

INICIAÇÃO CIENTÍFICA, RELATÓRIO FINAL

Período: 10/Jul/2017 a 31/Dez/2017 (6 meses)

Título do Projeto:	Distribuição vertical das nuvens na Amazônia central a partir das medidas de um tetômetro
Instituição:	Universidade de São Paulo
Endereço:	Rua do Matão, 1371, São Paulo-SP 05508-090
Orientador:	Henrique Barbosa, IF-USP, hbarbosa@if.usp.br Eduardo Landulfo, IPEN, elandulf@ipen.br
Aluno:	Amanda Vieira dos Santos (n° usp 8941710) amanda.vieira.santos@usp.br
Chamada:	Fluxo contínuo, bolsa de iniciação científica

1. Resumo	2
2. Objetivos.....	2
3. Síntese do relatório parcial.....	3
4. Resumo das Leituras Sugeridas.....	3
4.1 Artigo Machado et al (2002).....	3
4.2 Artigo Burleyson et al. (2016).....	4
4.3 Livro Clouds in the Perturbed Climate System (2009).....	5
5. Resultados.....	5
5.1 Estudo da Resolução Temporal	6
5.1.1 Efeito no cálculo da fração de cobertura de nuvens.....	8
5.2 Altitudes das bases e topos	10
5.3 Profundidade das nuvens.....	11
5.3.1 Retroespalhamento dentro da nuvem.....	12
5.4 Frequência de ocorrência na vertical.....	13
5.5 Ciclo diurno.....	14
5.5.1 Relação com o perfil termodinâmico	15
5.6 Discussão	16
6. Etapas do Cronograma	17
7. Reserva técnica	18
8. Referências bibliográficas	18

Orientador: _____

Bolsista: _____

1. Resumo

Nuvens são importantes agentes do sistema climático global por poderem alterar significativamente o balanço de radiação, afetando o sistema em escalas de tempo de minutos até mudanças climáticas. Alguns tipos de nuvem refletem significativamente a radiação solar, resfriando o planeta, enquanto outros são semi-transparentes mas ainda bloqueiam a saída de radiação térmica emitida pela superfície e que seria perdida para o espaço, aquecendo o planeta. Apesar de sua importância, os processos físicos que controlam as nuvens ainda não são totalmente conhecidos e faltam observações contínuas com alta resolução temporal e espacial para resolvê-los. Modelos numéricos, por exemplo, falham em reproduzir o ciclo diurno tanto da nebulosidade, quanto da precipitação.

Neste projeto de iniciação científica a aluna irá estudar o ciclo diurno da distribuição vertical das nuvens na região central da Amazônia. Isso será feito utilizando os dados do tetômetro (*ceilometer*) operado durante o experimento GoAmazon2014/15 no sítio experimental T3-Manacapuru. A detecção de nuvens será feita com o algoritmo desenvolvido no nosso Laboratório para um lidar, um instrumento semelhante. Este determina a altitude da base, topo, máximo retro-espalhamento e espessura da nuvem. A aluna irá adaptar este algoritmo e processar todos os dados que coletamos com o tetômetro na Amazônia, para cada estação. Com estes dados, ela fará uma análise estatística descritiva e calculará o ciclo diurno do perfil vertical da frequência de ocorrência. Os resultados serão interpretados com ajuda dos perfis termodinâmicos médios de cada estação, e serão comparados com resultados disponíveis na literatura.

2. Objetivos

Os experimentos GoAmazon 2014/15 e CHUVA realizaram observações contínuas com alta resolução temporal e espacial para resolver os processos físicos que controlam as nuvens, produzindo uma rica base de dados que já está sendo explorada pela comunidade científica. O principal objetivo deste projeto de iniciação científica é utilizar esta base de dados para investigar o ciclo diurno da cobertura de nuvens na Amazônia central, durante as estações chuvosa e seca. Para isso, a aluna irá utilizar os dados do tetômetro do ARM localizado no sítio T3-Manacapuru, entre Jan/2014 e Dez/2015.

Os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados ao longo deste projeto:

- Estudar a técnica de radar laser (LIDAR) para compreender o princípio de funcionamento dos tetômetros (em inglês: *ceilometer*);
- Aprender a programar em linguagem Matlab e a trabalhar com o formato de dados científicos netCDF, utilizado pelo DOE/ARM para sua base de dados;
- Estudar o algoritmo de detecção de nuvens cirrus desenvolvido na dissertação de metrado do aluno D. Gouveia e adaptá-lo para detecção de nuvens médias e baixas;
- Processar os dois anos de dados coletados no sítio experimental T3-Manacapuru, obtendo altitude da base, topo, máximo retro-espalhamento e espessura das nuvens;
- Classificar a base de dados em período seco (julho a setembro) e chuvoso (janeiro a março), e estudar o ciclo diurno médio da distribuição vertical das nuvens nestas estações do ano.

3. Síntese do relatório parcial

Os arquivos de dados do instrumento tetômetro CL31 fornecem as alturas de até três bases de nuvens detectadas pelo instrumento. Não há informação sobre a espessura de cada camada detectada, tampouco é informado se o nível do sinal, após atravessar a primeira camada de nuvens, se tornou muito baixo e por isso não foram detectadas camadas mais altas. Por este motivo, o principal objetivo deste projeto de iniciação científica foi aplicar um outro algoritmo de detecção nos dados brutos que nos permitisse ter estas informações adicionais.

Na sessão 3.2.2 do relatório anterior, mostramos o funcionamento do nosso algoritmo e quais modificações foram feitas para adaptá-lo para o CL31. Já na sessão 3.2.3 daquele relatório, apresentamos uma comparação detalhada entre o nosso algoritmo e aquele do fabricante. Um resultado inesperado desta comparação foi que as bases fornecidas pelo instrumento não correspondem aos valores reais de altura de base das nuvens, estando sempre alguns metros acima do esperado. Isso mostrou que a nossa versão do algoritmo de detecção representa uma melhoria na detecção de altura de base de nuvens. Outro ponto que discutimos no relatório anterior foi que ao usar uma média temporal maior aumentamos a frequência com que nuvens são detectadas, pois melhoramos a razão sinal ruído do instrumento.

Por outro lado, encontramos duas dificuldades não previstas: (1) a maneira que a Vaisala grava os dados, fazendo médias temporais diferentes em trechos diferentes dos perfis e (2) o baixo sinal-ruído no sinal molecular acima de 2km. Para resolver o primeiro ponto, foi necessário implementar todas as correções sugeridas por Kotthaus et al (AMT 2016). O ponto 2 não foi possível contornar, mesmo com médias temporais maiores. O sinal molecular acima das nuvens é o que utilizamos para detectar a altitude do topo da nuvem. Como o sinal-ruído deste instrumento é muito ruim (bem pior do que outros tetômetros, e.g., Lufft CHM15x), não é possível detectar com certeza os topos, sendo assim, a maioria serão considerados “topos-arentes”. Isso significa que a distribuição vertical de nuvens que iremos apresentar na próxima sessão tem um viés em relação as primeiras camadas detectadas.

4. Resumo das Leituras Sugeridas

Durante os últimos 6 meses desta Iniciação Científica, para ajudar na discussão e interpretação dos dados contido nesse relatório foram lidos principalmente artigos que estudam o ciclo diurno da convecção na Amazônia a partir de imagens do satélite geoestacionário GOES, e capítulos de livro que discutem a relação das nuvens com o balanço de energia, termodinâmica, dinâmica e precipitação.

4.1 Artigo Machado et al (2002)

Muitas propriedades do ciclo diurno da convecção sobre a América do Sul foram descritas por dados de satélites geoestacionários. No artigo “Diurnal march of the convection observed during TRMM-WETAMC/LBA” de Luiz A. T. Machado, Henri Laurent e Alexandra A. Lima, é descrito o ciclo diurno de diferentes tipos de nuvens, da chuva observada pelo radar e das variáveis termodinâmicas. O estudo usa quatro fontes de dados: imagens de temperatura

de brilho infravermelho do GOES 8, o indicador de posição do plano de altitude constante de 2 km (CAPPI) do radar Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA), medidas de precipitação da rede de pluviômetros e radiossondas liberadas em Rebio Jarú, Rolim de Moura e Abraços durante o experimento TRMM-WETAMC/LBA. A combinação das diferentes instrumentações fornece uma ampla base de dados para estudos sobre processos de precipitação e nuvens.

Segundo Machado et al. (2002), a modulação da convecção diurna tem grande influência na forçante radiativa da cobertura de nuvens e é um fator importante no balanço da radiação da Terra. Radiação infravermelha, na janela atmosférica, é muito sensível à temperatura da superfície e à cobertura de nuvens, especialmente nuvens convectivas profundas. Os autores observaram que a fração de nuvens total mínima acontece quando a fração de nuvens altas e convectivas tem sua maior taxa de aumento, ou seja, a convecção começa quando a cobertura de nuvens total é mínima e o fluxo solar está perto do máximo, quando a maior radiação solar atinge a superfície. Áreas de nuvens altas e de nuvens convectivas alcançam seu máximo algumas horas após a chuva máxima detectada pelas radiossondas e pelo CAPPI. A maior cobertura de nuvens ocorre à noite, já a menor cobertura de nuvens acontece algumas horas antes da precipitação máxima. A fração de chuva varia muito mais que a fração de nuvens. Foram observadas ocorrências de máximo de fração de chuva algumas vezes à tarde, e algumas vezes à noite, sendo que um máximo à tarde não nega a existência de um outro máximo à noite.

4.2 Artigo Burleyson et al. (2016)

Burleyson et al. (2016) argumentam que o ciclo de água da Terra é bastante influenciado pelo calor latente proveniente da convecção sobre a floresta amazônica, mas que devido a sua localização e por não haver muitos dados observacionais não se sabe muito sobre a convecção da região. O experimento Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5) e o projeto CHUVA, que estuda regimes de precipitação por todo o Brasil, tiveram como um de seus objetivos observar a influência da cidade de Manaus nas condições meteorológicas da região. Foram feitas medidas *upwind* e *downwind* de Manaus. Estas observações representam um dos conjuntos de dados mais completos sobre a Amazônia, entretanto são limitados espacialmente e temporalmente. Uma complicação possível é a variabilidade espacial da convecção profunda que ocorre naturalmente nos sítios do experimento, o que pode fazer com que as diferenças entre de propriedades entre os dados coletados *upwind* e *downwind* de Manaus não sejam puramente antropogênicas.

A análise feita em Burleyson et al. foi com base na climatologia de 15 anos de dados de satélites estacionários, pois permitem uma análise mais detalhada da fase do ciclo diurno. Os dados foram separados sazonalmente para que sejam analisados as variações entre a fase e amplitude do ciclo diurno nas diferentes estações. A maior parte da chuva anual cai durante a estação chuvosa, que vai de Dezembro até Maio. A frequência de convecção profunda na Bacia Amazônica é espacialmente heterogênea. A análise feita em Burleyson et al. mostra que se os sítios de coletas de dados do GoAmazon2014/5 fossem a algumas centenas de quilômetros a leste ou oeste, ou com um diferente posicionamento em relação aos rios, o ciclo diurno teria uma fase e amplitude diferentes, o que mostra que as comparações entre os diferentes sítios do experimento devem ser feitas cuidadosamente.

4.3 Livro *Clouds in the Perturbed Climate System* (2009)

No capítulo escrito por Heintzenberg e Charlson para o livro *Clouds in the Perturbed Climate System* (2009), os autores explicam que as nuvens existem desde a superfície, em forma de neblina, até a mesosfera. Elas podem existir em temperaturas acima de 0°C, e por grandes períodos de tempo como água ou gelo. As nuvens se formam quando o ar esfria e a umidade relativa passa de 100%. Isso acontece, por exemplo, quando o ar sobe ou quando perde energia em forma de radiação. Esse esfriamento pode ocorrer em quase qualquer altitude e em várias condições meteorológicas, o que faz as nuvens tomarem vários tipos de aparência, desde as maiores até as mais finas nuvens. As nuvens são influenciadas pela ação humana, sendo essa perturbação antropogênica proveniente de vários mecanismos.

As nuvens se formam quando partículas de água condensada crescem de núcleos de condensação de nuvem (cloud condensation nucleus, CCN) ou de núcleos de gelo (ice nucleus, IN), e as gotículas congelam ou o vapor de água se deposita e se torna água congelada. Os CCN e IN são encontrados na forma de aerossol, então para entender a formação de nuvens precisamos entender também a natureza dos aerossóis. A variabilidade das propriedades das nuvens afeta o balanço de radiação e o ciclo hidrológico global, sendo então difícil avaliar a precipitação em larga escala.

Heintzenberg e Charlson argumentam que as maiores incertezas estão na microfísica e na nucleação do gelo, e os efeitos da correlação dos aerossóis, nuvens e condições meteorológicas, tornam difícil a explicação completa dos dados climáticos do último século. Para melhorar a previsão de eventos climáticos extremos e medir a precipitação global, é necessário uma maior compreensão da microfísica do gelo, porém os métodos de obtenção de informação da microfísica de nuvens de gelo ainda é limitado, tanto com técnicas in-situ como com satélites, como discutido por Anderson et al., no mesmo livro.

Anderson et al. também explicam que as mudanças climáticas que ocorreram no século XX, e continuam ocorrendo, podem ter sido influenciadas de forma importante pelas interações entre aerossóis e nuvens, possivelmente devido a mudanças no CCN devido a industrialização. Para entender essas mudanças climáticas, é preciso identificar as influências do aerossol antropogênico e do aquecimento global na formação de nuvens. Entretanto é difícil identificar essa influência claramente pois muitos outros fatores naturais exercem grande influência nas propriedades das nuvens. Observações indicam que o aumento de partículas aumenta o número de gotículas na base de nuvens, mas ainda se procura identificar como as mudanças nos aerossóis afetam o albedo e a cobertura de nuvens, e também a precipitação.

5. Resultados

Nesta segunda etapa da bolsa de iniciação científica, processamos os 2 anos de dados de dados do instrumento tetômetro CL31. Com o algoritmo adaptado de Gouveia (2014), foram encontradas as bases e topos de nuvens e também a altitude de máximo retro espalhamento utilizando a resoluções temporal original do tetômetro (16 s) e também com médias de 2 minutos, 5 minutos, 10 minutos e 30 minutos. Nas subseções a seguir, apresentamos a análise destes dados de diferentes maneiras. Inicialmente, iremos discutir como as diferentes médias temporais modificam ou não nossos resultados (sessão 5.1). Em

seguida, na seção 5.2, analisamos como as bases e os topos estão distribuídos na vertical durante as estações seca e chuvosa. A seção 5.3 discute a profundidade das nuvens medidas pelo instrumento, e iremos mostrar que o instrumento tem limitações que prejudicam esta medida. Esta limitação se dá porque a maioria dos topos observados é aparente, ou seja, o sinal do laser é completamente atenuado dentro da nuvem, e por isso a distribuição vertical observada tem um viés em relação a primeira camada. Apesar da limitação, na seção 5.4 apresentamos a distribuição vertical da fração de cobertura de nuvens, e na seção 5.5 o seu ciclo diurno, discutido em função do perfil termodinâmico, na seção 5.5.1. Na seção 5.6, discutimos e comparamos nossos resultados com aqueles de Collow et al (2016).

5.1 Estudo da Resolução Temporal

Para escolher a média temporal que será usada na análise dos resultados, vamos primeiro compará-las. Nos histogramas abaixo, vemos a quantidade de bases detectadas pelo algoritmo com resolução temporal de 16 segundos e de 30 minutos. Diferentemente do algoritmo original, o nosso não tem um limite máximo do número de camadas identificadas, e conseguimos encontrar perfis com até 5 bases de nuvens. As barras de cores diferentes representam as 5 camadas de nuvens que o algoritmo conseguiu encontrar. Vemos que para a média de 30 minutos foram encontradas, relativamente, mais bases de nuvens acima da terceira camada. Isso acontece pois o sinal ruído aumenta ao usar médias temporais maiores. Ressaltamos, contudo, que mesmo com a média temporal maior, ainda são detectadas poucas nuvens acima da terceira camada. Isso pode acontecer se 1) realmente não houver muitas camadas de nuvens, ou mais provavelmente 2) se a potência do laser utilizado, que acaba sendo atenuado ao passar pelas camadas mais baixas, não for suficiente para medir muitas camadas.

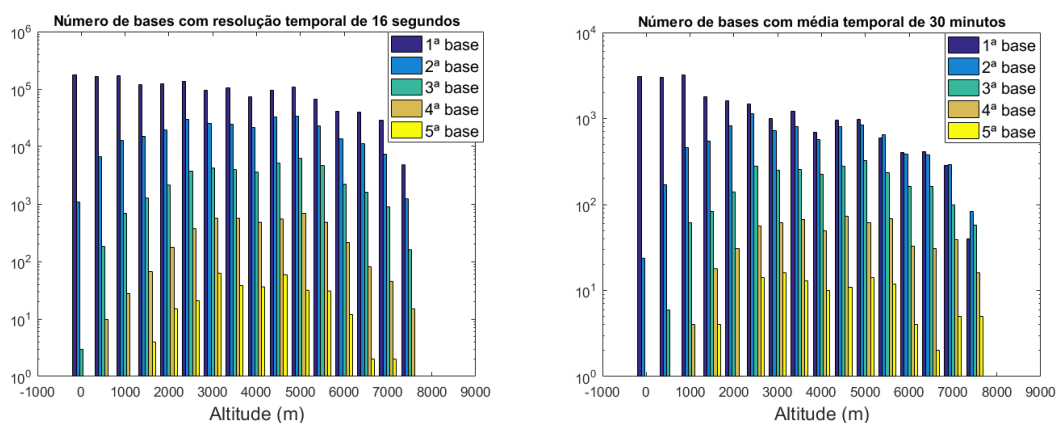


Fig. 1: Contagem do número de bases da primeira a quinta base detectada pelo algoritmo em função da altitude em metros, para uma média temporal de 16 s (esquerda) e 30 min (direita).

Como o número de perfis medidos muda com a média temporal, é mais fácil perceber o aumento de perfis detectados com 5 camadas, para médias temporais maiores, a partir de uma tabela. Abaixo estão apresentadas o número de primeiras, segundas, terceiras, quartas e quintas camadas encontradas para cada média temporal. A tabela mostra também sua contribuição relativa. Vemos que, para médias temporais maiores, em geral, aumenta a contribuição relativa de perfis com muitas camadas de nuvens. Por exemplo, 0.26% dos perfis com nuvens tem 4 camadas usando média de 16 s, mas são 2.39% com média de 30 min.

Mostramos, no gráfico da Fig. 2, a distribuição vertical das altitudes das bases detectadas. O eixo horizontal representa a fração relativa, isto é, o número de bases em cada intervalo de altura (125 m) dividido pelo número total de bases. A curva azul corresponde à média temporal de 16 s, a verde à média de 2 minutos, a vermelha à de 5 minutos, a preta à de 10 minutos, e a magenta à de 30 minutos. Podemos ver que não há muita diferença entre as curvas das bases encontradas pelo algoritmo usando as diferentes médias temporais. A curva da maior média temporal (30 minutos) é a que mais mostra bases de nuvens em altitudes por volta de 1000 metros, enquanto também é a que menos mostra para altitudes por volta de 5000 metros. O contrário acontece com a curva de menor resolução temporal (16 segundos). Como vimos na Fig. 1, foram encontrados mais perfis com 4 e 5 camadas de nuvens usando a média temporal de 30 minutos. Usar uma média temporal maior diminui o ruído e são encontradas mais bases de nuvens. Entretanto o número de perfis com 4 ou 5 bases ainda é pequeno e são as primeiras três camadas que dominam o número total de bases, fazendo com que as curvas de todas as médias temporais tenham poucas diferenças.

Tabela 1 – Número de perfis com apenas 1, 2, 3, 4 ou 5 camadas de nuvens em função da resolução temporal utilizada. A segunda linha mostra a contribuição relativa (em %), definida como a razão entre o número de perfis com N camadas e o número de perfis com nuvens para cada resolução temporal. Já a contribuição absoluta aparece entre parêntese, e é definida como a razão para o número total de perfis.

	16s	2 min	5 min	10 min	30 min
<i>Camada 1</i>	1271929 82.02 %	178677 75.32 %	72655 72.80 %	36493 65.67 %	12083 58.10 %
<i>Camada 2</i>	238136 15.36 %	47498 20.02 %	23996 24.04 %	14361 25.84 %	6093 29.30 %
<i>Camada 3</i>	36303 2.34 %	9411 3.97 %	2011 2.01 %	3821 6.88 %	2011 9.67 %
<i>Camada 4</i>	4039 0.26 %	1429 0.60 %	988 0.99 %	754 1.36 %	498 2.39 %
<i>Camada 5</i>	315 0.02 %	194 0.08 %	152 1.36 %	144 0.26 %	111 0.53 %
Total	1550722 100 %	237209 100 %	99802 100 %	55573 100 %	20796 100 %

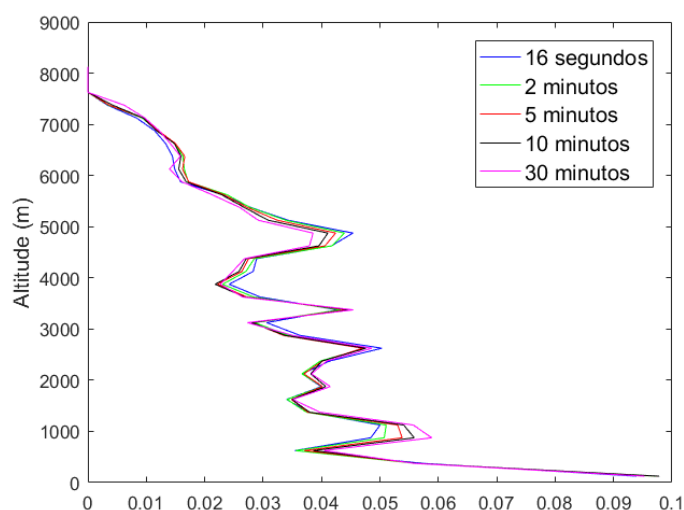


Fig. 2: Fração do número de bases em cada intervalo de altura (125 m) em função da resolução temporal utilizada. Todos os dados dos dois anos de medidas foram utilizados.

5.1.1 Efeito no cálculo da fração de cobertura de nuvens

Para verificar os efeitos da mudança da média temporal no cálculo da fração de cobertura de nuvens, vamos comparar as detecções de nuvens em um trecho do dia 22 de dezembro de 2013. Vemos na Fig. 3, painel superior esquerdo (resolução de 16 s) que, em torno dos 750 metros de altura, são detectadas nuvens. Estas nuvens ocorrem em menos de 50% do tempo entre 09h15 e 11h00. Entretanto, quando usamos média de 2 minutos, aproximadamente em 50% do intervalo de tempo representado foram identificadas nuvens. Esse número aumenta ainda mais quando é usada uma média de 5 minutos, quando são detectadas nuvens em aproximadamente 80% do intervalo de tempo. Com média temporal de 30 minutos, a cobertura de nuvens é 100% no intervalo de tempo representado. Isso acontece pois, ao fazer uma média temporal maior, estamos misturando perfis sem nuvem com perfis com nuvem. No limite, temos uma única nuvem média, com retro-espalhamento menor, mas ocupando todo o intervalo.

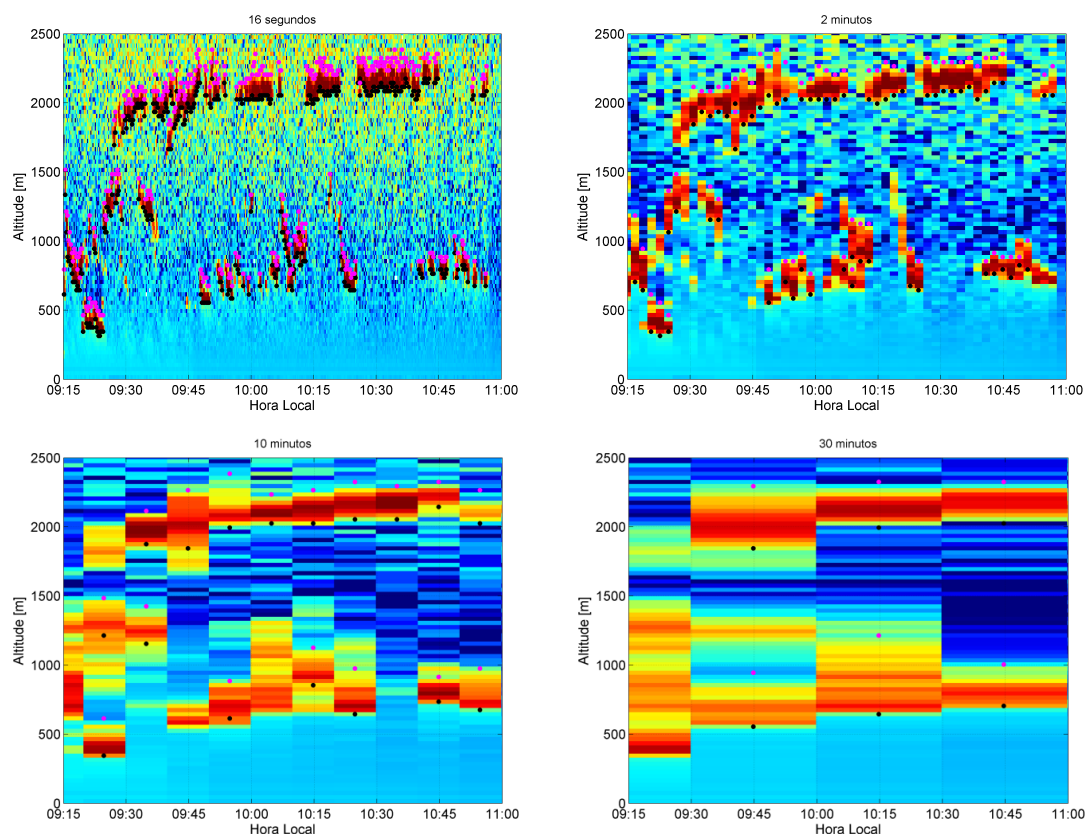


Fig. 3: Variável backscatter em função do alcance e hora local para as resoluções temporais de 16 s, 2 minutos, 5 minutos e 30 minutos. As bases e topos foram marcadas em preto e rosa respectivamente.

Vamos agora analisar o efeito na detecção de uma nuvem média. Vemos nos painéis da Fig. 4, que o efeito do uso de médias temporais diferentes não altera muito a percentagem de cobertura de nuvem como acontece com nuvens rasas. Isso acontece porque as nuvens médias, em geral, são do tipo estratiforme, assim tem grande extensão espacial, estando geralmente associadas a dias nublados; enquanto que as nuvens rasas são cúmulos de bom tempo, com pequena extensão espacial e ocorrência intermitente. Em suma, as Fig. 3 e 4 mostram que usando médias temporais maiores temos um sinal ruído maior, entretanto superestimamos a fração de cobertura, sendo o efeito maior para nuvens baixas.

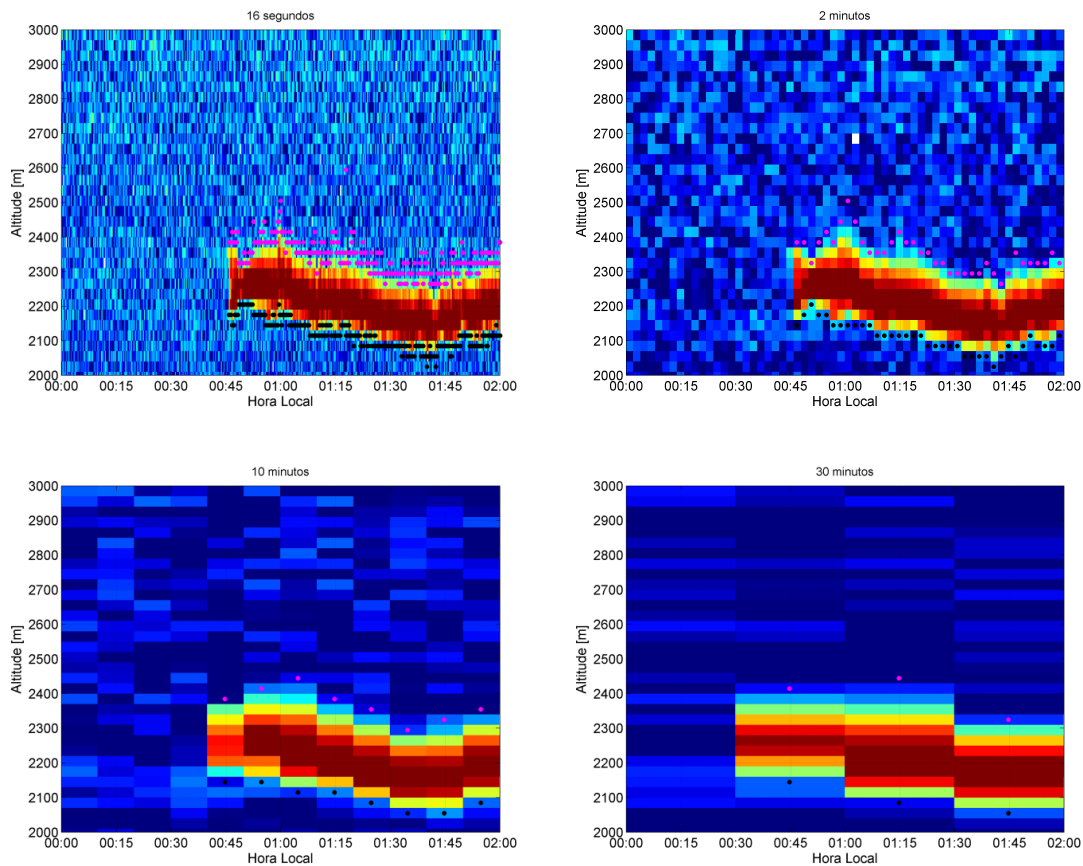


Fig. 4: Igual a figura 3, mas para uma nuvem média, no dia 22 de dezembro de 2013

Para verificar esta questão, na figura abaixo estão representados os perfis verticais de fração de cobertura de nuvens para as 5 médias temporais, para julho de 2014. Podemos ver a maior diferença entre as diferentes médias temporais por volta de 1 km, o que mostra que a influência das maiores médias temporais na detecção de bases de nuvens é realmente maior para as nuvens rasas. Também vemos que há um aumento sistemático da fração de cobertura quanto mais aumentamos a média temporal.

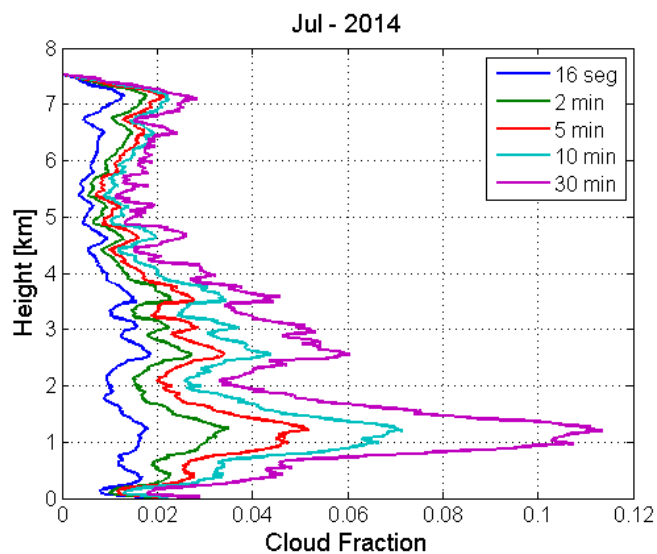


Fig. 5: Fração de cobertura em função da altura para o mês de Julho de 2014 para as resoluções temporais de 16 segundos, 2 minutos, 5 minutos e 30 minutos.

Este aumento artificial pode ser visto também nos valores da tabela 1, se calcularmos a contribuição absoluta em vez da relativa, o que é mostrado na tabela 2. Há um aumento substancial na fração de perfis com alguma nuvem (de 41% para 62%). Se o aumento da fração de perfis com alguma nuvem fosse devido ao melhor sinal ruído, deveríamos ver um aumento do número de perfis com apenas 1 camada (i.e. seriam perfis considerados sem nuvem, mas que com uma média temporal maior, passaram a ser identificados como com nuvem). Entretanto, este aumento foi apenas de 33.7% para 35.9%. Isso mostra que o aumento é artificial. **Portanto, consideramos que o ideal é utilizar a resolução temporal original de 16 s, e é isso que será apresentado nas próximas subseções.**

Tabela 2 – Complemento da Tabela 1 mostrando a contribuição absoluta (em %), definida como a razão entre o número de perfis com N camadas e o número total de perfis para cada resolução temporal.

	16s	2 min	5 min	10 min	30 min
Camada 1	33.65 %	35.43 %	36.02 %	36.18 %	35.92 %
Camada 2	6.30 %	9.42 %	11.90 %	14.24 %	18.11 %
Camada 3	0.96 %	1.87 %	2.78 %	3.79 %	5.98 %
Camada 4	0.11 %	0.28 %	0.49 %	0.75 %	1.48 %
Camada 5	0.01 %	0.04 %	0.08 %	0.14 %	0.33 %
Total	41.03 %	47.04 %	51.27 %	55.10 %	61.82 %

5.2 Altitudes das bases e topos

Passamos agora a analisar os resultados obtidos com o nosso algoritmo de detecção aplicado aos dados com 16 s de resolução temporal. Como proposto no projeto, fazemos a análise para a média da estação seca (Julho, Agosto e Setembro) e chuvosa (Janeiro a Março). A Fig. 6 mostra o número de bases detectadas em função da altitude, com uma resolução vertical de 125 m. Podemos ver que há mais bases de nuvens durante as estações chuvosas. Para as estações chuvosas de 2014 e 2015 os histogramas são bastantes parecidos, com os números de bases detectadas bem próximos nos dois anos. Para as estações secas de 2014 e 2015, foram detectadas mais bases de nuvens baixas para o ano de 2014, mas os histogramas para os dois anos ainda são parecidos, com o maior número de bases um pouco acima de 1 km, que deve corresponder ao topo da camada limite quando esta está bem desenvolvida, logo antes da ocorrência da precipitação.

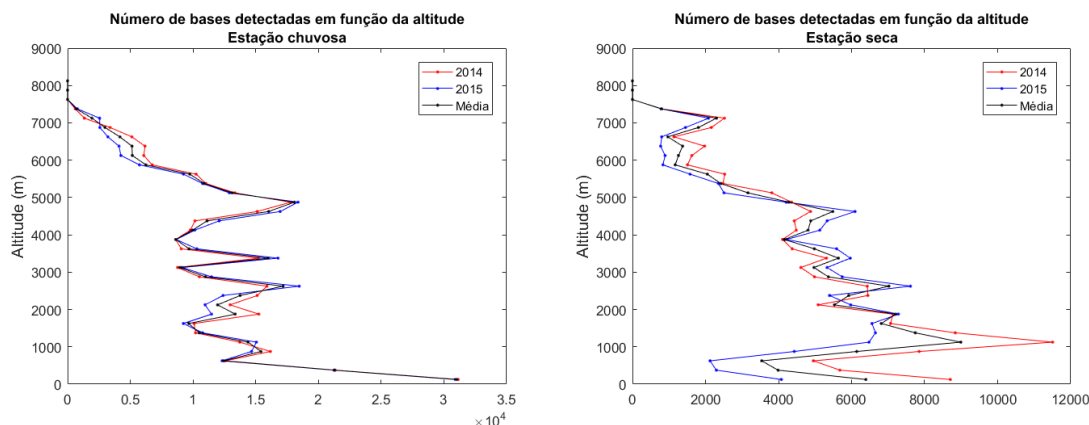


Fig. 6: Histogramas do número total de bases para as estações chuvosa (janeiro a março, à esquerda), e seca (julho a setembro, à direita)

Nos dois histogramas da Fig. 7, estão representadas as contagens de topos de nuvens detectados pelo algoritmo nas estações chuvosas e secas de 2014 e 2015. Vemos que as formas dos histogramas são semelhantes àquelas dos histogramas das bases nesses mesmos períodos. Nas estações chuvosas, há três picos nos histogramas, e topos de nuvens abaixo de 1 km, entre 2 e 3 km e por volta de 5 km são os mais frequentes. Na estações secas de 2015 a maior frequência de topos de nuvens detectadas acontece em alturas acima de 1 km e abaixo de 5 km.

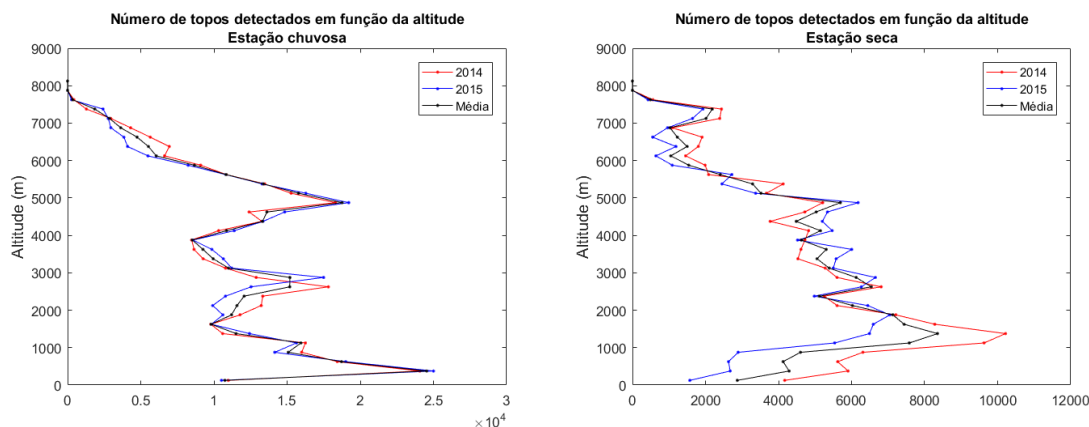


Fig. 7: Como a figura 6, mas para os topos das nuvens.

5.3 Profundidade das nuvens

Foram calculadas também a espessura de nuvens para as estações secas e chuvosas dos dois anos de dados, subtraindo as bases dos topos de cada perfil. Nos histogramas da Fig. 8, estão representados esses valores. As espessuras estão apresentadas no eixo horizontal e a contagem relativa no eixo vertical. Vemos que a maioria das nuvens tem espessura por volta de 200 m, e são poucas as nuvens com mais de 600 m de espessura. O mesmo é observado se separarmos as bases com altura menor que 1 km, entre 1 e 2 km, entre 2 e 3 km, e acima de 3 km e calcularmos os histogramas para cada um desses intervalos de altitude (Fig. 9). Não há muita diferença entre as espessuras das nuvens das duas estações. Entretanto, vemos uma pequena diferença para as nuvens com espessuras maiores que 800 m na estação chuvosa. Estas são mais frequentes que na estação seca. Já na estação seca, a frequência de nuvens com valores por volta de 200 m de espessura são mais frequentes que na estação chuvosa, e a espessura média é menor que durante a estação chuvosa. A média do histograma das estação chuvosa é de aproximadamente 220,9 m, enquanto a da estação seca é de aproximadamente 184,6 m. A média para todo o período dos dois anos de dados, é de aproximadamente 204,7 m. Logo, a espessura das nuvens da estação chuvosa é em média maior que as nuvens do ano inteiro, enquanto a da estação seca é menor.

Como sabemos, há muitas nuvens com desenvolvimento vertical muito maior (e.g. o trabalho de Machado et al discutido na seção 4.1). Isto significa, então que o nosso resultado acima é, na verdade, fruto de uma limitação do instrumento. Para o comprimento de onda utilizado no instrumento, o coeficiente de extinção volumétrico varia de 1 km^{-1} a 1000 km^{-1} , dependendo da nuvem. Assim, nos primeiros 200 m de uma nuvem, a profundidade óptica já alcança valores entre 0.2 e 200. Quando a profundidade da nuvem é muito grande, o sinal do laser é fortemente atenuado segundo a lei de Beer-Lambert, e portanto o topo detectado é aparente (o sinal cai para o nível de ruído e não é possível saber onde está o topo verdadeiro).

Apenas para nuvens muito delgadas, de pequena profundidade óptica (tipicamente < 3), como nuvens cirrus, seria possível medir toda a extensão da nuvem. Isto significa que um instrumento como o que estamos utilizando, que trabalha com comprimento de onda no infravermelho próximo, não serve para medir a extensão vertical das nuvens, mas apenas para identificar sua base. Para medir a extensão, instrumentos que trabalham com comprimentos de onda maiores tem que ser utilizado, como os radares.

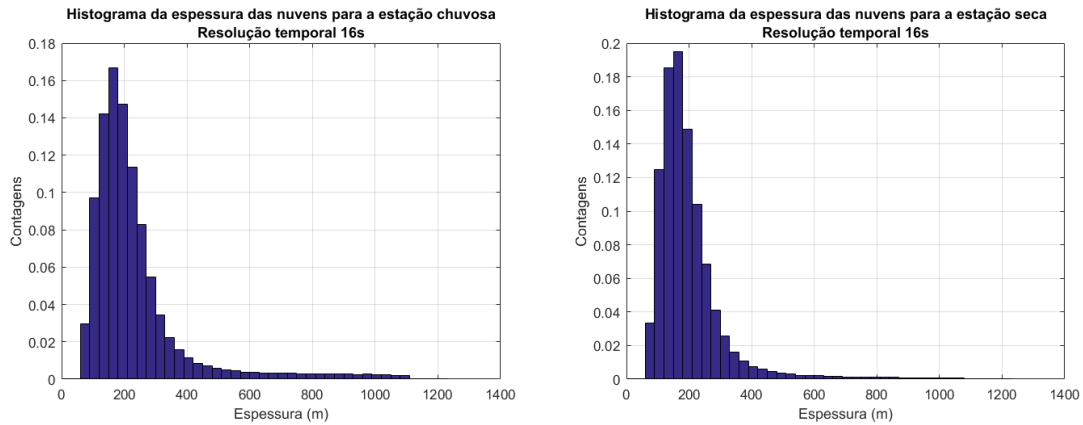


Fig. 8: Histograma relativo das espessuras das nuvens para estação a) chuvosa (à esquerda) e b) seca (à direita).

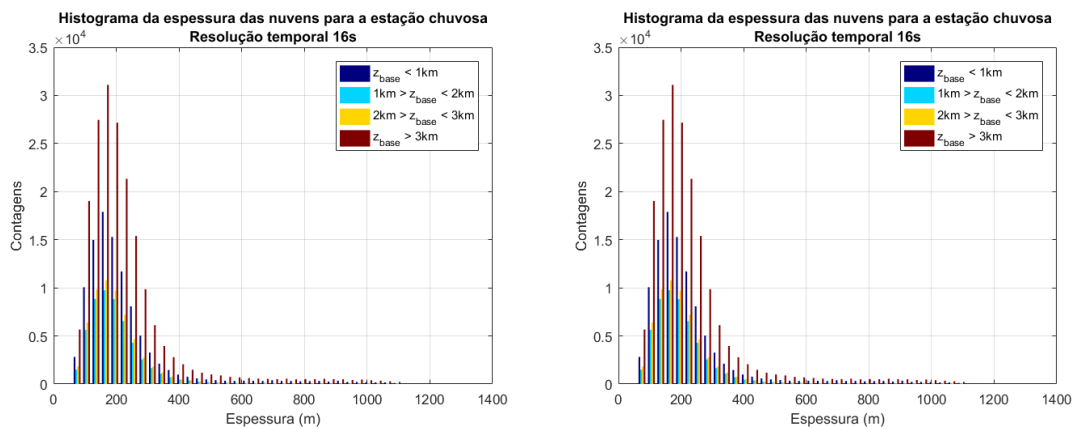


Fig. 9: Espessura das nuvens nos intervalos de altura em que a base é menor que 1 km, entre 1 e 2 km, entre 2 e 3 km, e maior que 3 km, para a estação a) chuvosa (à esquerda), e b) seca (à direita).

5.3.1 Retroespalhamento dentro da nuvem

Para demonstrar que a atenuação do sinal do laser dentro da nuvem é, de fato, substancial, foram obtidos os valores máximos do retroespalhamento dentro das nuvens detectadas para cada perfil. Nos histogramas abaixo (Fig. 10), estão representados os valores para as estações seca e chuvosa. Os histogramas mostram que é mais frequente que o valor máximo do retroespalhamento seja abaixo de $2000 \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ nas duas estações. Na estação chuvosa é mais frequente que o retroespalhamento máximo detectado seja abaixo de $250 \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ que na estação seca. Na estação seca, os valores máximos do retroespalhamento mais frequentes são entre 1250 e $1750 \text{ km}^{-1} \text{ sr}^{-1}$.

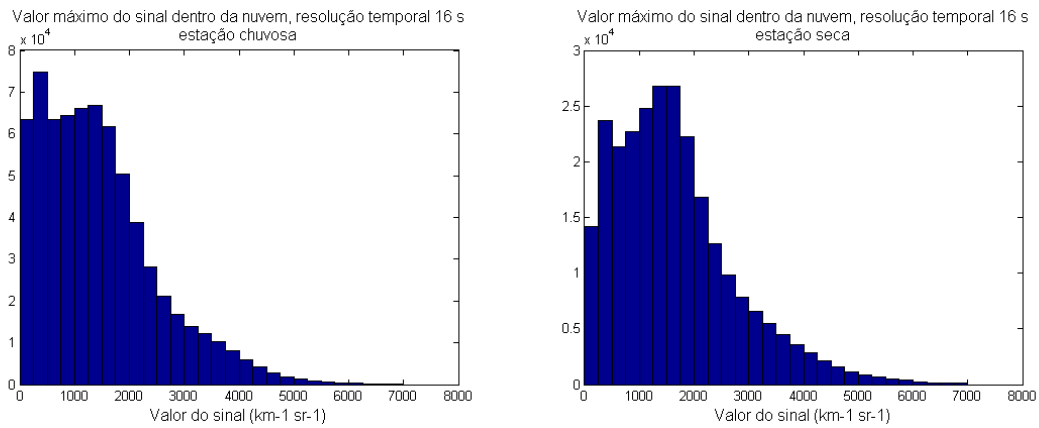


Fig. 10: Histograma dos valores máximos do retroespalhamento dentro das nuvens detectadas para os perfis da estação chuvosa (janeiro a março, esquerda) e estação seca (julho a setembro, direita).

Para ter uma estimativa da atenuação na nuvem, entretanto, é mais importante o valor médio do retroespalhamento. Os painéis da Fig. 11 mostram os histogramas desses valores. Na estação seca, nuvens com valor médio de retroespalhamento entre 500 e 750 $\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$ são mais frequentes que na estação chuvosa. Quanto maior o retroespalhamento, maior o coeficiente de extinção volumétrica da nuvem. Conseqüentemente, a profundidade óptica da nuvem também é grande. De fato, podemos estimá-la a partir das Fig. 8 (200 m) e Fig. 11 (700 $\text{km}^{-1} \text{sr}^{-1}$). Assumindo um lidar-ratio de 20 sr, a profundidade óptica das nuvens observadas é da ordem de, no mínimo, 2800. Com profundidades ópticas grandes, o sinal acaba não atravessando toda a nuvem, e faz com que os topos da última camada sejam considerados um “topo-aparente”, pois o sinal foi extinguido.

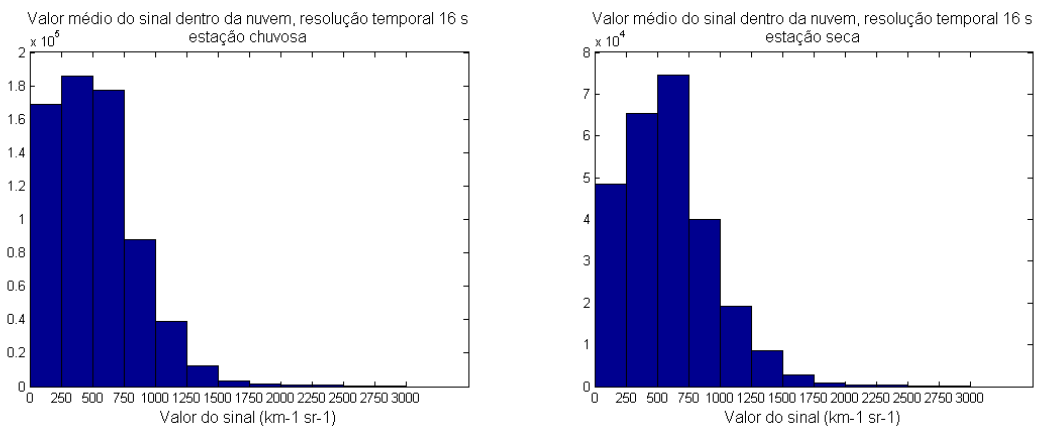


Fig. 11: Histograma dos valores médios do retroespalhamento dentro das nuvens detectadas para os perfis da estação chuvosa (janeiro a março, esquerda) e estação seca (julho a setembro, direita).

5.4 Frequência de ocorrência na vertical

O perfil vertical da fração de cobertura de nuvens foi calculado para as estações secas e chuvosas dos dois anos de dados. O gráfico abaixo apresenta esses valores. Foram detectadas mais nuvens para a estação chuvosa, onde a fração de cobertura média máxima é aproximadamente de 4.3 % para as nuvens rasas em alturas por volta de 0.5 km. A maior fração de cobertura 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 grandes picos para a estação chuvosa, enquanto na estação seca, o único grande pico foi aquele por volta de 1.3 km.

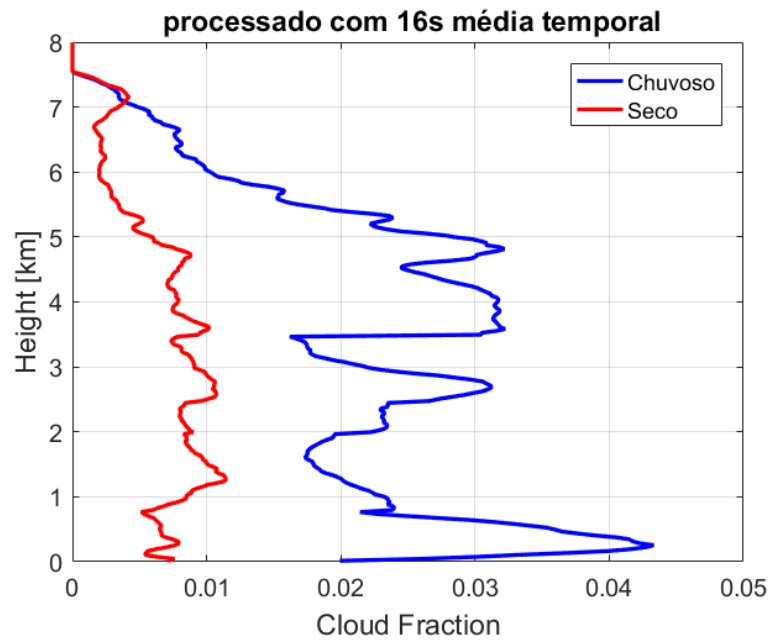
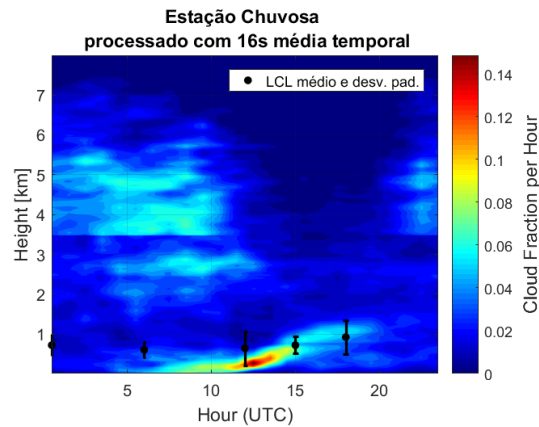


Fig. 12: Cloud fraction em função da altura para as estações chuvosa e seca para os dois anos de dados.

5.5 Ciclo diurno



Os gráficos abaixo (

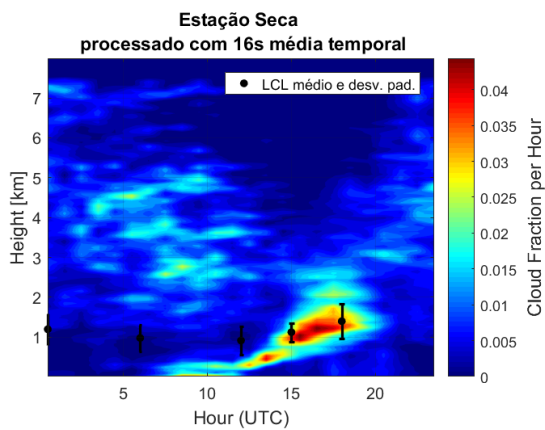


Fig. 13) mostram o ciclo diurno das nuvens em função da hora do dia e da altura. Durante a estação chuvosa são detectadas mais nuvens, com o máximo de fração de cobertura média chegando a aproximadamente 14%. Na estação seca a cobertura de nuvens média máxima é menor, chegando a 4%. Na estação chuvosa há mais nuvens abaixo de 1 km, com formação de nuvens rasas durante a noite no horário local, com a altitude de formação de nuvens subindo ao longo do dia. Na estação seca, não se observa muitas nuvens rasas, e a maior cobertura de nuvens acontece entre 2 e 3 km de altitude.

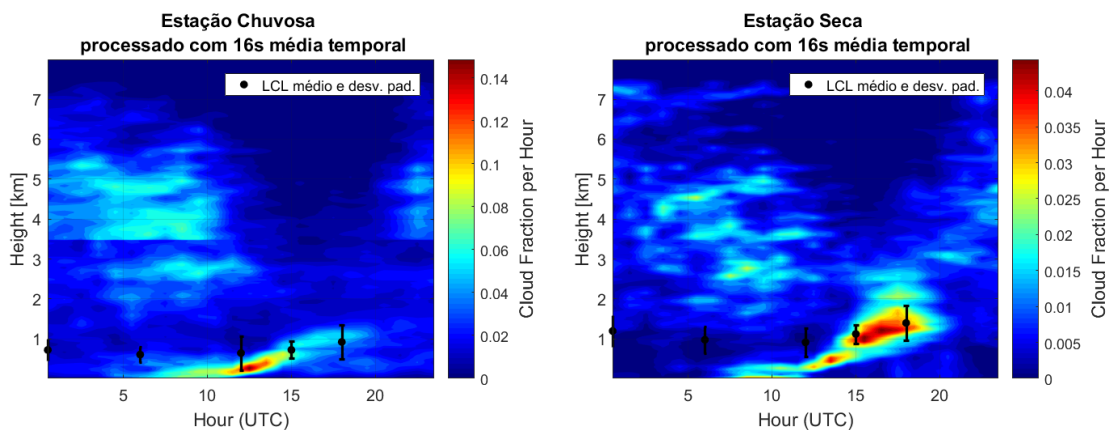


Fig. 13: Ciclo diurno das nuvens para a estação a) chuvosa (à esquerda), e b) seca (à direita)

Na figura Fig. 14, está apresentada a fração de cobertura por hora ($Z = \text{UTC}$) em função da altura. Durante a estação chuvosa, a maior cobertura de nuvens ocorre por volta das 12h00 (UTC), quando é detectada uma cobertura máxima de aproximadamente 15%. Na estação

seca, a maior porcentagem de perfis em que são detectadas uma nuvem acontece por volta das 18h00 (UTC), quando o máximo de cobertura é de 3,5%. Esses valores consistem com as imagens anteriores, quando vemos que durante a estação chuvosa há grande formação de neblina durante a noite, quando comparada a estação seca.

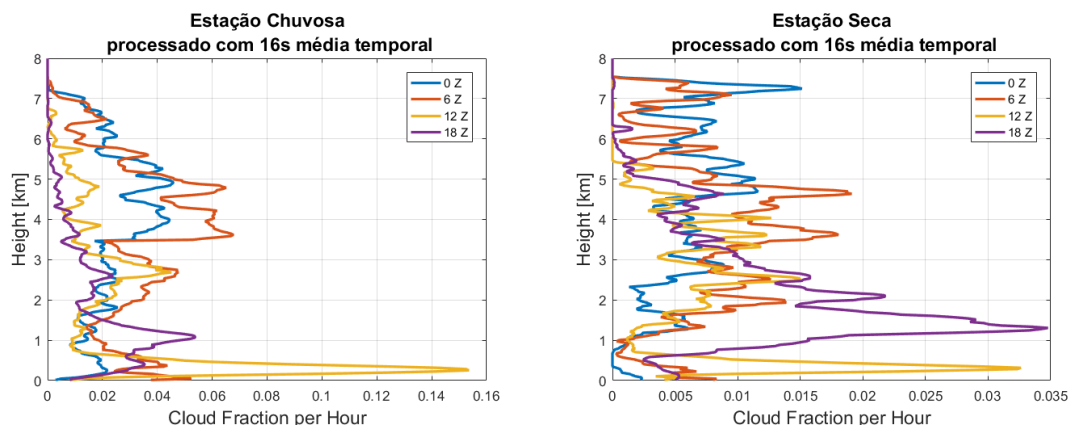


Fig. 14: Fração de cobertura por hora em função da altura e da hora do dia para a estação chuvosa (à esquerda), e seca (à direita)

5.5.1 Relação com o perfil termodinâmico

A Fig. 15 mostra a temperatura em função da altura e da hora do dia, obtidas por radiosondagens em Manacapuru nas estações chuvosa e seca de 2014 e 2015.

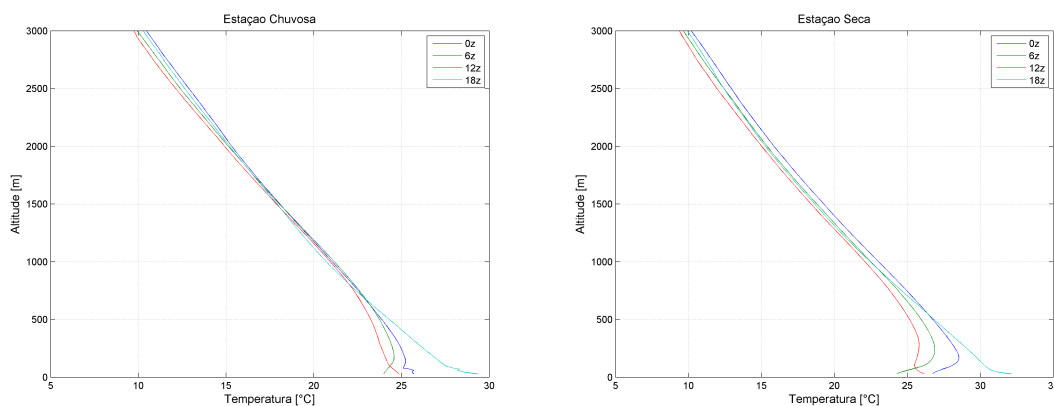


Fig. 15: Temperatura em função da altitude e hora do dia obtida por radiosondagem durante a estação chuvosa de 2014 e 2015 em Manacapuru (esquerda) e durante a estação seca (direita).

Por volta das 18h00 UTC (14h00 hora local), a temperatura próxima do chão é aproximadamente 5 °C maior que às 00h00, 06h00 e 12h00 UTC. De acordo com Machado et al., 2002, na maioria dos dias a maior fração de chuva acontece à tarde. Isso é consistente com os dados de temperatura mostrados na Fig. 15, pois uma temperatura maior torna o perfil mais instável. A Fig. 14, do ciclo diurno durante a estação chuvosa, mostra que esse é o horário em que são detectadas menos nuvens altas. As nuvens baixas espessas, associadas a convecção profunda e a chuva, fazem com que o sinal se extingue e o ceilômetro não consiga fazer medidas para altitudes mais altas.

Na Fig. 15, às 00h00 UTC (20h00 hora local), a temperatura próxima ao solo diminuiu, e o perfil está menos instável. A figura 14, mostra que nesse horário não são detectadas

muitas nuvens, e o instrumento consegue detectar tanto nuvens baixas como nuvens altas, sendo que a fração de cobertura de nuvens para esse horário é um pouco maior para nuvens entre 4.5 e 5.5 km altitude. Às 06h00 UTC, a instabilidade diminui mais, e como vemos na Fig. 15 temperatura próxima ao solo continuou a cair. 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 Fig. 15 mostra que a temperatura próxima ao solo aumentou um pouco em relação às medidas de 4 horas atrás, devido à incidência da radiação solar. Para esse horário, a maior fração de cobertura de nuvens acontece próximas ao solo.

Para a estação seca, novamente entre os 4 horários representados na Fig. 15, a maior temperatura acontece às 18h00 UTC. A temperatura perto do solo nesse horário para a estação seca é maior que para a estação chuvosa. A fração de cobertura é maior para nuvens baixas entre 1 e 2 km, 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 luz solar, a Fig. 15 mostra que a temperatura próxima ao solo começa a aumentar, e o ceilômetro mede mais nuvens baixas, mas poucas nuvens altas. Então, nos horários de temperaturas altas ou de aumento de temperatura, o ceilômetro consegue detectar poucas nuvens altas.

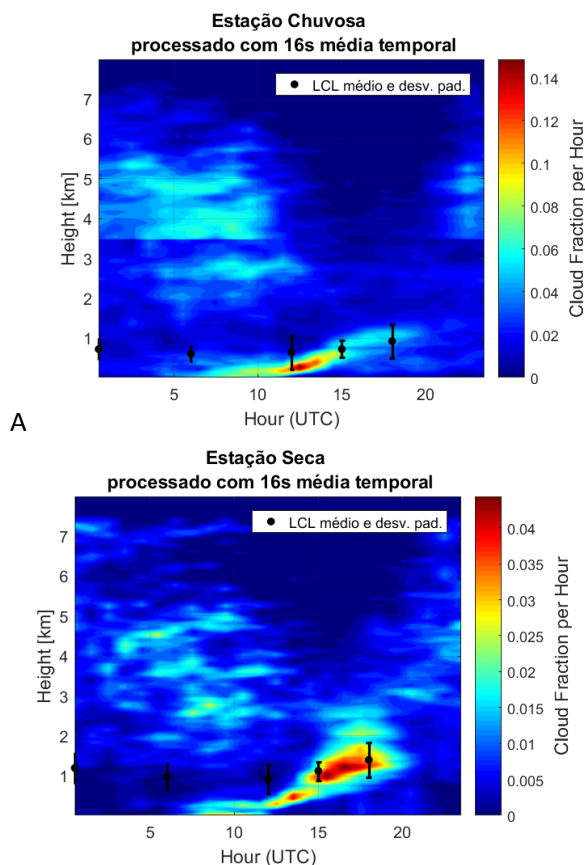


Fig. 13, já discutida, mostra também os LCL médios para cada estação obtidos para 5 horários pela radiossonda em Manacapuru. Vemos que o LCL da estação chuvosa é mais baixo que na estação seca, o que corresponde com a formação mais baixa das nuvens nessa estação. Os LCL médios dessa estação se mantêm por volta ou abaixo de 1 km para os 5 horários representados. Enquanto o LCL médio da estação chuvosa não varia muito, 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 em que as nuvens sobem na Fig. 13. A altitude mais alta do LCL médio limita a formação de nuvens na estação seca, e a Fig. 13 mostra que a fração de cobertura por hora é menor para a estação seca que para a estação chuvosa.

5.6 Discussão

Em “Cloudiness over the Amazon rainforest: Meteorology and thermodynamics”, Collow et al. apresenta observações coletadas na estação AMF1 em Manacapuru durante a campanha GOAmazon2014/15. As medidas de altura de base de nuvem foram feitas por um lidar e um ceilômetro, enquanto as outras propriedades de nuvens foram medidas por um radiômetro.

Na seção de resultados, Collow et al. discute a correlação entre o LCL (lifted condensation level) médio das estação chuvosa e seca. O LCL durante a estação seca é mais alto que na estação chuvosa, e isso combinado com a umidade relativa mais baixa da estação, limita a formação de nuvens. O contrário acontece durante a estação chuvosa, quando o LCL é mais baixo e a umidade relativa é maior, o que contribui para o desenvolvimento de nuvens. Então, durante a estação chuvosa, o paper mostra que a fração de cobertura é maior, e as nuvens são mais espessas. Durante a estação chuvosa a temperatura do solo é menor que durante a estação seca, possivelmente porque a formação maior de nuvens diminui o aquecimento do solo.

Neste relatório, durante as comparações entre as estações seca e chuvosa, os resultados mostram que a cobertura de nuvens é maior durante a estação chuvosa, como vimos na Fig. 12, o que está de acordo com as observações discutidas no paper de Collow et al. Também, vimos na Fig. 13, que durante a estação chuvosa o LCL foi mais baixo, consistindo com a formação mais baixa das nuvens e a fração de cobertura de nuvem maior, e durante a estação seca o LCL médio foi maior, com fração de cobertura menor como discutidos no paper. Vimos na Fig. 8 que a espessura média das nuvens na estação chuvosa é um pouco maior que na estação seca, consistindo com os dados de temperatura próxima do solo da Fig. 15, e consistindo com a discussão do paper de Collow et al., onde se discute a relação entre a formação de nuvens e a temperatura do solo.

6. Etapas do Cronograma

Com o algoritmo de detecção de bases e topo de nuvem para lidar adaptado para o tetômetro, foram encontrados as bases e topos dos perfis dos dois anos de dados. Com esses dados, foram calculadas, para as estações seca e chuvosa, as espessuras das nuvens, o ciclo diurno, a frequência de ocorrência na vertical e o retroespalhamento dentro da nuvem. Foi feita uma comparação com dados de radiossondagem e com as discussões de Collow et al. sobre a formação de nuvens na Amazônia durante a campanha GoAmazon2014/15.

A tabela abaixo mostra as atividades propostas que foram desenvolvidas durante esta iniciação científica. Durante os 11 meses da bolsa todas as atividades foram concluídas. Para o relatório final, foi feita a leitura do 50% da bibliografia restante, e foram concluídos os últimos 4 itens em azul do final da tabela. Foram incluídas na tabela abaixo também as atividades

concluídas no relatório parcial, as que estavam inicialmente previstas em verde, e as não previstas em vermelho. Como pode ser visto, o projeto foi concluído com sucesso.

Atividade	Mês	Andamento
Estudo da bibliografia;	1 a 12	100%
Aula/estudo dirigido sobre a técnica de radar laser (LIDAR);	1	100%
Aprender a programar em Matlab e trabalhar com netCDF;	1 a 3	100%
Realizar testes com o algoritmo de detecção desenvolvido para nuvens cirrus e adaptá-lo para nuvens baixas;	2 a 5	100%
Comparação entre o algoritmo da Vaisala e o de Gouveia		100%
Análise preliminar, com os dados de base da Vaisala, para as estações secas e chuvosas.		100%
Processar os dois anos de dados do tetômetro do GoAmazon, obtendo altitude da base, topo, máximo retro-espalhamento e espessura da nuvem;	6 a 7	100%
Classificar a base de dados em período seco (julho a setembro) e chuvoso (janeiro a março); Obtenção dos perfis termodinâmicos médios;	8	100%
Análise estatística descritiva; Calcular os ciclos diurnos médios da distribuição vertical das nuvens; Interpretação dos resultados e comparação com trabalhos da literatura;	9 a 11	100%
Relatório Final	12	100%

7. Reserva técnica

Não foi usada a reserva técnica durante o período que corresponde a este relatório.

8. Referências bibliográficas

Costa, AA; Pauliquevis ,TM; Souza, EP; Martins, JA; Yamasoe, M; Andrade, MF; Barbosa, HMJ. 2014: Aerossóis e nuvens, Capítulo 6 em Bases Científicas das Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 para o primeiro relatório do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. pp 209-236, ISBN: 978-85-285-0207-7

Kotthaus et al., 2016: Recommendations for processing atmospheric attenuated backscatter profiles from Vaisala CL31 ceilometers. Atmos. Meas. Tech., 9, 3769-3791, doi: 10.5194/amt-9-3769-2016.

Wallace, J., and P. Hobbs, 2006: Atmospheric science: an introductory survey, 2nd Edition, International Geophysics Series, Vol. 92, ISBN 0-12-732951-X, Academic Press, USA

Weitkamp, C. (Ed.), 2005: Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, Springer Series in Optical Sciences, Vol. 102, ISBN: 0-387-40075-3, Springer, New York.

Gouveia, D. A.: Caracterização de nuvens cirrus na região da Amazônia central utilizando um lidar em solo, 96 pp, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2014.

Machado, L. A. T., H. Laurent, and A. A. Lima, Diurnal march of the convection observed during TRMM-WETAMC/LBA, *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 8064, doi:10.1029/2001JD000338, 2002.

BURLEYSON, C. D., et al.: Spatial Variability of the Background Diurnal Cycle of Deep Convection around the GoAmazon2014/5 Field Campaign Sites. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 55, 1579–1598, 2016.

Clouds in the perturbed climate system: their relationship to energy balance, atmospheric dynamics and precipitation, edited by Jost Heintzenberg and Robert J. Charlson. *Strüngmann Forum Reports*. MIT Press, May 2009. ISBN 978 0 262 01287 4

Collow, A. B. M., M. A. Miller, and L. C. Trabachino (2016), Cloudiness over the Amazon rainforest: Meteorology and thermodynamics, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 7990–8005, doi:10.1002/2016JD024848.