



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO DO PERFIL VERTICAL DE AEROSSÓIS NA
TROPOSFERA UTILIZANDO A TÉCNICA DE LIDAR**

RENATA FERNANDES DE SOUZA

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Materiais.**

**Orientador:
Dr. Eduardo Landulfo**

**São Paulo
2004**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESTUDO DO PERFIL VERTICAL DE AEROSSÓIS NA
TROPOSFERA UTILIZANDO A TÉCNICA DE LIDAR**

RENATA FERNANDES DE SOUZA



**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Materiais**

Orientador: Dr. Eduardo Landulfo

SÃO PAULO
2004

*Dedico esse trabalho aos meus pais,
com muita saudade e a toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Dr. Eduardo Landulfo pela orientação, incentivo e amizade durante todos esses anos.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Ao Dr. Nilson Dias Vieira Júnior, pelo apoio e colaboração.

Ao MsC. Anderson Zanardi Freitas pelo incentivo e amizade.

Ao Felipe pelo incentivo, apoio e amizade

Ao Luiz Vicente, Fábio, Ilomar, Ana Maria pelo apoio, incentivo e amizade.

À todos do IPEN por proporcionar um ambiente de trabalho agradável e receptivo.

À Edna e Elsa pela amizade e atenção.

Aos professores Frenkel e Maria de Fátima pelo apoio.

Aos grandes amigos do Instituto de Física e de fora dele: Régis, Rambo, Gerson, Luciana Gonzaga, Michel, Max, Marquinhos, Andréa, Fernanda, Ernesto, Ivan e todos os outros que, mesmo aqui não citados têm igual importância.

Aos grandes amigos do Unibanco: Lucimeire, Luciana, Marcos, Marina. Ao Augusto, pela compreensão e apoio.

Aos meus queridos familiares por estarem sempre ao meu lado e torcendo pelo meu sucesso.

Desejo expressar especialmente minha gratidão aos meus queridos pais João e Selma dos quais eu tenho muita saudade, aos meus pais do coração Pompeu e Graça, aos meus irmãos Firmo e Bruno e à minha amada irmã Juliana.

ESTUDO DO PERFIL VERTICAL DE AEROSSÓIS NA TROPOSFERA UTILIZANDO A TÉCNICA DE LIDAR

Renata Fernandes de Souza

RESUMO

Neste trabalho foram feitas medidas das propriedades ópticas da atmosfera de São Paulo, utilizando um sistema LIDAR, a fim de caracterizar o perfil vertical de retroespalhamento de aerossóis em 532 nm até altitudes de 4-6 Km. Foram estudados os parâmetros geométricos e eletrônicos do sistema tais como transmissão dos espelhos utilizados, saturação da fotomultiplicadora, alinhamento, sinal de fundo, parâmetros que são muito importantes para uma boa interpretação dos dados. Através deste estudo foram estabelecidos alguns critérios para otimização do sistema, tais como alinhamento através da maximização de sinais de nuvens distantes, anodização das peças metálicas e revestimento preto e fosco nas paredes do laboratório. A fim de calibrar e validar as medidas do LIDAR foram feitas comparações entre as medidas do LIDAR e do Fotômetro de Rastreamento Solar CIMEL em relação à Espessura Óptica Atmosférica (EOA) e à Razão de Lidar (RL). Os perfis de coeficiente de retroespalhamento foram classificados em Categorias de acordo com algumas características comuns aos perfis em relação ao número de camadas em diferentes alturas, possíveis fontes de poluição e meteorologia. Os valores das EOA se mostraram coerentes em relação à categorização dos perfis e entre os dois sistemas. Os valores de RL apresentaram uma grande variabilidade, compreendidos num intervalo entre 10 e 108 sr. Através da análise temporal de RL foi observado uma tendência temporal apresentando valores menores para as estações úmidas e valores maiores para as estações secas. No entanto, investigações futuras utilizando uma quantidade maior de medidas são necessárias para que o comportamento deste parâmetro seja melhor entendido.

ESTUDO DO PERFIL VERTICAL DE AEROSSÓIS NA TROPOSFERA UTILIZANDO A TÉCNICA DE LIDAR

Renata Fernandes de Souza

ABSTRACT

In this work we measure the optical properties of the atmosphere in the city of São Paulo. A LIDAR system was used to characterize the vertical profile of the aerosol backscatter coefficient at 532 nm up to an altitude of 4-6 Km above sea level. We studied the geometrical and electronic parameters of the system such as transmittance of the mirrors, the photomultiplier's saturation, alignment and background noise, which are very important for a good interpretation of the data. With this study it was possible to establish some criteria to optimize the system such as the alignment using the maximization of the far cloud's signals, anodization of the metallic parts of the system and special black paint to minimize the effects the light scattering of the laser. In order to calibrate and validate the LIDAR measurements it was compared the data obtained with the LIDAR and the CIMEL sun-tracking photometer related to the Atmospheric Optical Thickness (AOT) and the LIDAR Ratio (LR). Profiles of the aerosol coefficient backscatter were classified in the categories according to some common characteristics to the profiles related to number of layers of aerosol in different heights, probable pollution sources and meteorology. Values of the AOT and the profile's categorization showed coherence among the both systems. The LR values showed a considerable variability in the 10-108 sr range. One can see, with the temporal analyses of the LR, a tendency towards to lower values attributed to humid season and bigger values to dry season. Nevertheless, further investigations using a bigger number of data are necessary to understand the behavior of this parameter.

SUMÁRIO

Página

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Um Breve Histórico.....	2
1.1.1. O Laser.....	2
1.1.2. Sensoriamento Remoto.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS.....	6
3.1. Sensoriamento Remoto da Atmosfera.....	6
3.1.1. Aspectos Gerais.....	6
3.1.2. Processos de Interação da Radiação Eletromagnética com a Atmosfera.....	8
3.2. Aerossóis.....	11
3.3. Aspectos Gerais da Poluição do Ar na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).....	12
3.4. Propagação da Radiação (lasers) através da Atmosfera.....	14
3.4.1. Extinção Atmosférica.....	14
3.4.1.1. Extinção devido à Absorção por Moléculas.....	16
3.4.1.2. Extinção devido ao Espalhamento por Moléculas.....	16
3.4.1.3. Extinção devido à Absorção e Espalhamento por Partículas.....	18
3.4.2. Retroespalhamento Elástico.....	23
3.4.2.1. Retroespalhamento por Moléculas.....	23
3.4.2.2. Retroespalhamento por Partículas.....	24

3.5. Interações Atmosféricas versus sinal Lidar	26
3.5.1. Solução da Equação LIDAR e Determinação dos Parâmetros Físicos dos Aerossóis.....	29
3.5.2. Razão de LIDAR (RL).....	31
3.6. CIMEL – Fotômetro de Solar de Rastreamento.....	31
3.6.1. Razão de Lidar (RL) do CIMEL.....	34
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA.....	36
4.1. Instrumentação Lidar.....	36
4.1.1. Telescópio.....	36
4.1.2. Detectores.....	39
4.1.3. Laser.....	41
4.1.4. Sistema de Armazenamento de Dados.....	42
4.1.4. Programa de Análise de Dados.....	43
4.2. CIMEL versus Lidar – Metodologia de Comparação.....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
5.1. Otimização do Sistema.....	47
5.1.1. Espectro de Transmissão dos Espelhos Utilizados no Sistema Lidar.....	47
5.1.2. Alinhamento do Sistema.....	48
5.1.3. Saturação da Fotomultiplicadora.....	48
5.2. Resultados da Comparação CIMEL versus LIDAR	49
5.2.1. Tabelas de Comparação	49

5.2.2. Categorização dos Perfis de Coeficiente de Retroespalhamento.....	53
5.3. Análise dos Perfis e Parâmetros para o 2001	57
5.3.1. Categoria A – Perfis e Parâmetros.....	58
5.3.2. Categoria B – Perfis e Parâmetros.....	58
5.4.3. Categoria C – Perfis e Parâmetros.....	59
5.4. Análise dos Perfis e Parâmetros para o 2002	59
5.4.1. Categoria A – Perfis e Parâmetros.....	59
5.4.2. Categoria B – Perfis e Parâmetros.....	60
5.4.3. Categoria C – Perfis e Parâmetros.....	60
5.5. Análise dos Perfis e Parâmetros para o 2003.....	61
5.5.1. Categoria A – Perfis e Parâmetros.....	61
5.5.2. Categoria B – Perfis e Parâmetros.....	61
5.5.3. Categoria C – Perfis e Parâmetros.....	62
5.6. Análise Temporal da Razão de LIDAR (RL).....	62
6. CONCLUSÕES.....	68
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar em grandes cidades é um dos mais importantes problemas do nosso tempo. São Paulo está entre as cinco maiores áreas metropolitanas do mundo, assim como está entre as mais poluídas com uma população superior a 17 milhões de habitantes¹. Em todas as grandes cidades, a atividade humana tem um enorme impacto na qualidade do ar e por conseqüência na saúde de sua população. Neste contexto é necessário melhorar os meios de monitoração e controle de qualidade do ar, especialmente através do desenvolvimento de sistemas compactos, com rápida recuperação de dados e alta resolução espacial e temporal.

O sensoriamento remoto da atmosfera com a utilização de laser tornou-se um poderoso instrumento no estudo da atmosfera e, dada a sua semelhança de operação e princípios físicos com as técnicas de radar, recebeu o nome de *LIDAR*, acrônimo para *Light Detection and Ranging*.

Um instrumento LIDAR é composto de quatro componentes principais: um sistema de coleta e envio do feixe (telescópio), uma fonte de luz (laser), um sistema de detecção (detectores) e um sistema de armazenamento de dados. O feixe do laser é emitido para a atmosfera, este por sua vez interage com os constituintes durante sua propagação e a luz retroespalhada é coletada pelo telescópio, transformada em sinal elétrico pelo sistema de detecção e este por sua vez é digitalizado e armazenado em um sistema analógico ou digital tais como placas de aquisição, osciloscópios, etc. Abaixo segue uma ilustração com o esquema de funcionamento de um sistema LIDAR.

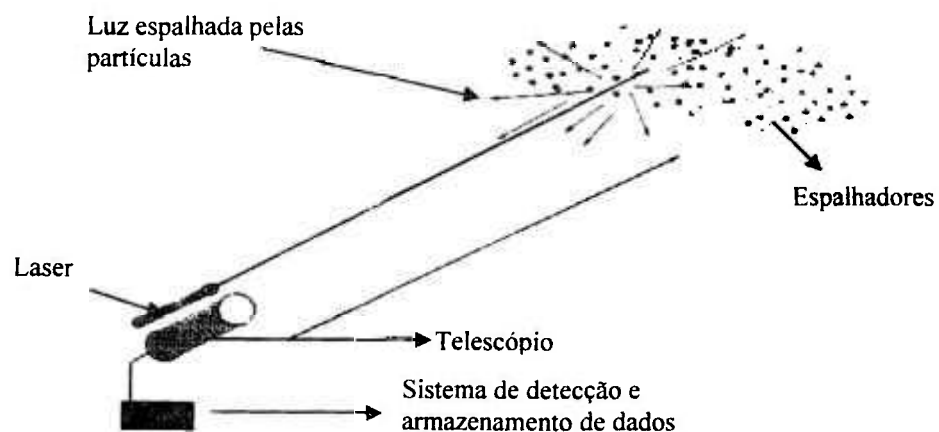


Figura 1.1. Ilustração do funcionamento de um sistema LIDAR.

A radiação eletromagnética interage com os aerossóis e gases presentes na atmosfera através de diversos processos, dentre alguns estão o Espalhamento Rayleigh, o Espalhamento Mie, o Espalhamento Raman, a Fluorescência e a Absorção, produzindo diversos tipos de sinais LIDAR para o estudo da atmosfera.

A atmosfera possui um espectro de transmissão-absorção característico, no qual a região espectral, entre 300 nm e 1µm, funciona como uma “janela atmosférica”, onde não há fortes bandas de absorção em uma atmosfera limpa, ou seja, o fenômeno de espalhamento é predominante. O sistema LIDAR em estudo opera com uma fonte de laser centrada em 532 nm, ou seja, dentre os muitos processos de interação da radiação eletromagnética com a atmosfera, há a predominância do espalhamento por moléculas e partículas (Espalhamentos Rayleigh e Mie).

Através do sinal LIDAR, utilizando simples considerações de intervalo de tempo entre o sinal emitido e recebido, sabendo-se a velocidade de propagação da luz, a magnitude do sinal recebido pode ser caracterizada pelas propriedades de retroespalhamento e atenuação da atmosfera nas sucessivas distâncias definidas pela resolução espacial e temporal do sistema.

A técnica LIDAR é caracterizada por alta resolução espacial e temporal, permitindo a medição de pequenas concentrações de diferentes tipos de gases, aerossóis, vapor d’água e parâmetros meteorológicos locais tais como direção do vento e temperatura. Além disso, quando muitos comprimentos de onda são utilizados, o sinal LIDAR pode fornecer informações sobre a distribuição de tamanhos e composição dos constituintes atmosféricos.

1.1. Um Breve Histórico

1.1.1. O Laser

A palavra laser é formada pelas iniciais da expressão *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que significa amplificação de luz por emissão estimulada de radiação. A própria palavra laser é sucessora da palavra mais antiga *maser*, formada a partir de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Em 1917 Einstein ² mostrou teoricamente que a emissão estimulada de radiação deveria existir. A idéia de amplificar radiação pelo efeito de emissão estimulada

foi apresentada pelo físico soviético V. A. Fabrikant em 1939. Em 1952, os físicos soviéticos N. G. Basov e A. M. Prokhorov e, independentemente deles, o físico americano C. H. Townes ³ apresentaram a idéia de um amplificador para microondas, que foi inicialmente chamado “gerador a feixe molecular” e mais tarde, maser. Nos dois anos seguintes, equipes lideradas pelos mesmos físicos no Instituto Lebedev de Física na URSS e na Universidade de Columbia construíram o maser. Estes físicos, em 1964 receberam o Prêmio Nobel por seus trabalhos.

Nos anos seguintes, muitos pesquisadores se dedicaram ao desenvolvimento do laser, isto é, o maser para amplificação de luz. Por isso, o termo laser foi inicialmente chamado de “maser óptico”. O primeiro “maser óptico”, apresentando em 1960, foi um laser de rubi sintético, construído pelo físico americano T. H. Maiman ⁴. No mesmo ano, foi demonstrado o funcionamento do laser de He-Ne, que é o laser na região do visível mais conhecido ⁵. Os principais tipos de lasers a gás, de estado sólido e semicondutores foram essencialmente desenvolvidos nos anos 60 e início dos anos 70. A partir do início da década de 60, a história dos lasers é difícil de ser resumida devido à enorme variedade de sistemas utilizados ^{6, 7}.

O fato é que o laser é uma ferramenta única. Graças às suas propriedades de intensidade, coerência, monocromaticidade e alta resolução espacial e temporal, esta ferramenta tornou-se uma solução para uma série de problemas, sejam eles no trabalho ou lazer. Nos dias de hoje as aplicações dos lasers são muitas. Entre elas podemos citar: aplicações médicas, odontológicas, telecomunicações, pesquisa, leitura ótica, sensoriamento remoto e outras.

1.2. Sensoriamento Remoto

Sensoriamento remoto é a ciência de obtenção de informações acerca de um objeto, área ou fenômeno, através da análise dos dados obtidos por instrumentos localizados a alguma distância desses alvos.

O princípio do radar foi primeiramente explorado através do uso de radiofrequências para detecção de alvos tais como navios e aeronaves. O termo LIDAR foi primeiramente utilizado em 1953, no entanto já no início de 1930 o conceito de exploração da densidade e carga de poeira na alta atmosfera através de técnicas de espalhamento foi obtido pela observação do espalhamento de um feixe de holofote verticalmente

direcionado com um fotodetector localizado remotamente, no entanto a relação sinal ruído era muito insatisfatória, já que a fonte de luz era policromática, não coerente e pouco colimada. Foi de fato, em 1939, que os meteorologistas franceses anteciparam o radar meteorológico, em quase todos seus aspectos com a utilização de um sistema para medições de bases de nuvens utilizando uma fonte de luz pulsada. É importante ressaltar que estas medições foram feitas muitos anos antes do desenvolvimento de fontes de radiação com comprimento de onda da ordem de centímetros, desenvolvimento este que permitiu o uso da radiofrequência na exploração da atmosfera ⁸.

Com o desenvolvimento dos lasers a partir de 1960, ficou clara a superioridade na qualidade das técnicas de sensoriamento remoto da atmosfera, principalmente em virtude da alta potência e colimação do feixe de luz, permitindo seu uso em diversos tipos de estudos, tais como a avaliação da presença de partículas e gases na atmosfera, monitoração de emissão de gases de chaminés das indústrias, prospecção de petróleo como indicador de vazamentos e emanações espontâneas do solo até sistemas de vigilância militar de armas químicas e biológicas ⁹.

Hoje em dia, sistemas LIDAR são utilizados para uma grande variedade de medidas atmosféricas, fornecendo informações que podem ser únicas ou complementares com medidas feitas através do sensoriamento remoto passivo ou medidas realizadas *in situ*.

Na aplicação de monitoração de poluentes na atmosfera, os sistemas LIDAR podem fornecer, com uma fonte de laser de comprimento de onda de largura de banda estreita, informação da presença e distribuição de partículas de uns poucos nanômetros a cerca de 100 mm de diâmetro e, se o LIDAR for operado com dois sinais distintos em comprimento de onda, pode-se obter informação da concentração específica do conteúdo de gases na atmosfera, atingindo-se um nível de sensibilidade de até 0,1 ppb, no caso das concentrações moleculares ¹⁰.

Dentre as principais vantagens que a técnica de sensoriamento remoto apresenta quando comparada com outras técnicas *in situ* existentes está a possibilidade da monitoração da atmosfera sem, entretanto ser necessário haver interferência nos constituintes em estudo, ou seja, não há necessidade de extração das fontes de gases ou aerossóis, eliminando a possibilidade da modificação da amostra durante a medição.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram a caracterização do sistema Lidar através do estabelecimento de critérios de otimização da geometria e eletrônica de aquisição e análise de dados, a realização das medidas das propriedades ópticas da troposfera de São Paulo, a fim de caracterizar o perfil vertical do coeficiente de retroespalhamento em 532 nm até altitudes de 4-6 Km acima do nível do mar e finalmente a validação e calibração das medidas do Lidar através da comparação direta com medidas das propriedades atmosféricas fornecidas pelo fotômetro de rastreamento solar CIMEL.

O sistema de retroespalhamento LIDAR, primeiro deste tipo no Brasil, está situado na área periférica na cidade de São Paulo (23°33' S, 46°44' W) no Centro de Lasers e Aplicações (CLA) localizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

Primeiramente foi feita a caracterização do sistema LIDAR, através do estabelecimento de critérios de otimização da geometria e eletrônica de aquisição e análise de dados a fim de melhorar a relação sinal ruído e também conseguir um melhor compromisso entre a operação do equipamento e as condições atmosféricas disponíveis.

Em virtude do uso de uma instrumentação delicada em relação aos parâmetros geométricos e eletrônicos do sistema e a uma análise de dados que possui uma certa complexidade no que concerne à solução da equação de LIDAR, existem muitos erros que afetam suas medidas. Uma maneira de se melhorar a calibração e validação das medidas é fazer a comparação direta com medidas de sensores *in situ*, utilizando diversos tipos de instrumentos, tais como balões de sondagem, aeronaves, ou ainda com instrumentos muito próximos ao sistema LIDAR investigando o mesmo volume atmosférico, propiciando uma confiabilidade muito maior na comparação das medidas. Tendo esse procedimento em mente, as medidas do LIDAR foram analisadas em sinergia com as medidas de propriedades atmosféricas na região do visível (532 nm) fornecidas pelo fotômetro de rastreamento solar CIMEL que pertence à rede AERONET¹¹, a fim de minimizar as incertezas em virtude das suposições feitas em relação às propriedades ópticas de retroespalhamento e composição dos aerossóis que são necessárias à solução da equação LIDAR.

A caracterização do perfil vertical do coeficiente de retroespalhamento permitiu um estudo da distribuição de camadas de aerossóis na baixa troposfera. Através deste estudo, foi feita uma classificação dos perfis de acordo com três diferentes

categorias, em cada qual foram observadas algumas características comuns aos perfis, tais como número de camadas em alturas diferentes, potenciais fontes de poluição e meteorologia. Além da categorização dos perfis verticais de retroespalhamento, foi feito um estudo do comportamento temporal da Razão de Lidar denotado por RL, parâmetro este crucial para uma interpretação quantitativa dos dados.

3. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

3.1. Sensoriamento remoto ativo – LIDAR

3.1.1. Aspectos gerais

A técnica LIDAR, na sua forma mais simples, consiste na emissão de uma fonte laser que pode ser enviada de uma base terrestre móvel ou fixa ou ainda de plataformas não terrestres tais como aeronaves e helicópteros. A radiação emitida interage com os componentes atmosféricos, técnica esta classificada como sensoriamento remoto ativo, diferente dos meios passivos que observam os níveis de radiação natural na atmosfera proveniente da energia Solar, emitidos na superfície da Terra ou através da luz solar transmitida pela atmosfera.

Uma classificação interessante para se entender as interações entre a radiação eletromagnética e a atmosfera é mostrada por Stephens ¹² onde as categorias dos tópicos são discutidas em termos de:

- a) Métodos de extinção;
- b) Métodos de emissão;
- c) Métodos de espalhamento;

No primeiro caso (item a) faz-se a observação da radiação de uma dada fonte conhecida, e a quantidade de radiação atenuada ou perdida no feixe é transmitida para um sensor (detector), determina-se a partir daí os constituintes atmosféricos presentes no caminho entre a fonte e o sensor. No método de emissão (item b), o objeto atmosférico é a fonte que emite radiação que é medida para se obter informação da estrutura atmosférica e

outras propriedades correlatas¹⁴. A terceira categoria de sensoriamento remoto (item c), explora as propriedades de espalhamento da radiação eletromagnética, havendo a possibilidade desse espalhamento ser elástico, sem alteração entre as frequências incidente e espalhada, ou ser inelástico, ocorrendo então um desvio da frequência após o espalhamento.

A técnica LIDAR para monitoração de aerossóis na troposfera envolve principalmente o fenômeno de espalhamento elástico em virtude do comprimento de onda do laser utilizado e das propriedades ópticas de espalhamento dos aerossóis. A radiação eletromagnética interage com os constituintes atmosféricos, e uma pequena fração desta energia é retroespalhada na direção do sistema LIDAR e se encontra disponível para detecção. A maior parte da energia não é detectada devido ao espalhamento da luz em direções diferentes daquela onde se encontra o sistema LIDAR e em menor proporção, à absorção por gases e partículas presentes na atmosfera. Ambos os processos atuam reduzindo a intensidade do feixe do laser que é detectado, fenômeno este chamado de atenuação ou extinção. A energia retroespalhada é coletada em um sistema de detecção e transmitida para um fotodetector, produzindo um sinal elétrico proporcional à intensidade óptica recebida. Como a velocidade da luz é conhecida, a distância dos constituintes atmosféricos responsáveis pelo espalhamento e que produzem o sinal LIDAR pode ser determinada através do intervalo de tempo desde a transmissão do feixe e a sua detecção. A magnitude do sinal recebido é determinada pelas propriedades de retroespalhamento da atmosfera nas sucessivas distâncias e também pela extinção atmosférica.

O sinal elétrico do fotodetector contém informações sobre a presença e distância dos espalhadores e absorvedores atmosféricos. Estes sinais podem ser apresentados e armazenados através de um dispositivo registrador, permitindo uma visualização da intensidade do sinal em função da distância.

A evolução quantitativa do sinal LIDAR apresenta uma certa complexidade, entretanto deve ser observado que tanto na representação qualitativa quanto na evolução quantitativa, o fator limitante para o sinal detectável é o nível de ruído em virtude de várias fontes de radiação adicionais, tais como ruído térmico de circuitos elétricos, ruído do fotodetector e, provavelmente o mais importante, o ruído causado pela energia óptica, normalmente de origem solar, presente como luz de fundo. Em virtude do alto grau de monocromaticidade do laser, fontes adicionais de luz podem ser excluídas com o uso de filtros de bandas estreitas centrados na frequência do laser ou com o uso de sistemas mais sofisticados tais como monocromadores e grades de difração.

3.1.2. Processos de interação da radiação eletromagnética

A atmosfera consiste primariamente de nitrogênio e oxigênio. Estas moléculas representam aproximadamente 99% do ar seco, sendo que o argônio representa a maior parte do restante deste percentual (aproximadamente 1%). Vapor d'água, o qual é altamente variável, é o próximo constituinte mais abundante na atmosfera, seguido pelo dióxido de carbono. Muitos outros gases estão presentes em pequenas concentrações. Além dos gases, a atmosfera consiste de partículas sólidas e água em estado líquido ou sólido ⁹.

Muitos dos constituintes atmosféricos modificam a transmissão da radiação eletromagnética através da atmosfera e é esta modificação (atenuação, absorção e espalhamento) que se torna um parâmetro mensurável na investigação da atmosfera com o uso do laser.

A atmosfera pode ser dividida em camadas, cada qual é caracterizada pela sua estrutura de temperatura. Na troposfera, camada da atmosfera em estudo neste trabalho, a temperatura diminui a partir da superfície em função da altitude até aproximadamente 10-12 Km. Dentro da troposfera, o vapor d'água é altamente variável, e podem alcançar concentrações que variam de 1% até 3%. Dentre os outros constituintes em menor concentração estão os aerossóis, que são responsáveis pela redução da visibilidade da atmosfera, proporcionam locais de reação para gases poluentes, modificam a precipitação, podem funcionar como núcleos de condensação de nuvens e ainda desempenham um papel importante no balanço energético do planeta ¹³.

O estudo da atmosfera é uma atividade que antecede a invenção do laser, mas após o advento deste tornou-se clara a superioridade dessa ferramenta no estudo da atmosfera face à potência e propriedades geométricas (divergência e coerência) de um feixe laser. A partir do desenvolvimento de técnicas de geração de pulsos de curta duração é que se consolidou o uso de sistemas LIDAR com laser, e hoje em dia, ao se mencionar simplesmente LIDAR fica clara a utilização de uma fonte laser em conjunto com o equipamento.

A utilização de sistemas de sensoriamento com laser levam em conta processos de interação da radiação eletromagnética com os constituintes atmosféricos tais como o Espalhamento Rayleigh, Espalhamento Mie, Espalhamento Raman, Ressonância, Fluorescência, Absorção e Absorção Diferencial. Na literatura há uma vasta descrição dos princípios físicos envolvidos e técnicas experimentais de cada um desses processos ^{14, 15},

aqui segue uma breve descrição desses processos e os parâmetros principais estão resumidos na tabela 3.1.2.1.

Espalhamento Rayleigh – a radiação do laser é espalhada elasticamente por átomos e moléculas, ou seja, não há alteração na frequência da radiação incidente;

Espalhamento Mie – a radiação do laser é espalhada elasticamente por pequenas partículas (de tamanho comparável ao comprimento de onda da radiação) e também não há alteração na frequência da radiação incidente;

Espalhamento Raman – a radiação é espalhada inelasticamente por moléculas, ou seja, há uma mudança na frequência da radiação incidente, a qual é característica da molécula em estudo;

Espalhamento Ressonante – a radiação espalhada é proveniente da absorção e reemissão da radiação por átomos devido a uma transição eletrônica, onde não há mudança na frequência da radiação incidente;

Fluorescência - a radiação espalhada é proveniente da absorção da radiação por átomos ocorrendo uma transição eletrônica e reemitida numa frequência menor daquela que foi incidida;

Absorção – a radiação é absorvida devido às bandas de absorção de determinadas moléculas ou átomos;

Absorção e Espalhamento Diferencial (AED) – duas fontes de radiação de diferentes frequências são emitidas, onde uma das fontes possui frequência próxima de uma determinada banda de transição molecular enquanto que a outra fonte possui uma frequência diferente da banda de transição molecular;

Tab. 3.1.2.1. Interações Relevantes em Sensoriamento Remoto com um Sistema LIDAR

TIPO	ELÁSTICA	ESPÉCIE	Intervalo de Secção de Choque (cm ² / sr)
Rayleigh	Sim	Átomos e Moléculas	10 ⁻²³ a 10 ⁻²⁵
Mie	Sim	Aerossóis	10 ⁻⁶ a 10 ⁻²⁴
Raman	Não	Moléculas	10 ⁻²⁶ a 10 ⁻³¹
Ressonância	Sim	Átomos	10 ⁻²³ a 10 ⁻²⁵
Fluorescência	Não	Átomos e Moléculas	10 ⁻¹⁴ a 10 ⁻¹⁵ (Átomos) 10 ⁻²⁰ a 10 ⁻²² (Moléculas)
Absorção		Átomos e Moléculas	10 ⁻¹¹ a 10 ⁻²⁰
Absorção Diferencial	Sim, Não ^(a)	Moléculas	10 ⁻¹⁸ a 10 ⁻²⁴

a) a atenuação diferencial de 2 sinais é avaliada, uma frequência é concordante com uma transmissão molecular, enquanto outra é “sintonizada” fora da banda de absorção e, portanto, espalhada.

Podemos observar na Tabela 3.1.2.1 que a secção de choque para espalhamento Mie pode ser tão grande que sinais originários de outros processos seriam completamente mascarados, o que por outro lado implica na mensuração de concentrações muito baixas (ou variações destas) de aerossóis e material particulado. Em termos práticos, vemos que as secções de choque chegam a valores tão baixos que refinamentos nas técnicas de medida se tornam extremamente sofisticados, principalmente no que concerne à relação sinal-ruído, e encontram aí seu fator mais limitante.

Outro aspecto importante se refere à resposta espectral, isto é, ao espectro de transmissão-absorção molecular (atômico) da atmosfera que pode ser visto abaixo na Figura 3.1.2.2, que revela que o vapor de água e o dióxido de carbono são os principais absorvedores de radiação em uma atmosfera sem poluição. Entre 300 nm e 1 μm há pouca absorção, e as condições de céu limpo favorecem a predominância de espalhamento Rayleigh-Mie, enquanto que nas regiões de maior comprimento de onda há maior competição com os processos Raman e de absorção de moléculas e átomos⁹.

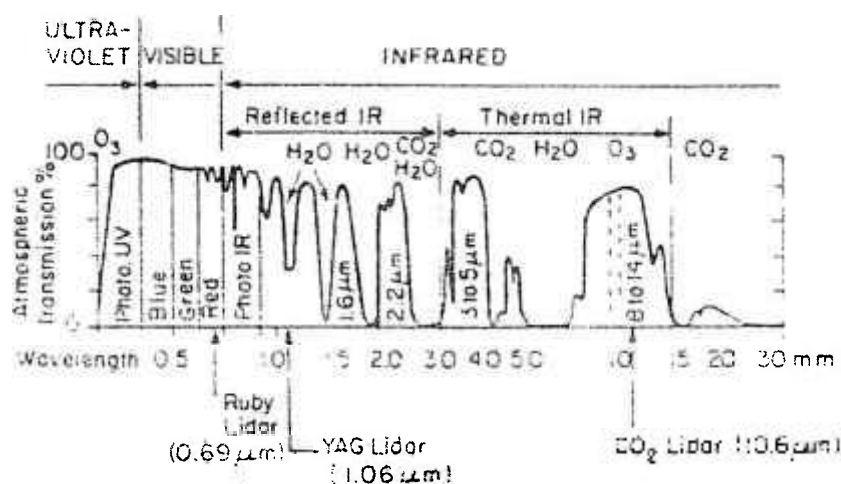


Figura 3.1.2.2 . Transmissão através da atmosfera terrestre¹⁵.

Dessa forma, as características de transmissão na atmosfera da parte correspondente à região visível do espectro (400 nm a 700 nm) são determinadas principalmente pelo espalhamento por particulados e moléculas gasosas, e a atenuação óptica aumenta gradativamente com o aumento de névoa, ou em função das condições de visibilidade.

3.2. Aerossóis (Material Particulado)

A atmosfera é um sistema constituído por gases, partículas sólidas e líquidas, que mantêm entre si um processo de interação física e química constante. Em uma área urbana, além dos componentes naturais presentes na troposfera, são lançados diariamente na atmosfera gases e partículas poluentes.

Os aerossóis são partículas sólidas ou líquidas em suspensão em um gás. Em física atmosférica, especialmente em sensoriamento remoto com LIDAR, costuma-se chamar apenas as partículas de aerossol, excluindo assim as moléculas, já que do ponto de vista de espalhamento óptico as duas espécies comportam-se de maneira diferente. Optamos aqui em referir sobre material particulado e aerossol de maneira indistinta, e quando for necessária a diferenciação entre eles será explicitada a natureza da espécie mencionada. As partículas de aerossol atmosférico são constituídas por uma mistura de partículas de origem primária (emissão direta da fonte) e secundária (transformação gás – partícula).

Os aerossóis podem permanecer suspensos na atmosfera por um longo período de tempo, da ordem de semanas e podem, portanto, ser transportados a longas distâncias por correntes de ar favoráveis, interferindo na química e física da atmosfera não somente em escala local como também em escala regional até global ¹⁶. O processo de remoção dos aerossóis ocorre basicamente por deposição seca e úmida. A deposição seca ocorre devido à ação da gravidade sobre as partículas, sendo mais eficiente na fração grossa do particulado, ou seja, partículas maiores que 2,5 µm. A deposição úmida ocorre por remoção dentro e abaixo das nuvens, devido à precipitação e é mais eficiente no caso de partículas pertencentes à fração fina, menores que 2,5 µm.

Em uma região metropolitana, os aerossóis são provenientes principalmente da queima incompleta de combustíveis e de seus aditivos de processos industriais e do desgaste do solo. Os aerossóis que contribuem para a poluição atmosférica de um ambiente urbano podem ser prejudiciais à saúde da população, influenciando diretamente em sua mortalidade. Alguns aerossóis são cancerígenos, como metais que contém arsênio, cromo, cádmio, chumbo, cobre, zinco e compostos orgânicos como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, dentre outros.

Os aerossóis possuem um papel definitivo no balanço radioativo do planeta, atuando na entrada e saída de radiação da atmosfera tendo implicações direta no clima,

uma vez que a fonte de energia que mantém a vida na biosfera em equilíbrio, depende da dinâmica no sistema Terra-atmosfera-oceanos, que por sua vez depende do equilíbrio radioativo entre todos os integrantes do sistema. Os aerossóis também podem atuar como núcleos de condensação de nuvens o que pode alterar as condições climáticas locais. Um efeito mais notório dos aerossóis está na redução da visibilidade na atmosfera.

As concentrações de aerossol podem atingir valores de 10^7 a 10^8 cm^{-3} . Os diâmetros dessas partículas cobrem 4 ordens de magnitude, de uns poucos nanômetros a cerca de 100 μm . As partículas geradas da queima de combustível automotivo, de geração de eletricidade, e queima de madeira incluem tamanhos de alguns nanômetros a 1 μm . Poeira, pólenes, fragmentos de plantas e sal marinho são, em geral, maiores que 1 μm .

Em termos de espalhamento óptico, os aerossóis cujas dimensões são menores que o comprimento de onda da radiação incidente ($r < 0,1\lambda$) espalham a radiação de forma similar ao espalhamento produzido pelas moléculas. Este espalhamento é descrito pela teoria conhecida como espalhamento Rayleigh. Quando as dimensões da partícula e o comprimento de onda da radiação são da mesma ordem de grandeza, o espalhamento apresenta propriedades mais complexas e a teoria que descreve esse tipo de espalhamento é conhecida como teoria de Mie, em homenagem a G. Mie que publicou uma solução para o problema em 1908¹⁷.

3.3. Aspectos gerais da poluição do ar na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP)

A atmosfera de um centro urbano é um complexo sistema constituído por gases e partículas poluentes que excedem as concentrações naturais da atmosfera e podem ser emitidas por fontes móveis, fixas ou gerados por meio de reações químicas.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) possui características geográficas e climáticas desfavoráveis à dispersão de poluentes, é um dos maiores conglomerados de metrópoles do mundo e está localizada no Estado de São Paulo na região sudeste do Brasil na Bacia Sedimentar do Planalto Atlântico a uma altitude média de 860 m do nível do mar. Possui uma extensão de 8.051 Km^2 com altitudes que variam de 650 m a 1200 m. Estas altitudes máximas são caracterizadas por serras ao redor da região urbanizada tendo a Serra do Mar a leste e a Serra de Paranapiacaba ao sul, Serra da Cantareira ao norte e outras a oeste, formando uma barreira à dispersão dos poluentes. O

clima pode ser resumido em duas estações bem definidas com um verão chuvoso e um inverso seco. O inverno é caracterizado pela ocorrência de freqüentes inversões térmicas com topo em baixas altitudes, o que é desfavorável à dispersão de poluentes.

A região apresentou nas últimas décadas um grande desenvolvimento industrial e comercial o que resultou num acentuado crescimento da população, levando a um colapso do sistema de transportes que não acompanhou o crescimento da cidade. Na década de 50 havia um índice de 20 habitantes por veículo e hoje em dia essa relação passou a ser de 2 habitantes por veículo, o que totaliza uma frota de aproximadamente 7,5 milhões de veículos que em sua maioria apresentam-se defasados tecnologicamente e em condições ruins de conservação, ou seja, emitem mais poluentes que os veículos modernos. A emissão de veículos movidos a diesel e gasolina é a principal fonte de gases e partículas poluentes na atmosfera ¹⁸. Além disso, na região coexiste um parque industrial com mais de 2.000 indústrias de alto potencial poluidor, responsáveis por 60% de toda atividade do Estado, onde a principal fonte de energia provém de usinas termelétricas, que em muitos casos utilizam a queima de óleo combustível em suas caldeiras, também contribuindo para a emissão de poluentes. Além das indústrias, a emissão de poluentes é causada por incineradores para destruição de resíduos tanto domiciliares quanto hospitalares ¹⁹.

Na RMSP, levando em consideração às peculiaridades da região, manter um padrão de qualidade do ar, onde a concentração de poluentes não comprometa a saúde da população é um desafio de extrema dificuldade. Por meio da respiração, as partículas de poluição menores que 2,5 µm podem atingir as vias respiratórias, das narinas aos alvéolos pulmonares, promovendo diferentes processos de inflamação que debilitam o sistema respiratório. Esses efeitos são mais notados em crianças, idosos e em pessoas que sofrem de doenças respiratórias e cardiovasculares, podendo levar a infecções mais graves como bronquites, pneumonias, asma e câncer ^{13.1}.

Considerando as características mencionadas, a região é geográfica e climaticamente desfavorável à dispersão de poluentes, situação esta agravada no período de inverno. Além desses fatores, possui uma enorme frota de veículos e possui uma grande quantidade de indústrias. Todos esses fatores geram uma preocupação devido às conseqüências dos poluentes na saúde da população. Vale ressaltar que esta preocupação existe em todas as grandes cidades do mundo que também sofrem com elevados níveis de poluição a exemplo de Cidade do México, Santiago, Atenas, etc.

3.4. Propagação da radiação (laser) através da atmosfera

A atmosfera determina o sinal LIDAR através de dois fatores: o coeficiente de retroespalhamento elástico β e o coeficiente de extinção (ou atenuação) α . A energia do laser atenuada pela atmosfera expressa pelo coeficiente de extinção, é resultado dos fenômenos de absorção molecular, espalhamento molecular, absorção por partículas e espalhamento por partículas, lembrando que o LIDAR detecta o retroespalhamento elástico, ou seja, o espalhamento na direção contrária àquela de propagação do feixe do laser.

As medidas do LIDAR podem fornecer informações de ambos os parâmetros atmosféricos, retroespalhamento elástico e extinção, desde que estes dois efeitos possam ser de alguma forma relacionados.

3.4.1. Extinção Atmosférica

Quando um feixe de luz atravessa a atmosfera ele sofre extinção devido ao espalhamento e a absorção. A redução na intensidade da luz incidente I sobre um incremento de caminho percorrido dz pode ser expressa como:

$$dI = -\alpha_{ext} I dz \quad [1]$$

onde α_{ext} é o coeficiente de extinção, em unidades de m^{-1} , dado por:

$$\alpha_{ext} = \sigma_{ext} N \quad [2]$$

N é o número total de concentração das partículas (partículas $\cdot m^{-3}$);

σ_{ext} : seção de choque de extinção (m^2)

Integrando a Eq. 1 temos:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\alpha_{ext} z) \quad [3]$$

O produto $\alpha_{ext,z}$ é chamado de espessura óptica e denotado por τ e a equação acima é chamada de Lei de Lambert-Beer. A espessura óptica indica a quantidade de material absorvedor e espalhador opticamente ativo encontrado no caminho percorrido pelo feixe de radiação, sendo adimensional. A Eq. 3 pode ser reescrita como:

$$I = I_0 \exp(-\tau) \quad [4]$$

A Eq. 4 mostra que um feixe de radiação ao atravessar um meio sofrerá atenuação exponencial ¹³.

A Espessura Óptica de Aerossóis, definida a partir deste momento como EOA, na região visível do espectro para aerossóis troposféricos pode assumir valores menores que 0,05 em atmosferas limpas até valores próximos de 1 para atmosferas próximas de intensa emissão de material particulado.

A lei de Lambert-Beer pode ser utilizada para cálculo da transmissão atmosférica. Ela apresenta uma relação entre vários parâmetros, sendo estes a radiação incidente, a radiação atenuada e a EOA, a qual pode ser decomposta em espalhamento e absorção por componentes. Desse modo, o coeficiente de extinção pode ser escrito como uma soma de quatro termos:

$$\alpha_{ext} = \alpha_m^{abs} + \alpha_m^{esp} + \alpha_p^{abs} + \alpha_p^{esps} \quad [5]$$

α_m^{abs} : coeficiente de extinção devido à absorção por moléculas;

α_p^{abs} : coeficiente de extinção devido à absorção por partículas;

α_m^{esp} : coeficiente de extinção devido ao espalhamento por moléculas;

α_p^{esp} : coeficiente de extinção devido ao espalhamento por partículas.

3.4.1.1. Atenuação atmosférica devido à absorção por moléculas

O coeficiente de extinção devido à absorção molecular da atmosfera α_m^{abs} é dependente do comprimento de onda em primeira ordem, se tornando uma componente dominante no coeficiente de extinção α na vizinhança das linhas de absorção e bandas de

vários gases atmosféricos. Esta forte absorção ocorre mais freqüentemente na região do espectro do ultravioleta ($\lambda < 300$ nm) e infravermelho ($\lambda > 900$ nm), o que acarreta numa limitação severa para o intervalo de comprimento de onda para medidas de sensoriamento remoto. Por outro lado, estas características espectrais podem ser exploradas pela técnica de absorção diferencial que fornece medidas de sensoriamento remoto de constituintes gasosos específicos. Na região visível do espectro a radiação é pouco atenuada, pois não há fortes bandas de absorção.

3.4.1.2. Atenuação atmosférica devido ao espalhamento por moléculas

Como o tamanho das moléculas é muito pequeno comparado aos comprimentos de onda da radiação laser, o fenômeno de espalhamento é descrito pelo Espalhamento Rayleigh. Espalhadores de diâmetro menor que $0,1 \mu\text{m}$, utilizando uma fonte de laser de comprimento de onda na região do visível, obedecem a esse tipo de regime. No espalhamento Rayleigh, a luz é espalhada simetricamente e a dependência da forma da molécula é pequena.

A secção de choque diferencial de Espalhamento Rayleigh é dada por:

$$\frac{d\sigma_{\text{esp}}(\theta, \phi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N^2\lambda^4} \{ \cos^2 \phi \cos^2 \theta + \text{sen}^2 \phi \} \quad [6]$$

θ : ângulo entre a radiação incidente e espalhada;

ϕ : ângulo de polarização;

Ω : ângulo sólido;

λ : comprimento de onda da radiação incidente e espalhada;

N : densidade dos espalhadores;

n : índice de refração dos espalhadores.

A Fig. 3.4.1.2.1 mostra o comportamento do espalhamento da luz por uma partícula no regime de Espalhamento Rayleigh. A intensidade da luz espalhada é simétrica nas direções da frente e de trás e independente da forma da partícula.

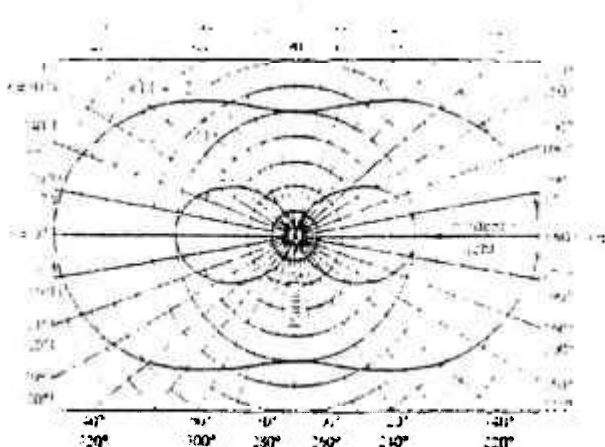


Fig. 3.4.1.2.1. Comportamento geométrico do Espalhamento Rayleigh ¹³.

A secção de choque total de Espalhamento Rayleigh é dada por:

$$\sigma_{\text{total}} = \frac{8\pi}{3} \left[\frac{\pi^2 (n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \right] \quad [7]$$

n : índice de refração das partículas;

N : densidade dos espalhadores;

λ : comprimento de onda.

A equação acima mostra que, aumentando o comprimento de onda λ , a intensidade da luz espalhada é reduzida com a quarta potência de λ . Como resultado, pequenas espalhadores espalham a luz mais efetivamente para comprimentos de onda menores. Uma consequência é a cor azul do céu, fenômeno este observado por Lord Rayleigh.

Para uma radiação com comprimento de onda λ , a secção de choque de espalhamento Rayleigh em altitudes abaixo de 100 Km pode ser aproximada por:

$$\sigma_R = 4.56 \left[\frac{\lambda(\mu m)}{0.55} \right]^{-4} \times 10^{-27} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \quad [8]$$

3.4.1.3. Extinção atmosférica devido à absorção e espalhamento por partículas

Se considerarmos a atenuação devido apenas ao espalhamento Rayleigh obteríamos uma visibilidade de mais de 250 km, ao nível do mar, onde a densidade gasosa atinge a ordem de 10^{19} moléculas¹⁵, portanto, a contribuição das partículas é, sem dúvida, extremamente significativa, pois em condições muito favoráveis raramente a visibilidade atinge mais de 50 km.

A absorção e espalhamento elásticos da radiação por partículas esféricas representam um problema clássico em física e o formalismo matemático é chamado de Teoria de Mie que apresenta uma certa complexidade devido às diversas formas, tamanhos e composição das partículas existentes na atmosfera. Em virtude desta complexidade se torna útil a suposição de que as partículas presentes na atmosferas são esféricas e homogêneas, hipótese esta adotada por Mie¹⁷.

Os principais parâmetros que governam o espalhamento e a absorção da luz por uma partícula são: o comprimento de onda da radiação incidente, o tamanho da partícula e as propriedades ópticas da partícula relativas ao meio onde ela se encontra¹⁵. O parâmetro de tamanho da partícula geralmente é expresso como a relação da circunferência da partícula com o comprimento de onda da radiação incidente sendo um parâmetro de tamanho adimensional dado por:

$$a = \frac{\pi D}{\lambda} \quad [9]$$

a : parâmetro de tamanho da partícula;

D : diâmetro da partícula.

O índice de refração é um número complexo dado por:

$$N = n + ik \quad [10]$$

onde ambas a parte real n e a parte imaginária k são funções de λ . As partes real e imaginária do índice de refração representam as componentes absorvedoras e não absorvedoras, respectivamente. O índice de refração N é geralmente normalizado para o índice de refração do meio N_0 e denotado por:

$$m = \frac{N}{N_0} \quad [11]$$

onde o meio de interesse é o ar. Considerando o índice de refração do ar $N_0 = 1$, então $N_0 = 1,00029 + 0i$ em $\lambda = 532 \text{ nm}$ e, para considerações práticas N e m são idênticos¹³.

Para uma população de partículas esféricas, monodispersas e concentração N , o coeficiente de extinção é relacionado a eficiência de extinção adimensional Q_{ext} por:

$$\alpha_{ext} = \frac{\pi D^2}{4} N Q_{ext} \quad [12]$$

Quando estamos analisando uma população de partículas monodispersas, esféricas, de índice de refração idênticos, porém de diferentes tamanhos, temos que incluir uma função de distribuição de tamanhos $N(D)$ e o coeficiente de extinção é dado por:

$$\alpha_{ext} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi D^2}{4} Q_{ext}(m, a) N(D) dD \quad [13]$$

onde D_1 e D_2 corresponde ao intervalo de diâmetros das partículas.

O coeficiente de extinção pode ser expresso como a soma das contribuições de espalhamento e absorção denotados por α_{esp} e α_{abs} , respectivamente e expressões similares podem ser escritas para os dois processos, ou seja:

$$\alpha_{ext} = \alpha_{esp} + \alpha_{abs} \quad [14]$$

$$\alpha_{esp} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi D^2}{4} Q_{esp}(m, a) n(D) dD \quad [15]$$

$$\alpha_{\text{ext}} = \int_{c_1}^{c_2} \frac{\pi D^2}{4} \cdot Q_{\text{abs}}(m, a) n(D) dD \quad [16]$$

As fórmulas para cálculo das eficiências de espalhamento e absorção, conseqüentemente de extinção envolvem funções de Riccati-Bessel. As expressões são dadas por ¹³:

$$Q_{\text{exp}}(m, a) = \frac{2}{a^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \left[|x_k|^2 + |y_k|^2 \right] \quad [17]$$

$$Q_{\text{ext}}(m, a) = \frac{2}{a^2} \sum_{k=1}^{\infty} (2k+1) \text{Re}[x_k + y_k] \quad [18]$$

onde

$$x_k = \frac{a\psi_k(l)\psi_k(a) - l\psi_k(a)\psi_k(l)}{a\psi_k(l)\zeta_k(a) - l\zeta_k(a)\psi_k(l)} \quad [19]$$

$$y_k = \frac{l\psi_k(l)\psi_k(a) - a\psi_k(a)\psi_k(l)}{l\psi_k(l)\zeta_k(a) - a\zeta_k(a)\psi_k(l)} \quad [20]$$

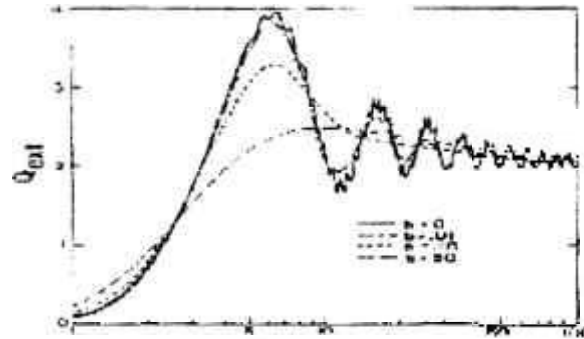
com $l = \alpha m$. As funções $\psi_k(z)$ e $\zeta_k(z)$ são funções recursivas de Riccati-Bessel, onde:

$$\psi_k(z) = \left(\frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} J_{k+\frac{1}{2}}(z) \quad [21]$$

$$\zeta_k(z) = \left(\frac{\pi z}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left[J_{k+\frac{1}{2}}(z) + i(-1)^k J_{-k-\frac{1}{2}}(z) \right] \quad [22]$$

Foi observado que a função de eficiência de extinção depende do índice de refração, do comprimento de onda da radiação, do tamanho e da forma da partícula. A Fig. 3.4.3.1 mostra algumas dessas dependências calculadas através da Teoria de Mie, como função do parâmetro de tamanho da partícula a para esferas de água iluminadas por uma

luz de comprimento de onda 500 nm e para diferentes valores da variância da distribuição de tamanhos. Podemos observar limites máximos e mínimos com a superposição de oscilações em menor escala.



$$a = \pi D/\lambda$$

Fig. 3.4.3.1. Eficiência de extinção como função do parâmetro de tamanho da partícula a para valores diferentes de variâncias b .

O espalhamento por partículas de tamanho comparáveis ao comprimento de onda da luz na região do visível (Espalhamento Mie) é o principal responsável pela redução da visibilidade na atmosfera. O espalhamento por partículas pode responder por 50 a 95% da extinção, dependendo do local. Em áreas urbanas estes valores podem estar entre 50 e 80% e áreas não urbanas com valores entre 80 a 95%. A absorção por partículas é da ordem de 5 a 10% no valor da extinção em áreas remotas podendo alcançar valores de até 50% em áreas urbanas. Partículas de diâmetro entre 0,1 e 1 μm são as mais efetivamente, por unidade de massa de aerossol, responsáveis pela redução da visibilidade. O coeficiente de espalhamento α_{esp} não é muito dependente da concentração de aerossol atmosférico neste intervalo de tamanho. Espalhamento por moléculas usualmente tem menor influência na visibilidade urbana. Para distâncias acima de 30 Km o efeito das moléculas pode ser maior ¹³.

3.4.2. Retroespalhamento elástico

O coeficiente de retroespalhamento elástico, denotado por β é uma soma de contribuições de moléculas e partículas, ou seja:

$$\beta = \beta_m + \beta_p \quad [23]$$

Dependendo da altitude a ser explorada há sempre um fator que domina mais o resultado de β . Em altitudes abaixo de alguns quilômetros, as concentrações típicas de material particulado são elevadas o suficiente para que o coeficiente de retroespalhamento β_p exceda, na maioria das vezes, a componente molecular β_m .

3.4.2.1. Retroespalhamento por moléculas

Para medidas de sensoriamento remoto com laser, o retroespalhamento é o fenômeno de grande importância, visto que o sistema mede diretamente o espalhamento na direção contrária daquela do feixe incidente na atmosfera, ou seja, a radiação retroespalhada. A seção de choque diferencial no caso de retroespalhamento por moléculas é dada por:

$$\frac{d\sigma_{esp}(\theta = \pi)}{d\Omega} = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{N^2 \lambda^4} \quad [24]$$

Essa relação pode ser aproximada pela equação empírica, válida para misturas gasosas até 100 km de altura ¹⁵:

$$\frac{d\sigma_{esp}(\theta = \pi)}{d\Omega} = 5,45 \left[\frac{\lambda(\mu m)}{0,55} \right]^{-4} \times 10^{-28} \text{ cm}^2 \text{ sr}^{-1} \quad [25]$$

onde se evidencia a dependência de λ com o inverso da quarta potência, típico da teoria Rayleigh de espalhamento, e que ainda negligencia uma pequena dependência do comprimento de onda devido ao índice de refração do ar. Ao nível do mar, onde a densidade de moléculas é $N_g = 2,55 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, obtém-se uma expressão aproximada para o coeficiente de retroespalhamento devido às moléculas:

$$\beta_m = 1,39 \times \left[\frac{\lambda(\mu m)}{0,55} \right]^{-4} \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad [26]$$

Essa expressão fornece valores suficientemente elevados para se ter sinais mesmo em sistemas LIDAR bem modestos.

3.4.1.2. Retroespalhamento por partículas

No caso do retroespalhamento por partículas, o tratamento é análogo aquele utilizado anteriormente no caso do espalhamento, onde o coeficiente de retroespalhamento por partículas é dado em função da eficiência de retroespalhamento:

$$\beta_p = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\pi D^2}{4} Q_{ret}(m, a) n(D) dD \quad [27]$$

Da mesma maneira que o espalhamento, o retroespalhamento depende do índice de refração da partícula, do parâmetro de tamanho e da distribuição de tamanhos das mesmas, sendo também expresso como uma série de funções de Riccati-Bessel. As expressões, uma vez calculadas, tanto para o espalhamento, quanto para o retroespalhamento, mostram um comportamento extremamente oscilante, que decresce à medida que o índice de refração aumenta. Fica também evidente, uma forte dependência com a distribuição de tamanhos das partículas. Valores apresentados na literatura para a relação entre o coeficiente de retroespalhamento e de extinção devido às partículas, denominada na literatura de Razão de Lidar (LR), mostram que para distribuições típicas de aerossóis e índices de refração, os valores estão no intervalo:

$$0,01sr^{-1} \leq \frac{\beta_p}{\alpha_p} \leq 0,10sr^{-1} \quad [28]$$

Uma característica do retroespalhamento Mie está nas propriedades de polarização do processo de espalhamento. Se a luz incidente é linearmente polarizada, a luz retroespalhada mantém a polarização linear da luz incidente, além disso, a secção de choque de retroespalhamento é independente da polarização da luz incidente. Estes resultados são conseqüências e estão de acordo com a simetria esférica dos espalhadores de Mie.

O tratamento apresentado assume o espalhamento simples, ou seja, que a radiação é espalhada uma única vez antes de ser detectada. Esta suposição é razoável em condições de céu limpo ou com poucos espalhadores presentes na atmosfera, no entanto

em áreas urbanas com alta concentração de partículas, o fenômeno de multiespalhamento se torna importante, mas seu tratamento é extremamente complexo.

Deve ser notado que o retroespalhamento por partículas atmosféricas reais de formas arbitrárias geralmente difere em diversos aspectos das hipóteses adotadas pela teoria de Mie, especialmente no caso onde as partículas possuem acentuadas não esfericidades, tais como cristais alongados ou no caso de partículas grandes que possuem um plano de superfície. Medidas de laboratório²⁰ a respeito da luz espalhada por placas de sílica irregulares, aleatoriamente orientadas têm indicado que a relação de extinção-retroespalhamento por partículas β_p/α_p pode ser menor em uma ordem de magnitude em relação aos valores calculados através da teoria de Mie para o mesmo índice de refração e distribuição de tamanho equivalente. Esta redução no retroespalhamento ocorre, muito provavelmente devido às hipóteses de esfericidade das partículas. Outras medidas de laboratório do espalhamento de luz por cristais de gelo têm mostrado uma redução similar no retroespalhamento²¹.

Um outro fator importante na redução do espalhamento observado empiricamente pelas partículas quando comparado com os resultados obtidos pela teoria de Mie é a probabilidade muito pequena, porém não nula da componente absorvente do índice de refração. Medidas recentes do índice de refração para a região do visível, para uma atmosfera não urbana, na região da troposfera em relação à partículas de névoa e poeira tem mostrado um índice de refração de

$$m = 1,5 - 0,007i \quad [29]$$

com uma incerteza ou variabilidade da ordem de 5% em n e um fator de aproximadamente 2 em k . Partículas de aerossóis urbanos, as quais contém significativa quantidade de carbono, tendem a ter valores maiores de k . Em atmosferas úmidas, onde as partículas podem acumular camadas de água líquida, as propriedades de espalhamento podem ser aproximadas daquelas que contém somente água, ou seja, $m = 1,33$ para comprimentos de onda na região do visível, onde a absorção da radiação é desprezível.

As propriedades de polarização para partículas não esféricas também se diferem substancialmente daquelas que são esféricas. Em geral, a polarização da luz retroespalhada por partículas não esféricas pode diferir da polarização incidente. Além disso, se as partículas não esféricas possuem algum tipo de alinhamento, o tamanho do

coeficiente de volume retroespalhado pode depender das direções de polarização e incidência em relação ao plano de alinhamento. Estes efeitos são especialmente evidentes no espalhamento da luz por cristais de gelo, como demonstrado através de cálculos e experimentos de laboratório.

Uma atmosfera real pode consistir de uma mistura de partículas homogêneas, com diferentes composições de partícula para partícula, ou ainda, uma única partícula pode conter algum tipo de heterogeneidade. Os efeitos do primeiro tipo de heterogeneidade entre as partículas foram discutidos por Bergstrom²², que enfatizou que as propriedades da luz espalhada por uma mistura não podem, em geral, ser considerada como uma simples média entre os índices de refração das partículas. Os efeitos do segundo tipo de heterogeneidade dentro de uma única partícula são extremamente difíceis de serem tratados teoricamente.

3.5. Interações Atmosféricas versus Sinal LIDAR

A forma como a equação de LIDAR pode ser expressa depende principalmente do tipo de interação entre a atmosfera e a radiação do laser. Esta por sua vez é determinada pela natureza da medida a ser feita. Para o estudo nos quais o retroespalhamento (elástico ou inelástico) é o fator principal, a forma da equação LIDAR é simples. Para situações que envolvem fluorescência, os efeitos de relaxação para espécies excitadas pela radiação laser devem ser considerados, o que leva a uma maior complexidade na forma da equação LIDAR e também em parâmetros relacionados ao laser e aos detectores, tais como período de integração do detector, forma e duração do pulso do laser, etc.

A atmosfera determina o sinal de LIDAR elasticamente espalhado por meio de dois fatores: o coeficiente de retroespalhamento β e o coeficiente de atenuação (ou extinção) α . A contribuição molecular para os coeficientes de retroespalhamento e extinção podem ser modeladas por perfis padrões atmosféricos de temperatura e pressão, ou medidos independentemente e, a partir desse procedimento, somente permanece desconhecida a contribuição de aerossóis para os coeficientes de retroespalhamento e extinção, os quais não podem ser determinados sem que sejam feitas algumas suposições e/ou alguns limites sejam incluídos na solução da equação.

A equação de LIDAR em função do alcance máximo do sinal, assumindo somente espalhamento simples, poder ser escrita da seguinte forma¹⁵:

$$P(R) = P_0 \left(\frac{c\tau}{2} \right) \beta(R) A_r R^{-2} \exp \left[-2 \int_0^R \alpha(R) dR \right] \quad [30]$$

$P(R)$: potência recebida num instante t ;

P_0 : potência transmitida num instante t_0 ;

c : velocidade de luz;

t : duração do pulso do laser;

R : distância do receptor ao espalhador;

A_r : área efetiva do receptor.

A determinação da distância e do incremento na distância em relação ao sinal que retorna são obtidos simultaneamente. Como o pulso do laser transmitido tem duração finita τ , ele ilumina um comprimento geométrico finito de tamanho $c\tau$ da atmosfera em qualquer instante. Entretanto, desde que a energia recebida se propagou durante a ida até o constituinte espalhador e retornou ao sistema de detecção, o comprimento atmosférico para os quais o sinal é recebido em qualquer instante de tempo τ , é somente a metade deste valor. Supondo que o início do pulso do laser ocorre em t_0 , a máxima distância para a qual a energia é recebida num instante de tempo t é dada pela metade da distância que a energia poderia se propagar, ou seja,

$$R = \frac{c(t - t_0)}{2} \quad [31]$$

No mesmo instante t , energia adicional é recebida de distâncias iluminadas por porções de pulso transmitido após o primeiro pulso. Como o segundo pulso foi transmitido num instante $t_0 + \tau$, a mínima distância para a qual a energia é recebida num instante de tempo t é dada por:

$$R' = \frac{c(t - t_0 - \tau)}{2} \quad [32]$$

onde

$$Lp = R - R' = \frac{c\tau}{2} \quad [33]$$

é chamada de “comprimento efetivo do pulso”, é o intervalo de distância para o qual sinais são recebidos em qualquer instante. É exatamente metade do atual comprimento instantaneamente iluminado pelo pulso do laser em virtude dos dois caminhos que devem ser percorridos por toda a energia recebida.

O coeficiente de volume de retroespalhamento β é definido como a quantidade fracional da energia incidente espalhada na direção oposta à direção da luz incidente por unidade de comprimento atmosférico, ou seja, a luz é espalhada para trás.

A expressão abaixo na equação LIDAR representa a transmitância fracional da energia ao longo dos caminhos a serem percorridos pela energia entre o sistema LIDAR e a distância R:

$$\exp \left(- 2 \int_0^R \alpha \, dr \right) \quad [34]$$

Esta transmitância depende de α , o coeficiente de extinção da atmosfera, o qual representa a fração pela qual o fluxo de energia na direção de propagação é reduzido por unidade de comprimento. Este termo representa a lei de Beer para a atenuação da radiação pela atmosfera.

3.5.1. Solução da equação LIDAR e determinação dos parâmetros físicos dos aerossóis

Fica evidente na equação do LIDAR que é necessário solucionar a equação para ambos os parâmetros ópticos $\beta(R)$ e $\alpha(R)$. Em geral, ambos os parâmetros são desconhecidos e é necessário assumir algum tipo de relação entre eles. Historicamente, a suposição de uma relação extinção-retroespalhamento tem sido discutida por Susano e Nakane, Klett, Keastner, entre outros. Em 1981 Klett²⁴ apresentou uma solução analítica estável para a solução deste problema, a qual se mostra muito apropriada para meio ambientes muito poluídos, no entanto algumas aproximações são necessárias:

- assume-se uma relação entre $\alpha(R)$ e $\beta(R)$;
- um valor de contorno para um dos parâmetros é conhecido;
- despreza-se a contribuição do particulado / gás para elevadas/baixas altitudes.

Para eliminarmos as constantes (como área ou fator de transmissão espectral do receptor), vamos introduzir uma nova variável definida pela relação:

$$S(R) = \ln\{P(R) R^2\} \quad [35]$$

A vantagem desta nova variável $S(R)$ é vista quando subtraímos da mesma um valor de S apropriado para alguma distância de referência R_{ref} :

$$S(R) - S(R_{ref}) = \ln\left\{\frac{P(R) R^2}{P(R_{ref}) R_{ref}^2}\right\} = \ln\left\{\frac{\beta(R) A(R)}{\beta(R_{ref}) A(R_{ref})}\right\} - \int_{R_{ref}}^R \alpha(R) DR \quad [36]$$

No caso de um sistema alinhado, temos $A(R) = A_0$, temos então:

$$S(R) - S(R_{ref}) = \ln\left\{\frac{\beta(R)}{\beta(R_{ref})}\right\} - \int_{R_{ref}}^R \alpha(R) dR \quad [37]$$

e esta diferença no valor de S depende somente de fatores atmosféricos. A forma diferencial da equação acima é:

$$\frac{dS(R)}{dR} = \frac{1}{\beta(R)} \frac{d\beta(R)}{dR} - \alpha(R) \quad [38]$$

Fica claro que a solução da equação acima só depende do conhecimento da Razão de Lidar, ou seja, se uma relação entre o coeficiente de retroespalhamento e o coeficiente de extinção for conhecida, a Eq. [38] pode ser solucionada para ambos. Se a forma espectral ou composição do aerossol varia conforme sua localização, pode-se assumir algum tipo de relação de proporcionalidade que é dependente da distância, porém em muitas circunstâncias não é possível se conhecer *a priori* a razão de extinção-

retroespalhamento em função da distância, logo uma razão constante em função da distância é utilizada, onde se assume que a distribuição de tamanhos e a composição dos aerossóis espalhadores não se alteram com a distância em relação ao sistema LIDAR e a variação no retroespalhamento de aerossóis ocorre em virtude somente da quantidade de aerossóis presentes na atmosfera. A forma utilizada para se relacionar ambos é assumir uma relação do tipo:

$$\beta = k.\alpha^g \quad [39]$$

onde g depende do comprimento de onda do LIDAR e das propriedades específicas dos constituintes de interesse. Klett ²³ indicou que os valores para este expoente estão entre $0,67 \leq g \leq 1,0$, e na ausência de absorção $g = 1,0$ e $k = 1,0$.

A solução da Eq. 38 para o perfil do coeficiente de retroespalhamento é dada por:

$$S'(R) - S'(R_{ref}) = S(R) - S(R_{ref}) - 16,755 \int_{R_{ref}}^R \beta(R) \left(\frac{1-0,12}{RL} \right) dR' \quad [40]$$

$$S(R) = \ln[P(R) - F] R^2 \quad [41]$$

$$\beta(R) = \beta_p(R) + \beta_m(R) \quad [42]$$

Os passos sucessivos para se obter a razão de retroespalhamento entre o coeficiente de partícula, β_p e o coeficiente molecular, β_m , e ainda os perfis verticais de $\alpha(R)$ e $\beta(R)$ a partir dos sinais não corrigidos de LIDAR, incluem a correção dos sinais em função da distância $S(R)$, a filtragem do sinal em relação à radiação de fundo F e a separação do sinal das contribuições devido às moléculas, que é feito através da modelagem do comportamento da contribuição molecular nos parâmetros da equação do LIDAR. Além disso, a solução da equação envolve o conhecimento à priori da Razão de Lidar RL .

3.5.2. A Razão de LIDAR (RL)

A solução da equação LIDAR, como dito anteriormente, envolve o conhecimento de duas incógnitas que são propriedades ópticas básicas de partículas de aerossóis: o coeficiente de retroespalhamento e o coeficiente de extinção. A análise

quantitativa dessas propriedades requer conhecimentos de suas relações ao longo do caminho do laser ²⁴. Estas relações são normalmente expressas na forma da razão de extinção-retroespalhamento RL em unidades de steradians:

$$RL = \frac{\alpha}{\beta} \quad [43]$$

α : é o coeficiente de extinção;

β : é o coeficiente de retroespalhamento.

Um estudo numérico sobre a RL feito por Ackerman ²⁴ utilizando hipóteses sobre a distribuição de tamanho dos aerossóis e índice de refração mostrou que a razão de RL pode variar entre 15 a 75 sr para aerossóis troposféricos, com valores baixos associados com pouca absorção e partículas de modo grossa (por exemplo, sal marinho, poeira mineral, etc) e altos valores associados à alta absorção e partículas mais finas.

Os cálculos através da Teoria de Mie utilizam muitas simplificações no que concerne às formas das partículas tais como considerá-las esferas homogêneas e concêntricas. Além disso, este procedimento teórico para determinar RL nunca pode ser mais acurado em comparação com conhecimentos experimentais de tamanho de partículas e índice de refração na qual o cálculo é baseado, o que implica no conhecimento de propriedades químicas das partículas. Por estas razões, determinações empíricas de RL são importantes.

Por estas razões, com o objetivo de se validar os valores obtidos pelo sistema LIDAR, optou-se por um método de comparação com os dados do fotômetro de rastreamento solar CIMEL que fornece parâmetros ópticos atmosféricos a partir dos quais pode se derivar a RL.

3.6. CIMEL – Fotômetro de Rastreamento Solar

O radiômetro espectral CIMEL ELETRONIQUE 318 A está instalado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo no Laboratório de Física Atmosférica (LFA). Este instrumento utiliza as radiâncias do céu e da auréola solar em vários ângulos de espalhamento em relação ao Sol através de um suposto perfil constante de aerossóis e

obtem assim a distribuição de tamanhos, a função de fase, espalhamento único de albedo e a EOA de aerossóis, sendo essa última o foco do nosso estudo. Estas medidas são realizadas em vários comprimentos de onda na região do espectro do visível e permite o cálculo do coeficiente de Ångström e da RL na mesma região espectral ²⁵ .

Para a relevância do nosso estudo de intercomparação os canais em comprimento de onda utilizados estão centrados em 440, 500, 670 e 870 nm. A precisão e acurácia do instrumento seguem o padrão definido pela rede mundial AERONET ²² e é periodicamente calibrada remotamente por computador ou localmente nos diversos laboratórios pertencentes à NASA (Goddard Space Flight Center), em Maryland, EUA. A metodologia de calibração assegura uma acurácia entre 1% e 3%, porém fatores atmosféricos e instrumentais influenciam a precisão e acurácia da EOA e, efetivamente, a incerteza total está em 10% para a EOA.

A inversão das radiâncias solares medidas pelo CIMEL baseia-se nos valores da EOA calculada pela equação de Lambert - Beer, assumindo que a contribuição de multiespalhamento dentro do campo de visão do fotômetro seja desprezível:

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^0 \exp\left(-\frac{\tau_{\lambda}}{\mu_s}\right) \quad [44]$$

I_{λ}^0 : irradiâncias no solo;

I_{λ} : irradiâncias no topo da atmosfera;

μ_s : o cosseno do ângulo solar zenital;

τ_{λ} : a EOA atmosférica total resultante das contribuições de espalhamento Rayleigh (molecular) e espalhamento por aerossóis, bem como as absorções pelo ozônio e a água, em 670 nm e 870 nm, respectivamente.

A EOA em 532 nm, comprimento de onda que o LIDAR opera, é derivada das medidas nos canais azul e vermelho, e derivada da dependência espectral da EOA de aerossóis na região visível do espectro:

$$\frac{\tau_{532}^{aer}}{\tau_{500}^{aer}} = \left(\frac{532}{500} \right)^{-\hat{a}} \quad [45]$$

τ_{532}^{aer} : EOA em 532 nm;

τ_{500}^{aer} : EOA em 500 nm;

\hat{a} : coeficiente de Ångström ²⁶

O coeficiente de Ångström é muito útil quando se quer representar a dependência do comprimento de onda com o coeficiente de extinção dos aerossóis e é calculado por:

$$\hat{a} = - \frac{d \log \alpha_{ext}}{d \log \lambda} \cong - \frac{\log \left(\frac{\alpha_{\lambda_1}}{\alpha_{\lambda_2}} \right)}{\log \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)} \quad [46]$$

O coeficiente de Ångström pode ser também um indicativo indireto da distribuição de tamanhos de aerossóis e sua possível composição ^{17,27}.

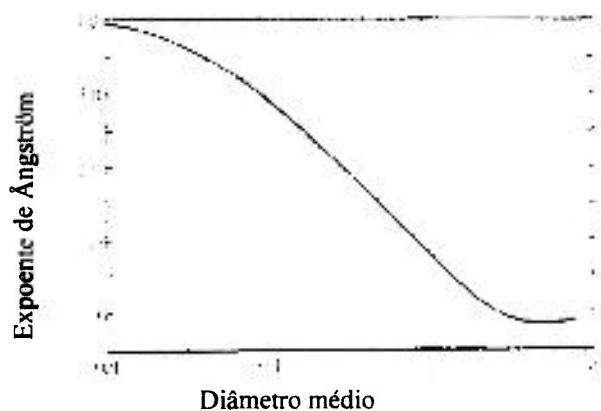


Fig. 3.6.1. Coeficiente de Ångström para uma distribuição log-normal de partículas de água com índice de refração $m = 1.33$ no comprimento de onda de intervalo de 500-700 nm.

O coeficiente de Ångström é obtido a partir da espessura óptica medidas em 440 e 870 nm, lembrando que a espessura em 500 nm também é fornecida pelo CIMEL:

$$\hat{a} = - \frac{\log \left(\frac{\tau_{440}^{aer}}{\tau_{870}^{aer}} \right)}{\log \left(\frac{440}{870} \right)} \quad [47]$$

\hat{a} : expoentê de Ångström;

τ_{440}^{aer} : EOA em 440 nm;

τ_{870}^{aer} : EOA em 870 nm.

3.6.1. Razão de LIDAR (RL) do CIMEL

A Razão de Lidar (RL) do CIMEL, assim como no caso do LIDAR, representa a fração da luz atenuada pelo feixe de radiação que foi retroespalhado. Esta relação pode ser obtida através dos parâmetros chamados de função de fase e Espalhamento Único de Albedo. Como visto anteriormente, a Razão de LIDAR (RL) é dada por:

$$RL = \frac{\alpha}{\beta} \quad [48]$$

α : é o coeficiente de extinção;

β : é o coeficiente de retroespalhamento.

A relação entre o espalhamento e a extinção da atmosfera é chamada de Espalhamento Único de Albedo ¹³, denotado por ω , ou seja:

$$\omega = \frac{\beta_s}{\alpha} \quad [49]$$

onde

β_s : coeficiente de espalhamento da radiação;

α : coeficiente de extinção devido ao espalhamento e absorção.

A distribuição angular da radiação espalhada por uma partícula num dado comprimento de onda é chamada de função de fase de espalhamento ou simplesmente função de fase e representa a intensidade da radiação espalhada num ângulo particular θ em relação à radiação incidente. No caso de partículas esféricas, a função de fase de espalhamento é dada por:

$$P(\theta, n, \lambda) = 4\pi \frac{\beta(\theta, n, \lambda)}{\beta_s(n, \lambda)} \quad [50]$$

$P(\theta, n, \lambda)$: é a função de fase de espalhamento;

$\beta(\theta, n, \lambda)$: é o coeficiente de espalhamento numa determinada direção angular;

$\beta_s(n, \lambda)$: coeficiente de espalhamento total;

n : é o índice de refração.

No caso de retroespalhamento temos $\theta = \pi$ e a função de fase é dada por:

$$P(\pi, \lambda) = \frac{4\pi\beta(\pi, \lambda)}{\beta_s(\lambda)} \quad [51]$$

onde,

$P(\pi, \lambda)$: é a função de fase de espalhamento em 180° ;

$\beta(\pi, \lambda)$: é o coeficiente de espalhamento em 180° ;

$\beta_s(\lambda)$: coeficiente de espalhamento total.

Combinando as Eq. 48, 49 e 51, e substituindo na Eq 47, temos que a RL do CIMEL é dada por:

$$RL = \frac{4\pi}{\omega P(\pi, n, \lambda)} \quad [52]$$

$P(\pi, n, \lambda)$: função de fase de retroespalhamento em 180° ;

ω : é o espalhamento único de albedo.

Lembrando que o CIMEL fornece a função de fase de retroespalhamento em diferentes ângulos, incluindo o ângulo de 180°, além do espalhamento unido de albedo para diferentes comprimentos de onda, permitindo assim que fosse calculada a RL para comparação com os dados obtidos pelo LIDAR.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

4.1. Instrumentação LIDAR

Um sistema LIDAR é composto por 3 módulos principais: sistema de coleta e envio de feixe (telescópio); sistema de detecção (detectores), fonte luminosa (laser), e um sistema de armazenamento de dados.

4.1.1. Telescópio

Há basicamente, duas configurações para os sistemas de envio e recepção do feixe de laser. O arranjo *biestático*, onde existe uma distância considerável entre o transmissor e o receptor, fornecendo considerável resolução espacial. Com a disponibilidade de lasers com largura de pulsos gerados de alguns nanosegundos, criou-se uma segunda opção de arranjo, o *monoestático*, onde o transmissor e o receptor compartilham da mesma localidade. O LIDAR monoestático, por sua vez, pode ser *coaxial* ou *biaxial*. Numa configuração coaxial, o feixe do laser coincide com o eixo óptico de recepção (telescópio), enquanto no arranjo biaxial, o feixe do laser só entra no campo de visão da óptica de recepção após uma certa distância pré-determinada. Esta configuração evita o problema de saturação dos detectores devido ao retroespalhamento próximo, porém não é tão eficiente quanto um sistema coaxial ¹⁵.

Um elemento importante na concepção da óptica de entrega (recepção) do sistema LIDAR é o telescópio refletor. Na figura abaixo temos as configurações de telescópios mais usuais em aplicações LIDAR.

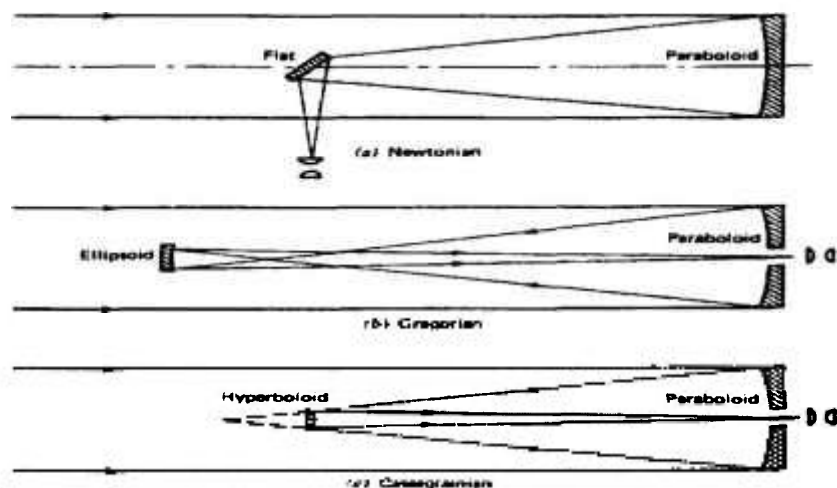


Figura 4.1.1.1. Sistemas de Telescópios – Newtoniano, Gregoriano e Cassegrainiano

Vemos aqui descritos três sistemas: o Newtoniano biaxial é o de mais fácil concepção, porém o sistema Cassegrainiano tem crescido em popularidade devido ao seu desenho compacto e longo comprimento focal, no entanto o substrato vazado utilizado para a construção do espelho parabolóide é muito mais caro e de difícil obtenção. Além disso, esses substratos têm que possuir coeficiente de dilatação térmica muito baixo, caso contrário, a variação de sinal devido à alterações do comprimento focal pode comprometer todo o projeto.

Na concepção de um telescópio há um compromisso forte entre a distância mínima a ser detectada, o diâmetro do espelho e sua distância focal. Optou-se por um Telescópio Newtoniano com emissão coaxial, intitulado MSP-LIDAR 1, com as seguintes características:

- Distância de “overlap” ~ 350 m
- Diâmetro do Espelho Primário: 30 cm
- Material do Espelho Primário: Duran 50 (baixo coeficiente de dilatação térmica)
- Distância Focal do Espelho: 130 cm
- Deposição de Filme de SiO e Alumínio para otimizar a recepção na luz visível e absorver no infravermelho

Em função destes valores, uma estrutura mecânica foi construída, com possibilidade de executar uma varredura azimutal, de 0° a 90°.

A seguir está apresentado um desenho do telescópio MSP-LIDAR 1 para efeito de ilustração e melhor idéia do sistema.

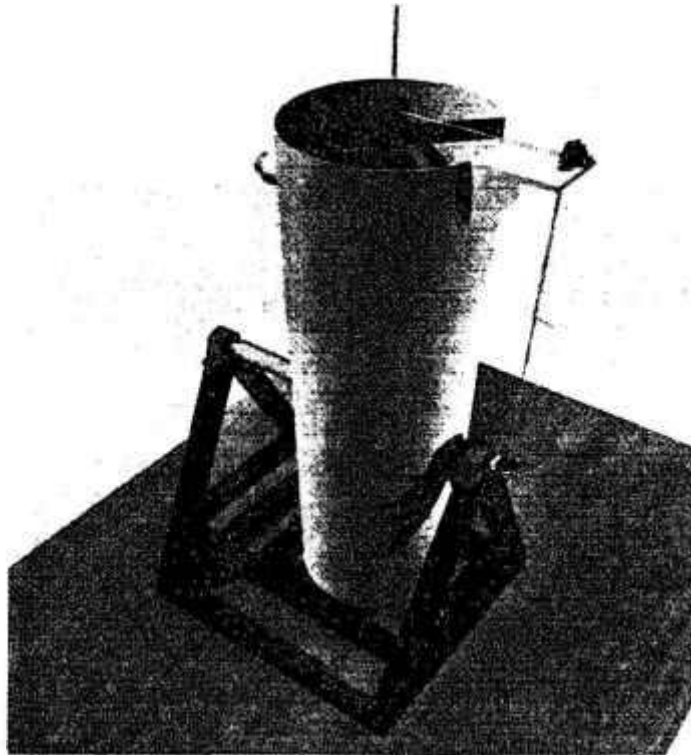


Figura 4.1.1.2. Desenho do Telescópio – observar o envio do feixe coaxialmente

Nos arranjos de sistemas biaxiais, como dito anteriormente, existe uma certa distância até que, durante propagação do laser, o mesmo coincida com o campo de visão do telescópio, esta distância é chamada de fator de “overlap” e é pré-determinada pelo sistema. Quando o feixe “entra” no campo de visão do telescópio, é dito que houve “overlap” do sistema e o fator de “overlap” assume valor 1. O “overlap” depende principalmente do ângulo de divergência do feixe do laser e do ângulo de abertura do telescópio, o que faz com que o alinhamento do sistema seja crucial para uma boa interpretação dos dados.

4.1.2. Detectores

As características instrumentais básicas em se determinar a escolha de um detector inclui a resposta espectral, a eficiência quântica, a frequência de resposta, o ganho de corrente e a corrente "escura". Algumas vezes, outras características tais como tamanho físico, robustez e custo são, também, importantes. Em muitos casos o comprimento de onda do sinal a ser detectado é o fator primário na seleção da classe de detectores a serem empregados em qualquer aplicação. Para comprimentos de onda entre 200 nm e 1 μm , ou seja, no ultravioleta ao infravermelho próximo, opta-se pelas fotomultiplicadoras^{28, 29} pelo seu ganho elevado e baixo ruído. A partir destas características desenvolveu-se a capacidade de detecção de um único fóton, permitindo assim a possibilidade de captar-se baixos níveis de intensidade luminosa, correspondente a dezenas de fW de potência, e com tempo de resposta de nanosegundos³⁰. A Fig. 4.1.2.1 mostra o gráfico da sensibilidade do catodo de alguns tipos de fotomultiplicadores em função do comprimento de onda..

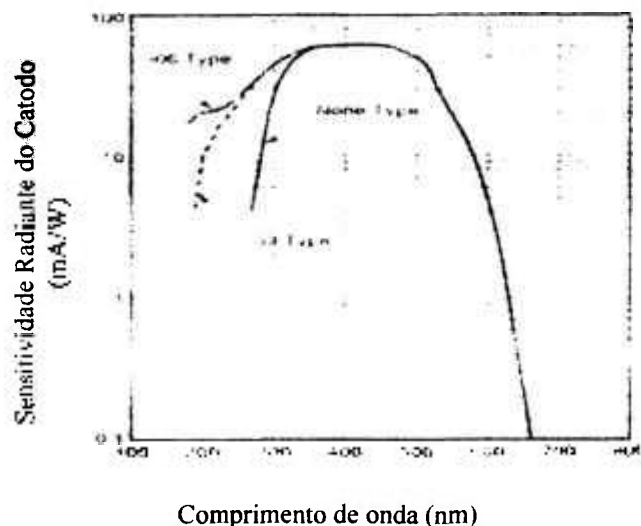


Fig. 4.1.2.1. Sensibilidade de alguns tipos de fotomultiplicadoras Hamamatsu.

O sistema de detecção LIDAR durante o período deste trabalho utilizou dois tipos de fotomultiplicadoras. Durante o ano de 2001 até o início de 2002 foi utilizada uma fotomultiplicadora RCA, cujo catodo (S-20) possui uma resposta espectral no intervalo de 185 nm a 900 nm e uma eficiência quântica de 25%. A sua operação é com uma tensão negativa de -1300 V. Após este período, passou-se a utilizar uma fotomultiplicadora do tipo Hamamatsu modelo H5783-03, que possui uma resposta espectral no intervalo 185 nm a 650 nm.

Na operação de fotomultiplicadoras pode ser observada uma pequena corrente mesmo quando não existem medições sendo feitas, ou seja, existe uma corrente de fundo que pode ser causada por diversos processos internos da fotomultiplicadora, tais como emissão termoiônica, ionização da corrente de gases residuais, etc.

Além disso, em aplicações LIDAR é necessário um cuidado extra de não sobrecarregar os fotocátodos, devido à “clarões” produzidos nas paredes do laboratório, do telescópio e regiões próximas, isso porque o ganho da FMT é fixo, e o intervalo dinâmico do sinal é restrito pela corrente máxima permitida nos estágios finais da FMT. Assim, ao exceder esses valores de corrente, resulta numa curva de resposta não-linear causada principalmente pelas características de linearidade do anodo, mas também pode ser causada pelas características de linearidade do catodo quando a fotomultiplicadora é operada com uma baixa voltagem e alta corrente. Ambas características de não linearidade do catodo e do anodo são dependentes somente do valor de corrente se a voltagem utilizada for constante, sendo, portanto, independente do comprimento de onda da radiação incidente. Esta inconveniência pode ser corrigida ao se reduzir o ganho da FMT para sinais de distâncias próximas apenas, que é feito ao se mudar a diferença de tensão na rede de dinodos ³¹. A fotomultiplicadora opera em conjunto com um filtro de interferência em 532 nm, utilizado para selecionar o comprimento de onda desejado e assegurar eficiência na redução da luz de fundo proveniente do céu durante a operação diurna do equipamento, melhorando assim a relação sinal ruído. A Fig. 4.1.2.2 mostra a curva de corrente de fundo e não linearidade típicas de fotomultiplicadoras ³².

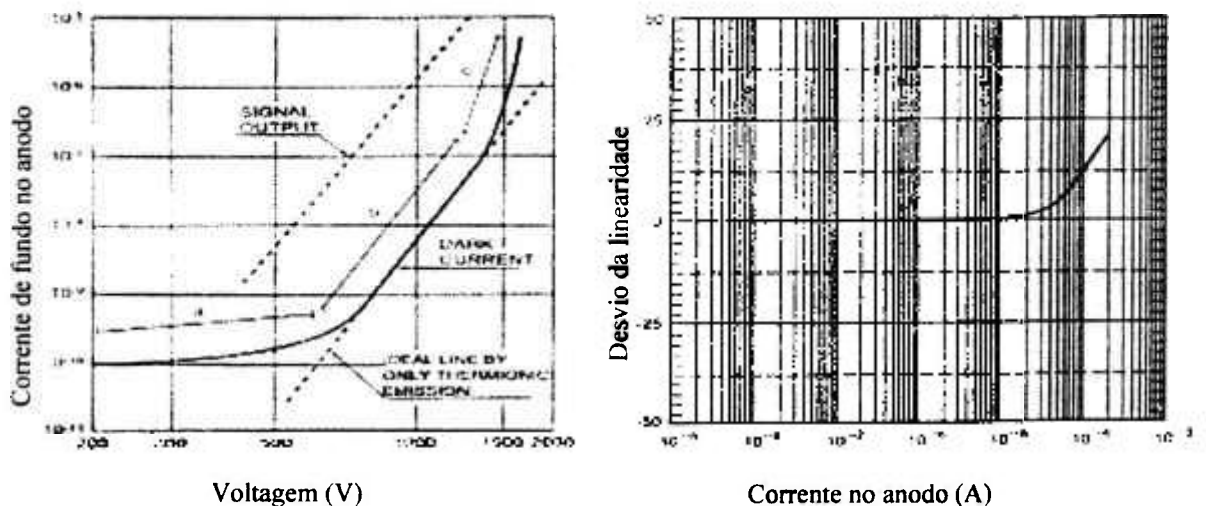


Fig. 4.1.2.2. Corrente de fundo e desvio da linearidade.

Um outro problema apresentado pelas fotomultiplicadoras é chamado de “*afterpulsing*” causado por pulsos extras com pequena amplitude e que aparecem depois do término dos pulsos provenientes dos sinais reais, daí o nome de “*afterpulsing*”. Estes pulsos freqüentemente distorcem as medidas que possuem sinais de baixo nível, causando problemas principalmente em aplicações de “*photoncounting*”. Além disso, os sinais detectados pelas fotomultiplicadoras podem apresentar um decaimento largo e suave, mesmo que o sinal real já tenha desaparecido, problema este denominado SIB.

O mecanismo de ocorrência do “*afterpulsing*” e do SIB não é bem entendido, eles se mostram como resultado de uma complicada interação entre a exposição do fotocátodo e o ganho da PMT. Os dois problemas geralmente são agrupados e denominados de “ruído de sinal induzido”³³.

4.1.3. Laser

Os principais requisitos de um laser para operar em sensoriamento remoto são: coerência espacial e temporal, curta duração do pulso, alta taxa de repetição, baixa divergência e alta potência, a fim de se obter boa resolução e longo alcance. Em comparação com outras técnicas de sensoriamento remoto tais como microondas e sensores acústicos, o laser com estas características apresenta melhor resolução espacial e sensibilidade de detecção, por outro lado, em dias de alto índice de névoa, chuva ou neve, seu uso é impraticável.

A escolha do comprimento de onda do laser é um fator importante no sistema LIDAR por diversas razões, sendo que a principal delas está no fato da porção de energia espalhada pelos constituintes atmosféricos depender fortemente do comprimento de onda do laser. O espalhamento por aerossóis e moléculas é muito maior na região do visível e ultravioleta em virtude das propriedades desses constituintes atmosféricos.

A fonte de luz do sistema LIDAR é um laser comercial pulsado Nd:YAG que opera na segunda freqüência de harmônico (532 nm) com uma taxa de repetição de 20 Hz. A potência média pode ser selecionada até 3,3 W e o feixe do laser possui 7 mm de diâmetro, com uma divergência de 0,5 mrad. A escolha deste tipo de laser deve-se ao fato de apresentar todas as características desejáveis para monitoração da atmosfera. A penalidade por se tratar de um laser com alta taxa de repetição é geralmente a necessidade de haver um bom sistema de refrigeração.

4.1.4. Sistema de Armazenamento de Dados

Após a luz atingir o detector, há ainda a necessidade de um sistema eletrônico para armazenar os dados.

Há, em geral, dois modos de armazenar e processar esses dados conhecidos como: analógico e contagem de fótons (photoncounting). No modo analógico a luz retroespalhada de muitos tiros de laser pode ser armazenada em uma memória de resposta rápida ou processada em um módulo específico para tal, ou mesmo em um computador. No sistema photoncounting, os sinais são amplificados antes de serem processados e discriminados, de maneira que somente sinais dentro de uma faixa de intensidade, inferior e superior, são considerados, incrementando assim, a sensibilidade do sistema. Assim, níveis mais baixos de intensidade são detectados, correspondendo a sinais retroespalhados em distância maiores.

Os sistemas de contagem de fótons utilizam contadores rápidos multicanais (multichannel scalers), e em geral, utilizam uma alta taxa de repetição, há, porém, um aumento na resolução espacial para um intervalo de 75 a 300 m. Há hoje uma tendência por sistemas de contagem de fótons, acoplados a lasers de baixa potência e alta taxa de repetição³³, por se tratar de sistemas mais compactos e com menor riscos à visão.

Na aquisição de um sistema de armazenamento de dados optou-se por um osciloscópio Digital onde se procurou atender alguns requisitos:

- a) Alta Taxa de Amostragem – como necessitaremos fazer médias dos sinais de maneira rápida;
- b) Capacidade de Armazenamento de Dados – para análise “off-line”;
- c) Possibilidade de Teste do Alinhamento do Sistema Óptico – boa qualidade de “display” já que trabalhamos com sinais pouco intensos;
- d) Bom Intervalo Dinâmico – o sinal de LIDAR pode variar até em 60 dB;
- e) Possibilidade de Extensão (UPGRADE) – pretensão de melhora de algumas características do sistema e assim adaptação do osciloscópio.

Assim, adquiriu-se um osciloscópio com as seguintes características:

- Largura de Banda: 1 GHz

- Número de Canais: 4
- Número de Amostradores : 4 GS/s
- Sensibilidade: 1mV/Divisão
- Resolução Vertical: 11 bits (256 níveis),
- Tamanho Máximo de Registro: 50 K, com possibilidade de extensão de 8 M/canal
- Saídas (Periféricos): Compatibilidade com uma placa GPIB, saída em disquete e para Zip-Drive

Abaixo temos uma figura para melhor ilustração do osciloscópio digital.

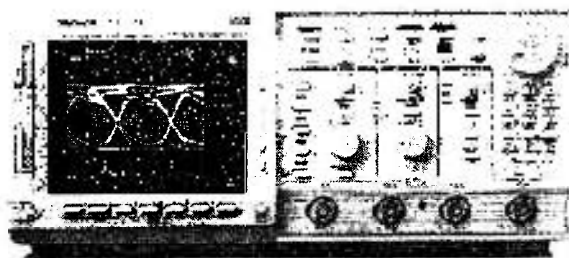


Figura 4.1.4.1. Osciloscópio digital

O osciloscópio é utilizado para aquisições em modo analógico (baixas altitudes) e na verificação do alinhamento do sistema óptico.

4.1.5. Programa de análise de dados

O programa de análise utilizado para processamento dos dados do LIDAR, possui entre outras características, uma boa interface gráfica, permitindo assim mais agilidade na visualização dos resultados obtidos.

Na figura a seguir pode-se observar a tela de entrada do programa de análise que utiliza o método de inversão de Klett para a solução da equação de LIDAR ²³. As letras indicam os dados de entrada, detalhados na tabela 4.1.5.1 e os gráficos de saídas são mostrados por números, também detalhados na tabela.

Tabela 4.1.5.1 Detalhamento dos parâmetros de entrada e saída do programa de análise pelo método de inversão de Klett.

LEGENDA	FUNÇÃO
A	região de fundo, entrada em canais
B	passo ou resolução, de 0.015 a 0.060 Km
C	região de cálculo, entrada em canais
D	temperatura e pressão na superfície
E	dados de filtragem, utilização de filtros polinomiais e binomiais
F	alturas em que se encontram o sinal molecular e a altura de inversão de Klett
G	razão entre o retroespalhamento e extinção (RL)
H	valor de BG variável utilizado, quando o fundo de escala máximo for de 7,5 Km ou menos
1	sinal corrigido com a distância
2	sinal molecular normalizado
3	derivada do logaritmo do sinal
4	perfil do coeficiente de extinção pela altura
5	EOA

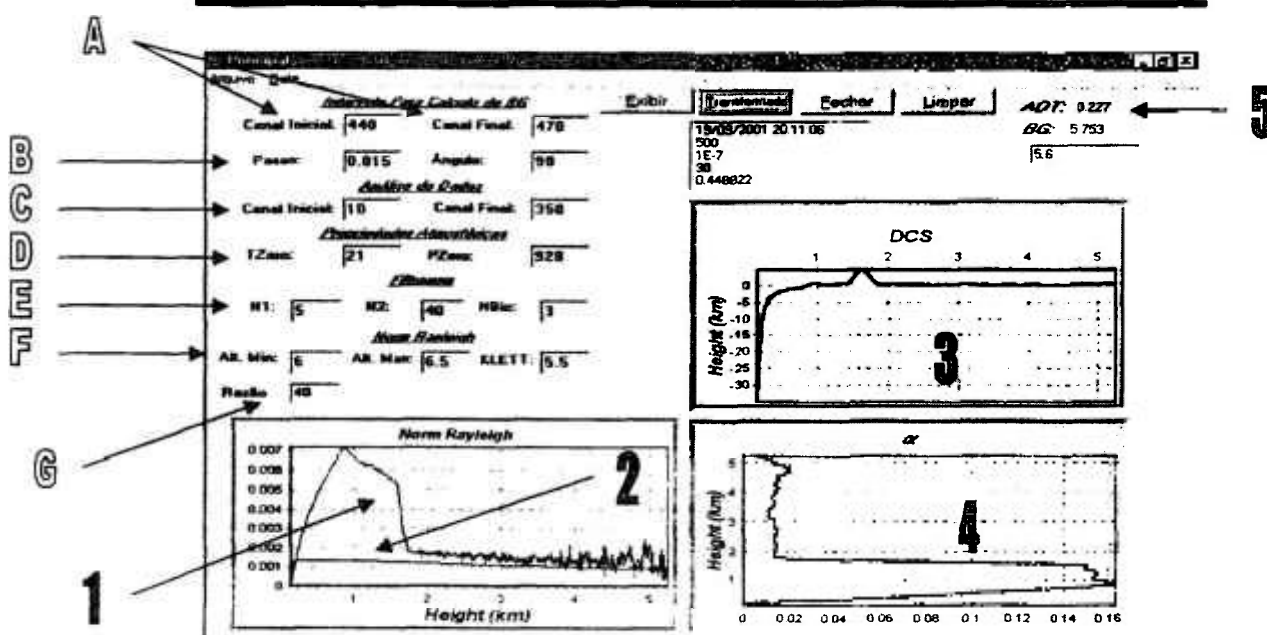


Figura 4.1.5.1. Tela de entrada do programa de análise que utiliza o método de inversão de Klett. As letras indicam os dados de entrada e os número indicam os dados de saída.

4.2. CIMEL versus LIDAR – Metodologia de Comparação

O principal objetivo da comparação das medidas feitas pelo sistema LIDAR e pelo CIMEL foi ajudar na interpretação das medidas do LIDAR, sobre as quais diversas suposições sobre propriedades ópticas e composição dos aerossóis são necessárias, principalmente no que concerne à inversão do sinal do LIDAR utilizando método de Klett,

A espessura calculada pelo LIDAR quando comparada com a calculada pelo CIMEL, deveria estar entre 80% a 90% da fornecida pelo CIMEL, já que a EOA obtida pelo LIDAR inicia-se em aproximadamente 350 m onde o fator de overlap do sistema

atinge seu máximo, ou seja, 1 e abaixo dessa altitude a carga de aerossol é medida apenas pelo CIMEL.

As medidas do LIDAR fornecem as propriedades ópticas dos aerossóis baseadas nas medidas do coeficiente de retroespalhamento dos aerossóis em 532 nm até uma altitude de aproximadamente 5-6 Km, onde acima desta região o sinal de LIDAR mostra um decaimento, que segue a contribuição somente molecular. A determinação do perfil vertical do coeficiente de retroespalhamento requer a técnica de inversão do sinal do LIDAR, seguindo o algoritmo de Klett ²³. Devemos ter em mente, porém que esta técnica pode levar a erros maiores que 30%, devido às hipóteses inerentes à solução da equação LIDAR.

Para derivar os perfis verticais de coeficiente de retroespalhamento na baixa troposfera, foi utilizado um procedimento iterativo baseado a intercomparação das espessuras ópticas derivadas pelo LIDAR e pelo CIMEL, assumindo a ausência de aerossóis estratosféricos e que a Região da Camada Limite Planetária (PBL) é homogeneamente misturada entre a superfície e 350 m de altitude.

Foram utilizados três métodos para se obter os valores de RL e da EOA. O primeiro método consiste em utilizar o método de inversão de Klett do LIDAR e sintonizar a razão RL até se obter a EOA fornecida pelo CIMEL. O segundo método consiste em diminuir a razão RL do LIDAR até se obter um valor para a EOA com uma diferença de 10% menor que a EOA fornecida pelo CIMEL e por último foi utilizada a razão RL fornecida pelo CIMEL e utilizado o método de Klett para se obter a EOA do LIDAR.

Estes perfis foram classificados em três categorias de acordo com algumas características comuns do perfil de distribuição do coeficiente de retroespalhamento nos quais as seguintes características foram decisivas:

(a) Número de camadas em diferentes alturas

A categoria A apresenta somente uma camada de aerossol e abaixo de 1,0 Km de altura e é considerada livre de aerossóis acima desta altura, neste caso o coeficiente de retroespalhamento β é menor que $0,005 \text{ Km}^{-1}\text{sr}^{-1}$. A Categoria B apresenta um perfil semelhante à Categoria A, porém mostra uma camada entre 1,0 e 2,5 Km e a Categoria C apresenta mais camadas acima de 2,5 Km.

(b) Fontes potenciais de aerossóis

No perfil apresentado pela Categoria A, a camada de aerossol é provavelmente originada nas regiões vizinhas do local onde o LIDAR está situado. No perfil apresentado pela Categoria B fontes locais de poluição do ar são as principais fontes dos aerossóis tais como poluição veicular, poluição industrial, ou ainda de poluição acumulada de dias anteriores. A Categoria C apresenta camadas acima de 2,5 Km e em alguns casos apresenta um perfil parecido com a Categoria A abaixo desta altitude, mostrando somente camadas acima de 2,5 Km, que pode ser uma indicação de transporte de partículas de áreas remotas fora da região metropolitana de São Paulo originadas, por exemplo, da queima de biomassa.

(c) Meteorologia

As características da meteorologia para cada categoria seguem prováveis parâmetros de larga escala tais como posição relativa de anticiclone ou frentes frias. Na Categoria A se encontram os dias provavelmente ensolarados precedidos por dias de chuva onde houve lavagem dos poluentes, com pouco vento e alta amplitude de temperatura e boas condições de visibilidade (5-10 Km). Os dias de Categoria B se distinguem por uma provável seqüência de dias sem chuva com algumas nuvens espalhadas e presença de vento moderado na superfície e altas altitudes, com visibilidade não tão boa quanto aos dias de Categoria A. Os dias de categoria C são provavelmente muito secos e com condições muito ruins de dispersão de poluentes, com ocorrência de inversões térmicas, sem nuvens e com pouco vento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Otimização do Sistema

5.1.1. Espectro de Transmissão do Espelho Utilizado no Sistema LIDAR

No direcionamento do feixe à atmosfera, o mesmo é refletido por 3 espelhos iguais, com revestimento totalmente refletor para evitar “perda” de luz até que o feixe chegue a atmosfera. A caracterização desses espelhos foi feita no Laboratório de Absorção

Óptica, utilizando o espectrofotômetro Cary do Centro de Lasers e Aplicações no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Para evitar a “perda” do feixe, o espelho deveria apresentar máxima reflexão, ou seja, mínima transmissão na faixa de comprimento de onda da operação do laser, ou seja, na faixa de 532 nm. O espectro obtido segue abaixo.

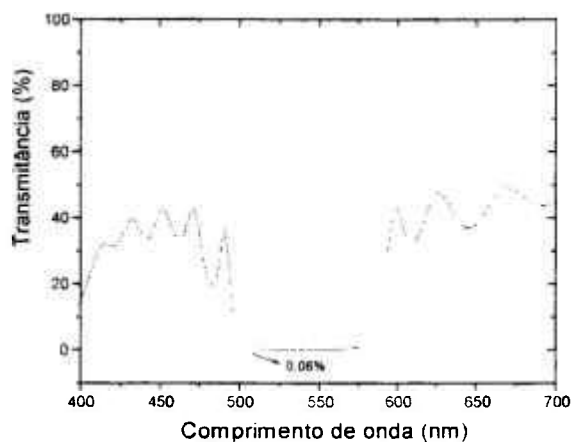


Figura 5.1.1.1. Espectro de transmissão do espelho.

Podemos observar no espectro acima uma transmissão de aproximadamente 0,06% na faixa de operação do laser, o que nos assegura uma mínima “perda” do feixe até que este alcance a atmosfera.

5.1.2. Alinhamento

O alinhamento mostrou-se um detalhe muito delicado, pois depende de certos ajustes em vários parâmetros do telescópio, tais como o alinhamento dos três espelhos que direcionam o feixe para a atmosfera, bem como o ajuste do espelho primário do telescópio para garantir o alinhamento entre o feixe do laser e o campo de visão do telescópio. O procedimento principal para alinhamento do sistema nos dias de medidas foi realizar o ajuste dos espelhos do sistema de forma a maximizar o sinal de nuvens de preferência em altas altitudes, e ao mesmo tempo trazer o “overlap” do sistema, região onde o feixe do laser se encontra com o campo de visão do telescópio, o mais próximo possível da superfície. Dessa forma certificava-se que havia o melhor alinhamento do sistema, pois o feixe estava no campo de visão do telescópio e era possível se ter sinais de espalhamento em regiões suficientemente longe da superfície.

5.1.3. Saturação da fotomultiplicadora

No direcionamento do feixe à atmosfera, o mesmo é refletido por 3 espelhos, com revestimento totalmente refletor, no entanto dependendo da energia fornecida ao feixe o “vazamento” de luz é inevitável. No laboratório há vários espalhamentos nas paredes e nos suportes metálicos, que eventualmente podem atingir o telescópio e aumentar o sinal relativo às regiões próximas do telescópio, e em certos casos até saturar o sinal da fotomultiplicadora, afetando às características do sinal no osciloscópio. Uma das providências tomadas foi executar a anodização de todas as partes metálicas do telescópio e diminuir o diâmetro da íris da fotomultiplicadora para minimizar o espalhamento próximo, tomando o cuidado de não alterar a “região de overlap”. Com isso houve uma diminuição da contribuição do espalhamento próximo, mas ainda abaixo do nível satisfatório. Uma outra medida adotada foi o revestimento de parte da parede da sala com material preto e fosco, principalmente na região indicada na figura abaixo.

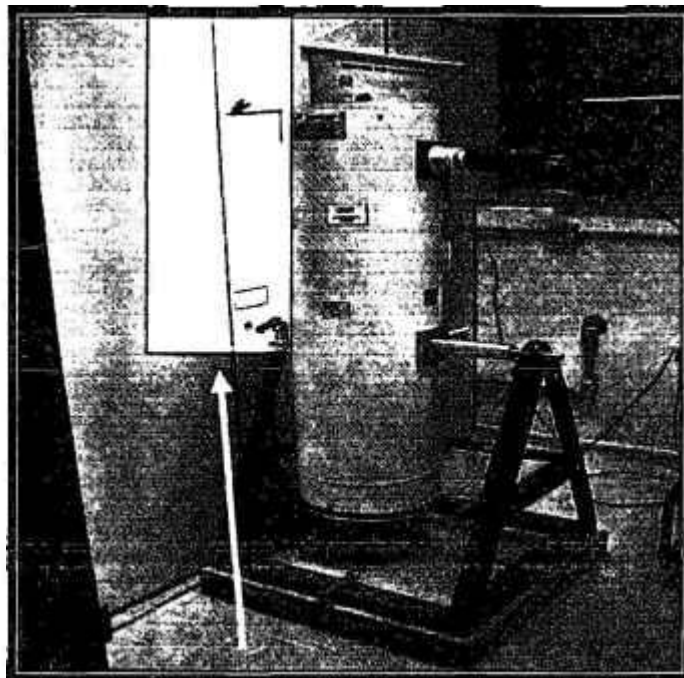


Figura 5.1.3.1. Local onde foi colocado revestimento escuro e fosco, a fim de se minimizar o efeito de espalhamento próximo.

5.2. Resultados da Comparação CIMEL versus LIDAR

5.2.1. Tabelas de Comparação

As primeiras medidas com o sistema LIDAR foram tomadas a partir de Agosto de 2001. Durante o ano de 2001, o enfoque do trabalho foi caracterizar o sistema, através do estudo do comportamento de seus principais instrumentos tais como, alinhamento do sistema, características dos espelhos refletores e da fotomultiplicadora, saturação da fotomultiplicadora e ruído.

Durante o período posterior o enfoque do trabalho foi fazer medidas diárias de acordo com as condições meteorológicas disponíveis, em virtude do sistema não poder funcionar em dias de alta nebulosidade ou chuva. Diante disso seguem abaixo três tabelas com os parâmetros ópticos obtidos para os anos de 2001, 2002 e 2003, respectivamente. As análises foram feitas para os dias em que haviam medidas disponíveis tanto para o LIDAR quanto para o CIMEL, com o objetivo de se fazer a comparação dos dados, na medida do possível simultâneos ou em horários próximos.

As tabelas 5.2.1.1, 5.2.1.2 e 5.2.1.3 resumem os dados de comparação para os três anos, bem como a categorização dos dias em A, B ou C, de acordo com suas características em relação à camada de aerossóis, potenciais fontes de poluição e possíveis condições meteorológicas. Nas tabelas estão discriminados os três métodos de comparação, a categorização dos dias, bem como os dias não hachurados para diferenciar os dias de estação seca e dias hachurados para diferenciar os dias de estação úmida.

RL¹ : Razão de LIDAR fornecida pelo CIMEL

RL² : Razão de LIDAR calculada pelo método de inversão de Klett para uma aproximação de 10% da EOA fornecida pelo CIMEL

RL³ : Razão de LIDAR calculada pelo método de inversão de Klett para se obter a EOA fornecida pelo CIMEL

EOA¹ : EOA fornecida pelo CIMEL

EOA² : EOA calculada pelo método de inversão de Klett

EOA³ : EOA calculada pelo método de inversão de Klett utilizando a Razão de Lidar fornecida pelo CIMEL (RL¹)

Tabela 5.2.1.1. Resultados da comparação das espessuras ópticas e RL entre os sistemas LIDAR e CIMEL para os dias selecionados no ano de 2001.

Dia (dd/mm)	Categoria	RL ¹	RL ²	RL ³	EOA ¹	EOA ²	EOA ³	Exp. Ångström
03/09	B	24±2	22±3	25±3	0,26±0,02	0,23±0,03	0,25±0,03	1,6±0,2
03/09	B	24±3	35±5	39±5	0,21±0,02	0,19±0,03	0,13±0,02	1,7±0,3
04/09	B	38±4	35±5	38±5	0,22±0,02	0,20±0,03	0,22±0,03	1,8±0,3
08/09	B	43±4	38±6	41±5	0,23±0,02	0,20±0,03	0,23±0,03	1,8±0,2
12/09	B	nd	35±5	41±5	0,18±0,02	0,15±0,02	nd	1,5±0,2
13/09	C	46±5	44±6	48±6	0,44±0,03	0,40±0,05	0,42±0,06	1,6±0,2
13/09	C	46±5	44±6	49±6	0,41±0,03	0,41±0,05	0,38±0,06	1,6±0,2
19/09	C	73±7	45±6	43±6	0,15±0,02	0,12±0,02	0,25±0,03	1,9±0,3
20/09	B	nd	41±5	46±6	0,14±0,02	0,12±0,02	nd	1,7±0,2
24/09	C	39±4	41±5	45±6	0,35±0,03	0,31±0,04	0,29±0,04	1,5±0,2
03/10	B	nd	16±2	19±3	0,05±0,01	0,04±0,01	nd	1,6±0,2
03/10	B	nd	14±2	15±3	0,07±0,01	0,06±0,02	nd	1,6±0,2
04/10	C	56±6	52±6	58±7	0,09±0,01	0,07±0,02	0,08±0,02	1,9±0,3
05/10	A	59±6	55±7	57±7	0,18±0,02	0,17±0,02	0,19±0,03	2,0±0,3
05/10	B	59±6	35±5	39±5	0,12±0,01	0,11±0,02	0,19±0,03	2,0±0,3
05/10	B	54±5	42±6	48±6	0,13±0,01	0,12±0,02	0,16±0,03	1,9±0,3
23/10	B	nd	35±5	39±5	0,14±0,01	0,13±0,02	nd	1,3±0,2
23/10	B	nd	32±4	35±5	0,14±0,01	0,13±0,02	nd	1,3±0,2
24/10	B	45±4	41±6	45±6	0,24±0,02	0,22±0,03	0,24±0,03	1,5±0,3
25/10	C	72±7	56±7	63±8	0,21±0,01	0,19±0,03	0,24±0,03	1,5±0,2
25/10	C	66±7	50±6	55±7	0,11±0,01	0,10±0,02	0,14±0,02	1,4±0,2
26/10	A	74±7	70±9	77±9	0,28±0,02	0,25±0,03	0,27±0,03	1,6±0,2
26/10	A	61±6	55±6	55±6	0,20±0,02	0,18±0,03	0,22±0,03	1,6±0,2

Tabela 5.2.1.2. Resultados da comparação das espessuras ópticas e a RL entre os sistemas LIDAR e CIMEL para os dias selecionados no ano de 2002.

Dia (dd/mm)	Categoria	RL ¹	RL ²	RL ³	EOA ¹	EOA ²	EOA ³	Exp. Ångström
19/03	C	nd	40±4	45±7	0,20±0,01	0,18±0,01	nd	1,5±0,0
01/04	A	51±5	52±5	58±9	0,18±0,01	0,16±0,01	0,16±0,02	1,9±0,0
02/04	C	98±10	85±9	94±14	0,41±0,04	0,37±0,04	0,43±0,05	1,3±0,0
10/04	B	70±7	51±5	58±9	0,16±0,02	0,14±0,02	0,19±0,02	1,7±0,0
11/04	C	78±8	67±7	75±11	0,20±0,06	0,18±0,06	0,21±0,03	1,4±0,1
12/04	B	48±5	35±4	39±6	0,18±0,02	0,16±0,02	0,22±0,03	1,3±0,1
15/04	A	68±7	55±6	59±9	0,13±0,02	0,12±0,02	0,15±0,02	1,7±0,1
16/04	C	93±5	69±4	63±9	0,21±0,02	0,19±0,02	0,28±0,03	1,6±0,0
16/04	B	64±6	43±4	48±7	0,21±0,04	0,19±0,04	0,28±0,03	1,6±0,1
17/04	A	73±7	38±4	45±7	0,11±0,04	0,09±0,04	0,19±0,02	1,6±0,0
24/04	A	62±6	42±4	46±7	0,13±0,05	0,12±0,05	0,18±0,02	1,6±0,1
25/04	B	71±7	30±3	33±5	0,12±0,03	0,11±0,03	0,26±0,03	1,6±0,0
25/04	B	42±4	31±3	35±5	0,20±0,03	0,18±0,03	0,24±0,03	1,6±0,0
29/04	B	68±7	57±6	63±9	0,21±0,03	0,19±0,03	0,23±0,03	1,7±0,1
29/04	B	25±3	20±2	18±3	0,21±0,01	0,19±0,01	0,26±0,03	1,7±0,0
13/05	C	nd	50±5	48±7	0,18±0,02	0,16±0,02	nd	1,5±0,2

Dia (dd/mm)	Categoria	RL ¹	RL ²	RL ³	EOA ¹	EOA ²	EOA ³	Exp. Ångström
14/05	C	74±7	39±4	39±6	0,14±0,01	0,13±0,01	0,25±0,03	1,6±0,1
15/05	C	90±9	55±6	52±8	0,10±0,02	0,09±0,02	0,17±0,02	1,7±0,0
12/06	C	42±4	33±4	37±5	0,17±0,02	0,15±0,03	0,19±0,03	1,7±0,2
14/06	B	70±7	65±7	73±9	0,23±0,02	0,20±0,03	0,22±0,03	1,8±0,3
18/06	C	58±6	50±5	59±7	0,06±0,02	0,05±0,03	0,06±0,03	1,7±0,3
21/06	C	54±5	35±4	40±5	0,11±0,02	0,10±0,03	0,15±0,03	1,9±0,2
24/06	A	89±9	75±9	87±10	0,19±0,02	0,17±0,02	0,20±0,02	1,5±0,2
05/08	A	35±4	33±4	38±5	0,13±0,03	0,11±0,05	0,12±0,02	1,8±0,2
05/08	A	35±4	25±3	28±4	0,10±0,03	0,09±0,05	0,12±0,02	1,5±0,2
06/08	B	63±6	52±6	57±7	0,22±0,03	0,20±0,02	0,24±0,02	1,9±0,3
07/08	B	70±7	59±7	65±8	0,20±0,02	0,18±0,02	0,22±0,02	1,9±0,3
08/08	C	69±7	67±8	75±9	0,20±0,02	0,18±0,04	0,19±0,04	1,7±0,2
08/08	C	64±6	60±8	68±8	0,18±0,03	0,16±0,02	0,17±0,02	1,8±0,2
09/08	B	59±6	41±5	48±6	0,21±0,01	0,18±0,02	0,26±0,02	1,7±0,2
12/08	B	73±7	65±8	73±9	0,29±0,03	0,26±0,03	0,29±0,30	1,8±0,3
13/08	B	69±7	64±8	70±9	0,33±0,01	0,30±0,04	0,33±0,04	1,8±0,3
16/08	C	72±7	64±8	69±8	0,49±0,01	0,45±0,060	0,51±0,06	1,7±0,2
19/08	A	58±6	57±7	63±8	0,12±0,02	0,11±0,02	0,11±0,02	1,8±0,3
20/08	A	65±7	48±6	70±9	0,10±0,01	0,09±0,02	0,13±0,02	1,8±0,2
21/08	B	40±4	45±4	46±7	0,15±0,02	0,14±0,01	0,12±0,02	1,5±0,2
23/08	C	60±6	65±8	63±8	0,30±0,03	0,27±0,02	0,29±0,02	1,7±0,3
03/09	A	45±5	22±3	25±4	0,12±0,01	0,11±0,01	0,17±0,02	1,7±0,2
11/09	C	69±7	63±8	70±9	0,37±0,04	0,33±0,02	0,32±0,02	1,7±0,2
17/09	C	68±7	20±3	25±3	0,31±0,02	0,27±0,03	0,45±0,03	1,8±0,2
17/09	C	63±6	33±5	36±5	0,31±0,03	0,28±0,01	0,40±0,01	1,6±0,2
19/09	C	57±6	60±8	66±8	0,40±0,04	0,36±0,02	0,36±0,02	1,7±0,3
07/10	B	54±5	52±5	56±8	0,25±0,01	0,23±0,01	0,24±0,03	1,5±0,1
10/10	A	89±9	73±7	81±12	0,31±0,05	0,28±0,05	0,34±0,04	1,8±0,1
11/10	B	63±6	50±5	54±8	0,45±0,04	0,41±0,04	0,52±0,06	1,8±0,0
16/10	C	49±5	45±5	50±8	0,62±0,01	0,56±0,01	0,61±0,07	1,7±0,1

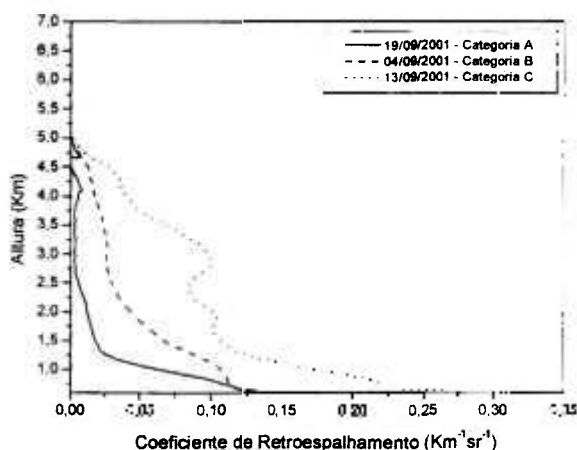
Tabela 5.2.1.3. Resultados da comparação das espessuras ópticas e Razão de LIDAR (RL) entre os sistemas LIDAR e CIMEL para os dias selecionados no ano de 2003.

Dia (dd/mm)	Categoria	RL ¹	RL ²	RL ³	EOA ¹	EOA ²	EOA ³	Exp. Ångström
04/03	A	nd	43±4	46±7	0,14±0,01	0,13±0,01	nd	2,0±0,0
06/03	B	79±8	60±6	68±10	0,18±0,02	0,16±0,02	0,21±0,03	1,9±0,0
19/03	A	88±9	37±4	40±6	0,15±0,00	0,14±0,00	0,33±0,04	1,7±0,0
20/03	A	94±9	60±6	65±10	0,08±0,02	0,07±0,02	0,12±0,01	2,0±0,1
31/03	B	nd	58±6	64±10	0,21±0,05	0,19±0,05	nd	1,8±0,2
02/04	A	nd	35±4	39±6	0,18±0,04	0,16±0,04	nd	1,9±0,1
14/04	A	93±9	44±4	48±7	0,09±0,01	0,08±0,01	0,18±0,02	1,8±0,1
17/04	B	94±9	36±4	41±6	0,29±0,03	0,26±0,03	nd	1,7±0,2
22/04	B	nd	45±5	51±8	0,27±0,05	0,24±0,05	nd	1,5±0,0
24/04	A	108±11	53±5	58±9	0,09±0,05	0,08±0,05	0,17±0,02	2,0±0,0
24/04	A	68±7	39±4	35±5	0,28±0,04	0,25±0,04	0,49±0,06	1,8±0,0
25/04	A	77±8	54±5	56±8	0,10±0,02	0,09±0,02	0,13±0,02	1,8±0,1

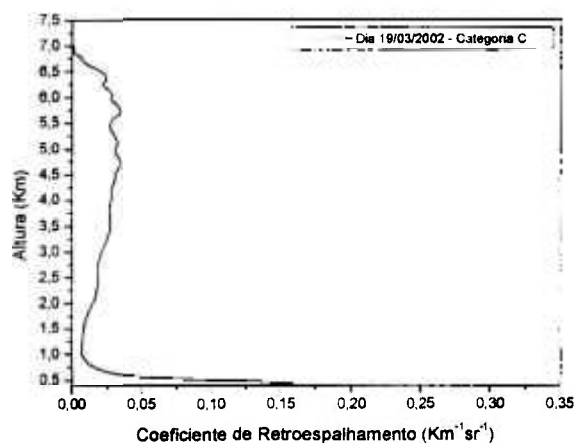
25/04	B	84±8	50±5	55±8	0,11±0,01	0,10±0,01	0,17±0,02	1,7±0,1
28/04	B	70±7	68±7	75±11	0,20±0,03	0,18±0,03	0,19±0,02	1,9±0,0
29/04	C	81±8	60±6	66±10	0,49±0,02	0,44±0,02	0,60±0,07	1,7±0,0
22/05	C	76±8	51±5	58±9	0,18±0,06	0,16±0,06	0,24±0,03	1,6±0,0
26/05	B	62±6	52±5	57±9	0,11±0,01	0,10±0,01	0,12±0,01	1,9±0,2
28/05	B	nd	38±4	42±6	0,30±0,03	0,27±0,03	nd	1,5±0,1
10/06	B	63±6	36±4	39±6	0,15±0,02	0,14±0,02	0,25±0,03	1,7±0,0
11/06	C	77±8	53±5	57±9	0,13±0,01	0,12±0,01	0,18±0,02	1,7±0,1
12/06	A	70±7	65±7	80±12	0,12±0,01	0,11±0,01	0,17±0,02	1,6±0,2
13/06	C	90±9	68±7	76±11	0,25±0,03	0,22±0,03	0,29±0,03	1,5±0,1
13/06	B	57±6	39±4	42±6	0,15±0,02	0,14±0,02	0,21±0,03	1,7±0,0
17/06	B	nd	56±6	63±9	0,29±0,03	0,26±0,03	nd	1,7±0,2
17/06	B	nd	18±2	21±3	0,31±0,03	0,28±0,03	nd	1,7±0,2
23/06	A	58±6	48±5	51±8	0,16±0,02	0,15±0,02	0,18±0,02	1,5±0,2
24/06	B	75±8	46±5	51±8	0,28±0,03	0,25±0,03	0,41±0,05	1,5±0,2
24/06	B	75±8	40±4	44±7	0,28±0,03	0,25±0,03	0,48±0,06	1,7±0,0
25/06	B	68±7	68±7	76±11	0,50±0,05	0,45±0,05	0,45±0,05	1,6±0,2
25/06	B	68±7	40±4	45±7	0,50±0,00	0,45±0,00	0,77±0,09	1,6±0,2
26/06	B	86±9	73±7	81±12	0,40±0,06	0,36±0,06	0,43±0,05	1,2±0,1
26/06	B	53±5	44±4	48±7	0,24±0,07	0,22±0,07	0,27±0,03	1,5±0,0
27/06	B	86±9	77±8	86±13	0,65±0,07	0,58±0,06	0,65±0,08	1,0±0,1
02/07	B	95±10	30±3	32±5	0,25±0,01	0,23±0,01	0,73±0,09	1,1±0,1
02/07	B	60±6	50±5	56±8	0,18±0,02	0,16±0,02	0,19±0,02	1,6±0,2
04/08	B	88±2	48±7	52±8	0,22±0,02	0,20±0,03	0,37±0,06	1,5±0,1
04/08	B	56±1	34±5	37±6	0,36±0,03	0,03±0,05	0,55±0,08	1,7±0,1
04/08	B	56±1	29±4	32±5	0,45±0,01	0,40±0,06	0,79±0,12	1,7±0,0
05/08	B	67±4	24±4	27±4	0,16±0,04	0,14±0,02	0,4±0,06	1,6±0,1
05/08	A	36±4	18±3	20±3	0,18±0,01	0,16±0,02	0,33±0,05	1,4±0,0
05/08	A	57±6	22±3	24±4	0,19±0,01	0,17±0,03	0,46±0,07	1,4±0,0
11/08	A	67±7	10±2	11±2	0,08±0,01	0,07±0,01	0,51±0,08	1,7±0,2
12/08	A	62±3	10±2	12±2	0,11±0,02	0,09±0,01	0,59±0,09	1,7±0,1
13/08	B	77±8	17±3	19±3	0,19±0,01	0,17±0,03	0,79±0,12	1,7±0,1
13/08	A	73±7	21±3	24±3	0,32±0,03	0,29±0,04	0,99±0,15	1,7±0,1
18/08	A	95±10	20±3	22±3	0,10±0,01	0,09±0,01	0,46±0,07	1,8±0,0
18/08	A	61±6	20±3	23±3	0,15±0,01	0,13±0,02	0,40±0,06	1,7±0,1
19/08	B	78±10	22±3	23±3	0,11±0,02	0,10±0,02	0,37±0,06	1,8±0,0
19/08	B	62±6	20±3	23±3	0,22±0,01	0,20±0,03	0,60±0,09	1,7±0,1
20/08	B	82±7	44±7	47±7	0,22±0,01	0,20±0,03	0,38±0,06	1,9±0,0
20/08	B	63±6	28±4	30±5	0,24±0,01	0,22±0,03	0,52±0,08	1,8±0,0
21/08	B	70±7	37±6	41±6	0,33±0,01	0,30±0,05	0,56±0,08	1,8±0,0
22/08	B	76±7	50±8	55±8	0,37±0,01	0,34±0,05	0,52±0,08	1,8±0,0
16/10	A	nd	25±4	30±5	0,06±0,01	0,05±0,01	nd	1,7±0,1
18/10	C	nd	40±6	46±7	0,28±0,02	0,25±0,02	nd	1,2±0,1
11/11	C	95±10	36±5	40±6	0,30±0,01	0,27±0,01	0,72±0,11	1,4±0,3
26/12	C	nd	64±9	70±10	0,42±0,04	0,38±0,04	nd	0,89±0,1

5.2.2. Categorização dos Perfis Verticais do Coeficiente de Retroespalhamento

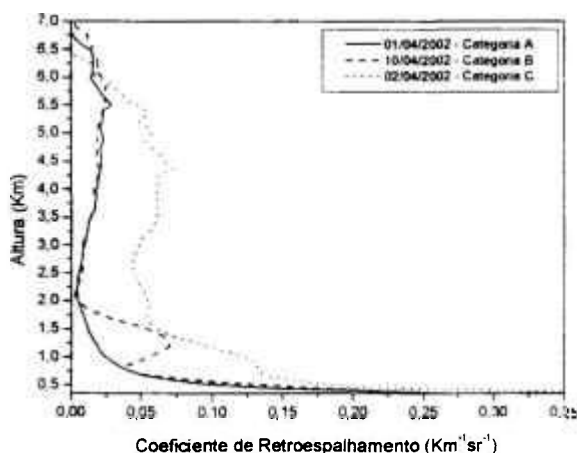
As figuras abaixo mostram alguns perfis do coeficiente de retroespalhamento obtidos em 532 nm para os anos de 2001, 2002 e 2003 e suas respectivas categorização em Categorias A, B ou C.



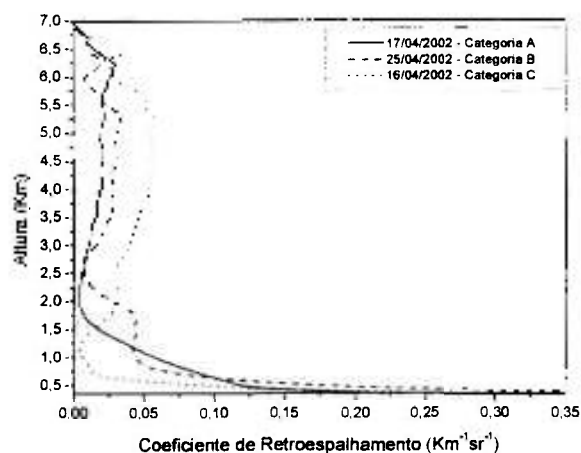
5.2.2.1. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Set/2001.



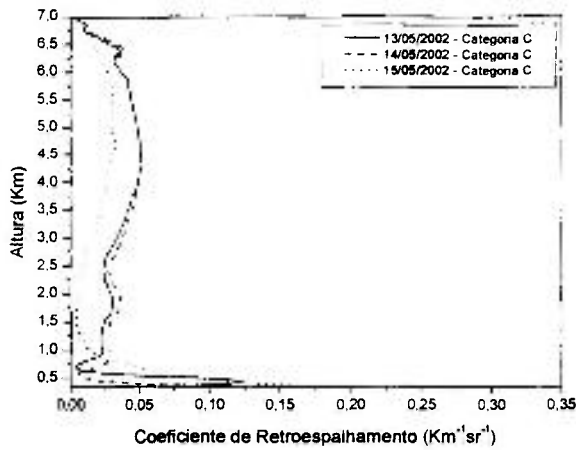
5.2.2.2. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Mar/2002.



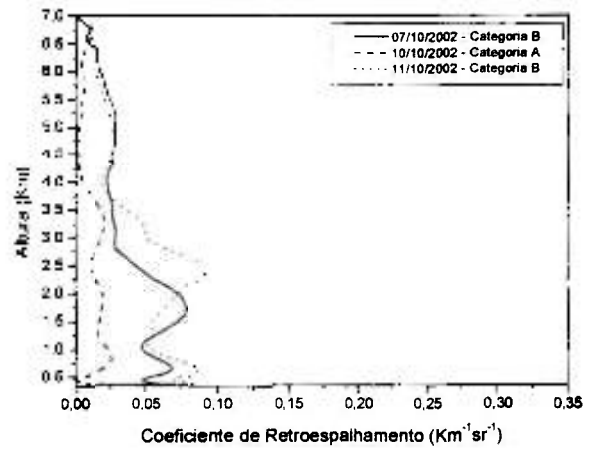
5.2.2.3. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Abr/2002.



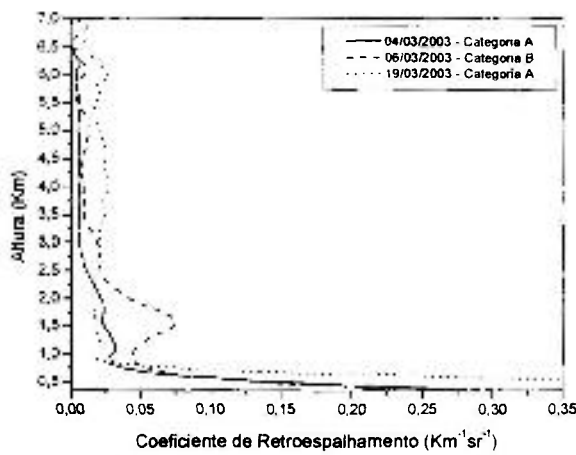
5.2.2.4. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Abr/2002.



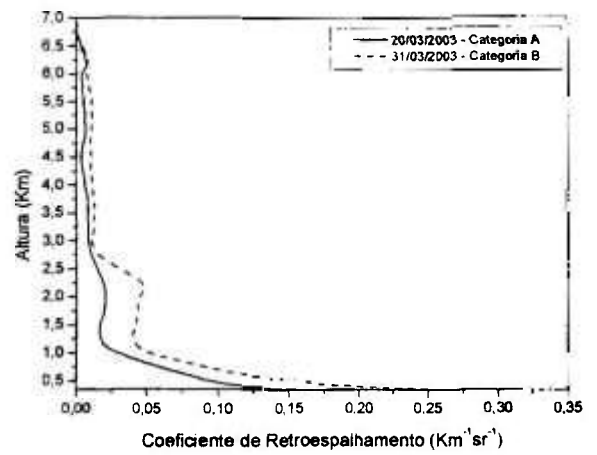
5.2.2.5. Categorização dos perfis do coeficiente de retrospalhamento de Mai/2002.



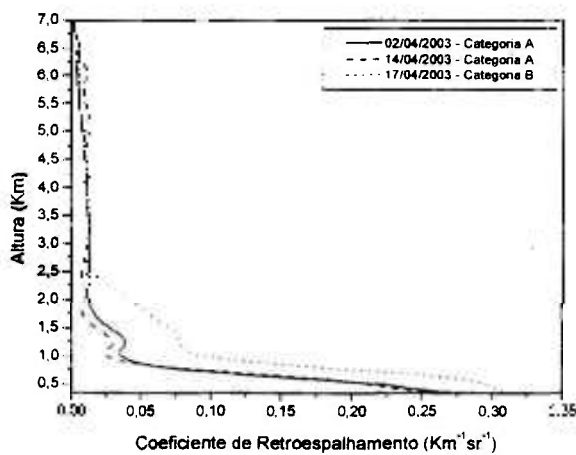
5.2.2.6. Categorização dos perfis do coeficiente de retrospalhamento de Out/2002.



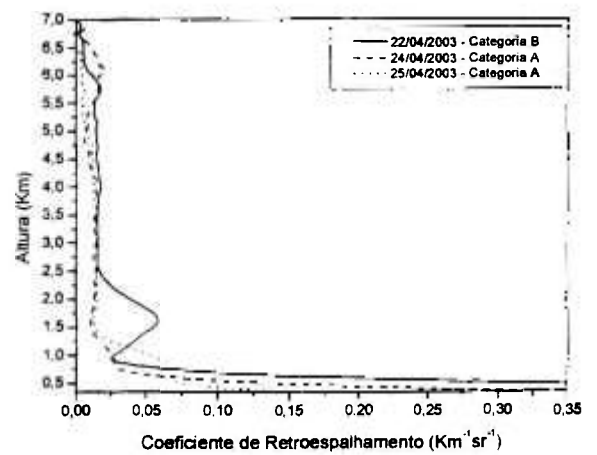
5.2.2.7. Categorização dos perfis do coeficiente de retrospalhamento de Mar/2003.



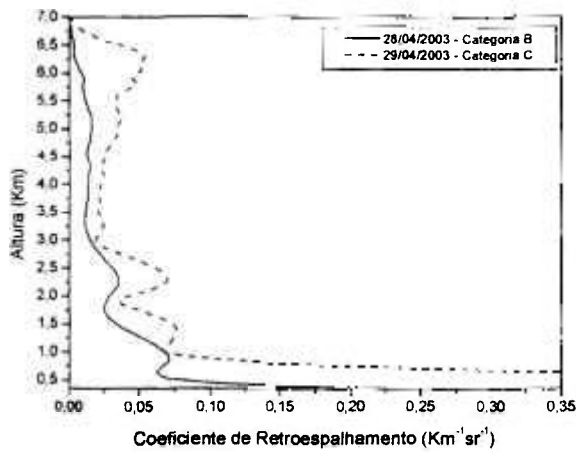
5.2.2.8. Categorização dos perfis do coeficiente de retrospalhamento de Mar/2003.



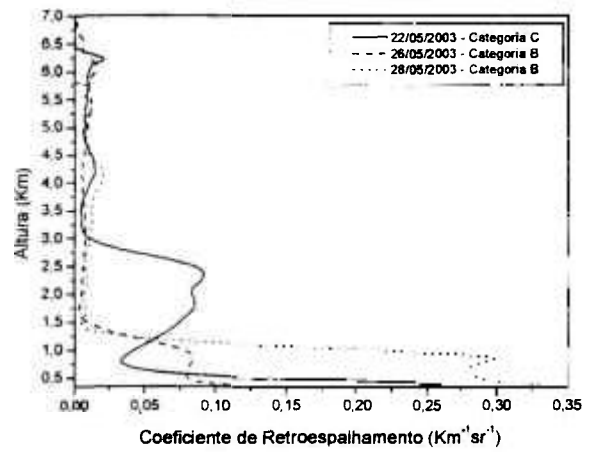
5.2.2.9. Categorização dos perfis do coeficiente de retrospalhamento de Abr/2003.



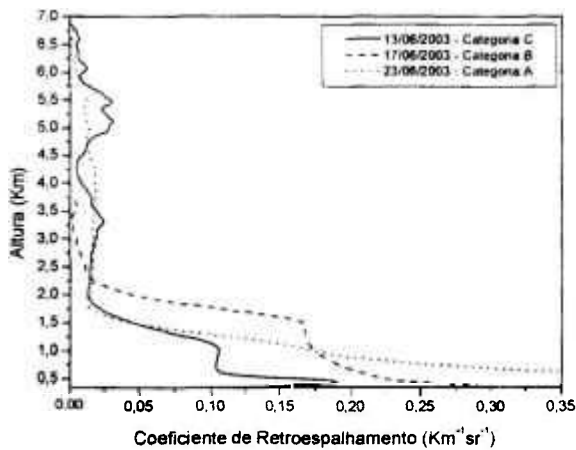
5.2.2.10. Categorização dos perfis do coeficiente de retrospalhamento de Abr/2003.



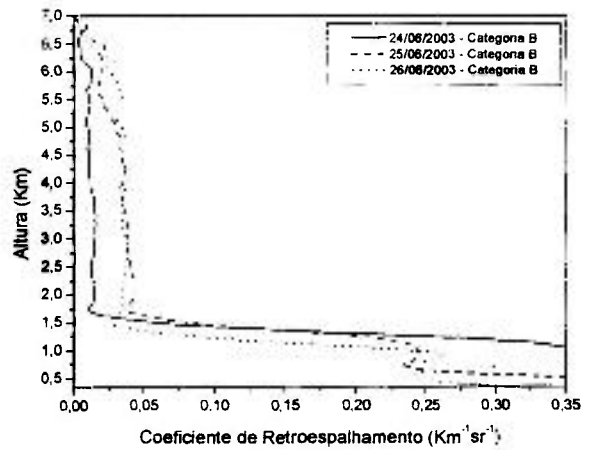
5.2.2.11. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Abr/2003.



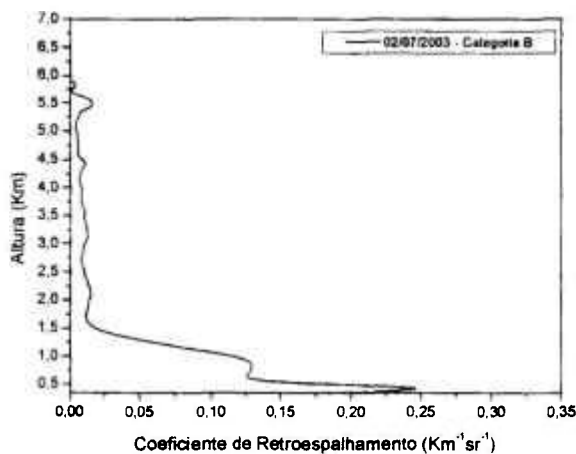
5.2.2.12. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Jun/2003.



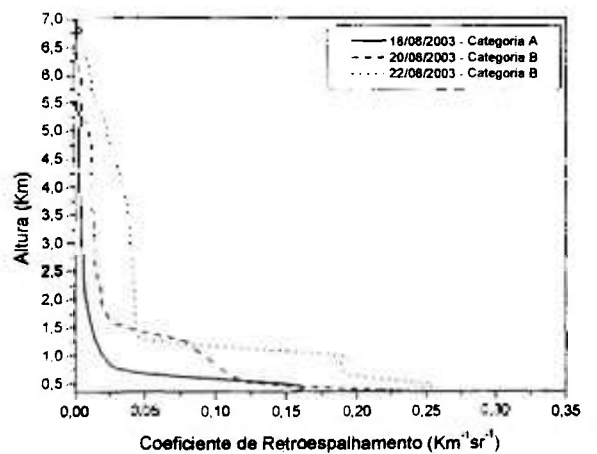
5.2.2.13. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Jun/2003.



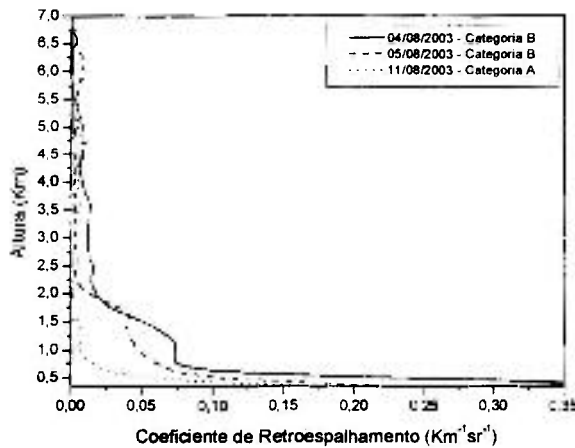
5.2.2.14. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Jun/2003.



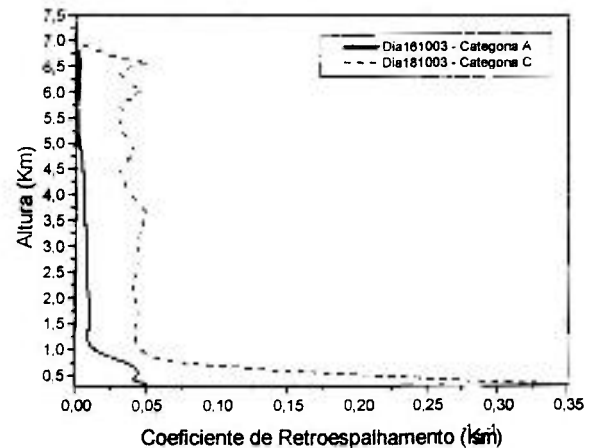
5.2.2.15. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Jul/2003.



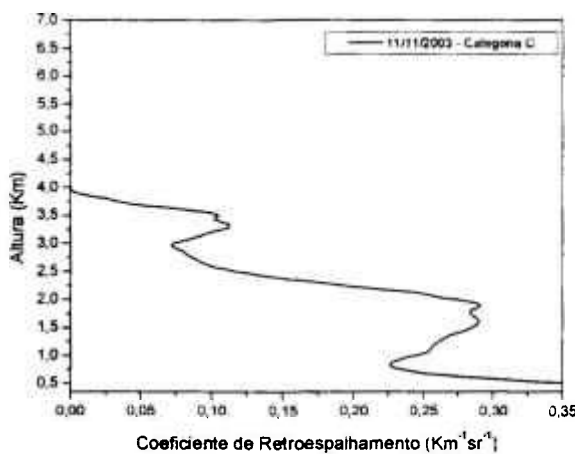
5.2.2.16. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Ago/2003.



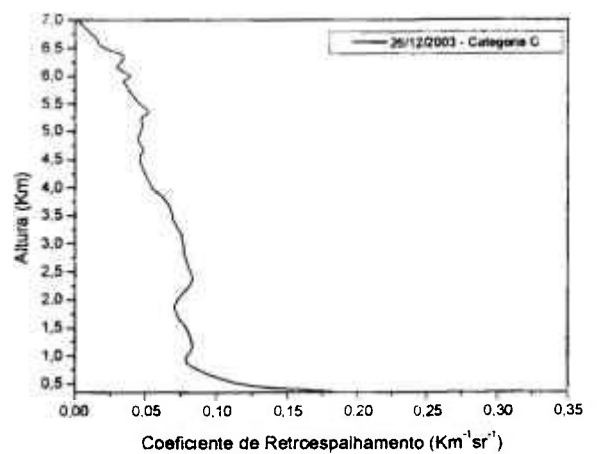
5.2.2.17. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Ago/2003.



5.2.2.18. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Out/2003.



5.2.2.19. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Nov/2003.



5.2.2.20. Categorização dos perfis do coeficiente de retroespalhamento de Dez/2003.

5.3. Análise dos Perfis para 2001

Para o ano de 2001 vale ressaltar que devido ao enfoque do trabalho ter sido o estudo do funcionamento inicial do sistema e possíveis dificuldades técnicas, as análises dos perfis para este período tiveram um grau de confiança menor em relação principalmente às categorizações e às análises de comportamento temporal dos parâmetros como EOA e RL que serão apresentados posteriormente.

5.3.1. Categoria A – Perfis e Parâmetros

Os dias de Categoria A mostram que a maior parte da camada de aerossol está confinada entre a superfície e aproximadamente 1 Km de altura. Nestes dias a camada de mistura não alcança grandes altitudes e então podemos dizer que a atmosfera está praticamente livre de aerossóis acima desta altura. Neste contexto, a camada de aerossol observada dentro da Camada Limite Planetária (PBL) deve ser resultado principalmente de atividades urbanas locais, tais como tráfego de automóveis, emissões industriais e outras fontes urbanas. Para esses dias podemos dizer que havia condições meteorológicas favoráveis à dispersão dos poluentes devido à dias anteriores de chuva responsáveis pela “lavagem” dos poluentes presentes na atmosfera ou à presença de vento.

No ano de 2001, as espessuras ópticas médias para EOA_1 , EOA_2 e EOA_3 obtidas através dos três métodos, apresentou valores de $0,22 \pm 0,05$, $0,20 \pm 0,04$ e $0,23 \pm 0,04$, respectivamente. Verifica-se que não houve discrepâncias entre os valores obtidos pelo LIDAR e pelo Cimel. As Razões de LIDAR RL_1 , RL_2 e RL_3 , também obtidas através dos três critérios apresentou médias de 65 ± 8 , 60 ± 9 e 63 ± 12 sr.

O valor do Expoente de Ångström calculado para o período de 2001 apresentou uma média de $1,7 \pm 0,2$. Valores para o Expoente de Ångström acima de 1,6 podem ser uma indicação da presença de aerossóis relativamente maiores do que aerossóis encontrados em regiões urbanas^{34, 35}, ou ainda que partículas menores tais como carbonáceos e sulfatos de origem antropogênicos ou biogênicos podem ter sido aumentados de tamanho em virtude da umidade³⁶.

5.3.2. Categoria B – Perfis e Parâmetros

Os principais perfis de retroespalhamento de aerossóis que representam a Categoria B mostram um diferente comportamento em relação aos perfis de Categoria A, podemos observar uma maior e mais larga camada de aerossol acima de 1 Km. Uma atmosfera livre de aerossóis somente é atingida acima de 4 Km. As fontes potenciais de aerossóis podem ter origem em regiões próximas principalmente devido a atividades urbanas, principalmente nos primeiros 1000 m. As camadas menores de aerossol encontradas acima dessa altitude pode ser atribuídas à camadas residuais de dias anteriores ou mais provavelmente à partículas originadas em áreas mais distantes.

Os valores das espessuras ópticas médias EOA₁, EOA₂ e EOA₃ para esta Categoria apresentaram valores de 0,16±0,07, 0,15±0,06 e 0,20±0,04. Verifica-se valores um pouco menores em relação àqueles obtidos para a Categoria A. Os valores de RL₁, RL₂ e RL₃ apresentaram médias iguais a 41±14, 32±9 e 36±10 sr. O valor médio calculado para o coeficiente de Ångström foi de 1,6±0,2.

5.3.3. Categoria C – Perfis e Parâmetros

Os perfis de retroespalhamento de aerossóis pertencentes à Categoria C mostram duas características peculiares distintas das categorias A e B, a primeira é a presença de camadas de aerossol acima em altitudes maiores 2,5 Km, o que mostra não somente a influência de fontes endógenas de aerossóis, mas também fontes exógenas, tais como áreas rurais de intensa colheita no estado de São Paulo ou fontes mais remotas de poluição. Vale ressaltar que a queima de biomassa tem grande importância em determinadas épocas do ano, e que pode ser detectada em regiões distantes da origem.

Os valores obtidos para as espessuras ópticas médias EOA₁, EOA₂ e EOA₃ para esta Categoria foram de 0,25±0,15, 0,23±0,14 e 0,26±0,12. Podemos observar valores relativamente maiores comparados aos perfis de Categoria A e B, mostrando que a coluna de aerossol foi afetada pela presença de altas camadas, resultando em valores maiores para a EOA.

Os valores de RL₁, RL₂ e RL₃ apresentaram médias iguais a 57±14, 47±5 e 52±7 sr. O valor médio calculado para o coeficiente de Ångström foi de 1,6±0,2.

5.4. Análise dos Perfis para 2002

5.4.1. Categoria A – Perfis e Parâmetros

No ano de 2002 as espessuras ópticas médias para EOA₁, EOA₂ e EOA₃ apresentaram valores de 0,15±0,06, 0,13±0,06 e 0,17±0,06. Verifica-se coerência entre os valores obtidos pelo LIDAR e pelo Cimel.

As Razões de LIDAR médias para RL₁, RL₂ e RL₃ foram de 61±19, 47±17 e 55±20 sr. A discrepância entre os valores de RL₁, RL₂ e RL₃ pode estar relacionada

principalmente à impossibilidade de se ter a aquisição simultânea de dados entre os dois sistemas. Além da alta sensibilidade na aquisição dos dados pelo CIMEL para se obter RL, principalmente no que diz respeito à função de fase e ao espalhamento único de albedo, podendo variar mais que 20% num intervalo de poucos minutos.

O valor médio calculado para o coeficiente de Ångström foi de $1,7\pm 0,1$.

5.4.2. Categoria B – Perfis e Parâmetros

Para esta Categoria no ano de 2002, os valores das espessuras ópticas médias EOA_1 , EOA_2 e EOA_3 apresentaram valores de $0,23\pm 0,08$, $0,20\pm 0,07$ e $0,26\pm 0,08$, que comparados com os valores da Categoria A se mostram um pouco maiores, evidenciando uma maior quantidade de aerossol na atmosfera para este tipo de perfil. As médias dos valores para as Razões de LIDAR RL_1 , RL_2 e RL_3 foram de 59 ± 14 , 48 ± 13 e 52 ± 16 sr.

O valor médio do coeficiente de Ångström calculado para esta categoria foi de $1,7\pm 0,2$, não se mostrando discrepante em relação ao valor médio apresentado pela Categoria A.

5.4.3. Categoria C – Perfis e Parâmetros

No ano de 2002 para a Categoria C, os valores médios para as espessuras ópticas EOA_1 , EOA_2 e EOA_3 apresentaram valores de $0,26\pm 0,15$, $0,23\pm 0,13$ e $0,29\pm 0,15$. Podemos observar mais uma vez valores maiores comparados aos perfis de Categoria A e B, mostrando que a coluna de aerossol foi afetada por uma maior quantidade de aerossol, mas no caso desse tipo de perfil, os aerossóis se encontram distribuídos em camadas mais altas da troposfera, acima de 3 Km.

As Razões de LIDAR RL_1 , RL_2 e RL_3 apresentaram médias de 68 ± 15 , 53 ± 16 e 57 ± 17 sr, um pouco maiores comparados aos valores das Categorias A e B, o que pode estar relacionado à alta absorção pelas partículas de aerossol que são típicas de aerossóis de origem da queima de biomassa nos trópicos, como apresentando por Mueller et al. (2001) durante o experimento INDOEX e por Balis et al (200) durante a grande queima de biomassa ocorrida recentemente na Europa.

O valor médio para o expoente de Ångström foi de $1,6\pm 0,1$. Um valor um pouco menor para esta categoria de perfil mostra a presença de partículas menores tais

como carbonáceos ou partículas de fumaça diluídas sobre a área urbana de São Paulo, que podem ser originadas em partes distantes do país devido à queima de biomassa ³⁷.

5.5. Análise dos Perfis para 2003

5.5.1. Categoria A – Perfis e Parâmetros

No ano de 2003 as espessuras ópticas médias EOA₁, EOA₂ e, EOA₃ apresentaram valores de $0,15\pm 0,07$, $0,13\pm 0,07$ e $0,37\pm 0,23$. Pudemos observar valores muito próximos aos valores para esta Categoria no ano de 2002, no entanto, foi obtido uma média discrepante para EOA₃ devido a um valor de $0,49\pm 0,06$ em 24/04 possivelmente devido à diferença de horários entre as medidas EOA e dos parâmetros ópticos do Cimel utilizados para se obter a RL.

Os valores para as Razões de LIDAR RL₁, RL₂ e RL₃ obtida através dos três critérios apresentaram médias de 67 ± 23 , 35 ± 17 e 38 ± 19 sr.

Os valores de EOA se mostraram bem próximos aos valores referentes a esta Categoria para os anos de 2001 e 2002.

O valor médio do expoente de Ångström foi de $1,7\pm 0,2$.

5.5.2. Categoria B – Perfis e Parâmetros

As espessuras ópticas médias EOA₁, EOA₂ e, EOA₃ apresentaram valores de $0,27\pm 0,12$, $0,24\pm 0,12$ e $0,44\pm 0,20$, os quais se mostraram maiores que os valores obtidos para a Categoria A, novamente evidenciando a presença de uma quantidade maior de aerossóis na atmosfera para esta Categoria.

Os valores para as Razões de LIDAR RL₁, RL₂ e RL₃ obtida através dos três critérios apresentaram médias de 72 ± 12 , 43 ± 16 e 48 ± 18 sr.

O valor médio do expoente de Ångström foi de $1,6\pm 0,2$.

5.5.3. Categoria C – Perfis e Parâmetros

No ano de 2003, as espessuras ópticas médias EOA₁, EOA₂ e, EOA₃ apresentaram médias de $0,29\pm 0,13$, $0,25\pm 0,12$ e $0,46\pm 0,19$. Aqui novamente observa-se

valores relativamente maiores comparados aos perfis de Categoria A e B, também devido à uma maior presença de aerossóis na atmosfera. Os valores para as Razões de LIDAR médias RL_1 , RL_2 e RL_3 obtida através dos três critérios apresentaram médias de 71 ± 16 , 43 ± 17 e 47 ± 19 sr.

O valor médio do expoente de Ångström foi de $1,5 \pm 0,3$, que se mostraram menores quando comparados aos anos de 2001 e 2002 e suas respectivas Categorias, o que evidencia a presença de partículas menores na atmosfera possivelmente originadas em partes distantes do país, assim como no caso dessa mesma Categoria para o ano de 2002.

5.6. Análise Temporal da Razão de LIDAR (RL)

A razão de extinção-retroespalhamento, chamada razão de LIDAR (RL) é um parâmetro crucial para a interpretação quantitativa dos dados do LIDAR, no entanto o conhecimento empírico de RL para aerossóis troposféricos ainda é muito limitado principalmente na Região da América do Sul.

Como já explorado anteriormente, a exata determinação de RL através dos cálculos pela teoria de Mie assume hipóteses irreais sobre a morfologia das partículas e procedimentos experimentais são necessários na determinação e análise de RL. Além disso, há uma forte dependência de RL com os perfis de temperatura e umidade e turbulência da atmosfera, o que pode causar variações nos parâmetros ópticos dos aerossóis^{38,41}. Nesse trabalho essa influência não foi analisada, ou seja, foram feitas suposições de perfis homogêneos de temperatura e umidade na troposfera.

A seguir seguem três gráficos apresentando o comportamento temporal da RL para os períodos de 2001, 2002 e 2003. A RL apresentada no gráfico corresponde àquela calculada para se obter uma EOA aproximadamente 10% menor que a EOA fornecida pela CIMEL.

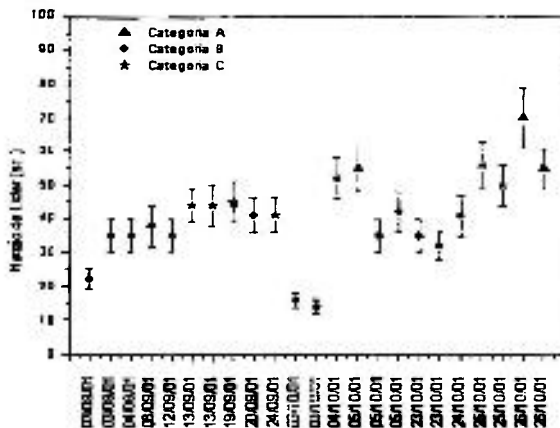


Fig. 5.6.1. Comportamento temporal da razão de LIDAR (RL) para o ano de 2001.

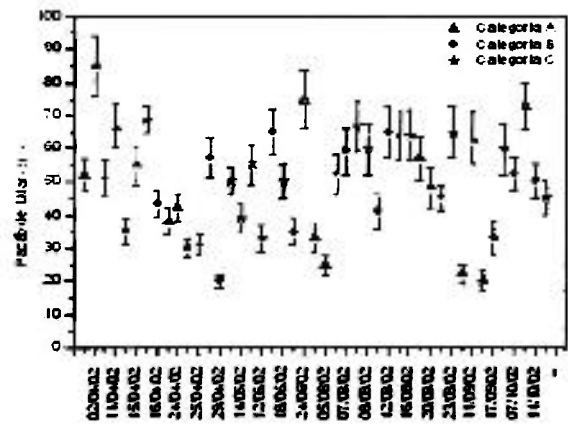


Fig. 5.6.2. Comportamento temporal da razão de LIDAR (RL) para o ano de 2002.

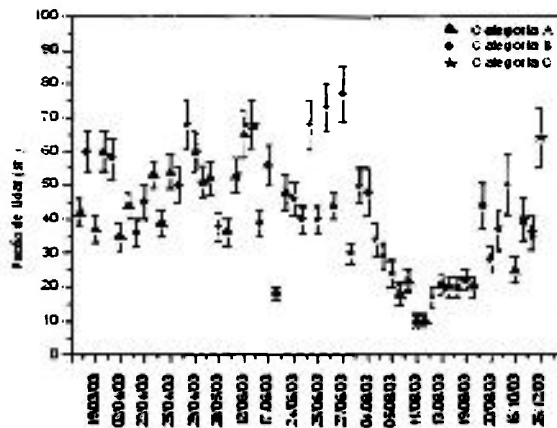


Fig. 5.6.3. Comportamento temporal da razão de LIDAR (RL) para o ano de 2003.

Apesar de muitos estudos para determinação de RL estarem sendo desenvolvidos, ainda não há um banco de dados estatisticamente significativo para aerossóis troposféricos, no entanto algumas relações podem ser exploradas através dos dados empíricos efetuados em alguns países tais como Estados Unidos, Alemanha, Austrália, etc. Primeiramente um intervalo de RL entre 8 e 95 sr está em acordo com as previsões feitas através dos cálculos pela teoria de Mie. Além disso, valores mais baixos de RL estão relacionados à baixa absorção e uma maior contribuição do retroespalhamento das partículas, ou seja, existe uma maior predominância de partículas grandes na atmosfera, enquanto que valores mais altos de RL estão relacionados a uma menor contribuição em relação ao retroespalhamento e uma maior contribuição em relação à extinção, ou seja, existe uma maior predominância de partículas menores na atmosfera. E finalmente, o grande intervalo de valores para RL em diversos locais indica que a

localização geográfica não representa necessariamente uma limitação para valores de RL³⁹.

No ano de 2001 as medidas foram feitas durante a chamada “estação seca”, ou seja, onde as condições meteorológicas não são favoráveis à dispersão de poluentes devido à ausência de chuva, altas pressões e à ocorrência de inversões térmicas. Durante este período foi observado uma tendência de aumento nos valores de RL no final do período, onde se daria o início do verão, estação mais propícia à dispersão dos poluentes, estando de acordo com a tendência temporal esperada para RL.

Durante o período de 2002, foram feitas medidas durante os dois períodos característicos da estação seca e úmida, no entanto durante este período não foi observada uma tendência temporal conclusiva.

Para o ano de 2003 foram observados valores maiores de RL durante a estação úmida, entre Março/2003 e Maio/2003 e um nítido aumento do valor de RL no início da estação úmida para o final desse período na metade do mês de Agosto/2003 a Dezembro de 2003. Durante a estação seca, a partir do mês de Junho/2003 e início do mês de Agosto/2003 foram observados valores menores de RL período onde há um considerável aumento do número de queimadas, cooperando para o aumento do número de partículas na atmosfera.

Através da análise para todo o período, pode-se observar uma coerência entre a tendência temporal esperada para os valores de RL e as observações feitas empiricamente. No entanto também pode-se observar que existe uma grande variabilidade dos valores de RL, e a determinação exata do mesmo implicaria no conhecimento da distribuição de tamanho e forma dos aerossóis, perfis de temperatura e umidade da atmosfera, turbulência, ou seja, um estudo mais aprofundado e uma quantidade maior de medidas são necessárias para melhorar a análise desse parâmetro.

Para uma melhor visualização dos intervalos da RL em relação à categorização dos perfis, foram feitos três histogramas apresentados abaixo, representando a distribuição de frequências dos valores de RL para cada Categoria.

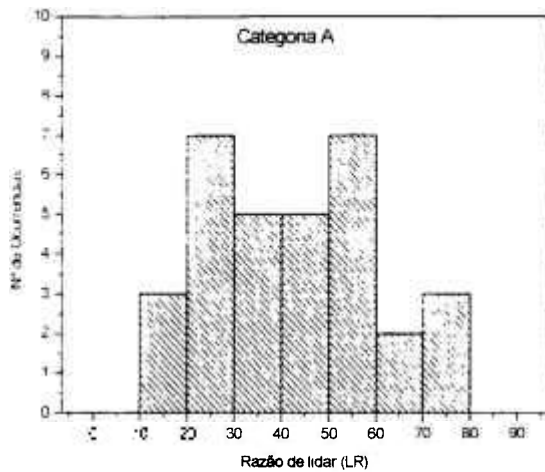


Fig. 5.6.4. Histograma da frequência dos valores de RL para os perfis de Categoria A.

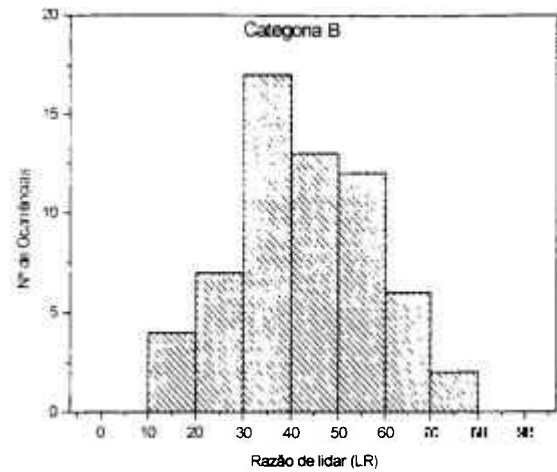


Fig. 5.6.5. Histograma da frequência dos valores de RL para os perfis de Categoria B.

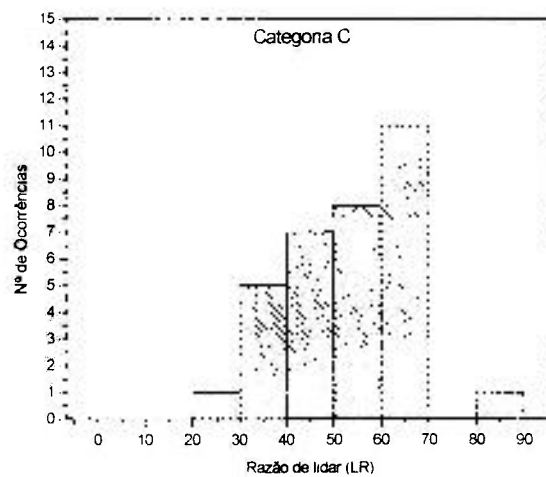


Fig. 5.6.6. Histograma da frequência dos valores de RL para os perfis de Categoria C.

Através dos histogramas pode-se observar que nos perfis de Categoria A, de um total de 32 dias, 24 apresentam valores de RL entre 20 e 60 sr, com uma média de 41 sr. Nos perfis de Categoria B, de um total de 61 observações, 42 apresentaram valores de RL entre 30 e 60 sr, com uma média de 42 sr. Já nos perfis de Categoria C, de um total de 33 observações, 26 apresentaram valores de RL entre 40 e 70 sr, com uma média de 52 sr.

O relativo aumento dos valores de RL da Categoria C em relação às Categorias A e B, mostra que nos dias de Categoria C existe a presença de partículas menores e maior absorção contribuindo para o aumento do coeficiente de extinção, o que pode estar relacionado à presença de partículas de origem da queima de biomassa nos trópicos que foram transportadas para a região urbana em camadas mais altas da atmosfera.

Da mesma forma que para RL, foram feitos três histogramas para as espessuras ópticas, representando a distribuição de frequências dos valores de EOA para cada Categoria.

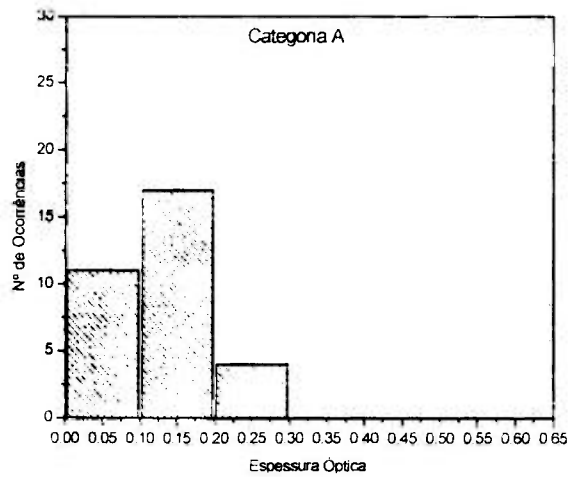


Fig. 5.6.7. Histograma da frequência dos valores de EOA para os perfis de Categoria A.

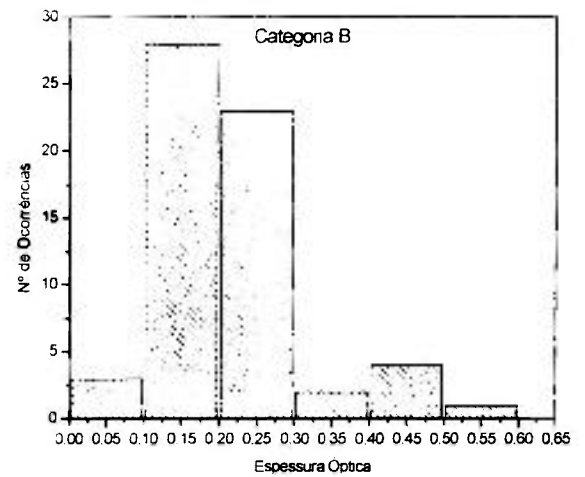


Fig. 5.6.8. Histograma da frequência dos valores de EOA para os perfis de Categoria B.

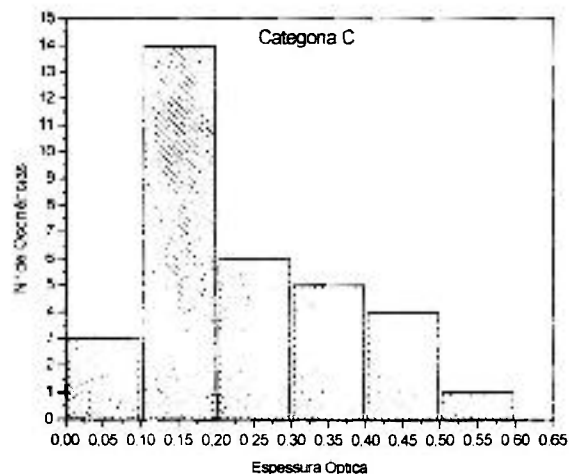


Fig. 5.6.9. Histograma da frequência dos valores de EOA para os perfis de Categoria C.

Através dos histogramas de frequência da EOA para cada Categoria, podemos observar um aumento nos valores das espessuras ópticas em relação às Categorias A, B e C. Esse aumento reflete uma maior quantidade de aerossóis na atmosfera, assim como era esperado de acordo com as características dos perfis em relação às condições meteorológicas de dispersão dos poluentes, número de camadas e possíveis fontes de poluição de cada Categoria.

Foi feito também um histograma apresentado logo abaixo, levando em conta todas as categorizações feitas aos perfis de retroespalhamento. Podemos observar que a maior parte dos dias, precisamente 61, foram categorizados como B, o que mostra a presença de aerossóis acima de 1 Km, esta categoria representa 48% dos dias. A segunda mais freqüente categoria é a Categoria A, a qual está relacionada à uma camada mais baixa, abaixo de 1 Km e uma atmosfera relativamente limpa acima desta altitude. Esta categoria representa 26% dos dias. Estes dias geralmente possuem condições favoráveis à dispersão dos poluentes, são dias precedidos de dias com chuva ou ainda precedidos da chegada de uma frente fria, que geralmente são dias com muito vento. Finalmente, a Categoria C que representa 26% dos dias e é caracterizada por camada de aerossóis em altitudes acima de 2,5 Km, que pode estar relacionada ao transporte de parcelas de ar ricas em aerossóis provenientes de áreas remotas do país.

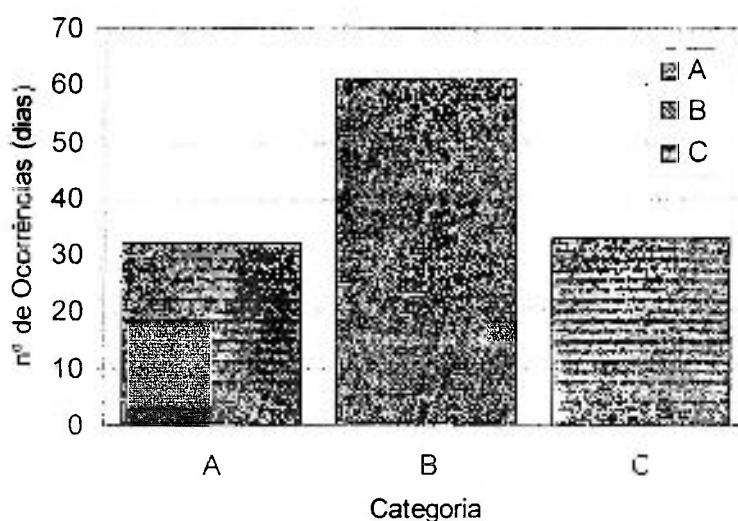


Fig. 5.6.10. Histograma da frequência de Categorias A, B e C.

6. CONCLUSÕES

Esse trabalho mostrou primeiramente que uma boa calibração e otimização de parâmetros geométricos e eletrônicos do sistema LIDAR no que concerne à alinhamento do sistema, saturação da fotomultiplicadora, sinal de fundo, fator de overlap e programa de análise dos dados, são cruciais para uma boa interpretação dos dados.

As medidas feitas em comparação com o CIMEL se mostraram coerentes em relação à EOA, apresentando um comportamento de acordo com o esperado também em relação à categorização dos dias, apresentando um aumento nos valores da EOA em relação às categorias A, B e C. Valores discrepantes foram observados principalmente em virtude de diferenças nos horários das medidas as quais podem variar muito dentro de pequenos intervalos de tempo em virtude da alta sensibilidade dos instrumentos utilizados pelo CIMEL.

Os valores de RL mostraram uma variabilidade muito grande, podendo assumir valores entre 10 e 108 sr, que se mostraram coerentes quando comparados com cálculos feitos através de Teoria de Mie e também quando comparados com valores médios observados empiricamente em experimentos feitos em outros países. Através da análise temporal de RL pode-se observar uma tendência de aumento nos valores de RL no final do período, início da estação úmida. Durante o período de 2002 não foi observada uma tendência nos valores de RL. Já no período de 2003, foi observada uma diminuição no valor de RL durante o mês de Junho e início do mês de Agosto, período da estação seca, evidenciando a presença de partículas menores na atmosfera. Devido à inexistência de um banco de dados estatisticamente significativo principalmente na Região da América do Sul, são necessários um estudo mais detalhado e um número maior de medidas deste parâmetro para que as análises se tornem mais conclusivas.

Em relação à categorização, dentre um total de 126 dias analisados, foi observado que a maior parte, aproximadamente 48% foram classificados como B e em proporções semelhantes como Categoria A e C, 25% e 26 %, respectivamente, ou seja, a maioria dos dias analisados apresentou uma camada de aerossol abaixo de 2 Km, onde fontes locais de poluição são as principais fontes de aerossol, tais como queima de combustível, poluição industrial, etc. Em menor proporção foram observados dias com a atmosfera livre de aerossóis (Categoria A) ou dias com camadas de aerossol acima de 2 Km e com condições muito ruins de dispersão de poluentes (Categoria C).

Através deste trabalho pôde-se estudar o comportamento do sistema LIDAR face as condições atmosféricas disponíveis, permitindo uma base de conhecimento maior a qual será crucial na continuação da operação do sistema e também nas etapas posteriores que inclui a combinação de dois comprimentos de onda (em 355 e 532 nm), para o estudo do Raman Lidar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 P.H.N. Sadiva et al; *Air Pollution and Mortality in Ederly People: A Time-Series Study in São Paulo, Brasil*, Arquivos of Environmental Helth, 50, 159-163 (1999).
- 2 A. Einstein; *Zur Quantem theorie der Sthralung*, Physic Z, 18, 121 (1917).
- 3 J.P. Gordon, H.J. Zeiger e C.H. Townes; *The maser: new type of microwave amplifier, frequency standard and spectrometer*, Phys. Rev., 99, 4, 1264-1274 (1955).
- 4 T.H. Maiman; *Stimulated optical radiation in rubi*, Nature, 187, 4736, 493-494 (1960).
- 5 F.A. Jenkis, H.E. White; *Fundamentals of optics*, McGraw-Hill Book Co., International Edition. (1981)
- 6 J.H. Vuolo; *Complementos de fisica experimental 2ª parte*, Universidade de São Paulo – Instituto de Física, São Paulo (1995)
- 7 E. Hecht e A. Zajac, *Optics*, Addison-Wesley, Massachusetts (1974).
- 8 R.T.H. Collis, P.B. Russel; *Laser monitoring of the Atmosphere*, Ed. E.D. Hinkley, Springer, New York, (1976)
- 9 C.T. Troy et al; *Photonics Spectra*; Environment April Issue, 101 (1998).
- 10 T. Kobayashi; *Remote Sensing Reviews*, 3, 1 (1987).
- 11 B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J. P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J. AA. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, A. Smirnov; *AERONET – A Federates Instrument Network and Data Archive for aerosol Characterization*, Remote Sens. Environment, 66, 1-16 (1998).
- 12 G. L. Stephens; *Remote Sensing of the Lower Atmosphere*, Oxford University Press, (1994)
- 13 J. H. Seinfeld, S. N. Pandis; *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*; New York, USA, Wiley.
- 14 R.T.H. Collis, P.B. Russel; *LIDAR Measurement of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption in Laser Monitoring of the Atmosphere*, Ed. E.D. Hinkley, Springer, New York, (1976)

-
- 15 R.M. Measures, *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications*; Krieger Publishing Company, Florida, 45-89 (1992)
- 16 E. Landulfo et al, *Synergetic measurements of aerosols over São Paulo, Brazil using LIDAR, sunphotometer and satellite data during the dry season*; Atmos. Chemistry and Physics, 3, 1523-1539 (2003).
- 17 C.M. Sorensen, D.J. Fischbach. *Patterns in Mie scattering*, Opt. Communicatons, 173, 145-153 (2000).
- 18 C. Orsini, M. Tabaniks, P. Artaxo, M. F. Andrade, A. S. Kerr; *Characteristics of fine and coarse particles of natural and urban aerosol of Brazil*; Atmos. Environ., 20, 2259-2269 (1986).
- 19 CETESB. 2003. *Relatório anual de qualidade do ar em 2003*, São Paulo, www.cetesb.sp.gov.br.
- 20 A.C. Holland, G. Gagne, Applied Optics. 9,1113 (1970).
- 21 P. Huffman, J. Atmos. Sci, 27, 1207 (1970).
- 22 R.W. Bergstrom. Beitr. Phys. Atmos, 46, 198 (1973).
- 23 J. Klett; *LIDAR inversion with variable backscatter/extinction ratios*, Appl. Opt., 24, 1638-1643 (1985).
- 24 Ackermann J., *The extinction-to-backscatter ratio os tropospheric aerosol: A numerical study*, J. atmos. Ocean Technol., 15, 1043-1050 (1998).
- 25 B.N. Holben et al; *AERONET – A Federal Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization: Remote sensing and Environment*, 66, 1-16 (1998).
- 26 A. Ångström; *The Parameters of Atmospheric Turbidity*, Tellus, 16, 64-75 (1964).
- 27 G.A. D'almeida, P. Koepke, E. P. Shettle; *Atmospheric Aerosols. Global Climatology and Radiative Characteristics*, Hampton, virgínia (1991).
- 28 S.N. Papayannis, G. Chourdakis; *The EOLE project. A multiwavelenght Laser Remote Sensing (LIDAR) System for Ozone and Aerosol Measurements in the Troposphere and the Lower Stratosphere, Part II: Aerosol Measurements over Athens, Grece*, Int J. Rem. Sens., 23, 179-196 (2002).
- 29 S.K. Poultney; *Advances in Electronics and Electron Physics*, 31-39 (1972).
- 30 S.D. Smith; *Optoeletronic Devices*, Prentice Hall (1995).

-
- 31 H. Edner, K. Fredriksson, A. Sunesson, S. Svanberg, L. Uneus, W. Wendt; *Mobile Remote Sensing System for Atmospheric Monitoring*, Appl. Opt., 26, 4330 (1987).
- 32 J. Boseberg, D. Brassington, P. C. Simon; *Instrument development for atmospheric research and monitoring*; Springer, 8 (1997).
- 33 C. Muenkel, U. Leiterer, H.D. Dier; *Scanning the troposphere with a low-cost eye-safe LIDAR*, Environmental Sensing Applications, SPIE Europto Series, 3821, 2, (1999).
- 34 A. Deepak, H. E. Gerber; *Aerosols and their Climate Effects*. Series Report 55, International Council of Scientific Unions and WMO, Switzerland (1983).
- 35 G. A. D'almeida, P. Koepke, E. P. Shettle; *Atmospheric Aerosols, Global Climatology and Radiative Characteristics*, Hampton, Virginia (1991).
- 36 R. B. Stull; *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, 2nd edition, Boston, Kluwer Academic Publishers, 1-14 (1991).
- 37 T. F. Eck, B. N. Holben, J. S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N. T. O'Neill, I. Slutsker, S. Kinne; *Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosol*, J. Geophys. Res., 104, 31333-31349 (1999).
- 38 G. Haanel; *The properties of atmospheric aerosol particles in function of the relative humidity at thermodynamic equilibrium with the scattering moist air*, Adv. Geo., 19, 73-188 (1976).
- 39 T. L. Anderson et al; *In situ measurement of the aerosol extinction-to-backscatter ratio at a polluted continental site*; J. of Geophysical Res., 105, 26907-26915 (2000).