



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS E  
CLIMÁTICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
CLIMÁTICAS

PPGCC

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE UM SISTEMA LIDAR  
TROPOSFÉRICO PELA ANÁLISE DE PARÂMETROS ÓPTICOS ATMOSFÉRICOS  
E INSTRUMENTAIS VIA PROTOCOLOS DAS REDES LALINET E EARLINET**

MARCOS PAULO ARAÚJO DA SILVA

NATAL RN

AGOSTO 2018

# CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS DE UM SISTEMA LIDAR TROPOSFÉRICO PELA ANÁLISE DE PARÂMETROS ÓPTICOS ATMOSFÉRICOS E INSTRUMENTAIS VIA PROTOCOLOS DAS REDES LALINET E EARLINET

MARCOS PAULO ARAÚJO DA SILVA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, do Centro de Ciências Exatas e da Terra da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Climáticas.

Orientadora: Profa. Dra. Judith Johanna Hoelzemann

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Landulfo

## COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Judith Johanna Hoelzemann (DCAC/UFRN)

Prof. Dr. Eduardo Landulfo (LAAL/IPEN)

Profa. Dra. Maria Paulete Pereira Martins (CRN/INPE)

Dr. Fábio Juliano da Silva Lopes (LAAL/IPEN)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Setorial Prof. Ronaldo Xavier de Arruda - CCET

Silva, Marcos Paulo Araújo da.

Controle de qualidade de dados de um sistema LIDAR troposférico pela análise de parâmetros ópticos atmosféricos e instrumentais via protocolos das redes LALINET E EARLINET / Marcos Paulo Araújo da Silva. - 2018.  
103f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas. Natal, 2018.

Orientadora: Judith Johanna Hoelzemann.

Coorientador: Eduardo Landulfo.

1. Sensoriamento remoto - Dissertação. 2. Inversão de Klett-Fernald-Sasano - Dissertação. 3. Perfis de retroespalhamento - Dissertação. 4. Aerossóis atmosféricos - Dissertação. 5. Controle de qualidade LIDAR - Dissertação. I. Hoelzemann, Judith Johanna. II. Landulfo, Eduardo. III. Título.

RN/UF/CCET

CDU 528.8

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por disponibilizar infraestrutura e recursos humanos.

À CAPES que tem me auxiliado com uma bolsa de estudos.

Ao projeto ACTRIS pelo suporte na participação do 2<sup>nd</sup> *LiCalTrain Workshop*, onde tive o primeiro contato com plataforma *EARLINET SCC*.

Ao Laboratório de Aplicações Ambientais de Lasers do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, por desenvolver o sistema *LIDAR DUSTER* e deixá-lo disponível.

Ao GP-MOQA, especialmente aos que trabalham com o *DUSTER*, pela amizade, trabalho em equipe e auxílio na coleta de dados.

Ao Dr. Fábio Lopes, por fazer parte da banca examinadora, pelas sugestões e por ter compartilhado do seu conhecimento.

Ao professor Dr. Eduardo Landulfo, por acreditar em mim e me apoiar para que eu participasse do 2<sup>nd</sup> *LiCalTrain Workshop*.

À Dra. Elena Montilla-Rosero, por ter me ensinado os conhecimentos básicos sobre a operação do *LIDAR DUSTER* e o processamento de dados.

À minha orientadora, Profa. Dra. Judith Johanna Hoelzemann, por confiar na minha capacidade, me incentivar na busca pelo aperfeiçoamento científico, pelas demonstrações de cuidado e pela sua sincera amizade.

À minha família, especialmente Dona Liu, Cassiana Rosália, Andria Carla, Mácio Antônio e Marcello Augusto, à minha companheira, Ana Cássia, e aos meus amigos, por me incentivarem a prosseguir na carreira acadêmica, pelo suporte e momentos bons que desfrutamos juntos.

A Deus, que tem me dado forças e alimentado meu espírito.

## RESUMO

A obtenção de dados observacionais dos aerossóis atmosféricos é algo relevante para o avanço das pesquisas sobre a influência destes nos processos de mudanças climáticas. Devido as suas propriedades ópticas, os aerossóis podem interferir no balanço radiativo e na microfísica das nuvens alterando suas dimensões e ciclos de vida. O sistema ativo de sensoriamento remoto *Light Detection and Ranging (LIDAR)*, chamado de *DUSTER*, instalado em Natal, capital do Rio Grande do Norte, Brasil, envia pulsos de laser à atmosfera e detecta características ópticas dos aerossóis por meio da interação dos mesmos com a luz. Esta pesquisa tem dois focos principais, o primeiro é o aprimoramento do controle de qualidade do sistema *LIDAR DUSTER* durante as campanhas operacionais de medição. O controle foi feito por meio dos seguintes testes instrumentais: *Dark Measurement*, *Zero Bin*, *Bin-Shift*, *Telecover* e *Rayleigh Fit* de acordo com os padrões da *Latin American LIDAR Network (LALINET)* e da *European Aerosol Research LIDAR Network (EARLINET)*. Por meio destes testes foi possível detectar ruídos, atrasos no registro dos dados e verificar o alinhamento do sistema em curto e em longo alcance. Foi desenvolvido um conjunto de algoritmos chamado *DUSTER Quality Assurance (DQA)*, com módulos que leem os dados dos testes instrumentais, realizam pré-processamento, geram gráficos, calculam erros e escrevem os resultados em formato *ASCII*. Os resultados mostram que os erros relativos aos testes de alinhamento, *Telecover* e *Rayleigh Fit*, estão abaixo de 0.1 na maioria dos canais. O segundo foco foi de comparar perfis de retroespalhamento dos aerossóis troposféricos pelo método de inversão de Klett-Fernald-Sasano em duas ferramentas distintas: a *Single Calculus Chain (SCC)*, desenvolvida pela *EARLINET* e o Algoritmo de Inversão da *LALINET*. Foram selecionados dois dias de medição no comprimento de onda 1064 nm para obtenção dos perfis. A comparação ocorreu por meio do erro relativo entre perfis de retroespalhamento calculados por cada uma das ferramentas. Os perfis de erro relativo variaram entre 0 e 10% nos dois dias. No contexto do presente trabalho também se desenvolveu um filtro de nuvens, o *DUSTER Cloud Free*, que remove dados com contaminação por nuvens automaticamente.

**Palavras-chave:** Inversão de Klett-Fernald-Sasano, Perfis de Retroespalhamento, Aerossóis Atmosféricos, Controle de Qualidade *LIDAR*.

## ABSTRACT

Observational data acquisition related to atmospheric aerosols is relevant for the progress in research to investigate their influence on climate change related processes. Due to their optical properties, they can interfere with the radiative balance and with cloud microphysics changing their dimensions and lifetimes. The active remote sensing system Light Detection and Ranging (LIDAR), called DUSTER, located in Natal, capital of Rio Grande do Norte, Brazil, sends laser pulses to the atmosphere and detects aerosols optical characteristics through their interaction with light. This research had two main foci: the first one is the LIDAR DUSTER quality assurance during the operational acquisition campaigns. The assurance was made by the following instrumental tests: Dark Measurement, Zero Bin, Bin-Shift, Telecover and *Rayleigh Fit* according to the Latin America LIDAR Network (LALINET) and the European Aerosol Research LIDAR Network (EARLINET) standards. By means of these tests it was possible to detect noises, recorder delays and check de alignment in near and far range. A set of algorithms called DUSTER Quality Assurance (DQA), with modules which read the instrumental quality test data, pre-processed data, generate graphics and write the results in ASCII format were developed. The results point that the errors relative to the alignment testes, Telecover and *Rayleigh Fit*, are less than 0.1 in most of the channels. The second focus was to compare tropospheric aerosol backscatter profiles by the Klett-Fernald-Sasano inversion method in two different tools: The Single Calculus Chain and the LALINET Inversion Algorithm. Two days of data acquisition with 1064 nm wavelength were selected to acquire the profiles. The computation happened by means of the relative error among the profiles. The relative error profiles varied among 0 and 10% on the two days. In the context of this work, a cloud filter was developed, the DUSTER Cloud Free filter, which removes cloud contaminated files automatically.

**Key-words:** Klett-Fernald-Sasano Inversion, Backscattering Profiles, Atmospheric Aerosols, LIDAR quality assurance.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	21
2.1 Aerossóis Troposféricos .....	21
2.2 Os Efeitos dos Aerossóis na Atmosfera .....	23
2.3 Extinção e Espalhamento da Luz pelos Aerossóis .....	25
2.4 Princípios de um Sistema <i>LIDAR</i> .....	27
2.5 Equação <i>LIDAR</i> .....	30
2.5.1 Extinção e Retroespalhamento Elástico .....	32
2.6 <i>EARLINET Single Calculus Chain</i> .....	36
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	39
3.1 Área de Estudo.....	39
3.2 O Sistema <i>LIDAR DUSTER</i> .....	40
3.3 Testes Instrumentais de Qualidade .....	42
3.3.1 <i>Dark Measurement</i> .....	43
3.3.2 Medida de <i>Zero Bin</i> .....	44
3.3.3 <i>Bin-Shift</i> .....	46
3.3.4 <i>Telecover</i> .....	47
3.3.5 <i>Rayleigh Fit</i> .....	50
3.4 <i>EARLINET SCC</i> e Algoritmo de Inversão da <i>LALINET</i> .....	52
3.5 O filtro de perfis com nuvens <i>DUSTER Cloud Free</i> .....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1 <i>Dark Measurement</i> .....	58
4.2 <i>Zero Bin</i> .....	65
4.3 <i>Bin-Shift</i> .....	70
4.4 <i>Telecover</i> .....	75
4.5 <i>DUSTER Cloud Free</i> .....	83
4.6 <i>Rayleigh Fit</i> .....	85
4.7 Perfis de Coeficientes de Retroespalhamento dos Aerossóis .....	95
5 CONCLUSÕES .....	98
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Escala de diâmetro das partículas na atmosfera e suas respectivas formas de interação com a atmosfera. ....	22
Figura 2.2 – Os efeitos na forçante radiativa devido à interação aerossol-radiação e interação aerossol-nuvem e diferenças entre as nomenclaturas adotadas no <i>AR4</i> e <i>AR5</i> do <i>IPCC</i> . * Efeito no tempo de vida (incluindo glaciação e termodinâmica). ....	24
Figura 2.3 – As forçantes radiativas no clima entre 1750 e 2001. As barras tracejadas representam as forçantes radiativas (FR) e as barras sólidas representam as forçantes radiativas efetivas (FRE). As incertezas para FR estão em linhas pontilhadas e as incertezas para FRE em linhas sólidas. ....	25
Figura 2.4 – Padrões de espalhamento de aerossóis esféricos com três diâmetros iluminados por luz visível de 0,5 $\mu\text{m}$ . (a) $10^{-4}$ $\mu\text{m}$ , (b) 0,1 $\mu\text{m}$ e (c) 1 $\mu\text{m}$ . O padrão de espalhamento à frente do aerossol com 1 $\mu\text{m}$ é extremamente grande e está dimensionado para a representação proposta. ....	26
Figura 2.5 – Esquema de representação de um sistema <i>LIDAR</i> . I – Módulo de transmissão, II – Módulo de captação e III – Módulo de detecção. ....	28
Figura 2.6 – Tipos de configuração de um sistema <i>LIDAR</i> de acordo com as posições dos módulos de transmissão e captação. ....	29
Figura 2.7 – Esquemas representativos de um telescópio newtoniano (A) e de um telescópio cassegraniano (B). ....	30
Figura 3.1 – Mapa de localização de Natal/RN e sua posição em relação ao deserto do Saara. ....	39
Figura 3.2 – Contêiner que abriga os equipamentos do sistema <i>LIDAR DUSTER</i> ...	40
Figura 3.3 – Configuração do sistema <i>LIDAR DUSTER</i> durante a campanha <i>MOLOTOVI</i> . As letras nas caixas amarelas representam: L – laser, B – expansor de feixe, C – caixa de detecção, E – espelho do laser, T – Telescópio, R – <i>LICEL TR20-160</i> , F – fontes das <i>PMT</i> , <i>PMT</i> – <i>Photomultiplier Tube</i> (“tubos azuis”), <i>APD</i> - <i>Avalanche Photo-diode</i> . ....	41
Figura 3.4 – Organograma de funcionamento do <i>DUSTER Quality Assurance</i> . AN se refere a um canal analógico e FO se refere a um canal fotocontagem. ....	43
Figura 3.5 – Fluxograma para obtenção dos sinais escuros. ....	44

Figura 3.6 – À esquerda, uma imagem a Medida de Zero Bin realizado em 26 de novembro de 2017 no <i>LIDAR DUSTER</i> , à direita um fluxograma da obtenção do trigger delay. Uma luz foi ligada apenas para fazer esta imagem. ....	45
Figura 3.7 – Exemplo de medidas <i>Zero Bin</i> com canais de detecção analógica. Os picos entre 6 e 7 mostram a altitude zero obtida instrumentalmente. ....	46
Figura 3.8 – Fluxograma para obtenção dos valores de Bin-Shift pelo módulo DQA/Bin-Shift. A1 e A2 são as altitudes inicial e final, respectivamente, para cálculo da média de normalização de cada perfil. ....	47
Figura 3.9 – Representação da divisão do telescópio em quadrantes para o teste de <i>Telecover</i> . A área do telescópio está representada em quadrantes coloridos e a circunferência verde representa o laser saindo do plano. A posição norte é estabelecida na bissetriz da emissão vertical do laser. ....	48
Figura 3.10 – Espelho refletor que transmite o laser para a atmosfera. As setas vermelhas indicam a posição dos pivôs os quais rotacionam o espelho na vertical e na horizontal. Padrão para o <i>Telecover</i> : $N1 = N2 > L = O > S$ . ....	48
Figura 3.11 – Processamento de dados do teste de <i>Telecover</i> no <i>DQA/Telecover</i> . .50 O fluxograma do processamento de dados para obtenção dos resultados dos testes de <i>Rayleigh Fit</i> está apresentado na Figura 3.12. ....	52
Figura 3.13 – Fluxograma do processamento dos testes de <i>Rayleigh Fit</i> . ....	52
Figura 3.14 – Página inicial da plataforma <i>EARLINET SCC</i> . ....	53
Figura 3.15 – Seção <i>Station Admin</i> da plataforma <i>EARLINET SCC</i> . ....	53
Figura 3.16 – Parâmetros do <i>DUSTER</i> durante as campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> para conversão de dados no pacote <i>Atmospheric-Lidar</i> . ....	55
Figura 4.1 – Média do sinal escuro do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. Teste realizado durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> . ....	58
Figura 4.2 – Média do sinal escuro do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . ....	59
Figura 4.3 – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. Ruído característico da <i>MOLOTOV I</i> . ....	59
Figura 4.4 – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . ....	60
Figura 4.5 – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico da <i>MOLOTOV I</i> . ....	60

Figura 4.6 – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	61
Figura 4.7 – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. Ruído característico da <i>MOLOTOV I</i> .....	61
Figura 4.8 – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	62
Figura 4.9 – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico da <i>MOLOTOV I</i> .....	62
Figura 4.10 – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	63
Figura 4.11 – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção analógico. Ruído característico da <i>MOLOTOV I</i> .....	63
Figura 4.12 – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	64
Figura 4.13 – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico da <i>MOLOTOV I</i> .....	64
Figura 4.14 – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	65
Figura 4.15 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico da campanha <i>MOLOTOV I</i> .....	66
Figura 4.16 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV I</i> .....	67
Figura 4.17 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico da campanha <i>MOLOTOV I</i> .....	67
Figura 4.18 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	68
Figura 4.19 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico da campanha <i>MOLOTOV I</i> .....	68
Figura 4.20 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .....	69
Figura 4.21 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 355 nm, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico da campanha <i>MOLOTOV I</i> .....	69

Figura 4.22 – Teste <i>Zero Bin</i> do canal 355 nm, modo de detecção analógico. <i>Trigger delay</i> característico das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . .....	70
Figura 4.23 – Perfis do canal 532 nm s nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a <i>MOLOTOV I</i> . A – Antes da correção de <i>trigger delay</i> . B – Após correção de <i>trigger delay</i> . C – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 <i>bins</i> do perfil modo FC. Inter. Inv. - Intervalo investigado. ....	71
Figura 4.24 – Perfis do canal 532 nm p nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a <i>MOLOTOV I</i> . A – Antes da correção de <i>Zero Bin</i> . B – Após correção de <i>Zero Bin</i> . C – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 <i>bins</i> do perfil modo FC. Inter. Inv. - Intervalo investigado. ....	72
Figura 4.25 – Perfis do canal 355 nm nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a <i>MOLOTOV I</i> . A – Antes da correção de <i>Zero Bin</i> . B – Após correção de <i>Zero Bin</i> . C – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 <i>bins</i> do perfil modo FC. Inter. Inv. - Intervalo investigado. ....	72
Figura 4.26 – Perfis do canal 532 nm s nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a <i>APEL</i> e a <i>MOLOTOV II</i> . A – Antes da correção de <i>Zero Bin</i> . B – Após correção de <i>Zero Bin</i> . C – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 <i>bins</i> do perfil modo FC. Inter. Inv. - Intervalo investigado. ....	73
Figura 4.27– Perfis do canal 532 nm p nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a <i>APEL</i> e a <i>MOLOTOV II</i> . A – Antes da correção de <i>Zero Bin</i> . B – Após correção de <i>Zero Bin</i> . C – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 <i>bins</i> do perfil modo FC. Inter. Inv. - Intervalo investigado. ....	73
Figura 4.28 – Perfis do canal 355 nm nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a <i>APEL</i> e a <i>MOLOTOV II</i> . A – Antes da correção de <i>Zero Bin</i> . B – Após correção de <i>Zero Bin</i> . C – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 <i>bins</i> do perfil modo FC. Inter. Inv. - Intervalo investigado. ....	74
Figura 4.29 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 1064 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). .	75

Figura 4.30 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 532 nm s, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).	.76
Figura 4.31 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 532 nm s, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).	.76
Figura 4.32 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 532 nm p, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).	.77
Figura 4.33 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 532 nm p, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).	.77
Figura 4.34 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 355 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).	.78
Figura 4.35 – <i>Telecover</i> durante a campanha <i>MOLOTOV I</i> , canal 355 nm, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).	.78
Figura 4.36 – <i>Telecover</i> do canal 1064 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .	.79
Figura 4.37 – <i>Telecover</i> do canal 532 nm s, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .	.80
Figura 4.38 – <i>Telecover</i> do canal 532 nm s, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> .	.80

Figura 4.39 – <i>Telecover</i> do canal 532 nm p, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . .....	81
Figura 4.40 – <i>Telecover</i> do canal 532 nm p, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . .....	81
Figura 4.41 – <i>Telecover</i> do canal 355 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . .....	82
Figura 4.42 – <i>Telecover</i> do canal 355 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFiguração das campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . .....	82
Figura 4.43 – Perfil <i>LIDAR</i> bruto contendo nuvem, canal 532 nm p, fotocontagem. A linha tracejada representa o limite de saturação do filtro <i>DUSTER Cloud Free</i> . .....	83
Figura 4.44 – Gráfico de cortina da medida noturna do 21/12/2017 contendo todos os dados. HL: Horário Local. ....	84
Figura 4.45 – Gráfico de cortina da medida noturna do dia 21/12/2017 após aplicação do filtro de nuvens <i>DUSTER Cloud Free</i> . HL: Horário Local. ....	84
Figura 4.46 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 1064 nm, analógico, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. $R.C.S_{fit}$ : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular. ....	85
Figura 4.47 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm s, analógico, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. $R.C.S_{fit}$ : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular. ....	86
Figura 4.48 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm s, fotocontagem, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular	

atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.Fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	86
Figura 4.49 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm p, analógico, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.Fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	87
Figura 4.50 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm p, fotocontagem, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.Fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	88
Figura 4.51 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 355 nm, analógico, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.Fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	88
Figura 4.52 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 355 nm, fotocontagem, e erro relativo na Campanha <i>MOLOTOV I</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	89
Figura 4.53 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 1064 nm, analógico, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	90
Figura 4.54 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm s, analógico, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	90
Figura 4.55 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm s, fotocontagem, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. <i>R.C.S.fit</i> : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular. ....	91
Figura 4.56 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm p, analógico, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . <i>R.C.<math>\beta_{mol(at)}</math></i> : Perfil de retroespalhamento molecular	

atenuado corrigido pelo alcance. $R.C.S_{fit}$ : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	91
Figura 4.57 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 532 nm p, fotocontagem, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. $R.C.S_{fit}$ : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular. ....	92
Figura 4.58 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 355 nm, analógico, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. $R.C.S_{fit}$ : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	92
Figura 4.59 – Teste de <i>Rayleigh Fit</i> do canal 355 nm, analógico, e erro relativo nas campanhas <i>APEL</i> e <i>MOLOTOV II</i> . $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance. $R.C.S_{fit}$ : Perfil <i>LIDAR</i> corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.....	93
Figura 4.60 – Aquisição do dia 27/12/2017, canal 355 nm, fotocontagem, configuração <i>APEL/MOLOTOV II</i> . HL: Horário Local.....	94
Figura 4.61 – Aquisição do dia 27/12/2017, canal 532 nm p, fotocontagem, configuração <i>APEL/MOLOTOV II</i> . HL: Horário Local.....	95
Figura 4.62 – Perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis calculados pela SCC e pelo Algoritmo de Inversão da <i>LALINET</i> , canal 1064 nm analógico. Medição do dia 13/11/2017, das 19:32 h às 20:18 h, hora local. ....	96
Figura 4.63 – Perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis calculados pela SCC e pelo Algoritmo de Inversão da <i>LALINET</i> , canal 1064 nm analógico. Dia 16/11/2017, das 17:34 h às 18:50 h, hora local.....	96

## LISTA DE SIGLAS

<i>AD-Net</i>	<i>Asian Dust and Aerosol LIDAR Observation Network</i>
<i>APD</i>	<i>Avalanche Photodiode</i>
<i>APEL</i>	<i>Assessment of Atmospheric Optical Properties During Biomass Burning Events and Long-Range Transport of Desert Dust</i>
<i>AR4</i>	<i>Fourth Assessment Report</i>
<i>AR5</i>	<i>Fifth Assessment Report</i>
<i>CCET</i>	<i>Centro de Ciências Exatas e da Terra</i>
<i>CCN</i>	<i>Cloud Condensation Nuclei</i>
<i>CIS-LiNet</i>	<i>Commonwealth of Independent States</i>
<i>DCAC</i>	<i>Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas</i>
<i>DQA</i>	<i>DUSTER Quality Assurance</i>
<i>EARLINET</i>	<i>European Aerosol Research LIDAR Network</i>
<i>ESA</i>	<i>European Space Agency</i>
<i>GALION</i>	<i>GAW LIDAR Observation Network</i>
<i>GAW</i>	<i>Global Atmosphere Watch Aerosol</i>
<i>GEE</i>	<i>Gases de Efeito Estufa</i>
<i>GP-MOQA</i>	<i>Grupo de Pesquisa de Modelagem e Observação de Química da Atmosfera</i>
<i>INPE</i>	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel On Climate Change</i>
<i>IPEN</i>	<i>Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares</i>
<i>LAAL</i>	<i>Laboratório de Aplicações Ambientais a Laser</i>
<i>LALINET</i>	<i>Latin American LIDAR Network</i>
<i>LIDAR</i>	<i>Light Detection and Ranging</i>
<i>MOLOTOV</i>	<i>Monitoring Aerosol Long-range Transportation Over Natal</i>
<i>MPLNET</i>	<i>NASA Micro-Pulse LIDAR Network</i>
<i>PBMC</i>	<i>Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas</i>
<i>PMT</i>	<i>Photomultiplier Tube</i>
<i>SCC</i>	<i>Single Calculus Chain</i>
<i>UFRN</i>	<i>Universidade Federal do Rio Grande do Norte</i>
<i>WMO</i>	<i>World Meteorological Organization</i>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos estudos das ciências atmosféricas e climáticas existe uma constante busca por técnicas cada vez mais eficazes para obtenção de dados sobre a atmosfera da Terra. As tecnologias de sensoriamento remoto são cada vez mais utilizadas devido aos grandes avanços tecnológicos nesta área durante as últimas décadas. Essas tecnologias são formas eficientes na obtenção de parâmetros físicos sobre objetos de estudo que possuem grande distribuição espacial, como os aerossóis atmosféricos. O sistema ativo de sensoriamento remoto *Light Detection and Ranging (LIDAR)* é um sofisticado conjunto de equipamentos que auxilia pesquisas relacionadas à distribuição vertical dos aerossóis. Por meio deste sistema é possível obter um grande volume de dados com alta resolução temporal e espacial (LOPES, 2011).

Os aerossóis atmosféricos estão presentes em todas as partes da atmosfera terrestre, pois possuem diversas fontes antropogênicas e naturais de emissões. Na troposfera, eles podem agravar problemas respiratórios, interferir na formação de nuvens e conseqüentemente nos regimes de precipitação. Devido as suas propriedades ópticas, os aerossóis interagem com a radiação solar, absorvendo ou espalhando luz e interferindo, desta forma, tanto no tempo como no clima. Informações sobre a variabilidade vertical ou propriedades ópticas dos aerossóis atmosféricos podem ser obtidas por medidas *LIDAR* (GUERRERO-RASCADO *et al.*, 2016; KOVALEV e EICHINGER, 2004; SEINFELD e PANDIS, 2016; WALLACE e HOBBS, 2005).

Existem redes de *LIDAR* distribuídas em diferentes partes do mundo como, por exemplo: a *European Aerosol Research LIDAR Network (EARLINET)*, a *NASA Micro-Pulse LIDAR Network (MPLNET)* e a *Asian Dust and Aerosol LIDAR Observation Network (AD-Net)*. Há uma rede entre países da antiga União Soviética a *Commonwealth of Independent States (CIS-LiNet)*, a *Latin American LIDAR Network (LALINET)* e existe também a *LIDAR Observation Network (GALION)*, considerada como “a rede das redes”, estabelecida dentro do *Global Atmosphere Watch (GAW)*, um programa da Organização Mundial de Meteorologia (OMM), em inglês *World Meteorological Organization (WMO)*, com o objetivo de coordenar as atividades relacionadas à *LIDAR* ao redor do mundo. Essas redes apresentam seus

resultados por meio de perfis dos coeficientes de extinção e de retroespalhamento dos aerossóis, dos quais podem ser calculados outros produtos de aerossol, como a profundidade óptica de aerossol, no inglês, *Aerosol Optical Depth (AOD)*. Embora o número de observações tenha aumentado em escala global, segundo o *Fifth Assessment Report (AR5)*, no português, Quinto Relatório de Avaliação, elaborado pelo *Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC)*, ainda existem poucas informações sobre perfis verticais de aerossóis (BOUCHER *et al.* 2013; CHAIKOVSKY *et al.*, 2016; LANDULFO, E. *et al.*, 2016; NISHIZAWA T., 2015, PAPPALARDO *et al.*, 2014; WELTON E. *et al.*, 2017).

A *LALINET* foi criada no primeiro *Workshop on Lidar Measurements in Latin America*, de 6 a 8 de maio de 2011, em Camagüey, Cuba, e inicialmente era chamada de *Red de LIDAR de América (ALINE)*. A *LALINET* se filiou ao programa *GALION/GAW* em 2013 e atualmente conta com 14 estações. Deste então tem contribuído para identificação de aerossóis subsidiando tópicos como tendências climáticas a longo-prazo, propriedades físicas de aerossóis, monitoramento de transportes globais de poeira, cinzas vulcânicas e de queima de biomassa na América Latina. A *LALINET* estabeleceu padrões de testes instrumentais que devem ser realizados para garantir a qualidade dos dados *LIDAR*. Até 2015 existiam 9 estações operacionais e perspectivas de expansão da rede (ANTUÑA-MARRERO *et al.*, 2017; GUERRERO-RASCADO *et al.*, 2016; LANDULFO *et al.*, 2015; ROBOCK; ANTUÑA, 2001).

Em 2014, por meio de uma parceria entre o Laboratório de Aplicações Ambientais a Laser do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LAAL/IPEN), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Grupo de Pesquisa de Modelagem e Observação de Química da Atmosfera (GP-MOQA), do Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas (DCAC), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), a instalação de um sistema *LIDAR*, denominado *DUSTER*, foi iniciada em Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. O *LIDAR DUSTER* é um sistema com tecnologia capaz de obter dados para o estudo de aerossóis que polarizam a luz no comprimento 532 nm, como os aerossóis de poeira ou da queima de biomassa, e se tornou operacional em janeiro de 2016. Este sistema foi instalado em Natal, por que a região está inserida na rota do transporte de aerossóis de poeira

provenientes do deserto do Saara os quais atravessam o oceano Atlântico e seguem em direção à Floresta Amazônica (LANDULFO *et al.*, 2016).

O **objetivo geral** desta pesquisa é implementar o controle de qualidade das medições do *LIDAR DUSTER* e verificar se há diferença entre os perfis de retroespalhamento dos aerossóis troposféricos calculados por duas ferramentas de processamento distintas, a *Single Calculus Chain (SCC)*, desenvolvida pela *EARLINET* e o Algoritmo de Inversão da *LALINET*. Esta comparação será importante para averiguar se as duas redes, embora por meios distintos, obtêm produtos semelhantes, o que facilitaria a troca de informações e campanhas conjuntas.

Dentre os **objetivos específicos** estão os seguintes pontos:

- Aplicação dos testes instrumentais de qualidade *Dark Measurement*, *Zero Bin*, *Bin-Shift*, *Telecover* e *Rayleigh Fit* segundo os padrões estabelecidos pela *LALINET* e a *EARLINET* durante as campanhas operacionais:
  1. *MOonitoring Aerosol LOng-range Transportation Over Natal I (MOLOTOV I)*, ocorrida entre 6 de dezembro de 2016 e 17 de fevereiro de 2017
  2. *Assessment of Atmospheric Optical Properties During Biomass Burning Events and Long-Range Transport of Desert Dust (APEL)*, em novembro e dezembro de 2017, em Natal.
  3. *MOLOTOV II*, de janeiro a fevereiro de 2018.
- Desenvolvimento de algoritmos para análise dos resultados dos testes instrumentais por meio gráficos, cálculo de erros e organização dos dados de saída conforme exigências da *LALINET* ou *EARLINET*
- Adaptação do Algoritmo de Inversão da *LALINET* para processamento de dados do sistema *DUSTER* a fim de calcular os perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis.
- Configuração da plataforma *EARLINET SCC* de acordo com os parâmetros do sistema *DUSTER* e obtenção dos perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis pela mesma.
- Comparação entre os perfis dos coeficientes de retroespalhamento obtidos pela plataforma *EARLINET SCC* e o Algoritmo de Inversão da *LALINET*.

As campanhas *MOLOTOV* tiveram objetivos como a manutenção da qualidade do sistema *DUSTER*, melhoria da calibração, monitoramento de aerossóis, principalmente os de poeira saariana e treinamento de novos pesquisadores para operação do *LIDAR*. Estas campanhas ocorreram devido à parceria entre pesquisadores do GP-MOQA/UFRN, que operam o *DUSTER* em vários turnos, e do LAAL/IPEN, emprestando equipamentos e dando suporte técnico. A campanha *APEL* ocorreu por meio de colaborações entre a *EARLINET*, *LALINET* e a *European Space Agency (ESA)* entre setembro e novembro de 2017 de acordo como as condições de cada estação envolvida, no caso de Natal, as atividades ocorreram em novembro de dezembro. As estações envolvidas foram as de Manaus (Brasil), LAAL/IPEN (Brasil) e *DUSTER* (Brasil), RALI (Romênia), Granada (Espanha), Buenos Aires (Argentina), Punta Arenas (Chile). O objetivo da *APEL* foi de avaliar as estruturas verticais dos aerossóis com dados das duas redes e verificar a qualidade dos produtos obtidos a fim de selecionar estações de referência para as missões do *EarthCARE*, um satélite da *ESA* que será lançado em 2019 com *LIDAR* a bordo para exploração de nuvens, aerossóis e radiação. A estação *DUSTER* também será utilizada na validação de dados do satélite *Aeolus (ESA)*, o primeiro com um *LIDAR doppler* a bordo capaz de medir perfis de vento em escala global.

A estrutura desta dissertação tem início com uma revisão de literatura no capítulo 2, contendo os conceitos fundamentais de aerossóis, óptica e de sistemas *LIDAR*. O capítulo 3 descreve as metodologias e ferramentas utilizadas para obtenção dos resultados, os quais estão apresentados e discutidos no capítulo 4. No final, o capítulo 5 conclui o trabalho e apresenta perspectivas e sugestões para o desenvolvimento futuro.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Aerossóis Troposféricos

A atmosfera terrestre é composta por gases e por diversos tipos de partículas com diferentes tamanhos, formas e composições químicas. Estas partículas exercem forte influência na transferência de energia radiativa e na distribuição espacial de calor latente através da atmosfera, influenciando as condições de tempo e clima do planeta. Também desempenham um importante papel nos ciclos biogeoquímicos e na química da atmosfera, por exemplo, transportando nutrientes para os ecossistemas oceânicos (BOUCHER *et al.* 2013).

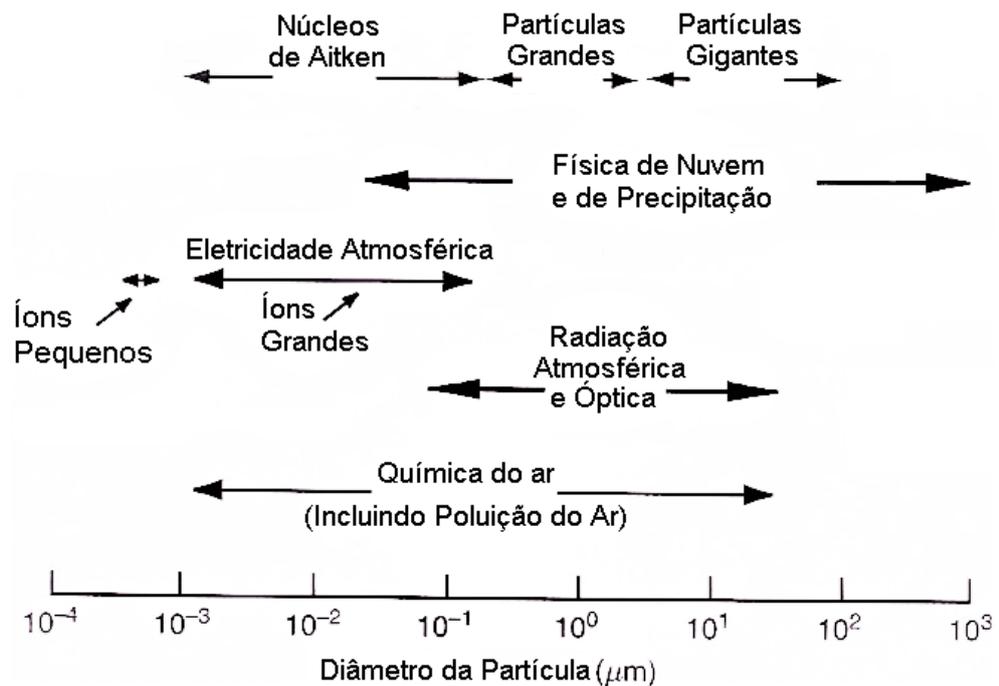
O aerossol é tecnicamente definido como uma suspensão de sólidos finos ou partículas líquidas no ar atmosférico. As fontes geradoras de aerossóis podem ser naturais como desertos que emitem poeira, florestas que emitem aerossóis biogênicos, vulcões, fogos naturais da vegetação, ou os oceanos que emitem aerossóis de sal marinho. Existem também as fontes antropogênicas tais como as queimadas e outros fogos de vegetação pela ação do homem, mineração, indústrias, usinas de geração de energia, agropecuária e meios de transporte terrestres, marítimos e aéreos que utilizem a queima de combustíveis fósseis para funcionamento. O processo de geração e as fontes de emissão influem no tamanho, na forma, composição química e propriedades ópticas das partículas transportadas pelo vento (WALLACE e HOBBS, 2005; SEINFELD e PANDIS, 2016).

Os aerossóis podem ser classificados como primários ou secundários. Os aerossóis primários são aqueles formados por partículas provenientes diretamente da fonte de emissão, enquanto os aerossóis secundários são resultados de reações químicas, conversão gás-partícula, ou processos físicos de aglomeração (SEINFELD e PANDIS, 2016).

O diâmetro dos aerossóis pode variar em torno de 0,001  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ . O tamanho de uma partícula de aerossol é expresso em relação ao seu respectivo diâmetro médio aerodinâmico. Este diâmetro é definido em relação ao de uma esfera com densidade de 1  $\text{g}/\text{cm}^3$ , a mesma densidade de uma gota de água, e cuja velocidade de sedimentação é equivalente à partícula de aerossol que está sendo analisada (HINDS, 1999). De acordo com o tamanho das partículas que compõem

os aerossóis, a interação com a atmosfera pode ocorrer de maneiras diferentes. A Figura 2.1 mostra quais partículas, segundo um intervalo de diâmetro, podem interagir com a eletricidade, radiação, nuvens, precipitação, física e química da atmosfera.

**Figura 2.1** – Escala de diâmetro das partículas na atmosfera e suas respectivas formas de interação com a atmosfera.



Fonte: Adaptado de Wallace e Hobbs (2006), p.169.

Grandes concentrações de partículas no ar diminuem a visibilidade e afetam a saúde das pessoas expostas, em escalas local, regional ou global. As partículas podem ser removidas da atmosfera por sedimentação úmida ou seca. A deposição seca ocorre por ação da força gravitacional e a deposição úmida devido à precipitação em forma de chuva ou neve. As partículas que possuem diâmetro superior a  $10 \mu\text{m}$  permanecem suspensas na atmosfera geralmente na ordem de dias. As partículas mais finas, com diâmetro inferior  $1 \mu\text{m}$ , podem permanecer suspensas na atmosfera durante várias semanas devido a sua pequena massa e normalmente são removidas da atmosfera pela deposição úmida (GIRARD, 2010).

## 2.2 Os Efeitos dos Aerossóis na Atmosfera

Devido as suas propriedades ópticas, os aerossóis influenciam o balanço de radiação da Terra pelo denominado **efeito direto**, que representa a capacidade que estes têm de espalhar ou absorver a radiação solar, podendo levar ao aquecimento ou resfriamento da superfície terrestre. Mediante propriedades químicas e físicas das partículas, a forçante radiativa, devido ao efeito direto dos aerossóis no topo da atmosfera, pode ser significativa (PBMC, 2014).

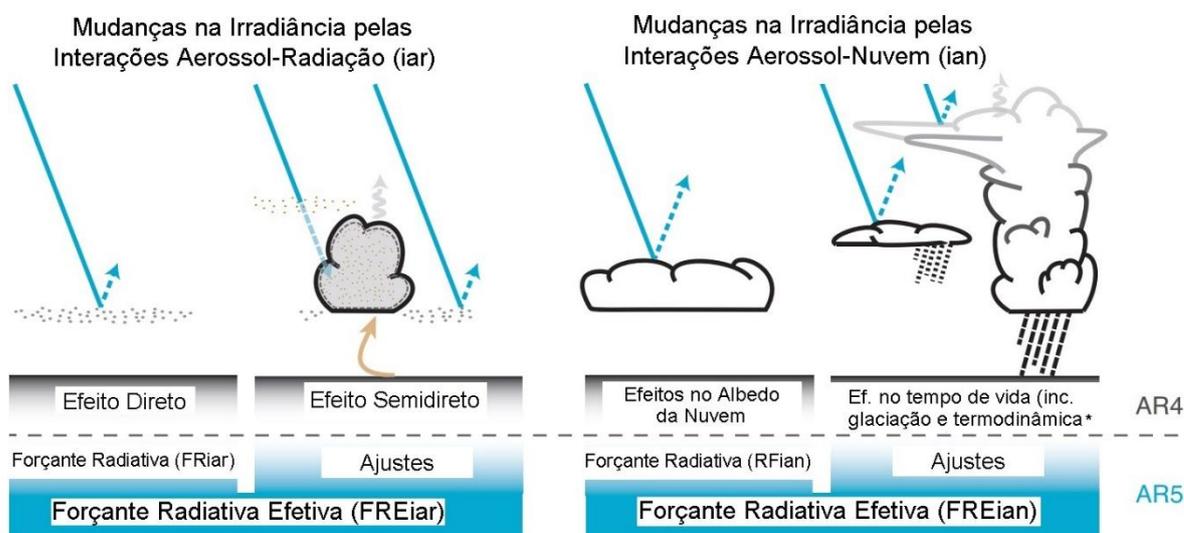
Os aerossóis também causam um chamado **efeito indireto** que consiste na alteração de propriedades microfísicas das nuvens, modificando suas dimensões, propriedades radiativas e ciclos de vida. As partículas suspensas na atmosfera atuam como núcleos de condensação de nuvens (CCN, do inglês *Cloud Condensation Nuclei*). Considerando que a quantidade de vapor d'água na atmosfera se mantenha constante e que sejam emitidos mais aerossóis com capacidade de atuar como CCN, conseqüentemente vão existir gotículas menores e em maior número. O pioneiro no estudo do efeito indireto dos aerossóis foi Twomey (1977), o qual verificou que estas condições favoreciam o aumento do albedo nas nuvens. Albrecht (1989), concluiu que a existência de muitas gotículas com tamanho reduzido aumenta o tempo de ciclo de vida das nuvens, pois gotículas menores têm menos chance de colidirem entre si desta maneira retardando ou inibindo a precipitação. Além do tempo de vida, a dimensão da nuvem também é estendida e como consequência há maior reflexão da radiação contribuindo para o resfriamento da região coberta por nuvens (PBMC, 2014).

Conforme o quarto relatório do IPCC (*AR4 – Fourth Assessment Report*), os aerossóis podem causar ainda um **efeito-semidireto**, um mecanismo pelo qual ocorre absorção de radiação em ondas curtas pelas partículas. Esse efeito provoca aquecimento de camadas que contêm aerossóis na troposfera causando mudanças na umidade relativa e na estabilidade troposférica, desta maneira influencia o tempo de vida e formação de nuvens (FORSTER *et al.*, 2007).

No quinto relatório do IPCC (*AR5*) os efeitos dos aerossóis atmosféricos estão divididos em duas categorias definidas como: I – Forçante Radiativa (FR), definida como a variação do fluxo radiativo descendente líquido na tropopausa admitindo que as temperaturas na estratosfera se reajustem ao equilíbrio radiativo, enquanto as temperaturas da superfície da troposfera se mantêm em valores não perturbados; II

– Forçante Radiativa Efetiva (FRE), que é a variação do fluxo radiativo descendente líquido da radiação do topo da atmosfera após admitir que as temperaturas atmosféricas, vapor d'água, nuvens e albedo da Terra se adaptem, mas com a temperatura média global inalterada. Desta forma, o efeito direto e o efeito-semidireto são englobados no Efeito da Forçante Radiativa das Interações Aerossol-Radiação, (**FREiar**). O efeito indireto, no AR4 tratado como efeito Twomey ou *Cloud Albedo Effect* (Efeito no Albedo das Nuvens) e *Lifetime Effects* (Efeitos no Tempo de vida), no AR5 passou a ser chamado de Forçante Radiativa Efetiva pelas Interações Aerossol-Nuvem (**FREian**). A Figura 2.2 contém uma representação dos efeitos dos aerossóis na atmosfera assim como mostram as diferenças existentes entre as nomenclaturas adotadas no AR4 e o AR5 do IPCC (BOUCHER *et al.* 2013; FORSTER *et al.* 2007).

**Figura 2.2** – Os efeitos na forçante radiativa devido à interação aerossol- radiação e interação aerossol- nuvem e diferenças entre as nomenclaturas adotadas no AR4 e AR5 do IPCC. \* Efeito no tempo de vida (incluindo glaciação e termodinâmica).

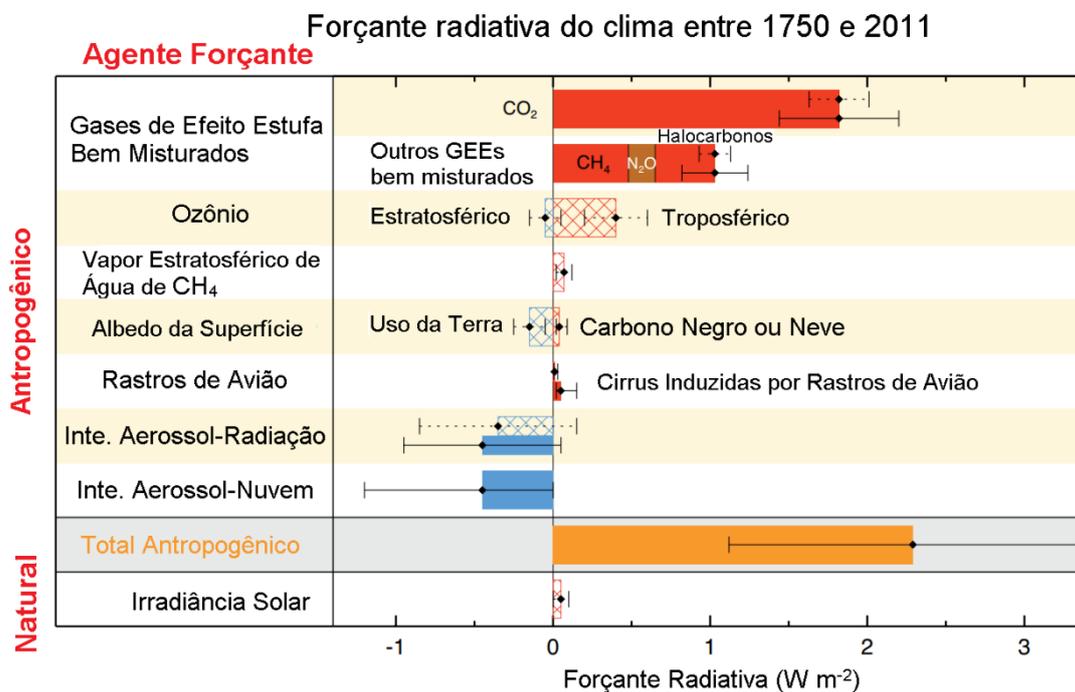


Fonte: Adaptado de Boucher *et al.* (2013), p. 578.

A quantificação das forçantes radiativas devido aos efeitos dos aerossóis na atmosfera é algo repleto de incertezas de tal maneira, que estes poluentes dominam as incertezas sobre as forçantes antropogênicas gerais. A forçante radiativa devido às interações aerossol- radiação está entre -0,85 e 0,15 W/m<sup>2</sup> sendo a melhor estimativa igual a -0,35 W/m<sup>2</sup>. Para as interações aerossol- nuvem, a forçante radiativa efetiva está estimada em -0,45 (de -1,2 a 0,0) W/m<sup>2</sup>. A contribuição devido

a estas duas classes de interações (não considerando *black carbon*, neve e gelo) é estimada em  $-0,9 \text{ W/m}^2$ , cujo intervalo varia entre  $-1,9$  e  $-0,1 \text{ W/m}^2$ , o que significa 5 a 95% de incerteza. A Figura 2.3 mostra as estimativas das forçantes radiativas com relação a aerossóis e outros poluentes atmosféricos (BOUCHER *et al.* 2013).

**Figura 2.3** – As forçantes radiativas no clima entre 1750 e 2001. As barras tracejadas representam as forçantes radiativas (FR) e as barras sólidas representam as forçantes radiativas efetivas (FRE). As incertezas para FR estão em linhas pontilhadas e as incertezas para FRE em linhas sólidas.



Fonte: Adaptado de Myhre *et al.* (2013), p. 697.

### 2.3 Extinção e Espalhamento da Luz pelos Aerossóis

Os fenômenos de absorção e espalhamento devido às moléculas de gases e aerossóis presentes na atmosfera contribuem para extinção da radiação que percorre a atmosfera, seja ela diretamente proveniente do sol ou reemitida pela superfície da Terra. Na atmosfera o espalhamento ocorre devido às moléculas de gases, partículas de aerossóis, gotas de vapor d'água, cristais de gelo, gotas grandes de chuva e partículas de granizo (LIOU, 2002; WALLACE e HOBBS, 2006).

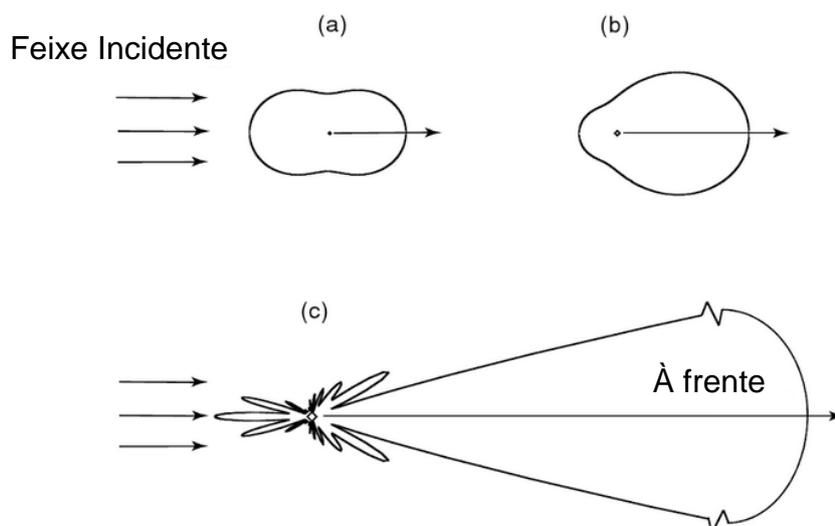
Fisicamente, o **espalhamento** é definido como o processo pelo qual a partícula que recebe uma onda eletromagnética absorve energia e a reemite em outras direções. Mesmo assim, é possível admitir que esta comporta-se como uma

fonte de energia. O termo físico **parâmetro de tamanho** se refere ao efeito que o tamanho de uma partícula causa no espalhamento. Considerando uma partícula com formato esférico o parâmetro de tamanho é dado pela seguinte equação:

$$x = \frac{2\pi a}{\lambda}, \quad (2.1)$$

na qual  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $a$  é o raio da partícula. Se  $x \ll 1$ , ou seja, se a partícula tiver um diâmetro bem menor que o comprimento de onda do feixe incidente, irá ocorrer o chamado **espalhamento Rayleigh**. Todavia, se a partícula em questão for de um tamanho equivalente ou maior que o comprimento de onda incidente, ou seja,  $x \geq 1$ , o espalhamento será referido como **espalhamento Mie**. De acordo com o comprimento de onda espalhado pela partícula, o espalhamento pode ser classificado como **elástico**, se a luz espalhada tiver comprimento de onda igual ao comprimento de onda do feixe incidente, ou **inelástico** se o comprimento de onda espalhado for diferente do recebido. A Figura 2.4 contém ilustrações das formas de espalhamento da luz visível, com comprimento de onda igual  $0,5 \mu\text{m}$ , incidindo em três tipos de aerossóis, com diâmetros iguais a  $10^{-4}$ ,  $0,1$  e  $1 \mu\text{m}$ . (BARON e WILLEKE, 2001; LIOU, 2002; YAMASOE e CORRÊA, 2016).

**Figura 2.4** – Padrões de espalhamento de aerossóis esféricos com três diâmetros iluminados por luz visível de  $0,5 \mu\text{m}$ . (a)  $10^{-4} \mu\text{m}$ , (b)  $0,1 \mu\text{m}$  e (c)  $1 \mu\text{m}$ . O padrão de espalhamento à frente do aerossol com  $1 \mu\text{m}$  é extremamente grande e está dimensionado para a representação proposta.



Fonte: Adaptada de Liou (2002).

Os aerossóis podem causar outro fenômeno óptico chamado de **extinção da luz**. Este fenômeno nada mais é que a atenuação de um feixe luz devido à absorção e ao do mesmo em todas as direções pelas partículas. A extinção da luz por uma partícula esférica, cujo parâmetro de tamanho seja  $x$ , com índice refrativo  $m$ , pode ser descrita por meio do seu coeficiente de extinção da luz  $E_x(x, m)$ . Considerando uma aproximação de uma partícula com espalhamento Rayleigh, o coeficiente de extinção pode ser descrito pela seguinte equação:

$$E_x(x, m) = 4x \operatorname{Im} \left[ \frac{-(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \right] + \frac{8}{3} x^4 \left[ \frac{(m^2 - 1)}{(m^2 + 2)} \right]^2, \quad (2.2)$$

na qual  $\operatorname{Im}$  é a parte imaginária, que é o primeiro termo e representa a componente de absorção. O segundo termo é a parte real e representa a componente de espalhamento (BARON e WILLEKE, 2001).

## 2.4 Princípios de um Sistema LIDAR

O sistema *Light Detection and Ranging*, mais conhecido pelo acrônimo *LIDAR*, é um sistema ativo de sensoriamento remoto que possui um princípio de funcionamento semelhante ao empregado nos radares. A técnica empregada basicamente consiste no envio de pulsos de luz em direção ao objeto de estudo o qual espalha parte da luz em todas as direções, sendo uma parte redirecionada ao *LIDAR*. Parte dessa luz também pode ser absorvida pelo objeto. A luz captada pelo sistema é utilizada na obtenção de propriedades ópticas e físicas do objeto de estudo (KOVALEV e EICHINGER, 2004; SILVA, 2015).

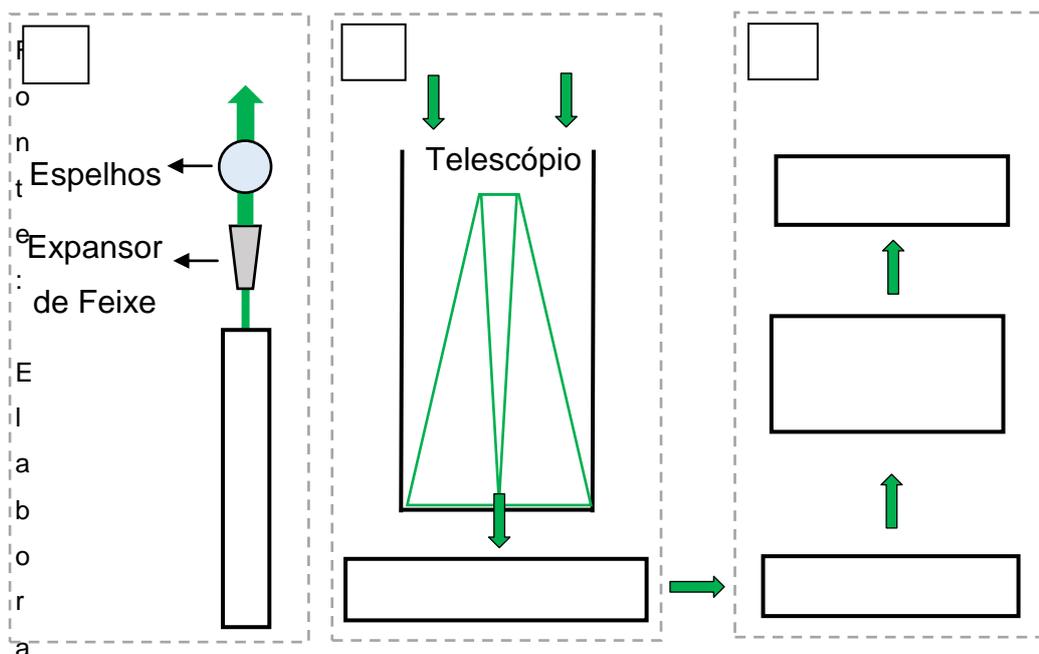
Um sistema *LIDAR* é basicamente composto por três módulos principais constituídos da seguinte forma (ARGALL e SICA, 2003; LOPES, 2011):

1. **Módulo de transmissão** – composto por um laser, geralmente seguido de um *beam expander* (expansor de feixe) e um ou mais espelhos os quais refletem os pulsos de laser em direção à atmosfera.
2. **Módulo de captação** – composto por um telescópio e um analisador óptico (ou caixa de detecção).
3. **Módulo de detecção** – composto por foto-sensores, um dispositivo de eletrônica de registro e um computador para armazenamento dos dados.

A fonte de transmissão contém um laser capaz de gerar pulsos de luz com diferentes propriedades espectrais e resoluções temporais na ordem de centenas de nano segundos. Muitos sistemas possuem um expensor de feixe na unidade de transmissão para reduzir a divergência do feixe de luz antes que este seja transmitido para a atmosfera.

Após interagir com os constituintes da atmosfera uma parte da luz emitida sofre retroespalhamento e é captada pelo telescópio, o qual converge a luz para um analisador óptico que direciona a luz aos sensores. O sinal óptico é convertido em sinal elétrico por sensores do tipo tubo fotomultiplicador (no inglês, *photomultiplier tube – PMT*) ou do tipo fotodiodo de avalanche (no inglês, *avalanche photodiode – APD*). Os sensores estão ligados a um sistema eletrônico de registro o qual organiza os dados em sincronia com o sistema de emissão e os envia para um computador, no qual são armazenados e podem ser visualizados em tempo quase real (WEITKAMP, 2006). A Figura 2.5 contém um esquema que representa o funcionamento básico de um sistema *LIDAR*, representado por três módulos principais e seus respectivos componentes.

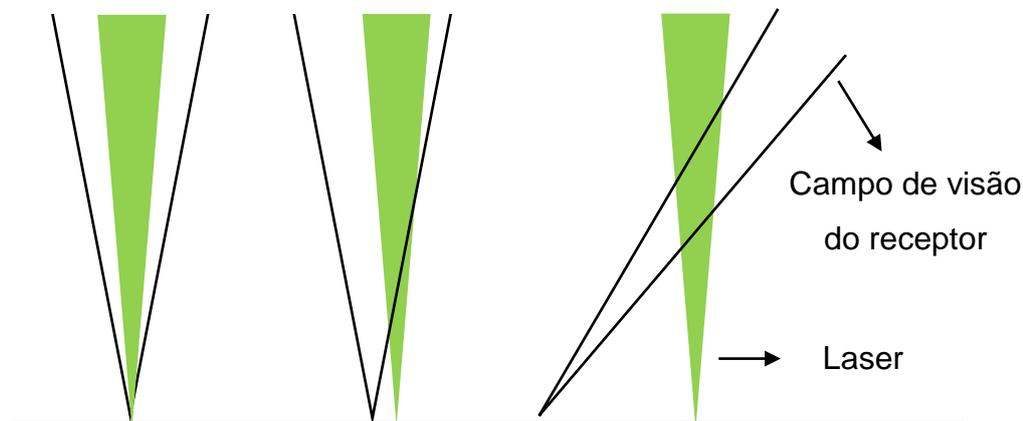
**Figura 2.5** – Esquema de representação de um sistema *LIDAR*. I – Módulo de transmissão, II – Módulo de captação e III – Módulo de detecção.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Argall e Sica (2003), Lopes (2011) e Weitkamp (2006).

Um sistema *LIDAR* no qual o módulo de transmissão está no mesmo local em que se encontra o módulo de captação é chamado de **monoestático**. Caso contrário, se estes módulos estiverem em locais diferentes, o sistema chama-se **biestático**. A configuração monoestática pode ser classificada de duas formas: I – **monoestática coaxial**: na qual o laser é emitido a partir do centro do telescópio; II – **monoestática biaxial**: na qual a transmissão do laser ocorre ao lado do telescópio. A Figura 2.6 contém as possíveis configurações que podem ser adotadas em um sistema *LIDAR*. Ao conjunto de fatores geométricos que descrevem a sobreposição entre o campo de visão do módulo receptor é dado o nome de **função de overlap**. Essa função varia de 0 a 1 tornando-se máxima quando o alcance do laser está totalmente inserido no campo de visão do telescópio (ARGALL e SICA, 2003, WEITKAMP, 2005).

**Figura 2.6** – Tipos de configuração de um sistema *LIDAR* de acordo com as posições dos módulos de transmissão e captação.

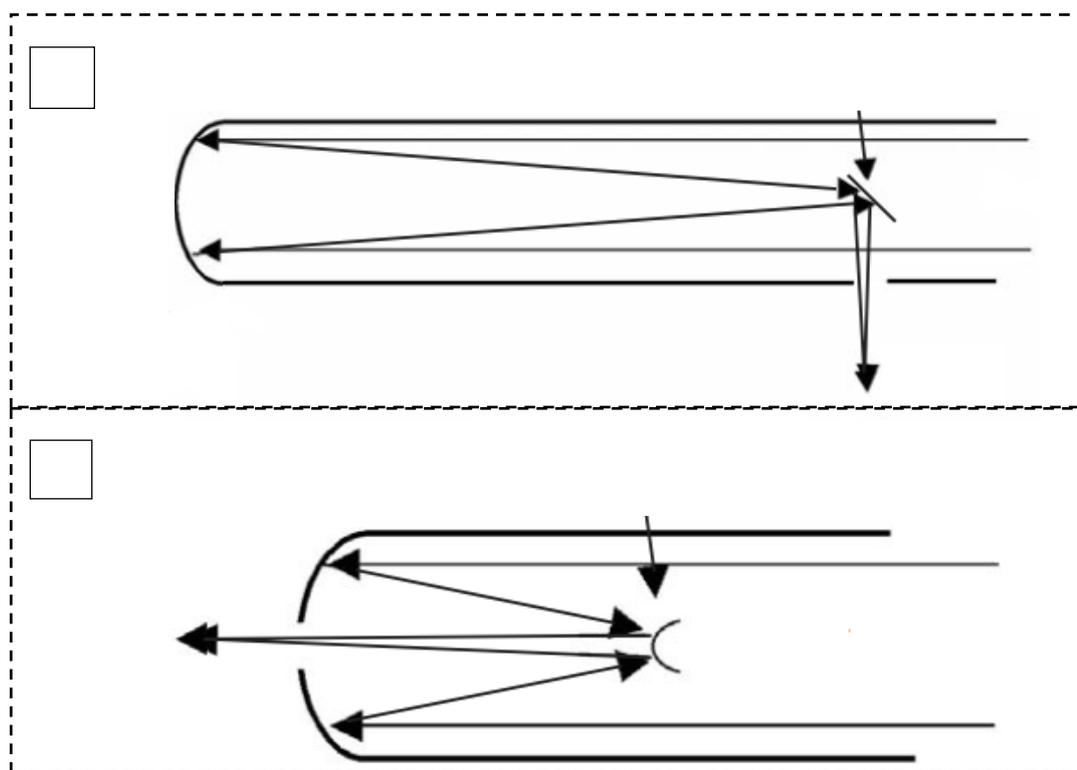


Fonte: Adaptado de Argall e Sica (2003).

Os telescópios empregados em um sistema *LIDAR* geralmente são do tipo **newtoniano** ou **cassegraniano**. Um telescópio newtoniano é composto por um espelho primário côncavo grande que recebe a luz refletindo-a para um espelho secundário pequeno, plano e cujo ângulo é de  $45^\circ$  em relação ao eixo óptico do sistema. Em outra configuração, o telescópio cassegraniano possui um espelho

primário côncavo e com uma cavidade no centro. Este espelho primário reflete a luz para um espelho secundário convexo o qual reflete a luz para cavidade do espelho primário. A Figura 2.7 é composta por dois esquemas que representam a configuração de um telescópio newtoniano e a configuração de um telescópio cassegraniano (BALL, 2005).

**Figura 2.7** – Esquemas representativos de um telescópio newtoniano (A) e de um telescópio cassegraniano (B).



Fonte: Adaptado de Ball (2005).

## 2.5 Equação LIDAR

Com base nas características observadas nos estágios de transmissão, captação e detecção é possível obter várias informações da atmosfera como, por exemplo, perfis de temperatura, altitude da camada limite, poluição, coeficientes de extinção e espalhamento devido aos aerossóis de acordo com as configurações técnicas do sistema LIDAR. O sinal detectado pelo sistema é representado pela **Equação LIDAR** que, em sua forma mais simples, pode ser escrita como (BECERRA e CHAVARRO, 2005; WEITKAMP, 2005):

$$P(R, \lambda) = K G(R, \lambda) \beta(R, \lambda) T(R, \lambda), \quad (2.3)$$

na qual  $R$  é a distância,  $P(R, \lambda)$  é a potência recebida,  $K$  é o fator de desempenho do sistema,  $G(R, \lambda)$  descreve a dependência geométrica com a distância,  $\beta(R, \lambda)$  é o **coeficiente de retroespalhamento** (melhor descrito na seção 2.5.1) e  $T(R, \lambda)$  é o termo de transmissão que descreve o quanto da luz emitida pelo *LIDAR* foi perdida no percurso de ida e volta até a distância  $R$ .

O fator de desempenho do sistema é representado pela seguinte equação:

$$K = P_0 \frac{c\tau}{2} A\eta, \quad (2.4)$$

em que  $P_0$  é a potência média do pulso unitário de laser,  $c$  é a velocidade da luz,  $\tau$  duração temporal do pulso,  $A$  é a área do receptor primário o qual recebe a luz retroespalhada, e  $\eta$  é a eficiência geral do sistema.

Em relação ao fator geométrico  $G(R, \lambda)$ , é possível representá-lo como a razão entre a função de *overlap*  $O(R, \lambda)$  e o quadrado da distância  $R$ :

$$G(R, \lambda) = \frac{O(R, \lambda)}{R^2}. \quad (2.5)$$

A transmitância  $T(R, \lambda)$  pode ter valores entre 0 e 1, e é dada pela equação:

$$T(R, \lambda) = \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (2.6)$$

O somatório de todas as perdas por transmissão representa a extinção da luz e o termo  $\alpha(r, \lambda)$  representa o **coeficiente de extinção** (melhor descrito na seção 2.5.1)

Agregando todos os termos vistos separadamente, a **equação LIDAR para o retroespalhamento elástico**, pode ser escrita desta maneira (WEITKAMP, 2005):

$$P(R, \lambda) = \frac{E_0 \eta_L}{R^2} O(R) \beta(R, \lambda) \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (2.7)$$

$P(R, \lambda)$  representa o sinal do retroespalhamento devido às moléculas (Rayleigh) e devido às partículas recebido de uma distância  $R$ ,  $E_0$  é a energia do pulso transmitido para a atmosfera ( $E_0 = P_0 \tau$ ),  $\eta_L$  é a eficiência óptica das unidades

de detecção do sistema,  $O(R)$  é a função de *overlap* que representa a interceptação entre o laser e o campo de visão do telescópio,  $\beta(R, \lambda)$  é o coeficiente de espalhamento [ $\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ] e  $\alpha(r, \lambda)$  é o coeficiente de extinção [ $\text{km}^{-1}$ ].

É importante destacar que o sinal total detectado por um sistema *LIDAR* possui, além dos termos destacados, outras duas contribuições chamadas de *noise background*, “ruído de fundo” em português, e o *dark signal*, “sinal escuro” em português. A contribuição de *background* representa o espalhamento da luz do ambiente externo à atmosfera, por exemplo, proveniente do sol, lua ou estrelas, após interagir com a atmosfera, captada pelo sistema. O sinal escuro é obtido por meio do teste *Dark Measurement* e representa o ruído intrínseco ao próprio sistema, é um sinal detectado mesmo na ausência de luz. Estas duas contribuições devem ser retiradas do sinal bruto na etapa de pré-processamento, pois as mesmas podem causar distorções nos resultados (KOVALEV e EICHINGER, 2004; MCMANAMON, 2015; WEITKAMP, 2005).

### 2.5.1 Extinção e Retroespalhamento Elástico

Na atmosfera, a extinção da luz ocorre devido ao espalhamento e absorção da luz por moléculas e por aerossóis. O coeficiente de extinção  $\alpha(R, \lambda)$  pode ser escrito por meio da soma de quatro componentes (WEITKAMP, 2005):

$$\alpha(R, \lambda) = \alpha_{mol,esp}(R, \lambda) + \alpha_{mol,abs}(R, \lambda) + \alpha_{aer,esp}(R, \lambda) + \alpha_{aer,abs}(R, \lambda), \quad (2.8)$$

na qual o índice ‘*esp*’ indica espalhamento e o índice ‘*abs*’, absorção, ‘*mol*’ é a contribuição da extinção devido as moléculas e ‘*aer*’ é a contribuição da extinção devido os aerossóis.

O coeficiente de retroespalhamento  $\beta(R, \lambda)$  representa o espalhamento da luz em  $180^\circ$ , ou seja, para a mesma direção da fonte emissora. Desconsiderando os efeitos da absorção molecular, os coeficientes de extinção e retroespalhamento podem representados pelas contribuições devido as moléculas e devido os aerossóis nestes efeitos:

$$\beta(R, \lambda) = \beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda). \quad (2.9)$$

$$\alpha(R, \lambda) = \alpha_{mol}(R, \lambda) + \alpha_{aer}(R, \lambda). \quad (2.10)$$

Os coeficientes de extinção e retroespalhamento devido os aerossóis  $\beta_{aer}(R, \lambda)$  e  $\alpha_{aer}(R, \lambda)$ , respectivamente, podem ser obtidos por meio da solução da equação *LIDAR* (2.7) a qual pode ser reescrita utilizando as equações 2.9 e 2.10, considerando a função *overlap* como máxima,  $O(R) = 1$ , e fazendo uma correção do sinal recebido ,para eliminar a dependência com a altura, multiplicando a equação por  $R^2$  , desta forma:

$$S(R, \lambda) = E_0 \eta_L [\beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda)] \exp \left[ -2 \int_0^R [\alpha_{mol}(r, \lambda) + \alpha_{aer}(r, \lambda)] dr \right]. \quad (2.11)$$

Na equação 2.11 o termo  $R^2$  não está explícito, pois  $S(R, \lambda) = R^2 P(R, \lambda)$ . O termo  $S(R, \lambda)$  representa o chamado **Range Corrected Signal (R.C.S.)**, em português, Sinal Corrigido pelo Alcance.

Em seguida é necessário calcular o coeficiente de extinção molecular,  $\alpha_{mol}(R, \lambda)$ , e o de coeficiente de retroespalhamento molecular,  $\beta_{mol}(R, \lambda)$ , os quais estão relacionados pela **razão LIDAR molecular**,  $LR_{mol}(R, \lambda)$ , descrita pela seguinte equação:

$$LR_{mol}(R, \lambda) = \frac{\alpha_{mol}(R, \lambda)}{\beta_{mol}(R, \lambda)} = \frac{8\pi}{3} sr. \quad (2.12)$$

Os coeficientes  $\alpha_{mol}(R, \lambda)$  e  $\beta_{mol}(R, \lambda)$  podem ser calculados a partir de dados de temperatura, pressão e parâmetros ópticos como proposto por Bucholtz (1995):

$$\alpha_{mol}(R, \lambda) = \frac{24\pi^3 (n_s^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2 (n_s^2 - 2)^2} \left( \frac{6 + 3\rho_n}{6 - 7\rho_n} \right) N_s \frac{T_0 P(R)}{P_0 T(R)}, \quad (2.13)$$

, logo, substituindo 2.13 em 2.12, o coeficiente  $\beta_{mol}(\lambda)$  é dado pela seguinte equação:

$$\beta_{mol}(R, \lambda) = \frac{9\pi^2 (n_s^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2 (n_s^2 - 2)^2} \left( \frac{6 + 3\rho_n}{6 - 7\rho_n} \right) N_s \frac{T_0 P(R)}{P_0 T(R)}, \quad (2.14)$$

$\lambda$  é o comprimento de onda [cm],  $n_s$  é o índice refrativo padrão do ar no comprimento  $\lambda$ ,  $N_s$  é o número da densidade molecular para o atmosfera padrão (aproximadamente  $2,54743 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ), e  $\rho_n$  é o fator de depolarização, termo que representa a variação anisotrópica das moléculas de ar com o comprimento de onda ( $\rho_n$  é 0.0301, 0.0284 e 0.0273 para 355 nm, 532 nm e 1064 nm, respectivamente),

$P_0$  e  $T_0$  são, respectivamente, temperatura e pressão na superfície,  $P(z)$  e  $T(z)$  são, respectivamente temperatura e pressão na altitude ' $R$ ' (LALINET, 2014b).

Após obter os coeficientes  $\beta_{mol}(R, \lambda)$  e  $\alpha_{mol}(R, \lambda)$  as únicas variáveis da equação *LIDAR* que ainda não foram descritas até o momento são  $\beta_{aer}(R, \lambda)$  e  $\alpha_{aer}(R, \lambda)$ . Portanto há duas incógnitas, mas apenas uma equação. Este problema pode ser resolvido relacionando as duas incógnitas por meio da **razão *LIDAR* devido os aerossóis**,  $LR_{aer}(r, \lambda)$ , a qual depende das propriedades físicas, químicas e morfológicas das partículas, ou seja, cada tipo de aerossol têm um valor de razão *LIDAR* diferente. Segundo Weitkamp (2005) valor da  $LR_{aer}(r, \lambda)$  pode alterar bruscamente com a altura principalmente em uma atmosfera que contenha aerossóis marinhos, antrópicos ou de poeira de desertos e pode ser representado pela seguinte equação:

$$LR_{aer}(R, \lambda) = \frac{\alpha_{aer}(R, \lambda)}{\beta_{aer}(R, \lambda)}. \quad (2.15)$$

Continuando a solução da equação *LIDAR*, é introduzido o termo:

$$Y(R, \lambda) = LR_{aer}(R, \lambda)[\beta_{mol}(R, \lambda) + \beta_{aer}(R, \lambda)]. \quad (2.16)$$

Substituindo os termos  $\alpha_{aer}(R, \lambda)$  e  $\alpha_{mol}(R, \lambda)$ , como descritos nas equações (2.12) e (2.15), para deixar toda equação em função dos termos  $\beta_{mol}$ , e também inserindo o termo  $Y(R, \lambda)$  na equação *LIDAR* (2.11), a resultante é:

$$\begin{aligned} S(R, \lambda) LR_{aer}(R, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_0^R [LR_{aer}(r, \lambda) - LR_{mol}(\lambda)] \beta_{mol}(r, \lambda) dr \right\} \\ = E_0 \eta_L Y(R, \lambda) \exp \left[ -2 \int_0^R Y(r, \lambda) dr \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Aplicando logaritmos em ambos os lados e diferenciando a equação em relação a  $R$ , obtêm-se uma equação de Bernoulli:

$$\begin{aligned} \frac{d \ln \left( S(R, \lambda) LR_{aer}(R, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_0^R [LR_{aer}(r, \lambda) - LR_{mol}(\lambda)] \beta_{mol}(r, \lambda) dr \right\} \right)}{dR} \\ = \frac{1}{Y(R, \lambda)} \frac{dY(R, \lambda)}{dR} - 2Y(R, \lambda) \end{aligned} \quad (2.18)$$

Resolvendo a equação 2.16 para a seguinte condição de contorno,

$$Y(R_0, \lambda) = LR_{aer}(R_0, \lambda)[\beta_{aer}(R_0, \lambda) + \beta_{mol}(R_0, \lambda)], \quad (2.19)$$

a seguinte equação é obtida:

$$\beta_{aer}(R_0, \lambda) + \beta_{mol}(R_0, \lambda) = \frac{S(R_0, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^R [LR_{aer}(r, \lambda) - LR_{mol}(\lambda)] \beta_{mol}(r, \lambda) dr \right\}}{\frac{S(R_0, \lambda)}{\beta_{aer}(R_0, \lambda) + \beta_{mol}(R_0, \lambda)} - 2 \int_{R_0}^R LR_{aer}(r, \lambda) S(r, \lambda) T(r, R_0) dr}, \quad (2.20)$$

na qual:

$$T(r, R_0) = \exp \left\{ -2 \int_{R_0}^r [LR_{aer}(r', \lambda) - LR_{mol}(\lambda)] \beta_{mol}(r', \lambda) dr' \right\}. \quad (2.21)$$

A partir da equação (2.20) é possível calcular o  $\beta_{aer}(R, \lambda)$ , ou seja, o **perfil do coeficiente de retroespalhamento** devido aos aerossóis. A altitude de referência  $R_0$  é escolhida considerando um ponto em que  $\beta_{aer}(R, \lambda)$  é desprezível em relação a  $\beta_{mol}(R, \lambda)$ . A partir  $LR_{aer}(r, \lambda)$  e  $\beta_{aer}(R, \lambda)$ , o **perfil do coeficiente de extinção devido os aerossóis**,  $\alpha_{aer}(R, \lambda)$ , pode ser estimado pela equação 2.15, válida apenas se for considerado que a relação entre os coeficientes de extinção e retroespalhamento é linear:

$$\alpha_{aer}(R, \lambda) = L_{aer}(R, \lambda) \beta_{aer}(R, \lambda) \quad (2.20)$$

Essas formulações matemáticas para solução da equação *LIDAR* de retroespalhamento elástico teve sua origem por Hitschfeld e Bordan (1954), entretanto ficou mais conhecida como o **Método de Inversão de Klett-Fernald-Sasano**, devido à contribuição destes pesquisadores para método. Klett (1981) apresentou uma solução analítica para equação propondo uma relação entre espalhamento e extinção. Fernald (1984) trouxe um esquema numérico para a solução computacional da equação. Sasano *et al.* (1985) apontaram os erros associados ao assumir a relação extinção sobre retroespalhamento como uma constante.

## 2.6 EARLINET Single Calculus Chain

A *European Aerosol Research LIDAR Network (EARLINET)* encontra-se em operação na Europa desde o ano 2000 e fornece a mais ampla base de dados terrestre da distribuição vertical de aerossóis sobre a Europa. O objetivo desta rede é criar uma base de dados estatisticamente significativa da distribuição horizontal, vertical e temporal de aerossóis em escala continental. Esta rede criou um rígido programa de padronização que inclui instrumentação e os algoritmos de processamento de dados, o que facilita a troca de dados. Nesta perspectiva foi desenvolvida a *EARLINET Single Calculus Chain (SCC)*, uma ferramenta automática para o processamento de dados *LIDAR (EARLINET, 2017)*.

A *SCC* é uma ferramenta capaz de receber os sinais brutos e gerar produtos finais tais como, por exemplo, coeficientes de retroespalhamento, coeficiente de extinção, razão *LIDAR* e razão de depolarização. Esta ferramenta começou a ser desenvolvida como foco principal do projeto *EARLINET – Advanced Sustainable Observation System (EARLINET-ASOS)*, que iniciou em 2006, e foi estendida durante *Aerosol, Clouds and Trace Gases Research InfraStructure Network (ACTRIS)* e o *ACTRIS-2 (D'AMICO et al., 2015, 2016; MATTIS et al., 2016)*.

Existem dois módulos de cálculo na *SCC*:

1. **EARLINET LIDAR Pre-Preprocessor (ELPP)** – Este é módulo de pré-processamento o qual lê os dados brutos, identifica os dados de cada canal e efetua correções eliminando possíveis erros instrumentais tais como o atraso entre o envio do laser e registro do sinal (*trigger delay*), e efetua a remoção de *background*.
2. **EARLINET LIDAR Data Analyzer (ELDA)** – O módulo de processamento óptico que lê os dados pré-processados no módulo *ELPP* e as informações sobre o produto conFigurado pelo usuário previamente.

Os dois módulos de cálculo são coordenados por um módulo adicional chamado *Daemon* que torna o sistema totalmente automático. Todos os módulos foram implementados em *softwares* livres, de código aberto, e o formato padrão dos dados é o *NetCDF*. O módulo *ELPP* foi implementado em ANSI C e o módulo *ELDA* em *Free Pascal*. Os usuários podem utilizar a *SCC* localmente, em sua própria máquina, ou por meio de uma *interface web*, na qual é possível fazer as

conFigurações tais como: informações básicas sobre a estação *LIDAR*, equipamentos utilizados na estação, os valores de entradas para o pré-processamento de dados, os tipos de produtos que serão gerados. Uma vez que os dados brutos são submetidos ao banco de dados da *SCC* o processamento é feito automaticamente, visto que todas as conFigurações foram realizadas previamente, e ao final são gerados gráficos dos produtos selecionados e os arquivos processados ficam disponíveis para download (D'AMICO *et al.*, 2015, 2016; MATTIS *et al.*, 2016).

Utilizando a *SCC*, 20 diferentes estações da *EARLINET* (atualmente existem 28) submeteram cerca de 2.600 arquivos de dados brutos adquiridos entre 2001 e 2015. Mais de 5.000 produtos ópticos foram calculados por meio da *SCC*, dos quais cerca de 3.600 perfis de retroespalhamento e 1.400 perfis de extinção de aerossóis. Estes produtos foram utilizados, por exemplo, em estudos relacionados a comparação entre diferentes instrumentos e experimentos em modelos de assimilação de qualidade do ar (D'AMICO *et al.*, 2015, 2016; *EARLINET*, 2017; MATTIS *et al.*, 2016).

Wandinger *et al.* (2016) intercompararam 21 diferentes sistemas *LIDAR* da *EARLINET* provenientes de 18 estações entre 2009 e 2013. Em 2009, foram comparados os primeiros 11 sistemas *LIDAR* no *Leibniz Institute for Tropospheric Research (TROPOS)* em Leipzig, Alemanha. Nesta campanha ocorreram 20 medidas, com duração entre 1 e 3 horas, durante 11 dias e 3 sistemas foram qualificados para serem os de referência. Nos anos seguintes, os sistemas de referência foram transportados para outras estações da *EARLINET* concluindo a intercomparação de 21 sistemas *LIDAR* em 2013.

O módulo de geração de produtos da *SCC* foi utilizado para calcular os coeficientes de extinção e retroespalhamento dos aerossóis a partir dos sinais obtidos para comparação. A *SCC* também foi utilizada para o processamento dos dados corrigindo o *trigger-delay* (atraso entre a transmissão e o registro do sinal), subtraindo o *background* e fazendo a correção do sinal com o alcance, manipulação matemática que retira a dependência do sinal *LIDAR* com o quadrado da altura (D'AMICO *et al.*, 2015, 2016; *EARLINET*, 2017; MATTIS *et al.*, 2016).

A técnica de sensoriamento remoto *LIDAR* envolve várias áreas do conhecimento tais como matemática, eletrônica, óptica, computação numérica e ciências climáticas. A Tabela 2.2 contém os principais autores citados nesta revisão de literatura e suas contribuições científicas.

**Tabela 2.1** – Principais referências bibliográficas da revisão de literatura.

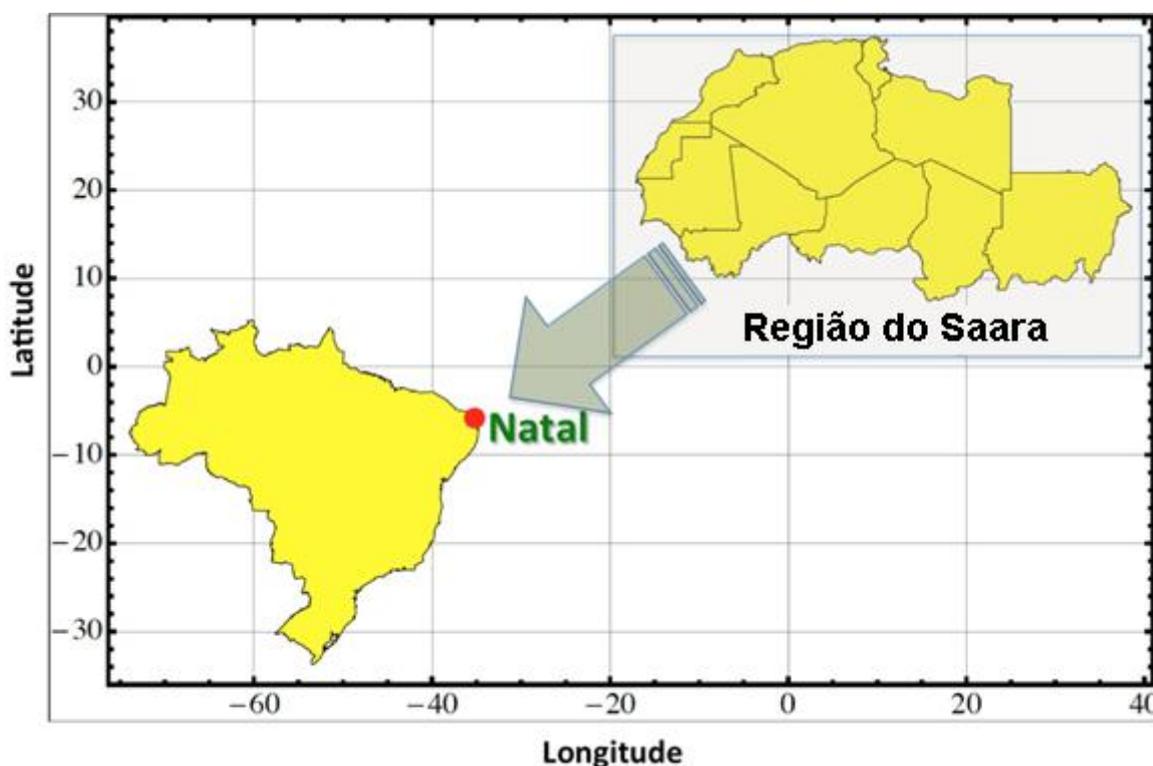
<b>Investigador(res)</b>	<b>Local</b>	<b>Método</b>	<b>Contribuições</b>
Klett (1981)	EUA	Integração por inversão	Mecanismos matemáticos para resolução da equação <i>LIDAR</i>
Fernald (1984)	EUA	Cálculo numérico	Cálculo do $\beta_{aer}$
Bucholtz (1995)	EUA	Teoria de Rayleigh	Cálculo de $\alpha_{mol}$
Pappalardo <i>et al.</i> (2004)	Europa	Erro absoluto e relativo	Metodologia para estimar diferença entre perfis de retroespalhamento
Kovalev e Eichinger (2004)	Canadá	Teoria	Técnica <i>LIDAR</i>
Weitkamp (2005)	Alemanha	Teoria	Técnica <i>LIDAR</i>
Seinfeld e Pandis (2016)	EUA	Teoria	Base científica sobre aerossóis
Landulfo <i>et al.</i> (2016)	Brasil	Instrumentação	Observação de poeira pelo <i>LIDAR DUSTER</i>
Mattis <i>et al.</i> (2016)	Europa	Computação numérica	Detalhes técnicos sobre produtos ópticos da <i>SCC</i>
Freudenthaler <i>et al.</i> (2018)	Europa	Instrumentação	Testes instrumentais de qualidade <i>LIDAR</i>

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

Natal é a capital do Rio Grande do Norte, Brasil. Esta cidade possui 877.662 habitantes, é banhada pelo Atlântico Sul, com temperatura média de 26° C, próxima à Linha do Equador, sobre influência dos ventos alísios de sudeste e da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Os ventos são mais intensos em agosto e setembro, sendo em abril a época dos ventos mais fracos. Sua climatologia anual é dividida em uma estação seca que normalmente ocorre de agosto a março e uma estação chuvosa, decorrente das ondas de Leste, entre abril e julho, com predominância de precipitações em junho. Natal, cujas coordenadas geográficas são 5°50'29" S e 35°11'57" O, está inserida na rota do transporte transatlântico de poeira do deserto do Saara, um fenômeno que ocorre principalmente em dezembro, janeiro e fevereiro quando a ZCIT está mais ao sul. A Figura 3.1 contém um mapa com localização de Natal e a localização da Região do Saara (IBGE, 2016; LANDULFO *et al.*, 2016; MOTTA, 2004; REBOITA *et al.*, 2012).

**Figura 3.1** – Mapa de localização de Natal/RN e sua posição em relação ao deserto do Saara.



Fonte: Adaptado de Landulfo *et al.* (2016).

### 3.2 O Sistema *LIDAR DUSTER*

O *LIDAR DUSTER* é um sistema elástico de depolarização capaz de obter dados da distribuição vertical dos aerossóis, coeficientes de extinção e retroespalhamento, e razão de depolarização no comprimento de onda 532 nm. Este sistema foi desenvolvido pelo LAAL/IPEN sendo mantido em operação pelo GP-MOQA em Natal desde janeiro de 2016. Os equipamentos que compõe este sistema *DUSTER* estão abrigados em um contêiner especialmente adaptado para este sistema, situado próximo aos anfiteatros A e B do Centro de Ciências Exatas e da Terra (CCET/UFRN) conforme a Figura 3.2. O contêiner possui um sistema de refrigeração e um sistema de desumidificação a fim de proteger os instrumentos da proliferação de mofo e umidade (LANDULFO et al., 2016).

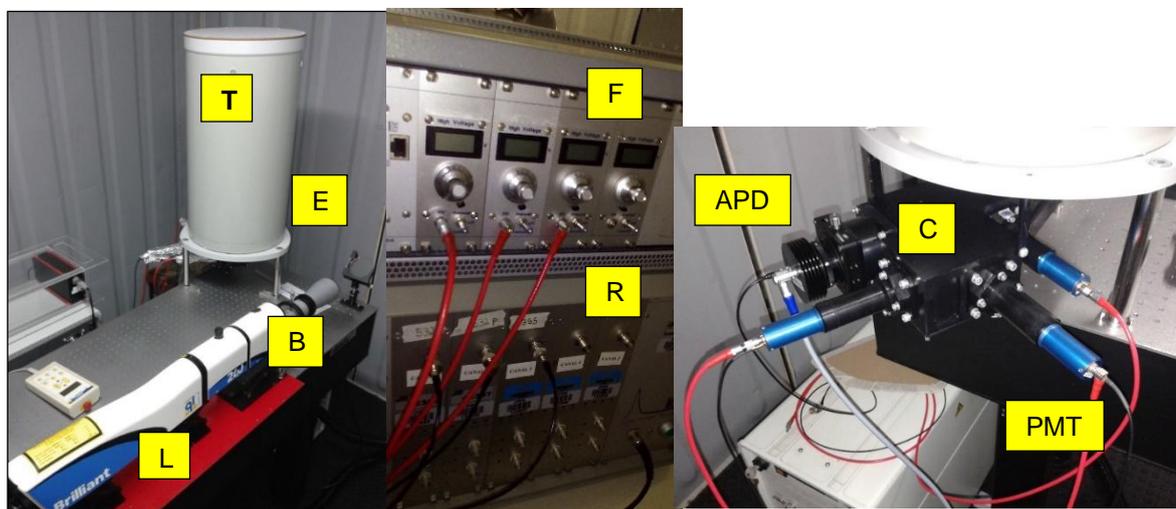
O *DUSTER* é um *LIDAR* de depolarização, porque sua caixa de detecção é equipada como um cubo divisor de feixes polarizados, o qual separa a fração da luz que sofreu polarização da fração não polarizada. Os feixes polarizados são direcionados para o canal perpendicular 532 nm s ('s' da palavra alemã '*senkrecht*', que significa 'perpendindicular' em português) e os não polarizados, para o canal paralelo, 532 nm p. Os sinais detectados nestes canais são utilizados para calcular parâmetros físicos, a fim de investigar a presença dos aerossóis que polarizam a luz, como os aerossóis de poeira A conFiguração do *DUSTER* é monoestática biaxial, conforme a Figura 3.2, e este sistema é composto pelos seguintes equipamentos (LANDULFO et al., 2016).

**Figura 3.2** – Contêiner que abriga os equipamentos do sistema *LIDAR DUSTER*



Fonte: Acervo do autor.

**Figura 3.3** – ConFiguração do sistema *LIDAR DUSTER* durante a campanha *MOLOTOV I*. As letras nas caixas amarelas representam: L – laser, B – expensor de feixe, C – caixa de detecção, E – espelho do laser, T – Telescópio, R – *LICEL TR20-160*, F – fontes das *PMT*, *PMT* – *Photomultiplier Tube* (“tubos azuis”), *APD* – *Avalanche Photo-diode*.



Fonte: Acervo do *LIDAR DUSTER*.

- **Transmissão** – Um Laser *Nd:YAG Brilliant B*, desenvolvido pela *Quantel SA*, cujo comprimento de onda fundamental é 1064 nm, equipado com geradores de segundo e terceiro harmônicos, 532 nm e 355 nm, respectivamente. Sua taxa de repetição é de 20 Hz e duração do pulso é de  $(7 \pm 2)$  ns. As energias nominais dos pulsos são de 100 mJ (355 nm), 200 mJ (532 nm) e 400 mJ (1064 nm); um espelho para laser HR de 76,2 mm. Durante a campanha *MOLOTOV I* foi utilizado um expensor de feixe, mas o mesmo não ocorreu nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*, por recomendações do pesquisador Volker Freudenthaler. Ele afirmou durante sua palestra no *workshop 2nd LiCalTrain*, em Bucareste, Romênia, que o expensor de feixe poderia afetar os produtos da depolarização por ser ele mesmo um agente polarizante.
- **Captação** – Um telescópio *Cassegrain Carbon Plastic* desenvolvido pela *Optosystems* (300 mm de diâmetro) de uma caixa de detecção projetada para operar 4 foto-sensores. Em cada saída para os foto-sensores existem filtros do tipo 25 nm FWHM que bloqueiam a luz solar.
- **Detecção** – Um foto-sensor *Avalanche Photo-diode (APD)* para detecção em 1064 nm (infravermelho), e três foto-sensores *Photomultiplier Tube (PMT)* para detecção dos canais 532 nm paralelo, 532 nm perpendicular e do 355 nm. Durante a campanha *MOLOTOV I* foi utilizado gravador transiente

modelo *LICEL TR20-160*, resolução espacial de 7,5 m, e durante as campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*, foi utilizado um *LICEL TR40-80*, resolução espacial de 3,75 m. Durante as três campanhas operacionais houve detecção em 7 canais da seguinte forma:

1. 1064 nm, analógico
2. 0532 nm s, analógico
3. 0532 nm s, fotocontagem
4. 0532 nm p, analógico
5. 0532 nm p, fotocontagem
6. 0355 nm, analógico
7. 0355 nm, fotocontagem

Os canais analógicos detectam o sinal dos foto-sensores e retornam um valor médio da tensão em mili Volt [mV], enquanto os canais fotocontagem contabilizam frequência de fótons que passaram pelo foto-sensor em Mega Hertz [MHz].

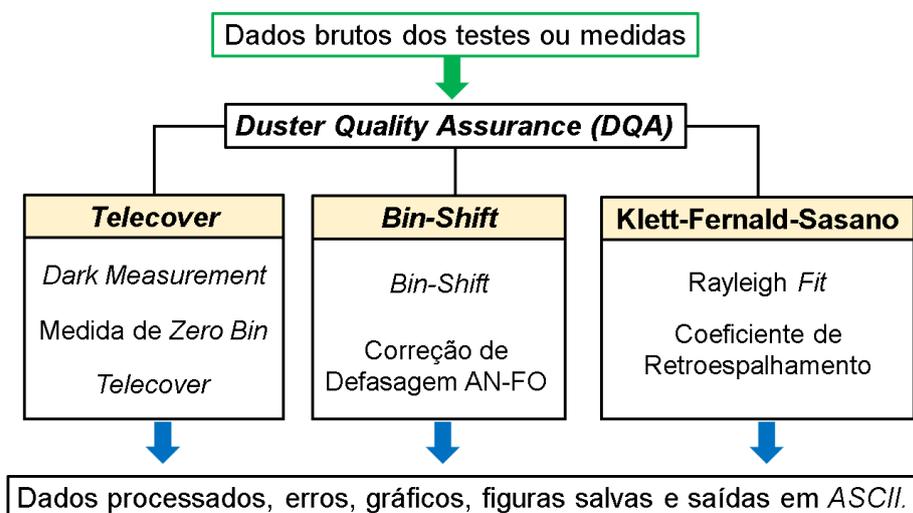
### 3.3 Testes Instrumentais de Qualidade

Com a finalidade de assegurar a qualidade nos dados adquiridos por meio do sistema *DUSTER* durante as campanhas operacionais *MOLOTOV I*, *APEL* e *MOLOTOV II*, os testes instrumentais *Dark Measurement*, *Zero Bin*, *Bin-Shift*, *Telecover* e *Rayleigh Fit* foram realizados. Estes testes são reconhecidos pelas redes *LALINET* e *EARLINET* como ferramentas do controle de qualidade de um sistema *LIDAR* (*EARLINET*, 2007; *FREUDENTHALER*, 2018; *LALINET*, 2014b).

A análise dos testes instrumentais foi feita com auxílio de um conjunto de algoritmos, desenvolvidos pelo autor, chamado de *DUSTER Quality Assurance (DQA)* dividido entre os módulos *Telecover*, *Bin-Shift* e *Klett-Fernald-Sasano*. O módulo *DQA/Telecover* processa dados de Medida de Zero Bin, *Dark Measurement* e *Telecover*, faz pré-processamento dos dados dos testes, gera os respectivos gráficos, calcula os valores de *trigger delay*, calcula o desvio padrão dos quadrantes do *Telecover* em relação à média, salva as Figuras e escreve os resultados de cada teste em formato *ASCII* automaticamente.

O módulo *DQA/Bin-Shift* é baseado em uma função desenvolvida pelo pesquisador Juan Luis Guerrero Rascado (Universidade de Granada, Espanha) que calcula o coeficiente Person para um sinal fotocontagem deslocado em relação ao respectivo sinal analógico. Entretanto o *DQA/Bin-Shift* além de calcular o valor do *bin-shift* mostra graficamente a correção do Zero Bin dos sinais. O módulo *DQA/Klett-Fernald-Sasano* é união do Algoritmo de Inversão da *LALINET* com uma função de processar o *Rayleigh Fit*. Este módulo calcula os perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis, gera o *Rayleigh Fit*, calcula o erro relativo entre o perfil de retroespalhamento devido as moléculas e devido os aerossóis, gera as Figuras e escreve os resultados em formato *ASCII* automaticamente. A Figura 3.4 contém um organograma de funcionamento do *DQA* apresentando cada um dos módulos, as respectivas entradas e saídas.

**Figura 3.4** – Organograma de funcionamento do *DUSTER Quality Assurance*. AN se refere a um canal analógico e FO se refere a um canal fotocontagem.

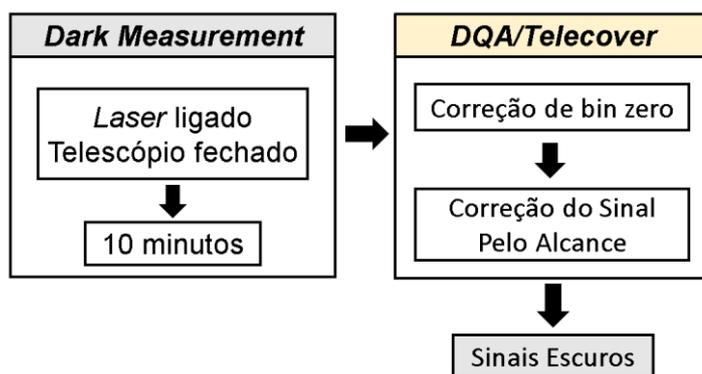


### 3.3.1 Dark Measurement

O dado bruto detectado pelo sistema *LIDAR* possui a contribuição do laser retroespalhado, da luz natural e dos ruídos eletrônicos do sistema. O teste de *Dark Measurement*, é realizado para captar estes ruídos gerados pelos próprios componentes eletrônicos, também chamados de **sinais escuros**. Para a realização deste teste todos os componentes do sistema *LIDAR* são ligados, mas o telescópio permanece totalmente fechado para que nenhum tipo de luz seja captada. As luzes

do laboratório permanecem apagadas durante todo o teste e sob estas condições a detecção dos ruídos é feita durante 10 minutos antes e 10 minutos após a mediação atmosférica (EARLINET, 2007; LALINET, 2014b). A Figura 3.5 contém o fluxograma para obtenção dos sinais escuros do teste instrumental ao processamento no DAQ/Telecover.

**Figura 3.5** – Fluxograma para obtenção dos sinais escuros.

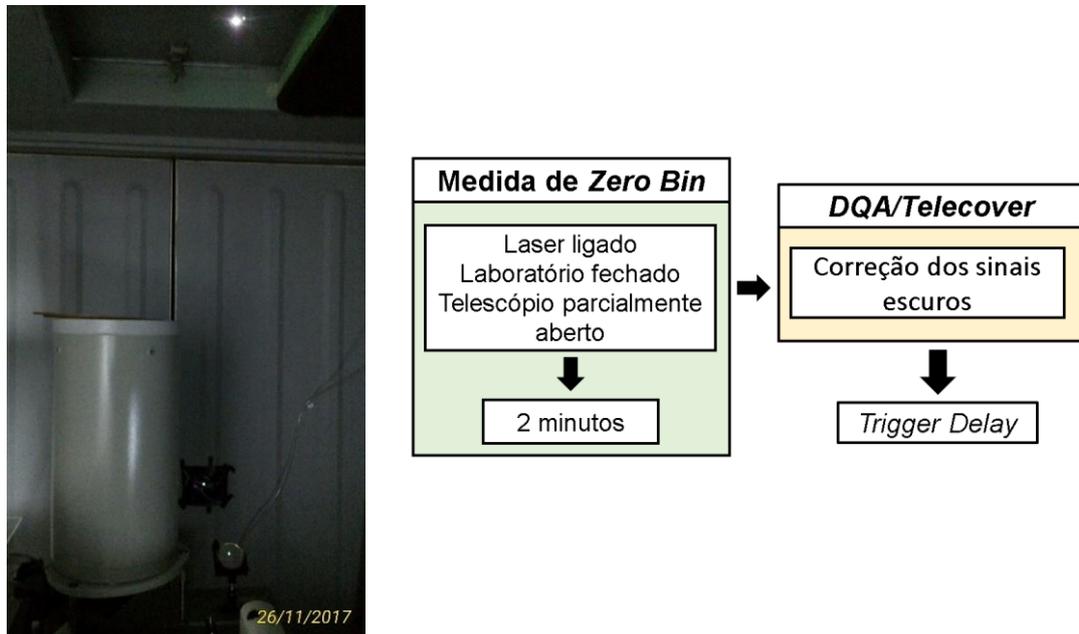


### 3.3.2 Medida de Zero Bin

Entre os envios dos feixes de laser e o registro do sinal pelo gravador transiente pode haver um atraso chamado de *trigger delay*, o qual é identificado pelo teste de **Zero Bin**. Cada *bin* corresponde a uma unidade da resolução vertical do sistema, por exemplo, um sistema com alcance de 30.000 m e resolução vertical de 3,75 m terá perfis divididos em 8.000 *bins*. Neste caso o primeiro *bin* contém o sinal detectado em 3,75 m, o segundo *bin*, o sinal detectado em 7,00 m e assim gradativamente.

Para realização deste teste de *Zero Bin* o laboratório permanece totalmente fechado com as luzes apagadas, o laser é ligado, o telescópio deve ter apenas uma pequena parte descoberta e um objeto deve ser posicionado na direção em que o laser é refletido pelo espelho, porém em uma altitude inferior a resolução vertical do sistema (FREUDENTHALER, 2018). Como o *DUSTER* está em um contêiner cuja a altura é inferior à sua própria resolução espacial, o teste de *Zero Bin* é foi simplesmente sem abrir a janela de passagem do laser para atmosfera durante 2 minutos conforme a Figura 3.6. A mesma Figura contém o fluxograma para obtenção dos valores de trigger delay calculados com auxílio do *DQA/Telecover*.

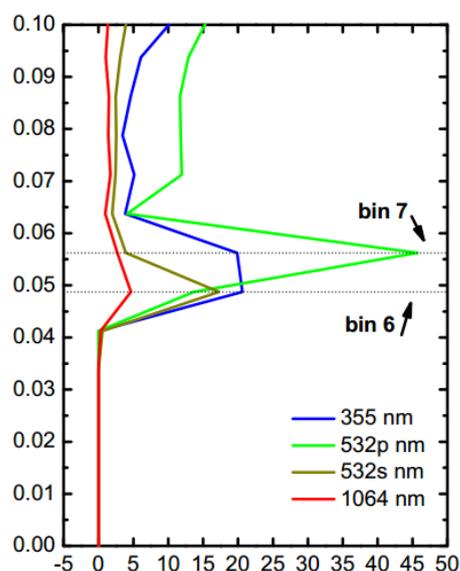
**Figura 3.6** – À esquerda, uma imagem a Medida de Zero Bin realizado em 26 de novembro de 2017 no *LIDAR DUSTER*, à direita um fluxograma da obtenção do trigger delay. Uma luz foi ligada apenas para fazer esta imagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal detectado durante o teste irá apresentar um pico de saturação que teoricamente deveria estar na altitude de 0,00 m (ou *Zero Bin*), pois o teto do contêiner está abaixo da resolução vertical. Entretanto devido ao erro instrumental do atraso no registro do sinal, o pico de saturação pode aparecer alguns *bins* acima da posição 0,00 m. A quantidade de *bins* entre a altitude 0,00 m e o pico de saturação representam o valor de *trigger delay* e estes *bins* devem ser descartados, pois caso contrário todo o sinal detectado estaria numa altitude acima da altitude real. A Figura 3.7 mostra um exemplo de como pode haver defasagem entre a altitude zero real e os sinais detectados em um teste de *Zero Bin* (GUERRERO-RASCADO, 2009).

**Figura 3.7** – Exemplo de medidas *Zero Bin* com canais de detecção analógica. Os picos entre 6 e 7 mostram a altitude zero obtida instrumentalmente.



Fonte: Adaptado de Guerrero-Rascado (2009).

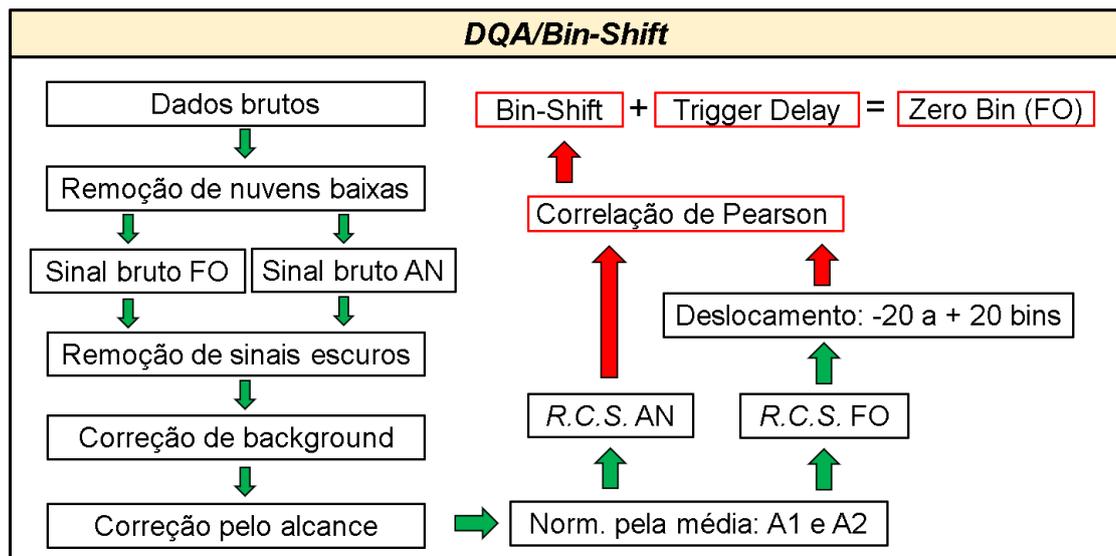
### 3.3.3 *Bin-Shift*

O teste de *Bin-Shift* identifica a defasagem existente entre os sinais analógico e fotocontagem de um determinado canal. A primeira etapa para comparar os sinais destes dois modos de detecção foi remover as nuvens dos dados brutos, em seguida o pré-processamento dos mesmos, corrigindo os sinais escuros e os *noises background*. Como o sinal analógico é medido em mili Volt [mV] e o sinal fotocontagem em Mega Hertz [MHz], para estabelecer uma comparação ambos os sinais foram normalizados. Esta normalização ocorreu dividindo todos os dados de cada sinal medido pela média do mesmo um determinado intervalo de altura acima do *overlap*, onde o sinal não apresentou muitas distorções. Em seguida, os sinais de fotocotagem, em um dado intervalo de investigação, foram deslocados de -20 a +20 *bins* e foram comparados aos respectivos sinais analógicos. Para cada um desses deslocamentos foi calculado um valor de coeficiente de Person, equação 3.1, o qual pode variar de -1 a 1. Quanto mais próximo o coeficiente de Person for de 1 maior a correlação positiva entre as variáveis.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (AN_i - \overline{AN}) (FO_i - \overline{FO})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (AN_i - \overline{AN})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (FO_i - \overline{FO})^2}} \quad (3.1)$$

A quantidade de *bins* deslocados para a qual houve a maior correlação representa o melhor valor de *Bin-Shift*, ou seja, de defasagem entre os sinais. A correção da defasagem do canal fotocontagem ocorreu somando seu valor de *Bin-Shift* com o valor *Zero Bin* do respectivo canal analógico (GUERRERO-RASCADO, 2009). A Figura 3.8 contém o fluxograma da obtenção dos valores de *Bin-Shift* pelo modo DAQ/*Bin-Shift*.

**Figura 3.8** – Fluxograma para obtenção dos valores de *Bin-Shift* pelo módulo DQA/*Bin-Shift*. A1 e A2 são as altitudes inicial e final, respectivamente, para cálculo da média de normalização de cada perfil.

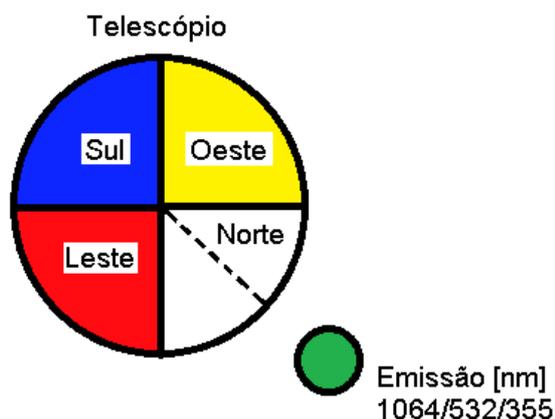


### 3.3.4 *Telecover*

O teste de *Telecover* é realizado para verificar o alinhamento em curto alcance e a qualidade de captação do telescópio. Em um sistema alinhado, toda a área do telescópio é aproveitada e há equilíbrio na captação dos feixes retroespalhados entre os quadrantes. Para realização deste teste, o telescópio é dividido em quadrantes: Norte, Leste, Sul e Oeste, sendo o quadrante Norte aquele cuja bissetriz é perpendicular a emissão do laser conforme a Figura 3.9. O padrão de alinhamento proposto pela *LALINET* é: Norte 1 = Norte 2 > Leste = Oeste > Sul.

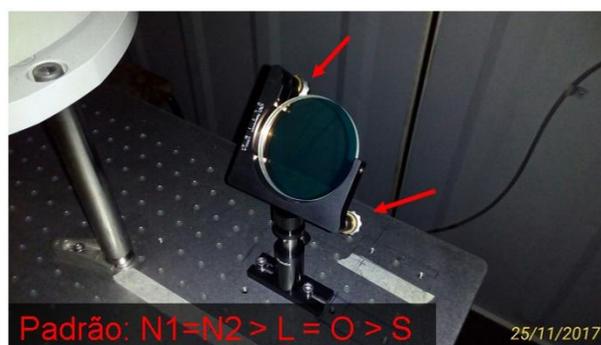
Caso contrário, o ângulo do espelho de transmissão deve ser alterado até que estas condições sejam satisfeitas movimentando os pivôs indicados na Figura 3.10.

**Figura 3.9** – Representação da divisão do telescópio em quadrantes para o teste de *Telecover*. A área do telescópio está representada em quadrantes coloridos e a circunferência verde representa o laser saindo do plano. A posição norte é estabelecida na bissetriz da emissão vertical do laser.



Fonte: Adaptado de Guerrero-Rascado *et al.* (2011).

**Figura 3.10** – Espelho refletor que transmite o laser para a atmosfera. As setas vermelhas indicam a posição dos pivôs os quais rotacionam o espelho na vertical e na horizontal. Padrão para o *Telecover*:  $N1 = N2 > L = O > S$ .



Durante a realização do *Telecover*, cada quadrante é testado individualmente, ou seja, um único quadrante é utilizado para captar os feixes retroespalhados enquanto os outros três permanecem cobertos. As medições ocorreram em dias com atmosfera livre de nuvens baixas nos quais cada quadrante foi medido por 2 minutos na sequência Norte 1, Leste, Sul, Oeste e Norte 2 (*LALINET*, 2014b).

Variações atmosféricas, a transmissão dos feixes retroespalhados pela caixa de detecção e a eficiência dos sensores também podem causar interferências nos

perfis obtidos. Entretanto, em um sistema *LIDAR* ideal os perfis normalizados de um *Telecover* devem coincidir, exceto para o alcance inferior ao *overlap* máximo. Para diminuir essas interferências todos os perfis foram suavizados e normalizados em relação à média do intervalo de altura com poucos desvios entre os sinais de cada quadrante. Segundo proposto no protocolo de qualidade instrumental da *EARLINET* o sistema pode ser considerado alinhado se duas condições forem estabelecidas (*EARLINET*, 2007; FREUDENTHALER, 2018):

1. Os desvios relativos de cada quadrante, calculados pelas equações de 3.3 a 3.6, em relação ao sinal médio, equação 3.2, não devem ser superiores a 0.10.

$$M_a = \frac{N1_a + L_a + S_a + O_a}{4}, \quad (3.2)$$

na qual  $M_a$  é o sinal médio,  $N1_a + L_a + S_a + O_a$  são os sinais dos quadrantes Norte 1, Leste, Sul e Oeste, respectivamente, na altitude ' $a$ '.

$$D(N1)_a = \frac{N1_a - M_a}{M_a}, \quad (3.3)$$

$$D(L)_a = \frac{L_a - M_a}{M_a}, \quad (3.4)$$

$$D(S)_a = \frac{S_a - M_a}{M_a}, \quad (3.5)$$

$$D(O)_a = \frac{O_a - M_a}{M_a}, \quad (3.6)$$

nas quais  $D(N1)_a, D(L)_a, D(S)_a$  e  $D(O)_a$  são os desvios relativos dos quadrantes em relação ao sinal médio  $M_a$  na altitude ' $a$ '.

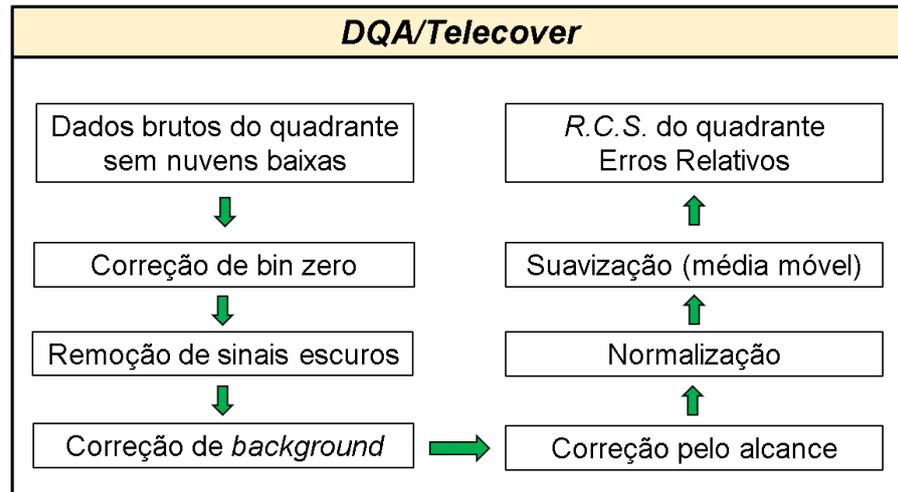
2. O desvio relativo total dos quadrantes em relação ao perfil médio deve estar abaixo de 0.05, calculando-o pela equação 3.7:

$$D(T)_a = \sqrt{\frac{1}{4} [D(N1)_a^2 + D(L)_a^2 + D(S)_a^2 + D(O)_a^2]}, \quad (3.7)$$

na qual  $D(T)_a$  é o desvio relativo total na altitude ' $a$ ',  $D(q)$  é o desvio relativo do quadrante ' $q$ ' conforme as equações de número 3.3 a 3.6.

A Figura 3.11 contém o fluxograma do processamento de dados dos testes de *Telecover* no módulo *DAQ/Telecover* o qual tem como saídas os sinais de cada quadrante corrigidos pelo alcance, os cálculos de todos os erros relativos, os gráficos e os resultados escritos em um arquivo formato *ASCII*.

**Figura 3.11** – Processamento de dados do teste de *Telecover* no *DQA/Telecover*.



### 3.3.5 Rayleigh Fit

O teste de *Rayleigh Fit* é empregado para verificar a qualidade do alinhamento do sistema *LIDAR* em longo alcance e, conseqüentemente, a altitude confiável para cálculos dos produtos tais como os perfis de retroespalhamento e extinção dos aerossóis. Neste teste foram comparados os sinais *LIDAR* medidos pelo *DUSTER* e os **perfis de retroespalhamento molecular atenuado** (ou *Rayleigh*),  $\beta_{mol(at)}$ , ambos corrigidos pelo alcance. O  $\beta_{mol(at)}$  corrigido pelo alcance,  $R.C.\beta_{mol(at)}$ , foi calculado pela multiplicação entre o quadrado do alcance  $R$ , o coeficiente de retroespalhamento molecular  $\beta_{mol}$  e a transmitância atmosférica  $T$  (FREUDENTHALER, 2018; GUERRERO-RASCADO, 2009; LALINET, 2014b) conforme a equação 3.8.

$$R.C.\beta_{mol(at)}(R, \lambda) = R^2 \beta_{mol}(R, \lambda) \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (3.8)$$

Reescrevendo  $\beta_{mol}(R, \lambda)$ , equação 2.14:

$$\beta_{mol}(R, \lambda) = \frac{9\pi^2(n_s^2 - 1)^2}{\lambda^4 N_s^2(n_s^2 - 2)^2} \left( \frac{6 + 3\rho_n}{6 - 7\rho_n} \right) N_s \frac{T_0 P(R)}{P_0 T(R)}. \quad (2.14)$$

Reescrevendo a transmitância atmosférica  $T(R, \lambda)$ , equação 2.6:

$$T(R, \lambda) = \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r, \lambda) dr \right]. \quad (2.6)$$

Os dados do teste de *Rayleigh Fit* foram triados pelo filtro *DUSTER Cloud Free*, o qual remove os perfis com nuvens baixa e que será melhor abordado na seção 3.5. Os perfis brutos livres de nuvens baixas medidos no *DUSTER* foram pré-processados com correção do *Zero Bin*, remoção de sinal escuro, remoção de *noise background* e por último fazendo uma média de todos os dados da aquisição. O perfil médio foi suavizado para redução dos efeitos das distorções do sinal. As aquisições para esse teste ocorreram durante 30 ou mais minutos e foram utilizados apenas os dados livres de nuvens. Os dados de pressão e temperatura foram obtidos pelo banco de dados da Estação de Radiossondagem 82599, SBNT, Natal Aeroporto. As equações moleculares foram solucionadas computacionalmente com auxílio da função 'molecular.m' da *LALINET*.

Todos os perfis *R.C.S.* e *R.C.β<sub>mol(at)</sub>* foram normalizados pelas médias de seus respectivos dados em um intervalo entre  $r_{min}$  e  $r_{max}$ . Após as normalizações, os perfis *R.C.S.* de cada canal foram ajustados em relação aos respectivos *R.C.β<sub>mol(at)</sub>* no mesmo intervalo entre  $r_{min}$  e  $r_{max}$  no qual são assumidas condições de atmosfera livre de aerossóis, onde ambos os perfis devem coincidir.

Assumindo a solução discreta, o ajuste entre o perfil de retroespalhamento molecular e o perfil de retroespalhamento devidos aerossóis foi calculado pela seguinte equação (*EARLINET*, 2007; *FREUDENTHALER*, 2018):

$$R.C.S._{fit}(R, \lambda) = R.C.S.(R, \lambda) \frac{\sum_{rmin}^{rmax} R.C.\beta_{mol(at)}(r, \lambda)}{\sum_{rmin}^{rmax} R.C.S.(r, \lambda)} \quad (3.9)$$

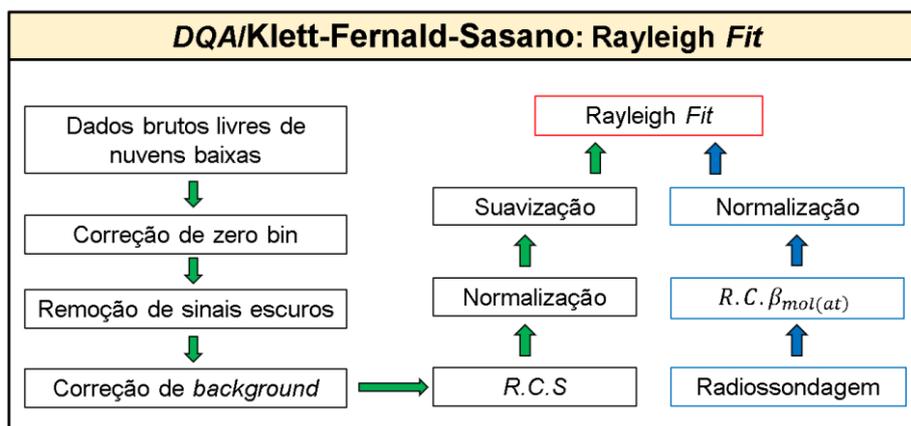
na qual *R.C.S.<sub>fit</sub>* é o perfil *LIDAR* ajustado em relação a *R.C.β<sub>mol(at)</sub>*.

O erro do sinal *R.C.S.<sub>fit</sub>* em relação a curva sintética molecular foi calculado pela equação:

$$\text{Erro Relativo} = \frac{R.C.\beta_{mol(at)} - R.C.S.fit}{R.C.\beta_{mol(at)}} \quad (3.10)$$

O fluxograma do processamento de dados para obtenção dos resultados dos testes de *Rayleigh Fit* está apresentado na Figura 3.12.

**Figura 3.13** – Fluxograma do processamento dos testes de *Rayleigh Fit*.



### 3.4 EARLINET SCC e Algoritmo de Inversão da LALINET

Foram selecionados dois dias de medição da campanha *APEL*, 13 e 16 de novembro, no comprimento de onda 1064 nm, para calcular os perfis de retroespalhamento dos aerossóis por duas ferramentas de processamento: a *EARLINET SCC* e o Algoritmo de Inversão da *LALINET*, ambos pelo método de inversão de Klett-Fernald-Sasano.

A plataforma *EARLINET SCC* foi operada por meio de sua interface web, cuja página inicial está na Figura 3.14, que permite configurar as especificações técnicas do sistema *DUSTER*, os produtos finais a serem calculados assim como submeter os dados brutos (D'AMICO *et al.*, 2015, 2016; MATTIS *et al.*, 2016). Após estas primeiras configurações, a *SCC* poderá ser reutilizada em futuras pesquisas. O primeiro passo para utilização da *SCC* foi alimentar o servidor com informações básicas como: Nome da estação, instituto responsável, principal investigador, coordenadas geográficas, tipo de meio ambiente do entorno e altitude em relação ao nível do mar. As configurações básicas e os parâmetros técnicos do sistema *DUSTER* foram realizadas na seção *Station Admin*, Figura 3.15, com os seguintes dados:

**Figura 3.14** – Página inicial da plataforma *EARLINET SCC*.



This interface was designed to improve the user-friendliness of EARLINET's Single Calculus Chain and to manage the set of parameters needed to perform lidar analysis.

Beta testing of SCC v4.0

This is a beta version of SCC v4.0. Please report any issues you face or suggestions for improving the SCC in the [forum](#) or in the [bug tracking system](#).

Thank you for your help and support!

SCC info

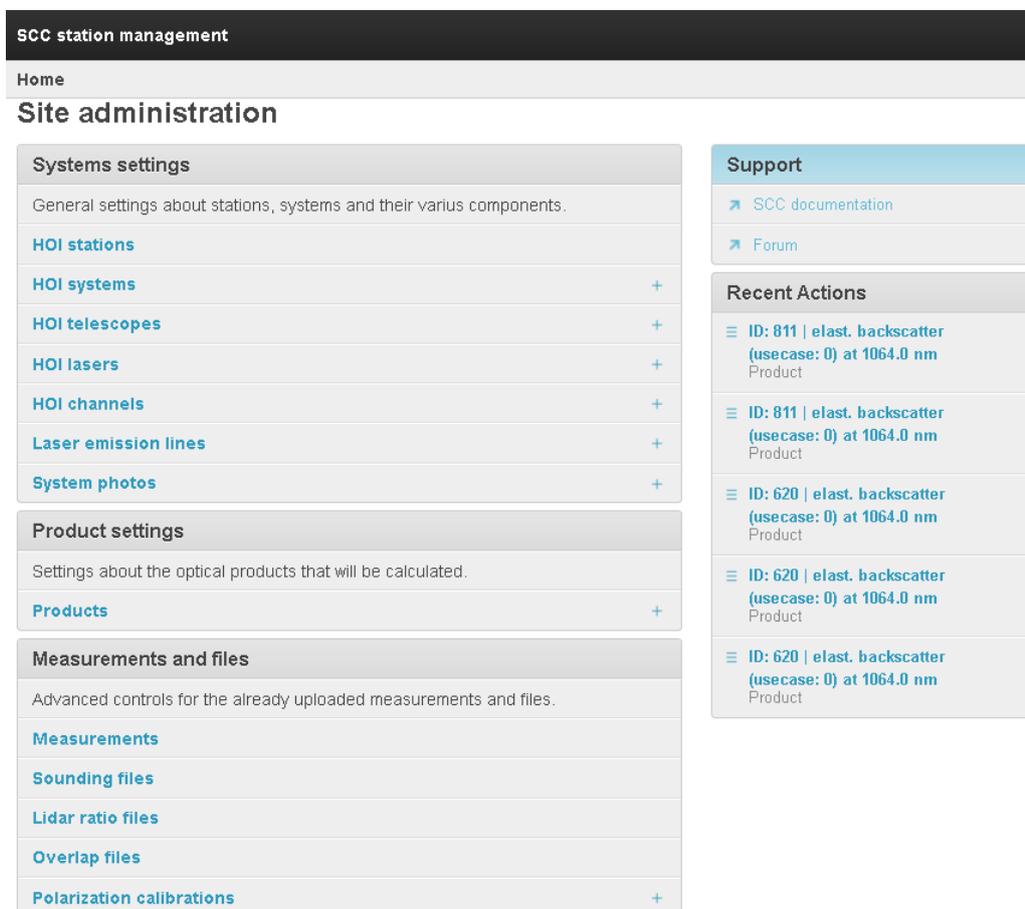
- Version: 4.0.6
- ELPP ver.: 6.37
- ELDA ver.: 3.0.14
- ELDEC ver.: 1.23.0
- Daemon ver.: 4.12.0
- Database ver.: 4
- Web interface ver.: 3
- Release: 2018-06-19 09:15

Interface structure

The interface has three sections that you can access from the menu on the top of the page.

Fonte: D'AMICO *et al.* (2015, 2016) e MATTIS *et al.* (2016).

**Figura 3.15** – Seção *Station Admin* da plataforma *EARLINET SCC*.



Fonte: D'AMICO *et al.* (2015, 2016) e MATTIS *et al.* (2016).

- a) **O período para o qual a configuração é válida** – A SCC permite criar vários tipos de configurações para o mesmo sistema. Com isso foi possível criar configurações distintas para as diferentes campanhas operacionais.
- b) **Tipo do fotômetro mais próximo** – fotômetro *CIMEL* Modelo Padrão SP3B2008, instalado no prédio da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN.
- c) **Distância do fotômetro ao LIDAR** – 0,2 km.
- d) **Distância da radiossondagem** – Foram utilizados os dados de radiossondagens da estação SBTN, na Base Aérea de Natal/RN, cerca de 9 km distante do *LIDAR*, de onde são lançadas radiossondagens diariamente.
- e) **Canais que serão utilizados** – Foram configurados os canais analógicos 1064 nm, 532 s, 532 nm p e 355 nm.
- f) **Produtos**: Retroespalhamento elástico total para os canais analógicos 1064 nm, 355 nm com razões *LIDAR* constantes.
- g) **Tipo de telescópio** – Telescópio cassegraniano de 300 mm, Campo de visão de  $\leq 1$  mrad.
- h) **Tipo do laser utilizado** – Laser de *Nd:YAG Quantel - Brilliant B* e comprimentos de onda emitidos: 1064 nm, 532 nm, 355 nm.
- i) **Resolução espacial**: *MOLOTOV I*: 7,5 m; *APEL* e *MOLOTOV II*: 3,75 m.
- j) **Modos de detecção de cada canal** – Analógico e fotocontagem.
- k) **Valores de trigger delay**: Estes valores serão obtidos pela Medida de *Zero Bin*, conforme descritos na seção 3.3.2 e apresentados na seção 4.2.

Todas as nuvens baixas foram removidas pelo filtro *DUSTER Cloud Free*, desenvolvido pelo autor e melhor descrito na seção 3.5, com posterior inspeção visual e, quando necessário, remoção manual. Os dados submetidos no servidor da plataforma SCC foram convertidos para formato *NetCDF*, padrão *EARLINET SCC*, por meio do pacote *Atmospheric-Lidar* desenvolvido pelo pesquisador Ioannis Biniotoglou em linguagem *Python 2.7*. Este pacote lê todos os dados brutos, que são

gerados em formato binário, e os reúne em um único arquivo *NetCDF*. Este arquivo contém os parâmetros de cada canal: respectivo número de identificação (o *id* é gerado automaticamente pela SCC de acordo com o canal configurado), modo de detecção, o valor de Zero Bin e um intervalo de altura para cálculo do *background*. No pacote *Atmospheric-Lidar* também foram indicados os respectivos dados de *Dark Measurement* para correção dos ruídos dos dados brutos. A Figura 3.16 contém as configurações utilizadas para conversão dos dados, medidos nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*, para o padrão *EARLINET SCC* (D'AMICO *et al.*, 2015, 2016; MATTIS *et al.*, 2016).

**Figura 3.16** – Parâmetros do *DUSTER* durante as campanhas *APEL* e *MOLOTOV II* para conversão de dados no pacote *Atmospheric-Lidar*.

```

1  general_parameters = \
2  {'System': '\\DUSTER\\',
3   'Laser_Pointing_Angle': 0,
4   'Molecular_Calc': 0,
5   'Latitude_degrees_north': -5.84155,
6   'Longitude_degrees_east': -35.19941,
7   'Altitude_meter_asl': 30.0,
8   'Call sign': "rg"}
9
10 channel_parameters = \
11 { '01064.o_an': {'channel_ID': 997,
12                 'Background_Low': 14500,
13                 'Background_High': 15000,
14                 'Laser_Shots': 200,
15                 'LR_Input': 1,
16                 'DAQ_Range': 500.0,
17                 'First_Signal_Rangebin': 11},
18   '01064.o_ph': {'channel_ID': 994,
19                 'Background_Low': 14500,
20                 'Background_High': 15000,
21                 'Laser_Shots': 200,
22                 'LR_Input': 1,
23                 'DAQ_Range': 0, },
24   '00532.s_an': {'channel_ID': 1019,
25                 'Background_Low': 14500,
26                 'Background_High': 15000,
27                 'Laser_Shots': 200,
28                 'LR_Input': 1,
29                 'DAQ_Range': 500.0,
30                 'First_Signal_Rangebin': 10},
31   '00532.s_ph': {'channel_ID': 982,
32                 'Background_Low': 14500,
33                 'Background_High': 15000,
34                 'Laser_Shots': 200,
35                 'LR_Input': 1,

```

A segunda ferramenta de processamento utilizado foi o Algoritmo de Inversão da *LALINET*, o qual foi unificado durante o *I Workshop on LIDAR Inversion Algorithms of LALINET*, ocorrido entre 10 e 14 de março de 2014. Este *workshop* reuniu pesquisadores da rede latino-americana para comparar seus respectivos algoritmos inversão a fim de chegar a um padronizado. A pesquisadora Elena

Montilla-Rosero trouxe esse algoritmo para Natal e iniciou as adequações para os dados do *DUSTER* (LALINET, 2014a; MONTILLA-ROSETO *et al.*, 2018).

Nas duas plataformas de processamento a razão *LIDAR* foi considerada como constante, igual a 40 sr. Por meio do valor inicial da razão *LIDAR* e dados do modelo atmosférico *U.S. Standard Atmosphere 1976* a *SCC* calcula os perfis dos coeficientes de retroespalhamento devido os aerossóis, enquanto na ferramenta da *LALINET* os cálculos moleculares ocorreram a partir de dados de radiossondagem. No algoritmo da *LALINET* o usuário escolhe um único intervalo de altura para a calibração, a qual ocorre pela multiplicação de todo o perfil de retroespalhamento devido aos aerossóis por uma constante de calibração. Esta constante é obtida dividindo o perfil de retroespalhamento molecular e o perfil de retroespalhamento devidos os aerossóis no intervalo escolhido. No algoritmo de inversão da *LALINET* e na plataforma *SCC* a calibração ocorre pela equação 3.9, entretanto na *SCC* a constante de calibração corresponde a menor média entre o perfil do coeficiente de retroespalhamento devido aos aerossóis e o perfil retroespalhamento devido as moléculas, variando a busca a de 1000 m em 1000 m, em um intervalo de 5000 e 15000, por exemplo (outras opções de intervalo de busca são oferecidas).

A comparação entre os perfis de retroespalhamento foi realizada pelo erro relativo entre os valores calculados pela *SCC* e pelo Algoritmo de Inversão da *LALINET* em cada respectivo *bin*, utilizando a seguinte equação (D'AMICO, 2015; PAPPALARDO, 2004):

$$E_a = \left[ \frac{LALINET_a - SCC_a}{LALINET_a} \right], \quad (3.11)$$

na qual  $E_a$  é o perfil do erro relativo,  $SCC_a$  é o retroespalhamento calculado pela plataforma *SCC* na altitude “a” e  $LALINET_a$  é o retroespalhamento calculado pelo Algoritmo de Inversão da *LALINET* no *bin* “a”.

### **3.5 O filtro de perfis com nuvens *DUSTER Cloud Free***

O processamento de dados *LIDAR* para obtenção de produtos como os perfis dos coeficientes de retroespalhamento e de extinção deve ser feito com dados livres de nuvens. Se não fosse feita uma filtragem da aquisição previamente, os perfis contendo nuvem iriam alterar completamente o produto final, gerando perfis com distorções. Em Natal a quantidade de nuvens baixas é elevada devido à proximidade com o oceano e com a linha do equador, onde há maior incidência de raios solares, conseqüentemente mais evaporação e formação de nuvens.

Com o intuito de automatizar o processo de remoção de perfis com nuvens baixas foi desenvolvido o filtro *DUSTER Cloud Free*. Este filtro funciona de maneira automática e tem como objetivo identificar perfis nos quais houve saturação do sinal *LIDAR* devido a presença de nuvens. O usuário deve fornecer como entrada um limite de intensidade máxima e um intervalo de altura para investigação de cada canal que será filtrado. O filtro percorre todos os perfis de cada canal selecionado, dentro do intervalo de altura escolhido, e detecta quando um dado do perfil está acima do limite indicado. O mesmo cria uma cópia dos dados livres de nuvens e outra cópia dos dados com nuvens e separa as cópias em pastas distintas. Os dados originais não são alterados.

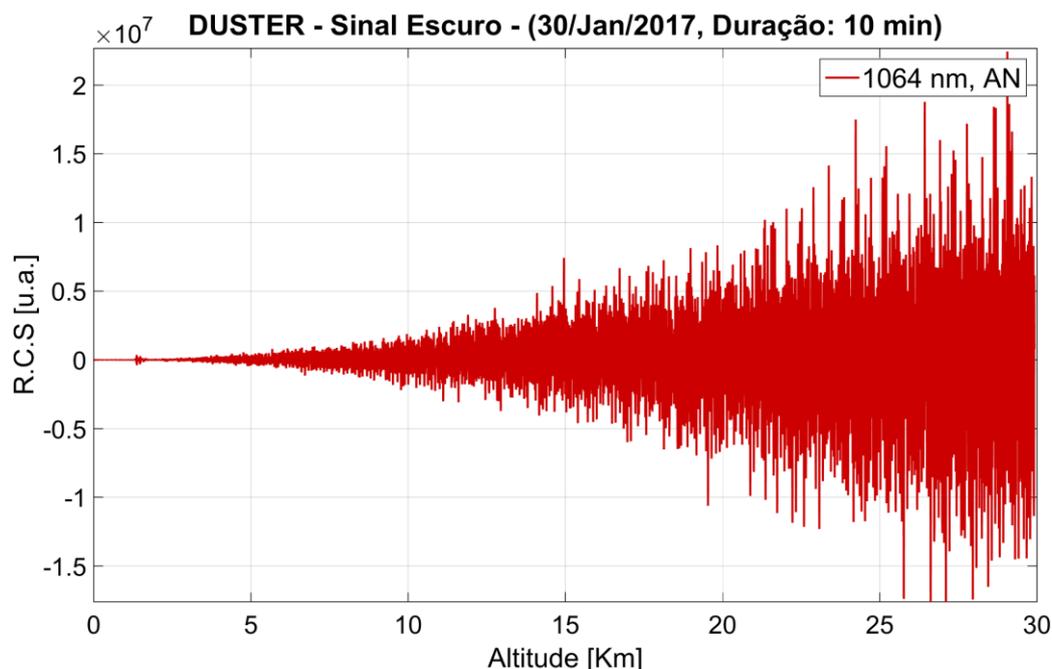
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes instrumentais de qualidade realizados no *LIDAR DUSTER* durante as campanhas operacionais de monitoramento *MOLOTOV I*, *APEL* e *MOLOTOV II*. Esses testes garantiram a qualidade do funcionamento do sistema e forneceram parâmetros importantes para o processamento dos dados medidos. As comparações entre os perfis dos coeficientes de retroespalhamento obtidos pelo Algoritmo de Inversão da *LALINET* e pela plataforma *EARLINET SCC* dão continuidade ao capítulo.

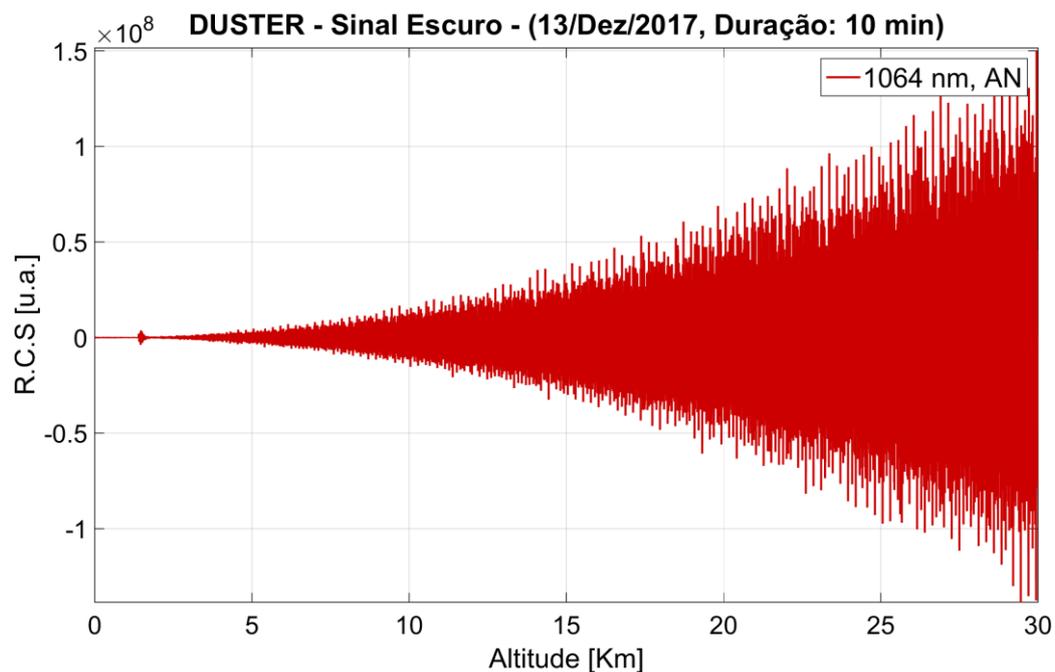
### 4.1 *Dark Measurement*

Os testes de *Dark Measurement* tiveram duração de 10 minutos e os resultados obtidos foram os **sinais escuros**, ou seja, ruídos eletrônicos do sistema. As Figuras 4.1 a 4.14 contêm as médias dos sinais escuros de cada canal durante as campanhas *MOLOTOV I*, *APEL* e *MOLOTOV II*. Estes sinais foram corrigidos de acordo com o respectivo *Zero Bin*, conforme descrito na seção 3.3.2. O processamento foi realizado pelo *DQA/Telecover*.

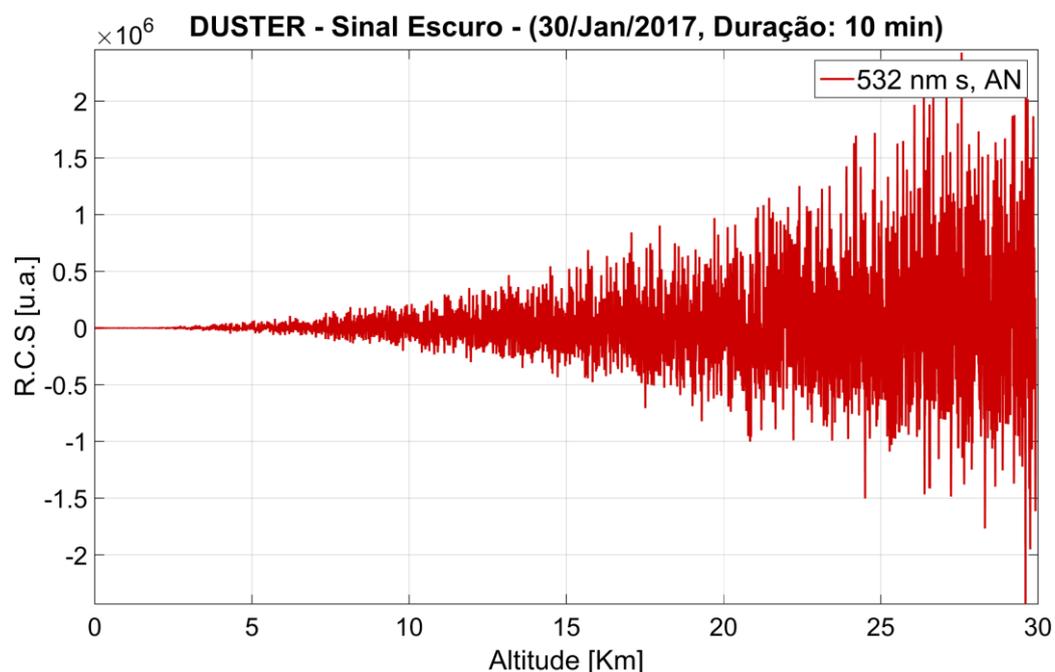
**Figura 4.1** – Média do sinal escuro do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. Teste realizado durante a campanha *MOLOTOV I*.



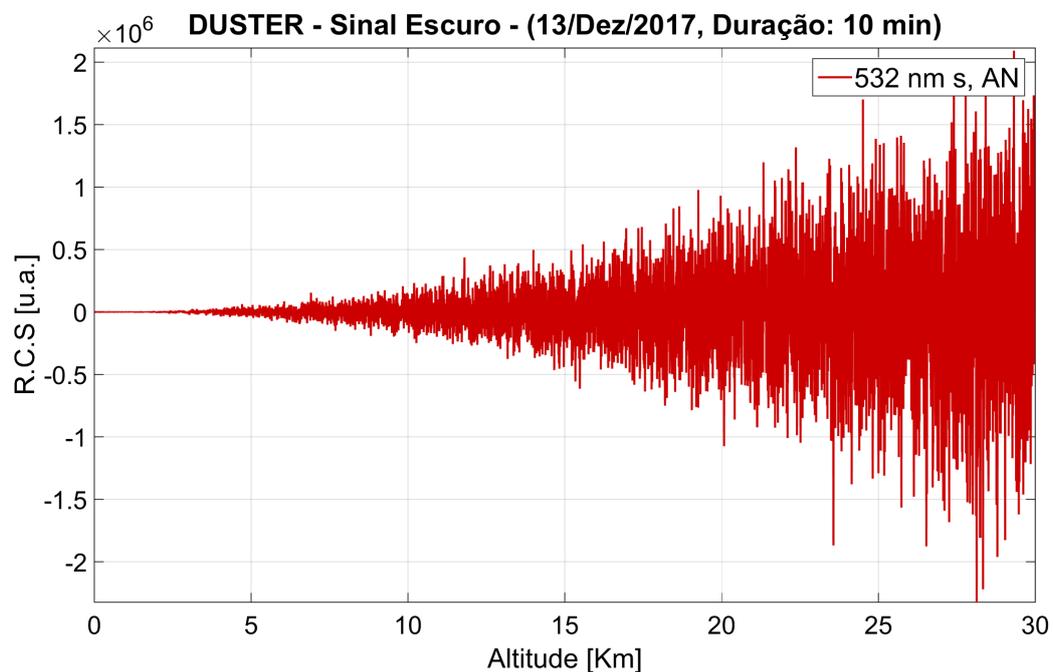
**Figura 4.2** – Média do sinal escuro do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



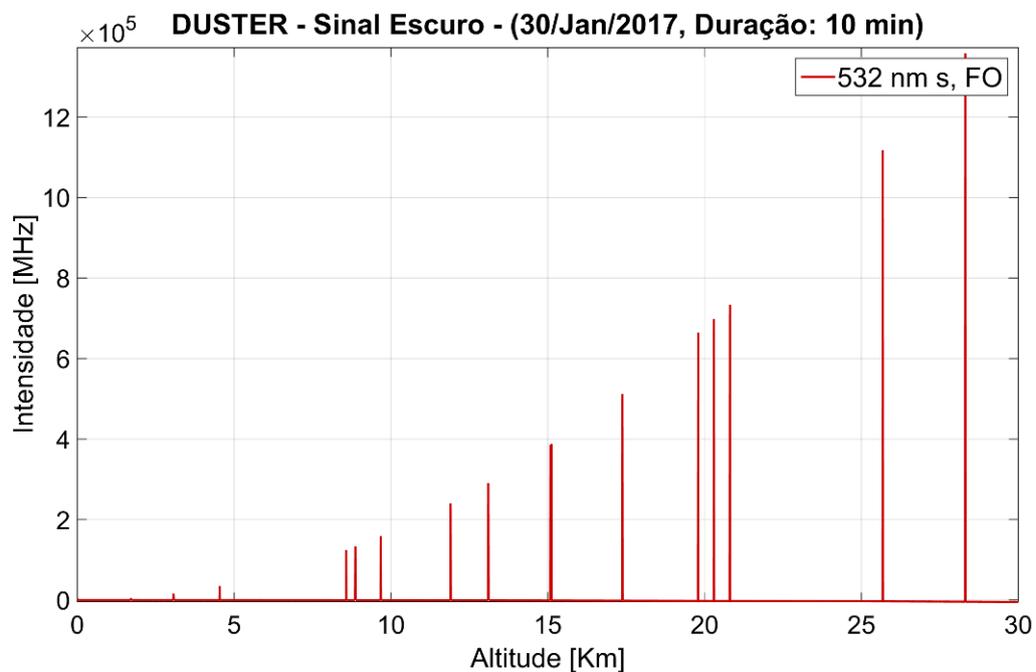
**Figura 4.3** – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. Ruído característico da *MOLOTOV I*.



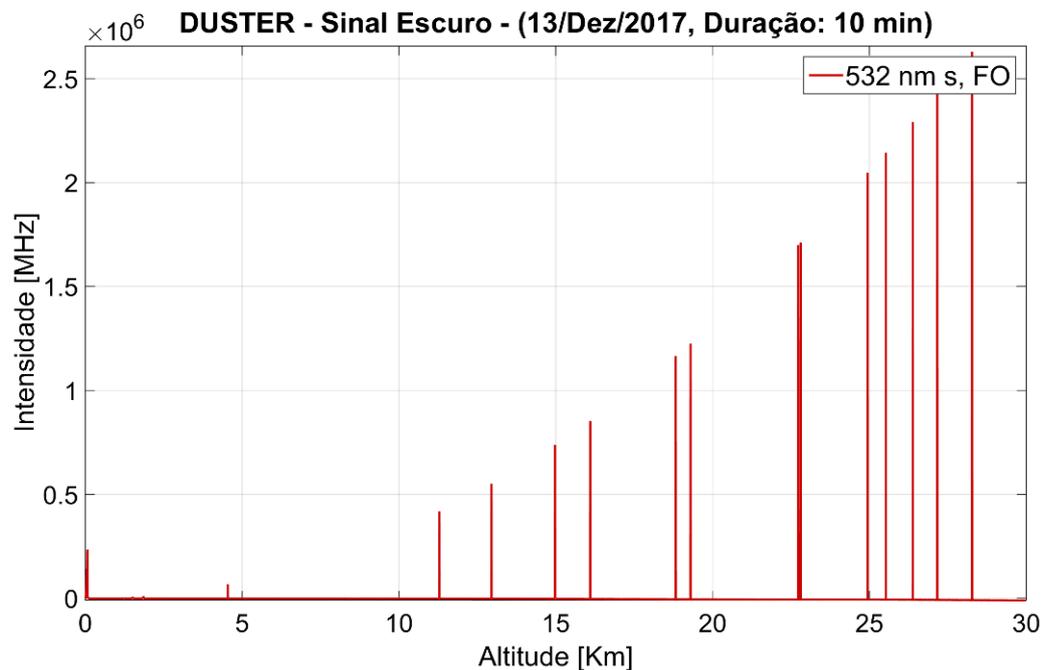
**Figura 4.4** – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



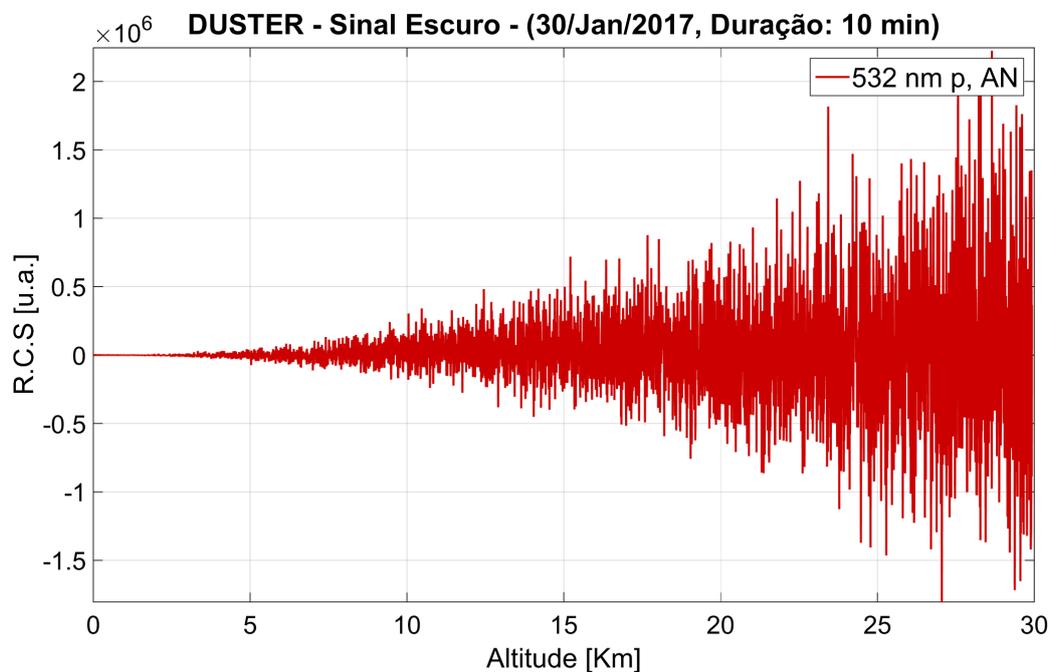
**Figura 4.5** – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico da *MOLOTOV I*.



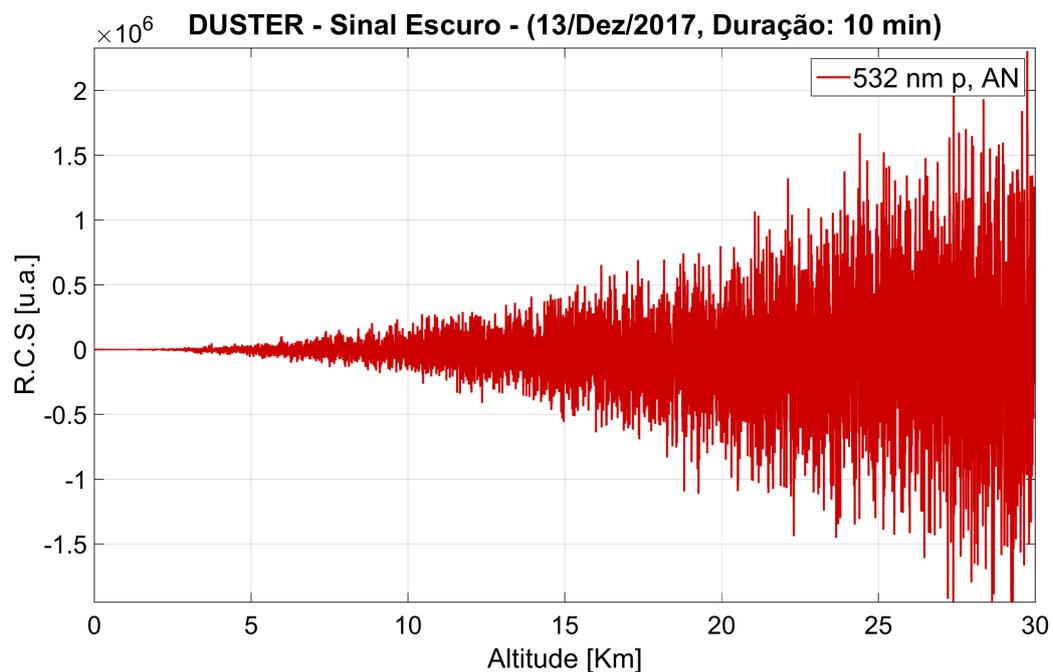
**Figura 4.6** – Média do sinal escuro do canal 532 nm s, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



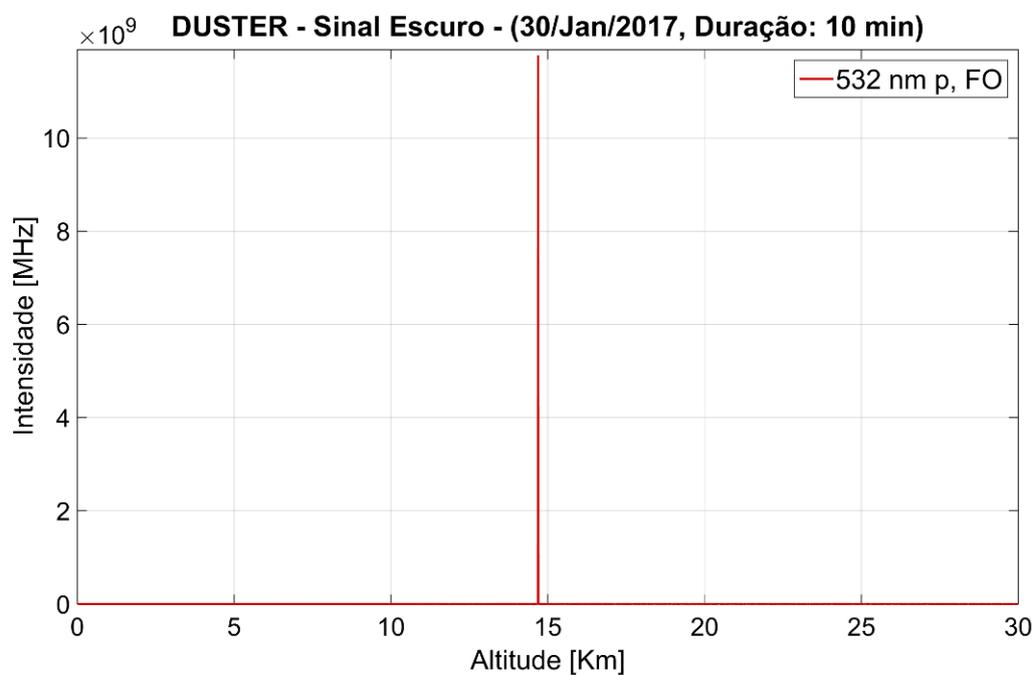
**Figura 4.7** – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. Ruído característico da *MOLOTOV I*.



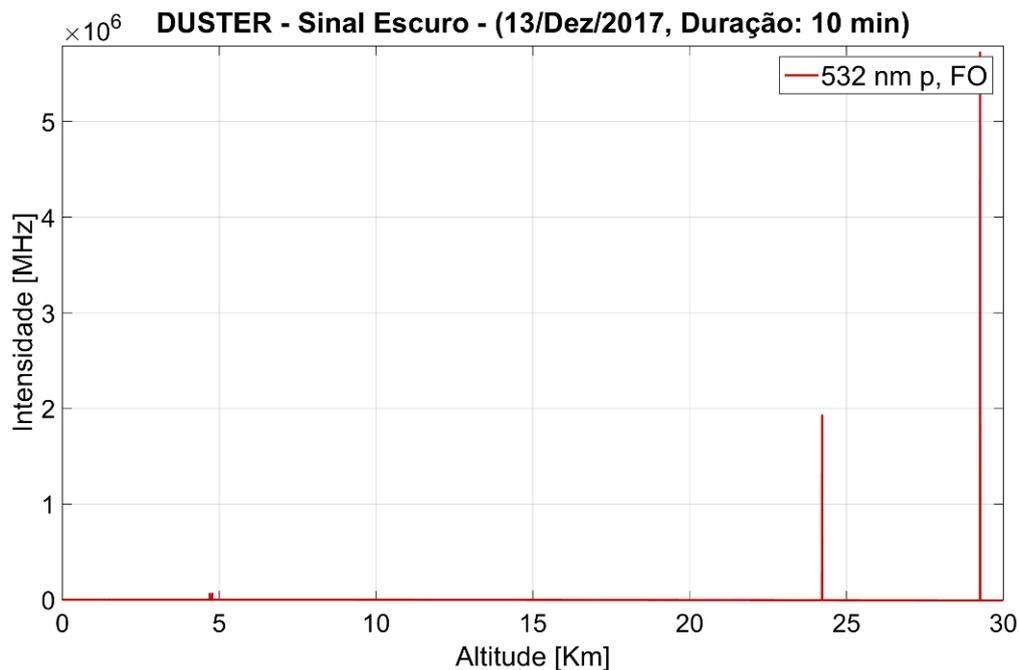
**Figura 4.8** – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



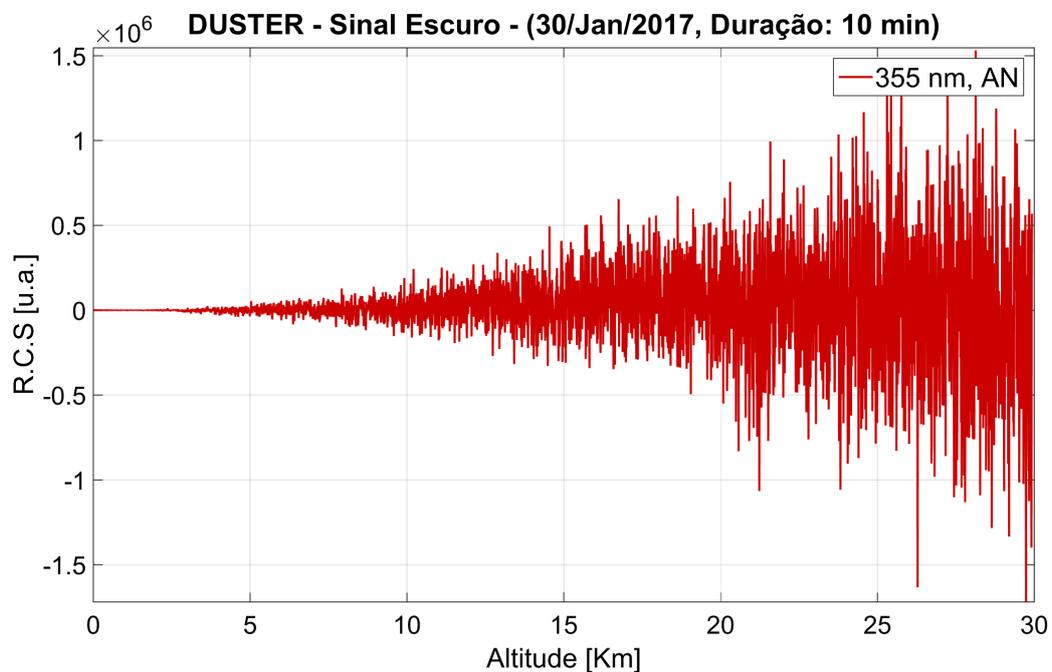
**Figura 4.9** – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico da *MOLOTOV I*.



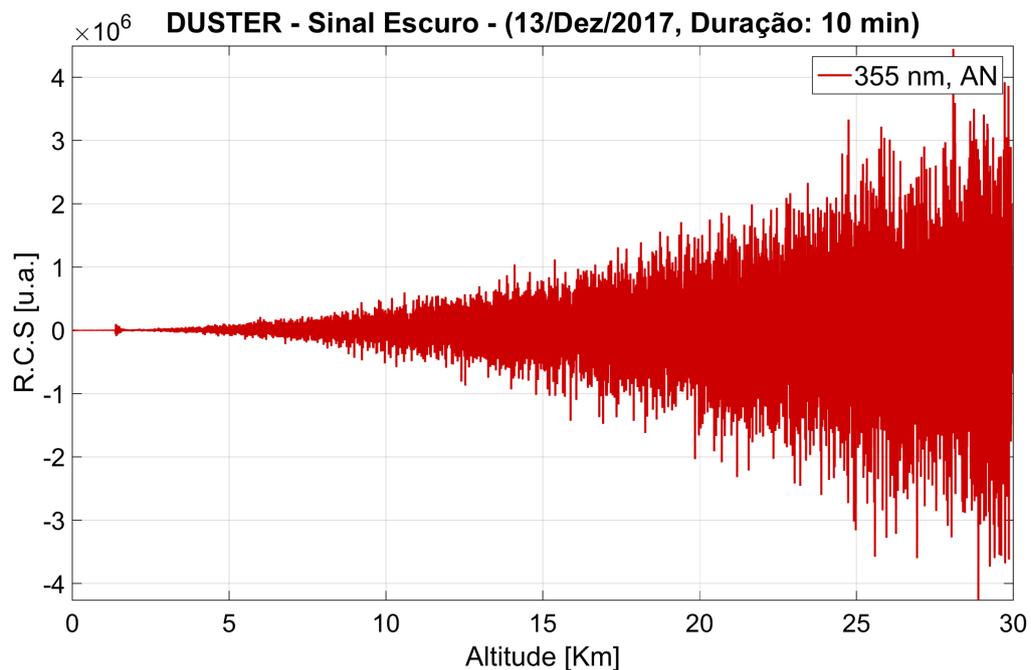
**Figura 4.10** – Média do sinal escuro do canal 532 nm p, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



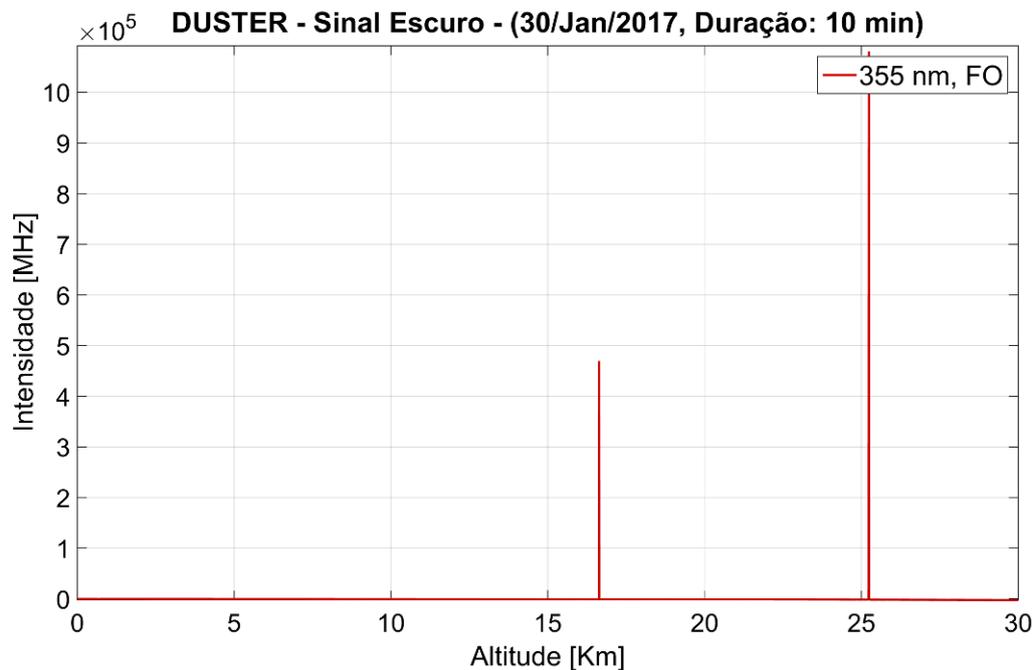
**Figura 4.11** – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção analógico. Ruído característico da *MOLOTOV I*.



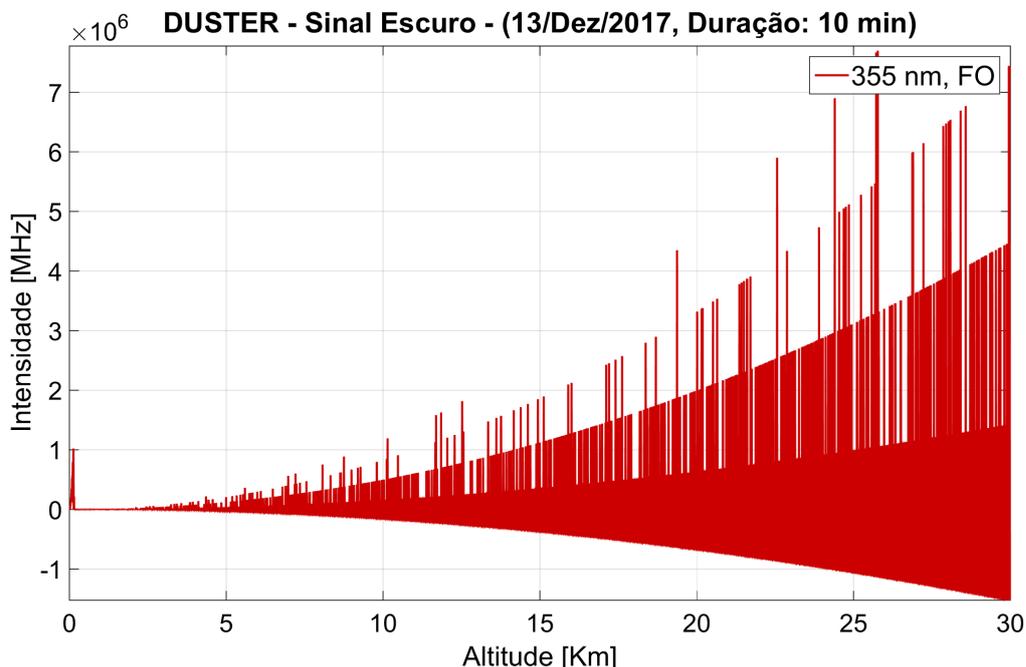
**Figura 4.12** – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção analógico. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



**Figura 4.13** – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico da *MOLOTOV I*.



**Figura 4.14** – Média do sinal escuro do canal 355 nm, modo de detecção fotocontagem. Ruído característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



Nas campanhas operacionais *APEL* e *MOLOTOV II*, foi utilizado um gravador transite *LICEL TR40-80*, e na campanha *MOLOTOV I*, o *LICEL TR20-160*. Isso explica a diferença entre os perfis dos sinais escuros obtidos. O canal 1064 nm foi o mais ruidoso nas duas campanhas. Os canais 1064 nm e 355 nm foram mais ruidosos na configuração *APEL/MOLOTOV II* em relação a configuração *MOLOTOV I*. A remoção dos sinais escuros dos sinais brutos é indispensável, pois caso contrário, o resultado final de qualquer processamento do dado irá conter picos e distorções que não representam a distribuição dos aerossóis na atmosfera. Estes foram resultados que servem como referência das distorções características do *LIDAR DUSTER* nas últimas campanhas.

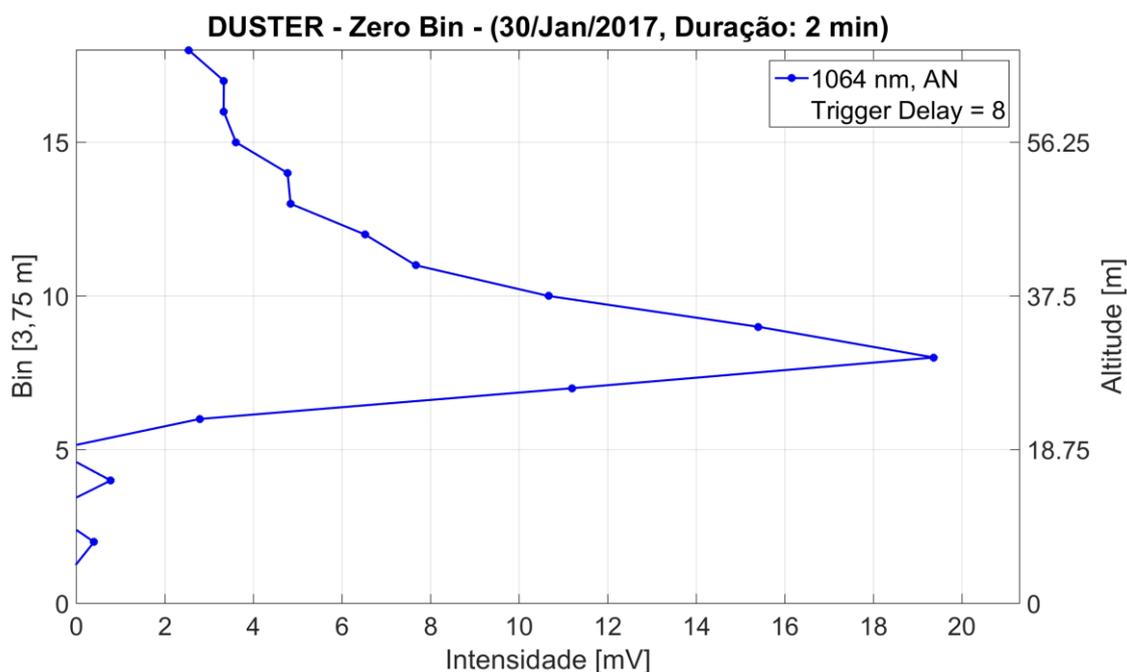
#### 4.2 Zero Bin

Os testes de *Zero Bin* quantificaram os valores de *trigger delay* dos canais analógicos, ou seja, o atraso entre a detecção da luz e o registro da informação pelo gravador transiente. Durante os testes, o laser foi retroespalhado pelo teto do contêiner, o qual possui altura inferior a resolução espacial do sistema. Portanto, em um sistema perfeito, sem nenhum atraso, o sinal detectado teria um pico localizado

na altitude zero. Os resultados com picos acima das altitudes zero indicam a quantidade de atraso e foram obtidos pelo *DQA/Telecover*

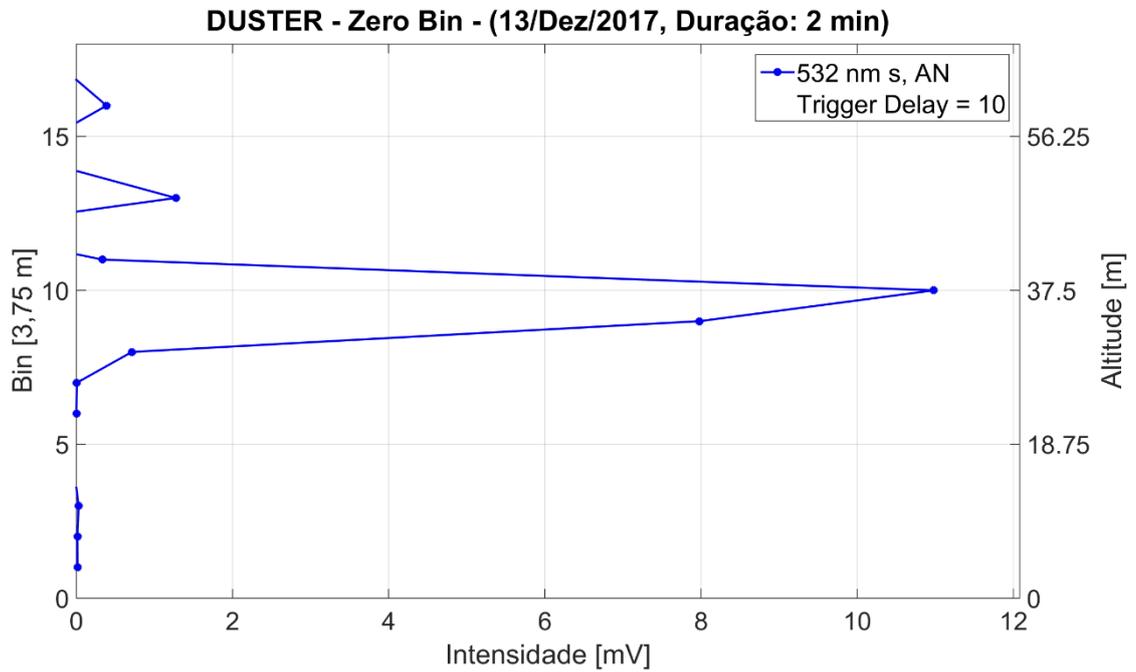
Na Figura 4.15 a saturação do sinal indica que o *trigger delay* é igual a 8 *bins*, portanto os primeiros 8 *bins* devem ser descartados antes de qualquer tipo de processamento de dados deste canal. Se essa correção não for feita, todo o perfil detectado estaria acima de sua posição real. O erro associado seria de 8 *bins* (*trigger delay*) x 7,5 m (resolução espacial) = 60 m. Este mesmo raciocínio para cálculo do erro associado ao *trigger delay* pode ser aplicado aos demais canais, observando sempre a respectiva resolução espacial. Os resultados dos testes de *Zero Bin* estão dispostos nas Figuras 4.15 a 4.22 e no final desta seção a Tabela 4.1 resume os valores de *trigger delay* dos canais utilizados durante as campanhas *MOLOTOV I*, *APEL* e *MOLOTOV II*.

**Figura 4.15** – Teste *Zero Bin* do canal 1064 nm, modo de detecção analógico. *Trigger delay* característico da campanha *MOLOTOV I*.

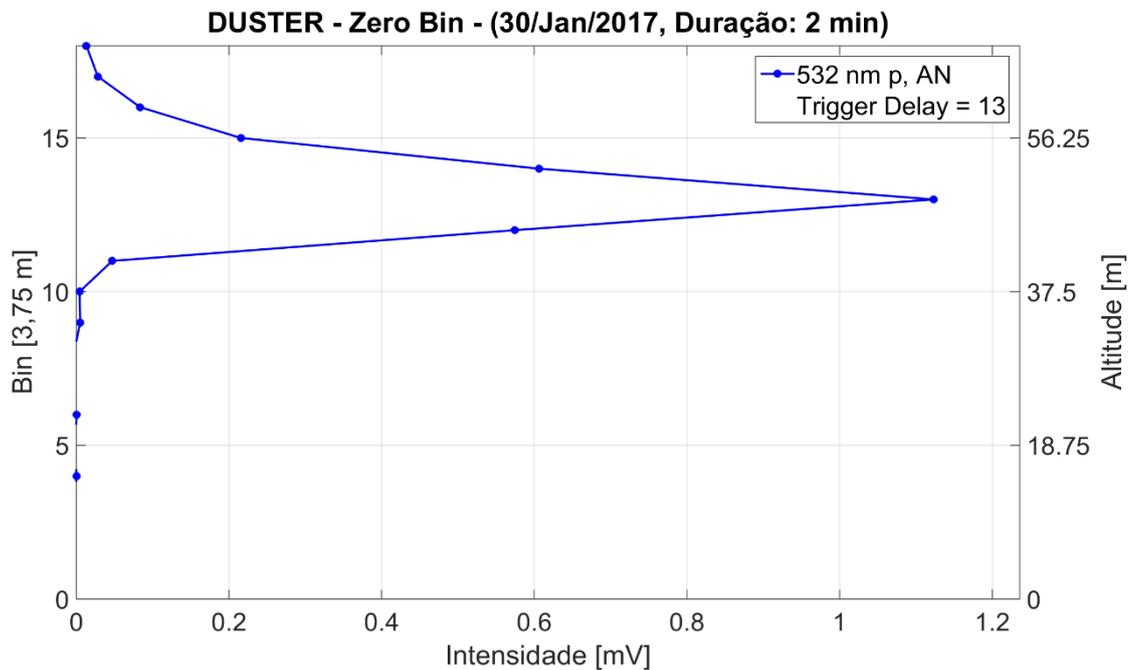




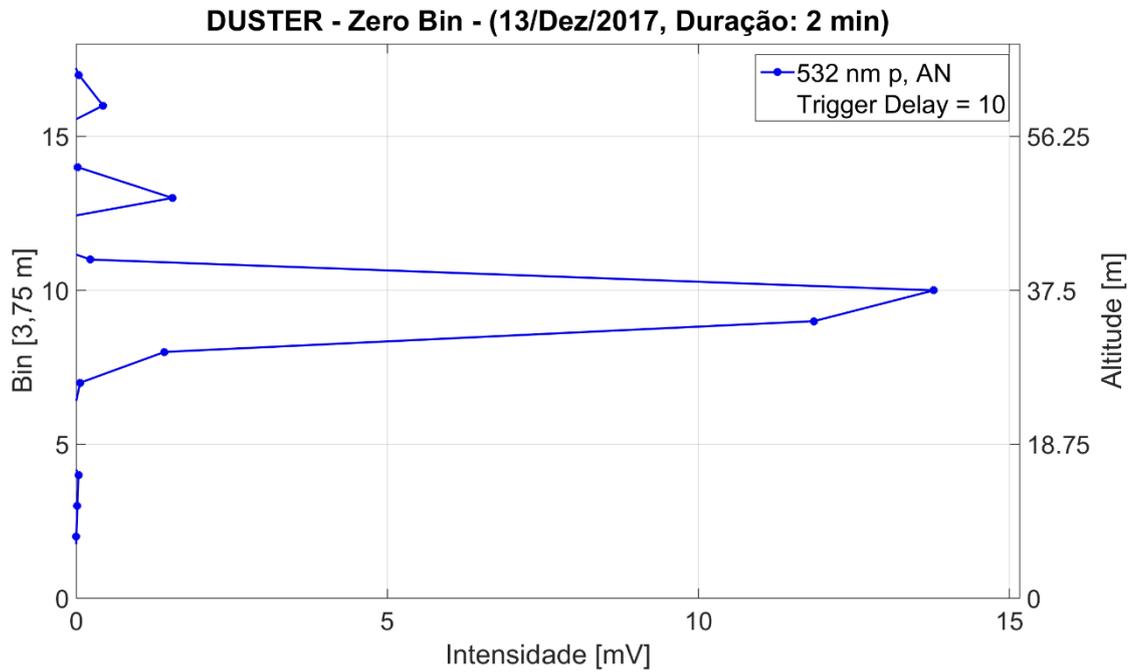
**Figura 4.18** – Teste *Zero Bin* do canal 532 nm s, modo de detecção analógico. *Trigger delay* característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



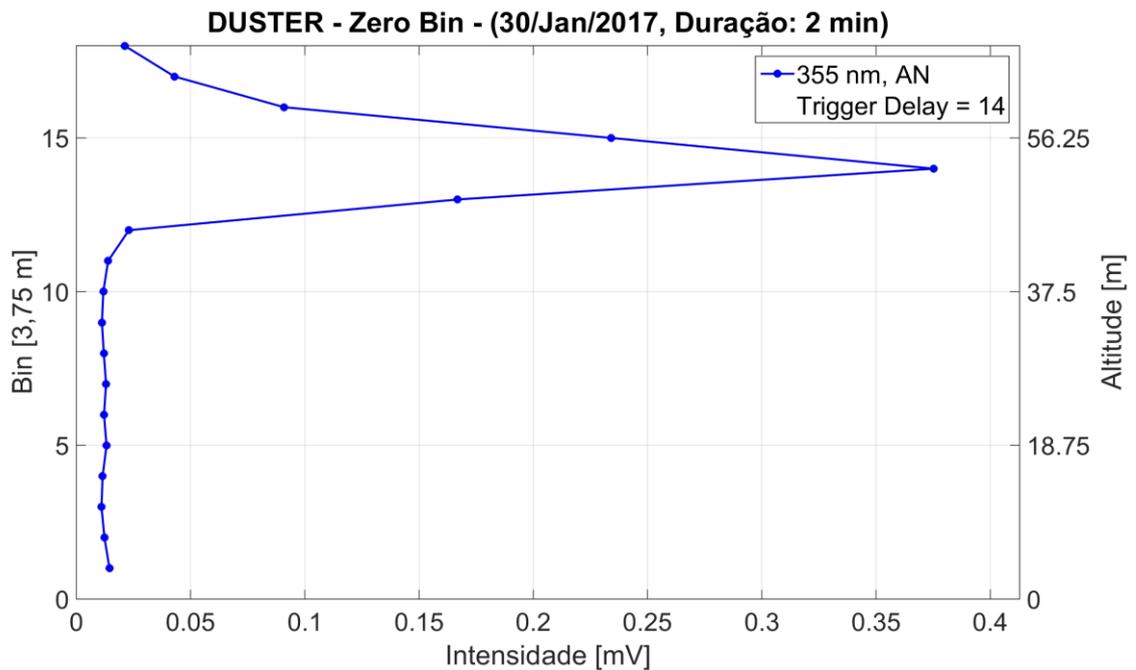
**Figura 4.19** – Teste *Zero Bin* do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. *Trigger delay* característico da campanha *MOLOTOV I*.



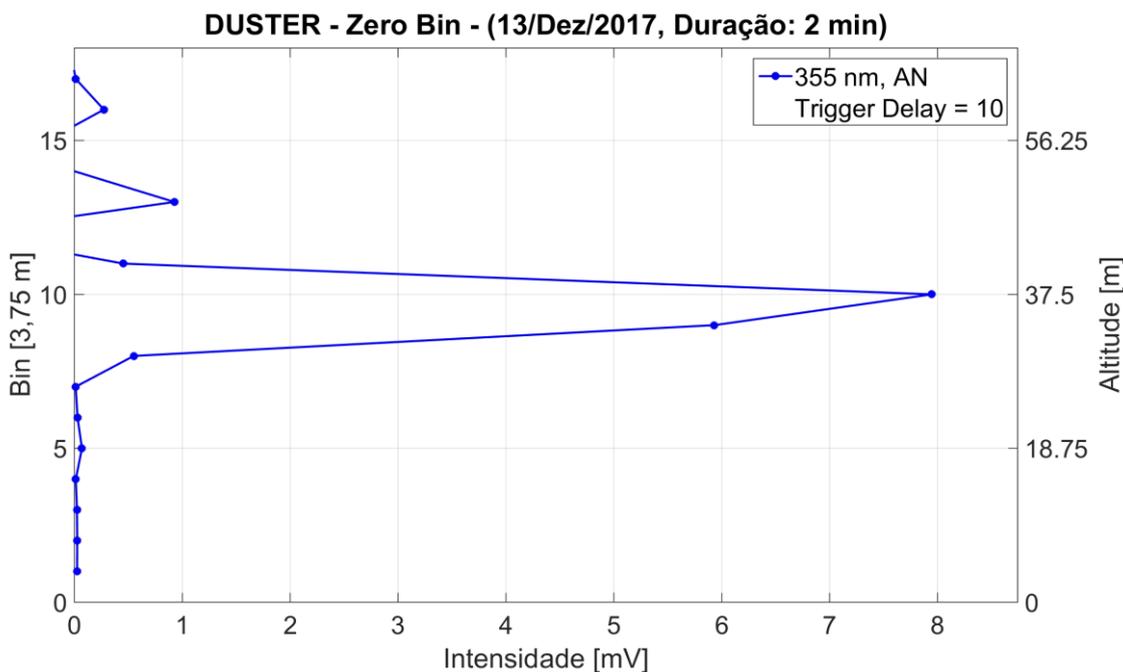
**Figura 4.20** – Teste *Zero Bin* do canal 532 nm p, modo de detecção analógico. *Trigger delay* característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



**Figura 4.21** – Teste *Zero Bin* do canal 355 nm, modo de detecção analógico. *Trigger delay* característico da campanha *MOLOTOV I*.



**Figura 4.22** – Teste *Zero Bin* do canal 355 nm, modo de detecção analógico. *Trigger delay* característico das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



**Tabela 4.1** – Valores de *trigger delay* para os canais analógicos utilizados nas campanhas operacionais *MOLOTOV I* e *APEL/MOTOV II*.

<b>Comprimento de onda</b>	<b>MOLOTOV I</b>	<b>APEL/MOLOTOV II</b>
1064 nm	8	11
532 nm s	12	10
532 nm p	13	10
355 nm	14	10

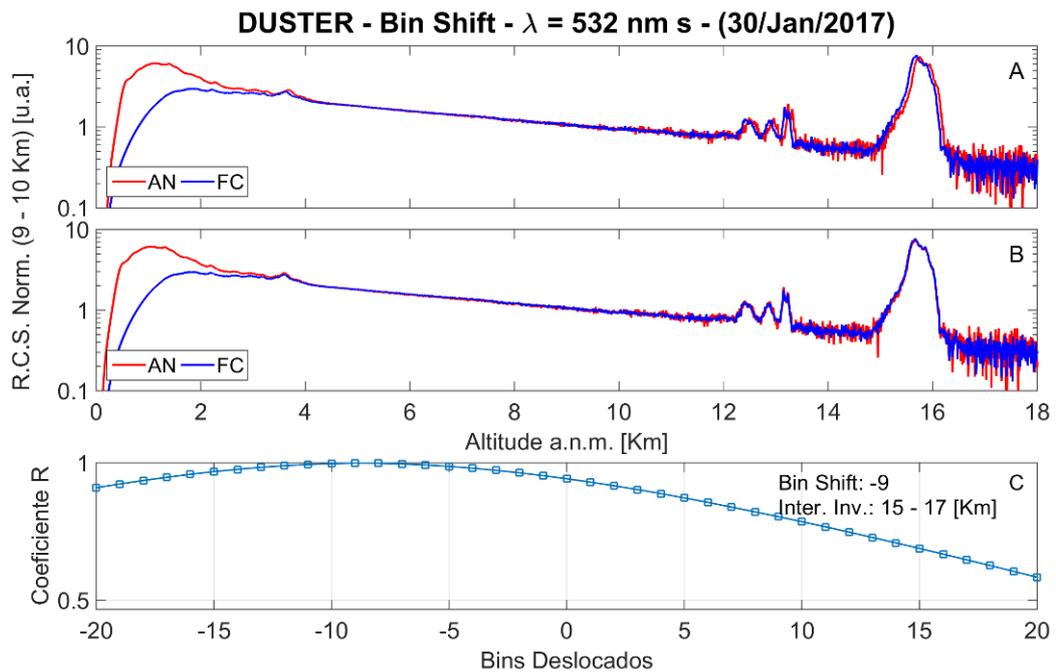
### 4.3 *Bin-Shift*

Os testes de *Bin-Shift* mostram as defasagens entre os sinais obtidos pelos modos de detecção analógico e o fotocontagem dos canais 532 nm p, 532 nm s e 355 nm. Não houve detecção em fotocontagem do canal 1064 nm em nenhuma das campanhas. Os processamentos destes testes foram realizados pelo *DQA/Bin-Shift*. As Figuras 4.23 ao 4.28 mostram os resultados dos testes e estão divididas em três partes:

- A. Sinal analógico e sinal de fotocontagem sem correção de *Zero Bin*.
- B. Sinal analógico e sinal de fotocontagem com correção de *Zero Bin* (correção do *trigger delay* e *bin-shift*).

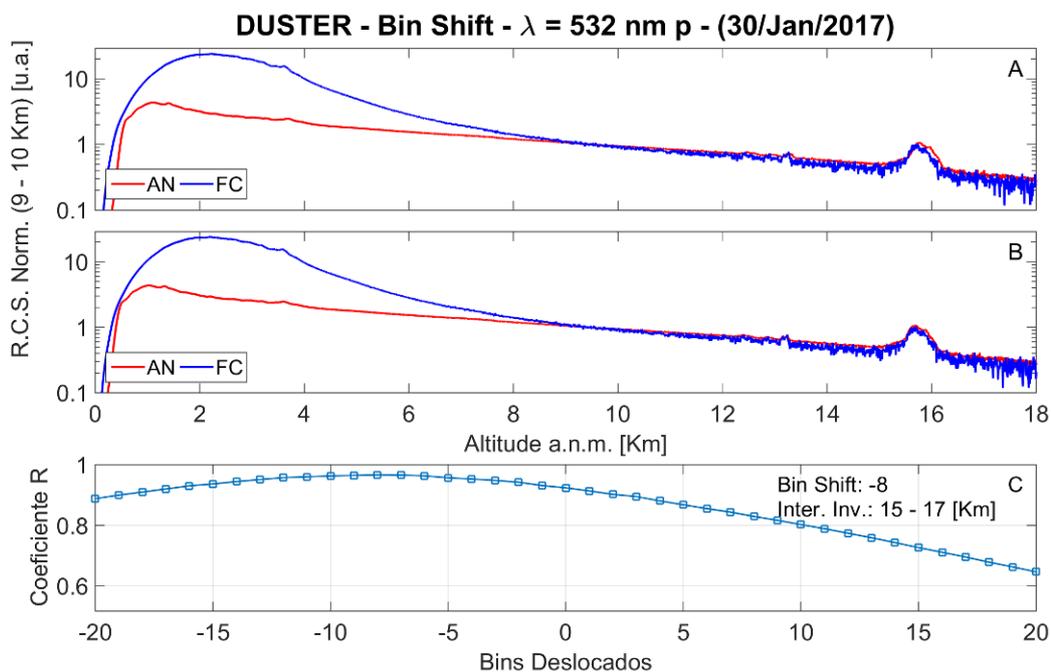
C. Coeficientes de correlação de Pearson (R) calculados para o deslocamento dos *bins*, expressando o valor *bin-shift* da melhor correlação e o intervalo investigado.

**Figura 4.23** – Perfis do canal 532 nm s nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a *MOLOTOV I*. **A** – Antes da correção de *trigger delay*. **B** – Após correção de *trigger delay*. **C** – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 *bins* do perfil modo FC. **Inter. Inv.** - Intervalo investigado.

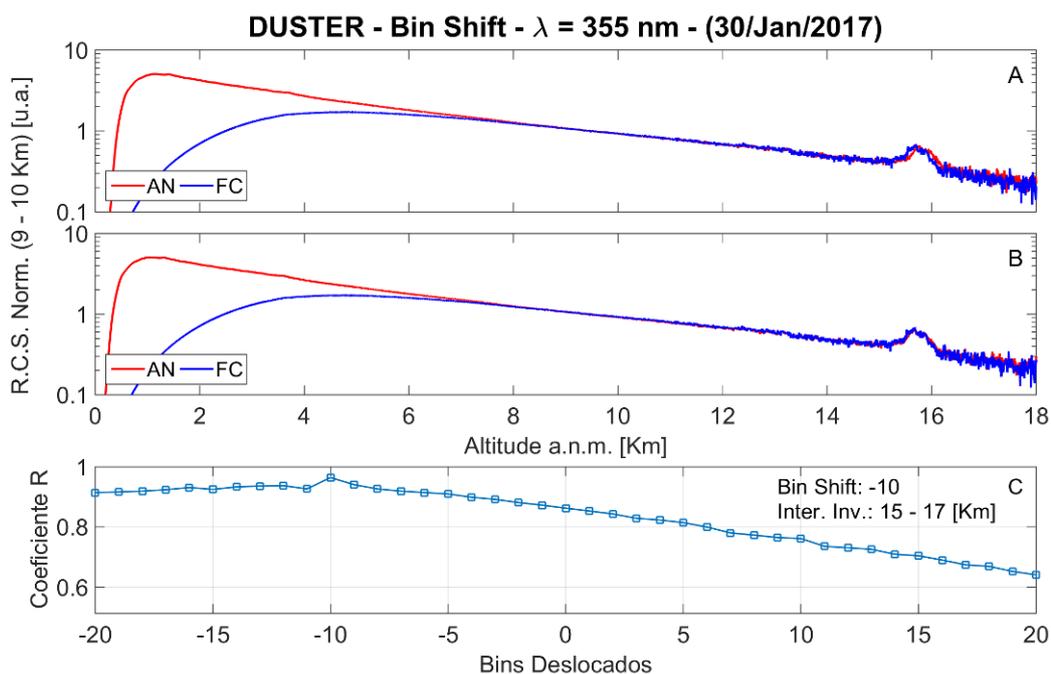


Na |Figura 4.23 (A) é notável a defasagem entre os perfis do canal 532 nm s. O intervalo escolhido para investigação foi entre 15 e 17 km, região na qual é mais perceptível a diferença. Após calcular os coeficientes de correlação de Pearson para todo o intervalo de *bins* deslocados, o maior valor de R ocorreu para o *bin-shift* igual a -9. O *Zero Bin* do modo fotocontagem é calculado somando o valor de *bin-shift* ao atraso do canal analógico. Como visto anteriormente, o *trigger delay* no modo analógico deste canal é igual a 12 *bins*. Portanto, o *Zero Bin* do canal 532 nm s fotocontagem é  $12 - 9 = 3 \text{ bins}$ . O mesmo raciocínio foi aplicado aos demais canais e os resultados estão nas Tabelas 4.2 e 4.3 no final desta seção.

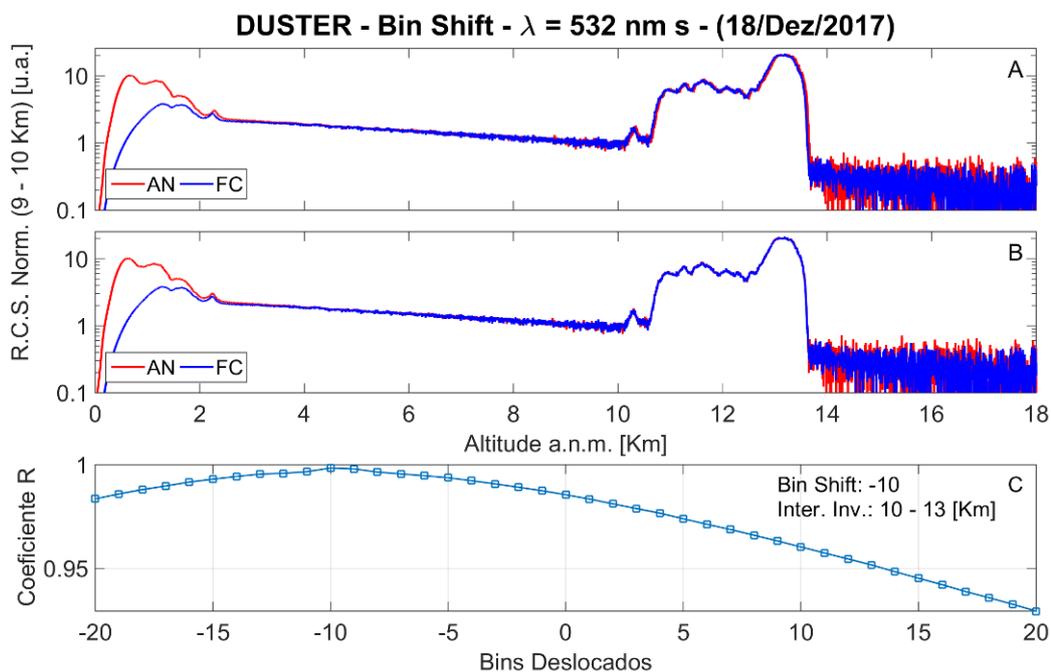
**Figura 4.24** – Perfis do canal 532 nm p nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a *MOLOTOV I*. **A** – Antes da correção de *Zero Bin*. **B** – Após correção de *Zero Bin*. **C** – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 *bins* do perfil modo FC. **Inter. Inv.** - Intervalo investigado.



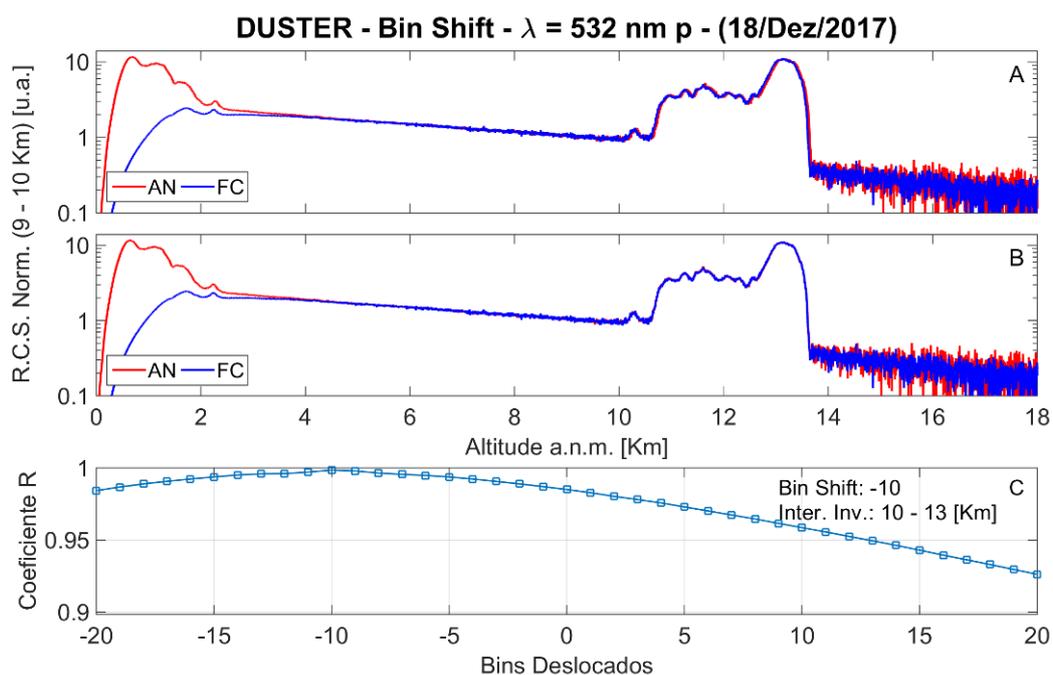
**Figura 4.25** – Perfis do canal 355 nm nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a *MOLOTOV I*. **A** – Antes da correção de *Zero Bin*. **B** – Após correção de *Zero Bin*. **C** – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 *bins* do perfil modo FC. **Inter. Inv.** - Intervalo investigado.



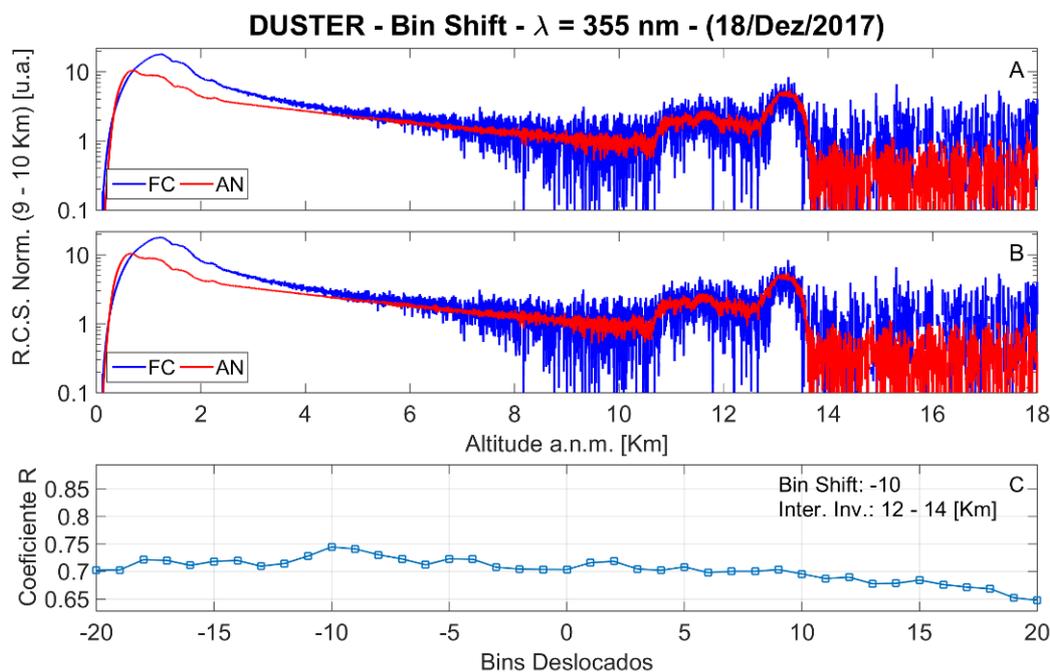
**Figura 4.26** – Perfis do canal 532 nm s nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a *APEL* e a *MOLOTOV II*. **A** – Antes da correção de *Zero Bin*. **B** – Após correção de *Zero Bin*. **C** – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 bins do perfil modo FC. **Inter. Inv.** - Intervalo investigado.



**Figura 4.27**– Perfis do canal 532 nm p nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a *APEL* e a *MOLOTOV II*. **A** – Antes da correção de *Zero Bin*. **B** – Após correção de *Zero Bin*. **C** – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 bins do perfil modo FC. **Inter. Inv.** - Intervalo investigado.



**Figura 4.28** – Perfis do canal 355 nm nos modos analógico (AN) e fotocontagem (FC) durante a *APEL* e a *MOLOTOV II*. **A** – Antes da correção de *Zero Bin*. **B** – Após correção de *Zero Bin*. **C** – Coeficiente de correlação de Pearson para os deslocamentos de -20 a +20 bins do perfil modo FC. **Inter. Inv.** - Intervalo investigado.



**Tabela 4.2** – Valores de *trigger delay*, *bin-shift* e *Zero Bin* para os canais utilizados durante a campanha *MOLOTOV I*. **AN**: analógico. **FO**: fotocontagem.

Comprimento de onda	<i>Trigger Delay</i> (AN)	<i>Bin-shift</i> (FO)	<i>Zero Bin</i> (FO)
1064 nm	8	0	-
532 nm s	12	-9	3
532 nm p	13	-8	5
355 nm	14	-10	4

**Tabela 4.3** – Valores de *trigger delay*, *Bin-shift* e *Zero Bin* para os canais utilizados durante as campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*. **AN**: analógico. **FO**: fotocontagem.

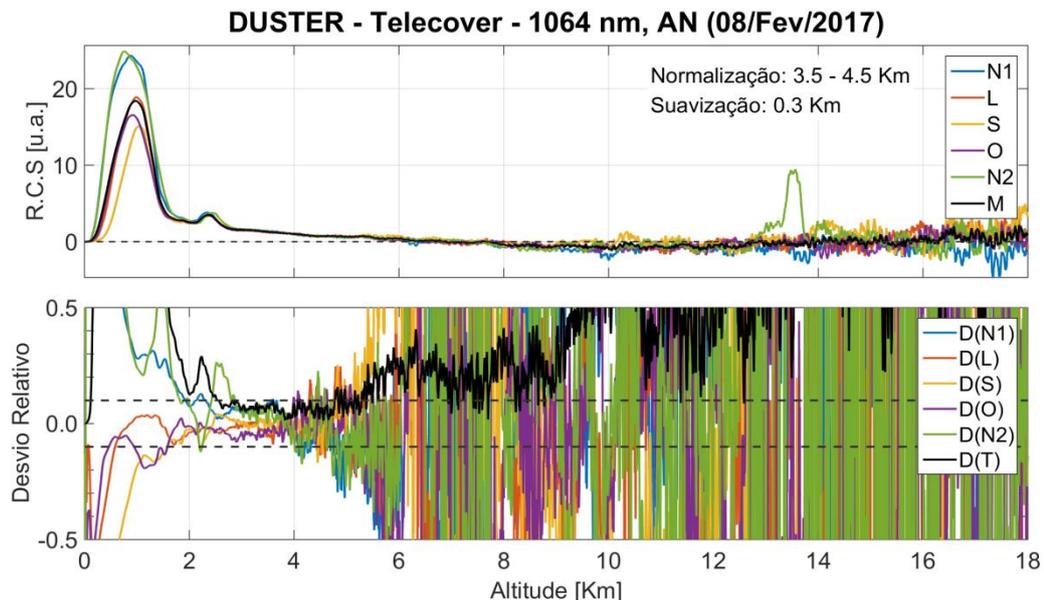
Comprimento de onda	<i>Trigger Delay</i> (AN)	<i>Bin-Shift</i> (FO)	<i>Zero Bin</i> (FO)
1064 nm	11	0	-
532 nm s	10	-10	0
532 nm p	10	-10	0
355 nm	10	-10	0

#### 4.4 Telecover

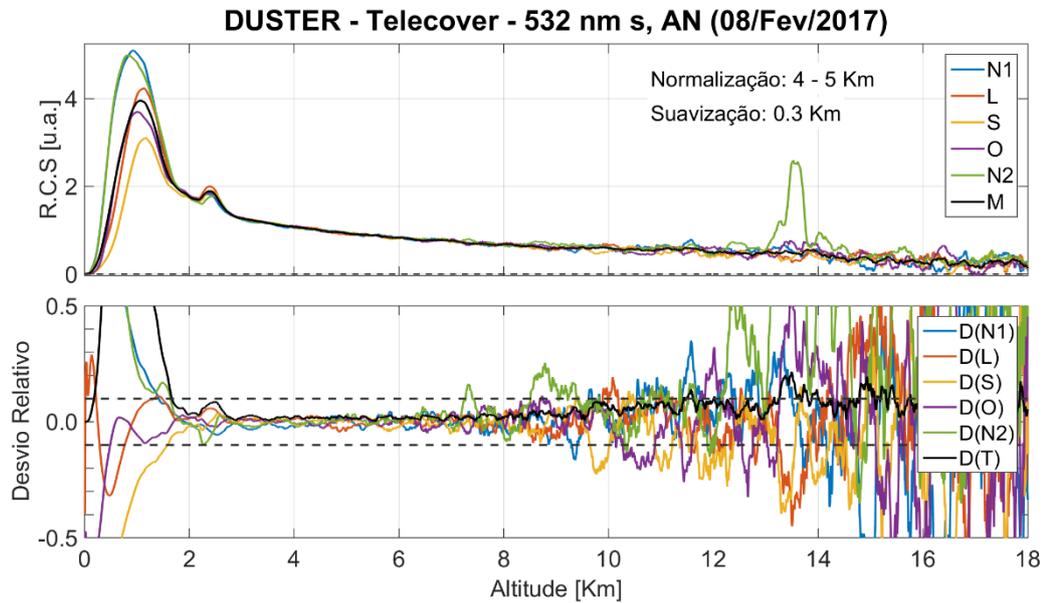
Os resultados dos testes *Telecover* mostraram o alinhamento do sistema para cada quadrante do telescópio em cada canal. Os resultados foram obtidos pelo *DQA/Telecover*. Antes das aquisições eram feitos pequenos ajustes no espelho na busca pelo padrão Norte > Leste = Oeste > Sul. Todos os perfis passaram pelo pré-processamento com correção do *Zero Bin*, remoção do sinal escuro, remoção do *background*, assim como foram normalizados e suavizados para redução distorções devido a geometria do sistema e variações da atmosfera.

As Figuras 4.29 a 4.35 contêm os resultados de um *Telecover* realizado durante a campanha *MOTOLOV I* e as Figuras 4.36 a 4.42, os resultados para a configuração das campanhas *APEL* e *MOTOLOV II*. As Figuras estão divididas em duas partes: na parte superior estão os perfis de cada quadrante e a média dos perfis, e na parte inferior estão os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total.

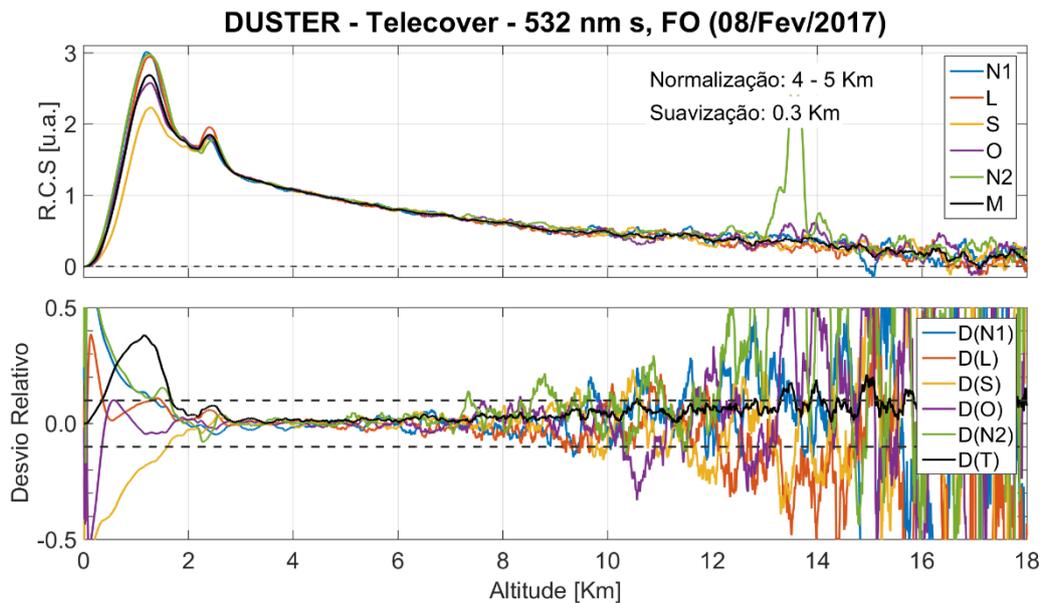
**Figura 4.29** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 1064 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



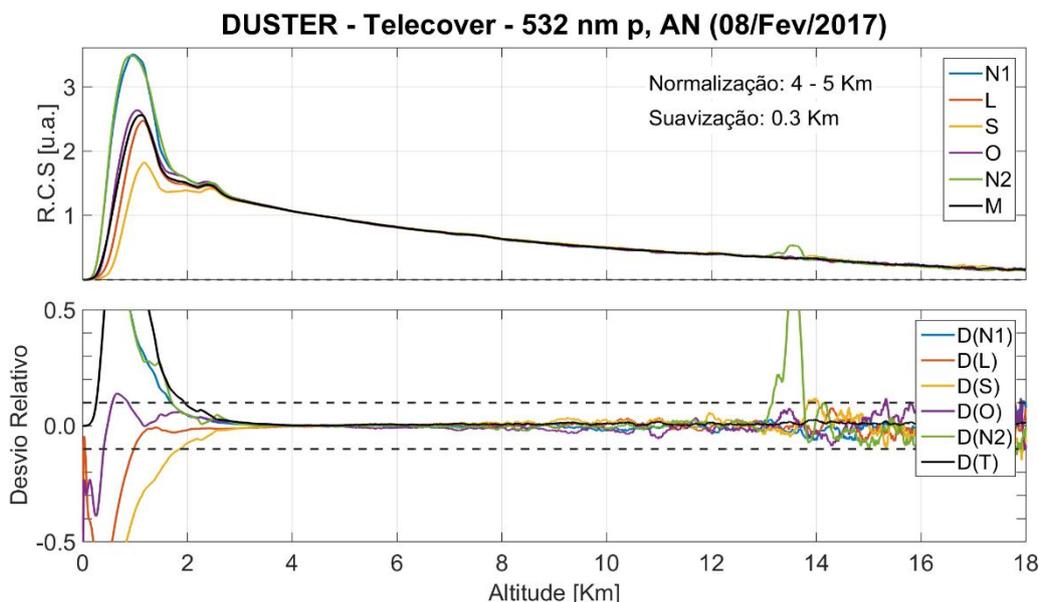
**Figura 4.30** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 532 nm s, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



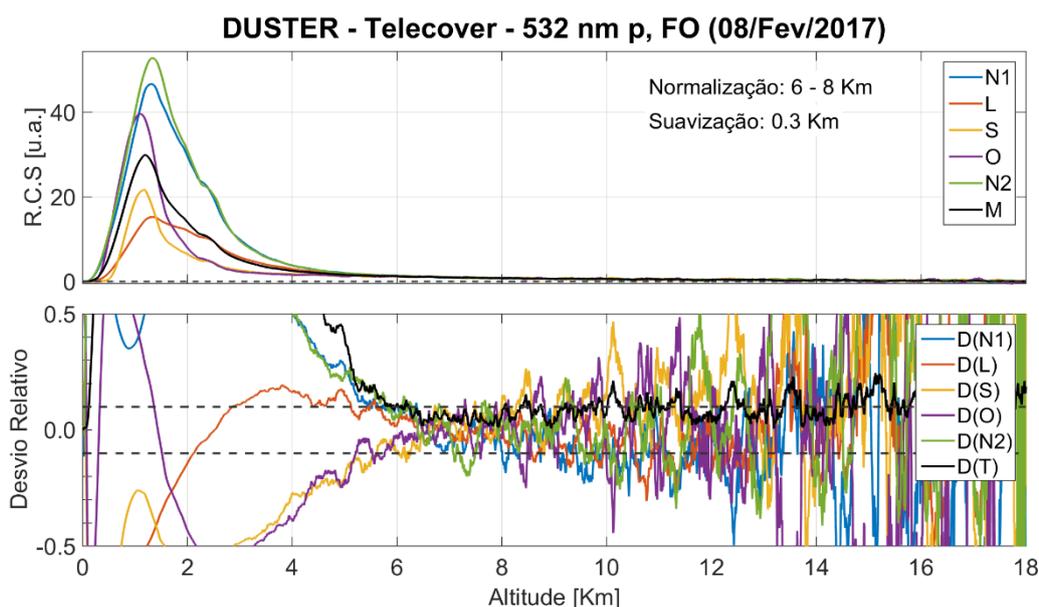
**Figura 4.31** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 532 nm s, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



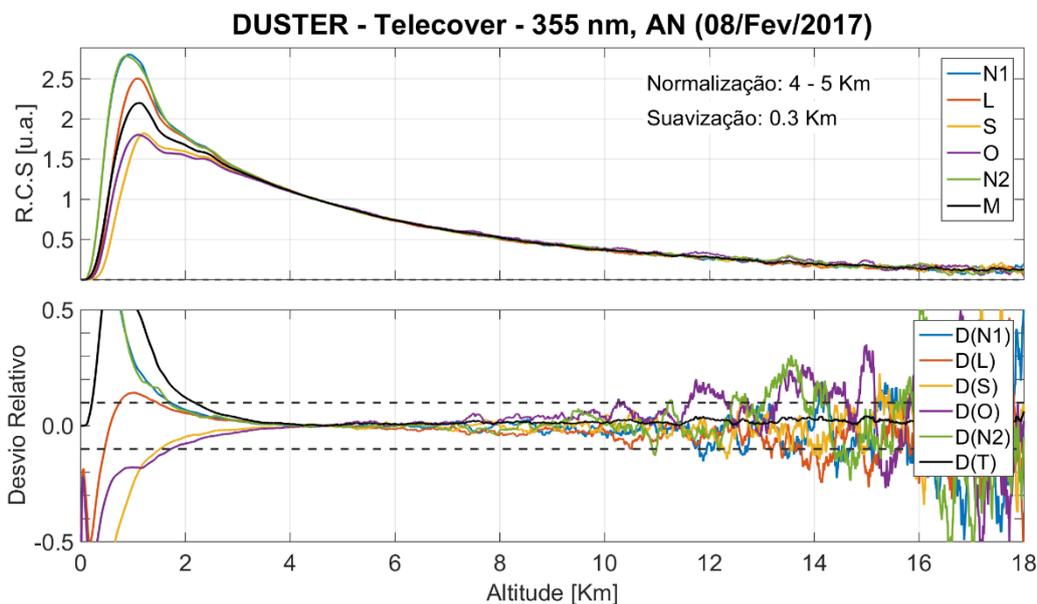
**Figura 4.32** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 532 nm p, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



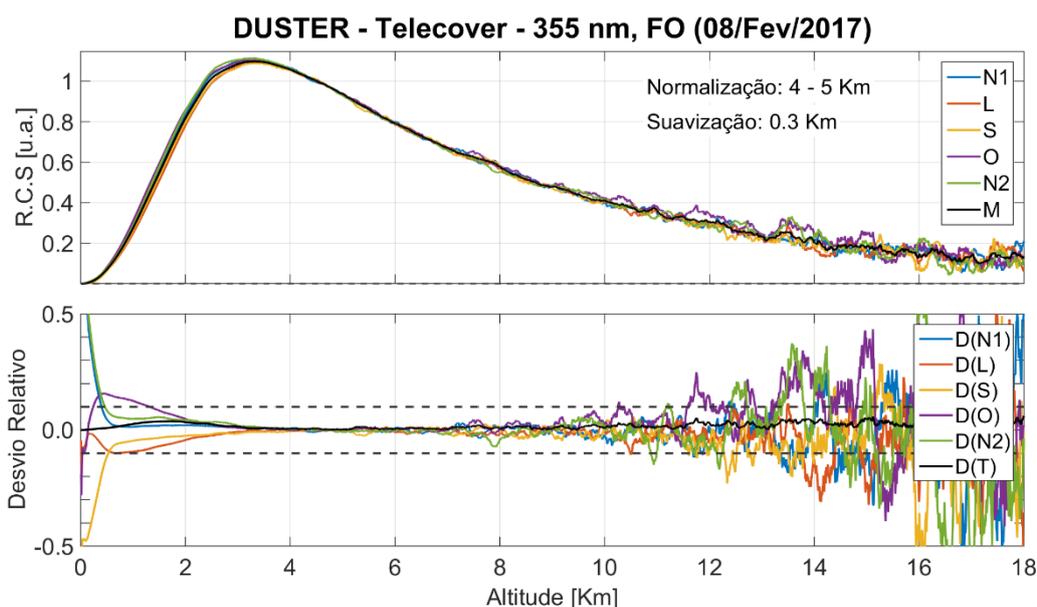
**Figura 4.33** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 532 nm p, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



**Figura 4.34** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 355 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



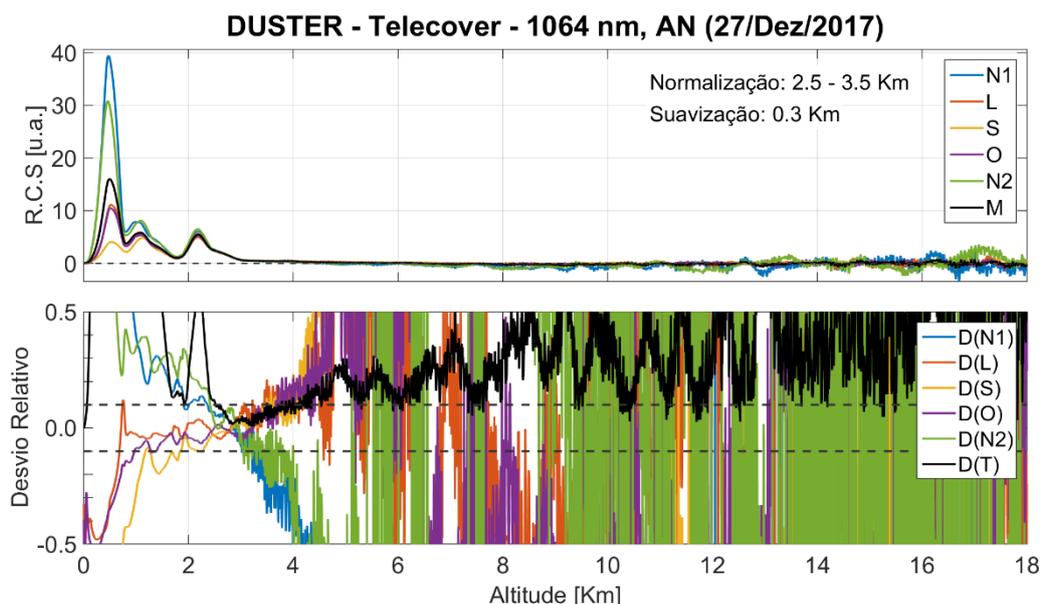
**Figura 4.35** – *Telecover* durante a campanha *MOLOTOV I*, canal 355 nm, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T).



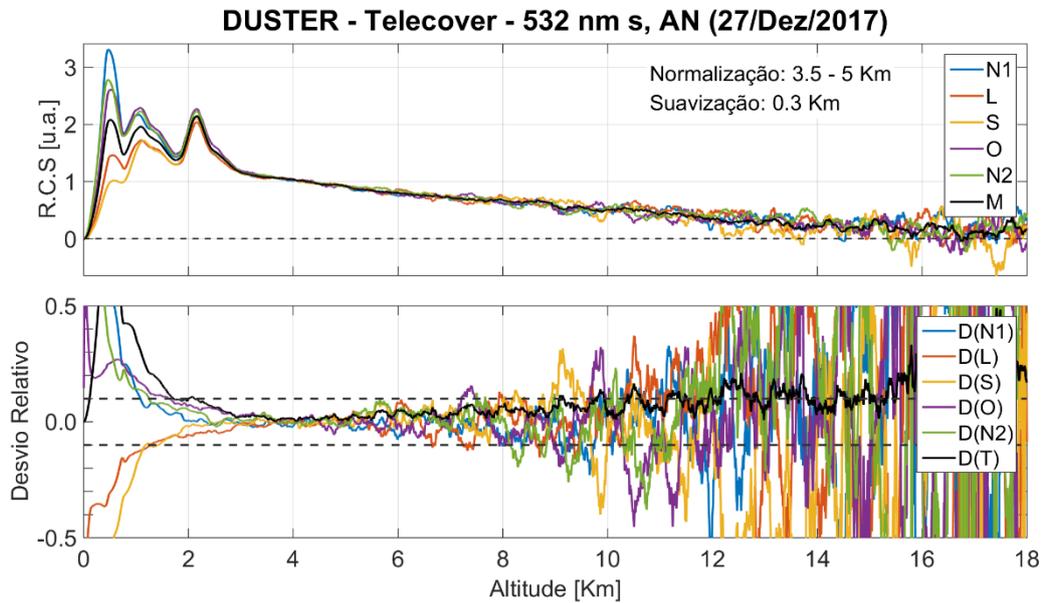
O canal 1064 nm teve bom alinhamento entre 2 e 5 km, mas seu erro relativo total foi alto, principalmente acima dos 5 km. Em maiores altitudes a atmosfera variou um pouco mais que em baixas altitudes. É possível notar isso pelo pico detectado pouco abaixo de 14 km, neste canal. Esse fator pode ter contribuído para aumento do erro relativo em altitudes mais elevadas. O canal 532 nm p, AN estava bem alinhado, mesmo em grandes altitudes, entretanto o 532 nm p, FO apresentou desvios maiores. Isso provavelmente ocorreu pela sensibilidade do canal. Durante a campanha *MOLOTOV I* o canal 532 nm p estava operando com uma tensão de saída acima de 50 mV, e foi possível perceber que muitos perfis ficavam saturados com facilidade, principalmente no canal 532 nm p, FO. Isto foi corrigido nas campanhas seguintes reduzindo a tensão para este canal. Os demais canais apresentaram desvio relativos dentro dos padrões, abaixo de 0.1 e desvios totais próximos a 0.05.

As Figuras 4.36 a 4.42 contêm resultados do *Telecover* com a configuração utilizada durante as campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.

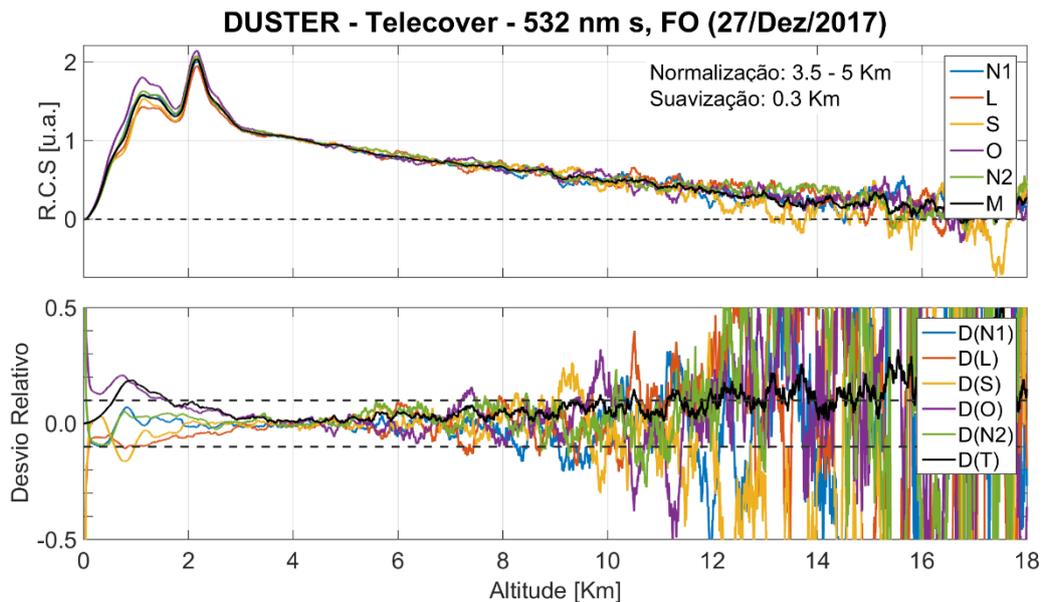
**Figura 4.36** – *Telecover* do canal 1064 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). Configuração das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



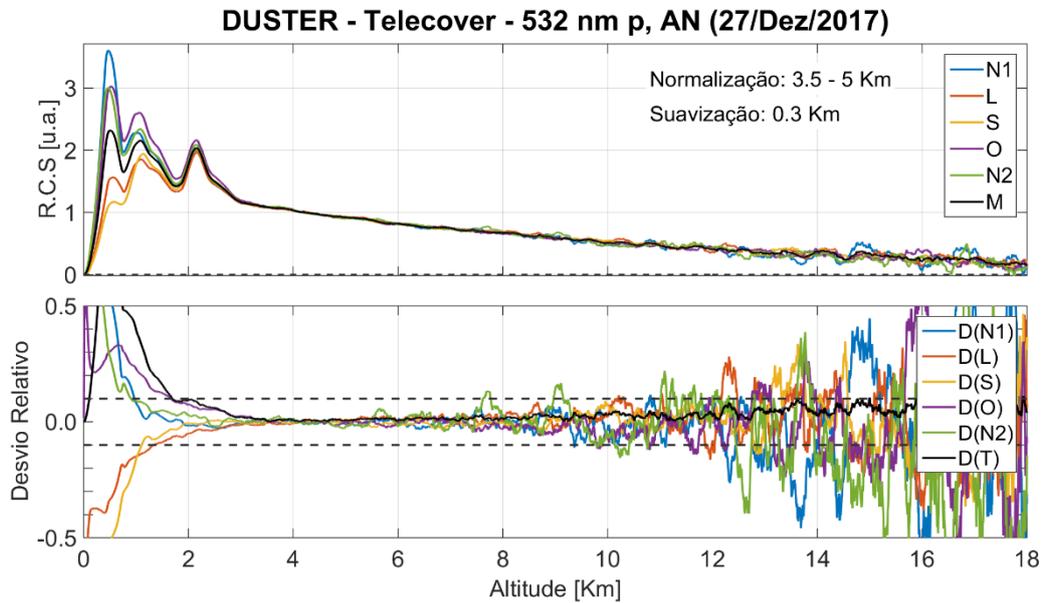
**Figura 4.37** – *Telecover* do canal 532 nm s, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFuração das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



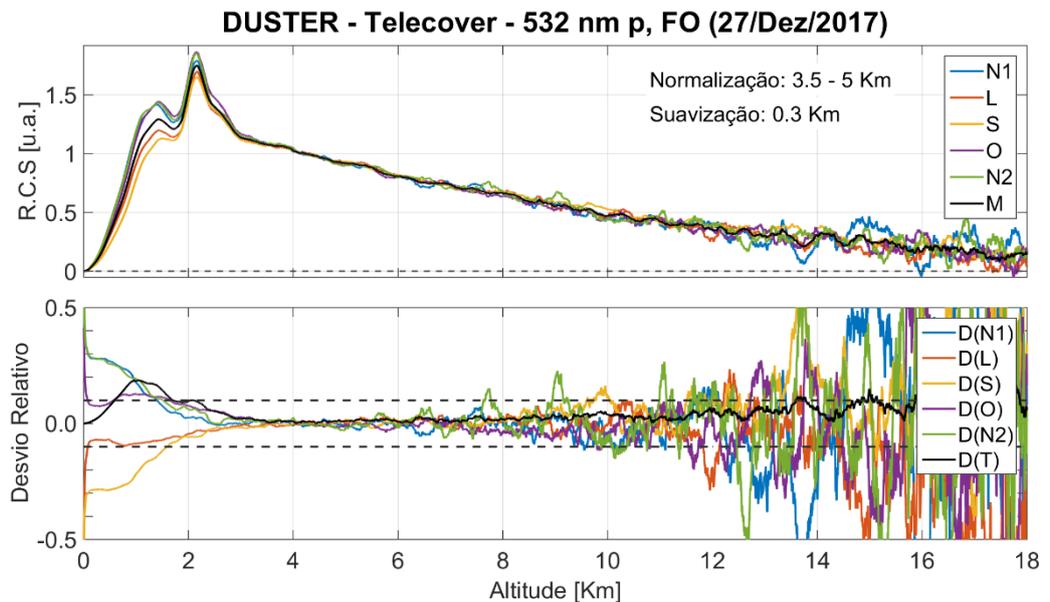
**Figura 4.38** – *Telecover* do canal 532 nm s, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFuração das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



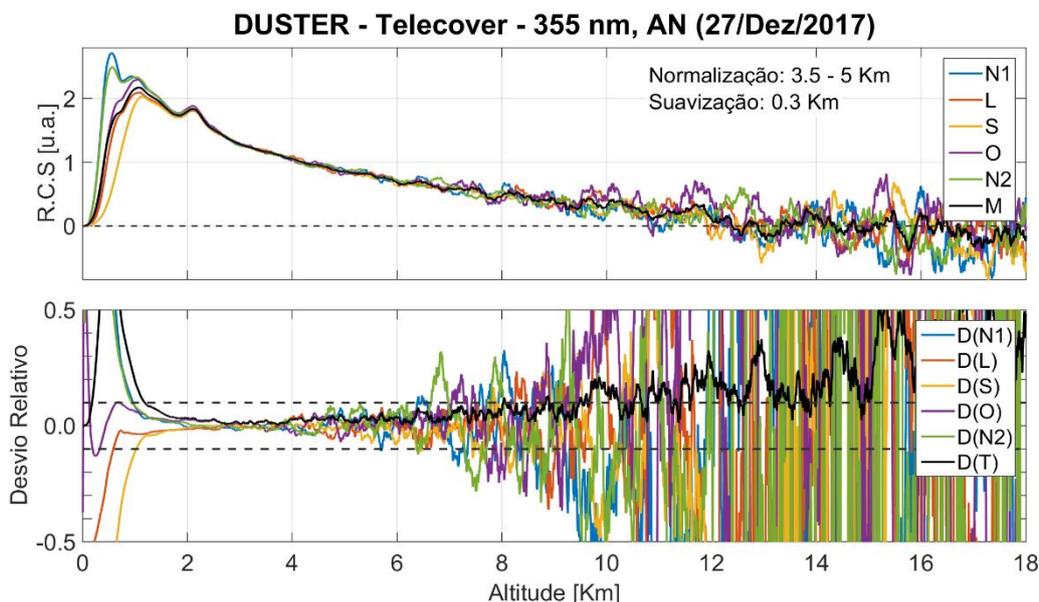
**Figura 4.39** – *Telecover* do canal 532 nm p, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFuração das campanhas APEL e MOLOTOV II.



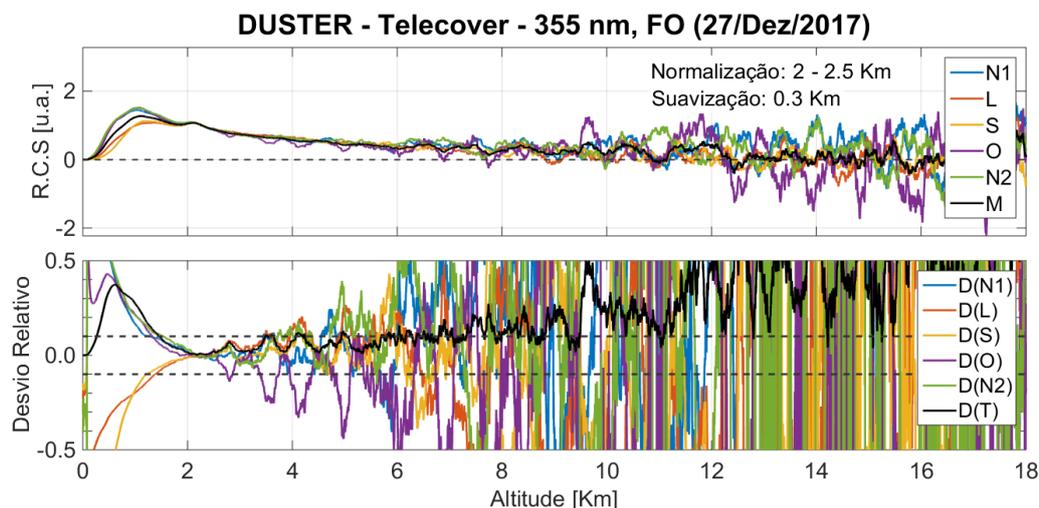
**Figura 4.40** – *Telecover* do canal 532 nm p, fotocontagem. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFuração das campanhas APEL e MOLOTOV II.



**Figura 4.41** – *Telecover* do canal 355 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFuração das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



**Figura 4.42** – *Telecover* do canal 355 nm, analógico. Na parte superior estão os sinais de cada quadrante e o sinal médio M, na parte inferior os desvios relativos ao sinal médio e o desvio relativo total D (T). ConFuração das campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.



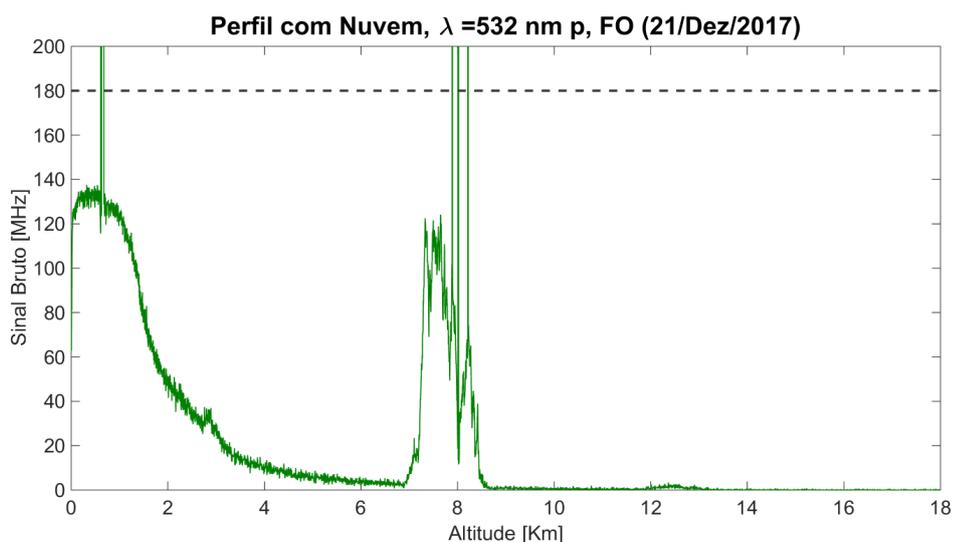
De maneira geral os canais utilizados nas últimas campanhas operacionais se encaixam nos padrões de alinhamento, pois os desvios relativos em curto alcance mantiveram-se oscilando próximo ao limite 0.01. O canal que apresentou maiores distorções e erros relativos foi o de 1064 nm, portanto necessita de aprimoramento e

a realização de um teste noturno para verificar a interferência do ruído de fundo neste canal durante o dia. Os canais 355 nm, analógico e fotocontagem, nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II* (Figuras 4.41 e 4.42) tiveram os maiores desvios em relação à campanha *MOLOTOV I*. Isso deve ter ocorrido porque nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II* optou-se por utilizar tensões mais baixas, para evitar saturação, mantendo um limite máximo de 50 mV. Então os ruídos prevaleceram um pouco mais em relação ao sinal. Por outro lado, o canal 532 nm p, FO, apresentou melhores resultados em relação à campanha *MOLOTOV I*, devido a essa diminuição de tensão.

#### 4.5 *DUSTER Cloud Free*

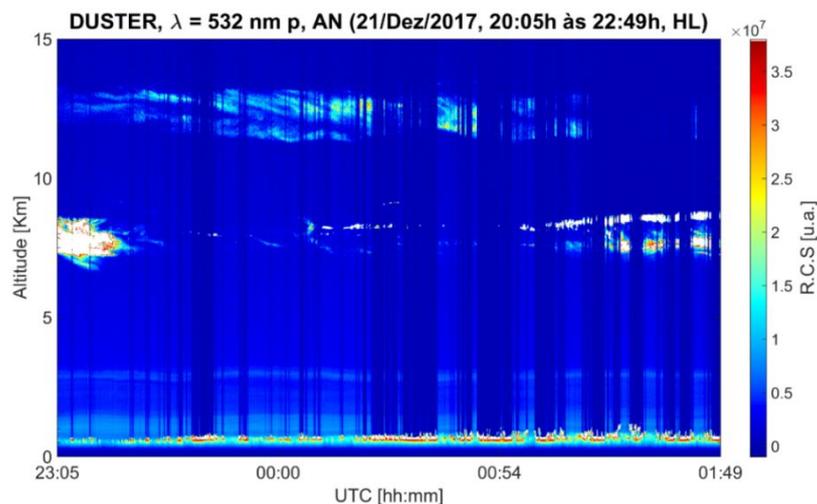
O filtro de nuvens *DUSTER Cloud Free* apresentou bons resultados na remoção automática de nuvens. A Figura 4.43 apresenta um perfil do canal 532 p, fotocontagem, no qual foi detectado uma nuvem. Em aproximadamente 1 km e pouco acima de 8 km de altitude ocorrem saturações que ultrapassam o limite de saturação predefinido como 180 MHz, representado pela linha tracejada. Este é um exemplo de perfil classificado como nublado pelo *DUSTER Cloud Free*.

**Figura 4.43** – Perfil *LIDAR* bruto contendo nuvem, canal 532 nm p, fotocontagem. A linha tracejada representa o limite de saturação do filtro *DUSTER Cloud Free*.

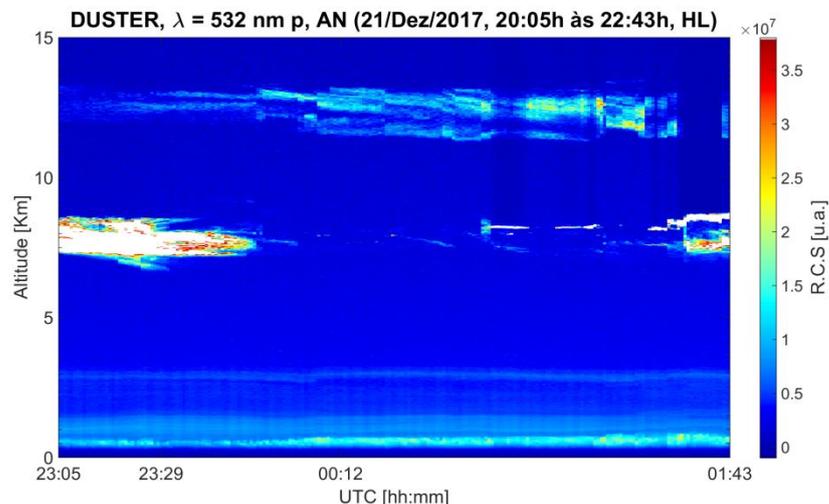


A Figura 4.44 apresenta a aquisição noturna do dia 21/12/2017. Houve uma grande quantidade de nuvens baixas que causaram distorções nos perfis e atenuaram os pulsos de laser emitidos prejudicando o retroespalhamento em altitudes mais elevadas. Após aplicação do filtro *DUSTER Cloud Free* nos dados é possível notar, pela Figura 4.45, que todas as nuvens baixas foram removidas. A remoção manual de nuvens é uma tarefa que demanda muito tempo, principalmente para um banco de dados de uma cidade como Natal onde há constante passagem de nuvens baixas. Este filtro facilita bastante o trabalho por executar esta tarefa de maneira automática.

**Figura 4.44** – Gráfico de cortina da medida noturna do 21/12/2017 contendo todos os dados. HL: Horário Local.



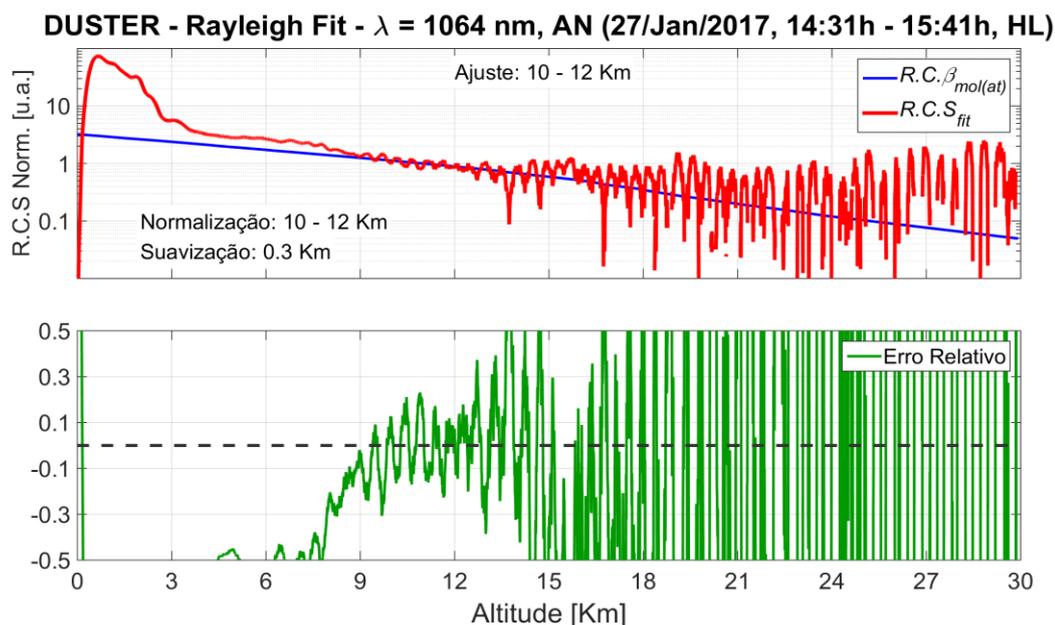
**Figura 4.45** – Gráfico de cortina da medida noturna do dia 21/12/2017 após aplicação do filtro de nuvens *DUSTER Cloud Free*. HL: Horário Local.



## 4.6 Rayleigh Fit

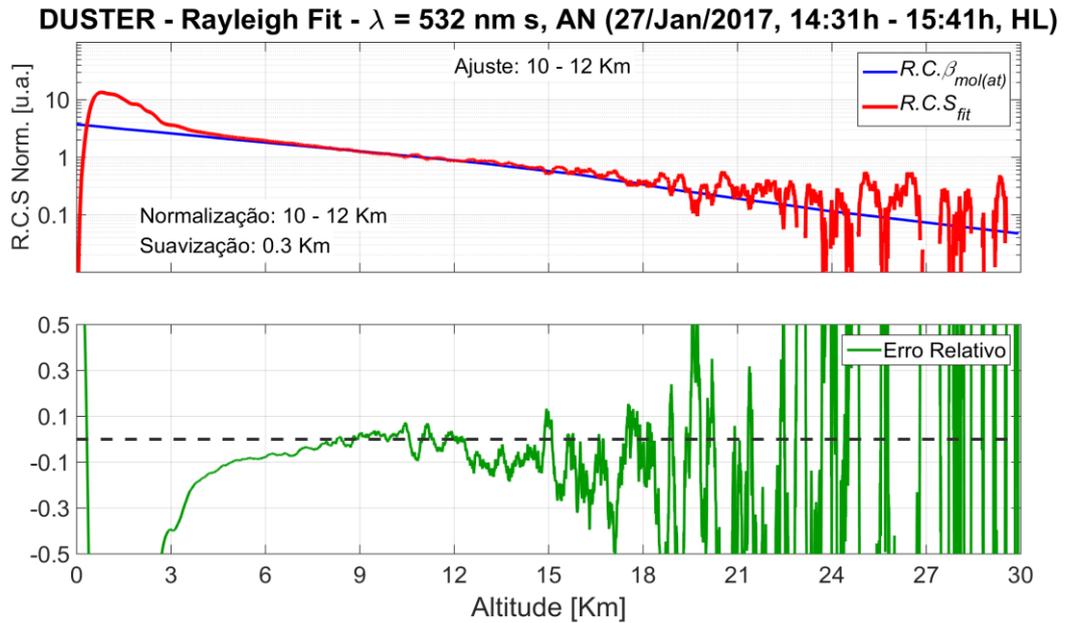
O alinhamento do sistema em grandes altitudes, nas quais se assume uma atmosfera livre de aerossóis, foi verificado pelos testes de *Rayleigh Fit*. As Figuras 4.46 a 4.52 apresentam os resultados do teste realizado durante a campanha *MOLOTOV I*, no dia 27 de janeiro de 2017, das 14:31h às 15:41h (horário local).

**Figura 4.46** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 1064 nm, analógico, e erro relativo na Campanha *MOLOTOV I*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.

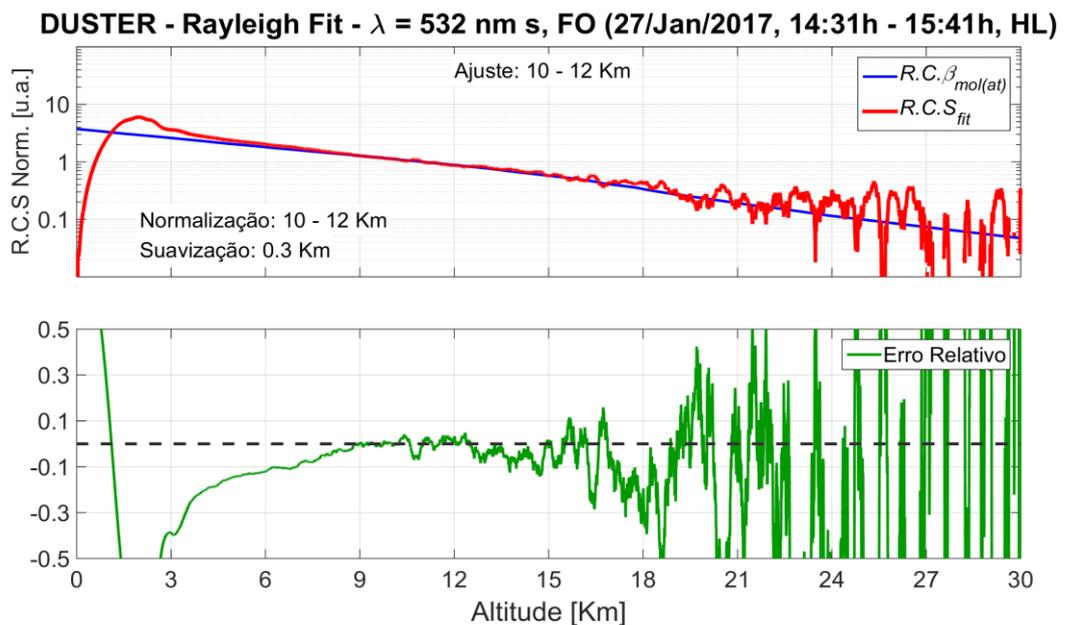


Na Figura 4.46, é possível perceber que nos primeiros quilômetros o perfil *LIDAR* e o perfil molecular estão afastados, o que representa o comportamento esperado, pois em baixas altitudes a quantidade de aerossóis é maior, por isso o perfil *LIDAR* é mais intenso. Os dois perfis convergem entre 9 e 14 km, comprovando o alinhamento do canal. Após este intervalo o perfil *LIDAR* oscila bastante e se afasta da curva molecular. Isto indica que os pulsos de laser não foram retroespalhados desta altitude restando apenas, provavelmente, alguma contribuição da luz natural.

**Figura 4.47** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm s, analógico, e erro relativo na Campanha *MOLOTOV I*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.

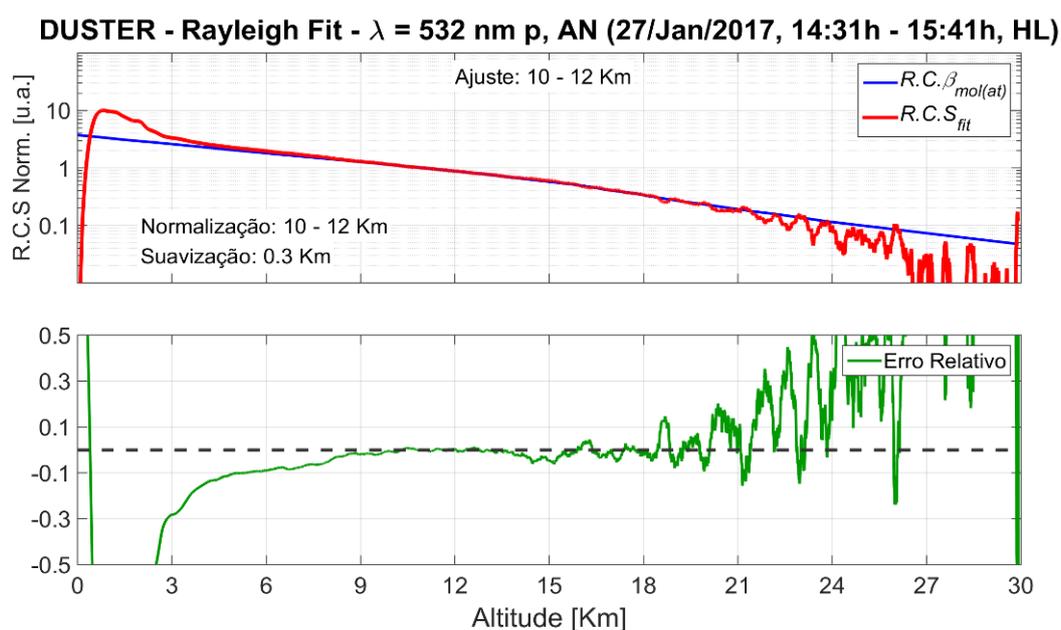


**Figura 4.48** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm s, fotocontagem, e erro relativo na Campanha *MOLOTOV I*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{Fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



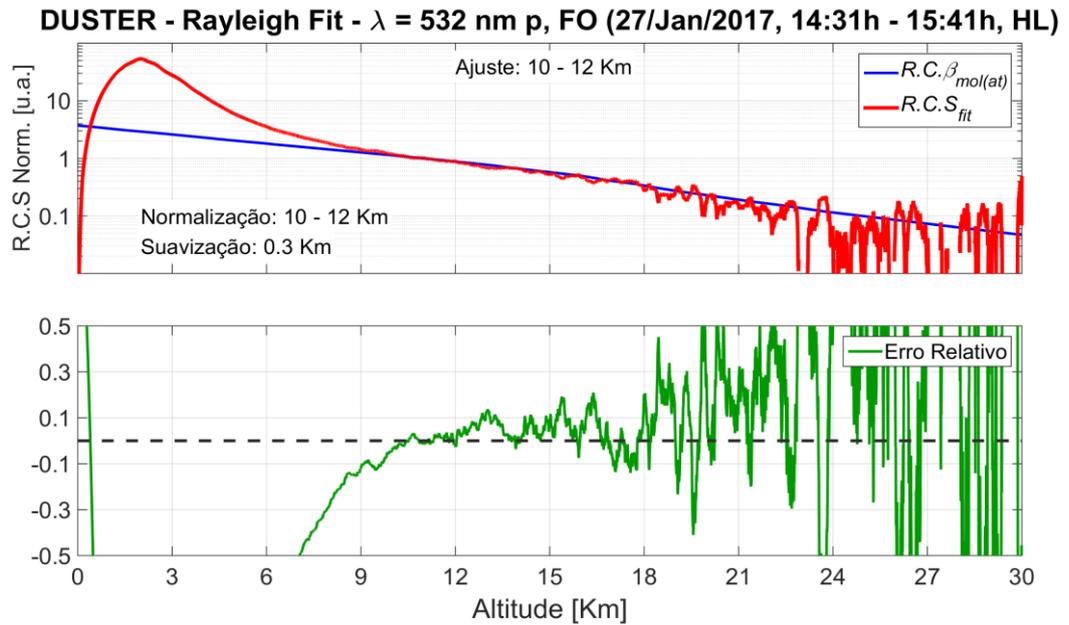
O canal 532 nm s apresentou um bom ajuste até cerca de 16 km, no modo analógico (Figura 4.47) e no fotocontagem (Figura 4.48), após essa altitude os perfis  $R.C.S_{Fit}$  ficam distorcidos. Esse canal mede sinais intensos quando há na atmosfera presença de aerossóis que polarizam a luz, como a poeira. Em grandes altitudes nuvens cirrus carregadas de cristais de gelo poderiam gerar algum pico acima do perfil molecular. Mas o teste de *Rayleigh Fit* do dia 27/Jan/2017 foi realizado em um dia com céu limpo, por isso, devido ao bom alinhamento, os perfis convergem em grandes altitudes.

**Figura 4.49** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm p, analógico, e erro relativo na Campanha MOLOTOV I.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{Fit}$ : Perfil LIDAR corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.

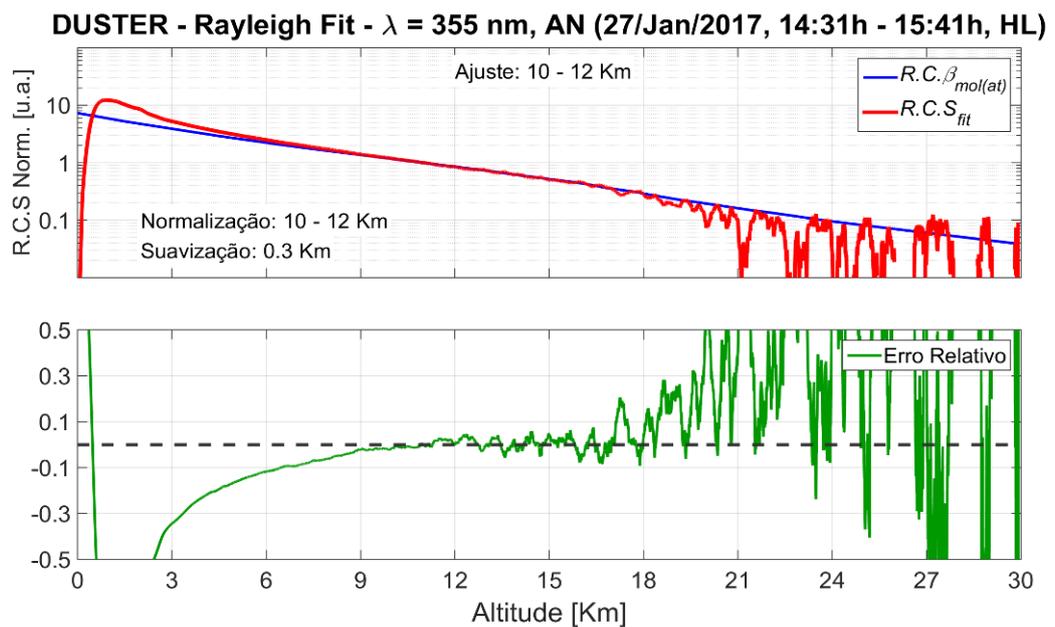


No canal 532 nm p o perfil molecular e o perfil LIDAR ajustado são similares até a altitude de 18 km e acima disso o  $R.C.S_{Fit}$  se torna mais distorcido e decai, no modo analógico e no de fotocontagem. O 532 nm p analógico foi o canal que apresentou alinhamento em maior alcance assim como menor erro entre o perfil LIDAR e o  $R.C.\beta_{mol(at)}$ .

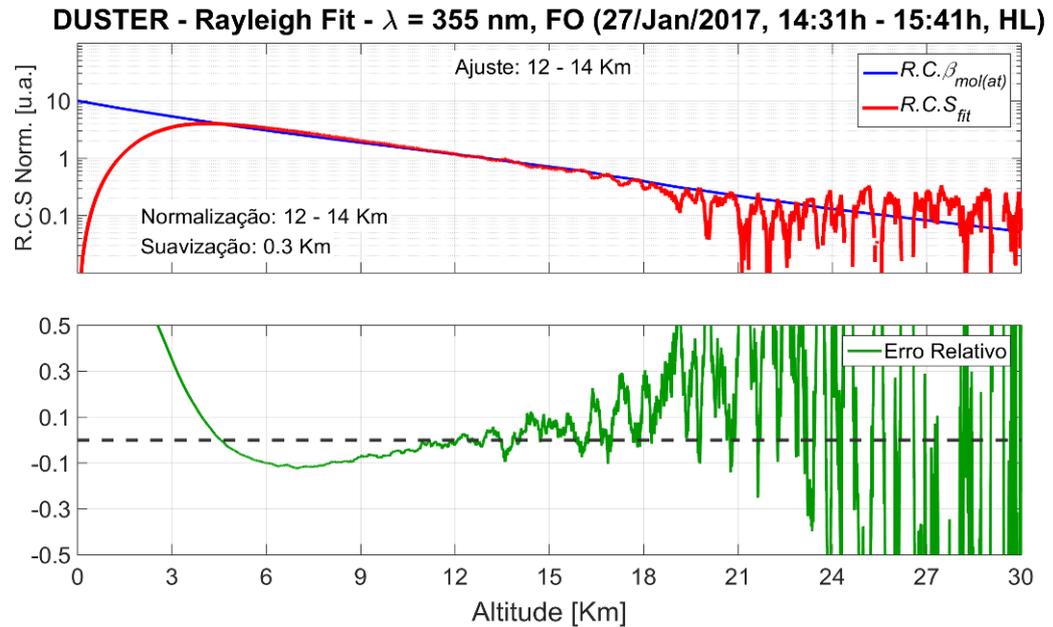
**Figura 4.50** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm p, fotocontagem, e erro relativo na Campanha *MOLOTOV I*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



**Figura 4.51** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 355 nm, analógico, e erro relativo na Campanha *MOLOTOV I*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.

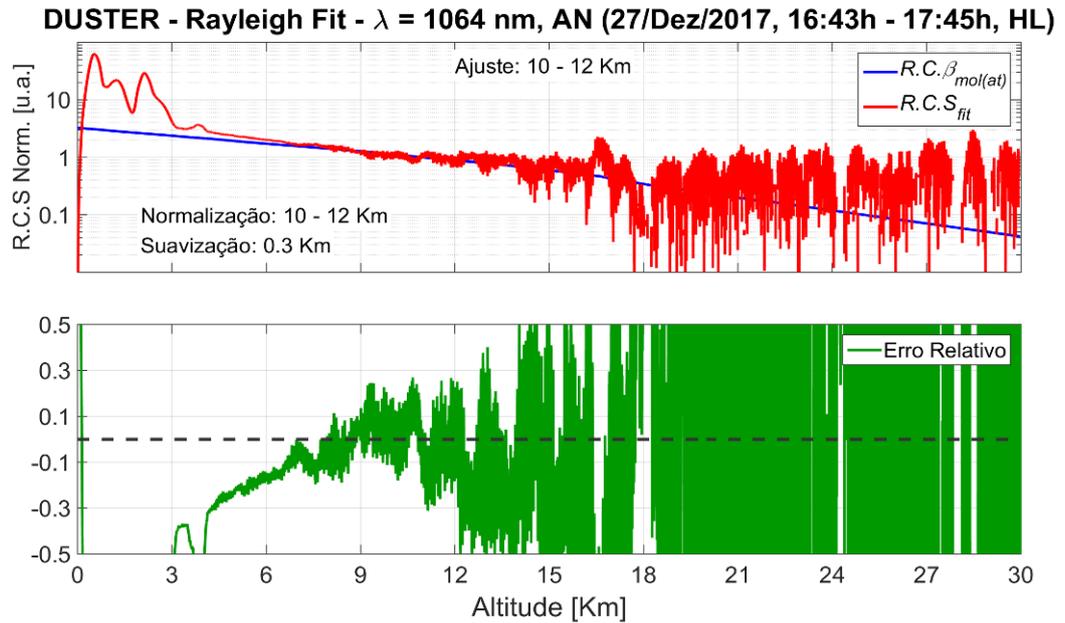


**Figura 4.52** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 355 nm, fotocontagem, e erro relativo na Campanha *MOLOTOV I*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.

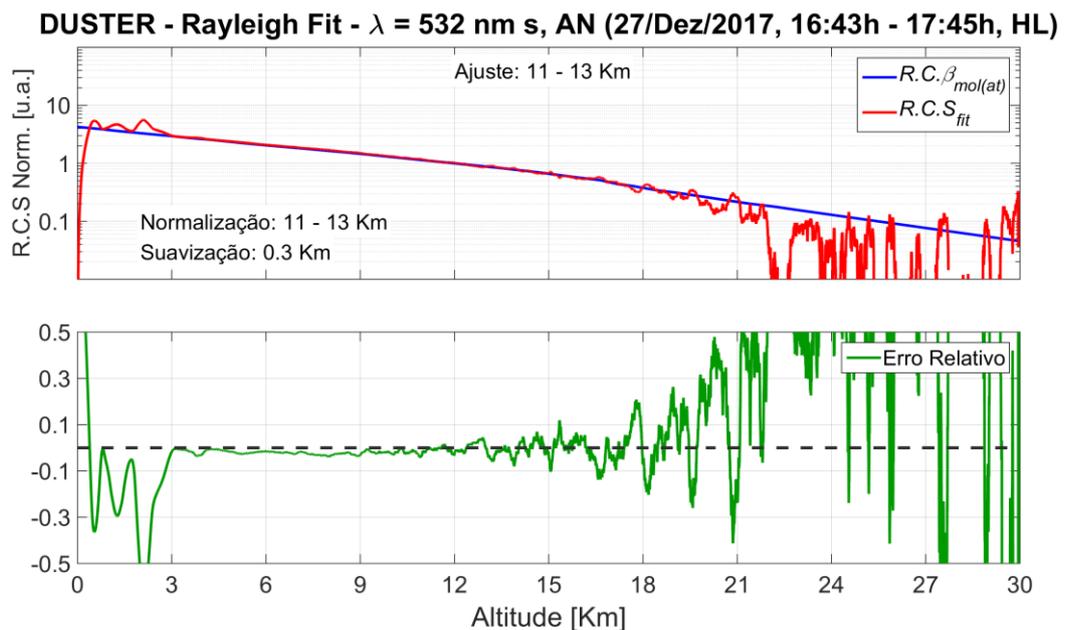


Nas Figuras 4.53 a 4.59 estão os resultados de um teste de *Rayleigh Fit* realizado no dia 27 de dezembro de 2017, com a configuração do *DUSTER* nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.

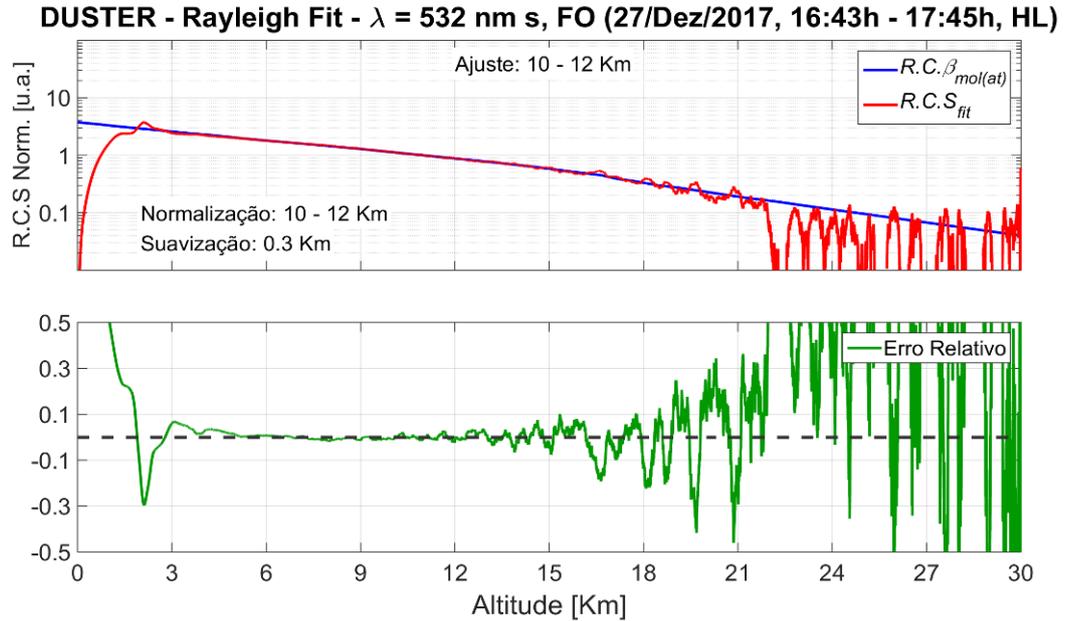
**Figura 4.53** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 1064 nm, analógico, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



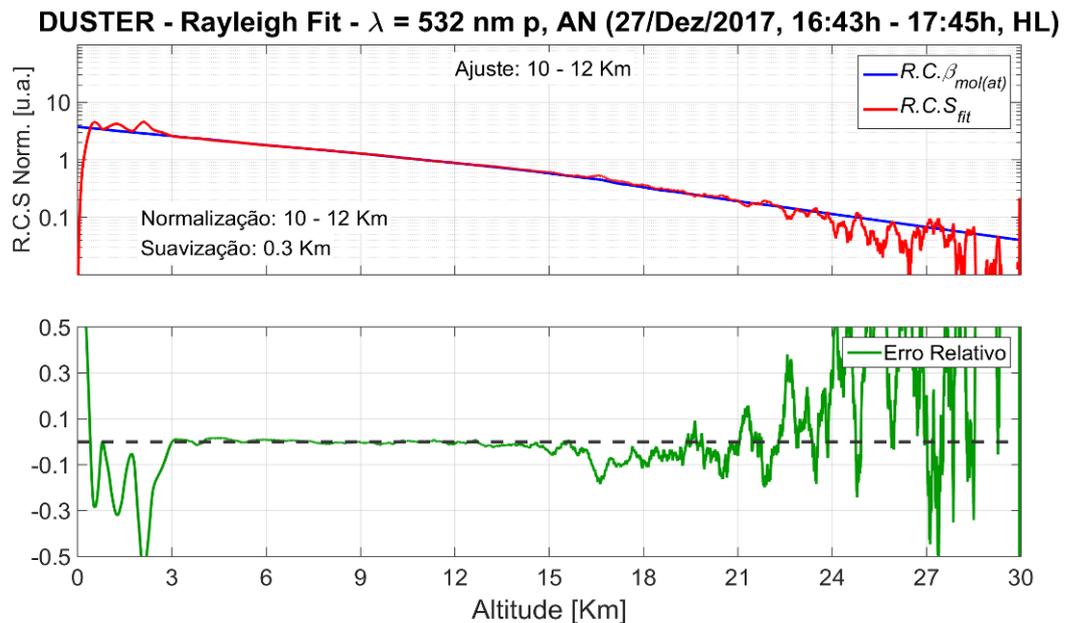
**Figura 4.54** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm s, analógico, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



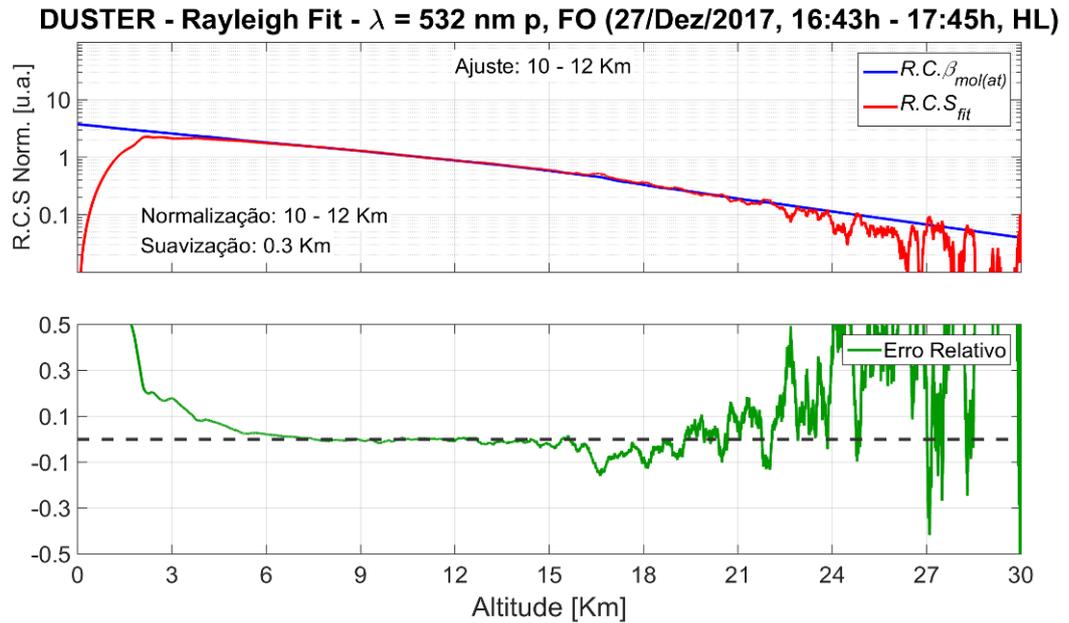
**Figura 4.55** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm s, fotocontagem, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



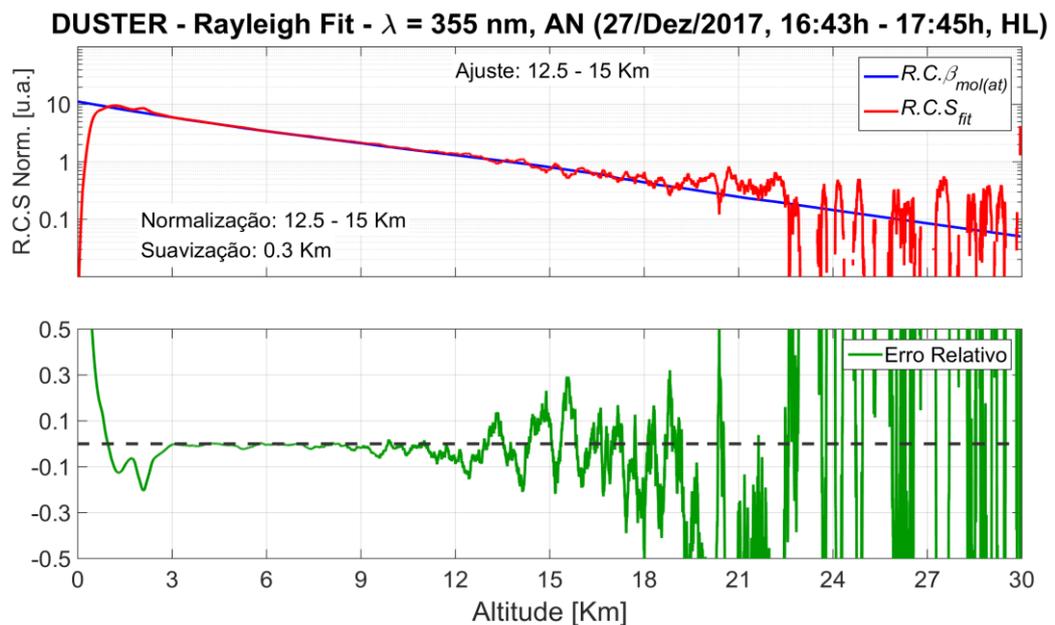
**Figura 4.56** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm p, analógico, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



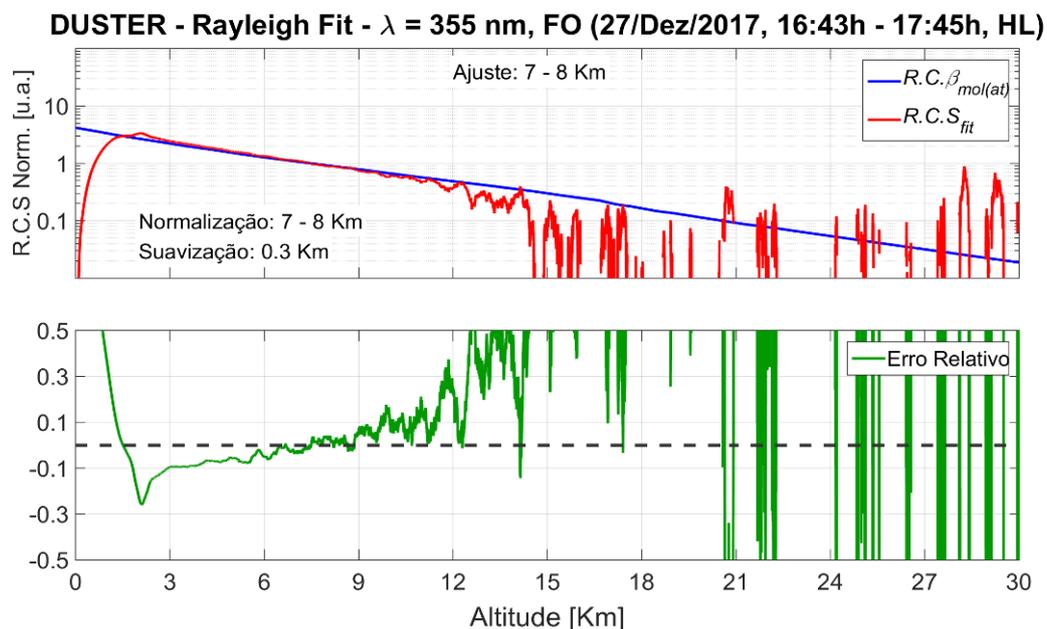
**Figura 4.57** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 532 nm p, fotocontagem, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



**Figura 4.58** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 355 nm, analógico, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



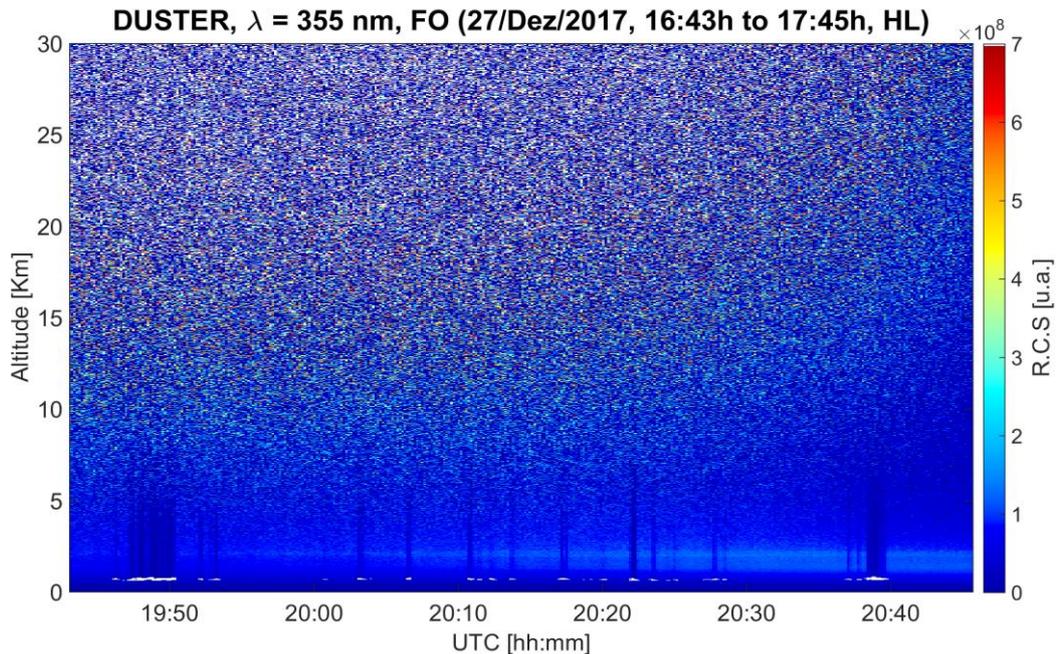
**Figura 4.59** – Teste de *Rayleigh Fit* do canal 355 nm, analógico, e erro relativo nas campanhas *APEL* e *MOLOTOV II*.  $R.C.\beta_{mol(at)}$ : Perfil de retroespalhamento molecular atenuado corrigido pelo alcance.  $R.C.S_{fit}$ : Perfil *LIDAR* corrigido pelo alcance e ajustado ao perfil molecular.



O canal 355 nm, fotocontagem, mostrado nas Figuras 4.58 e 4.59, foi o que apresentou maior erro relativo nas altitudes entre acima de 9 km se os compararmos com os outros canais. De maneira geral os canais do modo fotocontagem são mais sensíveis que os do modo analógico. Como os testes de *Rayleigh Fit* foram realizados durante o dia, no verão em Natal, provavelmente este canal tenha sofrido mais interferência da luz natural.

A remoção de *background* foi feita da mesma maneira que em outros canais, diminuindo todos os dados do perfil pela média dos últimos 3 km de dados. Entretanto, a energia dos pulsos de laser no comprimento 355 nm talvez não foi suficiente para se sobrepor à luz natural, e o canal fotocontagem, mais sensível, sofreu mais interferência. A Figura 4.60 apresenta o *quicklook* do canal 355 nm, fotocontagem, da medida realizada para o teste de *Rayleigh Fit* do dia 27/12/2017, na qual é possível notar a variação do ruído de fundo do início em relação ao fim da medida. É importante ressaltar que embora este *quicklook* contenha nuvens, todos os dados contendo nuvens foram removidos para o processamento do teste.

**Figura 4.60** – Aquisição do dia 27/12/2017, canal 355 nm, fotocontagem, configuração APEL/MOLOTOV II. HL: Horário Local.



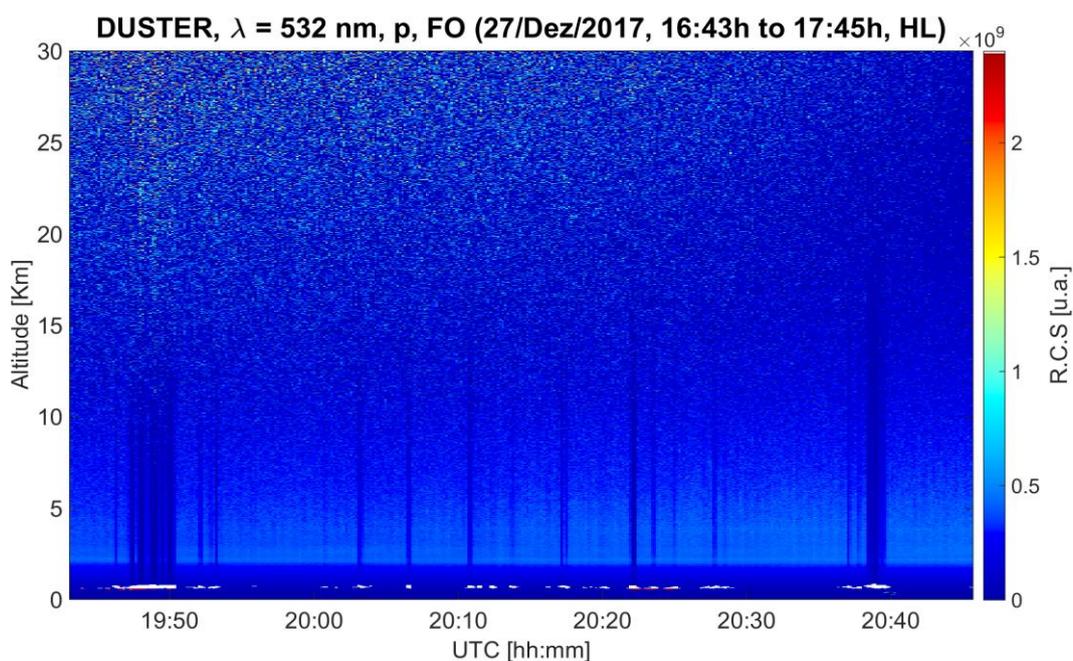
Este *quicklook* mostra que na média, após aproximadamente 7 km o *background* começa a se sobrepôr ao retroespalhamento detecção pelo canal 355 n, fotocontagem. É possível perceber isto pela grande quantidade de pixels coloridos na imagem acima desta altitude. Essa sobreposição justifica o fato do *Rayleigh Fit* deste canal ter um decaimento do sinal acima de 9 Km. No final da tarde, após às 20:30 h (UTC), às 17:30 h horário local, a quantidade de pixels coloridos diminui, indicando redução do *background*. Isto fica mais perceptível nos dados entre 2 e 12 Km, aproximadamente, região na qual é possível observar mais pixels da cor azul escuro após este horário.

O momento mais adequado para realizar o teste de *Rayleigh Fit* seria durante à noite, mas a partir do fim da tarde, após as 17:00h, começam a surgir muitas nuvens baixas. No verão, com cerca de 12 horas de luz solar, temperaturas superiores a 30° graus e a proximidade com o oceano existem muitas nuvens baixas, à noite principalmente. Por esses fatores os testes tiveram que ser feitos à tarde.

Para fazer uma comparação, a Figura 4.58 contém o *quicklook* do mesmo da mesma medição para o *Rayleigh Fit* para o canal 532 nm p, fotocontagem, o qual apresentou um alinhamento mais distante que o 355 nm, fotocontagem. Na Figura

4.61 é possível perceber que o canal 532 nm, p, fotocontagem, sofreu menos interferência da luz natural que o 355 nm, fotocontagem, pois há bem menos pixels coloridos e a após às 20:40 h (UTC), praticamente não exigem.

**Figura 4.61** – Aquisição do dia 27/12/2017, canal 532 nm p, fotocontagem, conFiguração *APEL/MOLOTOV II*. HL: Horário Local.



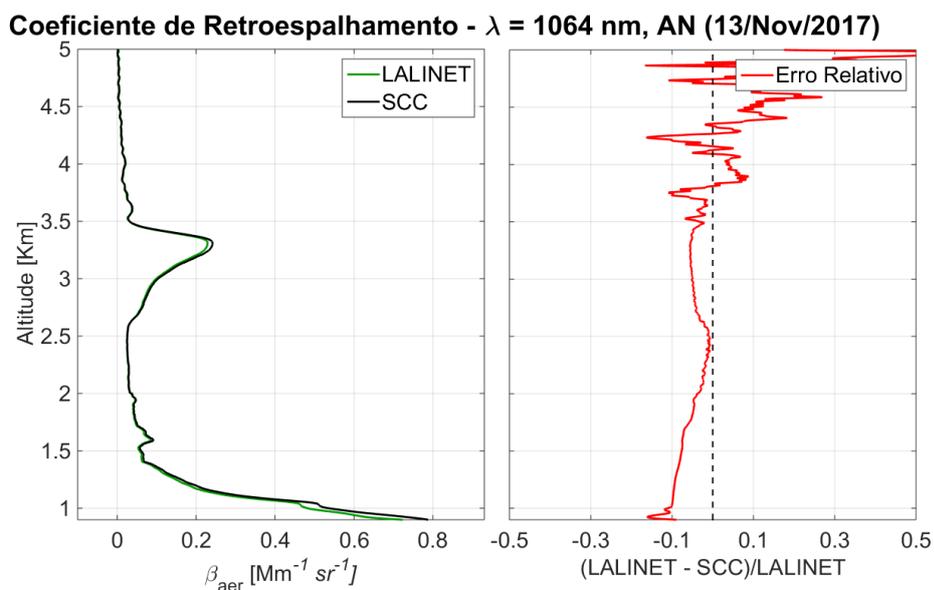
#### 4.7 Perfis de Coeficientes de Retroespalhamento dos Aerossóis

Foram escolhidas duas medições da campanha *APEL*, dos dias 13 e 16 de novembro de 2017, no comprimento de onda 1064 nm, para comparar os perfis de coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis calculados pela a *SCC* e o Algoritmo de Inversão da *LALINET*. Em ambas as ferramentas de processamento foi utilizado o método de inversão de Klett-Fernald-Sasano. No algoritmo da *LALINET* os coeficientes de extinção e retroespalhamento devido as moléculas foram calculados a partir de dados de radiosondagem e na *SCC* os coeficientes são calculados por dados do modelo atmosférico *U.S. Standard Atmosphere 1976*. Esta e as diferentes formas de calibração adotadas pelos dois mecanismos, como visto na seção 3.4 Processamento de Dados, são os dois principais fatores que podem ter influenciado nas diferenças encontradas.

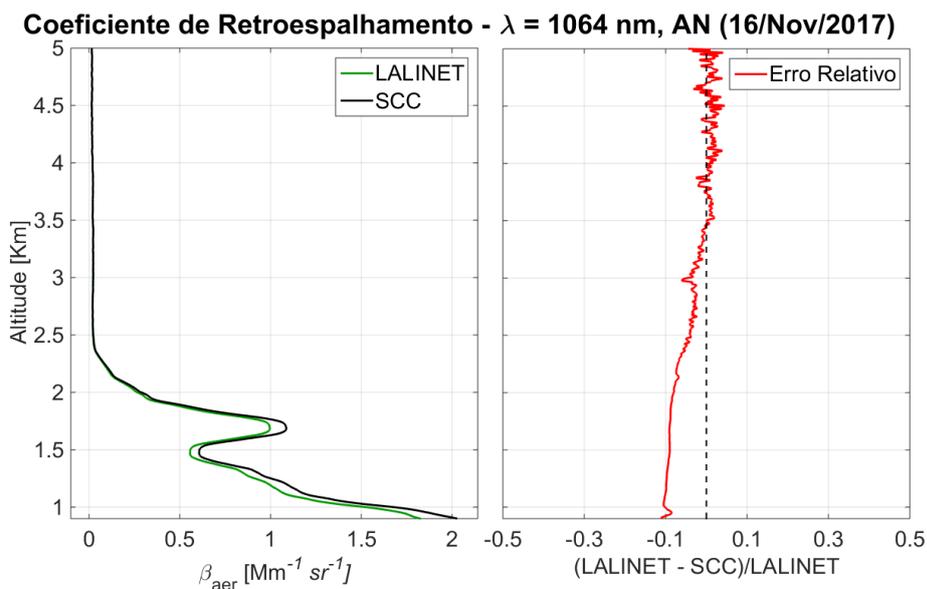
As Figuras 4.62 e 4.63 apresentam a comparação entre os perfis de retroespalhamento dos aerossóis pelas duas ferramentas abordadas. O erro relativo

entre os perfis oscila entre -0.1 e 0.1, ou seja, em valores absolutos, varia entre 0 e 10%, logo, é possível considerar um erro médio de 5%.

**Figura 4.62** – Perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis calculados pela SCC e pelo Algoritmo de Inversão da *LALINET*, canal 1064 nm analógico. Medição do dia 13/11/2017, das 19:32 h às 20:18 h, hora local.



**Figura 4.63** – Perfis dos coeficientes de retroespalhamento dos aerossóis calculados pela SCC e pelo Algoritmo de Inversão da *LALINET*, canal 1064 nm analógico. Dia 16/11/2017, das 17:34 h às 18:50 h, hora local.



Existe a possibilidade de submeter dados de radiossondagem na plataforma SCC, mas estes devem estar no formato *NetCDF* específico da plataforma. Para tal seria necessário desenvolver um código para conversão, submeter os dados no servidor e recalculá-los para fazer novas comparações. As similaridades entre os perfis são um indicativo de confiabilidade entre as duas metodologias de processamento de dados.

## 5 CONCLUSÕES

A realização dos testes instrumentais de qualidade, *Dark Measurement*, *Zero Bin*, *Bin-shift*, *Telecover* e *Rayleigh Fit*, dão garantia na qualidade das medições do *LIDAR DUSTER* durante as campanhas operacionais. O conjunto de algoritmos *DUSTER Quality Assurance* facilitaram a análise dos testes instrumentais e nas trocas de informações entre as redes *LALINET* e *EARLINET*. Estes algoritmos podem ser aprimorados para que no futuro seja desenvolvida uma plataforma única de análise de qualidade *LIDAR* para todas as estações da *LALINET*.

Dos canais analisados o que apresentou o maior ruído em todas as campanhas foi o 1064 nm, analógico, assim como foi o canal com pior alinhamento no *Telecover* se comparado aos demais. O canal 532 p, analógico, foi o que apresentou melhor alinhamento em curto e em longo alcance nas três campanhas. Houve uma melhoria da qualidade do canal 532 p, fotocontagem, na configuração *APEL/MOLOTOV II* em relação a configuração *MOLOTOV I*, pela diminuição da tensão do canal para 50 mV. Entretanto, medir em um intervalo de 50 mV fez com que os canais 355 mV, analógico e fotocontagem, perdessem um pouco de qualidade no longo alcance, permitindo que o ruído de fundo prevalecesse sobre os pulsos de laser.

Por meio do *DUSTER Cloud Free* foi possível obter perfis livres de nuvens baixas de forma automatizada, possibilitando uma grande economia no tempo de processamento. O filtro trouxe bons resultados sendo uma ferramenta muito útil para a preparação dos dados, visto que não é possível obter produtos *LIDAR*, como por exemplo, perfil de retroespalhamento devido aos aerossóis, utilizando perfis que contêm nuvens. Este algoritmo pode ser melhor aprimorado futuramente para detecção das nuvens de acordo com a distorção que ocorre antes e após a saturação do sinal contendo nuvem. Desta maneira seria possível calcular a altura da base e do topo das nuvens com mais precisão e futuramente ter um algoritmo de classificação de nuvens.

Todos os canais utilizados durante as campanhas *MOLOTOV I*, *APEL* e *MOLOTOV II* foram configurados na plataforma *SCC*. Ao todo 25 medições realizadas pelo *DUSTER* durante a campanha *APEL*, entre os meses de novembro e dezembro de 2017, estão no servidor. Os dados das outras campanhas e medições futuras podem continuar sendo submetidos no servidor para expandir a quantidade

de resultados. Foi conFigurado um produto de retroespalhamento elástico para cada canal analógico. Em pesquisas futuras seria interessante conFigurar produtos de perfis *glued* os quais são a união entre os dados de um canal analógico e um canal fotocontagem no mesmo comprimento de onda.

Considerando que a SCC e o Algoritmo de Inversão das *LALINET* apresentaram resultados semelhantes, para o canal 1064 nm, isto representa mútua confiabilidade entre os perfis de coeficientes de retroespalhamento elástico calculados pelas duas redes. Embora existam algumas diferenças no método de calibração e obtenção do perfil de retroespalhamento molecular os resultados foram semelhantes. Entretanto, é necessário desenvolver um algoritmo de conversão dos dados de radiossondagem para *NetCDF* e então submetê-los no servidor da SCC e fazer novas comparações. Algo a ser aprimorado em pesquisas futuras, é utilização de dados do fotômetro solar para obtenção mais precisa de uma razão *LIDAR* inicial.

Esta pesquisa contribuiu no desenvolvimento de um banco de dados, obtenção dos perfis de coeficientes de retroespalhamento de aerossóis e análise de qualidade do *LIDAR DUSTER*. Os resultados obtidos, após devido processamento, poderão ser utilizados futuramente em modelos de dispersão de poluentes, como o modelo *EURAD-IM*, em pesquisas sobre climatologia de aerossóis, validações e complementações de dados obtidos pelo fotômetro solar, e por satélites, como o *CALIPSO* e o *AEOLUS*.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARGALL, P.S.; SICA, R.J. *LIDAR/Atmospheric Sounding Introduction*. **Encyclopedia of Atmospheric Science**. Editores J.R. Holton, J.A. Curry e J.A. Pyle, Elsevier Science, Londres, p. 1669-1176, 2003.

ANTUÑA-MARRERO, C. J. *et al.* *LALINET The First Latin American-Born Regional Atmospheric Observational Network*. **Bulletin of The American Meteorological Society**; v. 98, n. 6, p. 1255-1275, Junho de 2017.

BALL, D. W. *Telescope Optics*. **Spectroscopy**, Vol. 20 (1), p. 52 – 54, janeiro, 2005.

BARON, P. A.; WILLEKE, K. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. 2<sup>o</sup> ed., **John Wiley & Sons**, Hoboken, New Jersey, EUA, 2001.

BECERRA, H. H. G; CHAVARRO, J.H. *Teoría, Diseño Básico y Señales Recibidas por um Sistema LIDAR para Mediciones Atmosféricas*. **Ciência Investigación Academia Desarrollo**, 2005.

BÖSENBERG, J. *et al.* *EARLINET – European Aerosol Research LIDAR Network, Advances in Laser Remote Sensing*, in: Selected papers 20th **Int. Laser Radar Conference (ILRC)**, 10–14 July 2000, Vichy, France, 155–158, 2000.

BOUCHER, O. D. RANDALL, P. ARTAXO, C. BRETHERTON, G. FEINGOLD, P. FORSTER, V.-M. KERMINEN, Y. KONDO, H. LIAO, U. LOHMANN, P. RASCH, S.K. SATHEESH, S. SHERWOOD, B. STEVENS and X.Y. ZHANG. *Clouds and Aerosols. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

BUCHOLTZ, A. *Rayleigh-Scattering Calculations for The Terrestrial Atmosphere*. **Applied Optics**, 34(15), 2765–2773, 1995.

CHAIKOVSKY, A. *et al.* *LIDAR-Radiometer Inversion Code (LIRIC) for the Retrieval of Vertical Aerosol Properties from Combined LIDAR/Radiometer Data: Development and Distribution in EARLINET*. **Atmospheric Measurement Techniques**, 9, 1181–1205, doi: 10.5194/amt-9-1181, 2016.

D'AMICO, G. *et al.* *EARLINET Single Calculus Chain – overview on methodology and strategy*. **Atmospheric Measurement Techniques**, 8, 4891–4916, doi:10.5194/amt-8-4891-2015, 2015.

D'AMICO, G. *et al.* *EARLINET Single Calculus Chain – Technical – Part 1: Pre-Processing of Raw LIDAR Data*. **Atmospheric Measurement Techniques**, 9, 491–507, doi:10.5194/amt-9-491-2016, 2016.

EARLINET – **EARLINET - Internal Checkups, 2007**. Disponível em: <[http://www.actris.net/Portals/97/Publications/quality%20standards/lidar/QAInternalCheckups\\_version\\_121017b.pdf](http://www.actris.net/Portals/97/Publications/quality%20standards/lidar/QAInternalCheckups_version_121017b.pdf)>. Acesso em 24/05/2018.

**EARLINET – European Aerosol Research LIDAR Network.** Disponível em: <[www.EARLINET.org](http://www.EARLINET.org)> Acesso em: 05/05/2017.

FERNALD, F. G. *Analysis of atmospheric LIDAR observations: some comments.* **Applied Optics**, v. 23, p. 652–653, University of Denver, Physics Department, Denver, Colorado, EUA, 1984.

FORSTER, P., V. RAMASWAMY, P. ARTAXO, T. BERNTSEN, R. BETTS, D.W. FAHEY, J. HAYWOOD, J. LEAN, D.C. LOWE, G. MYHRE, J. NGANGA, R. PRINN, G. RAGA, M. SCHULZ AND R. VAN DORLAND. *Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

FREUDENTHALER, V.; LINNÉ, H.; CHAIKOVSKI, A.; RABUS, D.; GROß, S. *EARLINET Lidar Quality Assurance Tools.* **Atmospheric Measurement Techniques**, <https://doi.org/10.5194/amt-2017-395>, 2018.

GIRARD, J. E. *Principles of Environmental Chemistry, 2<sup>o</sup> ed.*, Jones & Bartlett Learning, ISBN: 978-0-7637-59391, Sudbury, Ma 01776, EUA, 2010.

GUERRERO-RASCADO, J. L., “*Técnica LIDAR Para La Caracterización Atmosférica Mediante Dispersión Elástica Y Raman*”, Dissertação de Doutorado. **Centro Andaluz de Meio Ambiente, Universidade de Granada**, D.L.: GR. 187-2009, ISBN: 978-84-691-8587-2, Granada, Espanha, 2009.

GUERRERO-RASCADO, J. L., F. NAVAS-GUZMÁN, J. A. DÍAZ, J. A. BRAVO-ARANDA; ALADOS-ARBOLEDAS, L., *Quality assurance at the EARLINET Granada station. Characterization of the optical subsystem for a multichannels Raman LIDAR,* **Óptica Pura y Aplicada**, 44 (1), p.19-23, 2011.

GUERRERO-RASCADO, J. L. et al. *Latin American LIDAR Network (LALINET) for aerosol research: Diagnosis on network instrumentation.* **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, 138-139 (2016), p. 112–120, 2016.

HINDS, W. C. *Aerosol Technology, Properties Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2<sup>a</sup> Ed., **John Wiley & Sons**, New York, 1999.

HITSCHFELD, W; BORDAN, J. *Erros Inherent in the Radar Measurement of Rainfall at Attenuating Wavelengths.* **Journal of Meteorology**, v.11, p. 58-67, 1954.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – **IBGE**. Acesso em 03/05/2017 <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=240810>>.

KLETT, J. D. *Stable Analytical Inversion Solution for Processing LIDAR Returns.* **Applied Optics**, v. 20, 211-220, 1981.

KLETT, J. D. *LIDAR inversion with variable backscatter/extinction ratios*. **Applied Optics**, 24 (11), 1638–1643, 1985.

KOVALEV, V. A.; EICHINGER, W. E. *Elastic LIDAR: theory, practice, and analysis methods*. **John Wiley & Sons**, 2004.

LALINET – *Report of the inversion unified algorithm working group*, 2014a. <[http://lalinet.org/uploads/Analysis/Concepcion2014/report\\_1\\_analysis\\_workshop.pdf](http://lalinet.org/uploads/Analysis/Concepcion2014/report_1_analysis_workshop.pdf)> Acesso em: 30/07/2017.

LALINET – *Documentación Técnica Sobre Tests Instrumentales en LALINET, versión 9 de abril de 2014*, 2014b. Acesso em 25/06/2018: <[http://lfa.if.usp.br/ftp/public/lidar/data/Documentacion\\_tecnica\\_tests\\_LALINET\\_v2014\\_0409.pdf](http://lfa.if.usp.br/ftp/public/lidar/data/Documentacion_tecnica_tests_LALINET_v2014_0409.pdf)>

LANDULFO, E. ; LOPES, F. J. S. ; MOREIRA, G. A. ; MARQUES, M. T. A. ; OSNEIDE, M. A. ; ANTUÑA, J. C.; ARREDONDO, R. E.; GUERRERO-RASCADO, JUAN L.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. ; BASTIDAS, A. ; NISPERUZA, D. T. ; VELASQUEZ, A. B. ; MUNERA, M. ; ALEGRIA, D.; FORNO, R. ; SANCHEZ, M. F. ; MONTILLA, E. ; JIMENEZ, C. ; RIQUELME, A. S. ; QUEL, E. J. ; RISTORI, P. ; OTERO, L. ; BARBOSA, H. M. J. ; GOUVEIA, D. A.; BARJA, B. *Aline/LALINET network status*. No: 27th **International Laser Radar Conference (ILRC)**, New York, 5-10 de julho, 2015.

LANDULFO, E.; LOPES, F. J. S.; MONTILLA, E.; GUEDES, A. G.; HOELZEMANN, J. J.; FERNANDEZ, J. H.; ALADOS-ARBOLEDAS, L.; GUERRERO-RASCADO, JUAN L. *LIDAR DUSTER: Transatlantic Transport of Aerosol Particles From The Sahara And Other Sources: First Results From The Recently Installed LIDAR And Sunphotometer In Natal/Brazil*. **SPIE Remote Sensing**, Edinburgh. v. 10006. p. 1000607-9, 2016.

LIU, K. N. **An Introduction to Atmospheric Radiation**. 2ª Ed. Academic Press, California, 2002.

LOPES, F. J. S. *Validação dos Dados do Satélite Calipso Utilizando um sistema LIDAR de Retroespalhamento Elástico e o Fotômetro Solar da Rede AERONET*. Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na **Área de Tecnologia Nuclear (IPEN/USP)**, p.169, São Paulo, 2011.

LOPES, F. J. S.; MARIANO, G.L.; LANDULFO, E.; MARIANO, E. V. C. *Impacts of Biomass Burning in the Atmosphere of the Southeastern Region of Brazil Using Remote Sensing Systems*. In: Hayder Abdul-Razzak. (Org.). *Atmospheric Aerosols - Regional Characteristics - Chemistry and Physics*. 1ª Ed. Estados Unidos: **INTECH**, 2012, v. 9, p. 247-272, 2012.

LOPES, F. J. S.; LANDULFO, E.; VAUGHAN, M. A. *Evaluating CALIPSO's 532 nm LIDAR Ratio Selection Algorithm Using AERONET sun photometers in Brazil*. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 6, p. 3281-3299, 2013.

MATTIS, I. *et al.* EARLINET Single Calculus Chain – technical – Part 2: Calculation of optical products. **Atmospheric Measurement Techniques**, 9, 3009–3029, doi:10.5194/amt-9-3009-2016, 2016.

MCMANAMON, P. Field Guide to LIDAR. **SPIE PRESS**, V. FG36, Bellingham, Washington, USA, 2015.

MONTILLA-ROSETO, E. *et al.* Optical Characterization of Lower Tropospheric Aerosols by the Southern East Pacific LIDAR Station (Concepcion, Chile). *Journal of Aerosol Science*, Elsevier, n° 92, p. 16-26, 2015.

MOTTA, A. G. O clima de Natal: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**. INPE-11475-RPQ/776, São José dos Campos, 2004.

MYHRE, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang: *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

NISHIZAWA, T., SUGIMOTO, N., MATSUI, I., SHIMIZU, A., HIGURASHI, A., JIN, Y. *The Asian Dust and Aerosol LIDAR Observation Net-Work (Ad-Net): Strategy and Progress*. No: **27th International Laser Radar Conference (ILRC)**, New York, 5-10 de Julho 2015.

PAPPALARDO, G. *et al.* Aerosol LIDAR intercomparison in the framework of the EARLINET project. 3. Raman LIDAR algorithm for aerosol extinction, backscatter, and LIDAR ratio. **Applied optics**, Vol. 43, No. 28, 1 Outubro, 2004.

PAPPALARDO, G., AMODEO, A., APITULEY, A., COMERON, A., FREUDENTHALER, V., LINNÉ, H., ANSMANN, A., BÖSENBERG, J., D'AMICO, G., MATTIS, I., MONA, L., WANDINGER, U., AMIRIDIS, V., ALADOSARBOLEDAS, L., NICOLAE, D., AND WIEGNER, M. EARLINET: Towards an Advanced Sustainable European Aerosol LIDAR Network. **Atmospheric Measurement Techniques**, 7, 2389–2409, doi:10.5194/amt-7-2389-2014, 2014.

PBMC – **PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**. Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp, 2014.

REBOITA, M. S; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. **Terra e Didática**, v. 8, n° 1, p. 34-50, 2012.

ROBOCK, A.; J. C. ANTUÑA. *Report on the Workshop on Lidar Measurements in Latin America*. IAI Newsletter, Vol. 25, Inter-American Institute for Global Change Research, Montevideo, Uruguay, 7–10. 2001.

SASANO, Y.; BROWELL, E.V.; ISMAIL, S. *Error caused by using a constant extinction/backscattering ratio in the lidar solution.* **Applied Optics**, N° 24, p. 3929-3932, 1985.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.* **John Wiley & Sons**, 3ª Ed., New York, 2016.

SILVA, R. A. *Caracterización Óptica de Aerosoles Troposféricos Utilizando la Técnica LIDAR.* Tese de doutorado em **Ciências Físicas e Matemáticas - Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Física, Universidad de Concepción**, Concepción/Chile, 2015.

WALLACE, J. M.; HOBBS, P.V. *Atmospheric Science: An Introductory Survey.* 2º ed. **Elsevier**, London, UK, 2006.

WANDINGER, U. *et al.* *EARLINET Instrument Intercomparison Campaigns: Overview on Strategy and Results.* **Atmospheric Measurement Techniques**, 9, 1001–1023, doi:10.5194/amt-9-1001-2016, 2016.

WEITKAMP, C. *LIDAR: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere.* **Springer Series in Optical Sciences**, ISBN 0-387-40075-3, 2005.

WELTON, E. *et al.* *Measurement Status of the NASA Micro Pulse LIDAR Network (MPLNET): Overview of the Network and Future Plans, New Version 3 Data Products, and the Polarized MPL.* **28th International Laser Radar Conference**, Bucharest, Romania, 25-30 de Junho, 2017.

YAMASOE, M. A.; CORRÊA, M. P. *Processos Radiativos na Atmosfera: Fundamentos*, **Oficina de Textos**, São Paulo, 142 p. ISBN 978-85-7975-229-2. 2016.