



Estrutura Microfísica das Nuvens em Diferentes Ecossistemas da América do Sul Microphysical Structure of Clouds in Different Ecosystems of South America

Bruno Muniz Duarte & José 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: duartempo@gmail.com; jricardo@igeo.ufrj.br
Recebido em: 21/10/2009 Aprovado em: 02/12/2009*

Resumo

As nuvens afetam diretamente as condições meteorológicas do planeta, interagindo com a radiação eletromagnética proveniente do sol, da superfície terrestre e da atmosfera. Cada tipo de nuvem interage de maneira particular, sendo de extrema importância que o conjunto de nuvens em um determinado local esteja bem representado nos modelos atmosféricos para gerar resultados mais precisos. Neste trabalho, o objetivo é iniciar uma caracterização dos tipos de nuvens em função de suas propriedades microfísicas e avaliar a dependência no tipo de ecossistema e condição sinótica. Os dados foram obtidos através de sensoriamento remoto, utilizando as seguintes variáveis do sensor MODIS: raio efetivo da partícula de nuvem, espessura óptica, temperatura e pressão no topo da nuvem. Foram observados diversos tipos de distribuições das variáveis acima em seis ecossistemas diferentes, nas quatro estações do ano. Notou-se que os espectros de raio efetivo mais estreitos e concentrados são ligados a nuvens de convecção profunda, enquanto as distribuições mais espalhadas são comumente associadas com sistemas frontais. A quantidade de eventos analisados ainda foi insuficiente para mostrar padrões claros, porém, já pode indicar caminhos a serem seguidos em futuros trabalhos, no que diz respeito a metodologia e verificação das tendências apresentadas.

Palavras chave: microfísica de nuvens; sensoriamento remoto; MODIS

Abstract

Clouds directly affect meteorological conditions of the planet, by interacting with electromagnetic radiation from the sun, the earth's surface and the atmosphere. Each cloud type interacts in a particular way, being extremely important that the total set of clouds at any location is well represented in atmospheric models, in order to generate more accurate results. The purpose of this paper is to initiate a characterization of cloud types as a function of their microphysical properties and evaluate the dependence on ecosystem and synoptic condition. The data were obtained through remote sensing, using the MODIS sensor and the variables: cloud particle effective radius, optical thickness, pressure and temperature of the cloud top. Several forms of distributions were found for six different ecosystems for the four seasons. It was noted that narrow and concentrated effective radius spectra are linked to deep convection clouds, while broader distributions can be usually associated to cold frontal systems. The amount of events analyzed was not enough to show clear patterns, although the results can lead to other directions in a future and more focused work.

Keywords: cloud microphysics; remote sensing; MODIS

1 Introdução

A partir da década de 1970, quando os estudos sobre o clima e suas modificações começaram a aparecer, o entendimento dos processos físicos e radiativos das nuvens foi se mostrando essencial para melhor avaliar a evolução ambiental do planeta nas décadas seguintes. A importância em quantificar estes processos vem do fato de que as nuvens afetam diretamente as interações radiativas da atmosfera com a Terra e com o sol, com cada tipo de nuvem interagindo de uma forma particular, de acordo com seu tamanho, forma e constituição física (Rudorff *et al.*, 2007). Por exemplo, nuvens do tipo *cirrus* são praticamente transparentes à luz solar (ondas curtas), porém, retêm grande parte da radiação infravermelha proveniente da Terra (ondas longas), gerando um saldo positivo no aquecimento da atmosfera. Já nuvens do tipo *cumulus*, que são mais espessas e densas, bloqueiam a radiação solar, gerando um saldo negativo. Em um dado instante, a atmosfera de determinado local pode conter os mais variados tipos de nuvem ao mesmo tempo, sendo assim de extrema importância que o conjunto de interações das nuvens com as radiações solar e terrestre esteja muito bem representado nos modelos numéricos da atmosfera. A constituição física pode ser descrita através de certos parâmetros que apresentam valores típicos para cada tipo de nuvem, possibilitando o uso destes valores nas parametrizações dos modelos para fins de análise e previsão tanto de tempo como de clima ou simulações numéricas.

2 Revisão Bibliográfica

Em meados do século 20, muitos experimentos começaram a ser desenvolvidos para tentar fundamentar a microestrutura das nuvens, principalmente utilizando dados coletados por aeronaves especiais que atravessavam o seu interior com placas externas capturando gotículas. Battan & Raitan (1957) foram um dos primeiros a quantificar a diferença no espectro do tamanho das gotas para nuvens marítimas e continentais, evidenciando que as últimas têm espectro mais estreito. Logo em seguida, Squires (1958a) mostrou que para o mesmo tipo de núcleo de condensação e mesma massa de ar, nuvens de tipos diferentes apresentam espectros distintos. Ele verificou que, apesar de haver pouca variação no conteúdo de água líquida, as gotas se tornam menores, mais numerosas e mais homogêneas

em tamanho ao passar do tipo *stratus* para o tipo *cumulus*. Mais tarde, Hobbs *et al.* (1980) mostraram que *cumulus* embebidos em uma camada de *stratus* têm espectro ainda mais espalhado.

Outro aspecto interessante retirado de experimentos com aeronaves é o fato de haver uma tendência bi-modal no espectro das gotas, tendência esta que aumenta conforme a altura dentro da nuvem também aumenta. Warner (1969a) foi um dos autores a obter este tipo de distribuição, sugerindo que este aspecto estivesse associado com o processo de mistura por entranhamento de ar seco na nuvem. Warner estudou nuvens do tipo *cumulus*, porém, o mesmo padrão foi encontrado por Slingo *et al.* (1982) para nuvens *stratocumulus* na Inglaterra e por Ryan *et al.* (1972) para nuvens *Stratus* na costa da Califórnia.

Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é iniciar um trabalho de caracterização da estrutura física e microfísica de alguns tipos de nuvens, através de parâmetros como espessura óptica da nuvem e raio efetivo da partícula de nuvem, usando dados de sensoriamento remoto e comparando regiões diferentes de acordo com os biomas e ecossistemas distintos na América do Sul. A diferença entre os ecossistemas das regiões é determinante para definir algumas características de formação das nuvens, principalmente pelos tipos de núcleos de condensação encontrados.

3 Dados

De maneira a se obter o maior volume de dados possível, a técnica mais apropriada para estudar as nuvens é o sensoriamento remoto, uma vez que objeto de estudo não é de fácil acesso direto. Assim, este trabalho faz uso do sensor MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*), principal instrumento desenvolvido para o EOS (*Earth Observing System*), que é um programa de monitoramento da Terra da NASA. O MODIS está instalado nas plataformas TERRA e AQUA, as duas primeiras a serem lançadas pelo programa.

O sensor MODIS possui 36 bandas espectrais que vão desde o visível até o infravermelho longo. Os produtos de nuvem utilizam toda a extensão deste espectro, com alguns parâmetros tendo bandas específicas para o dia e para a noite. Espessura óptica

e raio efetivo das partículas usam bandas nas regiões do visível e infravermelho próximo, com resolução espacial de 1 km, enquanto as propriedades de topo das nuvens são tiradas a partir de bandas situadas na região do infravermelho médio, com resolução de 5 km. A Tabela 1 exibe os canais utilizados nestes algoritmos.

Banda	λ (μm)	$\Delta\lambda$ (μm)	Aplicação
1	0,645	0,05	Espessura óptica sobre os continentes
2	0,858	0,035	Espessura óptica sobre os oceanos
5	1,24	0,02	Espessura óptica sobre neve e gelo
6	1,64	0,025	Distinção neve/nuvem; fase termodinâmica
7	2,31	0,05	Raio efetivo das gotas
20	3,75	0,18	Raio efetivo das gotas; temperatura da nuvem/superfície
31	11,03	0,5	Correção termal

Tabela 1 Canais do MODIS para os produtos de Nuvem. Adaptado de King *et al.* (1997).

As regiões escolhidas para comparação foram: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Rio de Janeiro (urbano), Atlântico subtropical e Atlântico sul. A Figura 1 mostra o mapa da América do Sul com as regiões de estudo demarcadas.



Figura 1
 Regiões de estudo.
 1 - Amazônia;
 2 - Caatinga;
 3 - Cerrado;
 4 - Rio de Janeiro;
 5 - Atlântico subtropical;
 6 - Atlântico sul

4 Algoritmos – Descrição Física

4.1 Espessura Óptica e Raio Efetivo da Partícula de Nuvem

O princípio geral de recuperação dos parâmetros espessura óptica e raio efetivo consiste na exploração da variação espectral da absorção da água nas janelas atmosféricas. A água condensada é essencialmente transparente nas porções do visível e infravermelho próximo (0.4 – 1.0 μm) do espectro eletromagnético, portanto a reflectância (função de reflexão) depende somente da espessura óptica da nuvem τ_c e do fator de assimetria g . Por outro lado, a água absorve, ainda que fracamente, a radiação de bandas específicas no infravermelho médio (1.6, 2.1 e 3.7 μm) – quanto maior o comprimento de onda, mais forte é a absorção. Consequentemente, nestas bandas a função de reflexão também depende da absorção das partículas, o que é descrito pelo *albedo de espalhamento simples* ω_0 . Porém, a medida radiativa utilizada para este fim é o raio efetivo da partícula r_e , que apresenta relação linear com ω_0 para fraca absorção. Podemos então concluir que a reflectância carrega informação sobre a espessura óptica da nuvem, e nas porções de fraca absorção também revela características como o raio efetivo das partículas, parâmetro radiativo que permite avaliar a distribuição dos tamanhos das partículas de uma nuvem (Wallace & Hobbs, 2006).

O algoritmo de recuperação destes parâmetros utiliza um modelo de transferência radiativa para estimar a reflectância nas bandas transparentes e de absorção como função de τ_c e r_e . Os desconhecidos τ_c e r_e são então ajustados até que as diferenças entre o valor de reflectância estimado com o modelo de transferência radiativa e a reflectância observada sejam minimizadas. A equação para a reflectância normalizada em termos da resposta espectral $f(\lambda)$ e do fluxo solar $F_0(\lambda)$ fica definida então da seguinte forma:

$$R(\tau_c, r_e; \mu, \mu_0, \Phi) = \frac{\int_{\lambda} R^{\lambda}(\tau_c, r_e; \mu, \mu_0, \Phi) f(\lambda) F_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} f(\lambda) F_0(\lambda) d\lambda}$$

onde μ_0 , μ e Φ são, respectivamente, o coseno do ângulo zenital solar, o valor absoluto do coseno do ângulo zenital e o azimute relativo entre a direção da radiação emergente e a radiação solar incidente (King *et al.*, 1997).

4.2 Propriedades do Topo da Nuvem – Pressão e Temperatura

A recuperação de parâmetros do topo da nuvem é baseada no método da “fatia” de CO₂, utiliza o fato da atmosfera se tornar mais opaca devido à absorção de CO₂ conforme o comprimento de onda aumenta de 13,3 μm para 15 μm, fazendo com que as radiancias provenientes destas bandas espectrais sejam sensíveis a uma camada diferente da atmosfera (Menzel *et al.*, 2006).

A pressão gerada pelo MODIS é convertida em altura e temperatura das nuvens através de produtos do modelo do NCEP *Global Forecast System* (GFS), que fornece perfis verticais de temperatura em função da pressão. O método da fatia de CO₂ é mais eficiente para análise de nuvens médias e altas, especialmente nuvens semi-transparentes como os cirrus. Uma das restrições para o uso das bandas de 15 μm é que o sinal da nuvem se torna comparável ao ruído instrumental para nuvens de baixa espessura óptica e nuvens contidas nos primeiros 3 km da atmosfera. Quando nuvens baixas estão presentes, a banda de 11 μm é usada para inferir a temperatura do topo da nuvem e então altura e pressão são obtidas através do modelo.

A técnica da fatia de CO₂ é fundamentada no cálculo da transferência radiativa em uma atmosfera com uma única camada de nuvem. Para um dado elemento de nuvem no campo de visão do sensor, a radiancia observada, Rad(λ), na banda espectral λ, pode ser escrita como:

$$Rad(\lambda) = (1 - NE)Rad_{clr}(\lambda) + NERad_{bcd}(\lambda, P_c)$$

onde Rad_{clr}(ν) é a radiancia para céu claro, Rad_{bcd}(ν) é a radiancia da nuvem opaca na pressão P_c, N é a fração do campo de visão coberta por nuvem e E é a emissividade da nuvem. A radiancia da nuvem opaca pode ser calculada da seguinte forma:

$$Rad_{bcd}(\lambda, P_c) = Rad_{clr}(\lambda) - \int_{P_c}^{P_s} \tau(\lambda, p) \frac{dB[\lambda, T(p)]}{dp} dp$$

onde P_s é a pressão à superfície, P_c é a pressão no nível da nuvem, τ(λ,p) é a transmitância fracional da frequência ν emitida do nível de pressão atmosférica (p) chegando no topo da atmosfera (p = 0) e B[ν, T(p)]

é a radiancia de Planck para uma frequência ν e temperatura T(p). O segundo termo no lado direito representa o decréscimo da radiação introduzido pela nuvem opaca.

5 Resultados

Nesta seção serão apresentados os resultados para 16 casos de detecção de nuvens em imagens do MODIS em cada região de estudo, sendo quatro em cada estação do ano. Os casos analisados não têm relação alguma entre si, foram selecionados aleatoriamente de maneira apenas a obedecer ao critério de serem pixels com nuvens e estarem dentro da região de determinado ecossistema. As Figuras 2 a 5 mostram as relações entre o raio efetivo e a espessura óptica da nuvem. Cada figura contém seis gráficos (um de cada região) e cada gráfico reuni os quatro casos da estação, com a distribuição de 96 pixels (matrizes de 12x8). O raio efetivo é dado em micrômetros (μm) e a espessura óptica é um valor adimensional que varia de 0 a 100 no produto do MODIS.

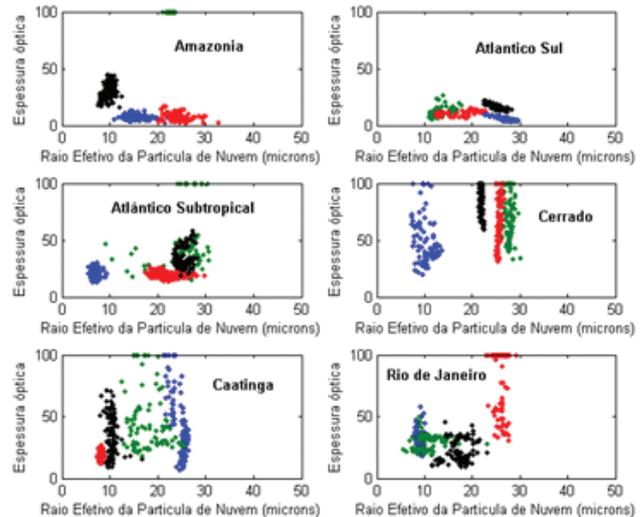


Figura 2 Relação entre o raio efetivo e a espessura óptica da nuvem para as imagens obtidas na primavera. Cada cor representa um caso analisado, onde cada um é uma seleção de 12x8 pixels referentes à região de estudo retirados da imagem original do MODIS. Cores iguais não estão relacionadas entre uma região e outra.

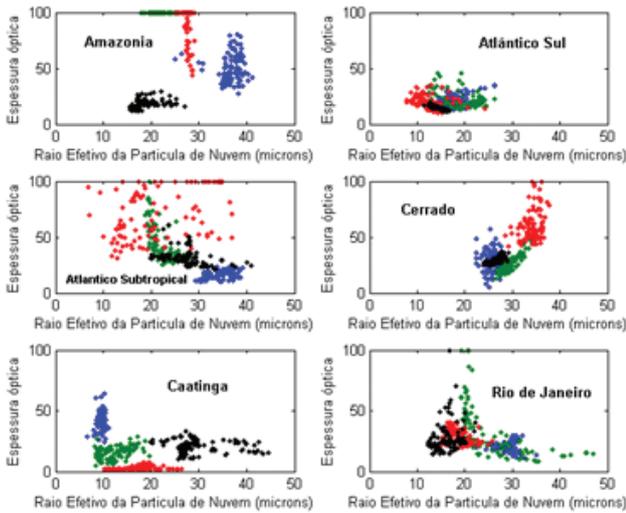


Figura 3 Relação entre o raio efetivo e a espessura óptica da nuvem para as imagens obtidas no verão. Cada cor representa um caso analisado, onde cada um é uma seleção de 12x8 pixels referentes à região de estudo retirados da imagem original do MODIS. Cores iguais não estão relacionadas entre uma região e outra.

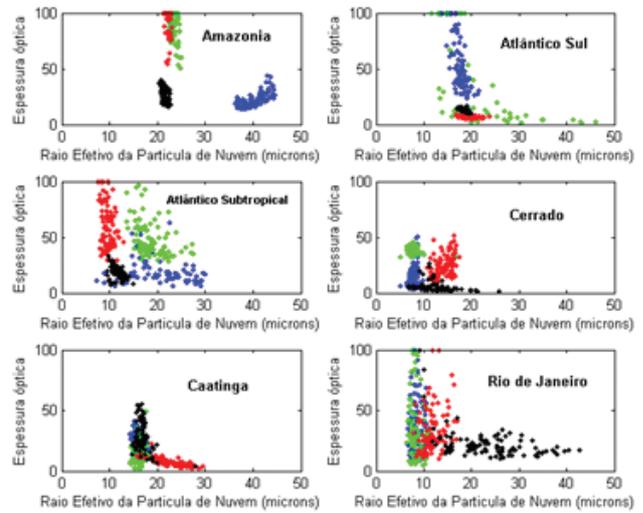


Figura 5 Relação entre o raio efetivo e a espessura óptica da nuvem para as imagens obtidas no inverno. Cada cor representa um caso analisado, onde cada um é uma seleção de 12x8 pixels referentes à região de estudo retirados da imagem original do MODIS. Cores iguais não estão relacionadas entre uma região e outra.

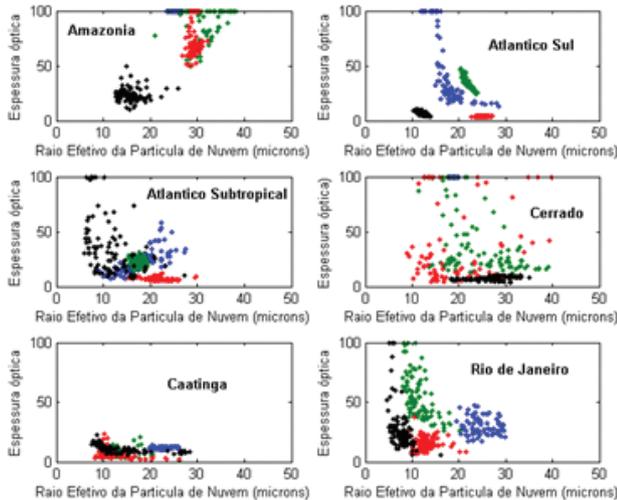


Figura 4 Relação entre o raio efetivo e a espessura óptica da nuvem para as imagens obtidas no outono. Cada cor representa um caso analisado, onde cada um é uma seleção de 12x8 pixels referentes à região de estudo retirados da imagem original do MODIS. Cores iguais não estão relacionadas entre uma região e outra.

Verificam-se todos os tipos de distribuição e padrões, como pontos muito concentrados em torno de um valor de raio e de espessura, pontos distribuídos na vertical ou horizontalmente no gráfico e pontos totalmente espalhados, sem padrão algum.

Para servir como base de comparação com os resultados obtidos neste trabalho, apresentamos o esquema da Figura 6, que mostra a classificação dos tipos de nuvens em função da altura da nuvem, representada

pela pressão do seu topo, e da espessura óptica. Esta é uma proposta do projeto ISCCP (*International Satellite Cloud Climatology Project*). Além disso, o produto de classificação de nuvens do DSA (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos /INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) é utilizado para uma classificação inicial dos casos estudados, e as cartas sinóticas do Centro de Hidrografia da Marinha são usadas para fazer uma descrição sinótica da região, juntamente com imagens do satélite o GOES, também disponibilizadas pelo DSA.

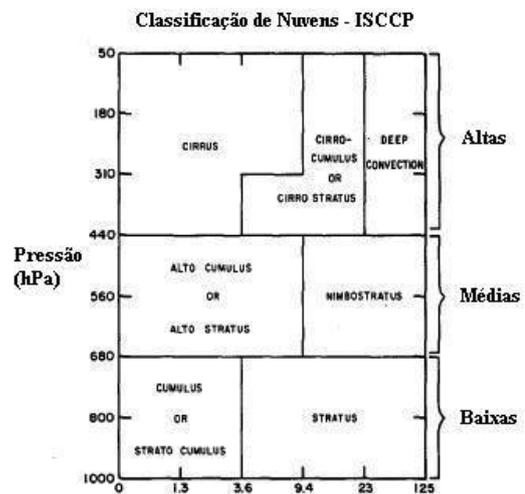


Figura 6 Esquema de classificação de nuvens proposto pelo projeto ISCCP relacionando os gêneros com a pressão no topo da nuvem e a espessura óptica da mesma.

Os casos da primavera foram os que apresentaram melhor separação gráfica, sendo possível visualizar características mais bem definidas de cada caso. Destacam-se os casos bem concentrados na Amazônia e as três distribuições bem estreitas do Cerrado. Na Amazônia, as distribuições azul e vermelha apresentaram condição sinótica semelhante (zona de baixa pressão característica da região equatorial), e nuvens cumuliformes em diferentes estágios de desenvolvimento, de acordo com o produto de classificação (o estágio mais avançado sendo o de maior raio efetivo). Os casos do Cerrado também apresentaram condições sinóticas semelhantes entre si, estando associados à forte convecção na presença de um cavado em superfície oriundo de um sistema frontal passando pelo litoral.

Os gráficos dos casos do verão têm distribuição um pouco mais espalhada. Considerando o esquema da figura 6, estes casos sugerem a presença de mais de um tipo de nuvem dentro da área compreendida na matriz de pixels. Destaca-se o caso do Atlântico Subtropical, que varia bastante tanto na espessura óptica como no valor de raio efetivo. A condição sinótica associada a esta distribuição, assim como à maioria das outras distribuições com padrão bem espalhado, é a presença de um sistema frontal frio bem marcado passando pelo sudeste brasileiro.

No outono, os resultados ficaram ainda mais espalhados nos valores de espessura óptica e raio efetivo, com exceção da Caatinga, onde os quatro casos apresentaram espessura abaixo de 30, sugerindo nenhuma situação de convecção profunda. Outro destaque é o caso do Atlântico Sul, onde a distribuição azul apresenta dois padrões distintos no mesmo caso: uma parte bem concentrada em torno de 20 μm de raio efetivo e espessura óptica de 25, e outra parte que se alonga a partir desta para valores altos de espessura, chegando a 100.

As distribuições do inverno apresentam as mesmas características dos gráficos anteriores, com padrões de distribuição concentrada assim como padrões de distribuição espalhada.

Um fato interessante que pode ser observado diz respeito às distribuições vermelha do Cerrado no outono e preta da Caatinga no verão. Na ocasião, ambas as regiões de onde os pixels foram selecionados localizavam-se na interface entre dois tipos de nuvens, de acordo com o produto de classificação do

CPTEC. O primeiro exemplo apresentou variação de espessura óptica entre 0 e 100, o que já engloba todas as possibilidades de nuvens baixas e médias (Figura 6). O segundo, apesar de variar bem menos (entre 10 e 30), se encontra exatamente no limite entre cirrocumulos ou cirrostratus e nuvens de convecção profunda.

5.1 Estudo de Caso

Um estudo mais detalhado do caso de 11 de novembro de 2008 foi realizado, avaliando o perfil horizontal de toda a extensão lateral da varredura da imagem do MODIS de 1720Z, como mostra a Figura 7. Os dados da imagem são transferidos a uma matriz de 2034 x 1354 pontos, considerando o pixel de 1 km, e uma matriz de 406 x 270 pontos, considerando o pixel de 5 km de resolução. A linha azul que cruza a imagem corresponde à posição geográfica de onde foi feito o perfil horizontal mostrado a seguir. Na matriz de 1 km, a linha correspondente ao perfil é a de número 1020, enquanto que na matriz de 5 km, a linha correspondente é a 210.

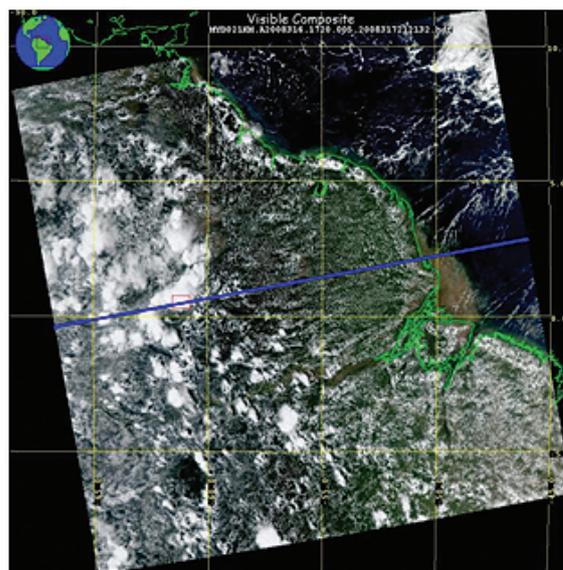


Figura 7 Imagem do canal visível do MODIS (satélite Aqua) para o dia 11 de novembro de 2008 às 1720Z, no bioma Amazônia. A região marcada em vermelho corresponde à área de onde foram obtidos os dados para a análise do caso vermelho da primavera. A linha que cruza a imagem marca a posição geográfica do perfil horizontal.

A condição meteorológica ilustrada na imagem sugere uma situação típica da região, em que a convecção se torna mais intensa conforme a brisa marítima avança para dentro do continente. O estudo de caso tem como objetivo avaliar a evolução

das variáveis microfísicas ao longo deste processo, através da pressão e temperatura do topo das nuvens, raio efetivo da partícula de nuvem e espessura óptica. As Figuras 8 e 9 (pressão e temperatura, respectivamente – 5 km de resolução) apresentam padrão similar, onde os picos representam os topos das nuvens mais desenvolvidas, e os mínimos mais pronunciados são nuvens baixas ou médias. O eixo horizontal segue a extensão lateral da imagem da esquerda para a direita, e os números das colunas da matriz são a referência de localização, uma vez que a imagem é uniformemente dividida (270 colunas para pixels de 5 km e 1354 colunas para pixels de 1 km). Observa-se claramente nos gráficos a separação entre os cumulus rasos próximos ao oceano e os complexos mais desenvolvidos à esquerda, onde os picos atingem temperaturas e pressões bem mais baixas.

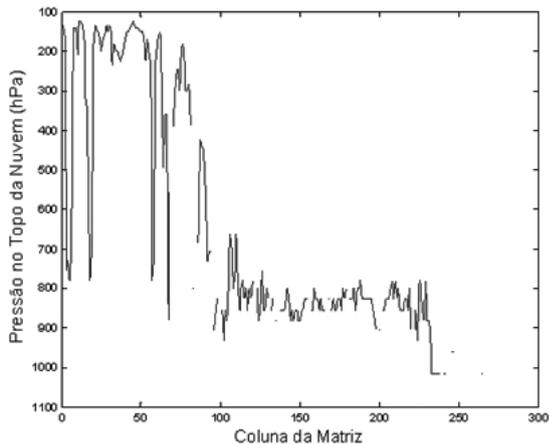


Figura 8 Perfil horizontal da pressão no topo da nuvem, referente à linha mostrada na Figura 7 que cruza a imagem de satélite para o dia 11 de novembro de 2008 às 1720Z. O eixo horizontal do gráfico representa a coluna da matriz associada aos dados da imagem.

As variáveis espessura óptica e raio efetivo (Figuras 10 e 11, respectivamente) são computadas nos pixels de 1 km, portanto o gráfico apresenta 1354 colunas no eixo horizontal, acarretando mínimos e máximos mais estreitos. A concentração de valores mais altos continua coincidindo com a região dos sistemas convectivos mais profundos, porém, o gráfico de espessura óptica mostra alguns picos excedendo o valor 100 (máximo do MODIS) próximo a costa, sobre o continente, acompanhados por uma região com partículas de maior raio efetivo também. Estes picos na região direita do gráfico estão de acordo com o observado na imagem, em que nota-se maior quantidade de formações convectivas, mas de escala menor em comparação com a região à esquerda.

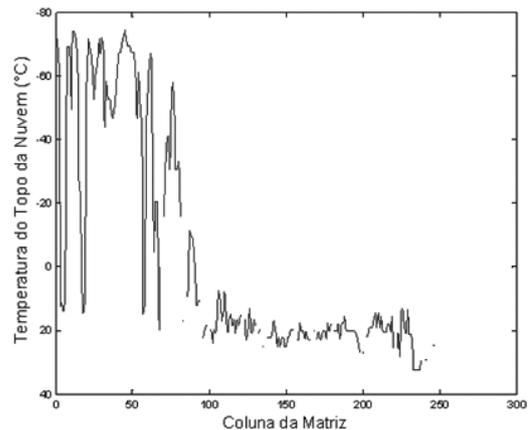


Figura 9 Perfil horizontal da temperatura do topo da nuvem, referente à linha mostrada na Figura 7 que cruza a imagem de satélite para o dia 11 de novembro de 2008 às 1720Z. O eixo horizontal do gráfico representa a coluna da matriz associada aos dados da imagem.

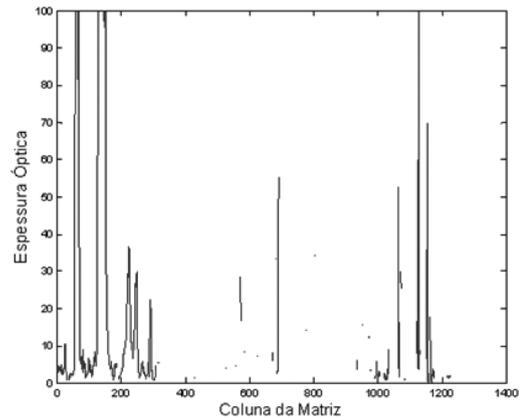


Figura 10 Perfil horizontal da espessura óptica da nuvem, referente à linha mostrada na Figura 7 que cruza a imagem de satélite para o dia 11 de novembro de 2008 às 1720Z. O eixo horizontal do gráfico representa a coluna da matriz associada aos dados da imagem.

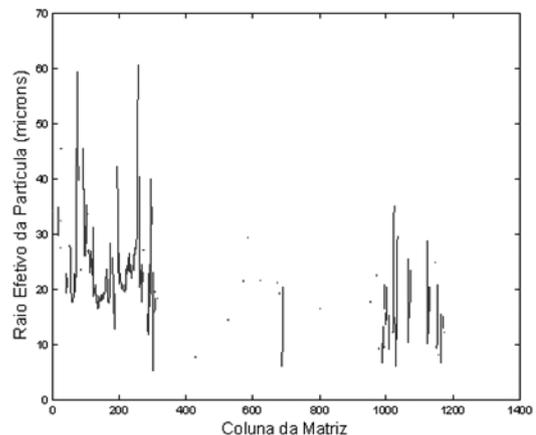


Figura 11 Perfil horizontal do raio efetivo da partícula de nuvem, referente à linha mostrada na Figura 7 que cruza a imagem de satélite para o dia 11 de novembro de 2008 às 1720Z. O eixo horizontal do gráfico representa a coluna da matriz associada aos dados da imagem.

6 Discussão e Conclusões

As distribuições de raio efetivo da partícula nas porções de nuvens dos eventos analisados apresentaram variações entre dois formatos extremos: espectros estreitos confinados em raios com variação de 2 a 3 μm e espectros bastante largos, com valores variando em até 35 μm dentro da mesma área. Ainda não foi realizado um trabalho estatístico sobre os dados encontrados e a origem meteorológica dos mesmos, porém, foi observado que os espectros estreitos e concentrados foram associados em todos os casos com nuvens de convecção profunda em áreas de baixa pressão atmosférica. As distribuições mais espalhadas, na maioria dos casos, foram associadas com sistemas frontais, apresentando grande variação nos valores de espessura óptica, o que sugere a presença de mais de um tipo de nuvem na área compreendida pelos pixels selecionados.

De fato, ao comparar os resultados com a Figura 5.1, que classifica os tipos de nuvens em função da altura e da espessura óptica, percebem-se os limiares nela impostos coincidem com as saídas do produto de classificação de nuvens do DSA, mostrando que grandes variações no valor de espessura podem significar mais de um tipo de nuvem.

A maioria dos casos estudados foi associada à convecção profunda, o que é verificado pela grande quantidade de casos com altos valores de espessura óptica (ISCCP) e muitas nuvens classificadas como multicamadas pelo produto do CPTEC. Esta constatação está aliada à dificuldade do método em observar nuvens pequenas ou aglomerados pequenos, devido à resolução espacial do sensor MODIS. Assim, uma vez que a escolha dos aglomerados de nuvens para análise foi realizada visualmente observando a imagem do canal visível do sensor, os casos de convecção profunda apareceram em maior destaque.

A quantidade de casos estudados ainda não é suficiente para definir padrões típicos de propriedades microfísicas para cada ecossistema, condição sinótica ou tipo de nuvem. No entanto são suficientes para dar a partida em estudos mais específicos e focados, analisando com maior detalhe alguma determinada região, utilizando maior número de eventos e avaliando outras variáveis para incrementar a caracterização proposta. Do mesmo modo, distinções entre as estações do ano não foram

sugeridas pelos resultados, pelas mesmas razões. Com base no conhecimento atual do comportamento da atmosfera, espera-se que estas relações típicas realmente existam, devido à grande influência comprovada dos núcleos de condensação nas características de formação das nuvens. Além disso, sabe-se que a circulação atmosférica transporta as propriedades de um local de origem para uma região adjacente, portanto, acredita-se que as estações do ano e os diferentes padrões de circulação atmosférica ao longo do ano também exerçam influência nas propriedades microfísicas das nuvens.

Entre os fatores que dificultaram o processo de análise dos dados, o principal foi a diferença de resolução espacial entre alguns parâmetros, prejudicando a avaliação combinada de duas variáveis de resoluções distintas, necessitando ajustes que geram imprecisões. Na descrição do algoritmo, King *et al.* (1997) apontaram como sendo um dos objetivos para o próximo conjunto de dados disponíveis a implementação da resolução de 1 km para as propriedades de topo das nuvens. Apesar disso, a metodologia apresentada se mostrou apropriada ao objetivo proposto, desde que se tenha em mente algumas considerações: não é possível avaliar pequenas nuvens isoladas, e sim aglomerados grandes ou extensas camadas estratificadas; a comparação entre parâmetros de escala espacial diferente pode indicar uma visão geral da relação entre eles, mas sem prover muito detalhamento.

Para suprir esta necessidade, o satélite CloudSat, que utiliza um radar como sensor para medir as propriedades microfísicas das nuvens, incluindo a realização de um perfil vertical, mostra-se como sendo o melhor caminho para o avanço desta pesquisa.

7 Referências

- Battan, L. J. & Reitan, C. H. 1957. Artificial Stimulation of Rain. *Pergamon*, p. 184.
- CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. Serviços Meteorológicos, disponível em <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/meteo/prev/cartas/cartas.htm>>. Acessado em 09/07/2009.
- Cotton, W. R. 2005. Atmospheric Thermodynamics and Microphysics of Clouds. Colorado State University: *AT 620 Lecture Notes*.

- DSA (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais)/CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos)/INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Disponível em <<http://satelite.cptec.inpe.br/home/>>. Acessado em 09/07/2009.
- 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*, Washington, 19, p. 645-663.
- King, M. D.; Tsay, S.-C.; Platnick, S. E.; Wang, M. & Liou, K.-N. 1997. Cloud Retrieval Algorithm for MODIS – Optical Thickness, Effective Particle Radius and Thermodynamic Phase. *NASA, MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD MOD-05 MOD06 – Cloud Product*.
- Menzel, W. P.; Frey, R. A.; Baum, B. A. & Zhang, H. 2006. Cloud Top Properties and Cloud Phase. *Algorithm Theoretical Basis Document*, 7, 56 p.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration). MODIS Website, disponível em <<http://modis.gsfc.nasa.gov/>>. Acessado em 09/07/2009.
- Rudorff, B. F. T.; Shimabukuro, Y. E. & Ceballos, J. C. 2007. *O Sensor MODIS e suas Aplicações Ambientais no Brasil*. São José dos Campos, Parêntese, 428 p.
- Ryan, R. T. 1972. Cloud Microstructure as Determined by an Optical Cloud Particle Spectrometer. *Journal of Applied Meteorology*, 11: 149-156.
- Slingo, A.; Brown, R. & Wrench, C. L. 1982. A Field Study of Nocturnal Stratocumulus; III. High Resolution Radiative and Microphysical Observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108: 145-165.
- Squires, P. 1958. The Microstructure and Colloidal Stability of Warm Clouds. *Tellus*, 10: 256-261.
- Warner, J. 1967. The Microstructure of Cumulus Cloud. Part I. General Features of the Droplet Spectrum. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26: 1049-1059.