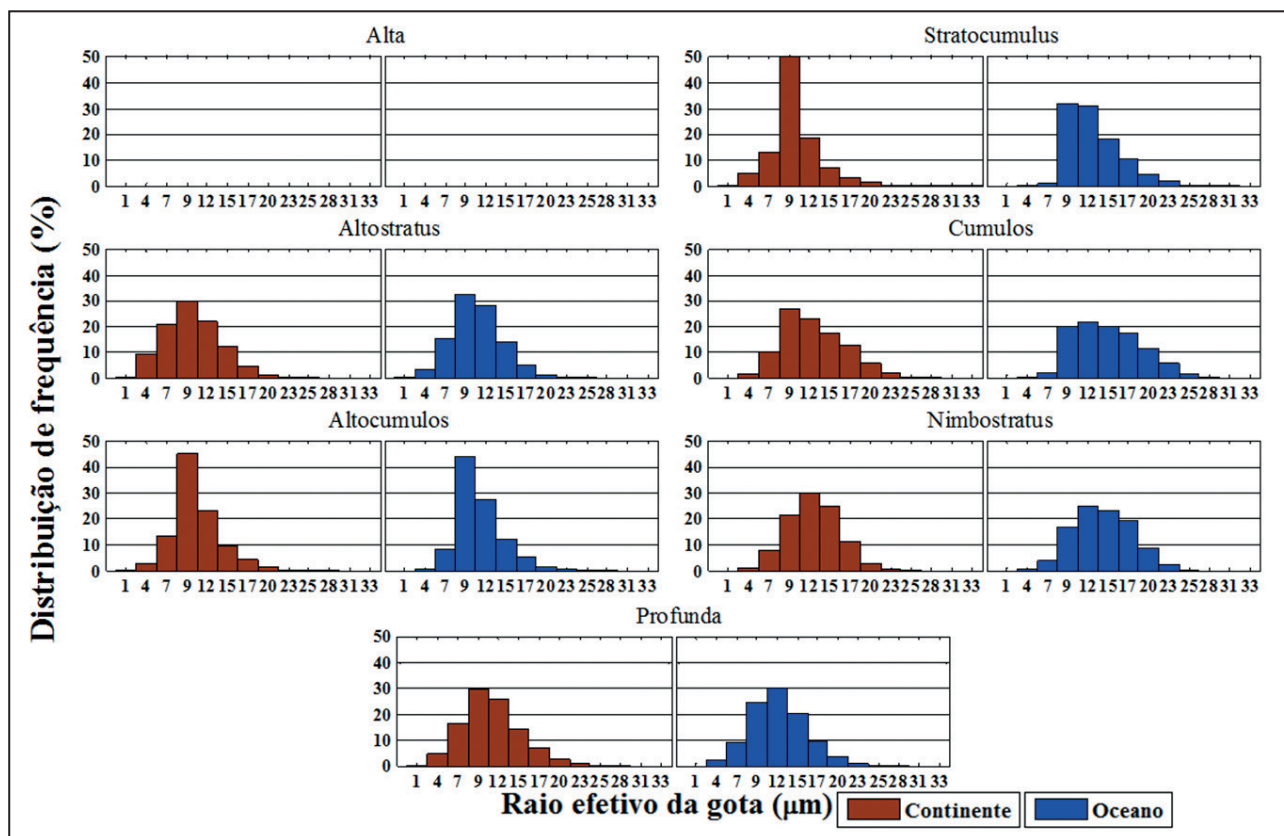


Figura 4 Distribuição de frequência (%) do raio efetivo da gota ( $\mu\text{m}$ ) em diferentes tipos de nuvens, formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul) para o período entre 06/2006 e 04/2011.

pela formação de atividade convectiva no interior destas nuvens. As correntes ascendentes procedentes desta atividade convectiva podem iniciar processos dinâmicos dentro das nuvens, como a colisão e coalescência (interação entre gotas), acreção e agregação. Com relação à análise comparativa entre as nuvens marinhas e continentais, novamente não é possível observar uma diferença expressiva entre nuvens marinhas e continentais. A média do REPG feita nos seis tipos de nuvens analisados com a presença de partículas de gelo (excetuando as Sc) foi de  $68,2 \mu\text{m}$  (desvio padrão de  $20,1 \mu\text{m}$ ) nas nuvens marinhas e  $72,6 \mu\text{m}$  (desvio padrão de  $23,9 \mu\text{m}$ ) nas nuvens continentais. Ou seja, as nuvens marinhas apresentam partículas de gelo menores em comparação às nuvens continentais, no entanto, esse padrão se inverte com relação ao tamanho das gotas.

Para o melhor entendimento da estrutura microfísica encontrada nas nuvens, a Figura 6 mostra para diferentes tipos de nuvens formadas sobre a região marinha, a relação entre o tamanho e a concentração de gotas (Figura 6A) e partículas

de gelo (Figura 6B). No primeiro caso, esta relação é nomeada de distribuição de tamanho das gotas (DTG) ou ainda, espectro de gotas. Enquanto que no segundo caso, é chamado de distribuição de tamanho das partículas de gelo (DTPG) ou espectro de partículas de gelo. Pela figura, nota-se que, diferentemente da distribuição de frequência do tamanho e concentração de gotas e partículas de gelo, a distribuição de tamanho destas partículas, revela com mais riqueza de detalhes, a verdadeira identidade da estrutura microfísica de cada tipo de nuvem. Por exemplo, é verificado que as nuvens As são formadas por valores baixos de CG (máximo de aproximadamente  $35 \text{ gotas por cm}^3$ ), em comparação aos demais tipos de nuvens para as mesmas classes de tamanho. Estes resultados estão de acordo com os obtidos pelo autor Zhang *et al.* (2010). No referido trabalho, o autor encontrou que as nuvens As são constituídas por gotículas super-resfriadas e principalmente por partículas de gelo. Devido a CPG ser muito menor que a CG, os resultados mostram que dentre os tipos de nuvens mistas analisadas, as nuvens As são as que possuem espessura óptica



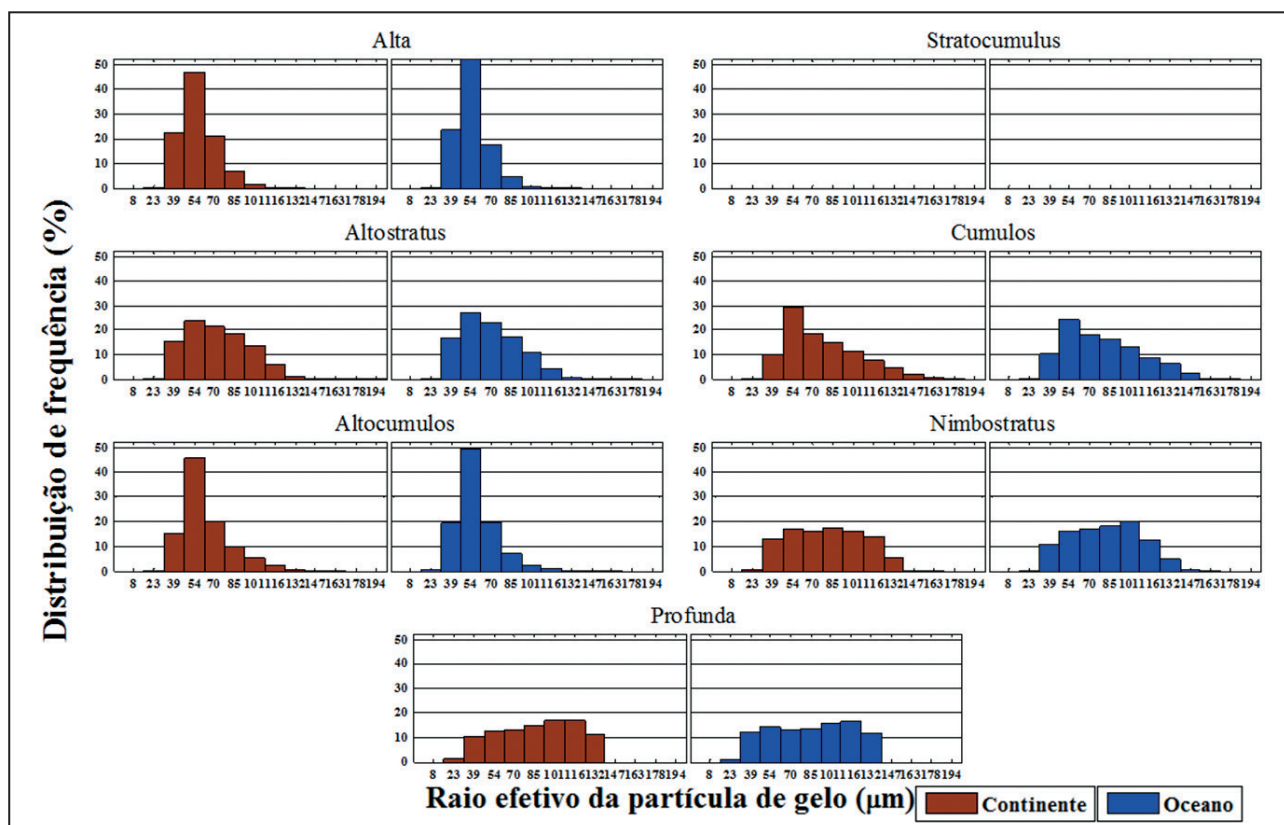


Figura 5 Distribuição de frequência (%) do raio efetivo da partícula de gelo ( $\mu\text{m}$ ) em diferentes tipos de nuvens, formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul) para o período entre 06/2006 e 04/2011.

mais baixa. Tendo o balanço de radiação terrestre forte influência da espessura óptica das nuvens, que por sua vez, depende diretamente da sua constituição microfísica, é esperado que as nuvens As interajam menos com a radiação solar. Como as nuvens altas são formadas unicamente por partículas de gelo e possuem uma baixa CPG (Figura 6B), pode ser inferir, que estas possuem os valores mais baixos de espessura óptica dentre todos os tipos de nuvens analisados.

A Figura 6 apresenta informações importantes para uma compreensão inicial da estrutura microfísica que diferentes tipos de nuvem podem assumir. Entretanto, os valores médios apresentados na Figura 6 ainda carecem de mais informações. Por exemplo, o grau de dispersão dos dados em torno destes valores médios. Ou seja, ainda é necessário quantificar a variabilidade do espectro de gotas e de partículas de gelo dentro da nuvem. Portanto, é mostrado na Figura 7, a distribuição média do tamanho de gotas e o seu desvio padrão, para a região continental (em marrom) e marinha (e azul). Ressalta-se, que não é feita a análise das

nuvens altas na Figura 6, pois estas são constituídas apenas por partículas de gelo. Verifica-se na Figura 7, que em todos os tipos de nuvens analisados foram observados valores de desvio padrão relativamente moderados e altos. Efetuando a média do desvio padrão nos seis tipos de nuvens considerados na figura, foram obtidos valores de desvio padrão de  $20,1 \text{ cm}^{-3}$  e  $21,5 \text{ cm}^{-3}$  (cálculo não mostrado) para nuvens continentais e marinhas, respectivamente. As nuvens As e Sc marinhas e continentais, apresentaram-se mais homogêneas em relação a CG na distribuição, apresentando valores mais baixos de desvio padrão. Contudo, nota-se também, que em praticamente todos os casos, há um decréscimo na dispersão dos dados com a diminuição no tamanho das gotas. Gotas pequenas são encontradas tipicamente na base e nas bordas das nuvens, como pôde ser observado nos trabalhos de Justo & França (2011), e Duarte (2012). Os resultados mostram que também ocorre uma redução na CG com o aumento no REG em todos os tipos de nuvens analisados a partir de um tamanho de gotas crítico. Essa queda na curva do espectro de gotas se deve basicamente

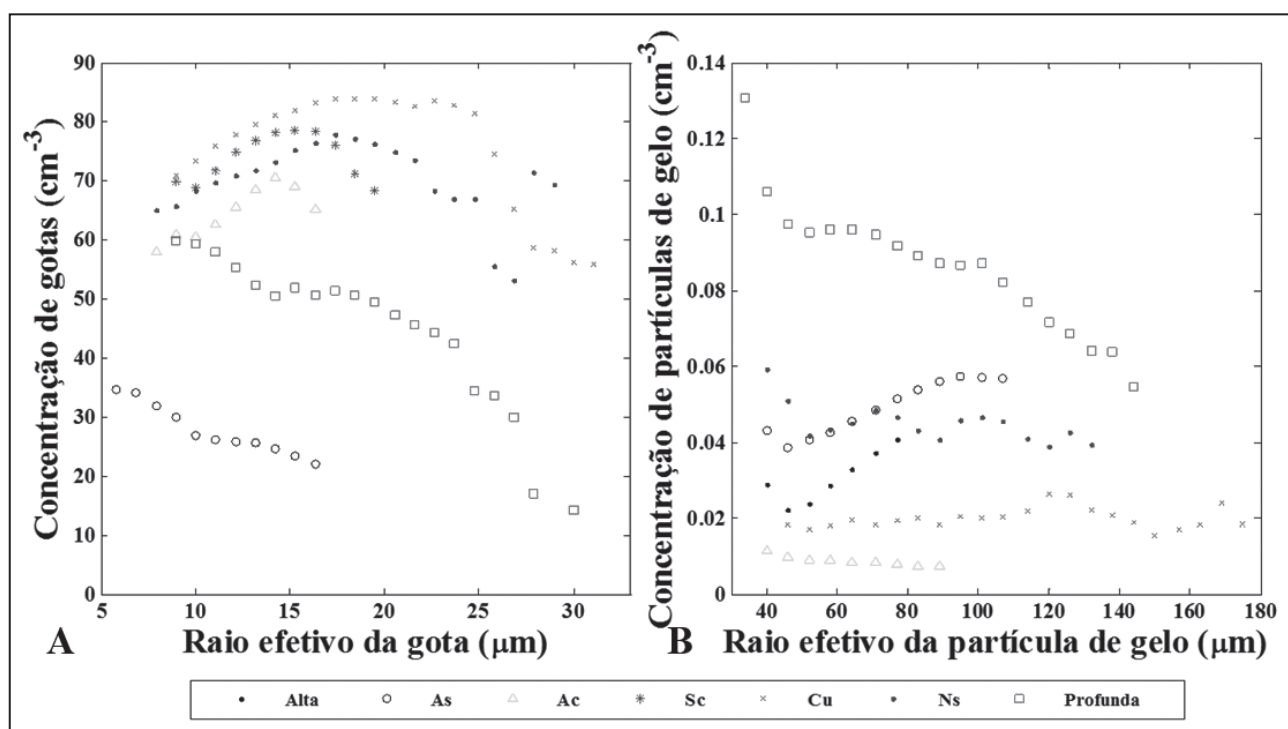


Figura 6 Distribuição do tamanho de gotas (A) e partículas de gelo (B) em diferentes tipos de nuvens, formadas sobre a superfície marinha para o período entre 06/2006 e 04/2011.

pela diminuição de vapor d'água disponível no ambiente das nuvens com gotas grandes. Estas gotas demandam uma maior quantidade de vapor d'água para crescerem, diminuído assim a sua disponibilidade. Como também pôde ser inicialmente verificado pelas Figuras 2 e 3, o espectro de gotas, mostra que a concentração é maior para os casos de nuvens marinhas.

A distribuição média do tamanho das partículas de gelo e o desvio padrão associado são mostrados na Figura 8. A figura mostra que, comparando a ordem de grandeza dos valores de desvio padrão com os valores médios obtidos, o espectro de partículas de gelo na maioria das nuvens se apresenta mais heterogêneo em relação ao espectro de gotas. As nuvens Altas (desvio padrão médio de 0,011 cm<sup>-3</sup>, continente e oceano) e Ac (desvio padrão médio de 0,005 cm<sup>-3</sup>) apresentam menor variabilidade, caracterizando um comportamento mais definido. Em compensação, as nuvens Ns (desvio padrão médio 0,038 cm<sup>-3</sup>) e principalmente Pf (desvio padrão 0,060 cm<sup>-3</sup>) apresentam grande dispersão nos valores de CPG, indicando que há uma grande variabilidade na distribuição de partículas de gelo dentro destas nuvens. É presumível, que o

principal responsável por este comportamento esteja associado à presença de precipitação nestas nuvens. Nuvens precipitantes possuem uma população de partículas de gelo notavelmente mais heterogênea, contendo desde partículas minúsculas de gelo a grandes pedras de granizo. O que por sua vez, terá impacto na variabilidade da CPG. Naturalmente, a distribuição de partículas dentro das nuvens pode assumir formas mais diversificadas, dependendo do seu estágio de vida, atividade convectiva e conteúdo de umidade disponível. Na Figura 8, também não é possível observar diferenças significativas entre nuvens continentais e marinhas, onde, tanto os valores médios, desvio padrão e o comportamento do espectro, foram relativamente semelhantes.

Como já referido neste trabalho, os resultados encontrados por outros autores em estudos feitos em outras regiões, não corroboram com os resultados encontrados nesta pesquisa. Basicamente, o objeto de estudo destes autores, consistia em verificar a influência que as diferentes quantidades de aerossóis presentes nas atmosferas continentais e marinhas, tinham na estrutura microfísica das nuvens. Neste contexto, para a melhor compreensão do papel dos

Comparação das Propriedades Microfísicas de Diferentes Tipos de Nuvens em  
 Duas Regiões Tropicais com Ecossistemas Distintos Usando Dados do Satélite CloudSat  
 Leonardo Abreu Jorge Justo & Jose Ricardo de Almeida França

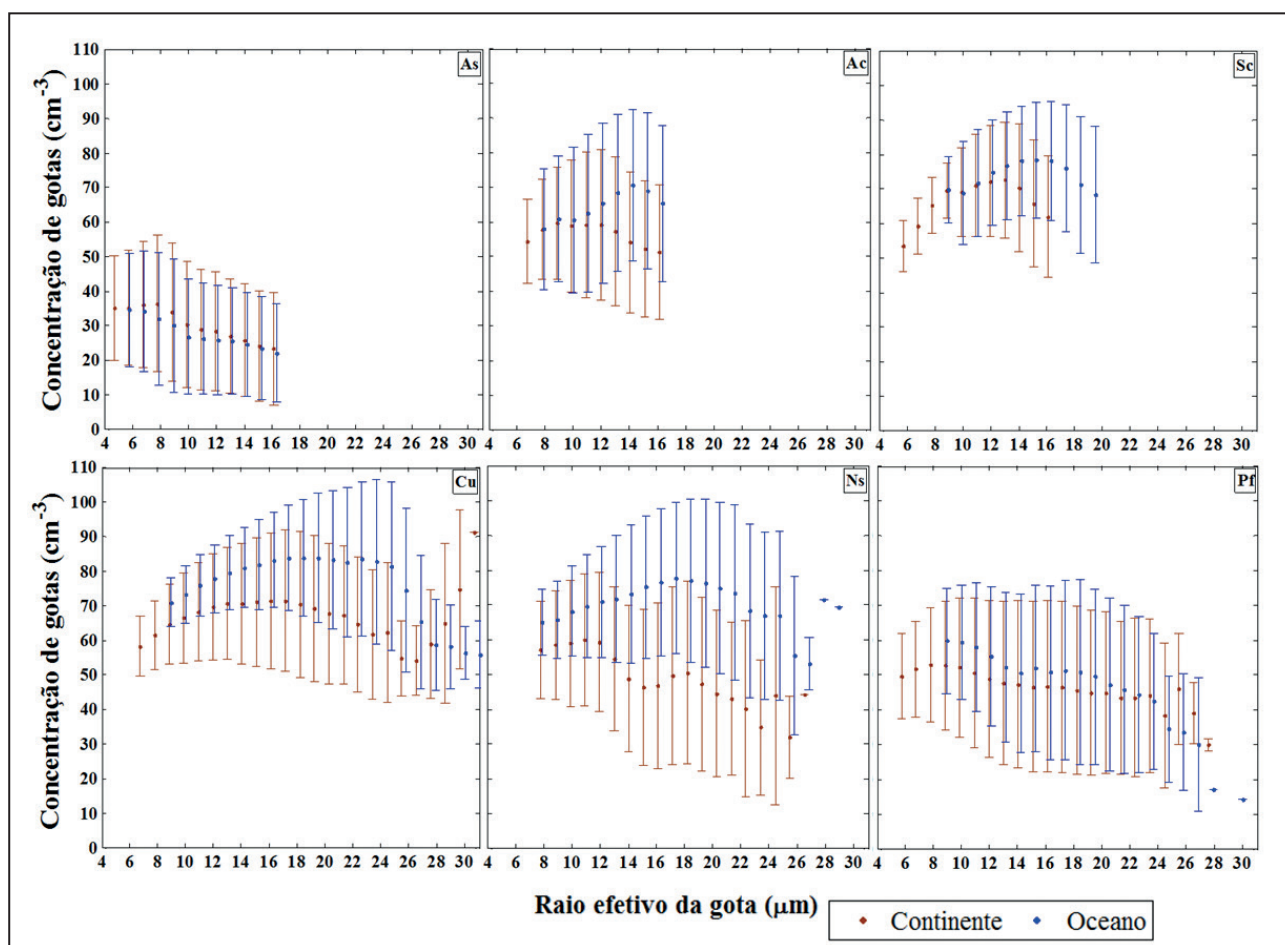


Figura 7 Distribuição do tamanho de gotas e desvio padrão para diferentes tipos de nuvens formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul) para o período entre 06/2006 e 04/2011.

aerossóis em modular a estrutura microfísica das nuvens, torna-se imprescindível, investigar a concentração destas partículas nas duas regiões estudadas. Para isso, a Figura 9 mostra o campo sazonal médio (feito entre o período de 2000 e 2013) da quantidade de aerossóis integrada na coluna atmosférica obtida por meio de dados do sensor MISR a bordo do satélite de órbita heliossíncrona TERRA (mais informações podem ser obtidas em: <http://www-misr.jpl.nasa.gov/>).

A Figura 9 mostra partículas de aerossóis de vários tamanhos e provenientes de diversas fontes, como a queima de biomassa, poeira mineral, sal marinho e poluição industrial. Pode ser observado pela figura, que a diferença na concentração de aerossóis sobre as regiões analisadas, sofre variações dependendo da estação do ano. Embora os dados apresentados na Figura 9, não permitam uma avaliação mais objetiva em termos quantitativos

das variações da concentração de aerossóis em níveis locais, nota-se que em média, na maior parte do ano a concentração de aerossóis nas regiões analisadas não atinge níveis muito elevados. Isto é especialmente verdade, quando é comparado com parte do noroeste da África. Os níveis mais elevados de concentração de aerossóis são observados durante a estação da primavera sobre a região de estudo continental, no trimestre de setembro-outubro-novembro (SON). O valor médio da espessura óptica (cálculo feito na área de estudo) sobre esta região foi de 0,33, enquanto que sobre a região marinha o valor obtido foi de 0,15 (SON). Ou seja, mais que o dobro da espessura óptica registrada sobre a região marinha. Este aumento na concentração de aerossóis observada durante o trimestre de SON sobre as regiões norte e Centro-Oeste do Brasil, está associado com o aumento na queima de biomassa neste período (Costa & Pauliquevis, 2009).

Comparação das Propriedades Microfísicas de Diferentes Tipos de Nuvens em  
 Duas Regiões Tropicais com Ecossistemas Distintos Usando Dados do Satélite CloudSat  
 Leonardo Abreu Jorge Justo & Jose Ricardo de Almeida França

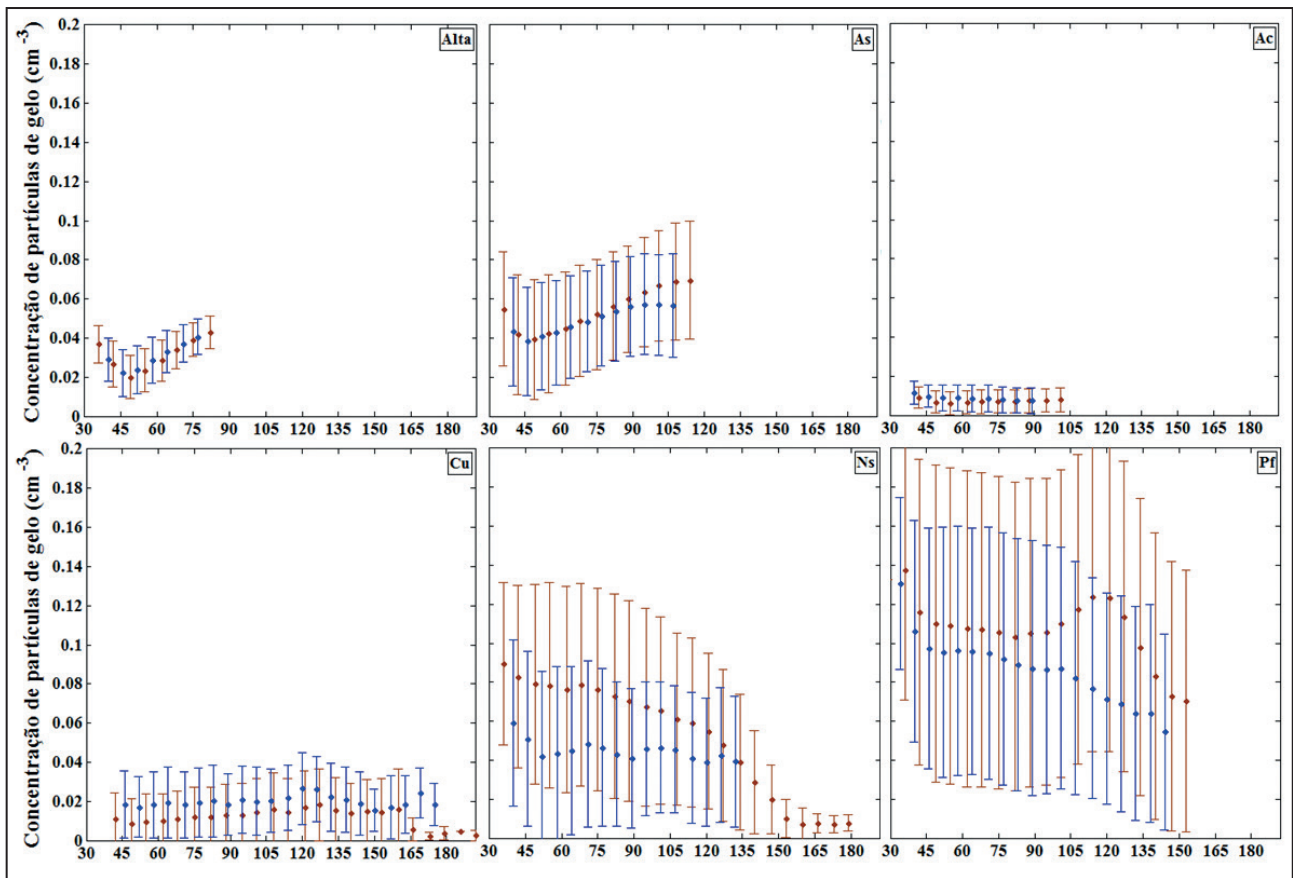


Figura 8 Distribuição do tamanho de partículas de gelo e desvio padrão para diferentes tipos de nuvens formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul) para o período entre 06/2006 e 04/2011.

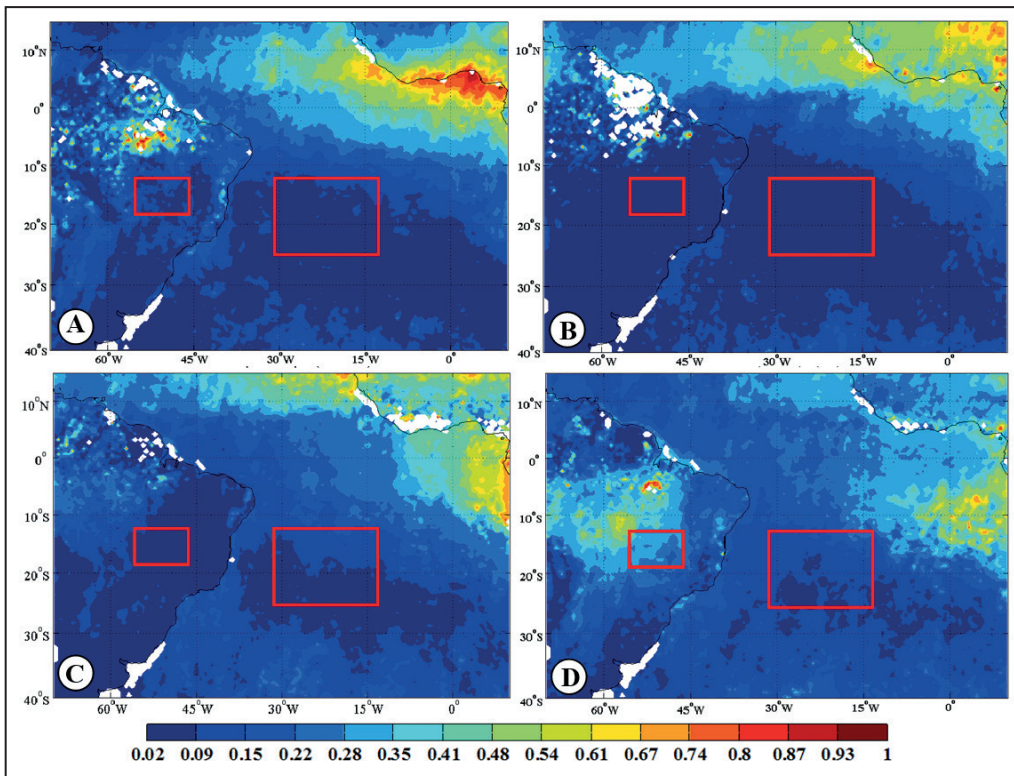


Figura 9 Estimativa sazonal da espessura óptica de aerossóis (adimensional) integrada na coluna atmosférica para os trimestres de dezembro, janeiro e fevereiro (A); março, abril e maio (B); junho, julho e agosto (C) e setembro, outubro e novembro (D). Os campos médios foram obtidos através dos dados medidos pelo sensor MISR (Multi-angle Imaging Spectro Radiometer) no comprimento de onda de 558 nm a bordo do satélite TERRA no período entre 2000 e 2013.

Para averiguar o impacto do aumento na concentração de aerossóis observado no trimestre de SON sobre a distribuição de partículas dentro das nuvens na região continental, é mostrada na Figura 10, a DTG e o seu desvio padrão. Os resultados mostram que mesmo no período de máxima concentração de aerossóis observado no Centro-Oeste brasileiro, não se observa um impacto relevante na CG dentro das nuvens. Com exceção das nuvens Ac e Ns os demais tipos de nuvens apresentaram aproximadamente o mesmo padrão de comportamento observado anteriormente na Figura 7. No entanto, ressalta-se que, as variações significativas no espectro de gotas destas nuvens (Ac e Ns), foram observadas sobre a região marinha, apresentando pouca variação sobre a região continental. Os resultados também mostraram que não houve mudanças consideráveis no espectro de partículas de gelo (figura não mostrada), ficando este, praticamente invariável em todos os tipos de nuvens analisadas, comparando a média anual (Figura 8) com o trimestre de SON.

Embora, a presente pesquisa, conte com uma estatística de dados de propriedade microfísicas para distintos tipos nuvens e localização geográfica, outros fatores ainda podem contribuir para modificar a distribuição de partículas dentro da nuvem. Sendo a distribuição de partículas das nuvens, também dependente do seu ciclo de vida e a altura (ou temperatura) na atmosfera, uma estimativa mais acurada, deve levar em consideração esses efeitos, a fim de tornar os valores médios estimados mais representativos. Devido o satélite CloudSat voar sobre uma órbita heliossíncrona, seria praticamente impossível, efetuar uma análise estatística para as nuvens de acordo com o seu estado de vida. O que de certa forma, contribui para aumentar a dispersão dos dados em torno de sua média. Contudo, presume-se, que uma das principais causas para a grande dispersão observada nos resultados apresentados foi à própria variação na distribuição de partículas existente, entre a base e o topo da nuvem. Estas mudanças que

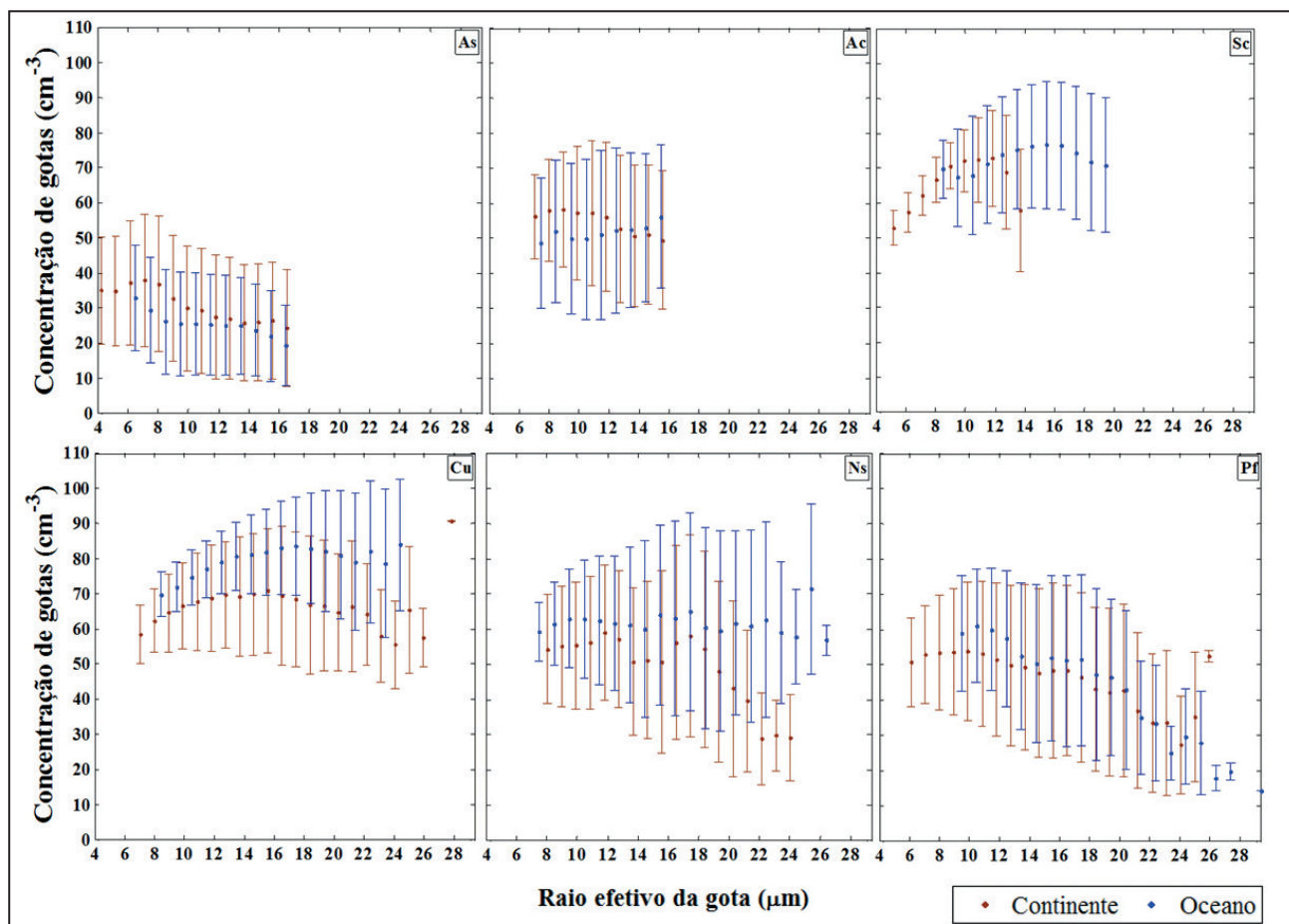


Figura 10 Distribuição média do tamanho de gotas e desvio padrão para o trimestre de setembro-outubro-novembro para diferentes tipos de nuvens formadas sobre uma superfície continental (em marrom) e marinha (em azul). Os dados foram obtidos para o período entre 06/2006 e 04/2011.

ocorrem na concentração e tamanho de partículas nas nuvens de acordo com a altura são devidas, principalmente à variação vertical da temperatura do ar na atmosfera. A Figura 11 apresenta a distribuição do tamanho das gotas e das partículas de gelo para a nuvem Pf em diferentes faixas de temperatura sobre a região continental. Os resultados mostrados na Figura 11 foram obtidos através da média dos valores do raio efetivo e concentração das gotas e das partículas de gelo contidos no intervalo de  $\pm 1^\circ\text{C}$  da temperatura considerada. Pela Figura 11, nota-se que diferentes regimes microfísicos podem coexistir em uma nuvem dependendo da faixa de temperatura onde as partículas se encontram. Estes resultados confirmam o que foi mencionado anteriormente, de que em parte, os altos valores de desvio padrão observados são devidos à própria variação vertical da estrutura microfísica das nuvens. Ou seja, ao contrário de um simples dado discrepante de uma amostra de dados, os altos valores de desvio padrão nas nuvens, em parte, assumem um significado físico.

#### 4 Conclusões

Este trabalho se propôs a estudar o comportamento médio da estrutura microfísica de diferentes tipos de nuvens formadas sobre duas

regiões com ecossistemas distintos. Os resultados mostrados, evidenciam a importância do CloudSat como ferramenta para a compreensão das diferentes características microfísicas que cada tipo de nuvem pode assumir, assim como os processos físicos que governam o seu comportamento. Metodologias utilizadas anteriormente (como as medidas in situ feitas em aeronaves), não tinham condições de prover o mesmo grau de detalhamento, como variedade em tipos de nuvens e análise para um longo período. Com os resultados obtidos, foi possível identificar e quantificar os distintos aspectos da estrutura microfísica de cada tipo de nuvem dentro de uma margem de erro satisfatória. Em relação às dificuldades encontradas, destaca-se a própria limitação do algoritmo utilizado no CloudSat em identificar a fase mista das nuvens na região entre  $-20$  e  $0^\circ\text{C}$ , onde as estimativas são feitas empiricamente. No entanto, para uma análise estatística com a finalidade de se obter o comportamento médio das nuvens, acredita-se que os resultados sejam satisfatórios possibilitando a metodologia empregada. Além do mais, as condições assumidas pelo algoritmo são geralmente verdadeiras na maioria dos casos.

Pelos resultados obtidos, verificou-se que a distribuição do tamanho das partículas nas nuvens

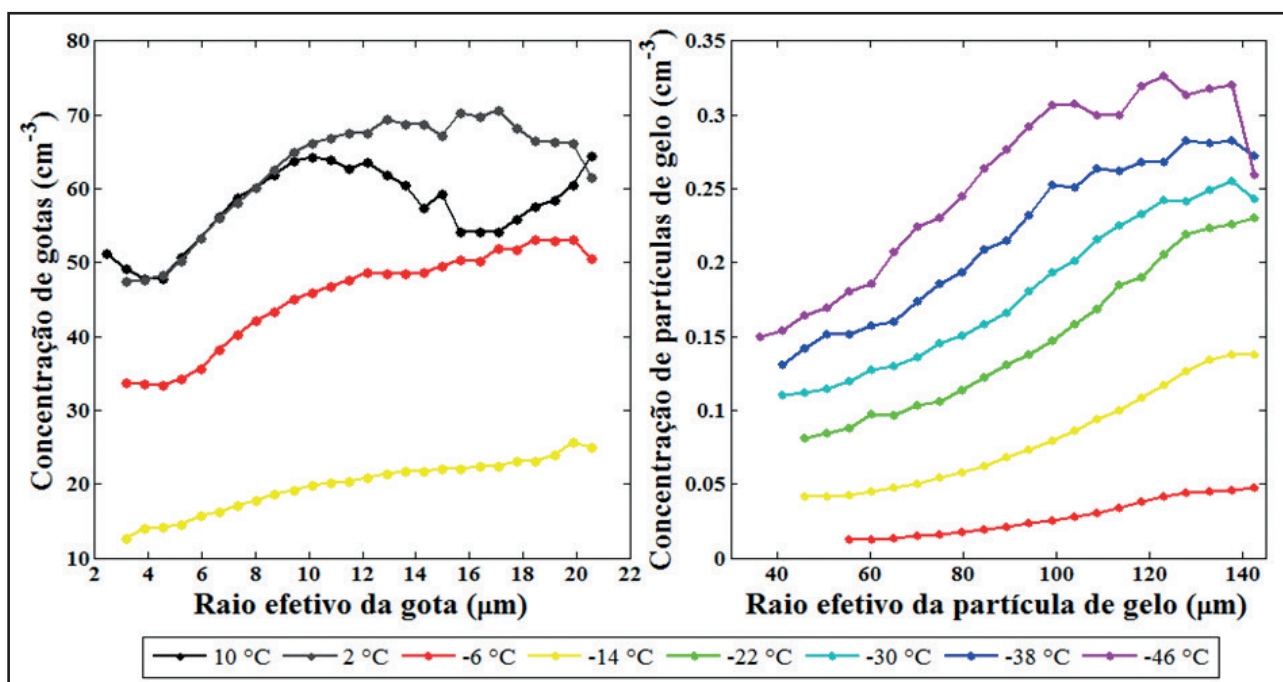


Figura 11 Distribuição do tamanho de gotas e partículas de gelo nas nuvens Pf em diferentes faixas de temperatura sobre a região continental para o período entre 06/2006 e 04/2011.

se mostrou mais eficiente para discriminar estas particularidades em comparação a distribuição de frequência. Neste último caso, entretanto, os resultados mostraram que os parâmetros na fase sólida apresentam características mais específicas dependendo do tipo de nuvem. Os resultados também mostraram um aumento gradativo no tamanho médio das partículas de gelo com o aumento na intensidade convectiva dentro das nuvens. Este comportamento pôde ser verificado, por exemplo, sobre as nuvens continentais Cu (80,1  $\mu\text{m}$ ), Ns (83,6  $\mu\text{m}$ ) e Pf (89,8  $\mu\text{m}$ ). A análise da concentração de partículas de gelo nas nuvens Altas indicou que estas nuvens possuem a menor espessura óptica (inferida subjetivamente) dentre todos os tipos de nuvens analisadas, seguida pelas nuvens As. Em estudos sobre as mudanças climáticas, quantificar estas distintas características encontradas nestas nuvens por meio de uma análise estatística robusta se torna importante para o aperfeiçoamento dos modelos climáticos. Em todos os tipos de nuvens consideradas para análise foram observados valores de desvio padrão relativamente moderados para a fase líquida e elevados para fase sólida. Todavia, estes altos valores de desvio padrão que foram observados neste trabalho, em parte, possui um significado físico, como sugere a grande variação encontrada na distribuição vertical das partículas das nuvens (dependente da temperatura do ar).

Na análise feita para os dois ecossistemas, os resultados indicam que, não há uma variação significativa na estrutura microfísica entre as nuvens continentais e marinhas nas regiões analisadas, ao contrário do que é encontrado na literatura clássica sobre microfísica das nuvens (Hobbs *et al.*, 1980; Squires, 1958). No entanto, resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho têm sido encontrados em pesquisas recentes por outros autores, por exemplo, em Costa & Pauliquevis (2009). Em todos os parâmetros que foram analisados neste trabalho, verificou-se em ambos os casos, que tanto a distribuição de frequência, quanto a distribuição de tamanho das partículas nas nuvens, apresentaram resultados relativamente semelhantes entre continente e oceano. Isto pôde ser observado quantitativamente, através dos valores médios obtidos e também qualitativamente, por meio da similaridade encontrada na forma das distribuições de frequência e de tamanho das partículas encontradas nas nuvens. Os resul-

tados apresentados nesta pesquisa mostraram que mesmo no período de máxima concentração de aerossóis sobre o Centro-Oeste do Brasil (setembro-outubro-novembro), não há uma diferença significativa na distribuição de tamanho das partículas das nuvens nas regiões estudadas. Estes resultados indicam que outros agentes externos (além da concentração total de aerossóis integrada na coluna atmosférica), também estejam atuando para modular a distribuição das partículas dentro das nuvens. Fatores como a distribuição vertical dos aerossóis na coluna atmosférica e a sua higroscopia (afinidade com a água), também devem ser considerados. Estes dois fatores podem apresentar características bem distintas entre uma região continental e marinha. Além disso, o transporte vertical de vapor d'água e aerossóis na coluna atmosférica, assim como o transporte horizontal, principalmente da região Amazônica para a região Centro-Oeste do Brasil são importantes para a melhor compreensão dos mecanismos físicos envolvidos na formação das nuvens.

Como perspectivas para futuros trabalhos, deve-se fazer uma investigação mais detalhada sobre a concentração e tipo de aerossóis nas regiões analisadas, para uma melhor avaliação dos resultados obtidos e conclusões aqui feitas. Uma alternativa para quantificar a distribuição vertical dos aerossóis na coluna atmosférica, seria a utilização de dados do satélite de órbita heliossíncrona Calipso. A utilização destes dados, tem a vantagem do satélite Calipso está sobrevoando na mesma órbita que o CloudSat com uma defasagem de apenas 15 segundos.

Finalmente espera-se que os resultados encontrados neste trabalho, possam contribuir para ampliar o conhecimento sobre a natureza microfísica de diferentes tipos de nuvens e os processos físicos envolvidos na sua formação e manutenção. Uma das perspectivas é que a metodologia aqui empregada possa ser utilizada sobre outras regiões e os resultados comparados com aqueles obtidos em experimentos de campo realizados no Brasil.

## 5 Referências

- Berner, E.K. & Berner, R.A. 1987. The Global Water Cycle. Geochemistry and Environment. New Jersey. Rainwater and Atmospheric Chemistry. *Prentice-Hall*. 396p.
- Bony, S. & Dufresne, J.L. 2005. Marine boundary layer clouds at the heart of tropical cloud feedback uncertainties in

Comparação das Propriedades Microfísicas de Diferentes Tipos de Nuvens em  
Duas Regiões Tropicais com Ecossistemas Distintos Usando Dados do Satélite CloudSat

Leonardo Abreu Jorge Justo & Jose Ricardo de Almeida França

- climate models. *Geophysical Research Letters*, 32: 1-4.
- Borovikov, A.M.; Gaivoronskii, I.I.; Zak, E.G.; Kostarev, V.V.; Mazin, I.P.; Minervin, V.E.; Khrgian, A. & Shmeter, S.M. 1963. *Cloud Physics*. Washington D. C. Transl. Israel Program Sci. Transl. Jerusalem US Dep. Commerce, *Office of Technology Services*, 393p.
- Cloudman's mini cloud atlas. Disponível em <<http://www.cloudman.com/atlas.htm>>. Acessado em 10/01/2013.
- Costa, A.A. & Pauliquevis, T. 2009. Aerossóis, nuvens e clima: resultados do experimento LBA para o estudo de aerossóis e microfísica de nuvens. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24: 234-253.
- Duarte, B.M. 2012. *Caracterização microfísica de sistemas meteorológicos de mesoescala utilizando dados do Cloudsat*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Departamento de Meteorologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 81p.
- Hobbs, P.V.; Politovich, M.K. & Radke, L.F. 1980. Structures of Summer Convective Clouds in Eastern Montana. I: Natural Clouds. *Journal of Applied Meteorology*, 19: 645-663.
- Jet Propulsion Laboratory. Disponível em <<http://www-misr.jpl.nasa.gov/>>. Acessado em 09/01/2014.
- Justo, L.A.J. & França, J.R.A. 2011. Estudos dos Processos Sinóticos e Microfísicos Associados a um Sistema Frontal que Atingiu o Extremo Sul do Brasil (Rio Grande do Sul) e Uruguai, *Anuário do Instituto de Geociências*, 34: 70-83.
- Klein, W.A. & Hartmann, D.L. 1993. The seasonal cycle of low stratiform clouds. *Journal of Climate*, 6: 1587-1606.
- Lewis, W. 1951. Meteorological aspects of aircraft icing. In: MALONE, T. F. (ed.). *Compendium of Meteorology. American Meteorological Society*, p. 1197-1203.
- Rosenfeld, D. & Lensky, M.L. 1998. Satellite-based insights into precipitation formation processes in continental and maritime convective clouds. *Bull. American Meteorological Society*, 79: 2457-2476.
- Squires, P. 1958. The microstructure and colloidal stability of warm clouds. *Tellus*, 10: 256p.
- Stephens, G.L.; Deborah, G.V.; Gonald, J.B.; Gerald, G.M.; Kenneth, S.; Zhien, W.; Anthony, J.I.; Ewan, J.O.; William, B.R.; Stephen, L.D.; Steven, D.M.; Richard, T.A.; Angela, B.; Cristian, M. & the Cloudsat Science Team. 2002. The CLOUDSAT Mission and the A-Train. *Bull. American Meteorological Society*, 83: 1771-1790.
- Wood, N. 2008. *Level 2B Radar-Visible Optical Depth Cloud Water Content (2B-CWC-RVOD) Process Description Document*. Cooperative Institute for Research in the Atmosphere – Colorado State University, Fort Collins - Colorado, 26 p.
- Zhang, D.Z.; Wang, W. & Liu, D. 2010. A Global View of Mid-level Liquid Layer Topped Stratiform Cloud Distributions and phase partition from CALIPSO and CloudSat Measurements, *Journal of Geophysical Research*, 115: 1-10.