



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-16703-TDI/1644

**EFEITOS DAS QUEIMADAS NA ATMOSFERA DO  
ESTADO DE SÃO PAULO - ANÁLISE DE FONTES  
PRÓXIMAS E DISTANTES ATRAVÉS DE LIDAR**

Glauber Lopes Mariano

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos  
Drs. Maria Paulete Pereira Martins, e Eduardo Landulfo, aprovada em 29 de  
março de 2010.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.18.15.07>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO:**

### **Presidente:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

### **Membros:**

Dr<sup>a</sup> Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr<sup>a</sup> Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr<sup>a</sup> Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

## **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

## **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

## **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da  
Ciência e Tecnologia



INPE-16703-TDI/1644

**EFEITOS DAS QUEIMADAS NA ATMOSFERA DO  
ESTADO DE SÃO PAULO - ANÁLISE DE FONTES  
PRÓXIMAS E DISTANTES ATRAVÉS DE LIDAR**

Glauber Lopes Mariano

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, orientada pelos  
Drs. Maria Paulete Pereira Martins, e Eduardo Landulfo, aprovada em 29 de  
março de 2010.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/03.18.15.07>>

INPE  
São José dos Campos  
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Mariano, Glauber Lopes.

M338ef Efeitos das queimadas na atmosfera do Estado de São Paulo - análise de fontes próximas e distantes através de LIDAR / Glauber Lopes Mariano. – São José dos Campos : INPE, 2010.  
xxxii + 160 p. ; (INPE-16703-TDI/1644)

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientadores : Drs. Maria Paulete Pereira Martins, e Eduardo Landulfo.

1. Queimada. 2. Aerossol. 3. LIDAR. 4. São Paulo (Estado).  
5. Cana-de-açúcar. I. Título.

CDU 551.508.951(815.6)

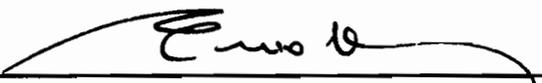
---

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

**Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Doutor(a) em  
Meteorologia**

**Dr. Enio Bueno Pereira**



---

Presidente / INPE / SJCampos - SP

**Dra. Maria Paulete Pereira Martins**



---

Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

**Dr. Eduardo Landulfo**



---

Orientador(a) / IPEN / São Paulo - SP

**Dr. Gilberto Fernando Fisch**



---

Membro da Banca / IAE/CTA / SJCampos - SP

**Dr. Roberto Fernando da Fonseca Lyra**



---

Convidado(a) / UFAL / Maceló - AL

**Dra. Rosa Maria do Nascimento Santos**



---

Convidado(a) / UEA / Manaus - AM

**Aluno (a): Glauber Lopes Mariano**

**São José dos Campos, 29 de março de 2010**



*“Água mole em pedra dura, tanto bate até que fura”.*

PROVÉRPIO POPULAR



*A meus pais Djálma Mariano Angelo (in memoriam) e  
Ana dos Anjos Lopes Mariano*



## AGRADECIMENTOS

Aos doutores Maria Paulete Pereira Martins e Eduardo Landulfo pela orientação e tempo dedicado à esta tese. De cada um aprendi algo que irei levar para o resto da vida.

À Ericka Voss Chagas Mariano pelo companheirismo e amor em todos os momentos, mesmo durante as intermináveis viagens e momentos distantes.

À família Mariano e Voss Chagas que me aturaram durante esse tempo.

Aos membros da banca de avaliação desta tese, pelas críticas e sugestões dadas para a melhora deste documento.

À todas secretárias da Pós-Graduação em Meteorologia, em especial: Lilian Escobar, Simone e Patrícia.

Aos colegas de INPE que fizeram com que esses quatro anos passassem mais rapidamente: Alessandro Michiles, Claudio Moisés, Luciano Marani, Marcelo Gomes, Mari Firpo, Samia Garcia, Suellen Roballo, Sheila Barros, Solange Gomes, Theomar Trindade, Virginia Silveira, Vinicius Capistrano e Wendell Farias.

Ao grupo de Lidar do IPEN: Fabio Lopes, Arthur, Wellington Jesus, Renata e Juliana. Todos foram importantes tanto para o apredizado do LIDAR bem como para os momentos de descontração ao longo desses anos.

Agradecimentos especiais para: Fabio Lopes, pelas discussões sobre LIDAR; Virginia Silveira e Claudio Moises pela ajuda com o GRADS; Vinicius Capistrano pela ajuda no LATEX; Silvio Chagas, pela ajuda em Fortran; Vassilis Amiridis, pela rotina do modelo Hysplit.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida durante meu doutorado sem a qual impossibilitaria este trabalho.

À PETROBRAS que viabilizou a aquisição do LIDAR Móvel por meio de projeto, ferramenta fundamental no desenvolvimento deste trabalho.

Ao CEAPLA/UNESP na figura do Dr. Sergio dos Anjos e do técnico Carlo Burigo.

Ao CEPEMA/USP na figura do Dr. Roberto Guardani e Dra. Juliana Steffens.

Ao IPMET/UNESP na figura do Dr. Gerhard Held e do técnico Márcio Bassan.

## RESUMO

A queima da biomassa é um problema ambiental com grandes impactos nas escalas local, regional e global. Entretanto, os estudos relacionados com os efeitos da queimadas são escassos. O objetivo deste trabalho é avaliar os efeitos da queima de biomassa na região sudeste do Brasil, em regiões distantes (São Paulo-SP) e próximas (Rio Claro-SP) das fontes de queimadas através principalmente de sensoriamento remoto à laser (LIDAR). Os focos de queimadas oriundos de dados do NOAA-12 permitiram identificar o período do inverno e a região próxima de Ribeirão Preto como de máxima quantidade de queimadas dentro do período de 1999-2007. Utilizando agrupamento de trajetórias entre o período de 2000-2006. A partir dessa região foi percebido que o principal sistema que influencia seu transporte é o anticiclone subtropical, mas também, em alguns casos, os sistemas transientes. A identificação somente desses sistemas de maior escala deve-se ao fato da resolução espacial dos dados de entrada do modelo de trajetória Hysplit utilizado serem de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ . Verificou-se que em todos os níveis e períodos analisados, existe pelo menos uma trajetória preferencial em direção à Região metropolitana da cidade de São Paulo, fazendo com que a poluição das queimadas seja somada com a urbana. Na campanha de coleta de dados durante o inverno de 2007 na cidade de São Paulo utilizando um LIDAR elástico em 532nm juntamente com dados do fotômetro solar da rede AERONET, foram identificados 10 casos com chegada de material de queimada sobre o sistema Lidar. As principais regiões identificadas como contribuintes de transporte de produtos de queimada para a região do estudo foram sul da Bacia Amazônica e norte da Argentina, além do interior do estado de São Paulo com grande número de queimadas, sobretudo devido às colheitas com queimadas de cana-de-açúcar. Análises da espessura óptica em 532 nm, Razão Lidar e Expoente de Angstrom revelaram valores entre 0,13 e 0,56; 44-74 e 1,02 e 1,70, respectivamente, bastante condizentes com outros autores para casos de queimadas. Destaca-se que a análise da espessura óptica na cidade de São Paulo mostrou que a mesma não é afetada significativamente pela entrada de plumas, provavelmente devido a ela ser bem misturada, e assim o sinal proveniente da pluma de queimada ser “mascarado” pela presença dos aerossóis locais na Camada Limite Planetária. Na cidade de Rio Claro durante julho-setembro do ano de 2009 foram identificados 31 dias com presença de material de queimadas através de um sistema LIDAR elástico móvel em 532nm, sendo 20 dias em conjunto com sistemas de medidas de gases e particulados. As queimadas detectadas pelo Lidar variaram entre 0,18 km e 3,00 km de altitude. Em quatro estudos de casos foi identificado que as melhores correlações entre a detecção de queimada pelo LIDAR e gases/particulados foram para o CO e NOx. Isto mostra que existe impacto de queimadas tanto em regiões próximas quanto distante das fontes emissoras.



## **BIOMASS BURNING EFFECTS ON THE ATMOSPHERE OF THE STATE OF SÃO PAULO - ANALYSIS OF NEAR AND FAR SOURCES THROUGH LIDAR**

### **ABSTRACT**

Biomass burning is an environmental problem with great impacts in the local, regional and global scale. However, the studies related to the effects of the burnings are scarce. The objective of this work is to evaluate the effects of the biomass burning in the southeastern Brazil, over distant (São Paulo - SP) and near (Rio Claro - SP) regions of the source of burnings, mainly through laser remote sensing (LIDAR). The active fires originated from the NOAA-12 data allowed the identification of the winter period and the region close to Ribeirão Preto as of the maximum amount of burnings in the period from 1999 to 2007. Using cluster analysis of trajectories in the period from 2000 to 2006 from this region, it was noticed that the main system that influences its transport is the subtropical anticyclone, but also, in some cases, the transient systems. The identification of these systems is due to the fact that the spatial resolution of the input data of the trajectory model Hysplit was  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ . It was possible to notice that in all levels and periods analyzed, there is at least one preferred trajectory towards the metropolitan region of the city of São Paulo, so that the pollution from the burnings is added to the urban pollution. In the data collection campaign during the winter of 2007 in the city of São Paulo, using an elastic LIDAR in 532nm, together with data from the AERONET sunphotometer, 10 cases with the arrival of burning material over the LIDAR system were identified. The main regions that contributed with the burnings advected for the study region were the south of the Amazon Basin and northern Argentina, as well as the countryside of the state of São Paulo, with great number of burnings, mostly because of the sugarcane crops. Optical depth analysis in 532nm, Lidar Ratio and Angstrom exponent revealed values between 0,13 and 0,56; 44sr-74sr and 1,02 and 1,70, respectively, similar to other papers about biomass burning. It can be stressed that the analysis of the optical depth in the city of São Paulo showed that there is no significant effect over the city because of the entrance of plumes, probably due to the influence of the aerosols inside the Planetary Boundary Layer. In the city of Rio Claro from July to September, 2009, 31 days with the presence of burning material were identified through an elastic mobile Lidar system in 532nm, 20 of those days together with gases and particulate measurements. The burnings detected by the Lidar changed between 0,18 to 3,00km of altitude. In four case studies it was identified that the best correlations between the burning detection by the Lidar and gases/particulate were for CO and NOx. This shows that there is burning impact both in near and in far regions of the emission sources.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 À esquerda, focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/ TERRA & AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004 (número de focos em áreas de 40 x 40 km <sup>2</sup> ). À direita, estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km <sup>2</sup> . . . . .	8
2.2 Número de focos de queimadas no Brasil 1999-2005 medidos através da análise de imagens do satélite NOAA-12. . . . .	9
2.3 Seqüência de imagens caracterizadas pela ocorrência de “plumas” derivadas da queimada de cana-de-açúcar iniciando-se às 14:05 até 17:03, do dia 10/11/03, na divisa dos municípios de Porto Calvo e Porto de Pedras - Alagoas. . . . .	12
2.4 Valores médios diários de espessura ótica dos aerossóis em 0,5 $\mu\text{m}$ sobre Cuiabá 1993 a 1995 a partir de dados da AERONET. . . . .	13
2.5 Médias sazonais de espessura ótica de aerossol $\tau_a$ (550 nm), para cada trimestre do ano de 2001 (dezembro de 2000). Imagens do MODIS obtidas com o produto nível L3. . . . .	14
2.6 Ilustração dos principais mecanismos físicos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera. . . . .	15
3.1 Diagrama ilustrativo dos componentes de um sistema LIDAR genérico	27
4.1 Organograma de atividades realizadas . . . . .	31
4.2 Localização das estações de medidas da AERONET na América do Sul. . . . .	34
4.3 Divisão do estado de São Paulo por EDR (Escritórios de Desenvolvimento Regional) à esquerda e mapeamento da cana do estado (direita). Em destaque as regiões onde serão feitas medidas diretas . . . .	37
4.4 Foto do sistema MSP-LIDAR 1, do Laboratório de Aplicações Ambientais a Laser - (a) Sistema de Coleta e Envio de Feixe; (b) (Telescópio); (c e d) Sistema de Detecção (Detectores + Módulos de Aquisição) . .	39
4.5 Detalhes do telescópio MSP-LIDAR 1 . . . . .	40
4.6 Sistema LIDAR móvel modelo LR-101-U-D200 da Raymetrics . . . . .	42
4.7 Vista de plantação de cana-de-açúcar. Ao fundo a cidade de Rio Claro-SP . . . . .	43

4.8	Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Imagem do sistema LIDAR corrigida pela altura . . .	44
4.9	Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Coeficiente de retroespalhamento . . . . .	44
4.10	Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Focos de queimadas para os cinco dias anteriores à detecção da queimada pelo sistema LIDAR juntamente com a retro-trajetória . . . . .	45
4.11	Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Perfil vertical médio do coeficiente de retroespalhamento . . . . .	45
4.12	Amostradores de gases e particulados. Vista Interna (a) e externa (b) do prédio . . . . .	47
5.1	Mapeamento da cana-de-açúcar do estado para o ano de 2006 . . . . .	49
5.2	Focos de queimadas durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007: (a) verão; (b) outono; (c) inverno e (d) primavera . . . . .	50
5.3	Somatório dos focos de queimadas por estação durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007 . . . . .	51
5.4	Somatório da precipitação nas cidades de São Simão, Pirassununga, Catanduva e São Carlos durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007 e somatório dos focos de queimadas mensalmente durante o mesmo período para o estado de São Paulo . . . . .	51
5.5	Somatório dos focos de queimadas anualmente . . . . .	53
5.6	Focos de queimadas mensais durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007 . . . . .	54
5.7	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o inverno em 925 hPa (24h) . . . . .	56
5.8	Compostos de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (a-grupo 1 (vermelho). b-grupo 2 (azul escuro); c-grupo 3 (verde); d-grupo 4 (azul claro); e-grupo 5 (violeta)) para o inverno em 925 hPa . . . . .	57
5.9	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o inverno em 700 hPa (24h) . . . . .	59

5.10 Compostos de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (a-grupo 1 (vermelho). b-grupo 2 (azul escuro); c-grupo 3 (verde); d-grupo 4 (azul claro); e-grupo 5 (violeta)) para o inverno em 700 hPa . . . . .	60
5.11 Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o inverno em 500 hPa (24h) . . . . .	62
5.12 Compostos de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (a-grupo 1 (vermelho). b-grupo 2 (azul escuro); c-grupo 3 (verde); d-grupo 4 (azul claro); e-grupo 5 (violeta)) para o inverno em 500 hPa . . . . .	63
5.13 Precipitação (mm) entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo	67
5.14 Média da temperatura do ar (°C) a cada 30min entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo . . . . .	68
5.15 Média da umidade do ar (%) a cada 30min entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo . . . . .	68
5.16 Ciclo médio da temperatura (°C) e umidade do ar (%) a cada 30min entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo . . . . .	70
5.17 Distribuição de freqüência para a direção (graus) e velocidade do vento média (m/s) entre 2006-2007 (período completo); entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 (período de estudo selecionado) e para os dez dias analisados e para São Paulo . . . . .	72
5.18 Retro-trajetórias das queimadas de biomassas detectadas pelo sistema LIDAR em São Paulo . . . . .	76
5.19 Distribuição de freqüência da razão LIDAR em 532 nm e expoente de Ângstrom . . . . .	77
5.20 Distribuição de freqüência da razão LIDAR em 532 nm e expoente de Ângstrom. . . . .	78
5.21 EOA médio a partir dos dados da AERONET para São Paulo para os dias com (cinza) e sem (preto) queimadas de biomassa durante o período de estudo . . . . .	79
5.22 EOA horária (532 nm) em São Paulo (dados oriundos da AERONET) para dias com queimadas de biomassa detectados pelo sistema LIDAR	79
5.23 Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para dias com (preto) e sem (cinza) queimadas de biomassa detectadas pelo sistema LIDAR. (a) Período de estudo completo; (b) 14 e 15 de Setembro (com queimada) e 16 e 18 de Setembro (sem queimada) . . . . .	81

5.24	Relação entre expoente de Ångstrom e EOA para dez casos selecionados e para o período completo do estudo . . . . .	82
5.25	Expoente de Ångstrom, Razão LIDAR e EOA 532 nm a partir de dados da AERONET em 24 agosto de 2007 . . . . .	83
5.26	Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	83
5.27	Imagem do sistema LIDAR corrigida pela altura para o dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	85
5.28	Perfil de coeficiente de retroespalhamento para o dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	85
5.29	Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 16Z em 5km de altura para o dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	86
5.30	Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	86
5.31	Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	87
5.32	Expoente de Ångstrom, Razão LIDAR e EOA 532 nm a partir de dados da AERONET em 07 de setembro de 2007 . . . . .	88
5.33	Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	89
5.34	Imagem do sistema LIDAR corrigida pela altura para o dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	90
5.35	Perfil de coeficiente de retroespalhamento para o dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	90
5.36	Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 6km de altura para o dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	91
5.37	Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	91
5.38	Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	92
5.39	Pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade do ar médias e precipitação durante o período da campanha de coleta de dados em Rio Claro-SP . . . . .	96
5.40	Precipitação (mm) média durante os anos de 1994-2008 e somatório em 2009 . . . . .	97
5.41	Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 06 de julho de 2009 . . . . .	101

5.42 Perfil de retroespalhamento integrado entre 20:30 até o final do dia 06 de julho de 2009 . . . . .	101
5.43 Perfil de retroespalhamento integrado entre 20:30 e 20:36 do dia 06 de julho de 2009 . . . . .	102
5.44 Medidas do coeficiente de retroespalhamento para o dia 06 de julho de 2009 . . . . .	102
5.45 Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 06 de julho de 2009	102
5.46 Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 06 de julho de 2009	103
5.47 Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 06 de Julho de 2009 . . . . .	104
5.48 Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 07 de julho de 2009	106
5.49 Perfil de retroespalhamento integrado entre 20:50 e 21:04 para o dia 07 de julho de 2009 . . . . .	106
5.50 Perfil de retroespalhamento entre 20:50 e 21:04 por minuto para o dia 07 de julho de 2009 . . . . .	107
5.51 Perfil de retroespalhamento ao longo do dia 07 de julho de 2009 . . .	107
5.52 Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 07 de julho de 2009	107
5.53 Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 07 de julho de 2009	108
5.54 Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 07 de Julho de 2009 . . . . .	109
5.55 Fotos do evento de queimada ocorrido no dia 15 de julho de 2009 . .	110
5.56 Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 15 de julho de 2009	111
5.57 Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 15 de julho de 2009 entre 15:22 e 15:30 . . . . .	111
5.58 Perfil de retroespalhamento integrado as 15:22 e 15:30 para o dia 15 de julho de 2009 . . . . .	112
5.59 Perfil de retroespalhamento integrado entre 15:33 e 17:22 para o dia 15 de julho de 2009 . . . . .	112
5.60 Medidas de retroespalhamento ao longo do dia 15 de julho de 2009 .	113
5.61 Perfil de retroespalhamento durante o evento de queimada do dia 15 de julho de 2009 . . . . .	113
5.62 Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 15 de julho de 2009	113
5.63 Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 15 de julho de 2009	114
5.64 Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 15 de Julho de 2009 . . . . .	115
5.65 Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 04 de agosto de 2009	117

5.66 Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 04 de agosto de 2009 entre 20:50 e 21:10 . . . . .	117
5.67 Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 04 de agosto de 2009 entre 20:50 e 21:00 . . . . .	118
5.68 Perfil de retroespalhamento ao longo do dia 04 de agosto de 2009 . . .	118
5.69 Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 04 de agosto de 2009	118
5.70 Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 04 de agosto de 2009 . . . . .	119
5.71 Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 08 de agosto de 2009 . . . . .	120
A.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 números indicam os dados de saída . . . . .	135
A.1 Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o verão em 925hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	137
A.2 Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o outono em 925hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	138
A.3 Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o primavera em 925hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	139
A.4 Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o verão em 700hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	140

A.5	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o outono em 700hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	141
A.6	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o primavera em 700hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	142
A.7	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o verão em 500hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	143
A.8	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o outono em 500hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	144
A.9	Trajетórias médias (a) da parcelas de ar para o primavera em 500hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta)) . . . . .	145
A.10	(a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 18Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 30 de julho de 2007 . . . . .	146
A.11	(a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 16Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 09 de agosto de 2007 . . . . .	147

A.12 (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 16Z em 6km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 13 de agosto de 2007 . . . . .	148
A.13 (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 4km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 09 de setembro de 2007 . . . . .	149
A.14 (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 8km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 14 de setembro de 2007 . . . . .	150
A.15 (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 18Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 15 de setembro de 2007 . . . . .	151
A.16 (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 18Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 04 de outubro de 2007 . . . . .	152
A.17 (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 6km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 09 de outubro de 2007 . . . . .	153
A.18 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 30 de julho de 2007 . . . . .	154
A.19 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 04 de agosto de 2007 . . . . .	155
A.20 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 13 de agosto de 2007 . . . . .	155

A.21 Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 13 de agosto de 2007 . . . . .	156
A.22 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 09 de setembro de 2007 . . . . .	156
A.23 Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 09 de setembro de 2007 . . . . .	157
A.24 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 14 de setembro de 2007 . . . . .	157
A.25 Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 14 de setembro de 2007 . . . . .	158
A.26 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 15 de setembro de 2007 . . . . .	158
A.27 Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 15 de setembro de 2007 . . . . .	159
A.28 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 04 de outubro de 2007 . . . . .	159
A.29 Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 09 de outubro de 2007 . . . . .	160



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Área de Cana (ha) por Escritório de Desenvolvimento Regional (EDR) onde se pretende realizar medições in situ . . . . .	36
4.2 Especificações do LIDAR modelo LR-101-U-D200 da Raymetrics . . . . .	42
4.3 Informações referentes aos analisadores de gases e particulados utilizados em Rio Claro - SP . . . . .	47
5.1 Máximas, mínimas e médias (juntamente com seu desvio padrão) para a temperatura e umidade do ar durante o período selecionado para a cidade de São Paulo . . . . .	74
5.2 Máximas, mínimas e médias (juntamente com seu desvio padrão) para a temperatura e umidade do ar dos dias em 2007 selecionados com detecção de plumas de queimadas na cidade de São Paulo . . . . .	74
5.3 Datas em 2007 de presença de fumaça sobre São Paulo indicado pela sinergia de medidas LIDAR, focos de queimadas do satélite NOAA-12 e modelo Hysplit. Intervalo de altura das partículas de fumaça, a razão LIDAR, EOA e expoente de Ångstrom médio para cada dia . . . . .	76
5.4 Dias com detecção de queimadas pelo sistema Lidar móvel em Rio Claro-SP, altura máxima e mínima das plumas (km), e máximos valores dos gases (ppb), particulado (ppb) e espalhamento ( $Sr^{-1}$ ) medidos durante o dia . . . . .	99



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AERONET	–	AErosol RObotic NETwork
AVHRR	–	Advanced Very High Resolution Radiometer
CANASAT	–	Mapemamento da Cana via Imagens de Satélites de Observação da Terra
CEAPLA	–	Centro de Análise e Planejamento Ambiental
CETESB	–	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CLA	–	Centro de Lasers e Aplicações
CLAIRE	–	Cooperative LBA Airborne Regional Experiment
CLP	–	Camada Limite Planetária
CPTEC	–	Centro de Previsão do Tempo e Clima
DIAL	–	Differential Absorption Lidar
EA	–	Expoente de Angstrom
ECMWF	–	European Centre for Medium-Range Weather Forecast
EDR	–	Escritório de Desenvolvimento Regional
EMA	–	Estação Meteorológica Automática
EOA	–	Espessura Óptica dos Aerossóis
FNL	–	NCEP FiNaL run
GOES	–	Geostationary Operational Environmental Satellite
HYSPLIT_4	–	HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory - versão 4.0
IAG	–	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
INMET	–	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEN	–	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
LAAL	–	Laboratório de Aplicações Ambientais a Laser
LBA	–	Large Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia
LIDAR	–	Light Detection And Ranging
MODIS	–	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration
NCEP	–	National Centers for Environmental Prediction
Nd:YAG	–	Neodímio Ytrium Alumínio Garnet
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
PM <sub>10</sub>	–	Material Particulado com 10 $\mu m$ de diâmetro
PM <sub>2,5</sub>	–	Material Particulado com 2,5 $\mu m$ de diâmetro
PMT	–	Fotomultiplicadora
PTS	–	Poeira Total em Suspensão
RADAR	–	Radio Detection And Ranging
RL	–	Razão Lidar
RMSP	–	Região Metropolitana de São Paulo
ROL	–	Radiação de Ondas Longas
SMOCC	–	Smoke, aerosols, clouds, rainfall and climate: Aerosols

- from biomass burning perturb global and regional climate
- SODAR – SOund Detection And Raging
  - TRACE-A – Transport and Atmospheric Chemistry Near the Equator-Atlantic
  - UNESP – Universidade Estadual Paulista
  - USP – Universidade de São Paulo
  - UTC – Universal Time Coordinated
  - VAS – Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>7</b>
2.1 Queimadas e seus efeitos na atmosfera . . . . .	7
2.1.1 Queimadas de cana-de-açúcar . . . . .	9
2.2 Medidas dos impactos das queimadas na atmosfera . . . . .	11
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> . . . . .	<b>17</b>
3.1 Detecção de focos de queimadas por satélite . . . . .	17
3.2 Descrição do Modelo HYSPLIT para simulação de trajetórias de parcelas de ar . . . . .	18
3.3 Análise de “clusters” para agrupamento de trajetórias . . . . .	20
3.4 Espessura óptica . . . . .	23
3.5 Lei de Beer . . . . .	24
3.6 LIDAR (Light Detection And Ranging) . . . . .	25
3.6.1 LIDAR de retroespalhamento elástico . . . . .	27
3.6.2 Método de Klett para obtenção dos coeficientes de retroespalhamento e extinção para LIDAR de retroespalhamento elástico . . . . .	28
<b>4 DADOS E METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>31</b>
4.1 Organograma das etapas e objetivos da tese . . . . .	31
4.2 Escolha das regiões de queimadas para estudo de trajetórias de ar . . . . .	32
4.3 Cálculo das trajetórias de parcelas de ar e análise de agrupamento . . . . .	32
4.4 Rede de dados AERONET . . . . .	34
4.5 Campanhas de coleta de dados nas cidades de São Paulo (2007) e Rio Claro(2009) . . . . .	36
4.5.1 Estações Meteorológicas de Superfície e SOund Detection And Raging - SODAR . . . . .	37
4.5.2 Dados da rede AERONET . . . . .	38
4.5.3 LIDAR . . . . .	38
4.5.3.1 LIDAR MSP-LIDAR 1 . . . . .	38
4.5.3.2 LIDAR Móvel Raymetrics . . . . .	41

4.5.4	Exemplos de resultados encontrados com LIDAR . . . . .	43
4.5.5	Analisadores de gases e particulados . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões . . . . .</b>	<b>49</b>
5.1	Análise das queimadas da cana-de-açúcar no estado de São Paulo . . . . .	49
5.1.1	Conclusões . . . . .	53
5.2	Trajetórias preferenciais de dispersão da parcela de ar . . . . .	55
5.2.1	Conclusões . . . . .	64
5.3	Análise de dados de São Paulo-SP . . . . .	66
5.3.1	Aspectos Sinóticos durante o período da campanha de coleta de dados com o sistema LIDAR de São Paulo em 2007 . . . . .	66
5.3.2	Medidas de queimadas de biomassa através de um sistema LIDAR em São Paulo . . . . .	75
5.3.2.1	Análise de caso - Dia 24 de agosto de 2007 . . . . .	82
5.3.2.2	Análise de caso - Dia 07 de setembro de 2007 . . . . .	87
5.3.2.3	Conclusões . . . . .	91
5.4	Análise de dados de Rio Claro-SP . . . . .	94
5.4.1	Aspectos Sinóticos durante campanha com o sistema Lidar móvel em Rio Claro - SP . . . . .	94
5.4.2	Medidas de queimadas de biomassa através de um sistema Lidar móvel em Rio Claro-SP . . . . .	98
5.4.2.1	Análise de caso - Dia 06 de julho de 2009 . . . . .	100
5.4.2.2	Análise de caso - Dia 07 de julho de 2009 . . . . .	105
5.4.2.3	Análise de caso - Dia 15 de julho de 2009 . . . . .	108
5.4.2.4	Análise de caso - Dia 04 de agosto de 2009 . . . . .	116
5.4.2.5	Conclusões . . . . .	119
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>123</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE A - Programa de processamento dos dados do sistema MSP-LIDAR1 em São Paulo-SP . . . . .</b>	<b>.135</b>
<b>Anexos . . . . .</b>	<b>.137</b>
A.1 Anexo A - Agrupamentos para verão, outono e primavera nos níveis de 925mb, 700mb e 500mb . . . . .	137
A.2 Anexo B - Dias com detecção de queimadas pelo sistema Lidar em São Paulo . . . . .	146



## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Usualmente, tanto para a comunidade científica quanto para a população em geral, tende-se a associar poluição do ar com grandes centros urbanos (principalmente oriunda de veículos automotores ou chaminés de fábricas). Porém, grandes regiões, principalmente regiões tropicais, convivem com outra fonte de poluição: a queima de biomassa.

O Brasil se destaca em termos de queima de biomassa, com a detecção de aproximadamente 135.000 pontos de queimadas em 2008, segundo o CPTEC/INPE. A maioria destes pontos ocorreu na parte sul da bacia amazônica durante a estação seca (de agosto a novembro) e o produto destas emissões chega até algumas cidades da região sudeste do país, uma região bastante populosa e com cidades com sérios problemas de poluição do ar urbano. Além disso, com a crescente demanda por biocombustíveis, o cultivo da cana-de-açúcar vem expandindo consideravelmente no estado de São Paulo, sendo uma forte contribuição para a má qualidade do ar na região.

A queima de biomassa inclui queimadas de florestas, savanas, e terras agrícolas. Grandes quantidades de gases e materiais, além de elementos traços são emitidos para a atmosfera por essa ação. Isso pode afetar tanto o clima regional ou global por meio das interações com a radiação solar e dos processos químicos e físicos na atmosfera. As regiões nordeste e sudeste do Brasil são ressaltadas em relação a esse problema, onde o uso de queimadas na cana-de-açúcar se faz de maneira programada, sendo utilizada para facilitar a colheita.

O Brasil possui 25% das áreas globais de cana de açúcar, sendo o principal produtor no mundo. No começo da década de 90 possuía 4.500.000 ha de colheita de cana e mais de 1.100.000 trabalhadores rurais envolvidos nesta indústria (ZAMPERLINI et al., 2000). A área cultivada no estado de São Paulo, no sudeste do Brasil, alcança aproximadamente 24.000 km<sup>2</sup>. A fim de facilitar a colheita, como ocorre também em outros locais como Havaí e África, a cana é queimada preferencialmente durante a estação seca (de maio a novembro). Aproximadamente 20 t da matéria seca da cana por hectare são queimados, contribuindo para uma emissão global de aproximadamente 0,48 Tg de carbono por ano. Em consequência, o aerossol e os gases traço emitidos pelas queimadas da cana têm efeitos significativos na composição e na acidez da precipitação em grandes

áreas do sudeste do Brasil. Apesar de sua importância, pouca informação está disponível sobre os efeitos das queimadas da cana nas partículas de aerossol (AZEVEDO et al., 2002) e conseqüentemente na atmosfera.

As plantações de cana-de-açúcar nos últimos anos tenderam a crescer devido a diversos fatores. O governo nacional tem incentivado a pesquisa e implementação de biocombustíveis como o álcool extraído da cana-de-açúcar. Além disso, o álcool utilizado misturado à gasolina, chamado de álcool anidro, é todo extraído da cana. Atualmente existe uma tendência de aumentar sua proporção, hoje em cerca de 25%, devido, entre outros motivos, ao aumento do preço do petróleo, pela produção anual da cana e como tentativa de mudança de matriz energética. Um fator que deve ser lembrado é que a partir de 2003 as montadoras lançaram no mercado carros “flex fuel”, que podem ser abastecidos com dois tipos de combustíveis, contribuindo com o aumento do consumo do álcool como combustível, sendo responsável hoje por 90% das vendas de veículos novos.

Conforme Aires e Kirchoff (2001) devido a não uniformidade na distribuição espacial das queimadas, o Brasil apresenta grandes contrastes entre regiões fonte e não fonte de queimada. Esses contrastes são decorrentes de fatores climáticos (período de grande estiagem) e regionais (predominância de atividades agropecuárias). No entanto, nas regiões de pouca queima, medem-se, às vezes, concentrações elevadas de gases traço gerados por queimadas, por exemplo, Lara et al. (2001). Em outras palavras, as regiões de muita queimada, ou regiões fonte, exportam gases e partículas gerados em queimadas para regiões não fonte.

A alteração da composição do ar pela queima da cana nas cidades onde existe plantação e conseqüentemente queima de cana, pode ser estendida a outras cidades da região Sudeste. No Estado de São Paulo, no que se refere à agricultura, os principais usos da terra são pasto e lavoura da cana de açúcar, que cobrem cerca de 50 % e 10 % da área total, respectivamente. Apesar dos aerossóis provenientes da queima da cana terem tempo de residência atmosférico considerado reduzido, de poucos dias até algumas semanas, eles podem ser espalhados sobre longas distâncias (centenas a milhares de quilômetros) (LARA et al., 2005).

Apesar de existirem estudos de casos na América do Sul sobre as regiões prefer-

enciais de transporte do material particulado resultante da queima da biomassa, tanto na região amazônica (por exemplo, Aires e Kirchoff (2001)) quanto nas regiões onde existe colheita de cana-de-açúcar, a maioria dos estudos relacionados à queima de vegetação a céu aberto diz respeito a episódios isolados. Lara et al. (2001) e Lara et al. (2005) estudaram somente a composição química do material particulado e da acidez da precipitação.

Uma forma de se estudar e avaliar os impactos induzidos por emissões de queimadas é analisar algumas variáveis ópticas como a transmissão óptica atmosférica e/ou o coeficiente de retroespalhamento.

Uma ferramenta muito útil nos estudos dos efeitos das queimadas na atmosfera é o LIDAR (Light Detection And Ranging), que permite obter perfis verticais dos aerossóis e acompanhar a evolução temporal da estrutura da atmosfera bem como obter valores de coeficiente de retroespalhamento. O sistema LIDAR é um tipo de sistema de sensoriamento remoto ativo. Seu nome provém de sua semelhança de operação e princípios físicos com sistemas de RADAR.

Atualmente, sistemas LIDAR são utilizados para uma grande variedade de medidas atmosféricas, fornecendo informações que podem ser únicas ou complementares com medidas feitas através de sensoriamento remoto passivo ou medidas realizadas “in situ”. Sua importante aplicação é na validação de modelos de previsão.

A técnica LIDAR é caracterizada por alta resolução espacial e temporal, permitindo a medição de pequenas concentrações de diferentes tipos de gases (principalmente vapor d'água), aerossóis e parâmetros meteorológicos locais tal como direção do vento e temperatura, dependendo, entretanto, do tipo de LIDAR e comprimento(s) de onda(s) utilizado(s).

A hipótese levantada nesse estudo é que o material resultante de queimadas em diversas partes da América do Sul é advectado para o estado de São Paulo e afeta alguns parâmetros atmosféricos como espessura óptica e coeficiente de retroespalhamento no estado como um todo, sendo as regiões estudadas nesse trabalho a região da Região Metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP) (LAT.: 23° 33'S e LON.:46° 44'W) e da cidade de Rio Claro (LAT.: 22°23'S e LON.:47°32'W), sendo a última principalmente pelo fato de estar situada em uma

região com grande focos de queimadas devido a cultura da cana-de-açúcar.

Diante do exposto, esse estudo tem como objetivo estudar a influência das queimadas, e conseqüentemente dos aerossóis originados delas, na atmosfera do estado de São Paulo, em regiões próximas e distantes das fontes emissoras. Pretende-se analisar os corredores preferenciais de transporte das emissões dessas regiões, através do uso do modelo Hysplit e da utilização da técnica de agrupamento de trajetórias. Essas informações deverá servir como base para uma possível expansão da rede de dados da AERONET ou de uma futura rede de LIDARs, buscando melhorar sua cobertura no Brasil, visando o estudo dos impactos das queimadas.

Além disso, pretende-se também estudar as características ópticas das partículas emitidas pelas queimadas de biomassa, com ênfase da cana-de-açúcar bem como o perfil vertical desses aerossóis nas cidades de São Paulo e Rio Claro. E assim, analisar os impactos das queimadas de regiões distantes (como Amazônia e norte da Argentina) e próximas na atmosfera do estado de São Paulo.

Especificamente, será proposto:

- Identificar as regiões e períodos com alta incidência de queimadas no estado de São Paulo;
- Identificar as trajetórias preferenciais das queimadas do estado de São Paulo à partir da região com maior índice de queimadas durante o período de 1999-2007 no estado de São Paulo através da análise de agrupamento utilizando o modelo HYSPLIT;
- Identificar os sistemas sinóticos em grande escala que influenciaram as trajetórias principais e seus agrupamentos;
- Determinar a influência das queimadas na cidade de São Paulo pelos dados da rede de superfície da AERONET durante a campanha de coleta de dados com o sistema LIDAR em 2007;
- Identificar as regiões de origem de queimadas que foram advectadas para a cidade de São Paulo em 2007 e identificadas através de LIDAR;
- Determinar o perfil e características ópticas dos aerossóis da cidade de São Paulo com sensoriamento remoto a laser - LIDAR;

- Determinar o perfil e características ópticas dos aerossóis na região ao entorno das queimadas (Rio Claro) utilizando sensoriamento remoto a laser - LIDAR.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Queimadas e seus efeitos na atmosfera

As regiões onde mais ocorrem queimadas de biomassa são as regiões tropicais e subtropicais, sobretudo da África, América do Sul, sudeste da Ásia e Austrália (ANDREAE, 1991; PRINS et al., 1998). Conforme Andreae (1991), sobre a América do Sul, em decorrência das atividades de queima de biomassa, representando um terço do total do material particulado emitido mundialmente, são lançadas para a atmosfera aproximadamente  $34 \text{ Tg.ano}^{-1}$  de partículas de aerossóis. No Brasil, a queima de biomassa na região da Amazônia acontece com maior intensidade durante a estação seca (Julho - Outubro) e afeta principalmente os ecossistemas de floresta, pastagem e cerrado (ARTAXO et al., 1998; PRINS et al., 1998). As emissões destes fogos têm impactos significativos na concentração de gases e de aerossóis traço sobre uma grande área (YAMASOE et al., 2000; ARTAXO et al., 2002).

Freitas et al. (2005) apresentaram a distribuição de focos de calor detectados em 2004 por diversos sensores, eliminando as redundâncias de detecções do mesmo foco (figura 2.1- esquerda), e a estimativa de emissão de monóxido de carbono (figura 2.1- direita). Os sensores utilizados no respectivo trabalho foram: Visible Infrared Spin Scan Radiometer Atmospheric Sounder - VAS (satélite GOES), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS (AQUA e TERRA) e Advanced Very High Resolution Radiometer AVHRR (NOAA). Os autores nesse trabalho afirmaram que as regiões que mais se destacam (com seus respectivos períodos de máxima quantidade de focos) são: Nordeste do Brasil (outubro - janeiro); centro-oeste brasileiro e na borda da região Amazônica (julho - outubro); no estado do Mato Grosso, com queimadas associadas a expansão agropecuária e com grande quantidade de estimativa de emissão de monóxido de carbono (figura 2.1-direita). Ainda complementaram que as queimadas de canaviais são as principais razões para a quantidade de focos de queimadas no estado de São Paulo identificados na figura 2.1, queimadas estas que são o alvo desse trabalho.

Na figura 2.2 é mostrado o número de focos de queimadas no Brasil durante o período de 1999 a 2005, medidos através de dados extraídos de imagens do satélite NOAA-12, que até o ano de 2007 era usado como fonte principal de

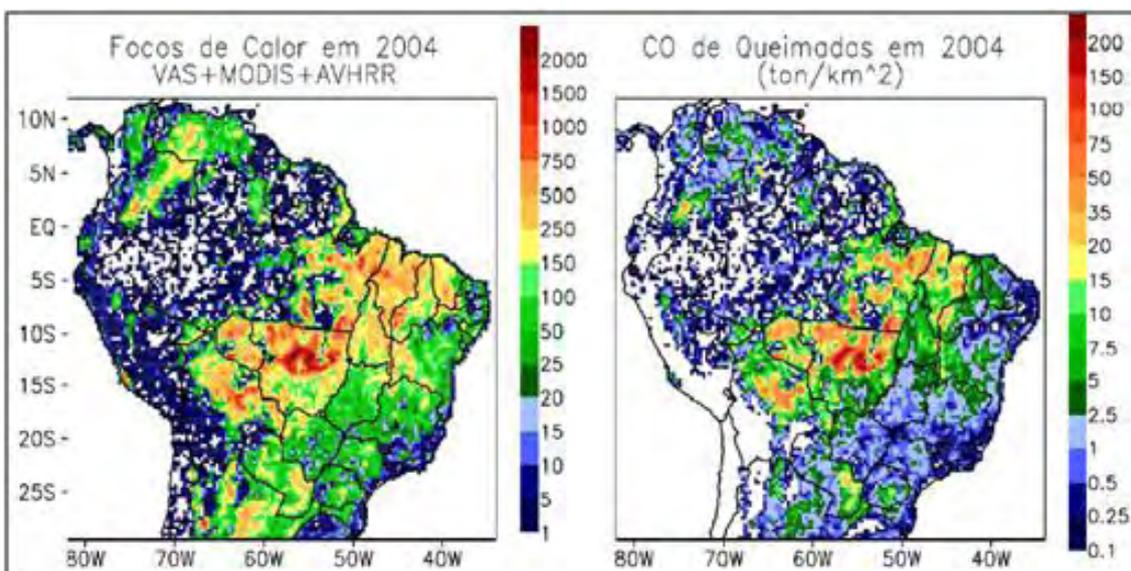


Figura 2.1 - À esquerda, focos de calor detectados pelos sensores VAS/GOES, MODIS/TERRA & AQUA, AVHRR/NOAA durante o ano de 2004 (número de focos em áreas de 40 x 40 km<sup>2</sup>). À direita, estimativa para 2004 de emissão de monóxido de carbono (CO) em ton/km<sup>2</sup>  
 Fonte: Freitas et al. (2005).

informações sobre dados de queimadas para a América do Sul pelo grupo de Queimadas do CPTEC/INPE. Os autores sugerem que o aumento de focos durante este período é um indicativo de que o problema das queimadas na América do Sul está longe de ser controlado (ARTAXO et al., 2006).

Relatórios do IPCC de 2001 e 2007, afirmaram que dentre os principais tipos de partículas de aerossóis, as emitidas durante a queima de biomassa são mais ativas, na interação com a radiação solar incidente devido ao seu tamanho médio (menor que 1 micrometro) e por conterem alto índice de componentes absorvedores de luz. Daí o fato de serem conhecidas como partículas escuras ((IPCC), 2001; (IPCC), 2007). Conforme Andreae e Crutzen (1997) e (IPCC) (2007), devido a estes fatores e como a queima de biomassa é estimada como a segunda maior fonte de aerossóis antropogênicos ((IPCC), 2001), iniciaram-se diversos estudos, tanto em campo quanto em laboratórios, para tentar determinar sua contribuição ao balanço de radiação da Terra. Porém, apesar desses estudos, o nível de incerteza do valor da forçante radiativa devido as partículas de aerossóis (não somente resultantes da queima de biomassa) são considerados “baixo” ((IPCC),

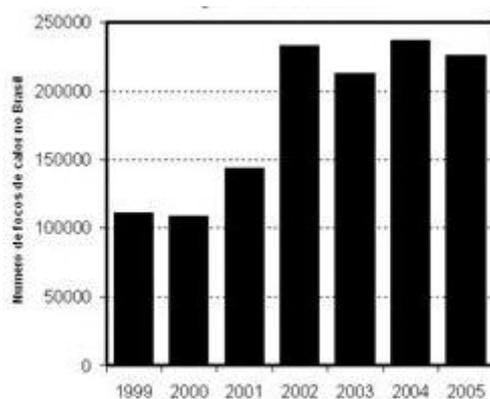


Figura 2.2 - Número de focos de queimadas no Brasil 1999-2005 medidos através da análise de imagens do satélite NOAA-12.  
 Fonte: Artaxo et al. (2006).

2007).

Dentre os estudos que avaliaram os efeitos causados pela queima de biomassa em escala global e regional, pode-se destacar alguns resultados. Como 80% das queimadas ocorrem nos trópicos, essa região é a maior fonte de produção de gases (tóxicos e de efeito estufa) e material particulado do planeta (CRUTZEN; ANDREAE, 1990); afeta o balanço radiativo (KAUFMAN; TANRÉ, 1998; CHRISTOPHER et al., 2000), balanço térmico da atmosfera devido a interação com a radiação solar (afetando tanto a quantidade refletida para o espaço como absorvida pela atmosfera) e de forma indireta pela redução da evaporação e precipitação (WARD et al., 1992; BOTKIN; KELLER, 1995), além de causar efeitos no clima (NOBRE et al., 1998).

Os aerossóis de fumaça têm um tempo de residência na atmosfera usualmente menor do que quatro semanas (JUNG; BACK, 1987), sendo dependente do tipo de vegetação queimada e da concentração de aerossóis na atmosfera, o que é muito variável ao longo do ano.

### 2.1.1 Queimadas de cana-de-açúcar

Arbex et al. (2004) detalham que o programa do governo brasileiro chamado Pró-Álcool foi implementado na década de 1970 com o objetivo primário de produzir um combustível alternativo, renovável e não poluente: o etanol, derivado

da cana-de-açúcar. Esse programa ocasionou, a partir da década de 1980, uma grande produção de veículos movidos a álcool que por sua vez ocasionou uma expansão na cultura da cana-de-açúcar. Os autores ainda afirmam que em 1996, somente alguns estados do país não produziam cana-de-açúcar (Acre, Amapá, Pará e Rondônia), sendo São Paulo o maior produtor, com aproximadamente 65% do total da produção nacional. Com a crescente utilização do álcool como combustível em veículos automotores houve uma melhora na qualidade do ar nos grandes centros urbanos. No entanto, os mesmos autores complementam que existe, porém, um contraponto: devido ao fato que a cana-de-açúcar ser uma cultura agrícola que por razões de produtividade e de segurança, sua colheita é realizada após a queima dos canaviais; isso gera grande quantidade de material particulado negro, que os mesmos denominaram como “fuligem da cana”, que consiste em “*black carbon*” ou também chamado de carbono negro. Esse material faz com que a população exposta por aproximadamente seis meses por ano seja afetada por esses poluentes além desses poluentes modificarem as características do ambiente nas regiões onde a cana-de-açúcar geralmente é cultivada, queimada, colhida e industrializada.

Relatórios da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), emitidos em 1986 e em 1999, sobre a qualidade do ar em Araraquara, mostravam um importante aumento da poeira total em suspensão (PTS) e do material particulado com  $10 \mu\text{m}$  de diâmetro ( $\text{MP}_{10}$ ), no período da safra da cana-de-açúcar, em comparação com o período de não safra (CETESB, 1986; CETESB, 1999).

Como já destacado por Crutzen e Andreae (1990), as regiões do sudeste e do nordeste do Brasil são regiões importantes nas emissões de material particulado e gases devido as queimadas de cana-de-açúcar. Apesar de existirem poucos trabalhos sobre queimadas dessa cultura, Lara et al. (2005) concluíram, após um ano de medidas, que durante todo o ano, a influência da queima de cana-de-açúcar pode ser vista na composição tanto de partículas finas quanto grossas, como também nas variações da concentração de carbono negro em Piracicaba-SP. Além disso, o estudo desses pesquisadores demonstrou que essas queimadas contribuem fortemente na estrutura dos aerossóis na região estudada, com cerca de 60% da massa dos aerossóis finos ( $\text{PM}_{2,5}$ ), 64% da massa do carbono negro e 25% da massa dos aerossóis grossos ( $2,5 \mu\text{m} < d < 10 \mu\text{m}$ ). Os autores acima mencionados ainda afirmam que os aerossóis e o carbono ne-

gro liberados nas queimadas alteram as propriedades higroscópicas dos núcleos de condensação afetando o albedo das nuvens. Apesar do tempo de residência atmosféricos do material particulado resultante da queima da cana-de-açúcar ser reduzido, entre alguns dias até semanas (devido ao seu tamanho médio), sem a ocorrência de deposição úmida, ele pode ser espalhado sobre longas distâncias, como já comentado por Aires e Kirchoff (2001) para as queimadas da região Amazônica.

A ocorrência de queimadas de biomassa, como da cana-de-açúcar, pode ser visualizada através de alguns sistemas como Radares. Observando uma série de imagens seqüenciais de um Radar instalado em Alagoas, Quintão (2004) pode verificar a ocorrência de “plumas” nas regiões canavieiras, no mesmo horário em que as queimadas foram realizadas. Os movimentos advectivos dessas “plumas” são ilustrados na figura 2.3.

## 2.2 Medidas dos impactos das queimadas na atmosfera

Os aerossóis atmosféricos possuem uma forçante radiativa global entre  $-0,50 \pm 0,40 \text{ W/m}^2$ , enquanto que o efeito indireto global é da ordem de  $-0,70 \text{ W/m}^2$  (podendo variar entre  $-1,8$  até  $-0,3 \text{ W/m}^2$ ). Comparado com a forçante radiativa do  $\text{CO}_2$ , de  $+1,55 \text{ W/m}^2$  que pode variar entre  $+1,49$  até  $+1,83 \text{ W/m}^2$ , os aerossóis possuem uma contribuição bastante significativa ((IPCC), 2007).

O experimento Large Biosphere Atmosphere (LBA) Experiment in Amazonia realizou diversos estudos sobre a importância das partículas de aerossóis na Amazônia, destacando-se o SMOCC - Smoke, aerosols, clouds, rainfall and climate: Aerosols from biomass burning perturb global and regional climate e LBA/CLAIRE - Cooperative LBA Airborne Regional Experiment. No período chuvoso da região a contribuição de aerossóis das queimadas é mínimo. Dessa maneira, como a maior parte dos aerossóis é oriunda de partículas biogênicas naturais, a concentração de massa de partículas é da ordem de 8 a  $10 \mu\text{g.m}^{-3}$  e a concentração numérica da ordem de 100 a  $300 \text{ partículas.cm}^{-3}$  (YAMASOE et al., 1998). Esses autores complementam que esses valores de concentrações (tanto para massa quanto em número de partículas) são semelhantes a regiões oceânicas remotas. Todavia, durante o período de maior quantidade de queimadas (estação seca), a concentração de massa é de cerca de 300 a  $600 \mu\text{g.m}^{-3}$  e o número de partículas passa a ser 15.000 a  $30.000 \text{ partículas.cm}^{-3}$ .

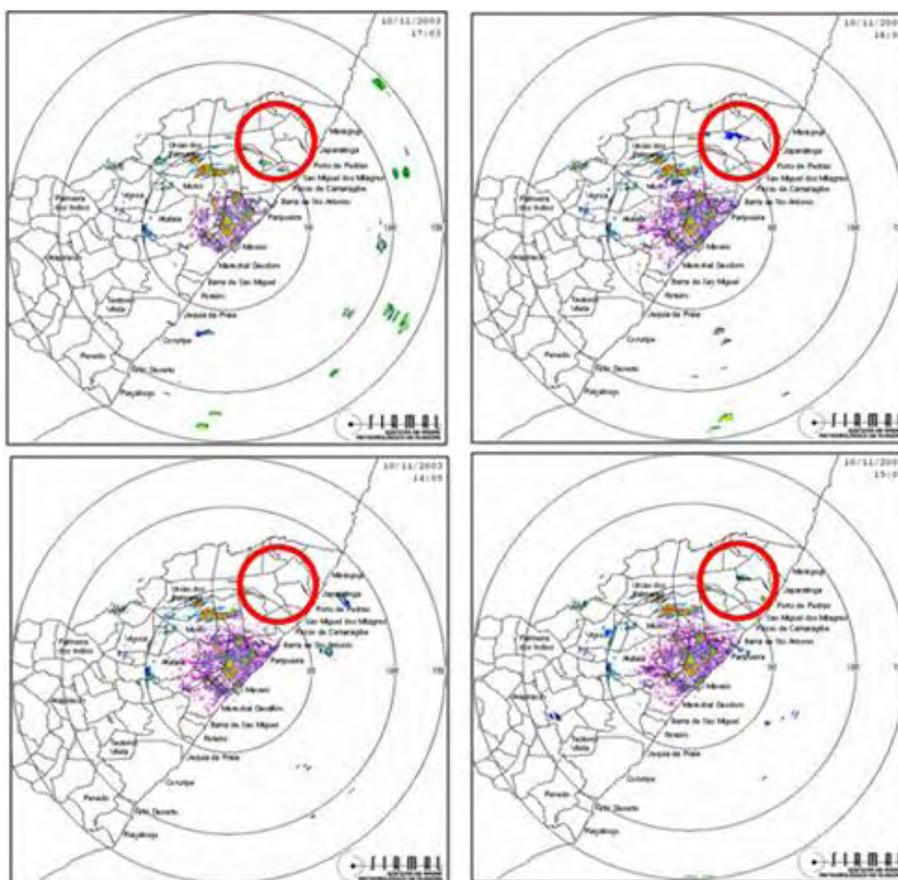


Figura 2.3 - Seqüência de imagens caracterizadas pela ocorrência de “plumas” derivadas da queimada de cana-de-açúcar iniciando-se às 14:05 até 17:03, do dia 10/11/03, na divisa dos municípios de Porto Calvo e Porto de Pedras - Alagoas.

Fonte: Quintão (2004).

Holben et al. (1996) e Holben et al. (2001) usaram dados oriundos da rede da AERONET para pesquisar impactos das queimadas de biomassa na espessura ótica na bacia Amazônica. Eles reportaram que a espessura ótica durante a estação de queimadas na bacia Amazônica foi uma ordem de magnitude acima dos níveis de fundo em algumas estações (figura 2.4). Durante o pico da estação de queimadas (Agosto-Setembro) em Cuiabá a média foi de 1,7-1,8 enquanto que nos meses onde normalmente não ocorrem queimadas a média foi de 0,6-1,7.

A figura 2.5, adaptada por Castanho (2005) de Chu et al. (2003) ilustra uma média da espessura ótica em 550 nm, com resolução de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  a cada trimestre. Os autores afirmam que é evidente a sazonalidade das fontes globais emissoras

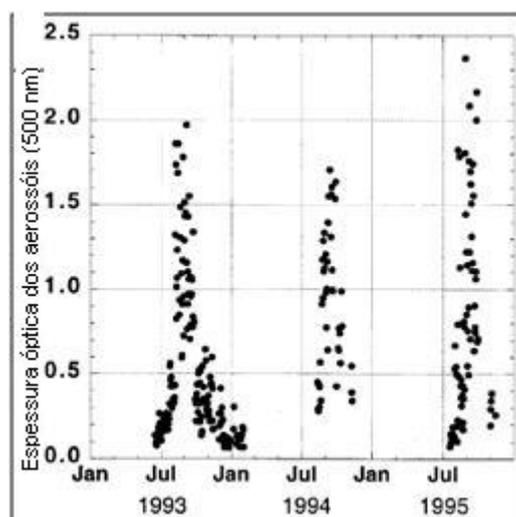


Figura 2.4 - Valores médios diários de espessura óptica dos aerossóis em  $0,5 \mu\text{m}$  sobre Cuiabá 1993 a 1995 a partir de dados da AERONET.  
 Fonte: Holben et al. (2001).

de aerossóis. Os mesmos destacam alguns eventos: a queima da biomassa na África e na Amazônia (setembro a novembro); o transporte de poeira do deserto do Saara para a América Central (junho a agosto) e da Ásia para a América do Norte (março a maio); grandes emissões urbanas e industriais na costa leste dos Estados Unidos, China, Índia e no oeste Europeu (junho a agosto) também são evidentes.

Aires e Kirchoff (2001) afirmam que através de cálculos de trajetórias de massas de ar é possível determinar as vias de transporte preferenciais em altitudes pré-definidas. Os mesmos sugerem que os resultados obtidos através dessa técnica demonstram um “corredor de circulação de massas de ar” entre regiões fonte e não fonte de queimada, no continente brasileiro em baixas altitudes (cerca de 0 a 4 km) para queimadas na região da Amazônia.

Freitas et al. (2005) afirmam que as queimadas emitem gases com flutuação positiva, além de partículas, pois tem temperaturas maiores às da atmosfera, transportando esse material para camadas superiores. Com alta densidade de biomassa e uma taxa de calor maior, as queimadas de florestas conseguem enviar esse material para a baixa e média atmosfera (3-10 km de altura), enquanto queimadas em cerrados e pastagem somente conseguem enviar o material re-

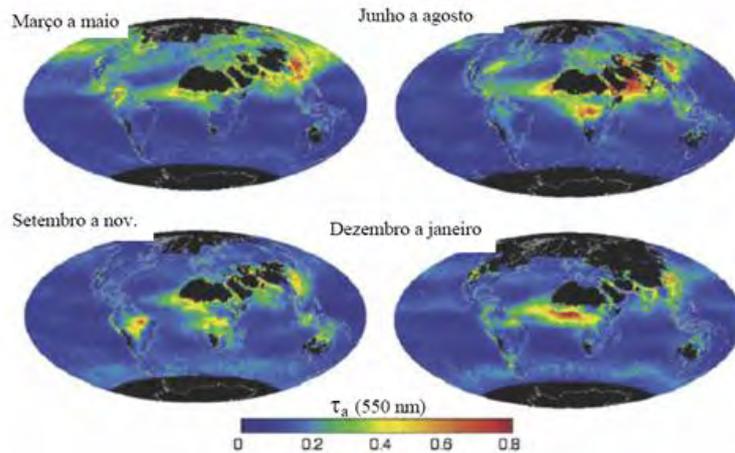


Figura 2.5 - Médias sazonais de espessura ótica de aerossol  $\tau_a$  (550 nm), para cada trimestre do ano de 2001 (dezembro de 2000). Imagens do MODIS obtidas com o produto nível L3.

Fonte: [Castanho \(2005\)](#) adaptada de [Chu et al. \(2003\)](#).

sultante da queima para dentro da camada limite, sendo portanto a estabilidade termodinâmica um fator crucial para se conhecer a altura final da pluma. Os mesmos autores complementam que os processos que ocorrem dentro da camada limite planetária tendem a homogenizar a camada de mistura enquanto que processos convectivos úmidos, além de sistemas convectivos rasos e não-precipitantes que ocorrem no topo da Camada Limite Planetária (CLP) contribuem para transportar o material da queima para acima da CLP. Com isso, os ventos dessas camadas, maiores que dentro da CLP, contribuem para o transporte para longas distâncias (escalas regionais ou mesmo globais). Os autores por fim descrevem diversos processos de remoção afirmando que quando os gases e traços alcançam a atmosfera livre (acima da CLP) poderão ter sua vida média aumentada, devido a diminuição dos processos que são mais eficientes dentro da CLP. Os principais mecanismos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera, conforme [Freitas et al. \(2005\)](#), são exemplificados na figura 2.6.

[Landulfo et al. \(2003\)](#), a partir de medidas feitas com LIDAR, fotômetro solar e satélites, durante o período seco na cidade de São Paulo, observaram que a maior quantidade de aerossóis situa-se entre 1000-3000 m acima da superfície, além de regiões com importantes quantidades de aerossóis em altitudes de 2500

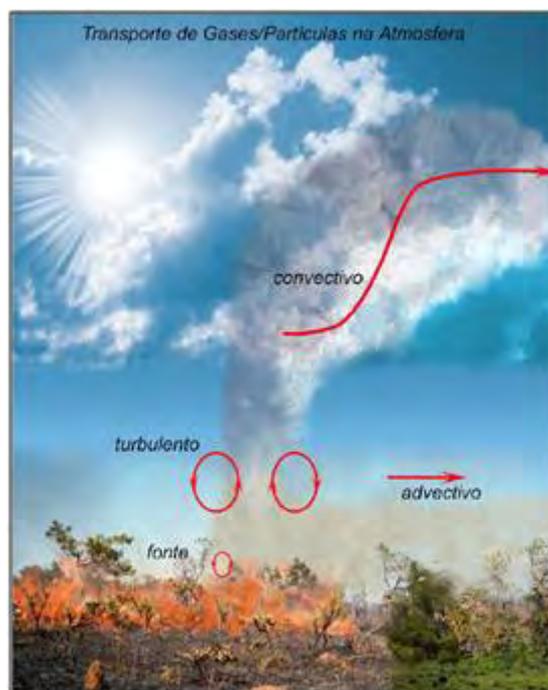


Figura 2.6 - Ilustração dos principais mecanismos físicos de redistribuição de emissões de queimadas na atmosfera.  
Fonte: Freitas et al. (2005).

a 5500 m. Os dados do LIDAR mostraram a presença de partículas altamente absorvedoras, que são características dos aerossóis de queima de biomassa. A análise das trajetórias reversas das massas de ar de 4 dias e dos dados de satélite, mostrou que a origem dos aerossóis se deu em regiões distantes, proveniente da queima de biomassa da Amazônia. A espessura ótica medida pelo fotômetro solar também apresentou indícios de queima de biomassa proveniente de regiões distantes. Além disso, os autores comentam que o valor médio para a razão LIDAR (razão entre o coeficiente de extinção e coeficiente de retroespalhamento) encontrada foi de 45 sr (típica de ambientes urbanos) durante o período de seu estudo.

A presença de aerossóis de poeira e queimadas de biomassa transportados a partir de grandes distâncias da cidade de São Paulo aumenta a variabilidade dos aerossóis suspensos na atmosfera, onde normalmente a camada entre 1-3 km é responsável por 20-25% de toda a quantidade de aerossóis da troposfera (LANDULFO et al., 2005).

Balis et al. (2003) observaram, durante o verão de 2001, que trajetórias de massas de ar, a partir de um determinado dia, em diferentes níveis (975, 850 e 700 hPa) eram provenientes de regiões com intensa atividade de queima de biomassa (Bulgária e Costa Norte do mar negro). A espessura ótica observada através de um LIDAR Raman em 355nm foi de 1,15, valor que os autores consideraram alta, pois o dia estudado foi sem nuvens e a média da Espessura Ótica dos Aerossóis (EOA) para a região da Grécia estudada é de 0,5-0,6 no mesmo comprimento de onda. Os valores da razão LIDAR estimados foram de 60 e 50 sr para 355 e 532 nm, respectivamente, valores condizentes com os originados de queimadas de florestas no norte do Canadá (WANDINGER et al., 2002).

Amiridis et al. (2009) analisou o impacto de dez casos de queimadas de biomassa (2001-2005) na quantidade de aerossóis na atmosfera livre sobre a cidade de Thessaloniki, Grécia. Os autores notaram altos valores de espessura ótica com um UV-Raman LIDAR. Através de modelagem e detecção de focos de queimadas com satélite, os autores mostraram que esses altos valores estão associados com queimadas ocorridas na Rússia e leste Europeu. As medidas de LIDAR mostraram que o expoente de Angstrom durante esses casos variou de 0,5 - 2,4 indicando, conforme os autores, um grande espectro de tamanho de partículas. Além disso observou-se que a razão LIDAR (coeficiente de extinção/coeficiente de retroespalhamento) variou de 40 sr para pequenas partículas até 100 sr para partículas grandes.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Detecção de focos de queimadas por satélite

Conforme descrito no portal de queimadas do INPE ([www.cptec.inpe.br/queimadas](http://www.cptec.inpe.br/queimadas)), um material em chamas emite energia principalmente na faixa térmica média, de  $3,7 \mu\text{m}$  a  $4,1 \mu\text{m}$ , do espectro eletromagnético. O CPTEC/INPE identifica os focos de queimadas utilizando as imagens de diversos satélites, que operam nesta faixa, selecionando os píxeis (elementos de resolução) com maior temperatura.

Setzer e Pereira (1991) implementaram, de forma operacional no INPE, a técnica de detecção de focos de queimadas na região de cerrado e floresta tropical no Brasil, usando o radiômetro AVHRR, a bordo da série de satélites NOAA. Para tal são utilizados todos os satélites que o CPTEC/INPE consegue receber e que possuem sensores óticos operando na faixa termal-média de  $4 \mu\text{m}$ . Em 2007, estavam sendo processadas, operacionalmente, as imagens AVHRR dos satélites polares NOAA-12, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, NOAA-18, as imagens MODIS dos satélites polares NASA TERRA e AQUA, e as imagens dos satélites geoestacionários GOES-10, GOES-12, e MSG-2. Ressalta-se que em meados de 2007 foi retirada a disponibilização do satélite NOAA-12, passando a se utilizar principalmente o NOAA-15.

Conforme o grupo de Queimadas do CPTEC/INPE o tamanho da queimada que os satélites detectam varia. Para os satélites de órbita polar (da série NOAAs a 800 km de distância, e TERRA e AQUA a 730 km), trabalhos de validação de campo indicam que uma frente de fogo com cerca de 30 m de extensão por 1 m de largura, ou maior, poderá ser detectada. Para os geoestacionários, a cerca de 36 mil km de distância, a frente precisa ter o dobro de tamanho para ser localizada. Entretanto, como o elemento de resolução espacial ("pixel") do satélite tem 1 km x 1 km ou mais, uma queimada de algumas dezenas de metros quadrados será identificada como tendo pelo menos  $1 \text{ km}^2$ . Nas imagens dos satélites geoestacionários, onde o pixel tem 4 km x 4 km, esta pequena queimada passará a ser indicada por uma área de  $16 \text{ km}^2$  ou mais. Assim, um foco de queima, que é o mesmo que um pixel de queima, pode indicar tanto uma pequena queimada quanto várias pequenas queimadas, ou uma muito grande. Este sistema do INPE detecta a existência de fogo na vegetação sem ter condições de

avaliar o tamanho da área que está queimando ou o tipo de vegetação afetada. Em casos com muitos píxeis de queima juntos, e com a presença de uma nuvem de fumaça grande, pode-se inferir que a queimada terá a dimensão dos píxeis de queima detectados.

Prins et al. (1998) apresentaram resultados analisando a variabilidade diurna do número de focos de fogo detectados às 11:45, 14:45, 17:45 e 20:45 UTC na América do Sul. O pico de queimadas acontece por volta das 17:45 UTC, oscilando de 1500 a 3500 focos detectados por dia. Os valores neste horário são da ordem de 2 a 3 vezes maiores daqueles às 14:45 e 20:45 UTC, e 20 vezes daqueles às 11:45 UTC.

### **3.2 Descrição do Modelo HYSPLIT para simulação de trajetórias de parcelas de ar**

O modelo HYSPLIT\_4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory - versão 4.0), disponível em [www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html](http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html), foi utilizado para simular trajetórias de parcelas de ar a partir de um ponto escolhido, após análise dos focos de queimadas no estado de São Paulo, para posteriormente agrupar essas trajetórias.

O método de cálculo do modelo é híbrido entre as aproximações Euleriana e Lagrangiana. Os cálculos da advecção e da difusão são realizados em um sistema Lagrangiano, enquanto os cálculos de concentrações em uma grade fixa usam o método Euleriano. O transporte e a dispersão dos poluentes é calculado assumindo que uma pluma (puff) simples irá se expandir até seu tamanho exceder a grade de uma célula meteorológica e então irá se dividir entre várias plumas. A aproximação do modelo HYSPLIT\_4 combina os métodos “puff” e o de partícula assumindo que ocorre uma distribuição tipo “puff” na horizontal e “partícula” na direção vertical.

Draxler e Hess (1997) afirmam que o HYSPLIT\_4 é um sistema completo que computa trajetórias simples de dispersão complexa e simulação de deposição usando emissão de “puffs” de fumaça ou aglomerados de partículas. O modelo usa dados meteorológicos em pontos de grade, com três projeções de mapas (Polar, Lambert, Mercator) como opção do usuário.

O modelo Hysplit assume que uma partícula segue o fluxo de vento passiva-

mente. Dessa forma sua trajetória é a integração do vetor posição da partícula no espaço e no tempo. A posição final é calculada a partir da velocidade média da posição inicial ( $p$ ) e da posição secundária ( $p'$ ). O caminho da partícula ou a variação no tempo do vetor posição é expresso por:

$$\vec{p}(t + \Delta t) = \vec{p}(t) + 0,5[\vec{v}(\vec{p}, t) + \vec{v}(\vec{p}(t) + \vec{v}(\vec{p}, t)\Delta t, t + \Delta t)]\Delta t \quad (3.1)$$

Onde  $\vec{v}(\vec{p}, t)$  é o vetor velocidade média e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo. O vetor velocidade é representado pela média das velocidades no instante inicial e após um intervalo de tempo.

Conforme Aires e Kirchoff (2001), no estudo da presença de contaminantes atmosféricos é muito importante o conhecimento da procedência (origem) das massas de ar e seus deslocamentos, pois a presença de um poluente atmosférico numa região pode ser devido à produção “in situ” e/ou a processos de transportes.

Do ponto de vista da dinâmica atmosférica, o conhecimento dos ventos no local de estudo não é suficiente para a determinação da origem das massas de ar, porque o vetor velocidade em parte é devido a movimentos de rotação, e não de translação das massas de ar. É preciso conhecer a trajetória seguida pelas mesmas e somente através do conhecimento dinâmico da atmosfera é que é possível mapear esses deslocamentos. Assim, uma ferramenta importante para o estudo de transporte dos contaminantes atmosféricos, em diferentes níveis de pressão, tem sido o cálculo de trajetória de massas de ar em função do tempo (DOTY; PERKEY, 1993).

Os cálculos baseiam-se em parâmetros de entrada tais como: campos de ventos (horizontal e vertical), altura geopotencial, temperatura potencial, níveis de pressão, cujos dados são provenientes de diversas fontes. Esses valores são utilizados em programas computacionais para a resolução das equações de movimento das parcelas de ar e na aplicação de técnicas de interpolação para o cálculo dos valores desconhecidos em pontos irregulares (AUSTIN; TUCK, 1985; MERRIL et al., 1986).

Segundo Aires e Kirchoff (2001) os cálculos de trajetória possuem uma incerteza devido a técnica utilizada. Os autores citam Pickering et al. (1996) que utilizaram amplamente trajetórias isentrópicas com a vantagem de não requererem a velocidade vertical do vento, enquanto as trajetórias cinemáticas utilizam-se das componentes do vento, como é o caso do método chamado de “velocidade vertical do modelo” disponível como opção pelo modelo Hysplit. Quando questionadas as diferenças entre os dois métodos citados acima, os autores citam Fuelberg et al. (1996) que durante o experimento “Transport and Atmospheric Chemistry Near the Equator-Atlantic” (TRACE A), que calcularam trajetórias cinemáticas e isentrópicas integrando-as por um período de cinco dias (utilizando análises do ECMWF). Seus resultados mostraram que as trajetórias calculadas pelo método cinemático, usualmente possuem um deslocamento vertical maior que as correspondentes isentrópicas. Segundo esses autores ambos os formalismos isentrópico e cinemático podem fornecer trajetórias realistas, na troposfera, com integração de até 5 dias.

As trajetórias de parcelas de ar podem ser calculadas tanto “forward” (para frente no tempo) quanto “backward” (para trás no tempo). Conforme Doty e Perkey (1993) o cálculo “forward” considera uma parcela inicial no tempo e no espaço e acompanha a mesma no sentido positivo do tempo até uma posição final após um intervalo determinado, enquanto que “backward” acompanha o deslocamento no sentido negativo do tempo. Dessa maneira, com a primeira técnica pode-se calcular a trajetória futura da parcela de ar, identificando-se as regiões que a mesma irá atravessar, enquanto que a segunda técnica permite estimar a origem da parcela de ar.

### **3.3 Análise de “clusters” para agrupamento de trajetórias**

Segundo Hair et al. (1998), a análise de “clusters”, também conhecida como análise de agrupamentos, é um conjunto de técnicas estatísticas cujo objetivo é agrupar objetos segundo suas características, formando grupos homogêneos. Os objetos em cada grupo tendem a ser semelhantes entre si, porém diferentes dos demais objetos dos outros grupos. Eles devem apresentar tanto uma homogeneidade interna (dentro de cada grupo), como uma grande heterogeneidade externa (entre grupos). Portanto, se a aglomeração for bem sucedida, quando representados em um gráfico, os objetos dentro dos agrupamentos estarão muito próximos, e os distintos estarão afastados.

O objetivo do uso dessa técnica neste trabalho é agrupar as trajetórias preferenciais para minimizar a variabilidade das mesmas dentro dos grupos e maximizar a variabilidade entre grupos (WILKS, 2006). O método escolhido para análise é o algoritmo não-hierárquico k-means. O mesmo autor cita diversos exemplos de uso de análise de “clusters” na literatura incluindo agrupamento de observações de tempo diários em fenômenos sinóticos, definição de regimes de tempo a partir de padrões do escoamento do ar superior, entre outros.

Existem dois tipos de processos de aglomeração: hierárquicos e não-hierárquicos. A aglomeração hierárquica se caracteriza pelo estabelecimento de uma hierarquia ou estrutura em forma de árvore, podendo ser aglomerativos ou divisivos. A aglomeração não-hierárquica, como exemplo o método K-means, inicialmente determina ou assume um centro de conglomerado e em seguida agrupa todos os objetos que estão a menos de um valor pré-estabelecido do centro.

Existem quatro etapas para utilização do método de agrupamento k-means. A primeira consiste em se escolher trajetórias iniciais a partir do conjunto de dados resultantes das simulações (centróides). Na segunda etapa são calculadas as distâncias (em graus) entre os pontos horários de cada trajetória individual e as centróides. As trajetórias são atribuídas aos grupos que compartilham a menor distância. Na terceira etapa, uma nova centróide é calculada para cada um dos grupos de trajetórias. Isto cria um novo conjunto ligeiramente mais próximo da centróide. A quarta etapa é repetir continuamente as etapas 2 e 3 até que nenhuma trajetória mude de grupo. Dessa maneira, o método k-means permite que as trajetórias mudem de grupo até que o melhor ajuste seja obtido (OWEN, 2003). Uma vez que as trajetórias estejam classificadas, o desvio padrão para cada hora será calculado entre a posição do membro e a trajetória média desse grupo. Desse modo, uma medida da variação horizontal e vertical é determinada sobre o conjunto médio.

Abaixo o passo a passo do algoritmo k-means:

- Passo 1 - Inicia-se com a decisão do valor de k (número de grupos)
- Passo 2 - Coloca-se qualquer divisão inicial que classifica os dados em conjuntos de k. Nessa etapa podem-se atribuir os objetos aleatoria-

mente, ou sistematicamente da seguinte maneira:

1. Leva-se o primeiro objeto k como grupo de elemento simples 2. Fixa-se cada objeto remanescente (N-k) para o grupo com o centróide mais próximo do mesmo. Depois de cada separação em grupos, recalcula-se o centróide do novo conjunto.

- Passo 3 - Calcula-se a distância a partir do centróide de cada objeto dos seus respectivos grupos.
- Passo 4 - Repete-se o passo 3 até alcançar a convergência, ou seja, até que o grupo permaneça constante após fixar os objetos

Como o objetivo da análise de agrupamentos é agrupar objetos semelhantes, é necessária uma medida da distância entre os mesmos. Os objetos com menor distância entre si são mais semelhantes, logo são aglomerados em um mesmo grupo. Já os mais distantes participam de grupos distintos. Existem várias formas de se medir a distância entre os objetos, porém, a mais utilizada é a distância euclidiana, a qual será utilizada neste estudo. A distância euclidiana é a raiz quadrada da soma dos quadrados das diferenças de valores para cada variável.

Segundo [Brower e Zar \(1977\)](#), a Distância Euclidiana é obtida pela seguinte expressão:

$$DE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.2)$$

Onde: DE - Distância Euclidiana xi - valor para a espécie i na área x (enumeração completa); yi - valor para a espécie i na área y (cada procedimento amostral); n - número de espécies existentes.

Através da análise de cluster apresentada neste tópico pretende-se analisar as principais trajetórias a partir da região com maior número de focos de queimadas no estado de São Paulo para identificar pontos para uma possível instalação de outra estação da rede da AERONET.

### 3.4 Espessura óptica

A espessura óptica dos aerossóis é um coeficiente adimensional, indicativo da quantidade e da eficiência de extinção de radiação solar pela matéria ópticamente ativa num dado comprimento de onda.

A espessura óptica pode ser definida como um coeficiente de atenuação que um feixe de luz sofre por espalhamento ou absorção, durante sua passagem através de um meio qualquer (COULSON, 1975). Na atmosfera, quanto maior for a espessura óptica, menor será a transmitância da coluna atmosférica e menor será a intensidade da radiação solar que atinge a superfície. Assim, a evolução temporal e espacial da radiação solar na superfície depende da espessura óptica da atmosfera, que por sua vez depende de fatores locais que provocam variações na distribuição da radiação solar no espectro eletromagnético.

A espessura óptica indica a quantidade de material absorvedor e espalhador ópticamente ativo encontrado no caminho percorrido por um feixe de radiação. É definida como a integral ao longo do caminho ótico do produto da quantidade total de moléculas presentes no meio e da seção transversal de extinção para cada comprimento de onda. A espessura óptica é expressa por:

$$\tau_{\lambda} = \int \sigma_{\lambda} N(x) dx \quad (3.3)$$

na qual  $\sigma_{\lambda}$  é a seção transversal de extinção,  $dx$  o caminho de integração e  $N(x)$  a densidade numérica por volume de átomos ou moléculas ópticamente ativos [partículas  $\text{cm}^{-2}$ ] (COULSON, 1975).

Ela expressa a quantidade de luz removida de um feixe por espalhamento ou absorção durante seu caminho em um meio qualquer. Sendo  $I_0$  a intensidade da radiação na fonte e  $I$  a intensidade observada depois de um certo caminho, a espessura óptica pode ser definida pela seguinte equação:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\tau} \quad (3.4)$$

Nas ciências atmosféricas é comumente referido como espessura óptica da at-

atmosfera o caminho vertical a partir da superfície da Terra ou da altitude do observador, até o espaço. Como  $\tau$  se refere ao caminho vertical, a espessura óptica de um caminho inclinado é  $\tau' = \mu\tau$ , onde  $\mu$  é chamado de fator de massa de ar, que para a atmosfera é normalmente definido como  $\mu = 1 / \cos(\Theta)$ , onde  $\Theta$  é o ângulo zenital correspondente para um certo caminho. Dessa forma:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu\tau} \quad (3.5)$$

Ela pode ser dividida em alguns componentes, devido ao espalhamento Rayleigh e Mie, bem como absorção pelas partículas da atmosfera. Portanto a espessura óptica é como uma medida de transparência, sendo definida como a fração da radiação (ou luz) que é espalhada ou absorvida em um caminho. Um exemplo fácil é o de um nevoeiro. O nevoeiro entre um observador e um objeto imediatamente em sua frente tem uma espessura óptica tendendo a zero. Se o objeto se mover para longe do observador a espessura óptica irá aumentar até alcançar um grande valor onde o objeto não será mais visível.

A atenuação da radiação solar direta medida pelo radiômetro da AERONET em cada comprimento de onda (340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 and 1020 nm) é utilizada para cálculo da espessura óptica dos aerossóis ( $\tau_a(\lambda)$ ). A espessura óptica dos aerossóis é calculada baseada na Lei de Beer (HOLBEN et al., 1998), apresentada no item 3.5.

### 3.5 Lei de Beer

Quando um feixe monocromático de radiação solar atravessa um meio absorvente, é atenuado. Essa atenuação pode ocorrer tanto por absorção como por difusão (espalhamento). O espalhamento é tão mais eficiente quanto menor o comprimento de onda da radiação.

Conforme Wallace e Hobbs (2006) no caso de constituintes atmosféricos gasosos, é conveniente expressar a taxa de espalhamento ou absorção na forma de:

$$dI_\lambda = -I_\lambda \rho r k_\lambda ds \quad (3.6)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $r$  é a massa do gás absorvente por unidade de massa de ar e  $k_\lambda$  é o coeficiente de absorção, que possui unidade de  $\text{m}^2\text{kg}^{-1}$ .

Pode-se integrar a equação 3.6 do topo da atmosfera até um nível  $z$  para determinar que fração do feixe incidente de radiação foi atenuado devido à absorção e/ou espalhamento. Temos que:

$$I_\lambda = I_{\lambda\infty} e^{-\tau_{\lambda\text{sec}\theta}} = I_{\lambda\infty} T_\lambda \quad (3.7)$$

onde

$$\tau_\lambda = \int_z^\infty k_\lambda \rho r dz \quad (3.8)$$

e

$$T_\lambda = e^{-\tau_{\lambda\text{sec}\theta}} \quad (3.9)$$

é a transmissividade da camada.

Esse conjunto de relações e definições são conhecidas como Lei de Beer que afirma que a intensidade monocromática  $I_\lambda$  decresce monotonamente através de um caminho. A quantidade adimensional  $\tau_\lambda$  refere-se à profundidade óptica normal ou espessura óptica dependendo do contexto que é usada.

### 3.6 LIDAR (Light Detection And Ranging)

O sistema de sensoriamento remoto a laser, LIDAR é uma ferramenta muito poderosa e versátil para estudar atmosfera com alta precisão. Com um LIDAR, as propriedades térmicas, estruturais e dinâmicas da atmosfera podem ser bem estudadas. Ele é ideal para monitoramento da poluição do ar, para obter informações sobre os processos na Camada Limite Planetária, e para fornecer a

estrutura vertical de toda a atmosfera (dependendo da potência do laser). Um LIDAR a bordo de satélites no espaço pode fornecer medidas globais da estrutura vertical de nuvens e de gases atmosféricos.

Um sistema LIDAR possui o mesmo princípio físico de um Radar de microondas, mas com a fonte de emissão sendo um feixe de laser pulsado, e o sistema de detecção compatível com o comprimento de onda da radiação a ser medida. Este feixe é direcionado para a atmosfera por meio de instrumentos óticos que ao se propagar interage com partículas e moléculas que a compõem. Uma parte desta luz que é espalhada em todas as direções ou ainda absorvida por gases e partículas, é retroespalhada na direção da fonte de emissão e será coletada por um sistema ótico de detecção adequado.

O esquema na figura 3.1 mostra os principais componentes de um sistema LIDAR. A luz retroespalhada (fótons) retorna ao sistema de detecção sendo coletada por um conjunto de instrumentos de óptica refrativa e reflexiva (telescópio, filtros e lentes) e em seguida transferidos para um detector de resposta rápida, uma fotomultiplicadora (PMT) ou detector de estado sólido, no qual se gera um sinal elétrico cuja intensidade em qualquer instante é proporcional a potência óptica recebida. Como a velocidade de propagação da luz é conhecida, a distância do volume espalhador que produz o sinal é determinada a partir do intervalo de tempo entre a transmissão do pulso e a sua recepção. A magnitude do sinal recebido é determinada pelas propriedades de retroespalhamento da atmosfera em distâncias sucessivas e pela atenuação no caminho de ida e volta. O retroespalhamento atmosférico, por sua vez, depende do comprimento de onda do laser, do número, tamanho, forma e propriedades ópticas das partículas (ou gotículas) e moléculas, interceptadas pela luz incidente. Embora o fenômeno de espalhamento não seja tão simples, em primeira aproximação, o retroespalhamento aumenta com a concentração de partículas.

No que se refere ao sistema de detecção os dois principais tipos de telescópios utilizados em sistema remoto à laser são os do tipo Newtoniano e Cassegrainiano. Neste trabalho, pelo fato de ser feito uso de dois sistemas LIDAR, foram utilizados ambos os tipos de telescópios mencionados.

Em aplicações de sensoriamento remoto com lasers, costuma-se classificar os sistemas segundo o tipo de interação entre a radiação laser (luz) e os constitu-

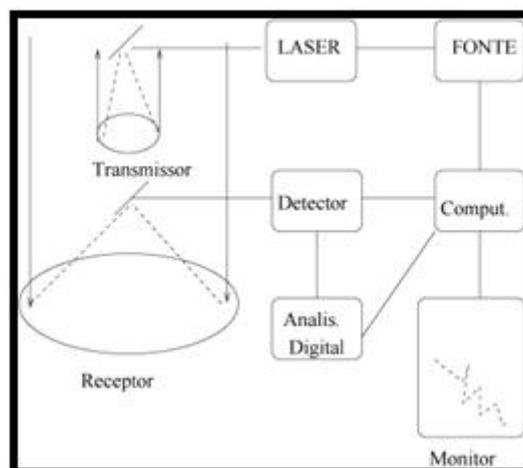


Figura 3.1 - Diagrama ilustrativo dos componentes de um sistema LIDAR genérico

intes atmosféricos, gases (moléculas, átomos) e partículas (aerossóis). O LIDAR pode ser classificado da seguinte maneira: Retroespalhamento elástico; Raman; Absorção diferencial (DIAL). Neste estudo será utilizado o LIDAR de retroespalhamento elástico, que está descrito a seguir.

### 3.6.1 LIDAR de retroespalhamento elástico

Em linhas gerais, uma fonte de laser emite um feixe, com único comprimento de onda, para a atmosfera e um detector mede a radiação retroespalhada de forma elástica por partículas ou moléculas. Por retroespalhamento elástico entende-se o processo no qual o comprimento de onda espalhado permanece inalterado após a interação da radiação com as partículas ou moléculas. Ele pode ser dividido em dois tipos, o espalhamento Rayleigh no qual o espalhamento elástico ocorre devido, principalmente, às partículas muito menores comparadas ao comprimento de onda da radiação, e o espalhamento Mie, sendo por ele responsável partículas com tamanho comparável ou maiores que o comprimento de onda da radiação (KOVALEV; EICHINGER, 2004).

Os referidos autores ainda complementam afirmando que a intensidade de luz retornada ao telescópio, retroespalhada, é descrito por dois fatores importantes, o coeficiente de retroespalhamento  $\beta$  e o coeficiente de extinção  $\alpha$  (ou atenuação) (MEASURES, 1992; KOVALEV; EICHINGER, 2004). Estes dois fatores,  $\alpha$  e  $\beta$ , compõem a equação de LIDAR para o retroespalhamento, em conjunto com os

parâmetros geométricos do sistema. Abaixo a equação clássica do sistema LIDAR:

$$P(r) = P_0 \frac{c\tau}{2} A_r \frac{\beta(r)}{r^2} \exp \left[ -2 \int_0^r a(r') dr' \right] \quad (3.10)$$

na qual  $P(r)$  é a potência do sinal detectado a uma distância  $r$  num tempo  $t$ ,  $r$  é distância do volume atmosférico investigado,  $P_0$  é a potência do sinal transmitido,  $c$  a velocidade da luz,  $\tau$  a duração do pulso emitido pelo laser, e  $A(r)$  a área efetiva do receptor. Como já mencionado,  $\beta$  é o coeficiente de retroespalhamento e  $\alpha$  o coeficiente de extinção (ou atenuação)

Dessa forma, as medidas com LIDAR fornecem informações sobre as características de espalhamento e atenuação da atmosfera, observando-se que esses dois efeitos correlacionados possam ser de alguma maneira separados (KLETT, 1983; KLETT, 1985; KLETT, 1986). Já em algumas aplicações há interesse em saber também o número de partículas ou concentração em massa a partir das propriedades ópticas da atmosfera; nesse sentido, é necessário ter disponível um modelo atmosférico, a partir do qual se extrai uma relação entre  $\alpha$  e  $\beta$ .

A obtenção dos parâmetros físicos da atmosfera a partir das medidas com um sistema LIDAR requerem, primeiro, a separação das características ópticas das interações com gases e material particulado, e posteriormente, o conhecimento apropriado das razões entre esses parâmetros, por exemplo: razão LIDAR (RL), que é a razão entre os coeficientes de extinção e de retroespalhamento, a razão de retroespalhamento pelo número de partículas, o coeficiente de extinção-massa, etc.

### **3.6.2 Método de Klett para obtenção dos coeficientes de retroespalhamento e extinção para LIDAR de retroespalhamento elástico**

Para extrair o coeficiente de extinção e de retroespalhamento (respectivamente,  $\alpha$  e  $\beta$ ) em uma atmosfera não-homogênea a partir do sinal de retorno de um LIDAR de retroespalhamento elástico (mesmo comprimento de onda que emite) utiliza-se o chamado Método de Inversão de Klett. Segundo Klett, deve-se utilizar o logaritmo natural do sinal recebido corrigido pela distância ao quadrado (KLETT, 1983):

$$S(r) = \ln[r^2 P(r)] \quad (3.11)$$

Tomando valores de  $S(r)$  e  $S_0 = S(r_0)$ , no qual  $r_0$  é uma distância de referência, tem-se que:

$$S - S_0 = \ln[r^2 P(r)] - \ln[r_0^2 P(r_0)] \Rightarrow S - S_0 = \ln \frac{r^2 P(r)}{r_0^2 P(r_0)} \quad (3.12)$$

Utilizando a equação clássica de LIDAR de retroespalhamento elástico (3.10) e substituindo na equação (3.12):

$$S - S_0 = \ln [\beta(r)/\beta(r_0)] - 2 \int_r^{r_0} \alpha(r') dr' \quad (3.13)$$

Derivando a equação (3.13) em função de  $r$  resulta em:

$$\frac{dS}{dr} = \frac{1}{\beta} \frac{d\beta}{dr} - 2\alpha \quad (3.14)$$

Através da equação (3.14) pode-se perceber que a mesma é dependente dos coeficientes de extinção e de retroespalhamento. Dessa maneira, existe apenas uma quantidade medida e duas grandezas físicas para serem obtidas. Portanto, introduz-se uma variável chamada Razão LIDAR. A Razão LIDAR relaciona o coeficiente de extinção e de retroespalhamento utilizado na equação 3.14

$$LR = \frac{\alpha(r)}{\beta(r)} \quad (3.15)$$

A Razão LIDAR é o parâmetro mais crítico ao se utilizar o método de Klett. Essa razão depende de diversos fatores, como: propriedades físicas, químicas e morfológicas das partículas, que por sua vez depende da umidade relativa da atmosfera e da altitude. Por depender de diversos fatores, a estimativa da Razão LIDAR é considerada como de grande dificuldade quando utilizado somente um único comprimento de onda (LIDAR de retroespalhamento elástico), tornando muito difícil a estimativa de valores confiáveis.

Para esses casos normalmente utiliza-se dados complementares de outros instrumentos, como o fotômetro solar que a rede AERONET possui, pois o mesmo fornece dados de espessura óptica. Calculando valores para o coeficiente de retroespalhamento integrado e utilizando valores da espessura óptica, oriunda do fotômetro solar, é possível estimar um valor para a Razão LIDAR integrada na coluna, que deve ser utilizado como um valor *a priori* para o cálculo do perfil de extinção da atmosfera.

Dessa maneira, pode-se utilizar a equação abaixo para conseguir relacionar a espessura óptica em 532nm com o coeficiente de retroespalhamento:

$$\tau_{532} = \int_0^r \beta_{532}(r) LR dr' \quad (3.16)$$

## 4 DADOS E METODOLOGIA

### 4.1 Organograma das etapas e objetivos da tese

Através da figura 4.1 pode-se visualizar um resumo das atividades realizadas neste trabalho.

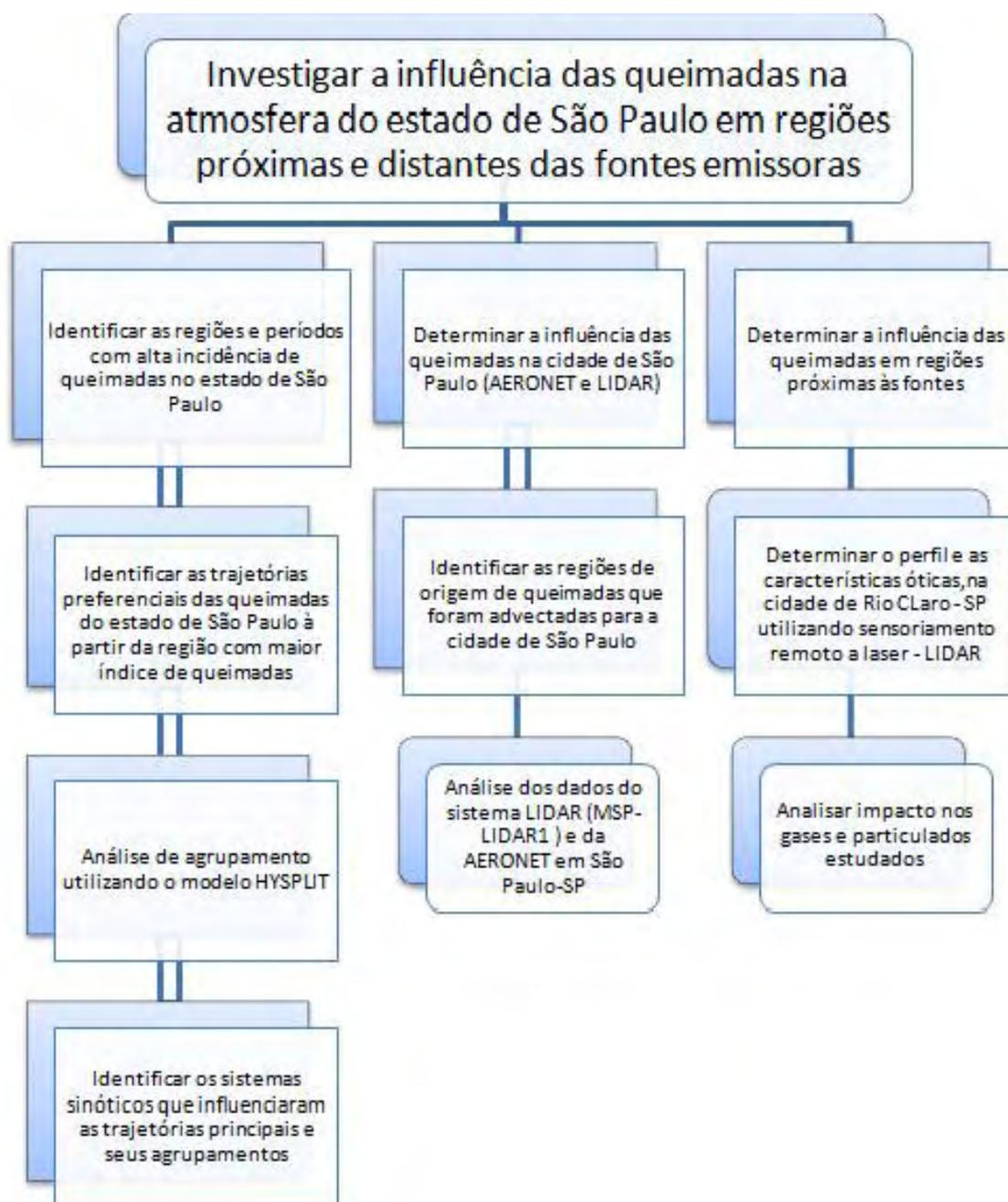


Figura 4.1 - Organograma de atividades realizadas

## **4.2 Escolha das regiões de queimadas para estudo de trajetórias de ar**

O primeiro procedimento deste estudo é analisar as incidências de focos de queimadas no estado de São Paulo, a partir dos dados semanais disponíveis ([www.cptec.inpe.br/products/queimadas](http://www.cptec.inpe.br/products/queimadas)), em uma grade de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ . Conforme comentado nos capítulos anteriores, o estado de São Paulo possui grandes extensões de áreas cultivadas com cana-de-açúcar (a maior do país), com práticas regulares de queima para facilitar a colheita.

Os dados utilizados são do satélite NOAA-12 na sua passagem ascendente. Esse satélite foi o principal utilizado durante o período de janeiro/1999 - julho/2007 pelo grupo de queimadas do CPTEC/INPE. Também foram utilizados dados do satélite NOAA-15 após esse período, pelo mesmo fato do grupo do CPTEC/INPE passar a utilizar esse satélite após a desativação de NOAA-12, para análise de focos de queimadas de outras épocas. Para a análise da variabilidade espacial e temporal dos focos de queimadas, os dados foram interpolados para  $16 \text{ km} \times 16 \text{ km}$ .

## **4.3 Cálculo das trajetórias de parcelas de ar e análise de agrupamento**

Para a análise de trajetórias de massa de ar foi feita a escolha de regiões de recorrentes números de focos de incêndio de biomassa entre os anos de 1999 e 2007 (Lat.:  $-20,5^\circ$  e Long.:  $-48,5^\circ$ ). Estas trajetórias visam obter os “corredores de ar” preferenciais para dispersão de poluentes oriundos de queimadas. Vale ressaltar, mais uma vez, que o estudo de dispersão de queimadas de cana-de-açúcar ainda não foi abordado suficientemente pela comunidade científica.

Os dados utilizados nas simulações de trajetória de ar com o modelo HYSPLYT foram do tipo FNL (NCEP “Final Run”) que são gerados a partir de um modelo global de previsão de médio alcance, cuja resolução horizontal é de  $2,5^\circ \times 2,5^\circ$  de latitude e longitude e temporal de 6 horas. Foram geradas trajetórias 3D cinemáticas às 12:00 UTC (09:00 hora local) para todos os dias dentro do período de 2000 a 2006 com duração de 24 horas, possuindo um total de 615 simulações para o inverno em cada nível dos três analisados, 925, 700 e 500 hPa. Para as simulações de trajetórias de ar para estudos de caso foram utilizados os dados GDAS com resolução de  $1,0^\circ \times 1,0^\circ$ .

Cada saída de trajetória consiste em latitude, longitude e elevação ao longo do

caminho da trajetória. Devido à baixa resolução espacial dos dados, uma limitação deste tópico é a não consideração de circulações de meso-escala e escala local, como brisa marítima, por exemplo. Conforme citado anteriormente na revisão bibliográfica, os aerossóis provenientes das queimadas permanecem até 4 semanas na atmosfera, porém o período de 1 dia foi escolhido para analisar as trajetórias preferenciais em regiões próximas à fonte emissora.

Calculou-se as trajetórias cinemáticas das parcelas de ar das duas maneiras descritas na fundamentação teórica: “forward” e “backward”. A primeira após a escolha das regiões onde existiram mais queimadas no período de estudo para se obter os caminhos preferenciais das trajetórias das parcelas de ar, utilizando a técnica de agrupamento, e a segunda, em casos específicos, para se analisar e confirmar a origem da massa de ar sobre os sistemas de medição a laser que foram utilizados.

Com o resultado final das trajetórias foi realizada a análise de agrupamento não-hierárquica k-means. Um aspecto do uso de agrupamentos não-hierárquicos é que o número de grupos deve ser pré-determinado. Apesar de existirem métodos para ajudar na escolha “correta” de número de grupos (DORLING et al., 1992), o processo permanece subjetivo. Já que o objetivo é comparar padrões de transporte entre comprimentos de trajetórias e lugares, pretende-se usar um número consistente de grupos. O critério de seleção é tal que se obtenha um número suficiente de grupos para representar as diferenças principais dos padrões de transportes, sem obscurecer a análise pela existência de inúmeros grupos. Conforme Hafner et al. (2007) o número de grupos normalmente usados na literatura varia entre 5 e 11. Foram testados agrupamentos entre 3 e 7 grupos, após uma inspeção visual foi estabelecido o uso de 5 grupos como uma melhor representação dos padrões atmosféricos médios. Com essas trajetórias médias das parcelas de ar pode-se analisar a frequência da direção na qual as parcelas de ar se deslocam em 24 h e juntamente com o composto de casos que abrange cada grupo de trajetórias médias, perceber a configuração sinótica estabelecida no momento de advecção dessas trajetórias.

O agrupamento das trajetórias foi feito por estações do ano e níveis de pressão. O agrupamento dessas trajetórias tem como uma das finalidades analisar a distribuição espacial da rede da AERONET, atualmente presente no continente, sugerindo locais para a possível instalação de novos equipamentos para um

estudo mais aprofundado dos impactos oriundos das queimadas no estado de São Paulo. Também foram analisadas as condições atmosféricas da região que favorecem as trajetórias das parcelas de ar.

#### 4.4 Rede de dados AERONET

A AERONET é uma rede mundial de monitoramento óptico de aerossóis atmosféricos, mantida pela NASA e expandida por diversas instituições de pesquisa ao redor do mundo. Essa rede conta com mais de 200 locais de medição, sendo 22 na América do Sul (com períodos permanentes ou campanhas – figura 4.2), utiliza protocolo padronizado de aquisição e processamento de dados, bem como de calibração de instrumentos. Maiores detalhes e informações sobre produtos da rede AERONET podem ser encontrados no site ([aeronet.gsfc.nasa.gov](http://aeronet.gsfc.nasa.gov)). O instrumento utilizado em todos os locais de medição é o radiômetro CIMEL CE-318, que funciona através de energia solar realizando medidas de radiação direta e difusa com um intervalo de tempo de 15 min em oito comprimentos de onda (340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 e 1020 nm) e medidas de radiância difusa em quatro comprimentos de onda (1020, 870, 670, 440 nm) a cada hora (HOLBEN et al., 1998).



Figura 4.2 - Localização das estações de medidas da AERONET na América do Sul.

O CIMEL CE-318 é um espectro radiômetro solar alimentado por painéis solares e utilizado para determinar a espessura óptica das partículas de aerossóis em diversos comprimentos de onda na região espectral do visível e do infraver-

melho próximo, além de outros produtos derivados como expoente de Ångström, tamanho de partículas, etc. Além disso, permite uma melhor estimativa dos valores do coeficiente de Ångström utilizados no cálculo do perfil vertical dos coeficientes de espalhamento e extinção das partículas de aerossol, nas medidas com LIDAR (LANDULFO et al., 2003).

O fotômetro solar CIMEL é calibrado periodicamente remotamente ou localmente sob a supervisão da rede AERONET. Esta calibração assegura uma precisão de 1 a 3%, na obtenção dos coeficientes. Todavia, a calibração e fatores atmosféricos influenciam na precisão e qualidade da espessura óptica das partículas de aerossol, sendo a sua incerteza total, da ordem de 10%, e sua imprecisão muitas vezes maior que 30%.

Como o instrumento realiza medidas independentemente da presença de nuvens, cujo efeito é especialmente difícil de detectar em medidas com visada direta para o sol, é necessário um procedimento automático de “cloud-screening”, ou seja, de limpeza ou exclusão das medidas contaminadas pela presença de nuvens da estação utilizada. Tal procedimento foi apresentado por Smirnov et al. (2000), e utiliza critérios ligados à variação temporal das medidas, partindo da hipótese de que maior variabilidade indica maior probabilidade de contaminação por nuvens.

A espessura óptica das partículas de aerossol, pelo fato de realizar medidas diretas da radiação solar, é obtida pelo radiômetro, estando disponível em diferentes “níveis de confiança”. Os produtos de nível 1.0 são os obtidos quase em tempo real (apenas um dia após as medições) sem processamento prévio quanto a erros espúrios como contaminação por nuvens. Os produtos de nível 1.5 são analisados a partir de um algoritmo automático que elimina eventuais resultados contaminados por nuvens (SMIRNOV et al., 2000). E finalmente, os produtos de nível 2.0 são certificados quanto a eventuais variações de calibração dos instrumentos e, dependendo da localidade, são disponíveis apenas vários meses após a realização das medições. Diante desses motivos utilizou-se os dados no nível 2.0.

As propriedades ópticas derivadas do radiômetro CIMEL, no comprimento de onda de 550 nm, são provenientes de interpolação logarítmica dos parâmetros obtidos nos comprimentos de onda de 440 e 670 nm a ser apresentada no

próximo capítulo. O algoritmo da AERONET para estimativa da distribuição de tamanho das partículas provê dados de distribuição de volume para 22 tamanhos de partículas ( $dV/d\ln r$ ,  $V$  é o volume e  $r$  é o raio) de  $0,05 \mu\text{m}$  até  $15 \mu\text{m}$ .

#### **4.5 Campanhas de coleta de dados nas cidades de São Paulo (2007) e Rio Claro(2009)**

Foram realizadas duas campanhas de coleta de dados para análise de queimadas nas cidades de São Paulo (julho a outubro de 2007) e em Rio Claro (julho-setembro de 2009). Para a cidade de São Paulo foram utilizados dados dos seguintes instrumentos: LIDAR elástico localizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de São Paulo (IPEN/USP), Fotômetro Solar da rede da AERONET dentro do campus da USP e estação meteorológica de superfície pertencente ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosférica (IAG) da USP. Na cidade de Rio Claro foram utilizados no Centro de Análise e Planejamento Ambiental da Universidade Estadual Paulista (CEAPLA/UNESP) dados de um LIDAR elástico móvel, estação meteorológica manual, SODAR e Analisadores de gases e material particulado.

A escolha da cidade de Rio Claro foi devido a grande quantidade de plantações de cana-de-açúcar no seu entorno. Na Figura 4.3 pode-se observar o mapa do estado de São Paulo dividido por Escritórios de Desenvolvimento Regional-EDRs (esquerda) e a direita mapa obtido através do projeto CANASAT (Mapeamento da Cana via Imagens de Satélites de Observação da Terra). O LIDAR móvel foi transportado para a cidade de Rio Claro - SP na EDR de Limeira. Através da Tabela 4.1 pode-se observar a área de cana de algumas EDRs.

Os equipamentos mencionados neste item são apresentados nos próximos sub-tópicos.

Tabela 4.1 - Área de Cana (ha) por Escritório de Desenvolvimento Regional (EDR) onde se pretende realizar medições in situ

<b>EDR</b>	<b>Área de Cana (ha)</b>
Bauru	61.804
Limeira	136.249
Pindamonhangaba	0
São Paulo	0

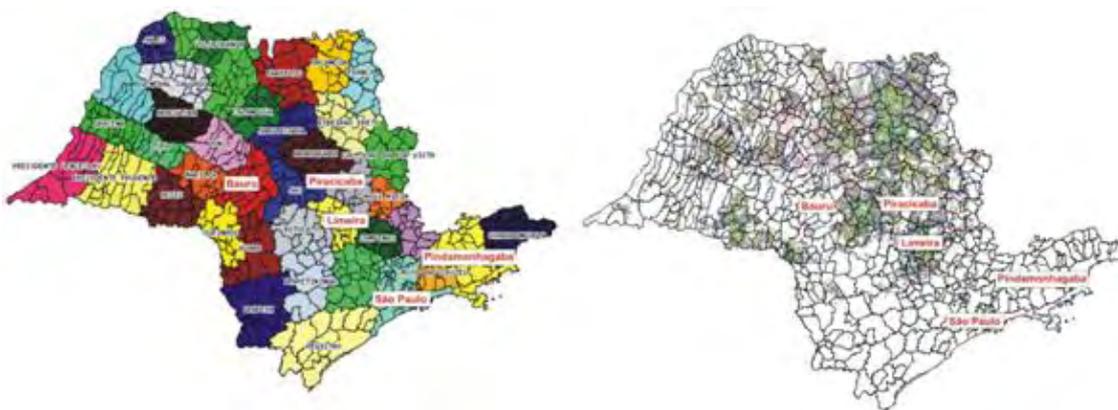


Figura 4.3 - Divisão do estado de São Paulo por EDR (Escritórios de Desenvolvimento Regional) à esquerda e mapeamento da cana do estado (direita). Em destaque as regiões onde serão feitas medidas diretas

#### 4.5.1 Estações Meteorológicas de Superfície e SOund Detection And Raging - SODAR

Para a análise em superfície foram utilizados dados de precipitação provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para as cidades de Catanduva, São Simão, São Carlos e Pirassununga. Esses dados foram utilizados para se analisar a relação da incidência dos focos de queimadas no estado de São Paulo com a precipitação.

O CEAPLA em Rio Claro-SP forneceu dados da estação meteorológica convencional que possui as seguintes variáveis: Pressão Atmosférica (hPa), Temperatura do ar em superfície (°C), Umidade relativa do ar (%) e precipitação (mm). Todas elas medidas nos horários sinóticos. Dados da Estação Meteorológica Automática (EMA) instalado no campus da Universidade de São Paulo (USP) também foram utilizados para analisar a situação sinótica durante a campanha de coleta de dados em São Paulo-SP em 2007.

Informações complementares sobre a situação sinótica de alguns períodos foram retiradas dos boletins da CLIMANÁLISE.

Para a campanha de 2009 na cidade de Rio Claro-SP também foi utilizado um SODAR que fez médias a cada 30 minutos da velocidade e direção do vento até no máximo 1,0 km de altura. Esse equipamento foi instalado a cerca de 10 m

do sistema LIDAR, portanto fornecendo informações detalhas sobre as camadas próximas à superfície medidas pelo LIDAR.

#### **4.5.2 Dados da rede AERONET**

Foram utilizados dados de espessura óptica e distribuição de tamanhos de aerossóis provenientes da estação da AERONET localizada na Universidade de São Paulo. Os dados de espessura óptica foram utilizados para cálculo da Razão LIDAR inicial (3.16) bem como como estimativa da concentração de aerossóis presentes na região.

A distribuição de tamanho calculada pelo algoritmo da AERONET, serviu como base para estimativa da concentração de partículas finas e grossas na região durante os períodos de detecção de queimadas pelo sistema LIDAR em São Paulo.

#### **4.5.3 LIDAR**

##### **4.5.3.1 LIDAR MSP-LIDAR 1**

O LIDAR atualmente em operação no Laboratório de Aplicações Ambientais a Laser (LAAL) foi implantado em 1999, e está operacional desde agosto de 2001. O LAAL está situado no Centro de Lasers e Aplicações (CLA) do IPEN/USP, e tem como objetivo monitorar a poluição de São Paulo através da obtenção dos perfis verticais de aerossol de 300 m a 10 km (30 km à noite) de altura.

O sistema desenvolvido é um LIDAR de retroespalhamento elástico para aerossóis operando em 532 nm, e foi intitulado de MSP-LIDAR 1, como visto na figura 4.4.

As características do laser estão sumarizadas a seguir:

- Taxa de Repetição: 20Hz
- Energia por pulso: 160 mJ para 532 nm, 50 mJ para 355 nm (máximas)
- Duração temporal do pulso: 4 ns
- Divergência: < 0,5 mrad
- Diâmetro do Feixe de Saída: 6 mm

O telescópio possui configuração Newtoniana, coaxial, com as seguintes características:

- Distância mínima detectável: 300 m
- Diâmetro do Espelho Primário: 30 cm
- Material do Espelho Primário: Duran 50 (com baixo coeficiente de dilatação térmica)
- Distância Focal do Espelho: 130 cm
- Deposição de Filme de SiO e Alumínio para otimizar a recepção da luz no visível e absorver no Infravermelho

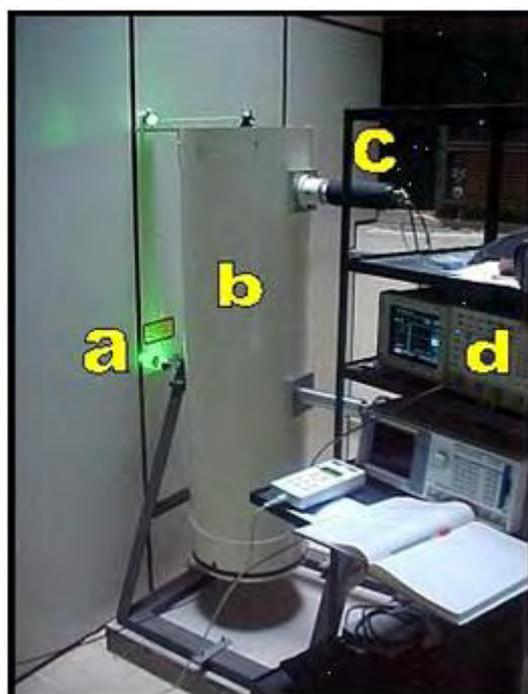


Figura 4.4 - Foto do sistema MSP-LIDAR 1, do Laboratório de Aplicações Ambientais a Laser - (a) Sistema de Coleta e Envio de Feixe; (b) (Telescópio); (c e d) Sistema de Detecção (Detectores + Módulos de Aquisição)

Neste sistema foi construída uma estrutura mecânica que permite executar uma varredura azimutal do telescópio , de 0° a 90° (figura 4.5).

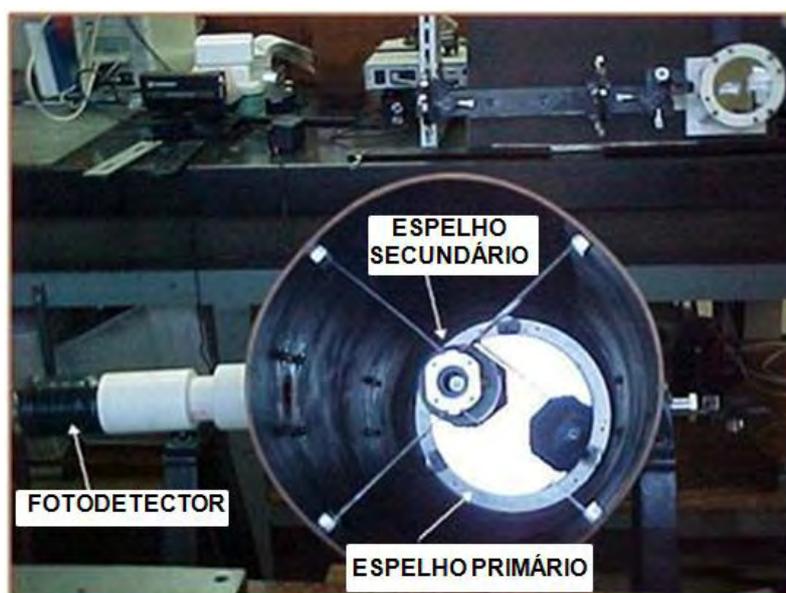


Figura 4.5 - Detalhes do telescópio MSP-LIDAR 1

O sistema MSP-LIDAR 1 já detectou casos de queimadas oriundas da região da Amazônia e da cana-de-açúcar que atingiram a região metropolitana de São Paulo (conforme mostrado no exemplo no item 5). Os dados utilizados para detecção das queimadas na cidade de São Paulo foram obtidos da campanha de 2007 realizadas nos meses de julho, agosto e setembro, situados dentro do período de queimadas em grande parte do Brasil.

A validação dos dados obtidos pelo LIDAR de Retroespalhamento (MSP-LIDAR 1) foi realizada pela comparação com os dados obtidos pelo fotômetro da CIMEL (AERONET) instalado no Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Com os valores obtidos para o coeficiente de Ångström é feita uma interpolação que permite o cálculo da espessura óptica das partículas de aerossóis para o comprimento de onda de 532 nm, por exemplo, que será um dos comprimentos de onda no qual serão realizadas as medidas de LIDAR de retroespalhamento (LANDULFO et al., 2003). Para tal cálculo de interpolação utiliza-se a relação dada a seguir:

$$\frac{\tau_{440}^{aer}}{\tau_{670}^{aer}} = \left(\frac{532}{500}\right)^{\circ-a} \quad (4.1)$$

Através dos dados fornecidos pela rede AERONET utilizou-se também o ex-

poente de Ångström que pode ser considerado como um meio indireto para se obter a distribuição de tamanhos dos aerossóis (JUNGE, 1963). Esse autores sugerem que quanto maior o valor do expoente de Ångström, menor é o tamanho do aerossol (SEINFELD; PANDIS, 1997). Este parâmetro é obtido a partir da espessura óptica medida em 440 e 670 nm:

$$a^0 = -\frac{\log \frac{\tau_{440}^{aer}}{\tau_{675}^{aer}}}{\log \frac{440}{675}} \quad (4.2)$$

Dessa forma, por meio das medidas de fotometria, dados obtidos pelo fotômetro solar CIMEL 318A, obtêm-se os valores da espessura óptica dos aerossóis para o comprimento de onda de 532 nm. Esse valor será utilizado na obtenção da razão LIDAR (RL), relação entre os coeficiente de extinção e de espalhamento das partículas de aerossóis, na equação LIDAR.

#### 4.5.3.2 LIDAR Móvel Raymetrics

Com recursos da Petrobrás foi adquirido um sistema LIDAR Raman portátil (figura 4.6(a)), cujas características se encontram na tabela 4.2. Esse sistema foi transportado para a cidade de Rio Claro-SP, situada dentro de uma das principais áreas de queimadas de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, onde permaneceu de junho a setembro de 2009.

A fonte de energia do LIDAR móvel é um laser pulsado de Nd:YAG operando em 1064 e 532 nm com taxa de repetição de 20 Hz. A fonte laser é configurada de tal forma que o máximo de energia seja em 532 nm, seu segundo harmônico. O telescópio receptor do sistema LIDAR é do tipo Cassegrainiano, onde o espelho refletivo primário possui um diametro de 200 mm e o secundário de 46 mm. O campo de visão (field of view) do telescópio é de 1 mrad.

A unidade de aquisição de sinal consiste de dois modos de detecção: o modo de detecção analógica e da contagem de fótons (para o comprimento de onda de 607 nm só existe a possibilidade de contagem de fótons). As PMTs são geralmente operadas em 660 v (532 nm) e 800 v (607 nm), ressaltando que só foi utilizado comprimento de onda de 532nm (elástico). O modo de detecção analógico é usado para detectar sinais intensos oriundos, normalmente, de distâncias curtas (tipicamente menos que 8-10 km). O modo de detecção de contagem de



(a)



(b)

Figura 4.6 - Sistema LIDAR móvel modelo LR-101-U-D200 da Raymetrics

Tabela 4.2 - Especificações do LIDAR modelo LR-101-U-D200 da Raymetrics

<b>Especificação</b>	<b>LR-101-U-D200</b>
<i>Fonte de Laser</i>	Nd:YAG, tipo CFR
<i>Comprimento de Onda</i>	532 e 607 nm
<i>Taxa de repetição</i>	20 Hz
<i>Detecção Elástica</i>	532 nm
<i>Energia</i>	120 mJ para 532 nm
<i>Duração do Pulso</i>	6.7 ns
<i>Diametro do feixe de laser</i>	21 mm
<i>Divergência</i>	< 0,17 mrad
<i>Detecção Raman</i>	607 nm (N <sub>2</sub> )

fótons é usado por sua vez para detectar a intensidade de sinais muito baixas oriundos de distâncias maiores (maiores que 8-10 km). Dessa forma, o sistema de detecção consegue identificar níveis de sinal tão baixos quanto algumas dezenas de fótons por segundo.

Para obter uma razão satisfatória de sinal por ruído (em inglês, “Signal Noise Ratio” - SNR) do sinal LIDAR no modo de contagem de fótons, deve-se utilizar um número suficientemente grande de pulsos de laser (normalmente maior que

1000). Dessa maneira, nesse estudo é utilizado o valor de 1000 pulsos de laser para realizar uma média a cada, aproximadamente 1,2 minutos.

A configuração óptica é feita de tal forma que o máximo “overlap” ocorre acima de 180m do sistema LIDAR e com uma resolução espacial de 7,5 m.

Na figura 4.7 pode ser observado uma vista da área de plantação de cana-de-açúcar bem próximo à cidade de Rio Claro-SP onde foi feito a campanha de coleta de dados.



Figura 4.7 - Vista de plantação de cana-de-açúcar. Ao fundo a cidade de Rio Claro-SP

#### **4.5.4 Exemplos de resultados encontrados com LIDAR**

Este item destina-se a explicar a origem e análise feita através de algumas figuras obtidas com os sistemas LIDAR elástico de São Paulo e Móvel (Rio Claro). Através das figuras a seguirpode-se observar três imagens geradas através dos dados dos sistemas LIDAR juntamente com figura complementar obtida através de focos de queimadas com dados dos satélites NOAA-12 ou NOAA-15 (dependendo do período analisado) e retro-trajetória pelo modelo Hysplit.

Na figura 4.8 podemos observar o sinal do sistema LIDAR corrigido pela altura. O eixo x refere-se ao horário local de medida enquanto o eixo y refere-se à altura do sinal. Nesta figura é possível perceber diversas características da atmosfera, como: presença de nuvens cirrus em torno de 12,0 km de altura, presença de

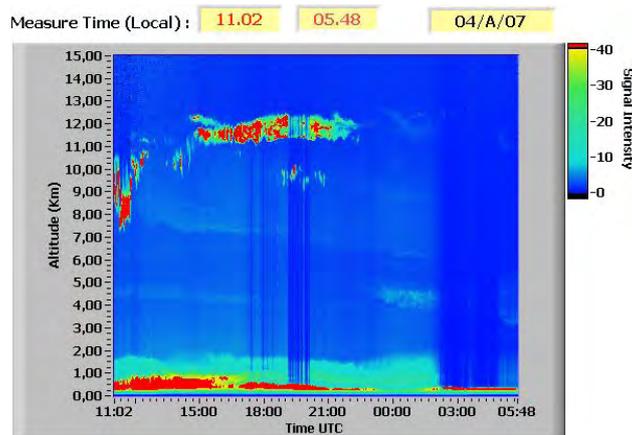


Figura 4.8 - Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Imagem do sistema LIDAR corrigida pela altura

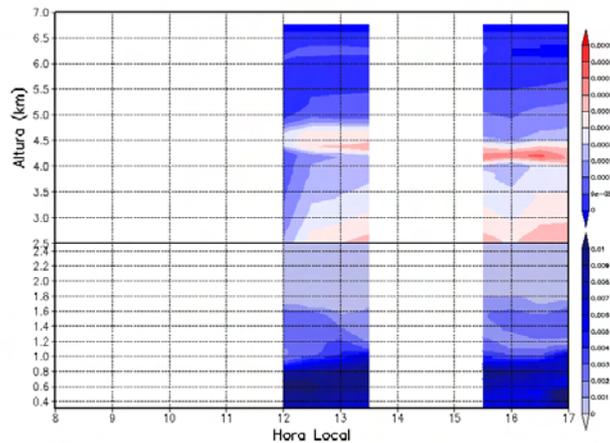


Figura 4.9 - Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Coeficiente de retroespalhamento

aerossóis próximo à superfície em torno de 500 m durante todo o período de medida e detecção de plumas de queimadas em diversas alturas como 4,0 e 8,0 km.

Para obter-se o coeficiente de retroespalhamento, conforme descrito no item 3.6.2 é necessário a utilização do fotômetro solar da AERONET. Dessa maneira obtém-se a figura 4.9 onde é mostrado o coeficiente de retroespalhamento. Destaca-se que a utilização de duas escalas destina-se a indicar melhor a camada de queimada (mostrada em vermelho na escala superior) se com-

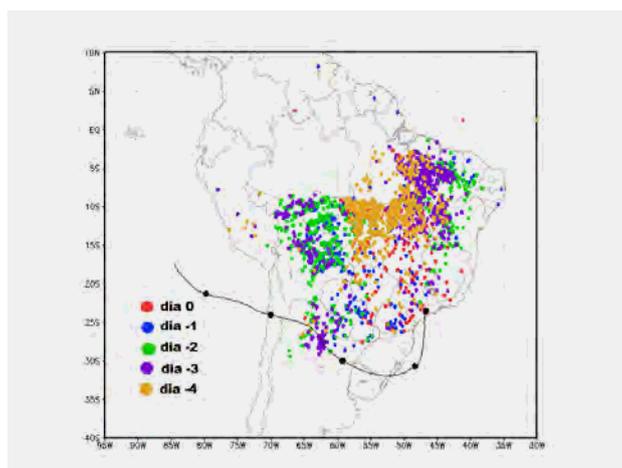


Figura 4.10 - Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Focos de queimadas para os cinco dias anteriores à detecção da queimada pelo sistema LIDAR juntamente com a retro-trajetória

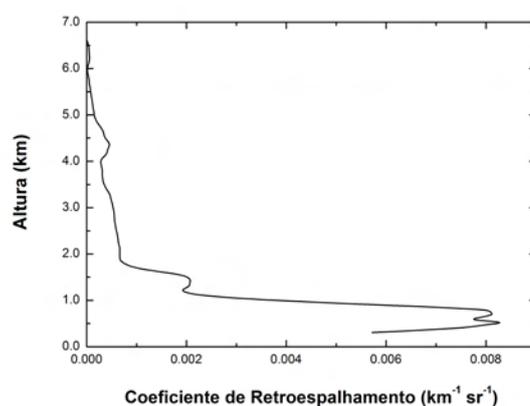


Figura 4.11 - Exemplo de imagem obtida pelos sistemas LIDAR e/ou utilizada na análise dos dados. Perfil vertical médio do coeficiente de retroespalhamento

parada com o retroespalhamento dentro da Camada Limite Planetária.

A figura 4.10 foi gerada a partir de dados de focos de queimadas do satélite NOAA-12 (obtidos até julho de 2007) ou NOAA-15 (após o período mencionado) juntamente com a retro-trajetória gerada pelo modelo Hysplit. A utilização dessa figura tem como propósito observar a existência de focos de queimadas no mesmo dia que a trajetória estava sobre esses focos, para reforçar a existência de transporte de aerossóis oriundo de queimadas. É possível observar na legenda a cor referente aos focos de queimadas para cada dia, partindo de dia

0 (focos de queimadas do dia onde foi detectada a pluma pelo LIDAR) até dia -4 (quinto dia anterior ao dia onde foi medida a pluma de queimada). Cada trajetória (para cada dia) possui cinco marcadores, o primeiro marcador refere-se a t 0, e cada marcador seguinte refere-se a - 24h, portanto t 1 (-24h); t 2 (-48h), etc. Dessa forma pode-se analisar se a parcela de ar se situa sobre o foco de queimada no mesmo dia.

Na figura 4.11 é possível observar o perfil vertical médio, nesse caso durante todo o dia, do coeficiente de retroespalhamento. Dessa maneira é possível observar as camadas com maiores valores de coeficiente de retroespalhamento ao longo de um período.

#### **4.5.5 Analisadores de gases e particulados**

Na campanha de coleta de dados em Rio Claro-SP também foram utilizados analisadores da ECOTECH dos gases CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>X</sub>, CH<sub>4</sub> e não-metano, além de SO<sub>2</sub> (figura 4.12). Um sistema de monitoramento de particulado tamanhos PM2.5 e PM10 também foi utilizado, além de um nefelometro Aurora de simples espalhamento em 550 nm que mediu continuamente, em tempo real, a luz espalhada em uma amostra de ar (em superfície). As principais características dos analisadores de gases são mostrados na tabela 4.3.

A utilização dos dados de gases e particulados serviu para se obter uma maior certeza sobre a origem dos dados medidos próximos à superfície com o sistema LIDAR móvel. Devido ao fato do LIDAR fazer medidas somente na vertical, não é possível ter certeza da origem desses aerossóis. Dessa forma, foi utilizado os sistemas de medidas de gases e particulado para tentar confirmar se durante a maior quantidade de sinal retroespalhado pelo LIDAR próximo à superfície os gases/particulados mostravam algum indício da origem dessa massa de ar como sendo de queimadas. Sendo assim, espera-se um aumento nos valores de CO e sobretudo espalhamento em 550 nm medido pelo nefelômetro durante casos de queimadas juntamente com uma maior intensidade de sinal medido pelo sistema LIDAR.

Tabela 4.3 - Informações referentes aos analisadores de gases e particulados utilizados em Rio Claro - SP

-	<b>O<sub>3</sub></b>	<b>CO</b>	<b>NO<sub>X</sub></b>	<b>SO<sub>2</sub></b>
<b>Método</b>	Absorção de Ultra Violeta	Correlação de filtro de gás	Quimioluminescência de gás-fase	Fluorescência de Ultra Violeta
<b>Ranges</b>	0-20 ppm	0-200 ppm	0-20 ppm	0-20 ppm
<b>Noise</b>	<0.25 ppb	<0.20 ppb	<0.2 ppb	<0.15 ppb
<b>Tempo de Resposta</b>	30s para 95%	60s para 95%	15s para 95%	60s para 95%



(a)



(b)

Figura 4.12 - Amostradores de gases e particulados. Vista Interna (a) e externa (b) do prédio



## 5 Resultados e Discussões

### 5.1 Análise das queimadas da cana-de-açúcar no estado de São Paulo

Este tópico destina a analisar a variabilidade temporal e espacial das queimadas no estado de São Paulo durante o período estudado através dos dados provenientes do satélite NOAA-12. Na figura 5.1 pode-se observar o mapa do estado de São Paulo obtido através do projeto CANASAT, onde foi comparada com o somatório de todos os focos de queimadas sobre o estado de São Paulo para o período estudado (janeiro de 1999 a julho de 2007) que pode ser notado através da figura 5.2.

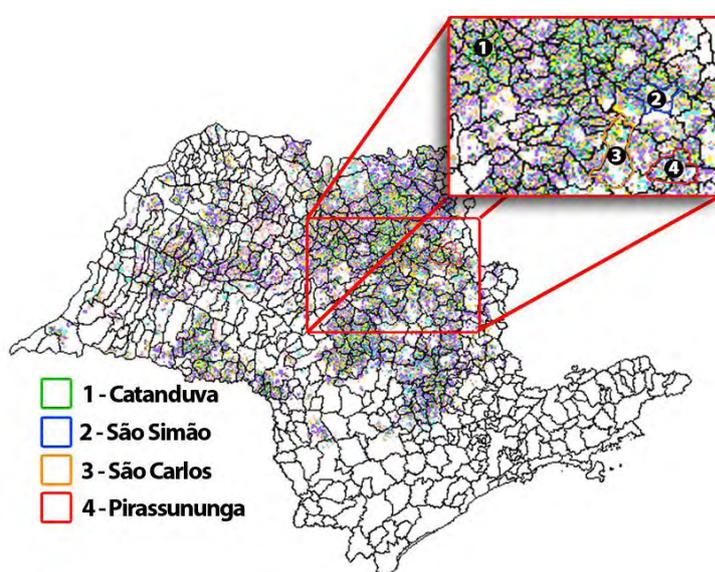


Figura 5.1 - Mapeamento da cana-de-açúcar do estado para o ano de 2006  
Fonte: CANASAT (2008)

Quando comparadas a figura da distribuição espacial das queimadas (figura 5.1) com a do somatório de focos de queimadas durante o período (figura 5.2), percebe-se que as regiões com maior número de focos de queimadas durante o período coincidem com plantações de cana-de-açúcar (como mostrado para o ano de 2006 na figura 5.1). Sobretudo no inverno, por se tratar do mês com maior número de focos, destacam-se as regiões de Ribeirão Preto (no centro norte), Jaboticabal (região central do estado), Piracicaba (centro leste) e Assis (centro

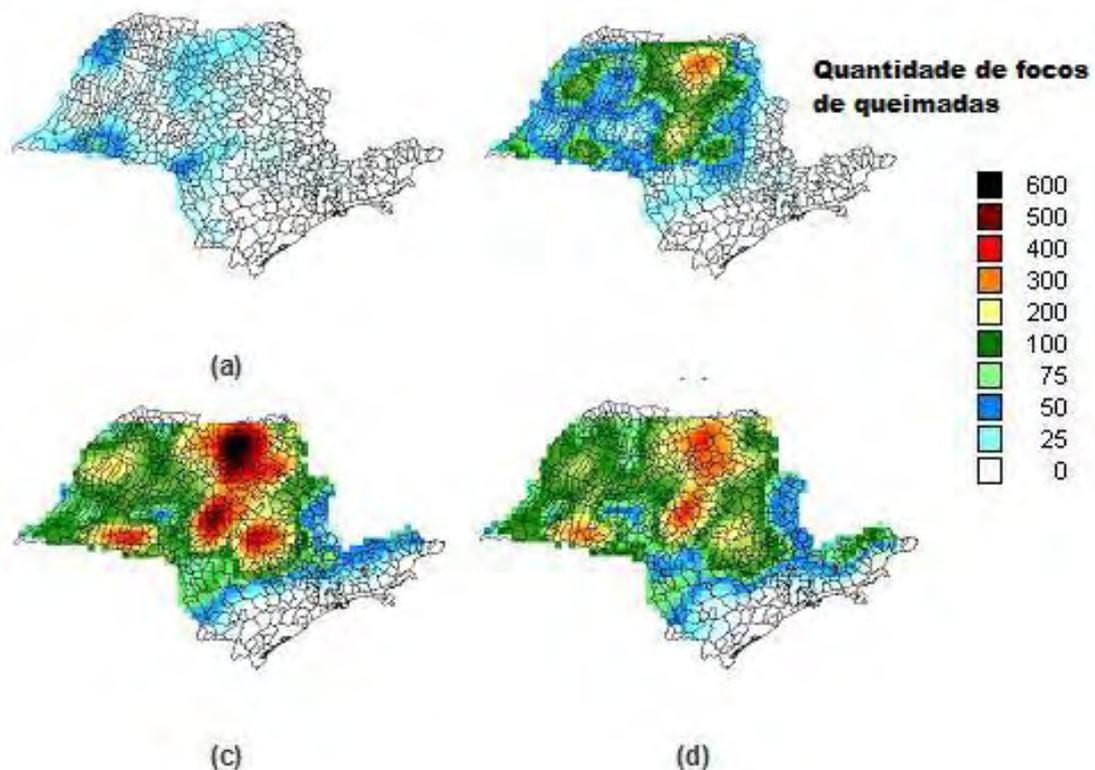


Figura 5.2 - Focos de queimadas durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007: (a) verão; (b) outono; (c) inverno e (d) primavera

oeste) como regiões onde existe um alto índice de focos, devido a presença da cultura de cana-de-açúcar. A relação entre os focos de queimadas e a cultura da cana-de-açúcar pode ser melhor compreendida ao se analisar a correlação entre os focos de queimadas de cada ano com a safra anual de cana-de-açúcar no estado de São Paulo (dados provenientes do projeto CANASAT), do qual foi obtido um coeficiente de correlação de aproximadamente 0,90.

Os resultados da figura 5.2 podem ser melhor analisados através da figura 5.3, na qual pode-se perceber a variação dos focos de queimadas durante o período analisado. O inverno foi a estação do ano com maior quantidade de focos de queimadas durante o período, quando foram registrados aproximadamente 15.000 focos, seguido de perto pela primavera com aproximadamente 12.000 focos, enquanto que no verão foram registrados 2000 focos.

A cana-de-açúcar é queimada e colhida de Maio à Novembro. Este período é coincidente com a estação seca do sudeste brasileiro. De dezembro a abril padrão

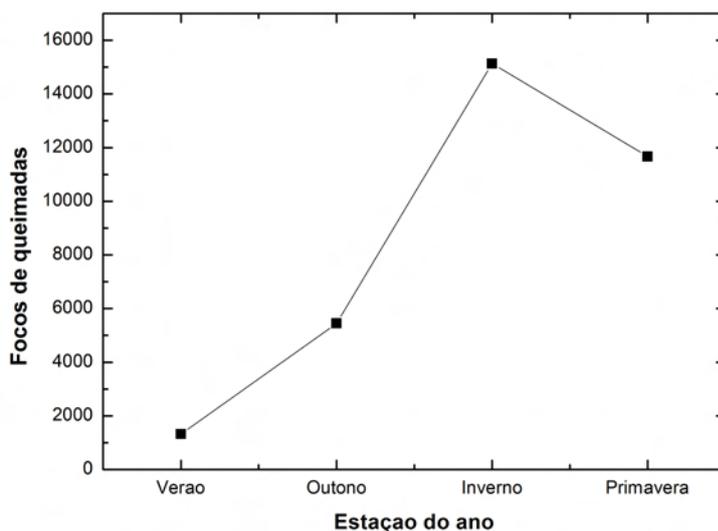


Figura 5.3 - Somatório dos focos de queimadas por estação durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007

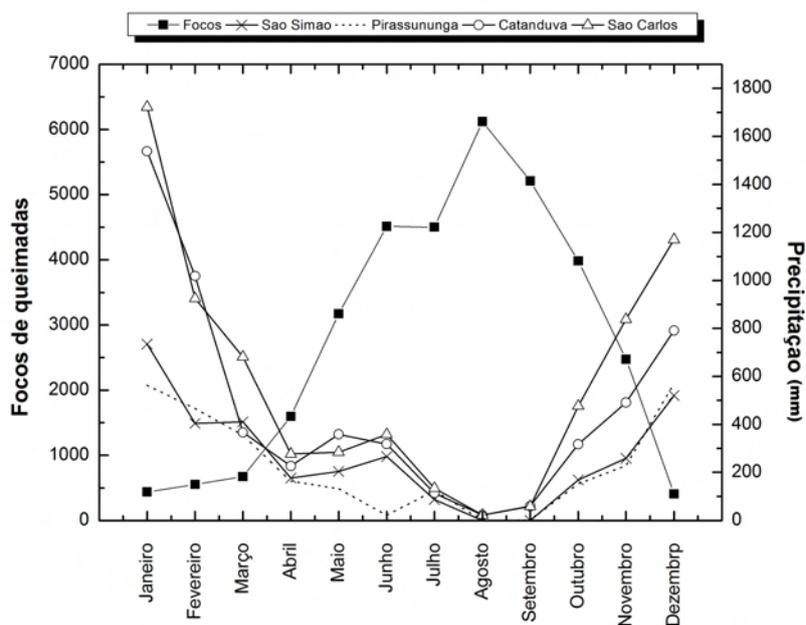


Figura 5.4 - Somatório da precipitação nas cidades de São Simão, Pirassununga, Catanduva e São Carlos durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007 e somatório dos focos de queimadas mensalmente durante o mesmo período para o estado de São Paulo

úmido prevalece e existem poucas atividades de queima em todo estado de São Paulo (figura 5.4). Pela análise dessa figura percebe-se que o número de focos de queimadas tende a crescer a partir do mês de março, obtendo seu máximo no trimestre julho, agosto e setembro. De acordo com a figura, o pico da estação de queima (agosto) coincide com o mínimo de precipitação, enquanto que o inverso também é encontrado, mínimo de queima nos meses com máximos de precipitação (dezembro e janeiro). Pode-se ainda perceber através da figura 5.4 que a precipitação nas várias cidades analisadas (São Simão - região leste do estado; São Carlos- Centro leste; Catanduva - região central do estado e Pirassununga - leste do estado) mantém um mesmo padrão, de onde se conclui que a precipitação nessa região é regida por fenômenos de grande escala (precipitação decorrente de sistemas frontais). A mesma possui um padrão aproximadamente inverso (em todas as cidades analisadas) do padrão de focos de queimadas no estado, chegando a alguns casos a possuir correlação negativa de aproximadamente 0,92 (para a cidade de Pirassununga, região onde se concentra grande quantidade de cana-de-açúcar) entre a precipitação das cidades e número de focos de queimadas.

Pode-se analisar a variação anual dos focos de queimadas para o estado de São Paulo através da figura 5.5, com alto valor de focos de queimadas para o ano de 1999 seguido de declínio até o ano de 2001. A partir disso notou-se uma tendência ligeiramente constante do número de focos de queimadas. Além dos totais anuais de focos de queimadas, pode-se observar a variação sazonal em cada ano do número dos focos através da figura 5.5 onde é percebido, claramente, que as estações de máximos focos de queimadas são inverno e primavera, seguidos de outono e verão. Destaca-se o ano de 2004, quando a estação com maior número de focos foi a primavera, ao invés do inverno, conforme mencionado, normalmente a estação com maior quantidade de focos, sem uma possível razão apresentada, visto que as chuvas para este dois períodos foram dentro do esperado conforme normal climatológica da região (INMET). Também se nota a diferença entre o número de focos durante a estação de máximo de queimadas (inverno) com a de mínimo (verão) alcançando, em alguns anos, um valor maior que 3 vezes.

Na figura 5.6 é possível analisar o somatório dos focos de queimadas entre os anos de 1999 e 2006 mensalmente. Em uma análise inicial, percebe-se clara-

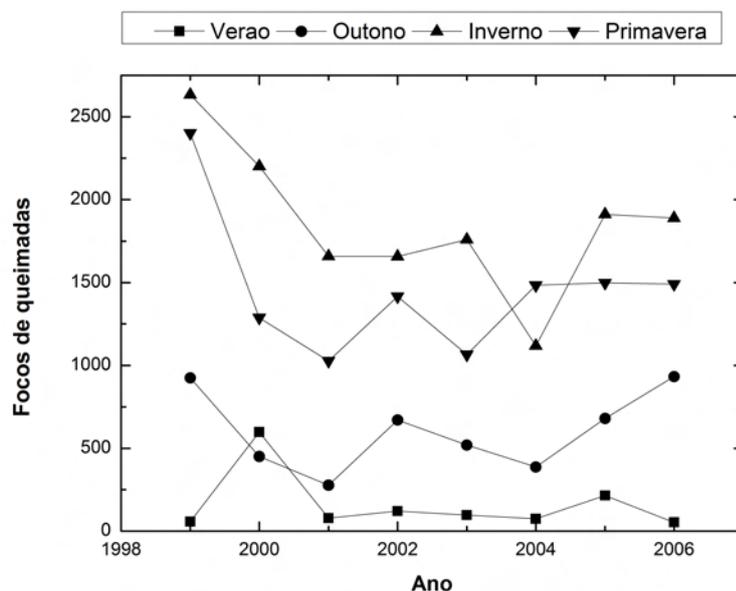


Figura 5.5 - Somatório dos focos de queimadas anualmente

mente que as queimadas tendem a aumentar a partir do mês de abril atingindo seu máximo nos meses de agosto, setembro e outubro. Destaca-se o ano de 1999, principalmente o mês de agosto do respectivo ano com aproximadamente 1400 focos de queimadas neste mês. Considerando que conforme a figura 5.5 o inverno do respectivo ano possuiu quase 3000 focos de queimadas esse valor mensal corresponde a cerca de 50% do total da estação. No entanto, analisando-se o padrão inverso dos focos mensais, ou seja, onde esperaria altos valores de número de focos, destaca-se o mês de julho de 2004, onde não foi observada a quantidade de focos esperada. Conforme já citado na figura anterior, foi observada uma inversão da estação onde predominaram os maiores valores de focos de queimadas na primavera no ano de 2004. Quando analisado a precipitação para o mês de julho, a mesma foi dentro da normal climatológica (INMET), não sendo, possivelmente, o motivo para a diminuição do número de focos neste mês. Uma hipótese foi devido à um atraso na plantação da cultura para esse ano.

### 5.1.1 Conclusões

Pela análise dos resultados durante o período estudado (1999-2007), percebe-se que as estações que possuem maior quantidade de focos de queimadas no estado de São Paulo, nessa ordem, são: inverno, primavera, outono e verão.

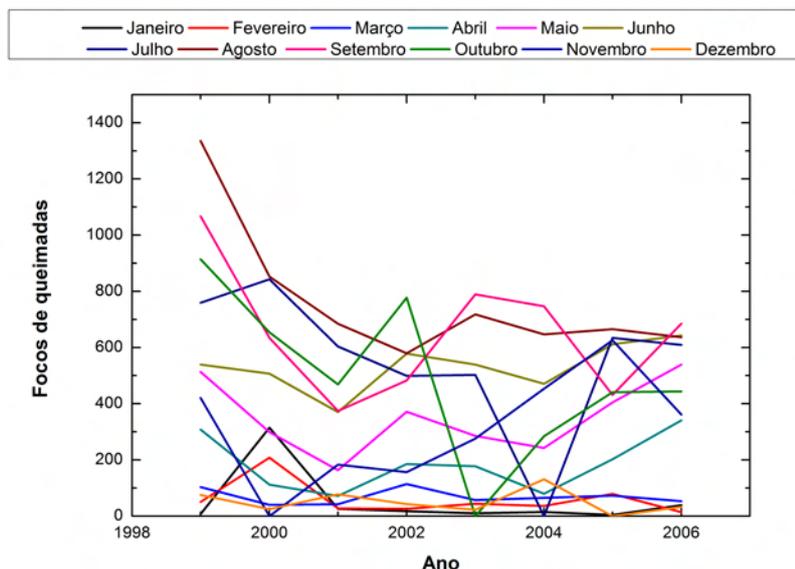


Figura 5.6 - Focos de queimadas mensais durante o período de janeiro de 1999 a julho de 2007

Sendo destacadas principalmente as regiões das cidades de Ribeirão Preto, Jaboticabal, Piracicaba e Assis como regiões onde existe alto índice de focos de queimadas, sugerindo que uma parte bastante significativa dos focos de queimadas ocorre em áreas onde existe o cultivo da cana-de-açúcar. Isto porque as queimadas são utilizadas na colheita dessa cultura, como mostra a correlação entre os focos de queimadas anuais e a safra de cana-de-açúcar, que alcança valores de 0,90.

Percebeu-se, conforme já era esperado, um padrão inverso entre a precipitação ocorrida em algumas cidades do estado de São Paulo e o número de focos de queimadas durante o período analisado, chegando a uma correlação negativa de 0,92 para a cidade de Pirassununga-SP entre os anos estudados. Isso ocorre, principalmente, porque fazendeiros utilizaram o método de queimadas quando não se verifica a presença da precipitação.

Durante o período analisado, percebeu-se quase uma constância no número de focos de queimadas, exceto para o ano de 1999, com aproximadamente 4000 focos de queimadas por ano para o estado de São Paulo.

## 5.2 Trajetórias preferenciais de dispersão da parcela de ar

Neste tópico serão analisadas as trajetórias das parcelas de ar a partir da EDR de Ribeirão Preto (Lat.-20.5°; Lon.-48.5°), em três níveis diferentes (925, 700 e 500 hPa) para o inverno do período mencionado (2000-2006). Esta região e época foram escolhidas por se constatar a maior quantidade de focos de queimadas durante o período estudado conforme já mostrado no item 5.2. Com essas trajetórias médias das parcelas de ar pode-se analisar a frequência da direção na qual as parcelas de ar se deslocam em 24h e juntamente com o composto de casos que abrange cada grupo de trajetórias médias, percebe-se a configuração sinótica estabelecida no momento de advecção dessas trajetórias.

As figuras 5.2, 5.2 e 5.2 mostram as trajetórias médias das parcelas de ar divididas em 5 grupos para o período 2000-2006 com a porcentagem de cada grupo (trajetória). Para cada caso apresentado foi feito os compostos de linhas de correntes com nível de significância de 95% obtido através do teste “t” de student para os 3 níveis mencionados e estão apresentados nas figuras 5.8, 5.10 e 5.12. Conforme relatado no item 4.3, a escolha do cálculo de 5 grupos para análise de agrupamento foi por, após diversos testes, se analisar que na maioria das ocasiões representa os padrões sinóticos da região. No anexo A.1 são mostradas as trajetórias preferenciais para os 3 níveis no restante das estações do ano.

No inverno em 925 hPa (figura 5.2) se nota a não ocorrência de trajetórias médias em direções menores do que 90° e maiores do que 270°. Dessa forma, durante o período de maior quantidade de focos de queimadas não deve existir dispersão das queimadas (em baixos níveis) para região ao norte da região fonte analisada. Além disso, o período do inverno (Junho-Agosto) é caracterizado por uma atmosfera seca e baixa umidade, com baixo índice de precipitação. Estas condições, juntamente com a queima em grandes áreas da cana favorecem a formação e acumulação de substâncias na atmosfera. No inverno a trajetória com maior ocorrência é para a direção leste (mostrado em azul claro) com aproximadamente 25% de ocorrência. Dessa forma, espera-se que o material resultante da queima de cana-de-açúcar na região que não consiga romper a camada limite, ficando confinado a níveis mais baixos (devido ao nível estudado, cerca de até 1000 m), sejam transportados com maior frequência em direção a região leste, próxima a região fonte. Nessa estação as trajetórias médias mostram uma frequência bas-

tante próxima entre si, variando aproximadamente entre 15% e 25%. Ainda se tratando do inverno, percebe-se a presença e influência constante em todos os itens analisados do anticiclone subtropical 5.8, somente no caso (d) que ocorre a presença de um centro de alta pressão à oeste do Brasil, porém o mesmo não afetou as trajetórias. Um fato que merece destaque é que as trajetórias médias mostradas em vermelho e azul escuro possuem a mesma direção, variando somente sua intensidade. Isso ocorre possivelmente devido ao fato da não formação do centro de alta pressão (item a) para o caso mostrado em vermelho, enquanto que nos casos mostrados em azul escuro (b) o centro de alta pressão já se encontra formado, devido a passagem de um sistema frontal.

Referente ao teste de significância percebe-se que praticamente para todos os grupos analisados pelos compostos, existe significância alta sobre a região onde se origina as queimadas, podendo-se observar nas áreas mais escuras. Dessa forma os grupos analisados são consistentes e representativos das trajetórias das parcelas de ar da região.

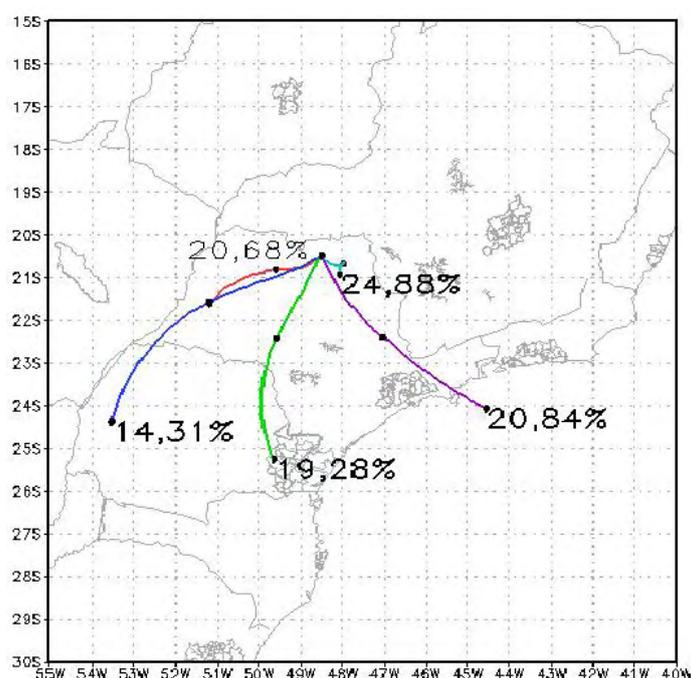
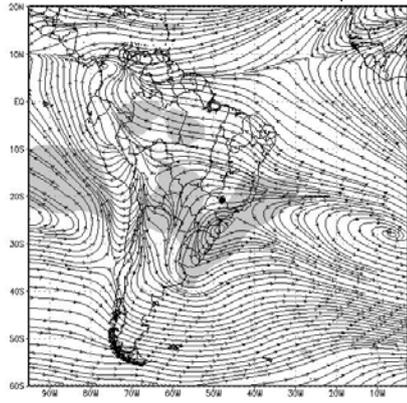
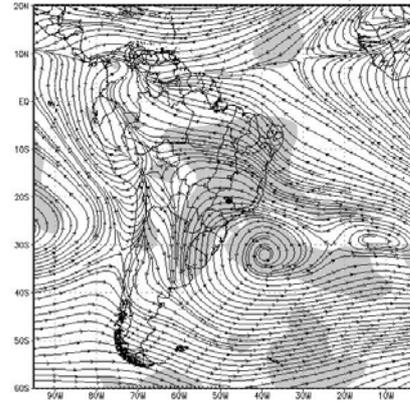


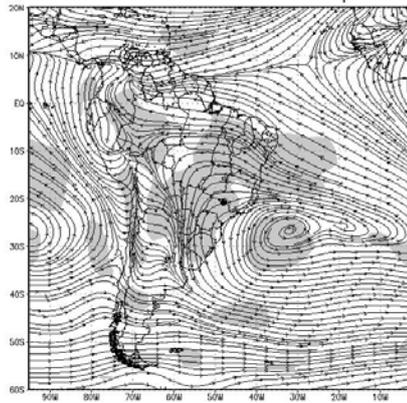
Figura 5.7 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o inverno em 925 hPa (24h)



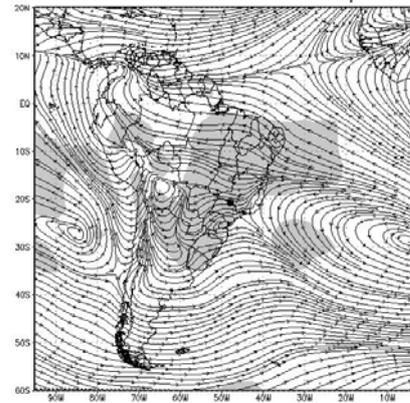
(a)



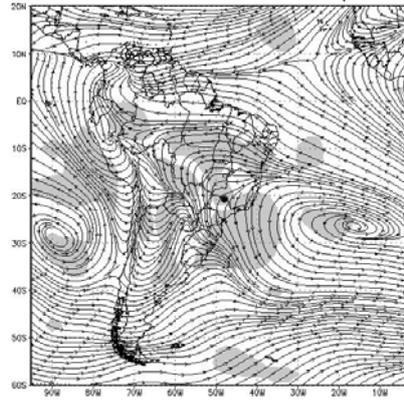
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.8 - Compostos de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (a-grupo 1 (vermelho). b-grupo 2 (azul escuro); c-grupo 3 (verde); d-grupo 4 (azul claro); e-grupo 5 (violeta)) para o inverno em 925 hPa

O nível de 700 hPa foi escolhido pelo fato de medidas anteriores de Lidar na cidade de São Paulo, como apresentados por [Landulfo et al. \(2003\)](#) apresentarem partículas absorvedoras nessa região da atmosfera, possivelmente, conforme citado pelos autores, oriundos de queimadas de biomassa. Os autores citaram duas possíveis fontes potenciais para os aerossóis pirogênicos (oriundos das queimadas) que podem ter sido transportados para a cidade de São Paulo: a Bacia Amazônica, bem como suas áreas vizinhas e a região norte do centro-oeste brasileiro durante o período seco. Porém em medidas posteriores e conforme detalhado nos próximos capítulos, as queimadas da cana-de-açúcar também podem transportar partículas pirogênicas, altamente absorvedoras de radiação solar para a região da cidade de São Paulo.

Além da direção das trajetórias médias para o nível analisado, destaca-se também a intensidade dessas trajetórias em relação a velocidade do vento. Tendo como o exemplo a figura 5.2 existem três trajetórias com direções muito semelhantes entre si (vermelho, azul escuro e azul claro). O algoritmo k-means, utilizado para a análise de agrupamento no momento de separação das trajetórias que compõem cada grupo, separou em relação a intensidade das trajetórias, como o azul claro com ventos mais intensos e azul escuro com ventos mais amenos. As duas primeiras trajetórias médias (vermelha e azul escuro), conforme mostra o conjunto dos casos, figura 5.10 (itens a e b), foram devido à presença do anticiclone do Atlântico sul sobre (nesse caso, ao norte da região de estudo) ou bem próxima ao continente (a leste da região), enquanto que para a trajetória mostrada em azul claro foi devido a um centro de alta pressão a norte da região de estudo (mais ao norte do que no caso do item (a)). Destaca-se que para o caso do item (e) da figura 5.10, apesar do anticiclone se encontrar bem próximo a costa do continente a direção das parcelas de ar foi para sul (violeta) devido ao mesmo estar a sudeste da região de estudo, enquanto que para o caso mostrado em verde, o item (c) nos mostra que a presença do centro de alta à oeste da região faz com que a trajetória média das parcelas de ar seja em direção a norte/noroeste.

Semelhante ao nível de 925 hPa, anteriormente analisado, nota-se a presença constante do anticiclone subtropical, variando somente sua posição, mais próxima do continente no inverno ou mais distante no verão. Esse sistema, conforme anteriormente citado é o principal mecanismo de transporte das parcelas de ar

da região fonte para a RMSP. Tendo novamente o inverno como exemplo (por se tratar da época com maior quantidade de queimada, tanto da cana-de-açúcar quanto da Bacia Amazônica), quando o sistema se encontra próximo ao continente (aproximadamente ao leste da região) é o responsável pelo transporte das parcelas de ar para a direção da RMSP (itens (a), (b) e (d)). Sendo o último caso mais importante para o transporte, o centro de alta pressão que se encontra ao norte da região sobre o continente, supõe-se que esse centro possivelmente ocorre devido a sistemas transientes como uma frente fria. O anticiclone também se apresenta importante quando as direções das parcelas de ar são para norte e sul (itens (c) e (e)). No caso do item (e) a presença do anticiclone na costa do continente mais ao sul da região principal analisada, acarreta o transporte das parcelas de ar para o sul do Brasil, enquanto que a presença de um centro de alta sobre o continente a oeste da região (item c) faz com que as parcelas de ar se desloquem para a direção norte referente a região inicial.

As três trajetórias em direção sudeste da fonte emissora (azul escuro, vermelho e azul claro) correspondem a aproximadamente 63% das trajetórias no inverno em 700 hPa, portanto as mesmas são bons indicativos de locais para instalação de locais de medidas da rede AERONET.

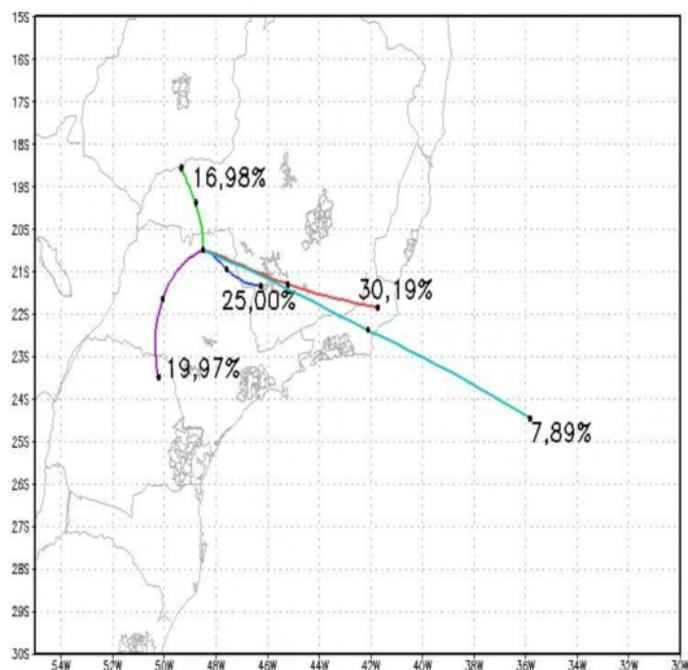


Figura 5.9 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o inverno em 700 hPa (24h)

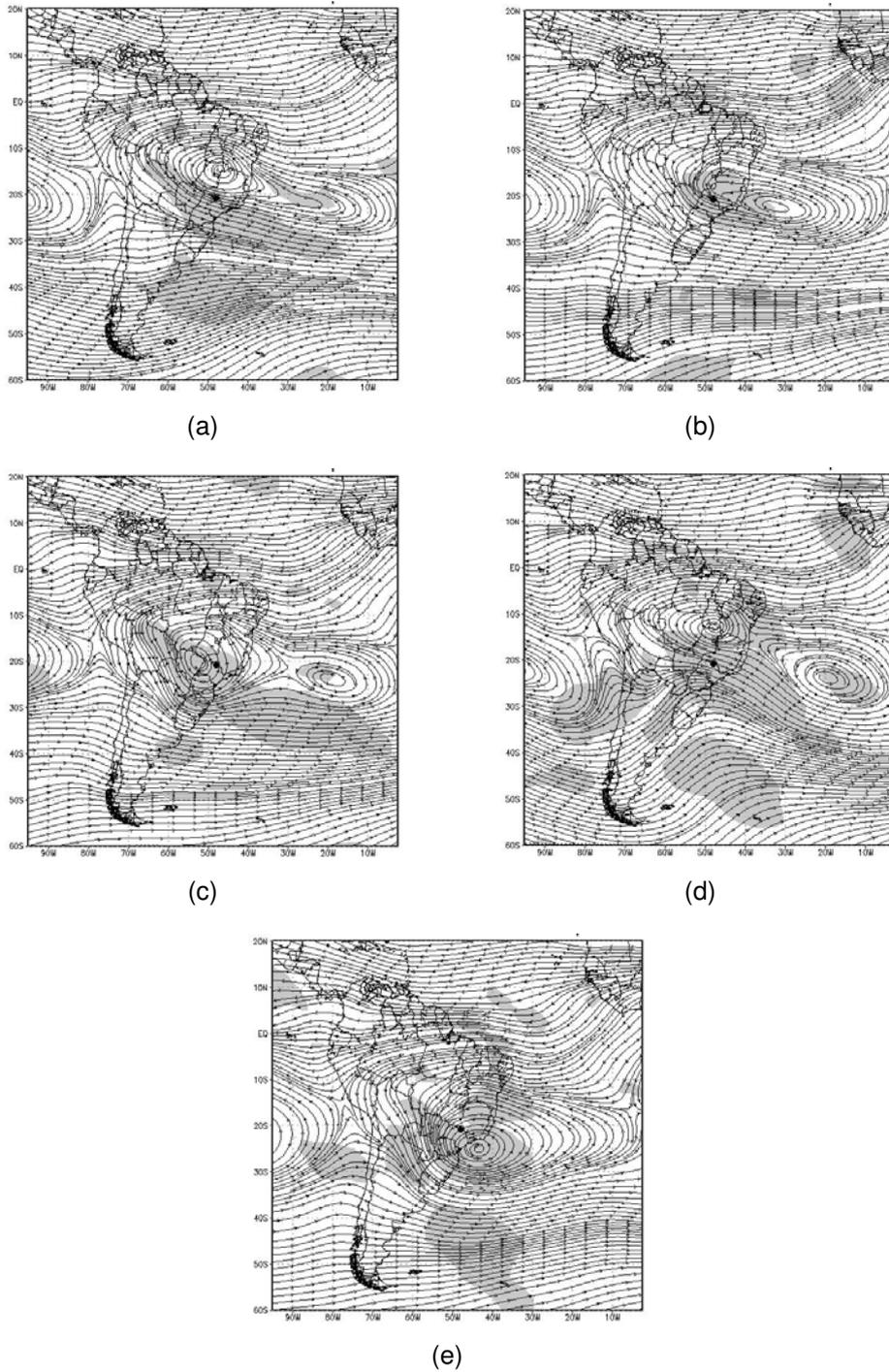


Figura 5.10 - Compostos de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (a-grupo 1 (vermelho). b-grupo 2 (azul escuro); c-grupo 3 (verde); d-grupo 4 (azul claro); e-grupo 5 (violeta)) para o inverno em 700 hPa

O teste de significância aplicado apresentou níveis altos em todos os itens derivados dos grupos obtidos pela análise de agrupamento. Destaca-se que em algumas ocasiões as regiões com altas significâncias são obtidas na direção das trajetórias das parcelas de ar, viabilizando assim sua confiança no grupo apresentado.

A escolha de se analisar no nível de 500 hPa foi devido, após medições durante os últimos anos através do Lidar instalado em São Paulo, a captação de partículas altamente absorvedoras em níveis de 700 hPa chegando em alguns casos até os níveis mais altos, como em 500 hPa.

O anticiclone subtropical também é observado nesse nível, pois o mesmo se estende desde a superfície até níveis mais altos e o mesmo é observado como sendo altamente impactante nas trajetórias das parcelas de ar agrupadas. Sua presença mais próxima do continente, sobretudo durante o inverno e primavera faz com que durante essas estações maior quantidade de trajetórias de parcelas de ar sejam advectadas para as direções leste e sudeste, podendo, conforme anteriormente citado, serem transportadas para a RMSP, ou devido ao nível analisado influenciar a físico-química das nuvens.

Na estação de inverno, figura 5.2, observa-se uma trajetória em direção a oeste/noroeste (mostrada em verde) e o restante das trajetórias variando entre nordeste e sudeste. Quando o centro de alta está a oeste próximo a região de estudo observa-se que a trajetória média da parcela de ar tende a ser para oeste. Entretanto, quando a alta se encontra a norte da região (variando entre noroeste, norte ou nordeste) percebe-se um deslocamento das parcelas de ar para a região leste, que por sua vez varia entre nordeste e sudeste.

Vale destacar que a trajetória com maior porcentagem se encontra em direção ao nordeste (vermelho - 32%) devido a ocorrência de um centro de alta pressão na região da Bacia Amazônica. Além disso, a trajetória mostrada em azul claro indica a dispersão preferencial desses poluentes emitidos na região fonte diretamente em direção à RMSP.

Pela análise das regiões com significância, percebe-se novamente que as regiões analisadas (principalmente região sudeste brasileira) possuem níveis de significância acima de 95%; dessa forma as trajetórias para cada grupo são sig-

nificativas.

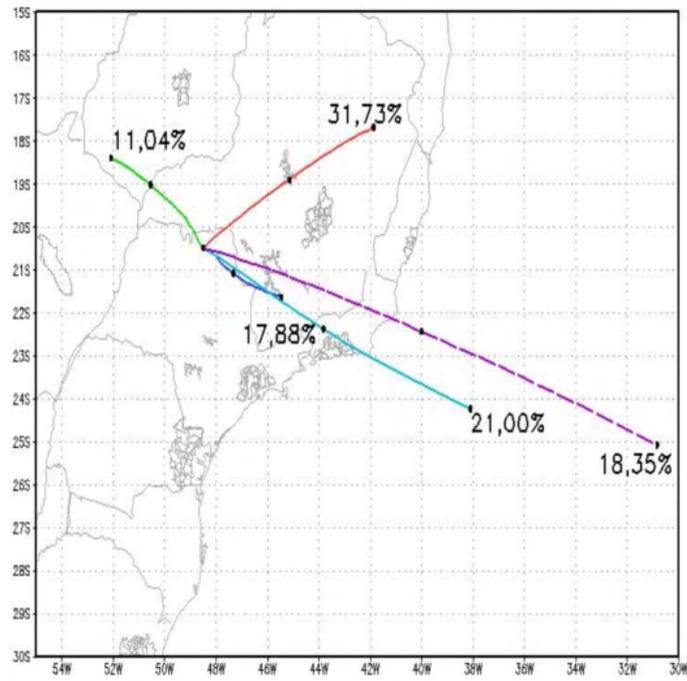


Figura 5.11 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o inverno em 500 hPa (24h)

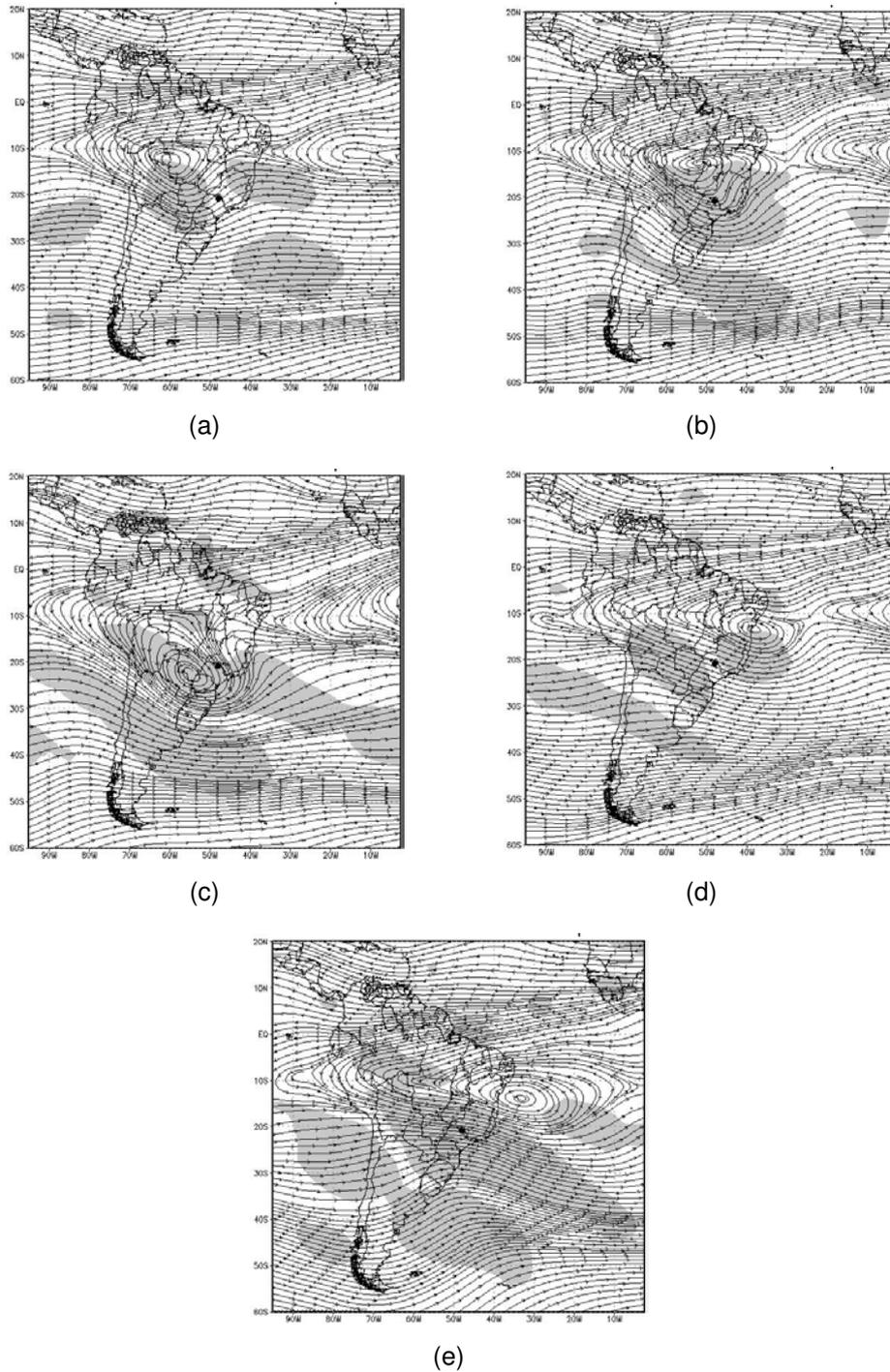


Figura 5.12 - Compostos de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (a-grupo 1 (vermelho). b-grupo 2 (azul escuro); c-grupo 3 (verde); d-grupo 4 (azul claro); e-grupo 5 (violeta)) para o inverno em 500 hPa

### 5.2.1 Conclusões

Através das figuras de trajetórias médias separadas em grupo pelo algoritmo de análise de agrupamentos (entre os anos de 2000 a 2006) verificaram-se trajetórias médias que tendem a se repetir em todos os níveis, sobretudo para a região da RMSP (sudeste da fonte). Dessa forma, locais indicados para instalações futuras da rede AERONET seria na direção leste-sudeste da fonte emissora analisada.

Pela análise dos agrupamentos de trajetórias, nota-se a influência de alguns sistemas predominantes no inverno (estação onde existiu maior número de focos de queimadas), destacando-se os anticiclones transientes e subtropical. Foi verificado que o anticiclone subtropical é o sistema que mais influencia nas trajetórias das parcelas de ar simuladas durante o período analisado. Percebe-se também que, pelos grupos analisados, sua variação zonal e em alguns casos do tipo meridional seja o fator impactante na trajetória das parcelas.

As trajetórias médias que foram influenciadas por sistemas transientes, que puderam ser identificados através da presença de cavados, e centros de baixa e alta pressão, em geral obtiveram, individualmente, baixa porcentagem em cada estação, porém em alguns casos quando em conjunto, alta porcentagem. Dessa forma percebe-se que os sistemas transientes como um todo (antes, durante e depois da passagem do mesmo) influenciam em grande porcentagem as trajetórias médias das parcelas de ar analisadas.

A intensidade das trajetórias médias é resultante de dois motivos. O primeiro deles é devido à menor intensidade dos ventos nos casos agrupados; dessa forma a trajetória média tende a ser menor se comparada com as outras apresentadas. O segundo motivo é quando ocorre grande variação nas trajetórias agrupadas; isso acontece pois o algoritmo utilizado tende a agrupar as trajetórias que não se encaixam em nenhum outro grupo em um mesmo grupo. Dessa forma nesse último caso, a escolha de se analisar as trajetórias médias separadas em cinco grupos se mostrou errônea, sendo o ideal se utilizar um número de grupo maior.

Também se observou que os compostos utilizados, na grande maioria dos casos, representaram satisfatoriamente os grupos separados pelo algoritmo de análise de agrupamento. Dessa forma, foi verificado que a região principal de estudo

na maioria dos casos analisados possuiu nível de significância alto (acima de 95%, conforme mostrado pelo teste t de student), fazendo com que as trajetórias escolhidas pelo método de agrupamento sejam bastante confiáveis.

Diante do exposto, cita-se como local para uma possível expansão para rede da AERONET e/ou uma rede de LIDARs a localização de Lat.: -20,5° e Long.: -48,5°, por possuir a maior quantidade de focos de queimadas no estado de São Paulo podendo, caso seja instalado algum equipamento acima mencionado, indicar o impacto dessas queimadas na região. Além das regiões mostradas na trajetória média da figura 5.2 indicada pela cor violeta.

### **5.3 Análise de dados de São Paulo-SP**

#### **5.3.1 Aspectos Sinóticos durante o período da campanha de coleta de dados com o sistema LIDAR de São Paulo em 2007**

A Região Metropolitana de São Paulo se situa entre 23°S e 46°W dentro da região sudeste do Brasil. Em uma área de 8.051 km<sup>2</sup> possui população em torno de 17 milhões de habitantes (dados de 2003). A região urbana se situa na Bacia Sedimentar de São Paulo com altitude média de 720 metros cercada ao norte pela Serra da Cantareira, que atinge altitudes de até 1200 m no sentido leste-oeste e pela Serra do mar com altitudes aproximada de 800 m no sentido leste-sul. A RMSPP está distante, aproximadamente, 45 km do Oceano Atlântico (CETESB, 2004).

Devido à sua latitude, a região sudeste do Brasil é caracterizada como uma região de transição entre climas quentes de latitudes baixas e climas temperados de latitudes médias. O sul da Região Sudeste é afetado pela maioria dos sistemas sinóticos que atingem o sul do país, porém com algumas diferenças em termos de intensidade e sazonalidade do sistema (CLIMANÁLISE, 1996).

O período de julho de 2007 estudado (últimos dez dias) foi marcado pela passagem de um sistema frontal que foi associado com áreas de instabilidades sobre o estado de São Paulo, sobretudo nos dias 23 e 24, do respectivo mês, onde ocorreu precipitação correspondendo a cerca de 60% do total medido durante todo o período - entre 20/07 e 10/10 (52,4mm dos 87,6mm registrados no período mencionado) (figura 5.13). Durante o período do mês de julho foi registrada a passagem de três sistemas frontais pelo estado de São Paulo nos dias 23, 25 e 28 (neste tópico serão consideradas passagens registradas em Ubatuba-SP, conforme divulgado pelo boletim Climanálise - disponível em <http://www6.cptec.inpe.br/revclima/boletim/>) (CLIMANÁLISE, 2007a). A passagem desses sistemas pode ser observada nos gráficos de precipitação, através de registros nos dias 23, 24 e 26 (figura 5.13), temperatura do ar, através da diminuição da temperatura pós-passagem do sistema frontal em todos os dias mencionados (figura 5.14) e da diminuição da umidade do ar (figura 5.15). O boletim da Climanálise do mês de julho destaca ainda a redução de 45% dos focos de queimadas do estado de São Paulo neste mês (300 focos) em comparação com o ano anterior. No mês de agosto de 2007 foi registrado somente um dia

(dia 20) de precipitação significativa (considerando acima de 5mm/dia) na cidade de São Paulo. Apesar de cinco sistemas frontais (dias 4, 8, 11, 20 e 26) terem atingido a região (CLIMANÁLISE, 2007b). É possível perceber a passagem de alguns desses sistemas frontais citados nos gráficos de temperatura e umidade do ar (5.14 e 5.15).

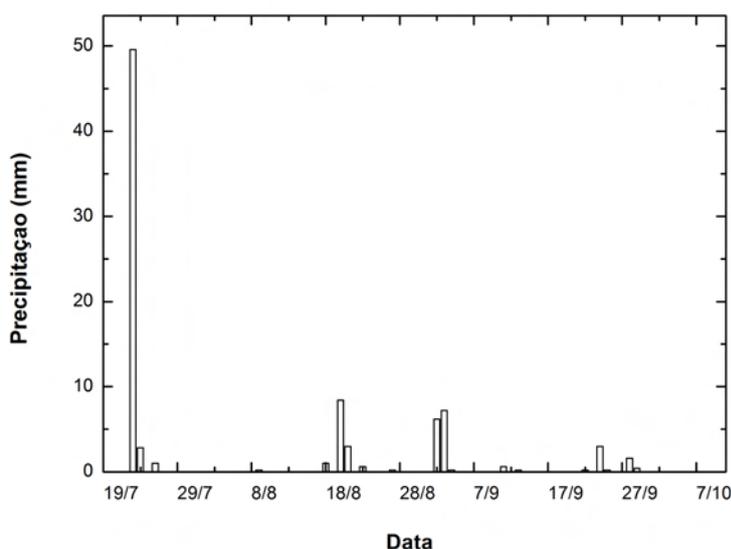


Figura 5.13 - Precipitação (mm) entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo

Em Setembro ocorreram dois dias com precipitação significativa (02 e 03) devido à passagem de um sistema frontal sobre o oceano, porém a precipitação ainda se manteve abaixo da média histórica para esse mês (CLIMANÁLISE, 2007c). Possivelmente isso foi motivado pelo número de passagens de sistemas frontais na região, somente três (dias 17, 24 e 29).

Durante o período estudado, para o mês de outubro de 2007 (dez primeiros dias do mês), não foi registrado nenhum dia com precipitação na cidade de São Paulo conforme mostrado na figura 5.13. Isso foi devido, possivelmente, a não-passagem de nenhum dos sete sistemas frontais registrados no mês (CLIMANÁLISE, 2007d), pois esses sistemas são os principais causadores de precipitação na região durante o período de inverno.

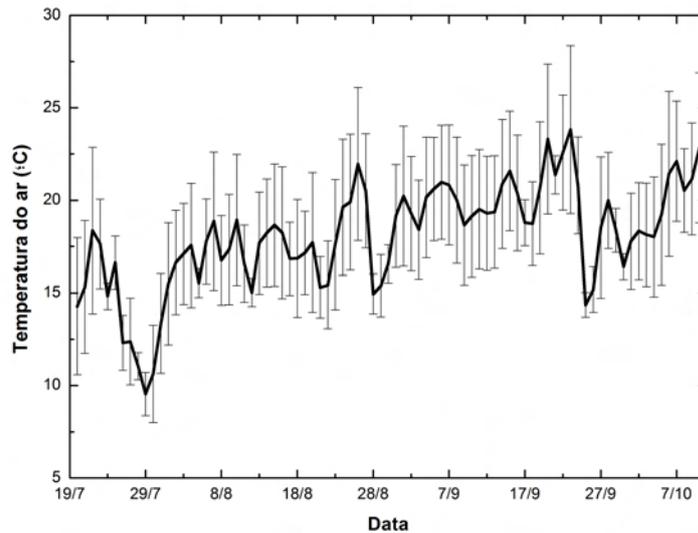


Figura 5.14 - Média da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) a cada 30min entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo

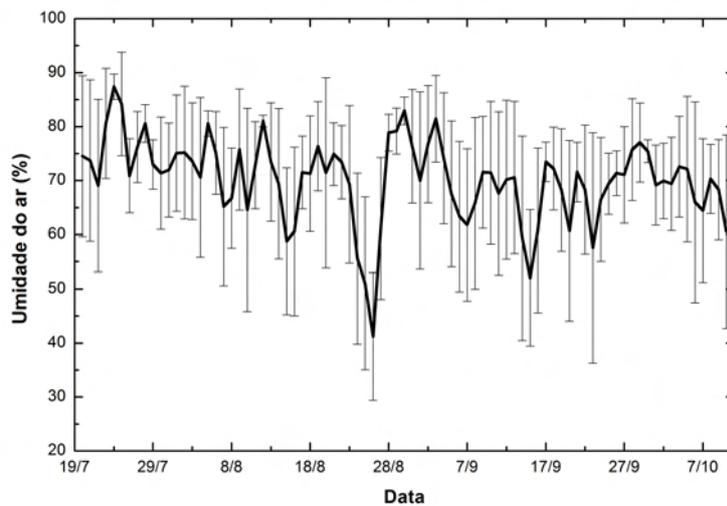


Figura 5.15 - Média da umidade do ar (%) a cada 30min entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo

Através da tabela 5.1 pode-se analisar as mínimas, máximas e médias (juntamente com o desvio padrão) de algumas variáveis meteorológicas dos meses do estudo. Percebe-se que todo o período é marcado por grandes desvios padrão tanto na temperatura (desvio padrão máximo de  $3,7^{\circ}\text{C}$ ) quanto na umidade do ar (máximo de  $14,6\%$ ). Estes desvios padrões são registrados, pois, neste período,

a região estudada é marcada pela forte e constante passagem de sistemas frontais que afetam sensivelmente diversas variáveis meteorológicas. Além disso, a baixa umidade do ar normalmente neste período favorece as grandes variações, sobretudo na temperatura do ar próximo a superfície.

Conforme o [CLIMANÁLISE \(1986\)](#), o clima na RMSP apresenta inverno seco e verão úmido, com temperaturas que variam de 8 °C (média das mínimas) nos meses mais frios e de 30 °C (média das máximas) nos meses mais quentes, com média anual de temperatura de 20 °C. A precipitação em agosto (inverno) é aproximadamente 50 mm, enquanto que em fevereiro (verão), a precipitação é cerca de 250 mm ([METEOROLOGIA, 2008](#)).

Conforme mencionado anteriormente, a baixa umidade do ar favorece grandes valores nos desvios padrões da temperatura do ar na região estudada, devido a maior facilidade que a energia radiante terá para aumentar a temperatura do ar. Devido a esse fator é possível observar altos valores no gráfico da temperatura do ar à superfície medida neste período para São Paulo (figura 5.14). Na referida figura pode-se notar grandes variações associadas na sua grande maioria à passagem de sistemas frontais que provocam, em alguns casos, queda de temperatura bastante acentuada. A temperatura média do período analisado foi de  $18,0 \pm 4,1$  °C.

Na figura 5.15 pode-se observar a variação da umidade do ar durante o período. O seu valor médio durante o período foi de  $70,2 \pm 13,8$  %. Nota-se novamente, grandes valores de desvio padrão para os dados apresentados chegando a alguns casos até aproximadamente 21% (23/09). Os valores apresentados na tabela 5.1, ficaram entre aproximadamente 24 e 94%, considerado bastante normal (apesar da grande variação) dentro do período.

O ciclo diário médio da temperatura e umidade do ar durante o período analisado pode ser visualizado na figura 5.16. Semelhante aos gráficos de temperatura e umidade do ar médio diário para o período é possível notar altos valores de desvios padrão de ambas as variáveis. A temperatura do ar cresce relativamente pouco com o nascer do sol, aumentando cerca de 1°C, aumentando mais consideravelmente a partir das 8:00, alcançando seu máximo em torno de 14:30 (média de 22,4 °C). Destaca-se para a temperatura o seu valor médio de  $18,0 \pm 2,5$ °C. Para a umidade do ar é possível notar a sua diminuição ao longo do dia

alcançando seu mínimo no mesmo momento do máximo de temperatura (14:30) com 53,2%. Seu valor médio foi de  $70,2 \pm 8,9$  %.

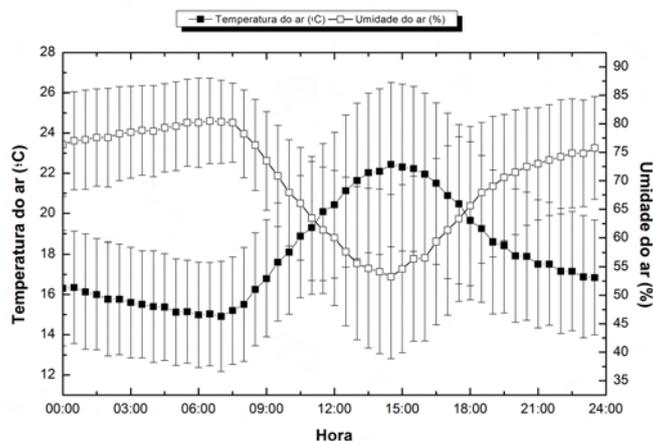


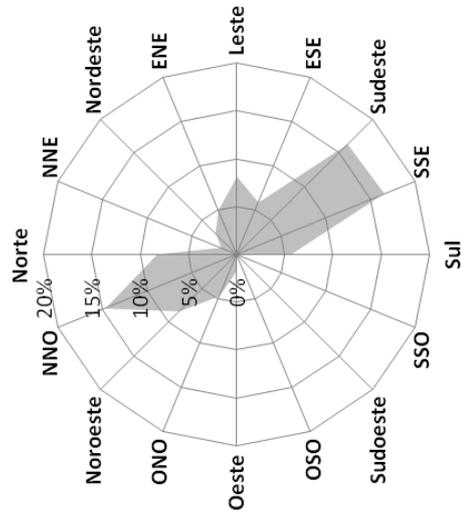
Figura 5.16 - Ciclo médio da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade do ar (%) a cada 30min entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 para São Paulo

Na figura 5.17 é possível observar a distribuição de frequência da direção do vento além da velocidade média para cada direção tanto no período inteiro (2006 e 2007), no período selecionado (20/07 a 10/10), quanto durante somente os dias estudados pela estação da Universidade de São Paulo. A direção predominante do vento para o período selecionado foi de SSE (26,7% dos dados medidos), enquanto para os dois anos de dados obteve-se direção predominante oriunda também de SSE (16,5%), porém bastante similar a porcentagem da direção Sudeste (16,2%) e próximo de NNO (14,8%). A diferença visível entre o período de dois anos e os dez dias analisados é a diminuição considerável para a direção NNO, possuindo somente (12,8%). Possivelmente a influência de ventos da direção NNO ocorra no período chuvoso da região (verão) devido à maior passagem e intensidade de sistemas frontais, sendo a direção predominante do vento resultado da chamada esteira transportadora de ar quente que antecede o sistema. Já no período seco (período selecionado para o estudo com o sistema LIDAR) o gradiente de pressão anterior à frente é mais fraco, não resultando em uma direção predominante do vento de NNO (pré-frente), somente de SSE (pós-frente) onde os gradientes são maiores.

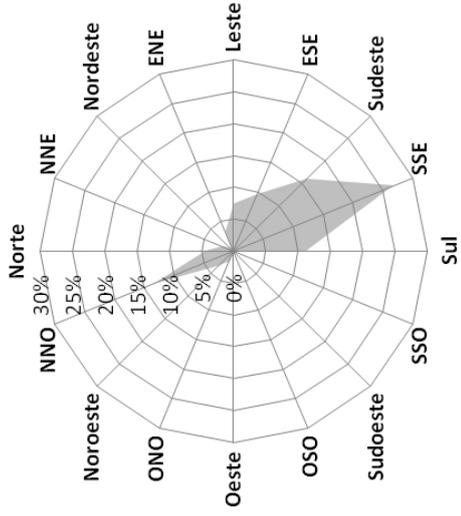
Dessa forma, quanto menor o período selecionado, possivelmente, menor será

a influência dos sistemas frontais nesse período. Dessa forma os dez dias selecionados possuíram uma menor influência de sistemas frontais se comparada com o período inteiro. Entretanto, se comparado com o período selecionado (cerca de três meses), os dez dias selecionados são bem representativos de dias que foram afetados pela entrada de sistemas frontais, pois houve somente uma leve redução de 14,8% para 12,8%.

Período Completo



Período de estudo selecionado



Dez dias selecionados para análise

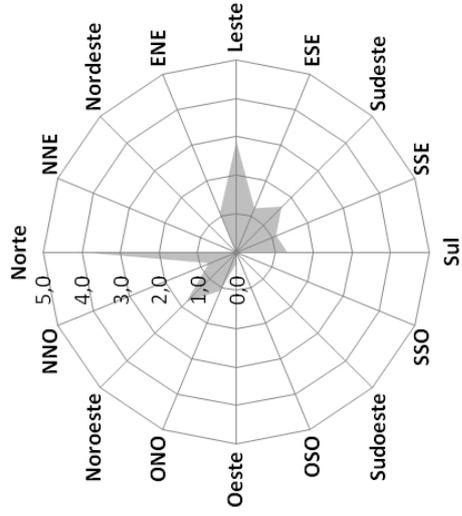
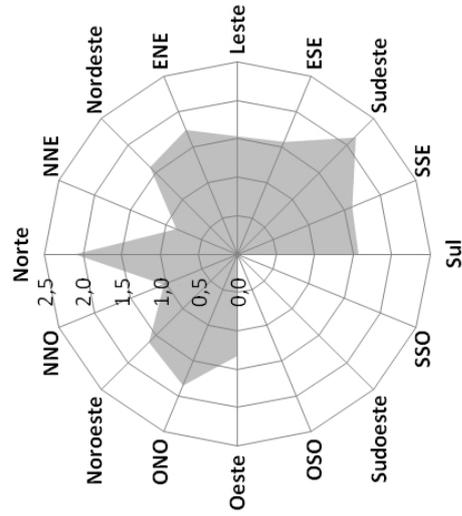
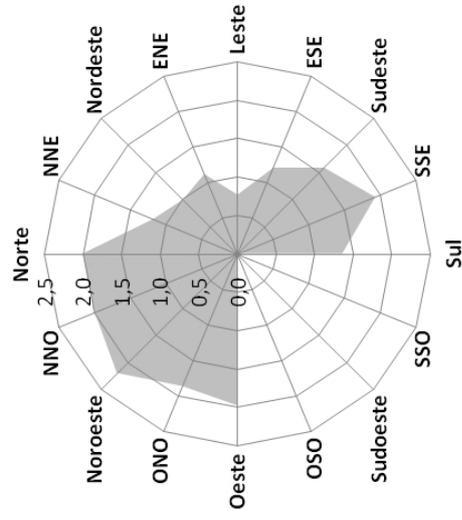
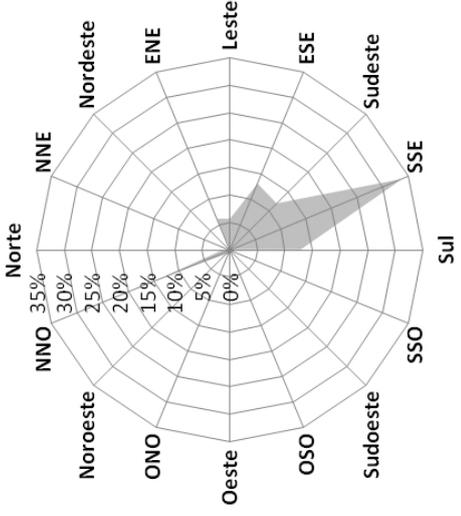


Figura 5.17 - Distribuição de frequência para a direção (graus) e velocidade do vento média (m/s) entre 2006-2007 (período completo); entre os dias 20/07 e 10/10 de 2007 (período de estudo selecionado) e para os dez dias analisados e para São Paulo

Para a velocidade média do vento observada percebe-se que para os dois anos medidos as maiores velocidades ocorreram oriundas das direções aproximadamente de Norte, Noroeste e Oeste (com cerca de 2,0 m/s) e outra componente oriunda de SSE (com também aproximadamente 2,0 m/s). Possivelmente essas duas direções estejam novamente relacionadas à entrada de sistemas frontais. Quando analisado somente o período do inverno de 2007 selecionado, percebe-se uma diminuição na componente NNO e um aumento na de Nordeste. Para os dez dias analisados observa-se um pico na velocidade do vento oriunda do Norte (cerca de 4,0 m/s), porém ressalta-se que a frequência nessa direção só corresponde à cerca de 1% dos dados coletados, portanto não sendo significativo. Para a direção SSE, direção com maior frequência de ocorrência, a velocidade do vento média é relativamente fraca (cerca de 1,0 m/s).

A tabela 5.2 é semelhante à tabela anterior, porém somente para os dias onde foi analisada a entrada de plumas de queimadas detectadas pelo sistema LIDAR na cidade de São Paulo (próximo tópic). Analisando a tabela não se nota nenhuma grande diferença quando comparado com os valores para os meses completos estudados (tabela 5.1). A direção predominante do vento (conforme figura 5.17) somente para os dias estudados (10 dias) foi de SSE com uma porcentagem relativamente maior (33,7%) do que no período dos quatro meses estudados (26,7%) enquanto na velocidade do vento ocorreu uma leve diminuição passando de 1,1 m/s para 1,2 m/s.

Tabela 5.1 - Máximas, mínimas e médias (juntamente com seu desvio padrão) para a temperatura e umidade do ar durante o período selecionado para a cidade de São Paulo

Mês	Temp. Máx. (°C)	Temp. Mín (°C)	Temp. média (°C)	$\sigma_T$	Umid. Máx (%)	Umid. Mín (%)	Umid. média (%)	$\sigma_{UR}$
Julho	25,3	7,2	13,9	3,7	94,0	43,0	76,1	11,4
Agosto	28,3	11,2	17,5	3,3	90,0	24,0	69,8	14,6
Setembro	31,1	13,2	19,7	3,6	93,0	28,0	68,7	13,7
Outubro	29,4	14,1	20,0	3,7	87,0	30,0	68,3	12,3

Tabela 5.2 - Máximas, mínimas e médias (juntamente com seu desvio padrão) para a temperatura e umidade do ar dos dias em 2007 selecionados com detecção de plumas de queimadas na cidade de São Paulo

Data	Temp. Máx. (°C)	Temp. Mín (°C)	Temp. média (°C)	$\sigma_T$ (°C)	Umid. Máx (%)	Umid. Mín (%)	Umid. média (%)	$\sigma_{UR}$ (%)
30/07	15,4	7,2	10,6	2,6	83,0	49,0	71,4	10,4
09/08	22,0	13,1	17,3	3,0	22,0	13,1	17,3	3,0
13/08	22,3	14,6	17,7	2,7	85,0	50,0	73,4	11,0
24/08	25,4	14,6	19,6	3,7	79,0	33,0	55,6	15,8
07/09	26,1	16,4	20,8	3,2	81,0	38,0	61,8	14,8
09/09	24,4	14,3	18,7	3,2	84,0	49,0	71,5	10,4
14/09	26,6	16,0	20,9	3,5	84,0	32,0	59,3	18,9
15/09	27,1	16,9	21,6	3,2	73,0	33,0	52,0	12,6
04/10	23,7	14,1	18,0	3,2	84,0	54,0	72,6	9,3
09/10	28,8	17,2	22,8	4,0	85,0	35,0	60,6	17,9

### 5.3.2 Medidas de queimadas de biomassa através de um sistema LIDAR em São Paulo

Conforme descrito na metodologia, uma campanha de perfilamento de aerossóis foi realizada com um sistema de retroespalhamento de aerossóis LIDAR em São Paulo durante a estação seca (julho-outubro) de 2007. Simulações de retro-trajetória através de modelagem juntamente com focos de queimadas através do satélite NOAA-12 (ainda disponível para o período analisado) indicaram que em dez dias de medidas com LIDAR em São Paulo nesse ano, fumaça foi advec-tada sobre São Paulo a partir de diferentes regiões, mais fortemente da Região Amazônica, Cerrado e interior do estado de São Paulo (provavelmente devido à queima de cana-de-açúcar, conforme descrito no tópico anterior).

As datas de presença de fumaça confirmada pelo sistema LIDAR estão apresen-tadas na tabela 5.3. Juntamente com o intervalo de altura das camadas de fu-maça (detectada pelo sistema LIDAR) a tabela mostra alguns parâmetros ópticos como a razão LIDAR (RL), a EOA em 532 nm e o expoente de Ångstrom médio para o dia analisado. Os valores apresentados na tabela 5.3 são condizentes com medidas realizadas na Grécia afetadas por queimadas provenientes da Rússia e leste Europeu (AMIRIDIS et al., 2009). Destaca-se que o intervalo de altura maior, em muitos casos, nesse estudo é possivelmente devido à maior energia das queimadas em questão, fazendo com que as plumas atinjam al-turas maiores. Os outros valores (EOA, Ångstrom e RL) foram em geral ligeira-mente menores. Alguns dias apresentados na tabela (24/08; 07/09; 09/09; 14/09; 15/09; 04/10 e 09/10) também foram constatados através de figuras MODIS ca-sos de transporte de poluentes de queimadas - não mostradas (obtidos em: <http://laadsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>).

A figura 5.18 mostra todas as dez trajetórias de massas de ar (separados em dois grupos de cinco) provenientes de São Paulo para os casos apresenta-dos anteriormente. As localizações das queimadas foram verificadas através do sensor AVHRR do satélite NOAA-12 com dados fornecidos pelo CPTEC/INPE ([www.cptec.inpe.br/queimadas](http://www.cptec.inpe.br/queimadas)) durante os cinco dias de retro-trajetória pelo modelo Hysplit. O modelo foi utilizado a partir das camadas de fumaça detec-tadas pelo sistema LIDAR nos dias específicos mostrados na figura 5.18.

Para se ter uma confirmação do tipo de aerossol presente nesses dias foi con-

Tabela 5.3 - Datas em 2007 de presença de fumaça sobre São Paulo indicado pela sinergia de medidas LIDAR, focos de queimadas do satélite NOAA-12 e modelo Hysplit. Intervalo de altura das partículas de fumaça, a razão LIDAR, EOA e expoente de Ångstrom médio para cada dia

Data	Intervalo de altura (km)	EOA	Ångstrom	RL[sr]
30 Julho	4,5 - 7,0	$0,15 \pm 0,05$	$0,85 \pm 0,30$	$75 \pm 33$
09 Agosto	4,2 - 5,5	$0,33 \pm 0,10$	$1,15 \pm 0,31$	$147 \pm 68$
13 Agosto	5,5 - 6,0	$0,22 \pm 0,04$	$1,37 \pm 0,11$	$70 \pm 18$
24 Agosto	3,5 - 4,0	$0,17 \pm 0,02$	$1,31 \pm 0,12$	$49 \pm 9$
07 Setembro	5,2 - 9,0	$0,33 \pm 0,10$	$1,58 \pm 0,05$	$59 \pm 14$
09 Setembro	2,8 - 4,0	$0,41 \pm 0,08$	$1,42 \pm 0,08$	$59 \pm 14$
14 Setembro	3,2 - 5,0 e 6,2 - 8,0	$0,34 \pm 0,06$	$1,51 \pm 0,03$	$71 \pm 19$
15 Setembro	3,5 - 6,0	$0,42 \pm 0,11$	$1,55 \pm 0,04$	$53 \pm 8$
04 Outubro	6,5 - 8,0	$0,46 \pm 0,04$	$1,20 \pm 0,11$	$55 \pm 6$
09 Outubro	4,5 - 6,0	$0,53 \pm 0,20$	$1,35 \pm 0,03$	$44 \pm 16$

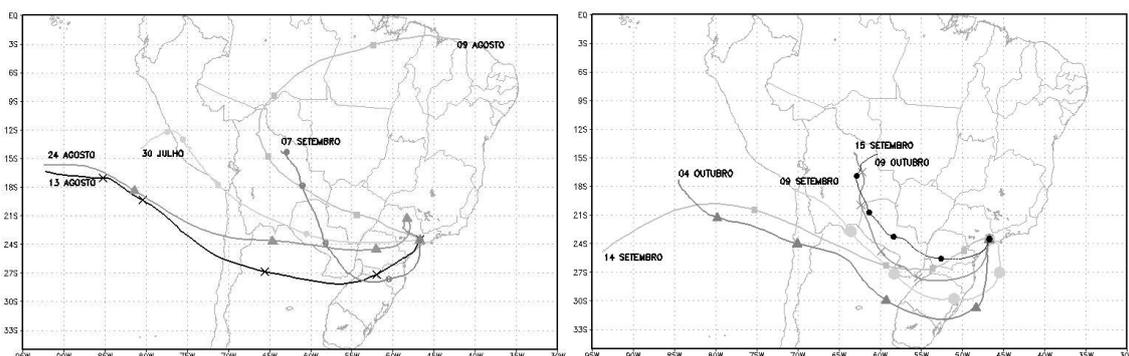


Figura 5.18 - Retro-trajetórias das queimadas de biomassa detectadas pelo sistema LIDAR em São Paulo

feccionada a figura 5.19 que nos mostra a distribuição de freqüência da razão LIDAR (532 nm) e do expoente de Ångstrom para os dez casos mencionados e comparou-se com os gráficos obtidos em Catral et al. (2005) e apresentados na figura 5.20. Nesse trabalho os autores mostram distribuições de freqüências de razão LIDAR e expoente de Ångstrom para diversas localidades. Destacam-se os gráficos produzidos com dados provenientes do Brasil (Alta Floresta, Brasília e Cuiaba), Bolívia (Los Fieros) e Zâmbia (Mongu, Senanga e Zambezi), lugares estes nos quais os mesmos descrevem o tipo de aerossol sendo resultante em

grande parte de queima de biomassa, classificando-os de tal maneira.

Em comparação com a figura citada, a figura 5.19(a) nos mostra um padrão bem semelhante para a razão LIDAR, com a quase totalidade dos dados entre 40-80 sr, tendo um pico de razão LIDAR em torno de 60 sr. Estes valores diferem do apresentado pelos autores citados anteriormente para o caso de tipo de aerossóis urbano/industrial coletados em seis cidades (com valores entre 40-100 sr com pico em 70 sr) e valores apresentados em estudos de casos em outros artigos com dados dessa campanha realizada em São Paulo (ex.: Lopes et al. (2008), Landulfo et al. ()). Isto sugere que os dias escolhidos continham predominantemente aerossóis oriundos de queima de biomassa, ao invés de urbano/industrial como se era esperado devido a localização, dentro da cidade de São Paulo. Ressalta-se que no trabalho de Catral et al. (2005) os valores foram normalizados em relação ao máximo da razão LIDAR (nesse caso aproximadamente 30%), porém escolheu-se não normalizar.

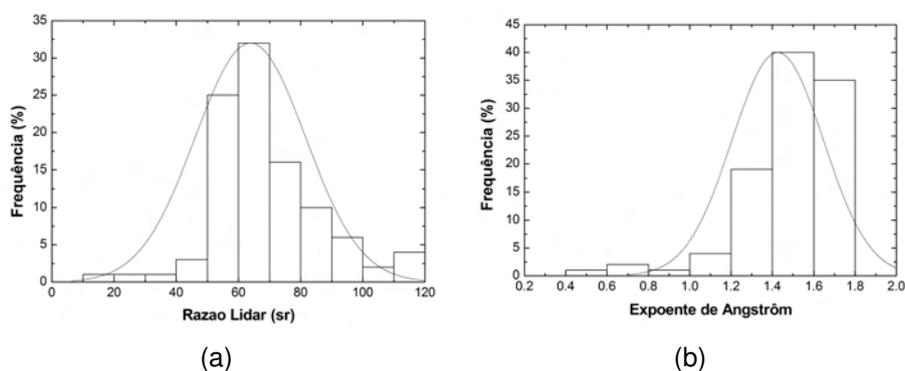


Figura 5.19 - Distribuição de freqüência da razão LIDAR em 532 nm e expoente de Ångstrom

Quando comparados os valores da distribuição de freqüência do expoente de Ångstrom, apesar da figura 5.19(b) mostrar um padrão semelhante ao apresentado pelos autores para queima de biomassa (entre 1.2-1.9 com pico em torno de 1.7), esses valores também são semelhantes à figura representativa de aerossóis urbano/industrial. Portanto analisando somente essa variável ficaria difícil de se concluir a origem dos aerossóis medidos em São Paulo.

A figura 5.21 mostra a EOA média para todos os dias entre julho-novembro, em

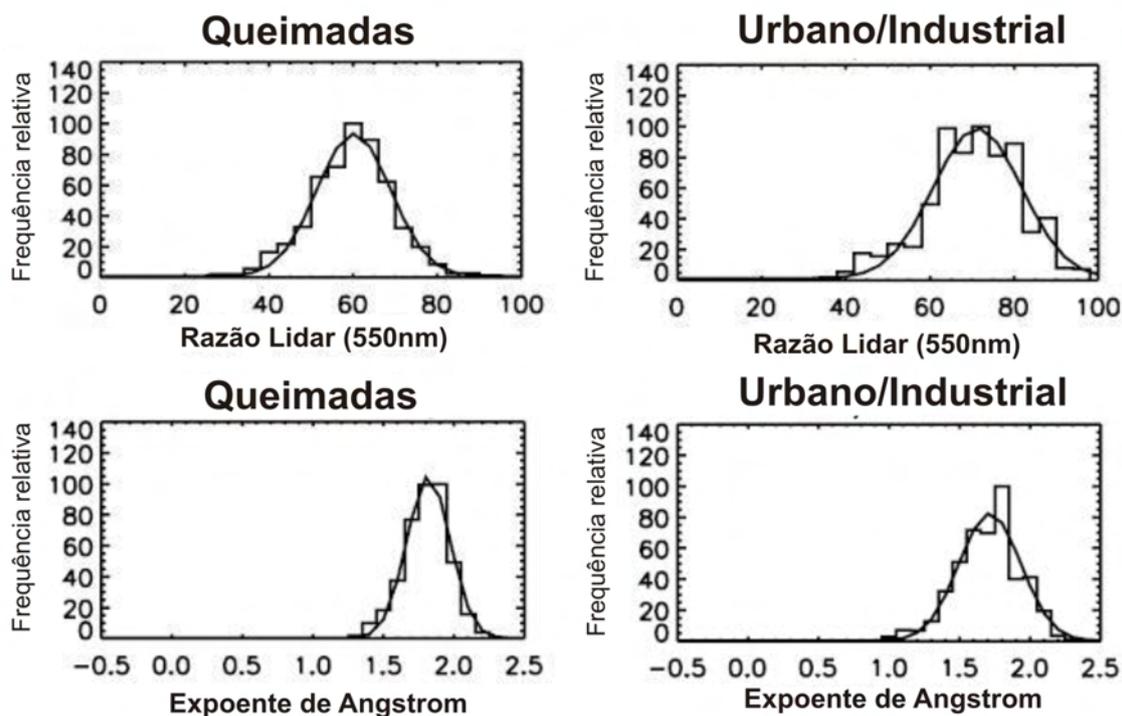


Figura 5.20 - Distribuição de frequência da razão LIDAR em 532 nm e expoente de Ângstrom.

Fonte: Adaptado de [Cattal et al. \(2005\)](#).

destaque os valores dos dias em que foram detectados queimadas de biomassa através do sistema LIDAR. Pela figura percebe-se que os dias com queimadas em São Paulo não se destacaram de outros dias que possuíram EOA média elevados. Uma possível explicação para isso é que a EOA da AERONET é um valor médio em toda a atmosfera. Dessa forma, casos com concentrações elevadas de poluentes dentro da camada limite, devido principalmente à poluição urbana, afetarão o resultado final. Percebe-se, portanto, que as entradas de queimadas não afetam tão diretamente a EOA média diária (figura 5.21) em São Paulo como nos valores de RL (tabela 5.1).

Na figura 5.22 são mostrados os valores de EOA horários para os dez casos apresentados (separados em dois grupos de cinco) em que foram detectadas queimadas pelo sistema LIDAR. Em alguns casos o valor de EOA chega próximo de 0,8 (ex. 09 de outubro). A média da EOA para todos os horários foi de  $0,36 \pm 0,15$ . Apesar do valor aparentemente baixo, o alto valor do desvio padrão indica

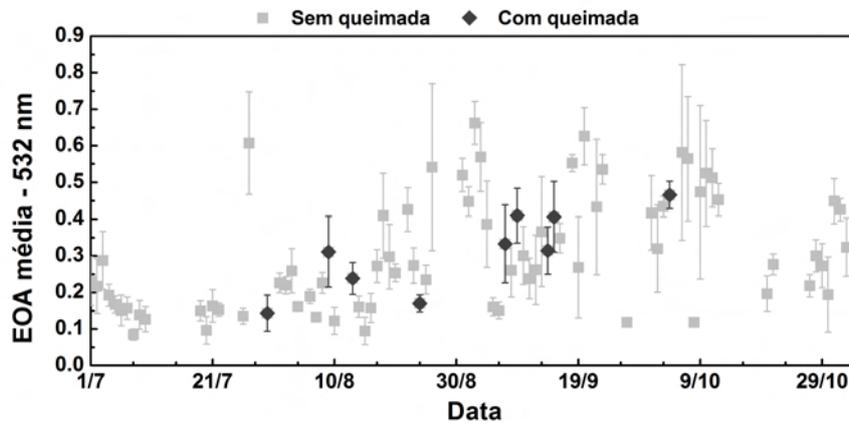


Figura 5.21 - EOA médio a partir dos dados da AERONET para São Paulo para os dias com (cinza) e sem (preto) queimadas de biomassa durante o período de estudo

a alta variabilidade desses dados, pois a presença de camadas de fumaça não é constante durante todo o dia. Dessa forma, com a presença de uma camada de fumaça, a EOA aumentará naquele período do dia. Esse aumento é percebido nos casos apresentados quando comparados o valor da EOA horária com a detecção pelo sistema LIDAR que por sua vez mostra que quando se detecta o material resultante da queima de biomassa nessas camadas o valor da EOA é aumentado. Alguns dos casos apresentados são semelhantes aos mostrados por Otero et al. (2004) quando detectaram a presença de queima de biomassa, que encontraram EOA em torno de 0,5 para Córdoba-Argentina.

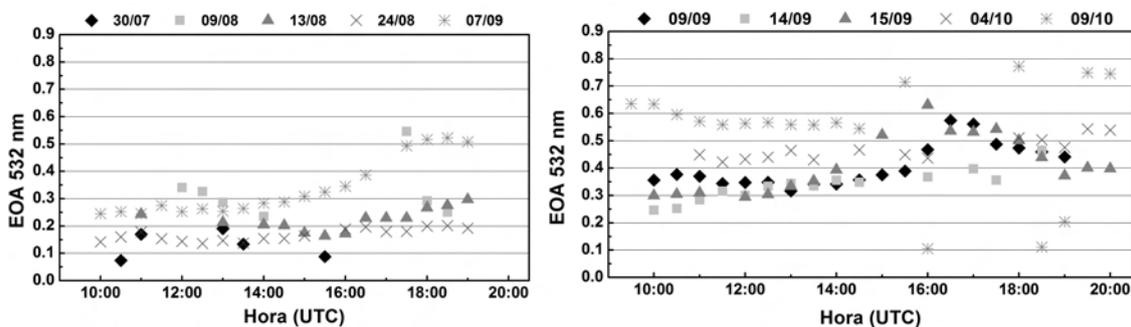


Figura 5.22 - EOA horária (532 nm) em São Paulo (dados oriundos da AERONET) para dias com queimadas de biomassa detectados pelo sistema LIDAR

Muitos estudos indicam que uma função lognormal bimodal é o modelo mais apropriado para distribuições de tamanho de partículas de aerossóis (ex.: [Remer e Kaufman \(1998\)](#), [Dubovik et al. \(2002\)](#), [Rodriguez e Rocha \(2008\)](#)). Semelhante ao fornecido na figura 5.23 que mostra a distribuição de tamanho dos aerossóis para todo o período medido com e sem detecção de queimadas (esquerda) e para um caso de estudo envolvendo dois dias com detecção de queimada e dois dias sem (direita). Nota-se que não existem diferenças relevantes na distribuição dos aerossóis entre os dias com e sem queimadas. Na figura 5.23 a esquerda pode-se perceber que os dias sem presença de queimadas de biomassa obtiveram uma distribuição de aerossóis maior em todas as faixas de comprimento de onda. Uma explicação plausível é a mesma comentada anteriormente, onde nos casos que a CLP demonstra estar bastante poluída ocorre com que a EOA, bem como a distribuição de tamanho de aerossóis, seja maior, diminuindo a importância das camadas dos casos onde existe a presença de aerossol de queima de biomassa sendo transportado para a cidade.

Esse fato pode ser corroborado analisando a figura 5.23 (direita), onde foram selecionados dois dias consecutivos com identificação de queimadas (14 e 15 de setembro) e sem detecção de queimadas (16 e 18 de setembro), porém com aerossóis dentro da CLP semelhante aos dias com queimadas analisados (confirmados através de detecção pelo sistema LIDAR). Ressalta-se que a não utilização do dia 17 de setembro ocorreu devido a não disponibilização dos dados pela AERONET. Percebe-se que, apesar do alto valor do desvio padrão em ambos os casos, os dias com a presença de queimadas de biomassa possuem uma distribuição de tamanho de aerossóis maior em todos os comprimentos de onda em comparação com os dias sem detecção, mostrando a significativa participação dos aerossóis de queimadas na atmosfera da cidade.

Análise de dados de estação meteorológica localizada próximo ao equipamento da AERONET (ambos situados dentro da Universidade de São Paulo) mostra que esse resultado para esse estudo de caso se estende para as temperatura média do ar, máxima e mínima (maior para os dias com queimadas e menor para os dias sem), além de para umidade (inverso), demonstrando que o transporte das queimadas para outras cidades podem afetar não somente a distribuição dos aerossóis, mas também alguns parâmetros meteorológicos em superfície. Porém o caso apresentado na figura 5.23 (direita) diverge do apresentado por [Otero et](#)

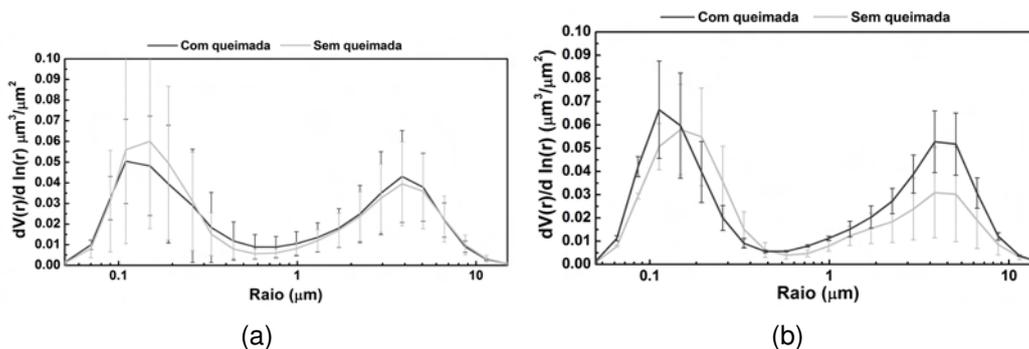


Figura 5.23 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para dias com (preto) e sem (cinza) queimadas de biomassa detectadas pelo sistema LIDAR. (a) Período de estudo completo; (b) 14 e 15 de Setembro (com queimada) e 16 e 18 de Setembro (sem queimada)

al. (2004) para um caso onde foi detectado queima de biomassa na Argentina. Os autores mostram um pico na moda fina, enquanto que no caso apresentado neste trabalho temos variação tanto na moda fina quanto na grossa, sem a presença de picos. Possivelmente o leve aumento na moda fina estaria relacionado com a entrada de plumas originadas de queimadas de biomassa enquanto que o aumento na moda grossa esteja relacionado a partículas próximas a superfície originadas localmente. Dessa forma, percebe-se que não se encontra diferenças significativas de qualquer tipo.

A figura 5.24 mostra o expoente de Ångström em função da EOA para os casos previamente selecionados em São Paulo (cinza claro) e período completo (cinza escuro). Apesar dos baixos valores de EOA apresentados, sendo todos abaixo de 1,0, os valores de expoente de Ångström indicam um pequeno tamanho de partículas, semelhantes aos encontrados durante queima de biomassa, como apresentado por Kaskaoutis et al. (2007), para Alta Floresta, Brasil, durante o período de queimadas. Porém o gráfico indica que apesar da presença de material resultante da queima de biomassa em São Paulo, esse material não altera significativamente o padrão do particulado na cidade, pois em ambos os casos analisados o expoente de Ångström indica partículas pequenas afetando levemente a espessura óptica de São Paulo.

Nas próximas seções serão detalhados dois casos onde detectou-se queimadas de biomassa com o sistema LIDAR em São Paulo, nos dias 24/08 e 07/09

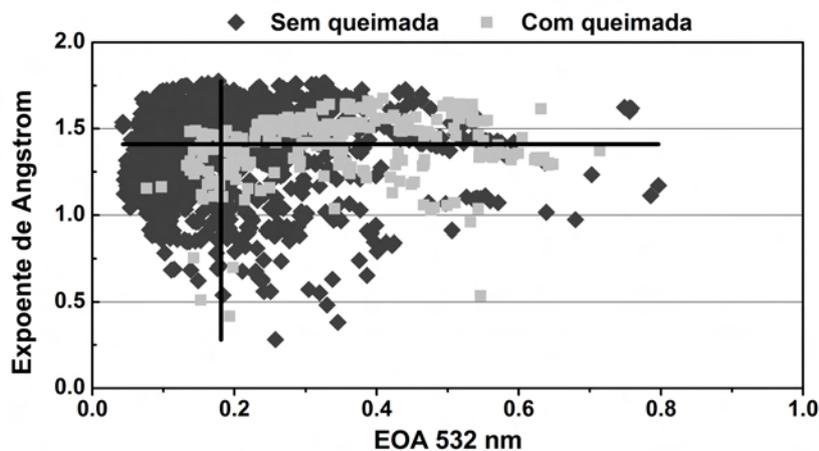


Figura 5.24 - Relação entre expoente de Ångstrom e EOA para dez casos selecionados e para o período completo do estudo

de 2007, enquanto que os outros dias, analisados na seção anterior, estarão disponíveis no anexo A.1. Da maneira descrita a seguir é possível observar em cada imagem do sistema LIDAR juntamente com os outros itens mostrados na figura e acima descritos a camada de aerossóis que foi confirmada (através de imagens MODIS, retro trajetórias juntamente com focos de queimadas) como sendo oriunda de queima de biomassa.

### 5.3.2.1 Análise de caso - Dia 24 de agosto de 2007

No final de agosto de 2007 a situação sinótica da região foi caracterizada pela persistência de uma massa de ar quente sobre a região do Brasil central ocasionando valores de baixa umidade relativa do ar e temperaturas máximas altas. A permanência dessa massa de ar quente foi resultado principalmente das extensas áreas de anomalias positivas de Radiação de Ondas Longas (ROL) que estava associada ao anticiclone no Atlântico Sul, sendo um fator importante para a quantidade de queimadas registradas durante o mês (40.000 focos de queimadas), 460% superior ao registrado ao mês anterior e 56% maior em relação à Agosto de 2006 (CLIMANÁLISE, 2007b).

O expoente de Ångstrom junto com razão LIDAR é mostrado na figura 5.25. Pode-se perceber a diminuição dos valores de expoente de Ångstrom e RL alcançando o mínimo em torno de 12:00 hora local para EA enquanto RL alcança seu mínimo em torno de 15:00. Percebe-se que durante o período onde se de-

tectou queimada de biomassa sobre o sistema LIDAR os maiores valores de EA são durante o dia. A análise da EOA mostra que durante o período afetado pela queimada o pico foi de 0,18, relativamente baixo, os maiores valores durante o dia analisado ocorreram devido a alta concentração de aerossóis dentro da CLP em torno de 16:00 hora local. A distribuição média de tamanho dos aerossóis ao longo do dia entretanto, indica que existe maior quantidade (figura 5.26) na fração grossa se comparado com a fração fina.

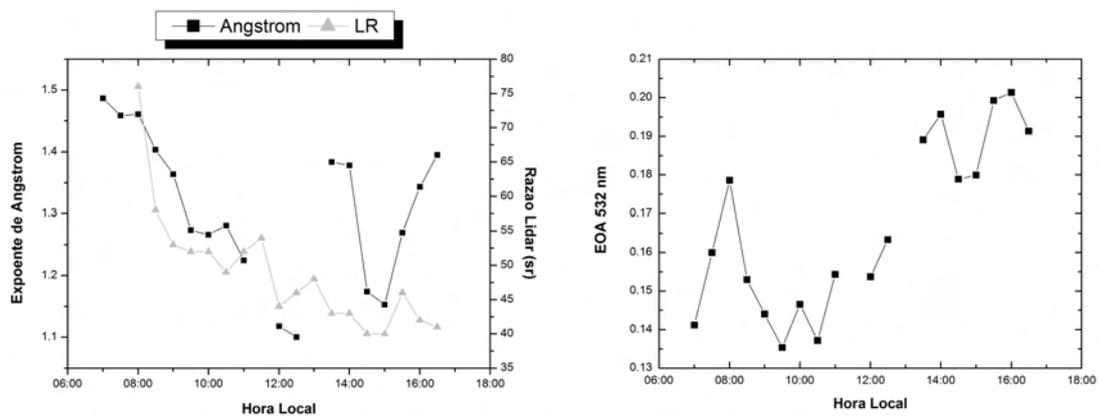


Figura 5.25 - Expoente de Ångstrom, Razão LIDAR e EOA 532 nm a partir de dados da AERONET em 24 agosto de 2007

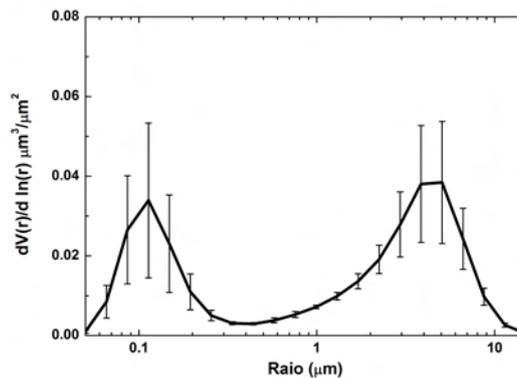


Figura 5.26 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 24 de agosto de 2007

Nas próximas figuras é possível observar: a imagem obtida pelo sistema LIDAR

na figura 5.27; o perfil do coeficiente de retroespalhamento obtido através do sistema LIDAR, figura 5.28; os focos de queimadas detectados pelo satélite NOAA-12 na sua passagem ascendente obtidos através da página de queimadas do CPTEC/INPE juntamente com a trajetória reversa obtida pelo modelo HYSPLIT a partir de 16Z (13:00 hora local) e a 5 km de altura, pois foi nessa camada onde detectou-se possíveis aerossóis originários de queimadas, figura 5.29; coeficiente de retroespalhamento médio ao longo do dia de medidas obtidos pelo sistema LIDAR junto com dados da AERONET, figura 5.30 e radiosondagem do aeroporto Campo de Marte (distante cerca de 10 km do sistema LIDAR e da AERONET) para o dia em questão às 12Z na figura 5.31.

Detalhando cada figura acima mencionada é possível perceber na figura 5.27 diversas informações oriundas das imagens LIDAR, como crescimento da camada limite planetária, camada residual ao longo do dia, concentração (inferida) de aerossóis presos na CLP, base de nuvens, nuvens cirrus, além da entrada de material particulado na atmosfera livre. Na referida figura percebe-se o crescimento da CLP desde o início de medições dos dados alcançando seu máximo em torno de 15h (pode-se perceber através da cor verde na imagem). Já a camada residual pode ser percebida por volta de 2,3 km através de uma leve variação no sinal de intensidade do LIDAR (partindo da cor azul claro para mais escura). Sobre coeficiente de retroespalhamento percebe-se picos de intensidade mostrados em vermelho e amarelo; ressalta-se novamente que o valor da intensidade do sinal LIDAR variou conforme o dia para ressaltar alguns aspectos. A presença de nuvens pode ser percebida no dia em questão um pouco após as 15h, através do sinal de intensidade mostrado em vermelho bem como a atenuação do sinal LIDAR (percebido através da faixa preta após o contato do feixe de luz com a nuvem). A presença de material particulado na atmosfera livre é facilmente identificada na imagem LIDAR juntamente com o perfil de retroespalhamento em várias camadas entre 5 e 9 km.

Na figura 5.28 é possível analisar os valores do coeficiente de retroespalhamento para o dia estudado. Nota-se que a figura foi dividida em duas escalas, da superfície até 2 km e de 2 a 7 km. Essa divisão foi feita para observar melhor tanto os valores de beta dentro da camada limite planetária, bem como os valores de beta na atmosfera livre. Pela análise do gráfico percebe-se que a CLP alcança o máximo em torno de 1,7 km de altura (com um coeficiente de retroespalhamento

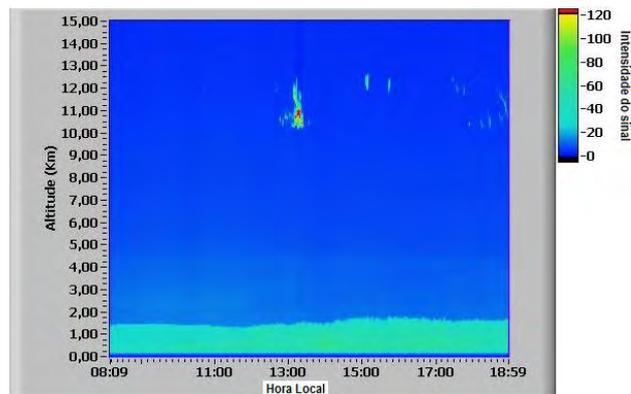


Figura 5.27 - Imagem do sistema LIDAR corrigida pela altura para o dia 24 de agosto de 2007

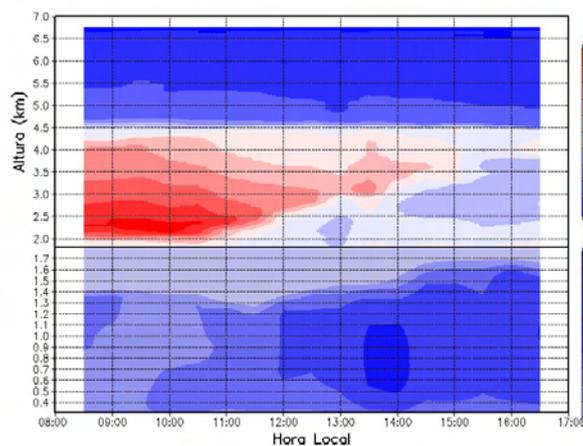


Figura 5.28 - Perfil de coeficiente de retroespalhamento para o dia 24 de agosto de 2007

máximo de cerca de 0,008) e que entre 2 - 4 km existe uma camada com altos valores (se analisado somente acima da camada limite) de beta com pico em torno de 0,0003. No item (c) conclui-se que essa camada de aerossóis que afetaram os valores de beta é devido a queimadas de biomassa oriundas sobretudo da região do Brasil central e norte da Argentina.

Através da figura 5.29 pode-se perceber que a trajetória da massa de ar passa sobre regiões com focos de queimadas no mesmo dia, principalmente sobre a região central do Brasil e norte da Argentina bem como no interior de alguns estados da região sudeste, possivelmente devido à queima da cana-de-açúcar, devido à grande quantidade dessa cultura no estado, como já discutido anterior-

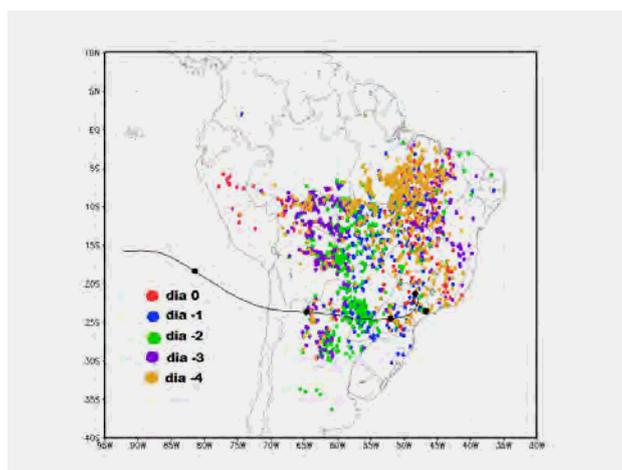


Figura 5.29 - Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 16Z em 5km de altura para o dia 24 de agosto de 2007

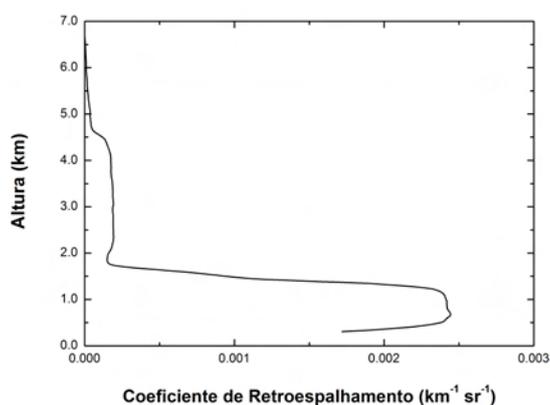


Figura 5.30 - Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia 24 de agosto de 2007

mente. Durante os 5 dias analisados foram detectados aproximadamente 7 mil focos de queimadas sobre a região.

Pode-se observar claramente na figura 5.30 a altura e extensão da camada de aerossóis provenientes de queimadas onde encontra-se em uma camada entre 2 - 5 km durante todo o dia medido.

Dados de radiosonda para o dia 24 de agosto de 2007 às 09:00 hora local oriundas do Aeroporto Campo de Marte (aproximadamente 10 km do sistema LIDAR) são mostrados na figura 5.31. É possível observar que em torno de 3 km de

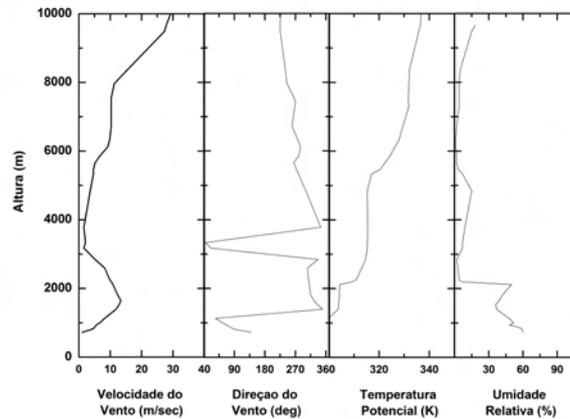


Figura 5.31 - Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 24 de agosto de 2007

altura existe uma camada bastante seca com valores de umidade relativa próximos a 5%, enquanto pela direção do vento observa-se uma advecção oriunda de norte exatamente nessa camada. A distribuição vertical da temperatura potencial indica estratificação aproximadamente estável na altura entre 2 - 5 km enquanto o perfil da velocidade do vento mostra, em geral, velocidade do vento baixa (1,5 m/s em 3 km) com um pico em torno de 10 m/s perto de 2 km de altura. Esses fatos suportam a existência de uma camada de aerossóis homogênea e seca entre 2 - 5 km similar aos encontrados por [Balis et al. \(2003\)](#) durante um episódio de queima de biomassa detectado sobre Thessaloniki, Grécia. O perfil de temperatura potencial também indica uma clara inversão em 2,2 km que coincide com os valores de máxima umidade relativa observada e portanto a chegada de massas de ar com diferentes origens acima e abaixo dessa inversão, sobretudo juntamente com valores de direção do vento acima dessa camada.

### 5.3.2.2 Análise de caso - Dia 07 de setembro de 2007

O período que compreendeu o dia em análise foi marcado pela predominância de uma intensa circulação anticiclônica na baixa troposfera que contribuiu para a diminuição da precipitação e da umidade relativa do ar na maior parte do Brasil ([CLIMANÁLISE, 2007c](#)). O grupo de queimadas do INPE detectou cerca de 63 mil focos de queimadas pelo satélite NOAA-15 (a partir desse mês já não estavam disponíveis dados do satélite NOAA-12) número 50% superior ao observado no mês anterior mas ainda considerado típico para o período, visto que ocorreu uma

persistência atípica do período seco nas Regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil aumentando, portanto, em 70% em relação ao ano anterior.

Pode-se perceber na figura 5.32 que o expoente de Ångström calculado para este dia foi sempre maior que 1,5, portanto sendo relacionado a partículas pequenas, como oriundas potencialmente de queima de biomassa. A razão LIDAR mostrou valores mais altos durante a parte da manhã, possivelmente devido a entrada da pluma de queimada. Entretanto, pela análise da espessura óptica em 532 nm não se nota valores elevados pela manhã (menores que 0,3), sendo que os maiores valores durante o dia analisado ocorreu devido a alta concentração de aerossóis dentro da CLP em torno de 16h.

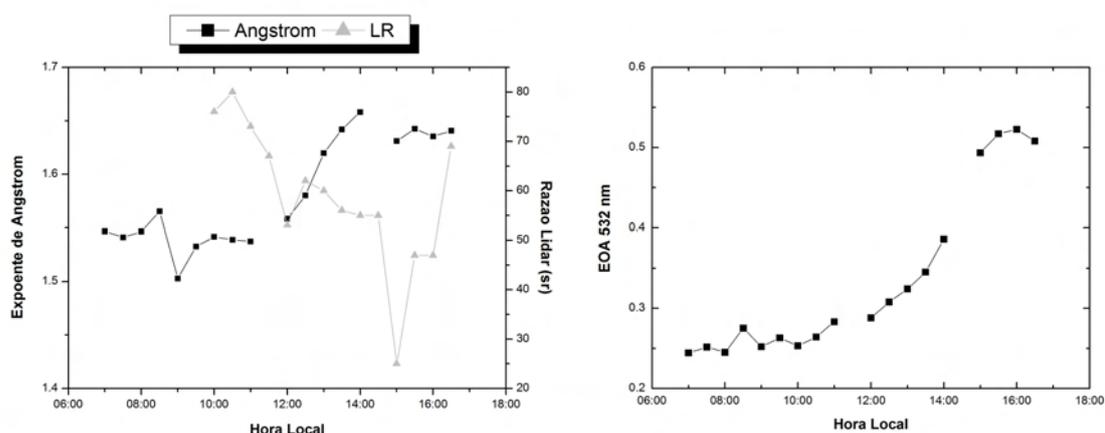


Figura 5.32 - Expoente de Ångström, Razão LIDAR e EOA 532 nm a partir de dados da AERONET em 07 de setembro de 2007

Na análise da figura 5.33 percebe-se que para esse caso, ao contrário do apresentado para o dia 24 de agosto de 2007, existe maior quantidade de aerossóis de fração fina em relação à fração grossa (aproximadamente o dobro), possivelmente devido a entrada das plumas de queimadas na atmosfera livre.

As figuras seguintes são análogas às analisadas no tópico anterior. É possível observar duas finas camadas de aerossóis em torno de 5 e 6 km de altura através da figura 5.34 ao longo de praticamente todo o período de dados medido para o dia 07 de setembro de 2007. Na mesma figura observa-se o crescimento da camada limite atmosférica ao longo do dia com a presença de, pelo menos, duas camadas de nuvens (em torno de 12:00 e 15:00), quando se observa quase a

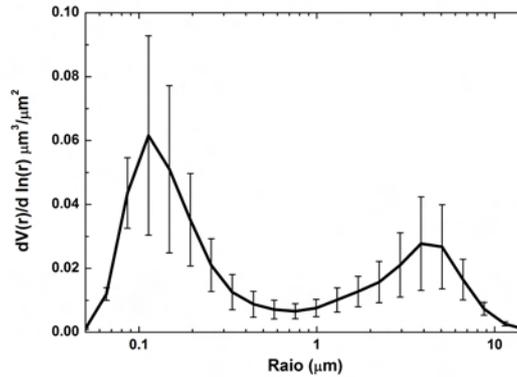


Figura 5.33 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 07 de setembro de 2007

extinção do sinal LIDAR emitido para a atmosfera no topo da camada limite (em torno de 2 km de altura).

A presença dessa camada de aerossóis, possivelmente originária de queimadas, é mais facilmente observada através da figura 5.35, onde é mostrado o coeficiente de retroespalhamento obtido através dos dados LIDAR juntamente com os fornecidos pela AERONET conforme anteriormente mencionado. A mesma é mostrada em tonalidade de vermelho com duas camadas em torno de 5,2 km e uma acima em 5,8 - 6,0 km de altura. Ressalta-se que para esse caso apresentado, bem como o anterior (24 de agosto de 2007) ambos os coeficientes de retroespalhamento possuem a mesma escala acima da camada limite. Portanto, nesse dia, a presença dessa camada de aerossóis obteve a mesma intensidade do dia anteriormente analisado, porém ao longo de todo o dia. Dessa maneira, durante todo o dia analisado foi percebido influência de queimadas.

A possível origem da camada de aerossóis é obtida ao analisar a figura 5.36, pois a trajetória da massa de ar originária em 6 km de altura às 12:00 hora local mostra que a mesma pode ter sido afetada pelos focos de queimadas apresentados no mesmo item, sobretudo na região do Brasil central.

A figura 5.37 mostra o coeficiente de retroespalhamento médio ao longo do dia, onde observa-se um aumento nas mesmas altitudes apresentadas na figura 5.35. Apesar de estarem mostrados em escalas diferentes, se comparado a figura 5.37 com 5.30 observa-se que os valores apresentados no dia 07 de setembro para essa camada são maiores que os apresentados no dia 24 de

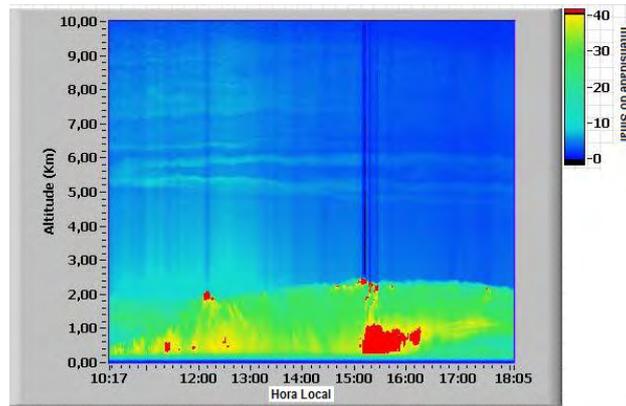


Figura 5.34 - Imagem do sistema LIDAR corrigida pela altura para o dia 07 de setembro de 2007

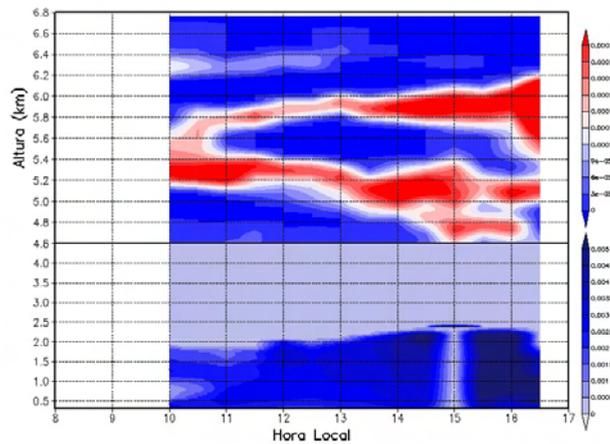


Figura 5.35 - Perfil de coeficiente de retroespalhamento para o dia 07 de setembro de 2007

agosto de 2007 (em torno de 0,001 e 0,0005 respectivamente).

Os dados de radiosondagem mostrados na figura 5.38 mostram situação um pouco diferente da discutida para o dia 24 de agosto. Observa-se na camada onde se encontrou aerossóis uma condição de estabilidade atmosférica moderada ao se analisar a temperatura potencial, além da direção do vento ser praticamente constante. Porém, ao se analisar a umidade relativa percebe-se que a camada em questão é praticamente seca, semelhante à apresentada para o dia 24 de agosto.

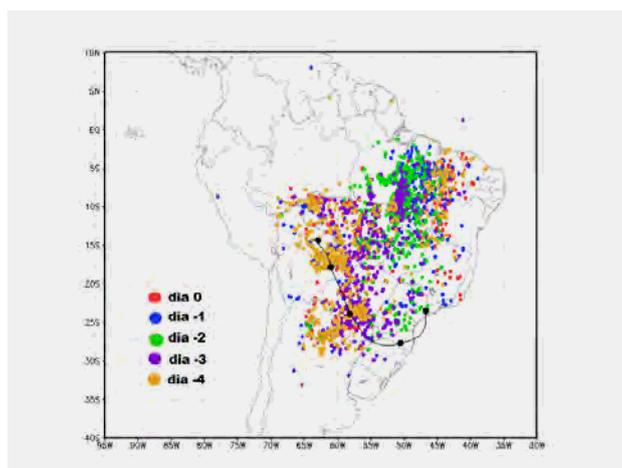


Figura 5.36 - Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 6km de altura para o dia 07 de setembro de 2007

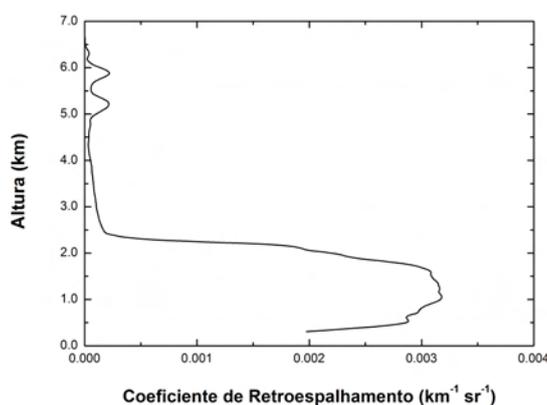


Figura 5.37 - Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia 07 de setembro de 2007

### 5.3.2.3 Conclusões

Neste tópico foram selecionados dez casos entre julho-outubro de 2007 onde foram detectadas camadas com material particulado pelo sistema LIDAR instalado em São Paulo. Simulações de trajetória por modelagem mostraram que a cada cinco dias a partir das medidas pelo LIDAR, massas de ar foram advec-tadas a partir de regiões na América do Sul com intensa atividade de queima de biomassa. A sinergia das medidas de LIDAR, sunfotômetro, imagens MODIS e modelagem permitiu ter a confirmação e estimar algumas características ópticas dos aerossóis observados durante estes eventos.

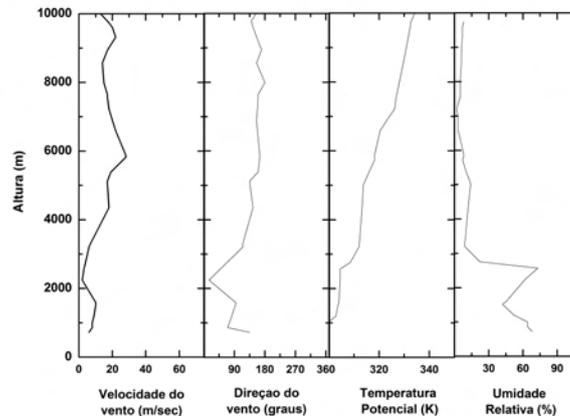


Figura 5.38 - Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 07 de setembro de 2007

Através de retro-trajetórias de cinco dias das massas de ar juntamente com focos de queimadas (e em alguns casos imagens MODIS) comprovou-se a origem desse material para os dez casos selecionados através de medidas de LIDAR em São Paulo, sendo resultante de queima de biomassa. Identificou-se as principais regiões de onde se advecta massas de ar com material de queimadas para a cidade de São Paulo: sul da Bacia Amazônica, norte da Argentina e interior do estado de São Paulo.

A EOA média variou entre 0.13 - 0.56 (coluna integrada), enquanto que RL e Ångstrom variaram entre 44 - 74 sr e 1.02 - 1.70, respectivamente para os dias onde se detectou entradas de plumas provenientes de queimadas, que é bastante similar ao encontrado em casos de queimadas de biomassa por [Amiridis et al. \(2009\)](#). A análise de distribuição de frequência para Razão LIDAR e Expoente de Ångstrom corroborou com a possibilidade do material resultante ser oriundo de queima de biomassa pela comparação com [Cattal et al. \(2005\)](#) ao invés de ser originário de poluição urbana, o esperado pelo fato do sistema estar instalado em uma grande metrópole. A frequência máxima para Razão LIDAR e Expoente de Ångstrom fora, respectivamente 60 sr e 1,7.

A análise da EOA durante todo o período estudado (Julho-Outubro) mostrou que a entrada dessas plumas de queimadas não afeta significativamente a EOA média diária na cidade de São Paulo quando comparam-se os dias com e sem presença de queimadas. Porém, pela análise horária da EOA juntamente com o

sistema LIDAR é possível perceber o momento de entrada das plumas conforme indicado pelo sistema LIDAR instalado. A distribuição de tamanhos de aerossóis também mostrou pouca variação quando se analisado os dias com e sem entrada de plumas de queimadas na cidade, sendo mais importante para essa variável a distribuição dos particulados dentro da CLP se comparado com a atmosfera livre.

Vale ressaltar que uma grande importância na detecção dessas plumas de queimadas é que apesar de impactar relativamente pouco na EOA bem como EA, é possível perceber essas entradas em valores de RL. Dessa forma, à alta poluição urbana da cidade de São Paulo soma-se à poluição originária de queimadas de diversas regiões da América do Sul, além de desempenhar um papel importante no balanço de aerossóis sobre esta região.

## 5.4 Análise de dados de Rio Claro-SP

### 5.4.1 Aspectos Sinóticos durante campanha com o sistema Lidar móvel em Rio Claro - SP

Na figura 5.39 pode-se observar a pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação para o período de 01 de junho até 30 de setembro de 2009. Os valores médios e desvios padrão para essas variáveis durante esse período foram respectivamente:  $947,5 \pm 2,2$  hPa,  $20,2 \pm 3,1$  %,  $72,0 \pm 12,0$  °C.

Uma leve tendência de aumento nos valores de temperatura do ar é notada ao longo do período destacado. Para os valores de pressão atmosférica e umidade relativa do ar, como era esperado, notou-se uma relação com a passagem de sistemas frontais que ocasionavam um aumento na pressão atmosférica e diminuição da umidade relativa e temperatura do ar.

Nesse tópico não se irá propor o mesmo método de análise que o tópico 5.3.1 onde foram analisadas as condições atmosféricas das ocasiões com a presença de queimadas mostradas pelo sistema Lidar instalado em São Paulo-SP. Pois, para aquela cidade, era interessante saber-se em que condições atmosféricas ocorreria essa detecção, já que as mesmas influenciavam mais diretamente o transporte em meso e grande escala. Para a análise em Rio Claro-SP isto não é tão importante, já que o material detectado pelo sistema Lidar móvel é basicamente oriundo de queimadas de cana-de-açúcar no entorno da cidade.

Os fazendeiros queimam essa cultura sobretudo no final da tarde e/ou começo da noite devido a proibição da CETESB (órgão ambiental do estado de São Paulo) de permitir essa prática com baixos valores de umidade relativa do ar que ocorrem normalmente nesse período durante o dia. Portanto, a quase totalidade das detecções de queimadas pelo Lidar ocorreram no final da tarde e no decorrer da noite, quando a temperatura do ar se apresentava baixa e umidade relativa do ar se encontrava mais alta do que o período diurno.

A ocorrência de nebulosidade bem como precipitação não era esperada nesse período do ano como pode ser observado na figura 5.40. Percebe-se, através da figura, que apesar de no mês de junho ser observado um acumulado mensal abaixo da média histórica (40,8 mm para o período de 1994-2008 e 28,7 mm

para 2009), os meses de agosto e setembro tiveram precipitação bem acima do esperado (29,7 mm x 42,9 mm e 27,6 mm x 85,0 mm, respectivamente).

Pode-se notar também altos valores de precipitação acumulada durante um dia a partir do dia 18 de agosto. Destaca-se o dia 09 de setembro com uma precipitação acumulada diária de aproximadamente 63 mm. A precipitação acumulada para todo o período de campanha de coleta de dados em Rio Claro-SP foi de 288 mm, enquanto que a média histórica foi de aproximadamente 157 mm  $\pm$  14 mm. Portanto, no ano de 2009 foi registrado um aumento de aproximadamente 85% na precipitação acumulada durante o período destacado. Esse aumento de precipitação e conseqüentemente de nebulosidade contribuiu para um menor registro de medidas utilizando Lidar durante a campanha, pois a presença de nebulosidade, sobretudo em baixa altitude, afeta a qualidade do sinal medido.

Apesar do período de estudo possuir precipitação maior que a média entre 1994-2008, constatou-se uma continuação da tendência de diminuição do valor acumulado de precipitação durante o ano iniciada a partir de 2004; este ano possuiu valor acumulado anual de 1743 mm, enquanto 2009 teve valor de aproximadamente 982 mm, sendo constatada uma redução de aproximadamente 44% nesses últimos 6 anos. Esse aumento no valor acumulado de precipitação pode ter sido causado pela influência de fenômenos como o El Niño, que estava se iniciando nesse período.

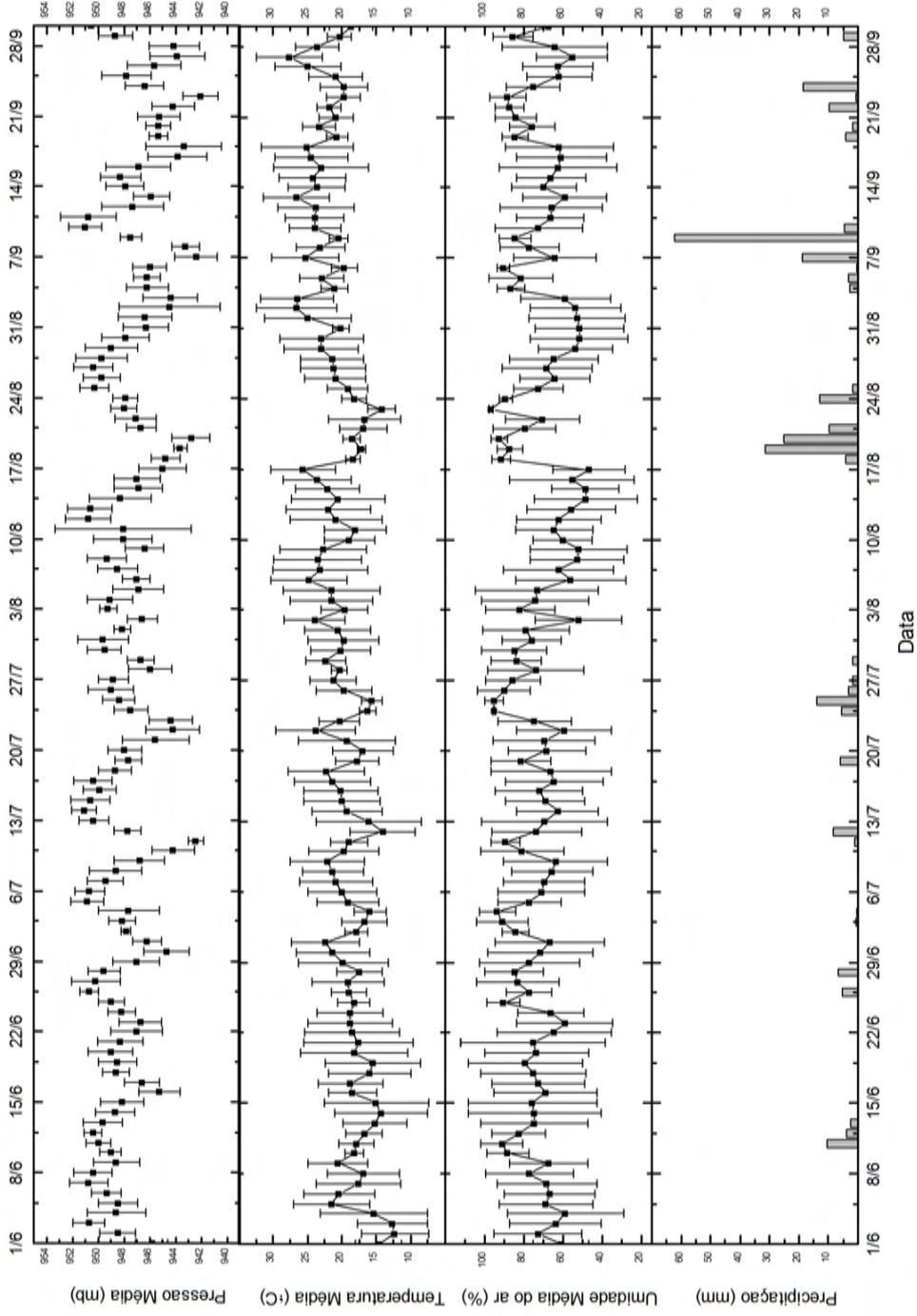


Figura 5.39 - Pressão atmosférica, temperatura do ar, umidade do ar médias e precipitação durante o período da campanha de coleta de dados em Rio Claro-SP

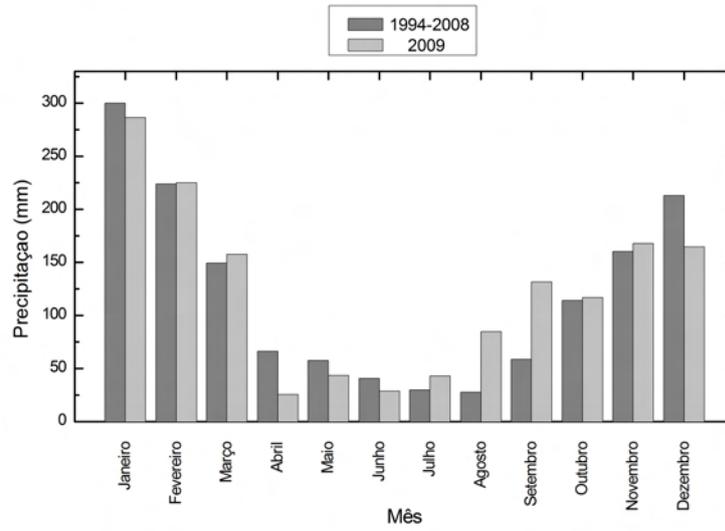


Figura 5.40 - Precipitação (mm) média durante os anos de 1994-2008 e somatório em 2009

#### **5.4.2 Medidas de queimadas de biomassa através de um sistema Lidar móvel em Rio Claro-SP**

Sobre todo o período da campanha de coleta de dados (julho-setembro) foram observados 39% de dias com detecção de nuvens cirrus e cerca de 25% com nuvens baixas ou médias e acima de 50% com a detecção de queimadas pelo sistema Lidar. Entretanto, apenas foram analisados os dias em que ambos os sistemas (Lidar e analisadores de gases/particulados) estavam funcionando simultaneamente.

O sistema Lidar ficou em operação em média 7 horas por dia durante o período entre 15 de junho e 15 de setembro de 2009. Ao analisar-se somente os dados do Lidar foram detectadas plumas de queimadas em cerca de 86% dos dias medidos, correspondendo a 31 do total de 37 dias durante o período.

Pode-se observar na tabela 5.4 um total de 20 dias que fizeram parte da campanha de coleta de dados em Rio Claro-SP onde foi observada presença através do sistema Lidar de material particulado quando os sistemas de medição de gases/particulados também estavam ativados. É importante ressaltar que os valores de gases mostrados na tabela e do espalhamento medido pelo nefelômetro foram os máximos medidos entre 12:00 do respectivo dia até 06:00 do dia seguinte, pois grande parte das medidas com Lidar ocorreu também durante a madrugada.

A altura da detecção das plumas variaram entre 0,18 km (mínima altura detectada pelo Lidar móvel) até 3,00 km. Entretanto, como era esperado, nos casos onde as plumas de queimadas estavam situadas em alturas mais elevadas os valores de concentração dos gases medidos não possuíram boa correlação com os dados medidos pelo Lidar. Enquanto observou-se que quando o Lidar indicava material de queimada próximo à superfície os sistemas de medição de gases indicaram altos valores para os mesmos em grande parte dos casos.

Tabela 5.4 - Dias com detecção de queimadas pelo sistema Lidar móvel em Rio Claro-SP, altura máxima e mínima das plumas (km), e máximos valores dos gases (ppb), particulado (ppb) e espalhamento ( $Sr^{-1}$ ) medidos durante o dia

Data	Altura máx e mín.	Máx. CO	Máx. NO	Máx. NO <sub>2</sub>	Máx. NO <sub>x</sub>	Máx. SO <sub>2</sub>	Máx. PM10	Máx. Espalhamento
06/07	0,18-2,20	2930,20	13,39	22,81	34,35	8,79	0,21	112,52
07/07	0,40-1,60	3605,40	25,79	24,75	44,94	8,25	0,26	158,50
09/07	0,18-2,60	2991,50	9,04	28,20	33,70	9,04	0,32	353,18
13/07	0,18-1,50	3465,80	8,60	38,32	45,11	8,66	0,16	140,25
14/07	0,15-1,60	3064,70	14,16	35,81	46,13	12,82	0,41	162,05
15/07	0,15-1,60	4083,40	13,25	55,48	62,79	13,86	0,48	1199,90
16/07	0,15-1,60	3039,20	7,16	18,34	22,31	8,30	0,61	356,33
20/07	0,13-0,60	2990,70	17,09	43,27	53,67	12,74	0,16	103,62
21/07	0,13-1,70	4316,40	10,45	35,51	43,24	8,45	0,28	666,63
22/07	0,15-2,80	3386,20	5,23	39,96	45,12	9,22	0,37	192,18
29/07	0,22-1,50	3494,00	46,93	19,95	58,07	9,26	0,17	156,56
31/07	0,25-0,85	3845,40	14,22	29,51	34,81	9,88	0,22	105,67
03/08	0,15-1,60	3989,10	49,71	36,72	68,66	8,68	0,40	337,23
04/08	0,15-3,00	3532,80	15,41	36,12	47,13	10,34	0,46	219,33
09/08	0,15-2,60	4952,00	9,41	20,80	25,13	10,08	0,40	113,78
02/09	0,15-0,90	3259,30	13,65	31,48	40,63	8,95	0,44	152,42
07/09	0,15-3,00	3359,40	3,39	31,68	34,43	34,43	-	126,13
15/09	0,15-1,00	3251,40	8,91	38,56	46,19	10,53	-	160,91
16/09	0,20-0,60	3391,60	13,82	42,41	48,33	10,45	-	255,03
17/09	0,20-0,55	3622,30	51,87	532,17	532,78	11,00	-	251,67

#### 5.4.2.1 Análise de caso - Dia 06 de julho de 2009

Nas figuras apresentadas nesse item pode-se observar diversas informações obtidas pelo sistema Lidar e pelo SODAR para o dia em análise: coeficiente de retroespalhamento integrado durante todo o período de medidas nesse dia 5.41, integrado entre 20:30 até o final do dia (23:10) 5.42, valores por minuto do coeficiente de retroespalhamento entre 20:30 e 20:37 5.43, ao longo do dia 5.44, direção 5.45 e velocidade do vento 5.46 medidos pelo SODAR.

Através da figura 5.41 pode-se observar que o maior valor do coeficiente de retroespalhamento se encontra próximo a superfície. Esse resultado já era esperado devido à influência que a Camada Limite Atmosférica exerce nessa variável, com a presença de maior quantidade de aerossóis e umidade na mesma. É interessante notar as variações no perfil esperado do coeficiente de retroespalhamento em torno de 1,50 km, 2,00 km, 2,50 km, e 4,50 km de altura. Para analisar essas influências deve-se comparar com a figura 5.44. Através dessa figura percebe-se a presença de uma camada de aerossóis próximo de 1,50 km em torno de 18:00 (hora local) que se estendeu, variando de intensidade, até o final do dia. As camadas de 2,00 e 2,50 km podem ser percebidas nessa figura desde o início das medidas, sendo na verdade a mesma pluma, variando somente sua altura ao longo do dia. Já a influência em 4,50km foi devido a ocorrência de plumas ou possivelmente nuvens vindo de regiões mais distantes.

As plumas podem ser observadas em alturas variadas, desde a superfície até 2,20 km. Como era esperado para a plumas mais próxima à superfície, depois de 20:30 foi observado um sinal de Lidar maior, provavelmente devido a maior concentração de material particulado.

Uma análise mais detalhada da influência de algumas plumas detectadas pelo lidar pode ser observada nas figuras 5.42 e 5.43. Na primeira dessas figuras é possível observar a variação no perfil de retroespalhamento em outras camadas (próximo a 1,00 km de altura), bem como a camada com maior valor (em torno de 0,50 km) que estão diretamente correlacionadas com a quantidade de aerossóis presentes na atmosfera detectadas pelo Lidar. Ao analisar-se os valores brutos na figura 5.42 pode-se observar valores maiores que os mostrados na figura 5.41, pois foi selecionado um período com maior quantidade de aerossóis se comparado com todo o período medido.

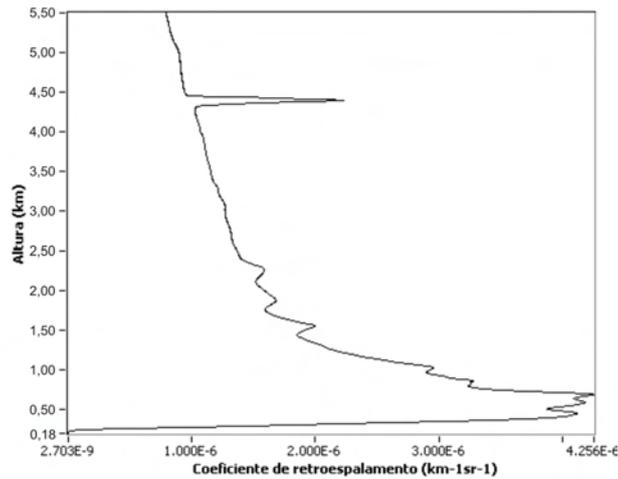


Figura 5.41 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 06 de julho de 2009

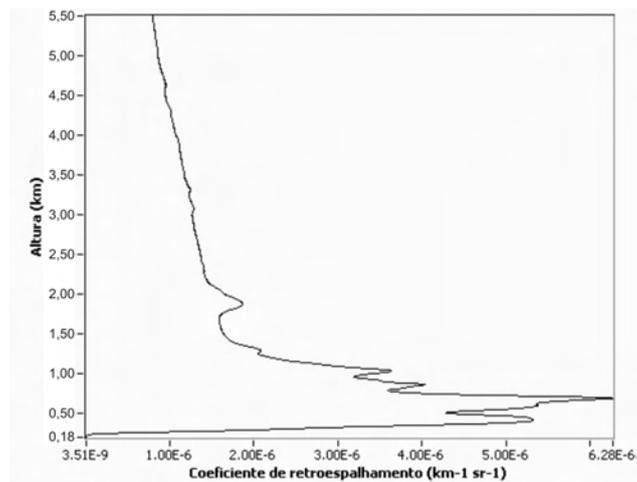


Figura 5.42 - Perfil de retroespalhamento integrado entre 20:30 até o final do dia 06 de julho de 2009

A figura 5.43 mostra a variação por minuto do perfil de retroespalhamento entre 20:30 e 20:37. Observa-se que, para esse dia analisado, o perfil varia a cada minuto de intensidade, sendo o máximo em 20:33. Porém é facilmente observado que mesmo variando de intensidade a camada de pluma é bastante compacta em relação a altura com aproximadamente 200 m de espessura.

Os gráficos 5.45 e 5.46 referem-se à direção e velocidade do vento medido pelo SODAR durante o dia. Pode-se observar que durante o período onde foi observado material particulado próximo a superfície a direção do vento se encontrava

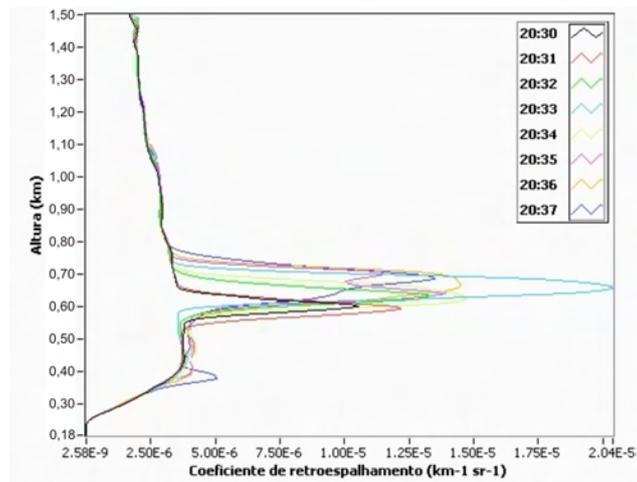


Figura 5.43 - Perfil de retroespalhamento integrado entre 20:30 e 20:36 do dia 06 de julho de 2009

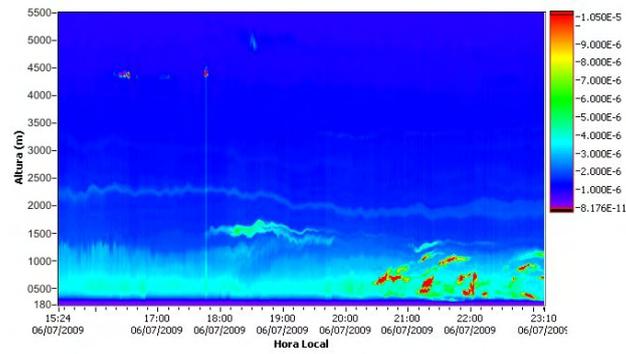


Figura 5.44 - Medidas do coeficiente de retroespalhamento para o dia 06 de julho de 2009

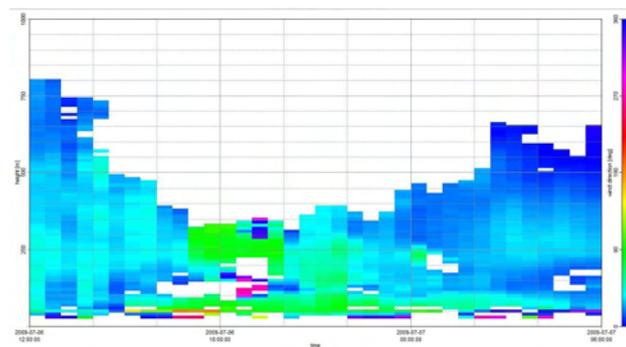


Figura 5.45 - Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 06 de julho de 2009

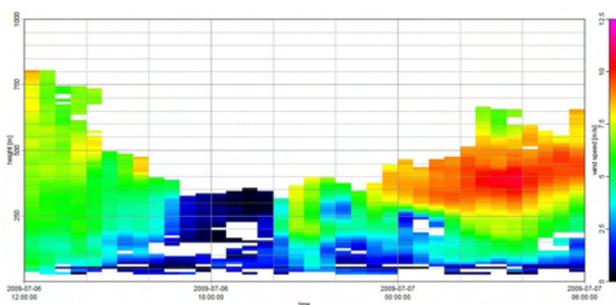


Figura 5.46 - Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 06 de julho de 2009

praticamente constante, aproximadamente de  $360^\circ$  (oriundo de norte), enquanto a velocidade do vento mostrava valores entre 5 e 7,5 m/s, podendo ter contribuído para as variações das camadas de material particulado medido pelo sistema Lidar após as 20:30.

Os gases medidos para esse dia podem ser observados na figura 5.47. É possível perceber as medidas de todos os sistemas que estavam em operação durante a campanha: CO, NO, NO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, espalhamento em 550nm e a concentração de PM<sub>10</sub>. As barras verticais cinzas em cada figura referem-se ao período que o sistema lidar estava em operação para este dia. Através dessa figura pode-se observar que na maioria dos gases existiu um aumento na concentração após as 20:30, período no qual o sistema lidar detectou material possivelmente oriundo de queima de biomassa próximo à superfície. Conforme já comentado, devido ao fato de algumas plumas detectadas pelo sistema Lidar não se encontrarem próximas à superfície não foi possível observar mudanças nos gráficos relativos à concentração de gases/particulados.

As médias e desvio padrões para os gases medidos durante esse período foram de: CO  $2616,19 \pm 108,71$  ppb; NO  $6,79 \pm 0,81$  ppb; NO<sub>2</sub>  $10,18 \pm 6,19$  ppb ; NO<sub>x</sub>  $16,96 \pm 6,58$  ppb; SO<sub>2</sub>  $7,71 \pm 0,25$  ppb; Espalhamento em 550 nm  $53,05 \pm 18,13$  Mm<sup>-1</sup> e PM<sub>10</sub>  $0,028 \pm 0,018$  mg/m<sup>3</sup>.

Quando foram comparados os dados de SODAR com os dos gases, percebe-se que no momento de aumento dos gases (entre 20:30 e 22:00) a velocidade do vento medida pelo SODAR se encontrava em uma das menores durante o período apresentado, com máximo de cerca de 2,5 m/s na camada mais próxima à superfície medida pelo SODAR.

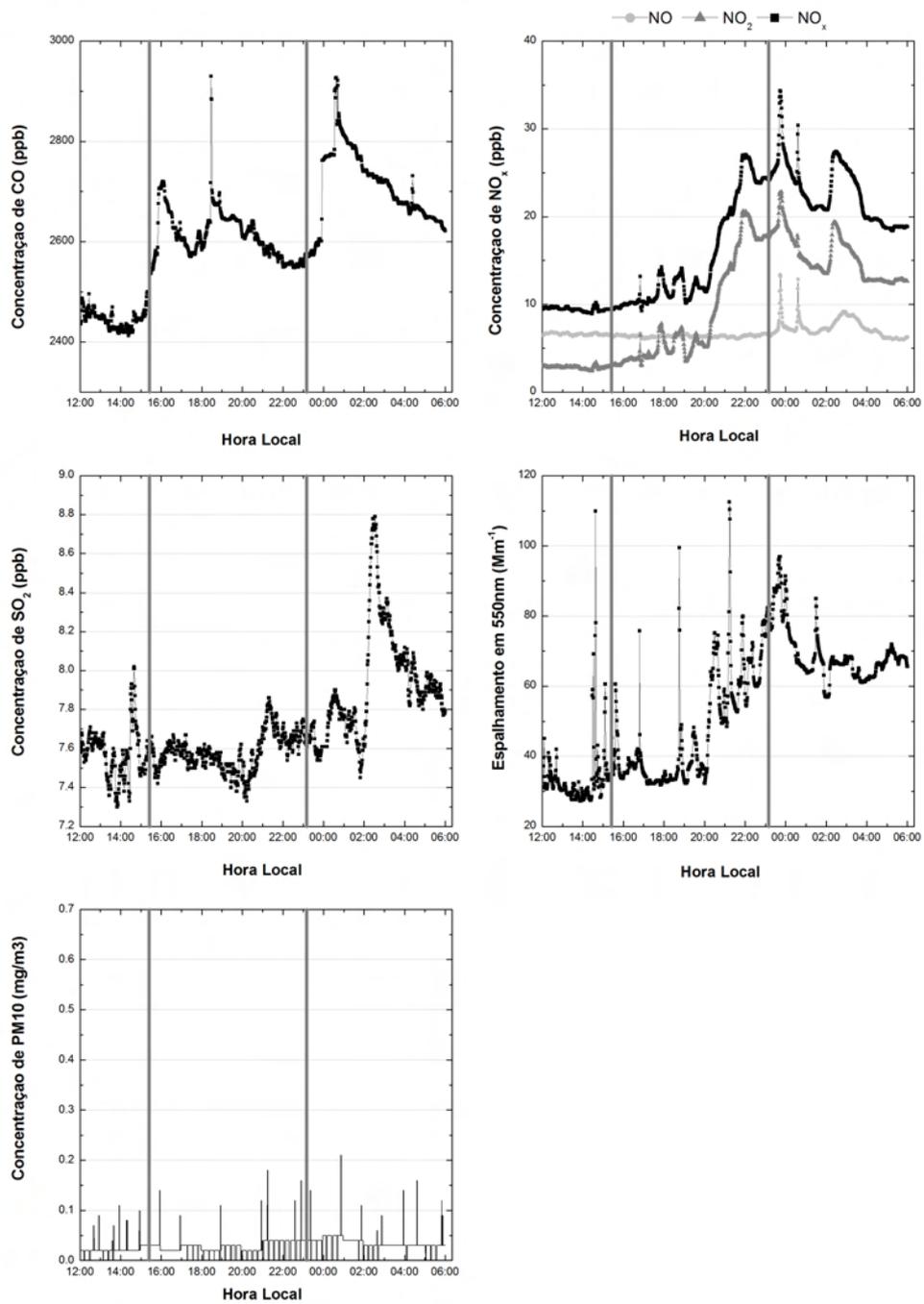


Figura 5.47 - Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 06 de Julho de 2009

#### 5.4.2.2 Análise de caso - Dia 07 de julho de 2009

Nas próximas figuras podem-se observar diversas informações obtidas pelo sistema Lidar e pelo SODAR para o dia 07 de julho de 2009: coeficiente de retroespalhamento integrado durante todo o período de medidas nesse dia, figura 5.48, integrado de 20:50 até 21:04, figura 5.49, valores por minuto do coeficiente de retroespalhamento entre 20:50 e 21:04, figura 5.50, ao longo do dia, figura 5.51, direção 5.52 e velocidade do vento 5.53 medidos pelo SODAR. Percebe-se que o maior valor de coeficiente de retroespalhamento ocorreu em cerca de 2,00 km. Isso pode ter sido resultado da formação da camada limite residual do dia anterior durante esse dia de medida nessa altura. Percebe-se também duas variações no perfil em torno de 0,50 km e 1,00 km. Essas variações podem ser percebidas na figura 5.51 principalmente após as 19:00. Dessa maneira, a presença de material particulado após esse período influenciou a integração do perfil de retroespalhamento para todo o dia.

Para analisar melhor a influência naquele período específico foi gerada a figura entre 20:50 e 21:04 (perfil de retroespalhamento para o período integrado e por minuto) - figuras 5.49 e 5.50. Percebe-se duas camadas bastante distintas em torno de 0,70 km e 1,20 km em ambas as figuras. Um fato interessante é que a camada mais próxima a superfície possui variações tanto de intensidade quanto de espessura a cada minuto, enquanto a camada mais longe da superfície não possui grande variação. Isso pode ter ocorrido devido a presença de turbulência nas camadas inferiores. As informações fornecidas pelo SODAR para esse caso específico não puderam ajudar a entender pois não chegaram até a altura observada pelo sistema Lidar.

Os dados de SODAR (figuras 5.52 e 5.53 apresentados na figura, indica que no momento de constatação de material particulado pelo sistema Lidar mais próximo à superfície (a partir de aproximadamente 21:00) a direção e velocidade do vento praticamente constante de aproximadamente de 45° (oriundo de nordeste) e 6,0 m/s.

Os gases e particulado mostrados na figura 5.54 confirmam a presença de queimadas principalmente após as 19:00 através dos valores de NO<sub>x</sub>. Já a concentração de espalhamento em 550 nm mostra um pico em torno de 22:00 de 160 Mm<sup>-1</sup>, podendo indicar que, apesar do sistema Lidar não conseguir medir

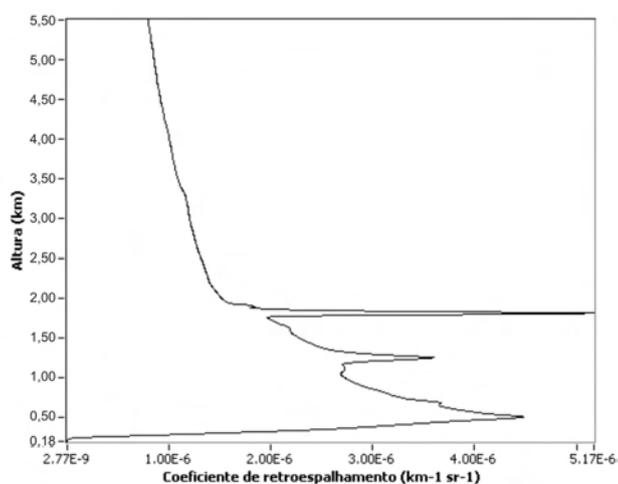


Figura 5.48 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 07 de julho de 2009

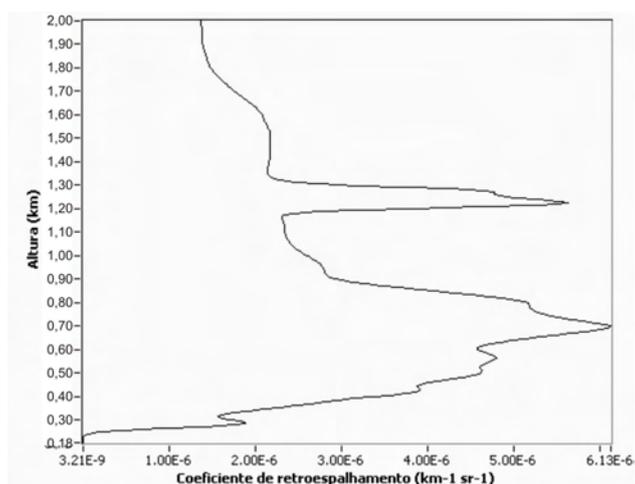


Figura 5.49 - Perfil de retroespalhamento integrado entre 20:50 e 21:04 para o dia 07 de julho de 2009

em níveis mais baixos, existia a presença de plumas de queimadas próximo a superfície.

As médias e desvio padrões para os gases medidos durante esse período foram de: CO  $2993,69 \pm 328,19$  ppb; NO  $8,69 \pm 4,66$  ppb; NO<sub>2</sub>  $13,23 \pm 8,34$  ppb ; NO<sub>x</sub>  $21,92 \pm 11,49$  ppb; SO<sub>2</sub>  $7,95 \pm 0,13$  ppb; Espalhamento em 550 nm  $54,96 \pm 27,01$  Mm<sup>-1</sup> e PM<sub>10</sub>  $0,04 \pm 0,02$  mg/m<sup>3</sup>.

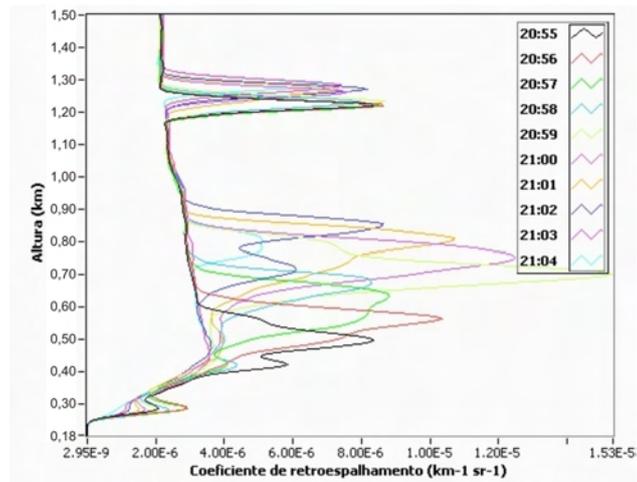


Figura 5.50 - Perfil de retroespalhamento entre 20:50 e 21:04 por minuto para o dia 07 de julho de 2009

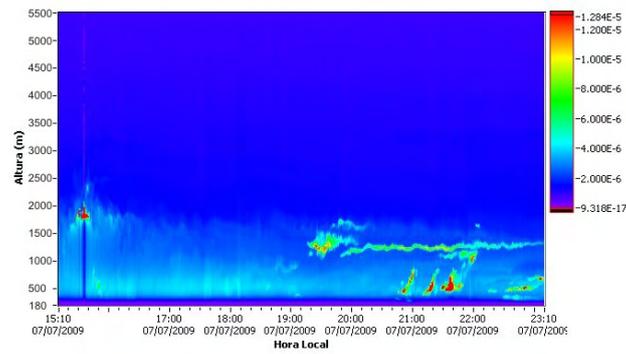


Figura 5.51 - Perfil de retroespalhamento ao longo do dia 07 de julho de 2009

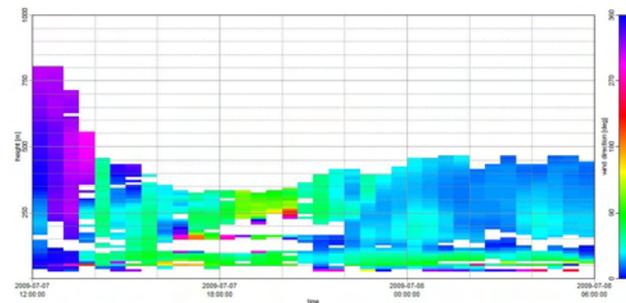


Figura 5.52 - Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 07 de julho de 2009

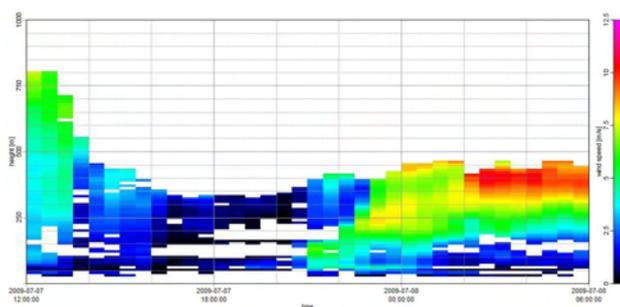


Figura 5.53 - Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 07 de julho de 2009

#### 5.4.2.3 Análise de caso - Dia 15 de julho de 2009

No dia 15 de julho de 2009 uma intensa queimada de vegetação nativa foi observada dentro do campus da UNESP de Rio Claro-SP (onde os equipamentos estavam localizados) que foi advectada sobre o sistema Lidar (figura 5.55). Uma análise mais detalhada dessa queimada pode ser observada através das figuras extraídas do sistema LIDAR, figuras 5.56-5.63. O foco de queimada estava aproximadamente à 300m do sistema Lidar, tornando essa análise a primeira no Brasil utilizando sistema Lidar tão próximo à fonte emissora de queimada.

Semelhante aos itens anteriores, as figuras a seguir mostram o perfil de retroespalhamento integrado durante o dia, figura 5.56, entre 15:22 e 15:30, figura 5.57, as 15:22 e 15:31 figura 5.58, entre 15:22 e 17:22 através da figura 5.59, ao longo do dia (5.60), durante o evento de queimada (5.61), direção (5.62) e velocidade do vento medidos pelo SODAR (5.63) para o dia 15 de julho de 2009.

O perfil de retroespalhamento integrado para todo dia (5.56) indica uma influência de plumas de queimadas próximas de 1,00 km e 1,50 km de altura. É possível observar plumas de aerossóis próximas à superfície (com um máximo em torno de 1,30 km) logo no início das medidas com o sistema Lidar entre 15:22 e 16:40 (hora local). Uma característica que merece destaque é que as plumas emitidas e detectadas pelo sistema Lidar possuíram espaços (gaps) entre si. Já as 20:00 pode-se observar a detecção de material provavelmente oriundo de queimadas próximas ao local de medidas.

Através dos valores de coeficiente de retroespalhamento pode-se observar altos valores na região e no período de entradas de plumas sobre o sistema. A

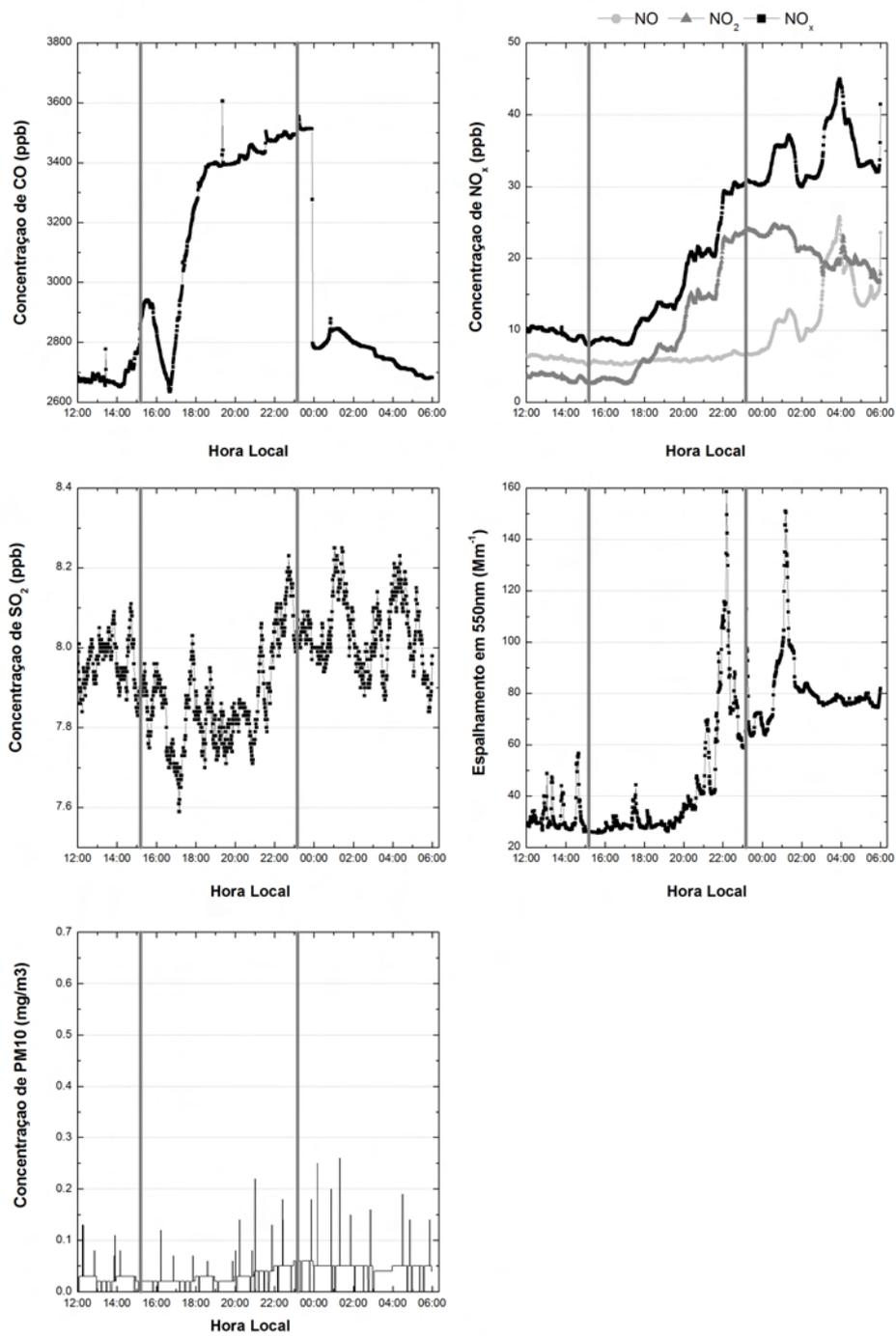


Figura 5.54 - Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 07 de Julho de 2009



Figura 5.55 - Fotos do evento de queimada ocorrido no dia 15 de julho de 2009

diminuição na altura máxima das plumas no início das medidas ocorreu devido a intervenção de funcionários da UNESP e bombeiros na tentativa de se extinguir a queimada, causando uma diminuição na mesma e conseqüentemente na pluma emitida.

A figura 5.57 refere-se aos perfis de coeficiente de retroespalhamento logo no início das medições com o sistema Lidar (nove minutos iniciais). Pode-se observar grande variação na intensidade do sinal conforme a média a cada minuto, variando de  $5,8 \cdot 10^{-5}$  até valores próximos à  $4,0 \cdot 10^{-6}$  indicando a grande variação da influência das queimadas próxima a sua fonte emissora. Também é possível observar nesse item a variação em relação a altura ou espessura da pluma, o que mostra que em determinados minutos (ex. 15:25) a pluma se concentra mais próximo à superfície além de ser mais fina que em outros minutos, como 15:22.

A figura 5.58 refere-se a dois momentos isolados dessa queimada. O primeiro (15:22) é o ápice da pluma de queimada sobre o sistema Lidar, contendo maior quantidade de material particulado. O segundo refere-se à um dos intervalos entre as plumas de queimadas observadas. Pode-se observar a grande variação entre esses momentos através do respectivo item. Essa análise mostra a complexidade de se modelar um evento de queimada tão próximo a fonte emissora, quando além da intensidade da pluma e quantidade de material lançado na atmosfera também ocorre variação na espessura da pluma.

A finalidade das figuras 5.59 e 5.61 é mostrar a variação da intensidade do coe-

ficiente de retroespalhamento até 1,40 km (5.59) e 2,50 km (5.61) nos primeiros 120 minutos de medidas do sistema Lidar. Portanto, durante o episódio de queimada registrado e destacado nesse item, percebe-se que o maior valor de coeficiente de retroespalhamento ocorreu após cerca de 10-15min do ligamento do sistema Lidar (figura 5.59) alcançando o valor de aproximadamente  $9 \cdot 10^{-5}$ . Porém, a maior altura ocorreu logo no início da medida nesse dia, em torno de 700m de altura (podendo ser observado em ambos os itens).

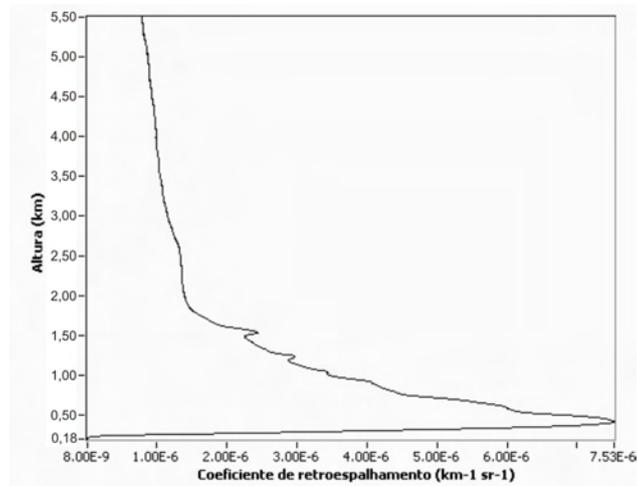


Figura 5.56 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 15 de julho de 2009

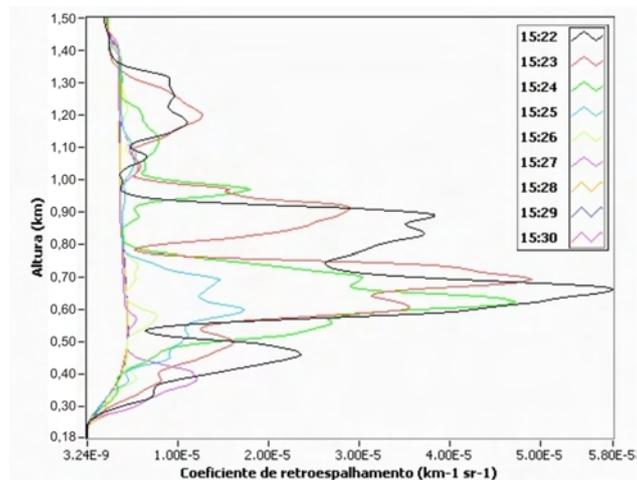


Figura 5.57 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 15 de julho de 2009 entre 15:22 e 15:30

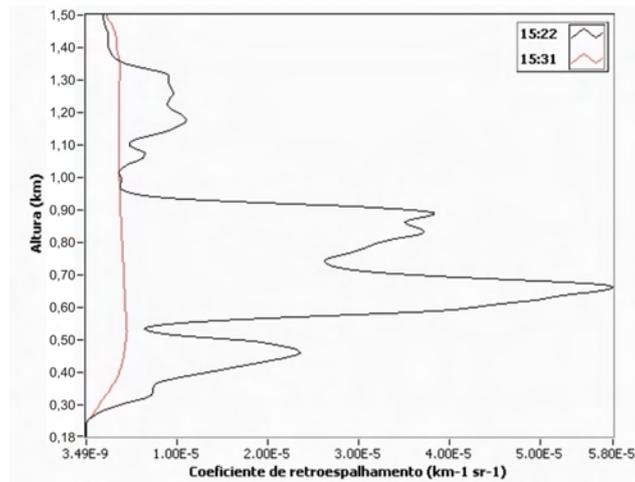


Figura 5.58 - Perfil de retroespalhamento integrado as 15:22 e 15:30 para o dia 15 de julho de 2009

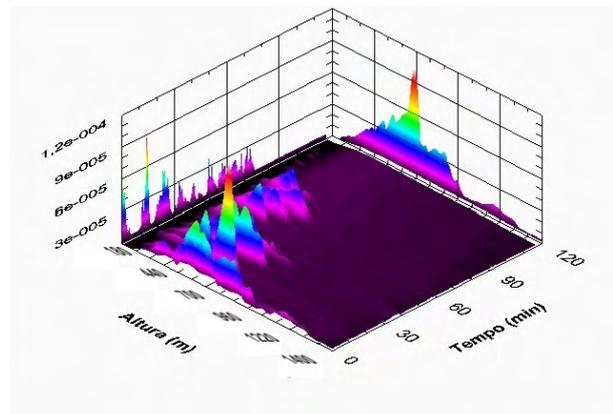


Figura 5.59 - Perfil de retroespalhamento integrado entre 15:33 e 17:22 para o dia 15 de julho de 2009

Um fato a se notar analisando os dados do SODAR durante o período de queimada no início das medidas com o Lidar é que a velocidade do vento estava bastante baixa, em torno de 1,5 m/s, em toda a camada com material particulado. Porém, devido ao método de escolha da aquisição dos dados pelo SODAR não é possível analisar os dados com intervalo de tempo menor que 30 minutos. A partir de 20:00 quando foi detectado material particulado pelo Lidar em níveis mais próximos à superfície pode-se perceber que a direção do vento estava de leste-sul (entre 90° e 180°) com velocidade do vento máxima de 6 m/s em torno de 350 m de altura.

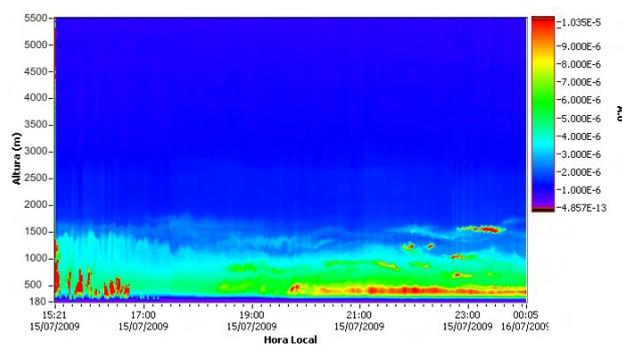


Figura 5.60 - Medidas de retroespalhamento ao longo do dia 15 de julho de 2009

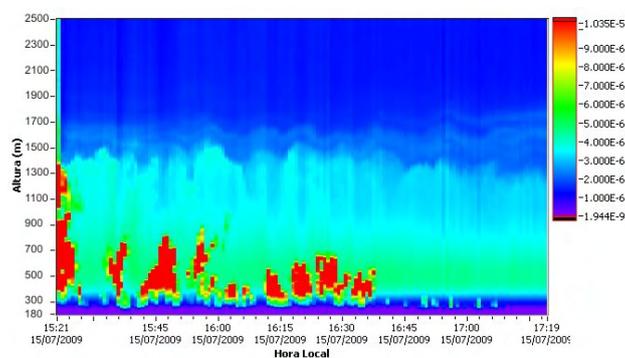


Figura 5.61 - Perfil de retroespalhamento durante o evento de queimada do dia 15 de julho de 2009

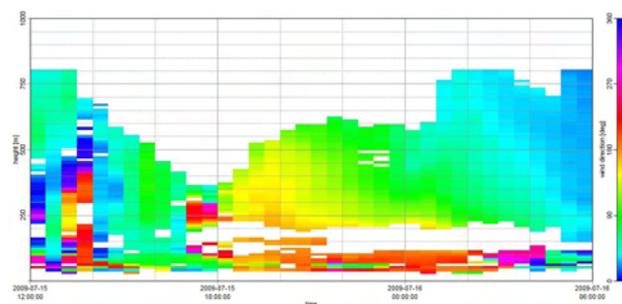


Figura 5.62 - Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 15 de julho de 2009

Os analisadores de gases, nefelômetro e amostrador de particulado (PM10) são mostrados na figura 5.64. Os altos valores no início da medição do sistema Lidar são facilmente observados em praticamente todos os gráficos. Destaca-se os valores observados no espalhamento em 550 nm medido pelo nefelômetro. É

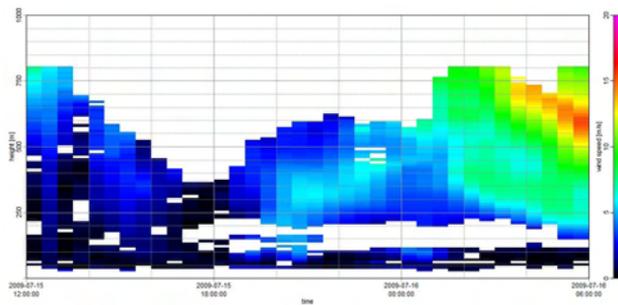


Figura 5.63 - Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 15 de julho de 2009

possível também observar que, apesar de ser detectado essa queimada que ocorreu no início das medidas com o Lidar, a queimada observada a partir das 20:00 não interferiu nos valores com mudanças significativas das concentrações dos gases, possivelmente devido a altura superior que a mesma atingiu, não afetando assim os instrumentos de medidas de gases.

As plumas ocasionadas devido a queimada mostrada na figura 5.55 ocasionaram altos valores, principalmente de CO e NOx, além do espalhamento medido pelo nefelômetro em 550 nm. Entretanto, era esperado um aumento na concentração de PM10 que não foi observado. Possivelmente, esse fato ocorreu devido à deposição do material em regiões pouco mais distantes da fonte emissora.

As médias e desvio padrões para os gases medidos durante esse período foram de: CO  $3118,48 \pm 276,67$  ppb; NO  $5,75 \pm 1,94$  ppb; NO2  $16,46 \pm 10,28$  ppb ; NOx  $22,20 \pm 10,84$  ppb; SO2  $8,89 \pm 1,01$  ppb; Espalhamento em 550 nm  $181,39 \pm 145,05$  Mm<sup>-1</sup> e PM10  $0,07 \pm 0,06$  mg/m<sup>3</sup>.

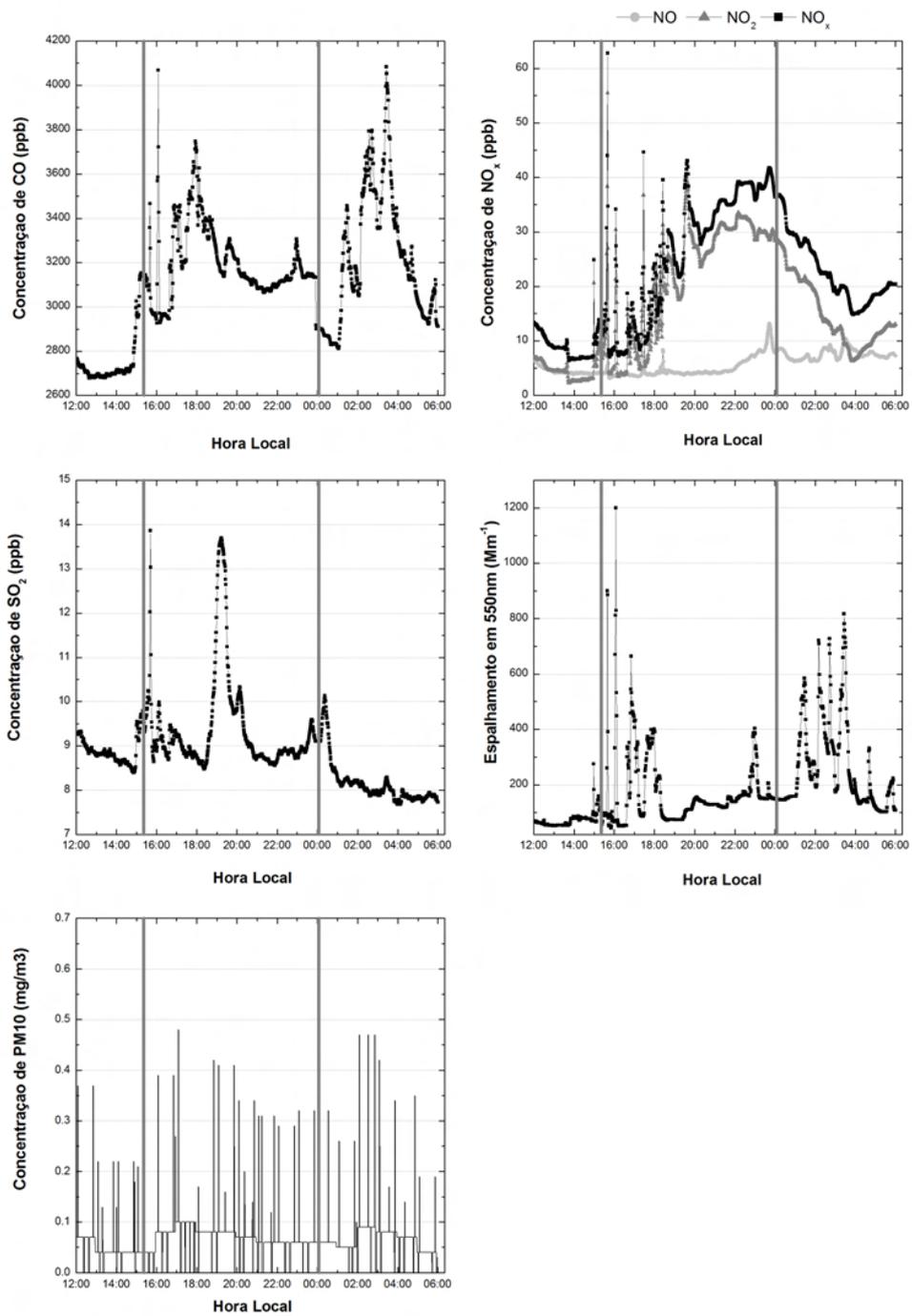


Figura 5.64 - Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 15 de Julho de 2009

#### 5.4.2.4 Análise de caso - Dia 04 de agosto de 2009

Através das figuras seguintes podem-se observar o perfil de retroespalhamento integrado durante o dia (5.65), integrado entre 20:50 e 21:10 (5.66), entre 20:50 e 21:00 (5.67), ao longo do dia (5.68), direção (5.69) e velocidade do vento medidos pelo SODAR (5.70) para o dia 04 de agosto de 2009.

A figura 5.65 juntamente com (5.68) mostra uma camada bastante homogênea em torno de 2,70 km. Essa camada, possivelmente, é uma pluma de queimada advectada de regiões mais distantes do sistema de medidas. É interessante analisar mais detalhadamente as figuras 5.66 e 5.67 que mostram períodos menores da medição pelo Lidar.

Na figura 5.66 percebe-se facilmente três camadas distintas em torno de 1,10, 1,30 e 1,70 km de altura. Ao analisar-se a variação por minuto percebe-se que as três camadas praticamente não possuíram variação nem de espessura nem de intensidade nos valores de coeficiente de retroespalhamento. Portanto, para esse dia específico pode-se observar a existência de uma relativa facilidade para a modelagem atmosférica, pois as camadas são bastante distintas e com valores de coeficiente de retroespalhamento bastante homogêneos.

Pode-se notar através dos dados do SODAR (figuras 5.69 e 5.70) que o vento nos horários de medidas de material particulado pelo Lidar elástico (a partir de 18:00 até o final das medidas) variou entre as direções de 90° e 180° e velocidade de 1,5 m/s até aproximadamente 8,5 m/s.

Os gráficos mostrados através da figura 5.71 indicam a existência de dois picos principais de concentrações de gases, indicados principalmente através das concentrações de CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> e espalhamento em 550nm. Pode-se perceber o primeiro pico próximo as 19:00 e o segundo próximo as 21:00 (hora local). Ao comparar-se esses picos com a figura 5.68 percebe-se que o primeiro pico possuiu uma boa correlação em relação ao sistema Lidar, pois as concentrações dos gases começaram a aumentar em torno de 17:00, hora que o sistema Lidar começa a indicar uma maior concentração de aerossóis próximo a superfície.

As médias e desvio padrões para os gases medidos durante esse período foram de: CO 3092,86 ± 137,90 ppb; NO 6,73 ± 4,22 ppb; NO<sub>2</sub> 20,08 ± 8,53 ppb ; NO<sub>x</sub> 26,81 ± 10,99 ppb; SO<sub>2</sub> 8,85 ± 0,74 ppb; Espalhamento em 550 nm 117,24 ±

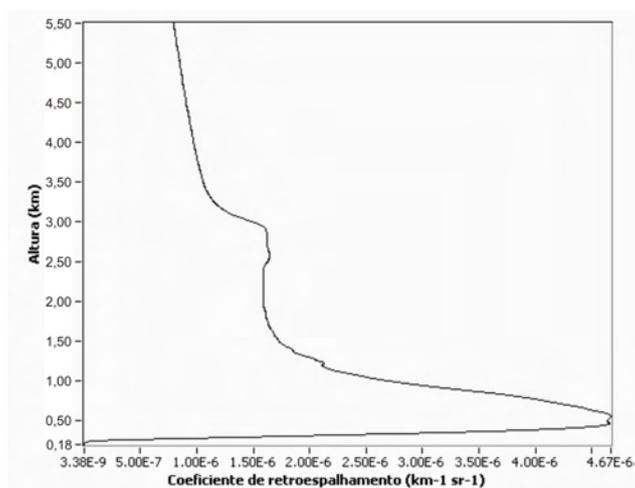


Figura 5.65 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 04 de agosto de 2009

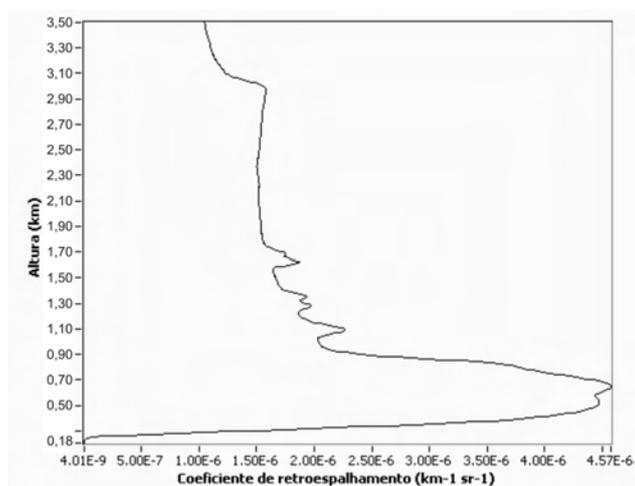


Figura 5.66 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 04 de agosto de 2009 entre 20:50 e 21:10

59,62  $\text{Mm}^{-1}$  e  $\text{PM}_{10}$   $0,05 \pm 0,03 \text{ mg/m}^3$ .

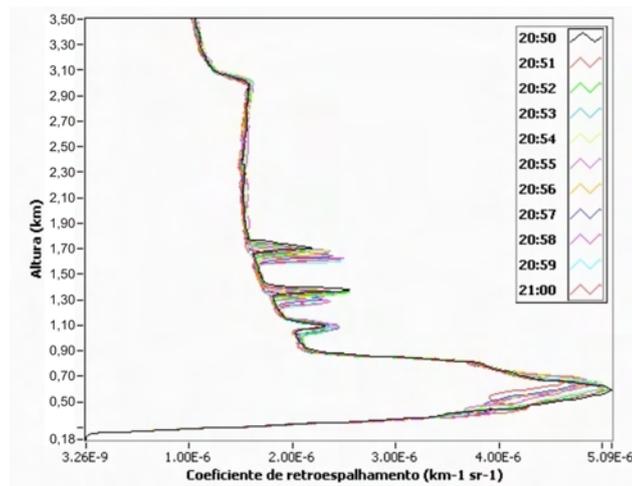


Figura 5.67 - Perfil de retroespalhamento integrado para o dia 04 de agosto de 2009 entre 20:50 e 21:00

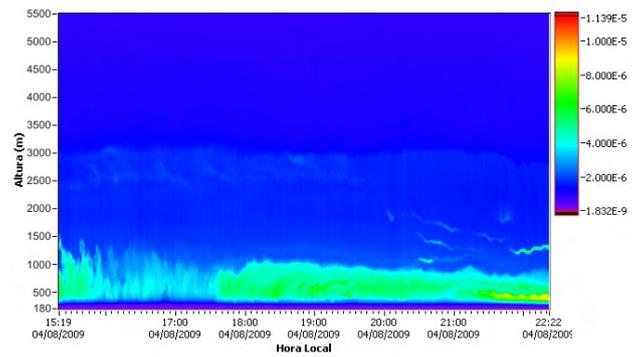


Figura 5.68 - Perfil de retroespalhamento ao longo do dia 04 de agosto de 2009

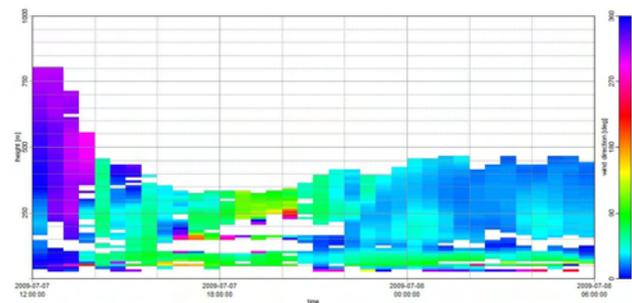


Figura 5.69 - Direção do vento medido pelo SODAR para o dia 04 de agosto de 2009

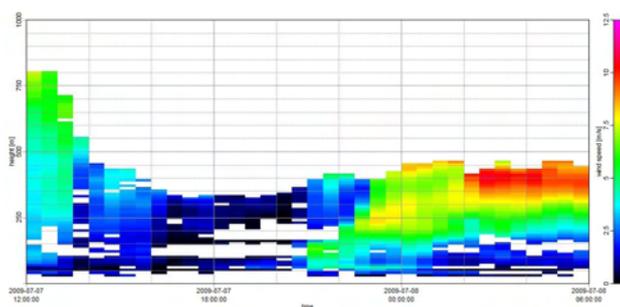


Figura 5.70 - Velocidade do vento medido pelo SODAR para o dia 04 de agosto de 2009

#### 5.4.2.5 Conclusões

Neste item apresentou-se os resultados da campanha de coleta de dados em Rio Claro-SP que possuiu o propósito de estudar os impactos das queimadas no entorno da cidade com um sistema Lidar móvel. Foi possível observar uma grande quantidade de material de queimadas advectadas sobre a região, devido, à grande quantidades de plantações de cana-de-açúcar ao redor da cidade.

A campanha possuiu uma menor quantidade de dias medidos com o sistema Lidar do que se era esperado devido a existência de grande totais de precipitação e conseqüentemente nebulosidade que não permitiram a operação adequada do sistema Lidar. Era esperado um total aproximado de 150mm durante o período da campanha (junho-outubro) enquanto foi observado quase o dobro da precipitação esperada (300mm).

No total, foram identificados 31 dias com a presença de material de queimada sobre o sistema Lidar móvel em Rio Claro-SP, correspondendo a um total de aproximadamente 86% dos dados medidos. Porém desse montante, só foram utilizados e relatados 20 casos/dias onde o sistema Lidar possuía uma boa correlação com os sistemas de medidas de gases e particulados utilizados na campanha.

As queimadas detectadas pelo Lidar variaram entre 0,18 km e 3,00 km. Possivelmente a entrada de plumas de queimadas detectadas em alturas menores foram queimadas que ocorreram em regiões mais próximas ao local de medida, enquanto o oposto ocorreu para as queimadas detectadas em alturas maiores. Dessa forma, os maiores valores de coeficiente de retroespalhamento ocorreram próximos à superfície, sendo que em casos determinados possuíam picos em

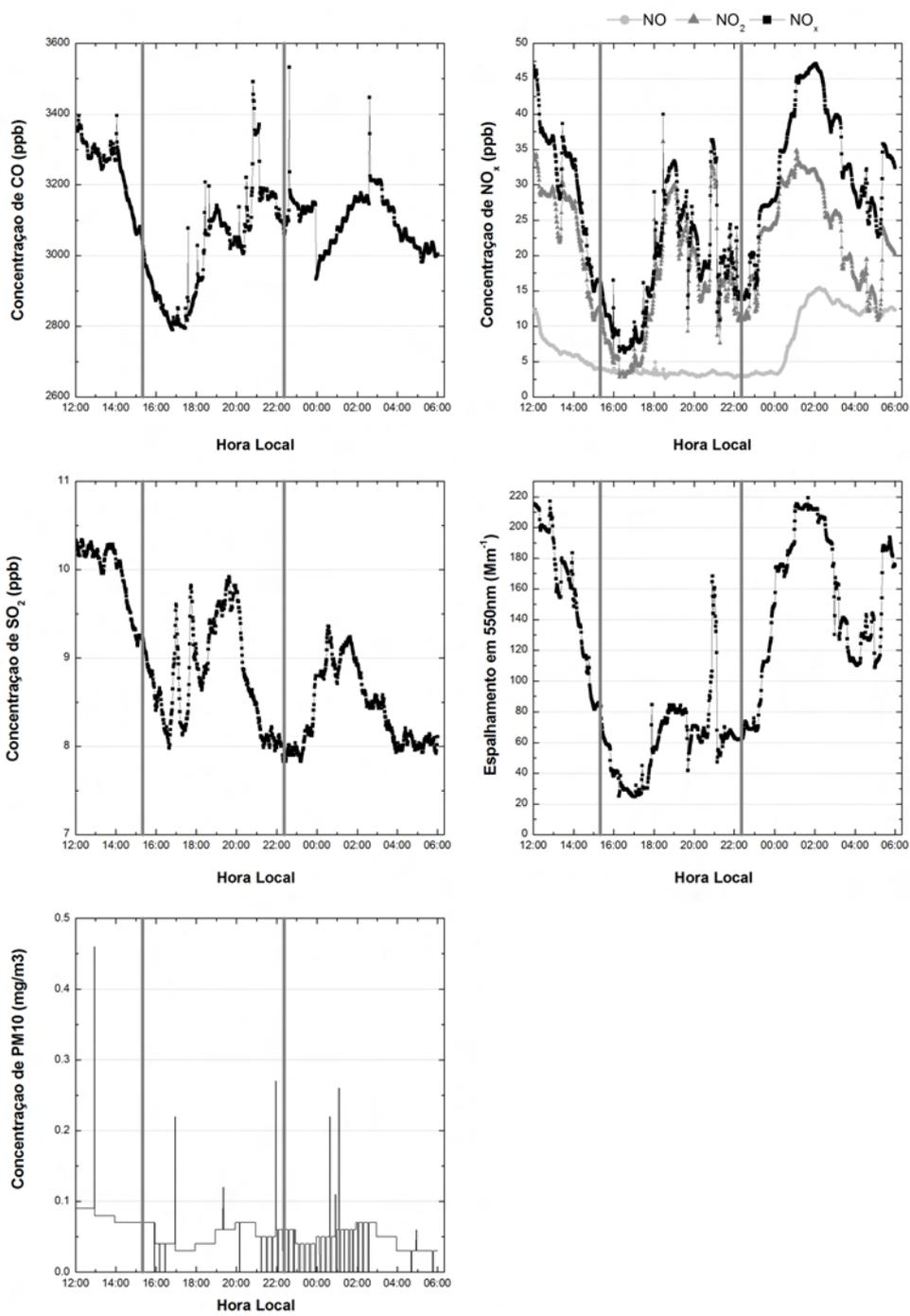


Figura 5.71 - Concentração de gases/particulado em Rio Claro-SP em 08 de agosto de 2009

camadas específicas acima da Camada Limite Atmosférica.

Foi notado, como era de se esperar, que na maior parte das medidas, o horário preferencial de detecção de queimadas foi a partir de 17:00 (hora local), pois os fazendeiros tendem a utilizar o processo da queimada quando a umidade atmosférica está em níveis mais altos, conforme é solicitado pelo governo.

Foram estudados em maiores detalhes quatro dias de detecção de queimadas pelo Lidar que foram correlacionados com picos nos sistemas de medidas de gases utilizados durante a campanha, principalmente CO e NOx. Na análise desses quatro casos pode-se perceber a existência de camadas, na sua maioria distintas entre elas, com a presença de material de queimada facilitando possivelmente uma modelagem atmosférica/gases para eventos de queimadas de cana-de-açúcar sobre a região.

Ressalta-se o caso do dia 15 de julho de 2009, onde foi constatado pela primeira vez na literatura uma análise de uma queimada com distância menor que 500 m do sistema Lidar. Notou-se que as plumas possuíram intervalos entre si e que existiu grande variação de espessura da camada, bem como de valores de coeficiente de retroespalhamento a cada minuto. Portanto, percebe-se que em distâncias muito próximas à fonte de queimadas, seu processo de modelagem pode ser complicado de se realizar necessitando, assim, de mais estudos.

Os analisadores de gases, nefelômetro e amostradores de material particulado mostraram na maioria dos casos boa correlação com os dados apresentados pelo sistema Lidar, principalmente quando, as plumas foram observadas mais próximas à superfície. Em geral, as melhores correlações foram observadas para CO, NOx e espalhamento em 550 nm, enquanto as piores foram para SO2 e PM10. Em relação ao PM10, a razão dessa baixa correlação foi devido ao fato que o material resultante das queimadas não foi depositado sobre o local de coleta de dados na maioria dos casos, porém relatos de moradores sugerem que grande parte desse material é depositado próximo a fonte.



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Os eventos de queimadas que foram advectados de regiões fonte para as cidades de São Paulo e Rio Claro, ambas no estado de São Paulo, foram o principal foco deste trabalho. Para uma análise climatológica foram utilizados dados do satélite NOAA-12 durante o período de 1999 à 2007 e para as campanhas em 2007 e 2009, dados provenientes de sensores atmosféricos à laser (LIDAR) e no ultimo caso (Rio Claro), analisadores de gases e além de SODAR.

A análise dos dados do NOAA-12 indicou que as estações com maior quantidade de focos de queimadas no estado de São Paulo foram, em ordem decrescente: inverno, primavera, outono e verão. Sendo as regiões com maior quantidade de focos: Ribeirão Preto, Jaboticabal, Piracicaba e Assis, regiões com grande áreas de plantação de cana-de-açúcar. Percebeu-se uma constância no número de focos de queimadas, exceto para os anos de 1999 e 2007, o último devido ao fato da desativação em julho do referido ano do satélite NOAA-12 de onde os dados foram extraídos.

As trajetórias preferenciais indicaram a influência de alguns sistemas predominantes, sobretudo o anticiclone subtropical e sistemas transientes, como principais sistemas que afetam essas trajetórias. No caso do anticiclone subtropical a variação na sua posição zonal e em alguns casos meridional foi o fator mais impactante na trajetória das parcelas. Em diversos níveis (925, 700 e 500 hPa) notou-se trajetória preferencial em direção a Região Metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP) fazendo com que a poluição urbana seja somada a poluição das queimadas. Como possíveis pontos para instalação de futuras estações da rede da AERONET ou de uma possível rede de LIDARs cita-se a região próxima à Lat.:  $-20,5^{\circ}$  e Long.:  $-48,5^{\circ}$ , onde foi detectada a maior quantidade de focos de queimadas no estado de São Paulo, além das regiões próximas à trajetória mostrada pela cor violeta na figura 5.2.

A campanha de coleta de dados em 2007 na cidade de São Paulo com o sistema LIDAR elástico detectou, em 10 casos, camadas com material altamente absorvedor que, através de simulações de trajetórias reversas e focos de queimadas detectados com satélites, eram material resultante de queimadas originadas no Sul da Bacia Amazônica, norte da Argentina e interior do estado de São Paulo. A Espessura Óptica Atmosférica (EOA) média obtida dos dados

da AERONET ficou entre 0,13 - 0,56 (coluna integrada) enquanto que a Razão LIDAR e Expoente de Ångström variaram entre 44 - 74 sr e 1,02 - 1,70, respectivamente, bastante similar ao encontrado em casos de queimadas de biomassa estudados por outros autores (BALIS et al., 2003; AMIRIDIS et al., 2009). Não foi possível identificar claramente a entrada de plumas de queimadas através da análise isolada da EOA e/ou da distribuição de tamanhos, somente através do sistema LIDAR, pois esses parâmetros na cidade de São Paulo são governados quase exclusivamente pelos aerossóis aprisionados dentro da Camada Limite Atmosférica, enquanto que as queimadas advectadas estão normalmente na Atmosfera Livre.

Durante a campanha na cidade de Rio Claro em 2009 identificou-se 20 casos de queimadas através de LIDAR juntamente com amostradores de gases e particulados instalados no local. As queimadas detectadas variaram entre 0,18 e 3,00 km de altura. O horário de detecção das queimadas foi, usualmente, após as 17:00 devido a proibição de se realizar queimadas nas plantações de cana-de-açúcar em horários com baixa umidade atmosférica. Os gases com maior correlação entre suas concentrações e dados do LIDAR foram o Monóxido de Carbono (CO) e Óxidos de Nitrogênio (NO<sub>x</sub>), além do espalhamento em 550 nm medido através de Nefelômetro. Na análise de casos pode-se perceber a existência de camadas, na sua maioria distintas entre elas, com a presença de material de queimada em níveis bastantes distintos. Pela primeira vez na literatura foi medida uma queimada usando LIDAR com distância menor que 500 m, notando que as plumas próximas à sua região fonte possui intervalos entre si. Além de grande variação na espessura da camada da pluma de queimada e coeficiente de retroespalhamento, enquanto que as plumas mais distantes possuem camadas normalmente mais constantes ao longo do tempo.

Diante da hipótese levantada, pode-se concluir que as queimadas de diversas regiões da América do Sul afetam o estado de São Paulo, como resultado das análises estudadas para as cidades de São Paulo e Rio Claro. Logo, deveriam ser tomadas ações mitigadoras por partes dos governos e dos produtores de cana em relação à essas queimadas

Baseado nos resultados apresentados neste documento, sugere-se para trabalhos futuros:

- Inclusão de um sítio de monitoramento da AERONET no estado de São Paulo em regiões com queimadas de cana-de-açúcar
- Simulação e agrupamento de trajetórias somente de casos onde foram detectadas queimadas por meio de satélite.
- Simulação de trajetórias utilizando dados com melhor resolução espacial e temporal.
- Uso de métodos de agrupamento hierárquicos.
- Utilização de LIDAR Raman para a obtenção direta dos coeficientes de retroespalhamento e extinção.
- Análise de queimadas em outras regiões, como Nordeste do Brasil (mais especificamente Alagoas), região com grande produção de cana-de-açúcar e que também utiliza queimadas no seu cultivo.
- Utilização dos valores de coeficiente de retroespalhamento dos aerossóis medidos pelos sistemas LIDAR em modelos atmosféricos como o WRF pelo fato do mesmo assimilar os focos de queimadas e possuir como saída variáveis que são afetadas por essas queimadas.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, C. B.; KIRCHOFF, V. W. J. H. Transporte de monóxido de carbono gerado em queimadas para regiões onde não se queima. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, n. 1, p. 61–74, 2001. [2](#), [3](#), [11](#), [13](#), [19](#), [20](#)

AMIRIDIS, V.; BALIS, D. S.; GIANNAKAKI, E.; STOHL, A.; KAZADZIS, S.; KOUKOULI, M. E.; ZANIS, P. Optical characteristics of biomass burning aerosols over southeastern europe determined from uv-raman lidar measurements. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 9, 2009. [16](#), [75](#), [92](#), [124](#)

ANDREAE, M. O. **Biomass burning**: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate. Cambridge, Mass: MIT Press, 1991. 3-21 p. [7](#)

ANDREAE, M. O.; CRUTZEN, P. J. Atmospheric aerosols: Biogeochemical sources and role in atmospheric chemistry. **Science**, v. 276, n. 5315, 1997. [8](#)

ARBEX, M. A.; CANÇADO, J. E. D.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F.; SALDIVA, P. H. N. Queima da biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 30, n. 2, 2004. [9](#)

ARTAXO, P.; FERNANDES, E.; MARTINS, J.; YAMASOE, M.; HOBBS, P.; MAENHAUT, W.; LONGO, K.; CASTANHO, A. Large scale aerosol source apportionment in amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. 31, 1998. [7](#)

ARTAXO, P.; MARTINS, J. V.; YAMASOE, M. A.; PROCOPIO, A. S.; PAULIQUEVIS, T. M.; ANDREAE, M. O.; GUYON, P.; GATTI, L. V.; LEAL, A. M. G. Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry season in rondonia, amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, 2002. [7](#)

ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; PAULIVEQUIS, T. M.; RIZZO, L. V.; JÚNIOR, C. P.; PAIXÃO, M. A.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; CORREIA, A. L. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas da amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3a, 2006. [8](#), [9](#)

AUSTIN, J.; TUCK, A. F. The calculation of stratospheric air parcel trajectories using satellite data. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v. 111, n. 468, p. 279–307, 1985. 19

AZEVEDO, D. A.; SANTOS, C. Y. M.; NETO, F. R. A. Identification and seasonal variation of atmospheric organic pollutants in campos dos goytacazes, brazil. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 14, 2002. 2

BALIS, D. S.; AMIRIDIS, V.; ZEREFOS, C.; GERASOPOULOS, E.; ANDREAE, M.; ZANIS, P.; KAZANTZIDIS, A.; KAZADZIS, S.; PAPAYANNIS, A. Raman lidar and sunphotometric measurements of aerosol optical properties over thessaloniki, greece during a biomass burning episode. **Atmospheric Environment**, n. 32, p. 4529–4538, 2003. 16, 87, 124

BOTKIN, D.; KELLER, E. A. **Environmental science: earth as living planet**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 9

BROWER, J. E.; ZAR, J. H. **Field & laboratory methods for general ecology**. [S.I.]: Brown Publishers, 1977. 226 p. 22

CANASAT. **Mapeamento da Cana via Imagens de Satélites de Observação da Terra**. 06 2008. Figura retirada da internet. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/canasat/>>. 49

CASTANHO, A. D. A. **Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2005. 12, 14

CATTRAL, C.; REAGAN, J.; THOME, K.; DUBOVİK, O. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected aerosol robotic network locations. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, p. D10S11, 2005. 76, 77, 78, 92

CETESB. **Avaliação da qualidade do ar em Araraquara em 1986**. São Paulo - SP, 1986. 10

\_\_\_\_\_. **Resumo dos estudos em locais influenciados diretamente pelas queimadas de cana**. São Paulo - SP, 1999. 10

\_\_\_\_\_. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2003**. São Paulo - SP, 2004. P. 122. [66](#)

CHRISTOPHER, S. A.; CHOU, J.; ZHANG, J.; LI, X.; WELCH, R. M. Shortwave direct radiative forcing of biomass burning aerosols estimated from virs and ceres. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 15, 2000. [9](#)

CHU, D. A.; KAUFMAN, Y. J.; ZIBORDI, G.; CHERN, J. D.; MAO, J.; LI, C.; HOLBEN, B. N. Global monitoring of air pollution over land from the earth observing system-terra moderate resolution imaging spectroradiometer (modis). **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D21, 2003. [12](#), [14](#)

CLIMANÁLISE. **Boletim de monitoramento e análise climática**. 1986. Número especial. [69](#)

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 1996. Número Especial. [66](#)

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 07 2007. Número 22. [66](#)

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 08 2007. Número 22. [67](#), [82](#)

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 09 2007. Número 22. [67](#), [87](#)

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 10 2007. Número 22. [67](#)

COULSON, K. L. **Solar and terrestrial radiation**: methods and measurements. New York: Academic Press, 1975. 479 p. [23](#)

CRUTZEN, P. J.; ANDREAE, M. O. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles. **Science**, v. 250, n. 4988, 1990. [9](#), [10](#)

DORLING, S. R.; DAVIES, T. D.; PIERCE, C. E. Cluster analysis: a technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry-method and applications. **Atmospheric Environment**, v. 26, n. 14, 1992. [33](#)

DOTY, K. G.; PERKEY, D. J. Sensitivity of trajectory calculations to the temporal frequency of wind data. **Monthly Weather Review**, v. 121, n. 1-4, 1993. [19](#), [20](#)

DRAHLER, R. R.; HESS, G. D. **Description of the HYSPLIT\_4 Modelling System**: Noaa tech. mem erl arl-224. US Dept Commerce: [s.n.], 1997. 24p. [18](#)

DUBOVIK, O.; HOLBEN, B.; ECK, T.; SMIRNOV, A.; KAUFMAN, Y.; KING, M.; TANRE, D.; SLUTSKER, I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 59, p. 590–608, 2002. [80](#)

FREITAS, S.; LONGO, K.; DIAS, M. S.; DISAS, P. S.; CHATFIELD, R.; PRINS, E.; ARTAXO, P.; GRELL, G.; RECUERO, F. Monitoring the transport of biomass burning emissions in south america. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 5, n. 1-2, 2005. [7](#), [8](#), [13](#), [14](#), [15](#)

FUELBERG, H. E.; LORING, R. O.; WATSON, M. V.; SINHA, M. C.; PICKERING, K. E.; THOMPSON, A. M.; SACHSE, G. W.; BLACKIE, D. R.; SCHOEBERL, M. R. Trace a trajectory intercomparison. isentropic and kinematic methods. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D19, 1996. [20](#)

HAFNER, W.; SOLORZANO, N.; JAFFE., D. Analysis of rainfall and fine aerosol data using clustered trajectory analysis for national park sites in the western us. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 3071–3081, 2007. [33](#)

HAIR, K.; JOSEPH, F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. **Multivariate data analysis**. New Jersey-EUA: Prentice Hall, 1998. 745 p. [20](#)

HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; SLUTSKER, I.; TANRÉ, D.; SETZER, J. P. B. nd A.; VERMOTE, E.; REAGAN, J. A.; KAUFMAN, Y. J.; NAKAJIMA, T.; LAVENU, F.; JANKOWIAK, I.; SMIRNOV, A. Aeronet - a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. **Remote Sensing of the Environment**, v. 66, n. 1, 1998. [24](#), [34](#)

HOLBEN, B. N.; SETZER, A.; ECK, T. F.; PEREIRA, A.; SLUTSKER, I. Effect of dry-season biomass burning on amazon basin aerosol concentrations and optical properties. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D14, 1996. [12](#)

HOLBEN, B. N.; TANRÉ, D.; SMIRNOV, A.; ECK, T. F.; SLUTSKER, I.; ABUHASSAN, N.; NEWCOMB, W. W.; SCHAFFER, J. S.; CHATENET, B.; LAVENU, F.; KAUFMAN, Y. J.; CASTLE, J. V.; SETZER, A.; MARKHAM, B.; CLARK, D.; FROUIN, R.; HALTHORE, R.; KARNELO, A.; O'NEILL, N. T.; PIETRAS, C.; PINKER, R. T.; VOSS, K.; ZIBORDI, G. An emerging ground-based aerosol climatology: aerosol optical depth from aeronet. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D11, 2001. [12](#), [13](#)

(IPCC), I. P. on C. C. **Climate change 2001**: The third assessment report to the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, New York, 2001. 8

\_\_\_\_\_. **Climate change 2007**: The fourth assessment report to the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, New York, 2007. 8, 9, 11

JUNG, H. J.; BACK, W. The effects of aerosols on the response of a two-dimensional zonally averaged climate model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 38, n. 4, 1987. 9

JUNGE, C. **Air chemistry and radioactivity**. 3. ed. [S.l.]: New York: Academic Press Inc., 1963. 41

KASKAOUTIS, D.; KAMBEZIDIS, H.; HATZIANASTASSIOU, N.; KOSMOPOULOS, P.; BADARINATH, K. Aerosol climatology: on the discrimination of aerosol types over four aernet sites. **Atmospheric Chemistry and Physics Discussions**, v. 7, p. 6357–6411, 2007. 81

KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. **Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS**: Nasa mod04 product report. 1998. 9

KLETT, J. D. Lidar calibration and extinction coefficients. **Applied Optics**, v. 22, n. 4, 1983. 28

\_\_\_\_\_. Inversion with variable backscatter/extinction ratios. **Applied Optics**, v. 24, n. 11, 1985. 28

\_\_\_\_\_. Extinction boundary value algorithms for lidar inversion. **Applied Optics**, v. 25, n. 15, 1986. 28

KOVALEV, V. A.; EICHINGER, W. E. **Elastic lidar**: theory, practice and analysis methods. [S.l.]: New York: John Wiley & Sons, 2004. 640 p. 27

LANDULFO, E.; PAPAYANNIS, A.; ARTAXO, P.; CASTANHO, A. D. A.; FREITAS, A. Z.; SOUZA, R. F.; JUNIOR, N. D. V.; JORGE, M. P. M. P.; SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; MOREIRA, D. S. Synergetic measurements of aerosols over são paulo, brazil using lidar, sunphotometer and satellite data during dry season. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 3, 2003. 14, 35, 40, 58

LANDULFO, E.; PAPAYANNIS, A.; FREITAS, A. Z. de; JR, N. D. V.; SOUZA, R. F.; GONÇALVES, A.; CASTANHO, A. D. A.; ARTAXO, P.; SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; MOREIRA, D. S.; JORGE, M. P. M. P. Tropospheric aerosol observations in são paulo, brazil using a compact lidar system. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 13, 2005. 15

LANDULFO, E.; TORRES, A.; LARROZA, E.; LOPES, F.; NAKAEMA, W.; UEHARA, S.; JESUS, W.; SAWAMURA, P.; CARRILO, A.; JORGE, M.; MARANI, R.; MARIANO, G. Midterm aerosol vertical profiling over an urban area (são paulo, brazil). In: AIR & WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, 2008, Moab. **Proceedings of aerosol and atmospheric optics**. Moab,Utah-Estados Unidos. 77

LARA, L. B. L. S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; KRUSCHE, A.; AYERS, G. P.; FERRAZ, E. S. B.; BALLESTER, M. V. Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the piracicaba river basin, southeast brazil. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 29, 2001. 2, 3

LARA, L. L.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; CAMARGO, P. B.; VICTORIA, R. L.; VICTORIA, E. S. B. Properties of aerosol from sugar-cane burning emissions in southeastern brazil. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 26, 2005. 2, 3, 10

LOPES, F.; MARIANO, G.; LANDULFO, E.; TORRES, A.; JESUS, W. de; NAKAEMA, W.; LARROZA, E.; UEHARA, S.; SAWAMURA, P.; JORGE, M. Midterm pollution monitoring with a backscattering lidar, sunphotometer, and air quality indexing stations. In: SPIE. **Proceedings...** [S.I.], 2008. v. 7111. 77

MEASURES, R. M. **In laser remote sensing fundamentals and applications**. [S.I.]: Krieger Publishing Company, 1992. 521 p. 27

MERRIL, J. T.; BLACK, R.; BOUDRA, D. Techniques of lagrangian trajectory analysis in isentropic coordinates. **Monthly Weather Review**, v. 114, n. 3, 1986. 19

METEOROLOGIA, I. I. nacional de. **Gráficos Climatológicos**. 11 2008. Acesso em: 20 de novembro de 2008. 69

- NOBRE, C. A.; MATTOS, L. F.; DEREZYNSKI, C. P.; TARASOVA, T. A.; TROSNIKOV, I. Overview of atmospheric conditions during the smoke, clouds and radiation-brazil (scar-b) field experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, 1998. [9](#)
- OTERO, L.; RISTORI, P.; HOLBEN, B.; QUEL, E. Detection of biomass burning aerosols in córdoba, argentina, using the aeronet / nasa data base. **Óptica pura y Aplicada**, v. 37, n. 3, p. 3359–3363, 2004. [79](#), [81](#)
- OWEN, R. C. **A Climatological Study of Transport to the PICO-NARE Site Using Atmospheric Backward Trajectories**. Dissertação (Mestrado) — Michigan Technological University, Houghton, MI - EUA, 2003. [21](#)
- PICKERING, K. E.; THOMPSON, A. M.; MCNAMARA, D. P.; SCHOEBERL, M. R.; FUELBERG, H. E.; JR, R. O. L.; WATSON, M. V.; FAKHRUZZAMAN, K.; BACHMEIER, A. S. Trace a trajectory intercomparison, effects of different input analyses. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. D19, 1996. [20](#)
- PRINS, E.; FELTZ, J.; MENZEL, W.; WARD, D. An overview of goes-8 diurnal fire and smoke results for scar-b and 1995 fire season in south america. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, 1998. [7](#), [18](#)
- QUINTÃO, D. S. **Calibração de sistema de radar meteorológico através de dados disdrométricos dos campos de chuva no Nordeste leste do Brasil**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2004. [11](#), [12](#)
- REMER, L.; KAUFMAN, Y. Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, p. 13859–13871, 1998. [80](#)
- RODRIGUEZ, C.; ROCHA, R. da. Does the pollution affect the development of thunderstorms in the city of são paulo? In: **Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing and International Conference on Lightning Physics and Effects**. Florianópolis-Brazil: [s.n.], 2008. [80](#)
- SEINFELD, J.; PANDIS, S. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. [S.l.]: New York: John Wiley & Sons, 1997. [41](#)
- SETZER, A. W.; PEREIRA, M. C. Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. **Ambio**, v. 20, n. 1, 1991. [17](#)

SMIRNOV, A.; HOLBEN, B. N.; ECK, T. F.; DUBOVIK, O.; SLUTSKER, I. Cloud-screening and quality control algorithms for the aernet database.

**Remote Sensing of the Environment**, v. 73, n. 3, 2000. 35

WALLACE, J. M.; HOBBS, P. V. **Atmospheric science**: an introduction survey. 2. ed. [S.l.]: New York: Academic Press., 2006. 24

WANDINGER, U.; MULLER, D.; BOCKMANN, C.; ALTHAUSEN, D.; MATTHIAS, V.; BOSENGER, J.; WEIB, V.; FIEBIG; WENDISCH, M.; STOHL, A.; ANSMANN, A. Optical and microphysical characterization of biomass burning and industrial pollution aerosols from multiwavelength lidar and aircraft measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D21, p. 8125, 2002. 16

WARD, D. E.; SUSOTT, R. A.; KAUFFMANN, J. B.; BABBIT, R. E.; CUMMINS, D. L.; DIAS, B.; HOLBEN, B. N.; KAUFMAN, Y. J.; RASMUSSEN, R. A.; SETZER, A. W. Smoke and fire characteristics for cerrado and deforestation burns in brazil- base-b experiment. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D13, 1992. 9

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. [S.l.]: New York: Academic Press, 2006. 627 p. 21

YAMASOE, M. A.; ARTAXO, P.; MIGUEL, A. H.; ALLEN, A. G. Chemical composition of aerosols particles from direct emissions of vegetation fires in the amazon basin: watersoluble species and trace elements. **Atmospheric Environment**, v. 34, n. 10, 2000. 7

YAMASOE, M. A.; KAUFMAN, Y. J.; DUBOVIK, O.; REMER, L. A.; HOLBEN, B. N.; ARTAXO, P. Retrieval of the real part of the refractive index of aerosols from sun/sky radiometers during scar-b. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, 1998. 11

ZAMPERLINI, G. C. M.; SANTIAGO-SILVA, M.; VILEGAS, W. Solid-phase extraction of sugar cane soot extract for analysis by gas chromatography with flame ionization and mass spectrometric detection. **Journal of Chromatography A**, v. 889, n. 1-2, 2000. 1

## APÊNDICE A - Programa de processamento dos dados do sistema MSP-LIDAR1 em São Paulo-SP

O programa de análise utilizado para processamento dos dados do LIDAR oriundos do sistema MSP-Lidar 1 pode ser visualizado através da figura A.1. Pode-se observar a tela de entrada do programa de análise que utiliza o método de inversão de Klett para a solução da equação LIDAR. As letras indicam os dados de entrada, detalhados abaixo e os gráficos de saída são mostrados por números, também detalhados abaixo.

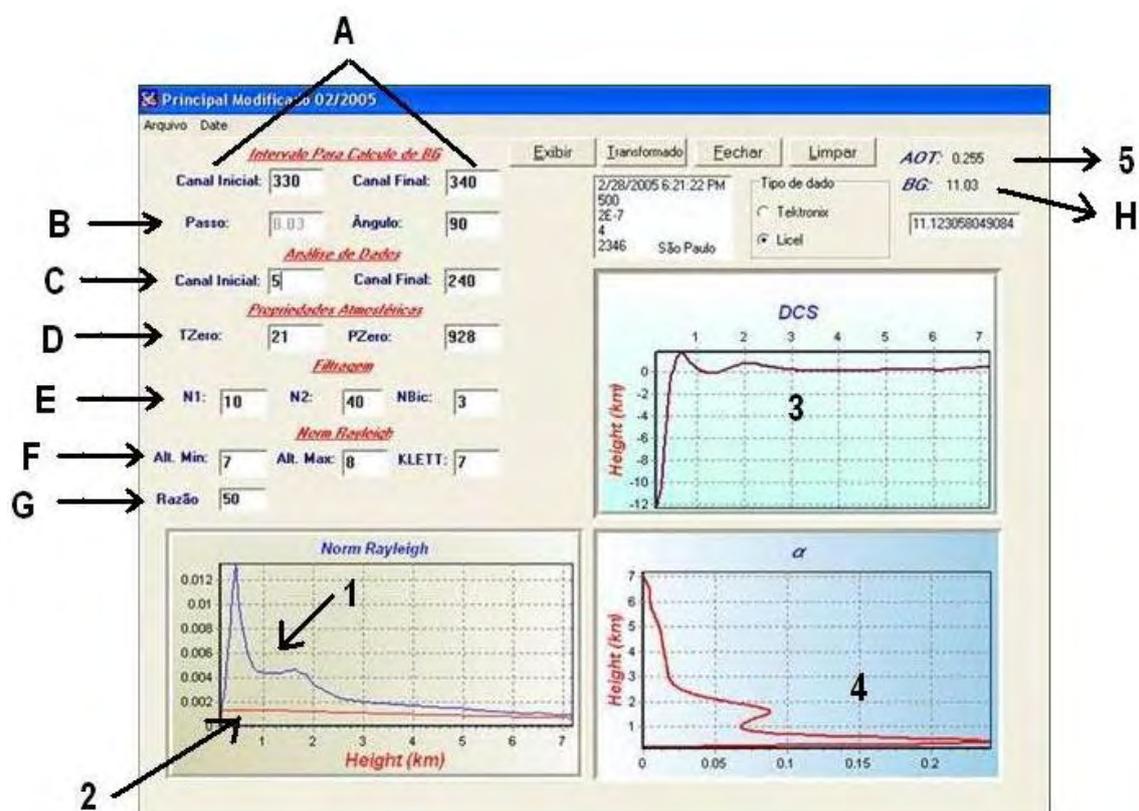


Figura A.1 - Tela de entrada do programa de análise que utiliza o método de inversão de Klett. As letras indicam os dados de entrada e os números indicam os dados de saída

### DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA

A - Canais de entrada para cálculo do Background - nesses itens insere-se os canais do sistema Lidar e o programa irá calcular o valor de fundo. Dessa forma,

deve-se inserir canais que não devem possuir aerossóis.

B - Passo ou resolução, de 0,015 a 0,060 km. Nos dados utilizados na campanha de 2007 foi utilizado um valor fixo de 0,015km.

C - Região de cálculo - Canais que o programa de análise irá usar para calcular a espessura óptica.

D - temperatura e pressão na superfície - Utilizados dados da estação meteorológica do campus da USP.

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) - First Guess da Razão Lidar

H - valor de BG (background) - Calculado através do item A.

### **DADOS DE SAÍDA**

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 - Espessura óptica atmosférica - Deve ser a mais próxima possível dos dados provenientes do fotômetro solar da AERONET.

## Anexos

### A.1 Anexo A - Agrupamentos para verão, outono e primavera nos níveis de 925mb, 700mb e 500mb

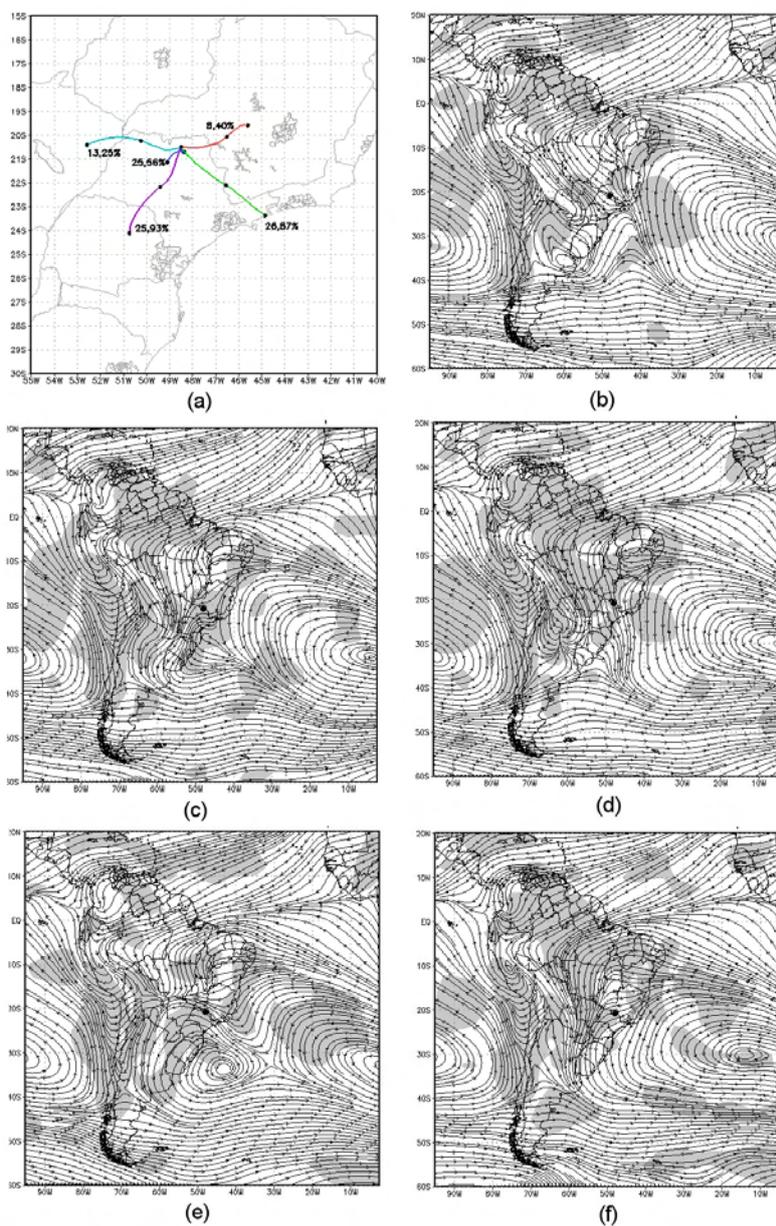


Figura A.1 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o verão em 925hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

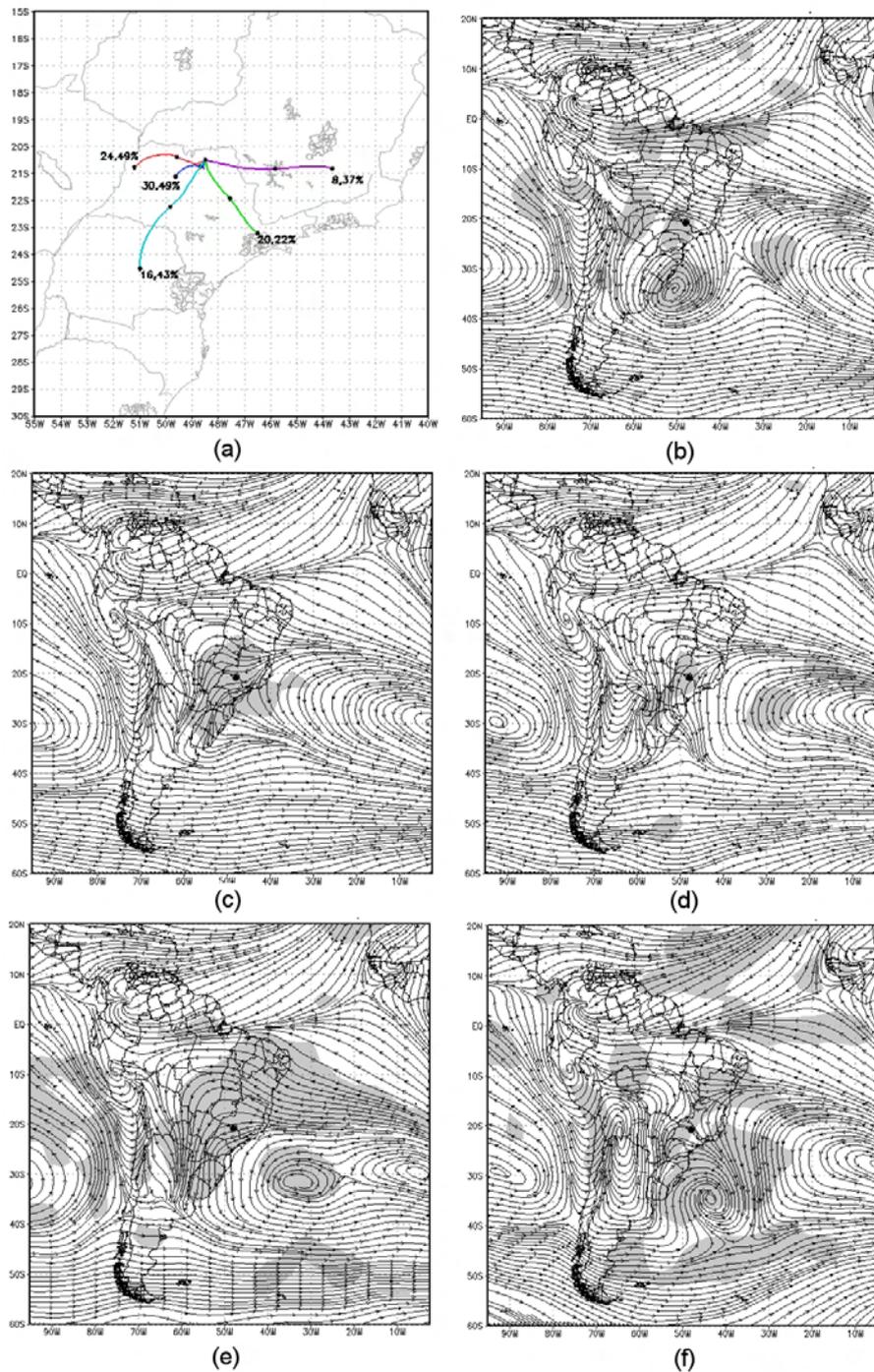


Figura A.2 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o outono em 925hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

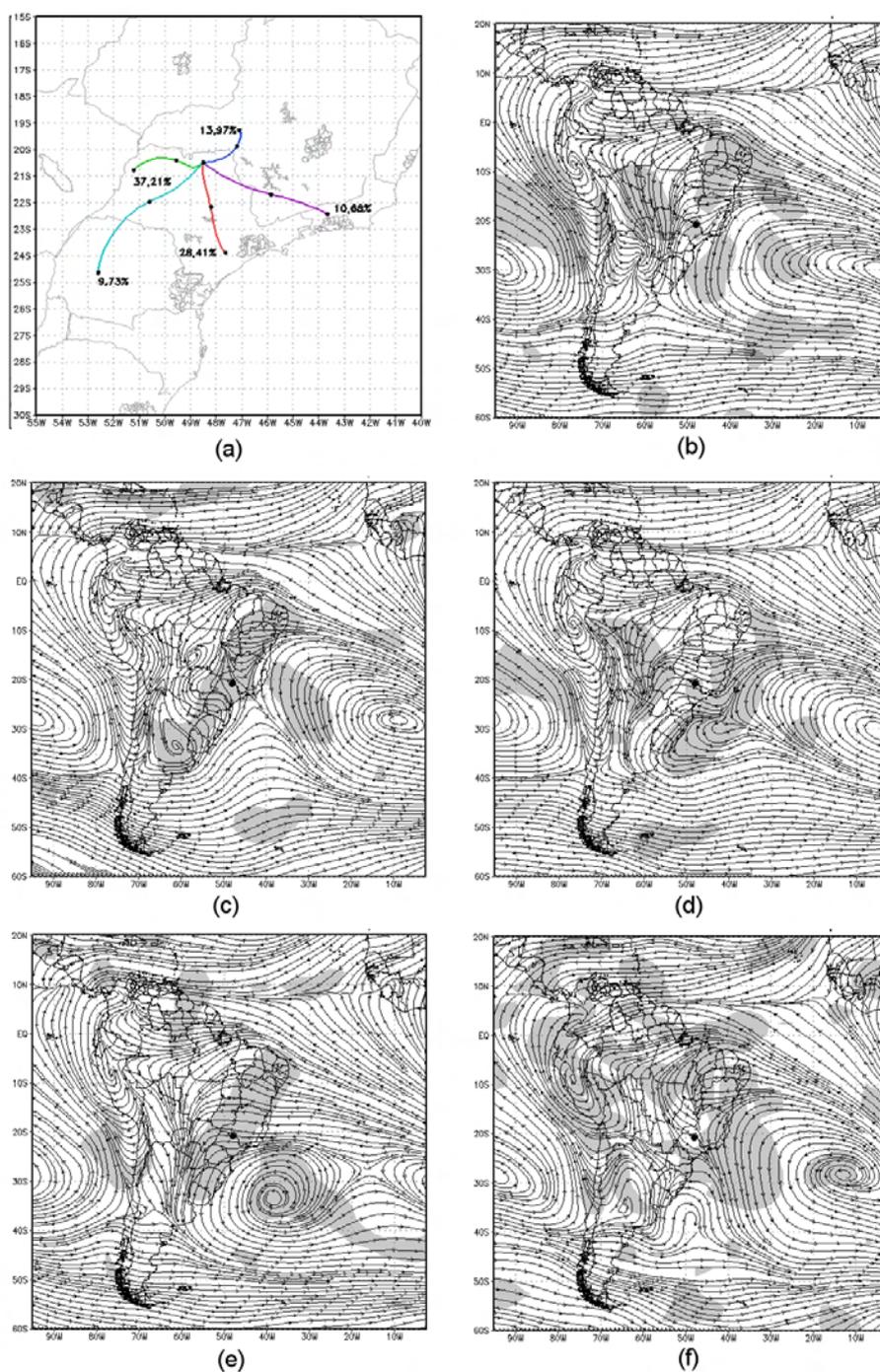


Figura A.3 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o primavera em 925hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

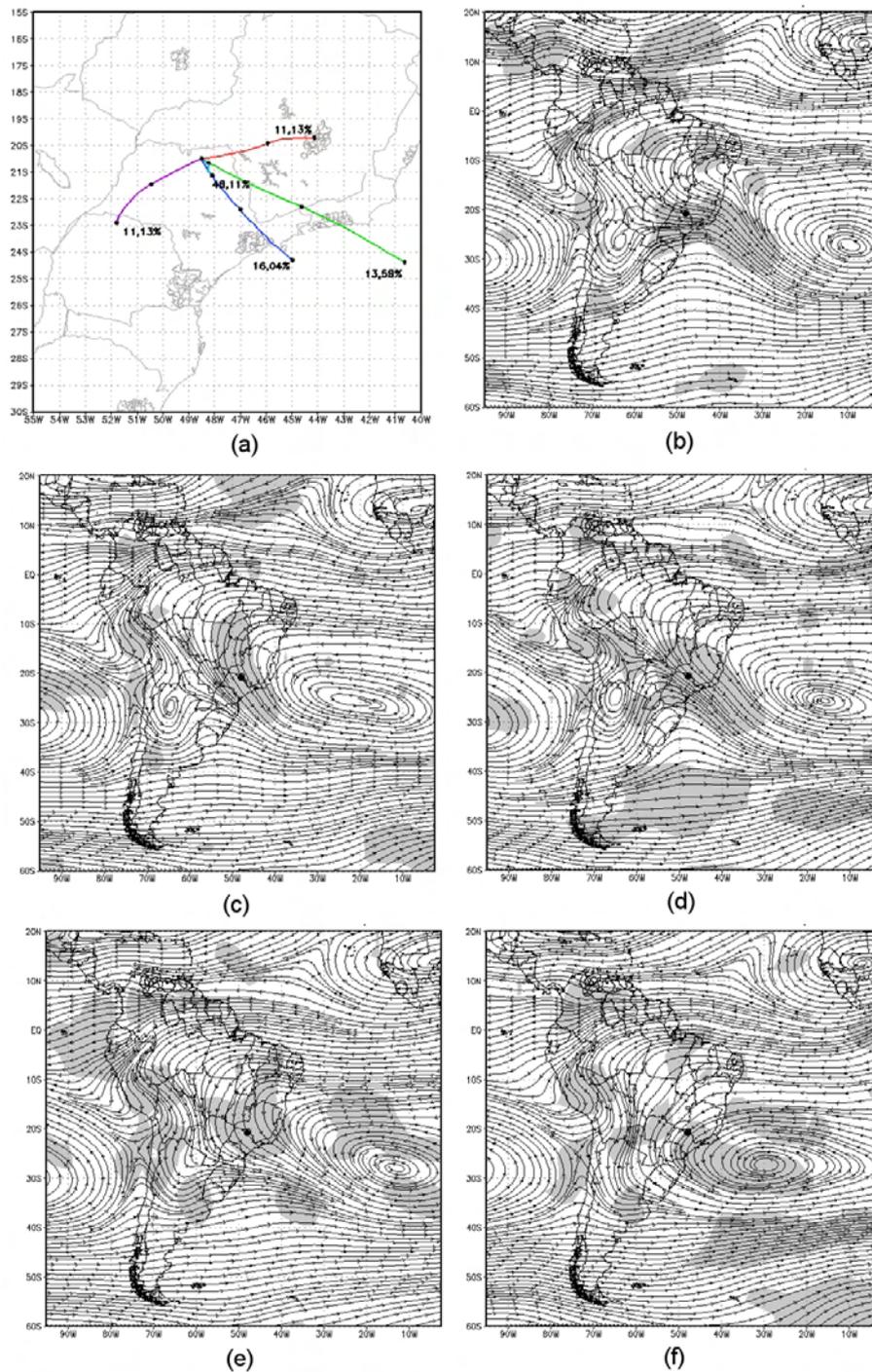


Figura A.4 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o verão em 700hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

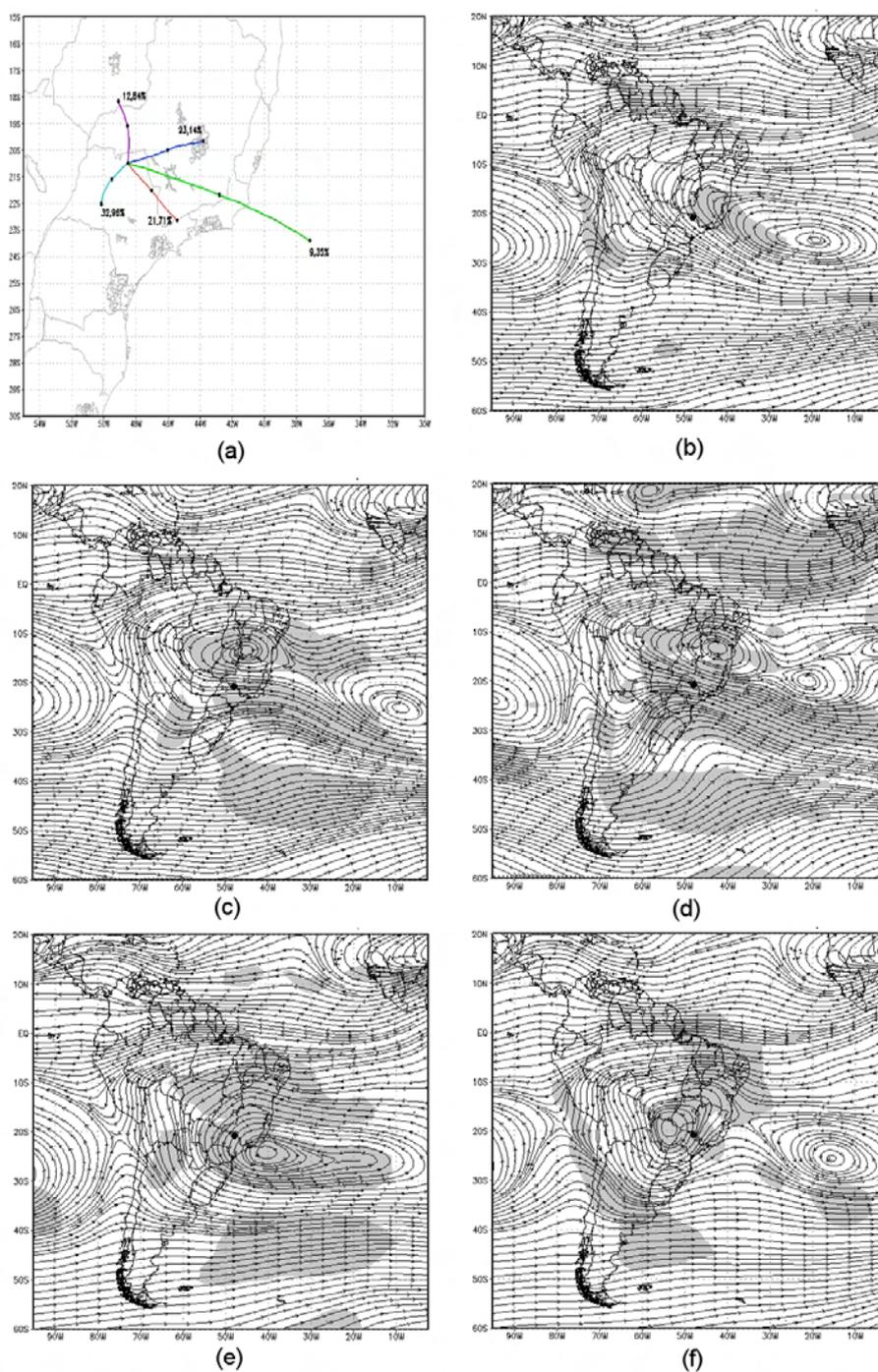


Figura A.5 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o outono em 700hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

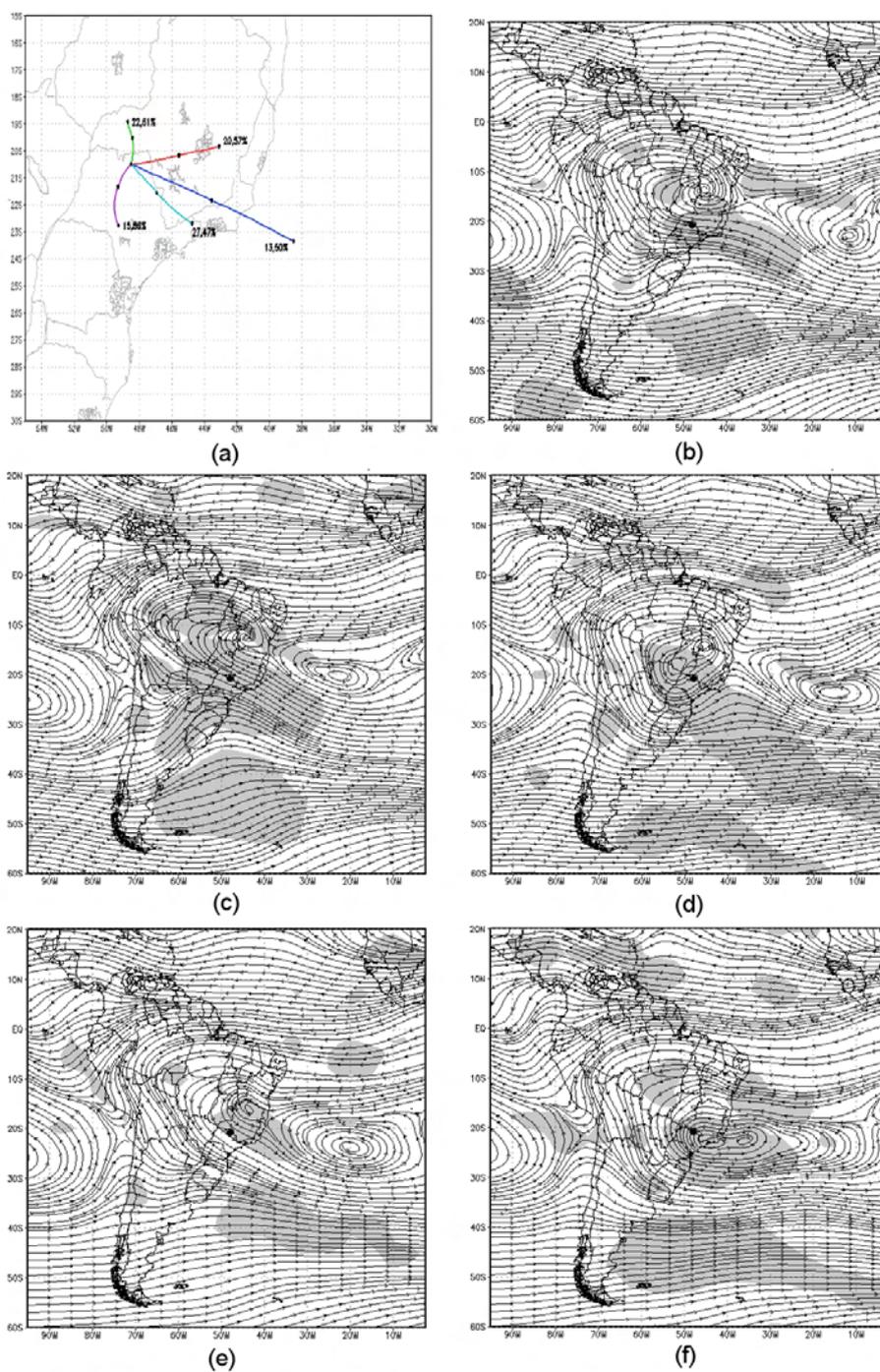


Figura A.6 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o primavera em 700hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

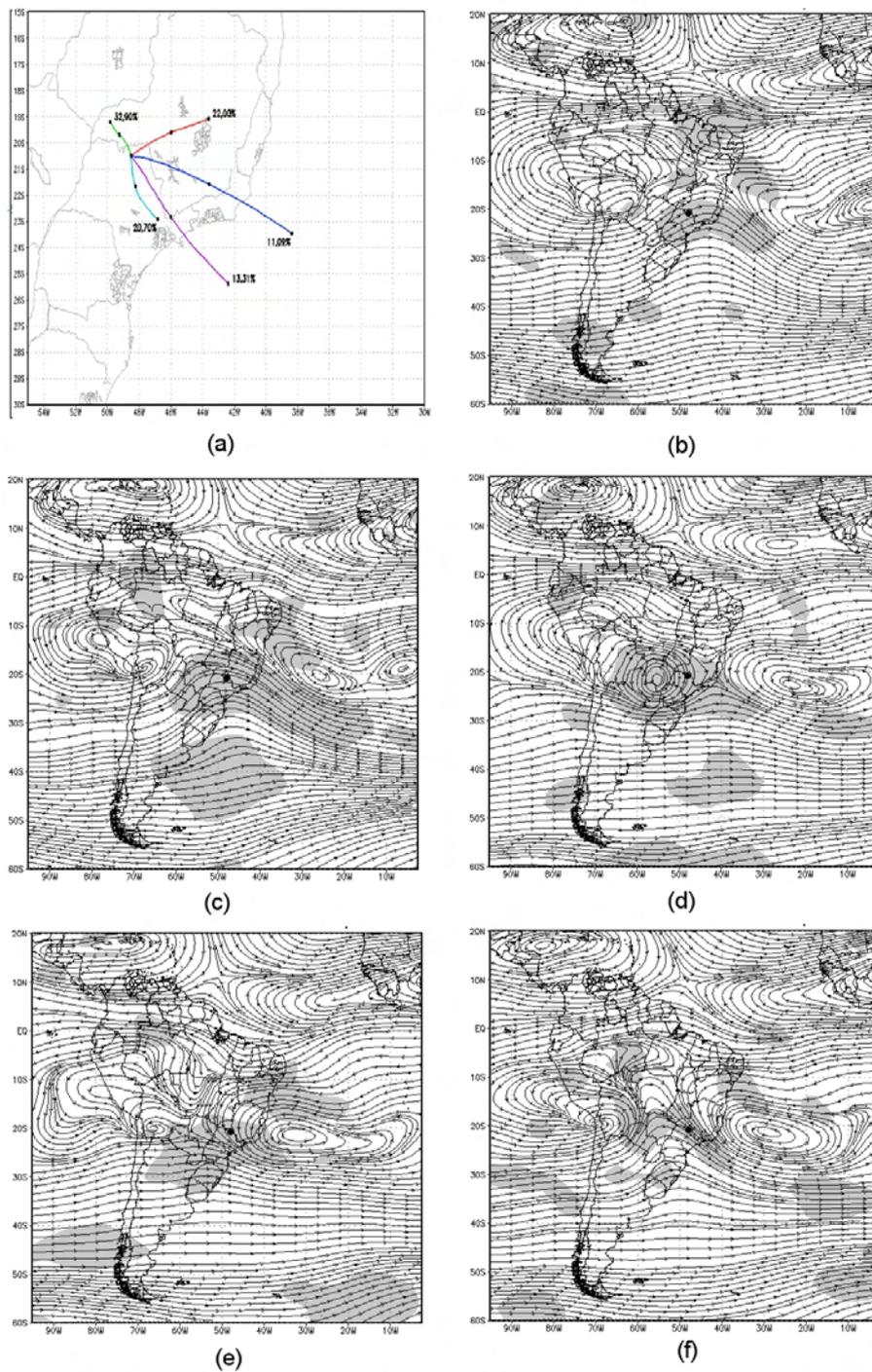


Figura A.7 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o verão em 500hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

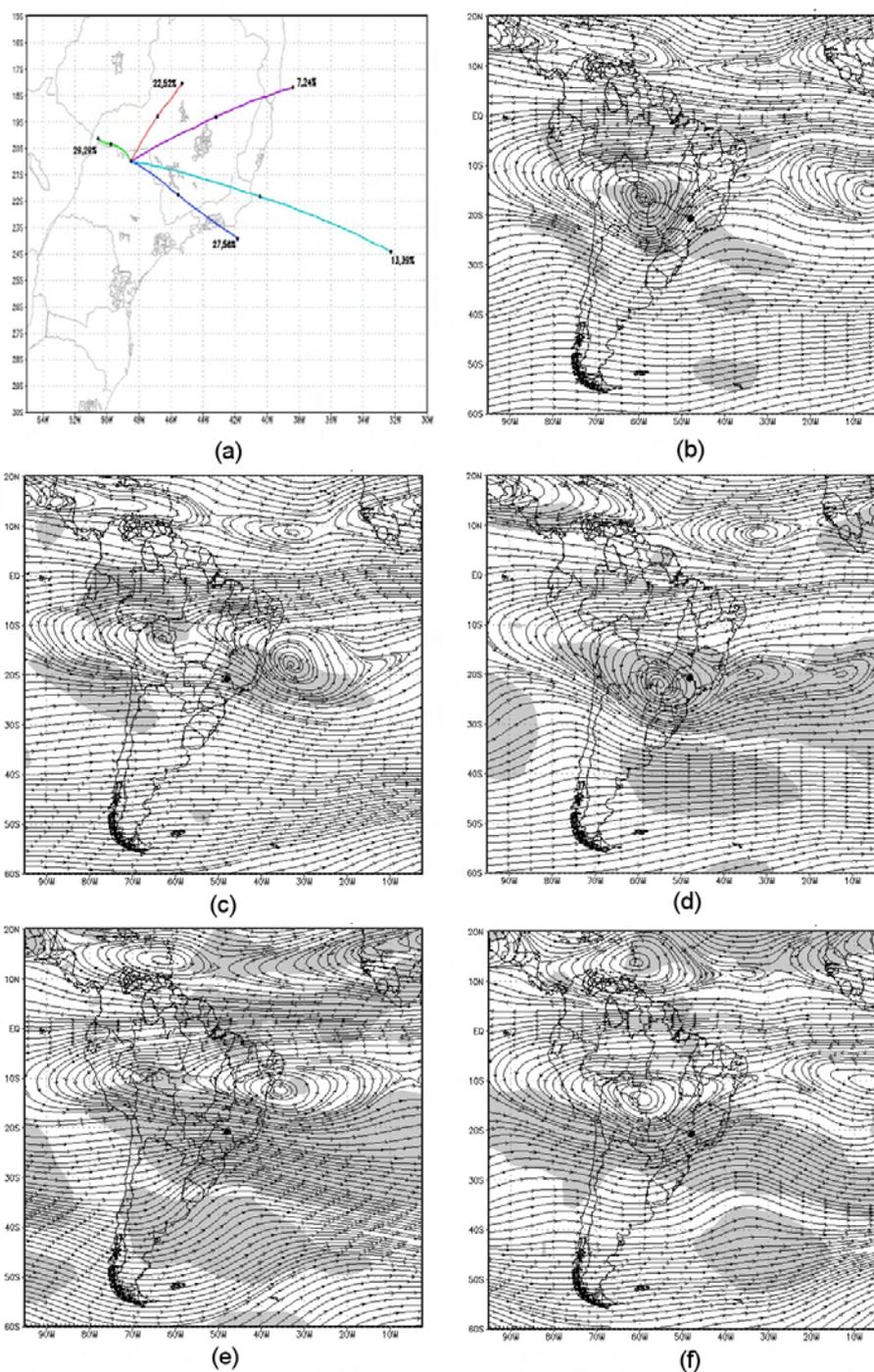


Figura A.8 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o outono em 500hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

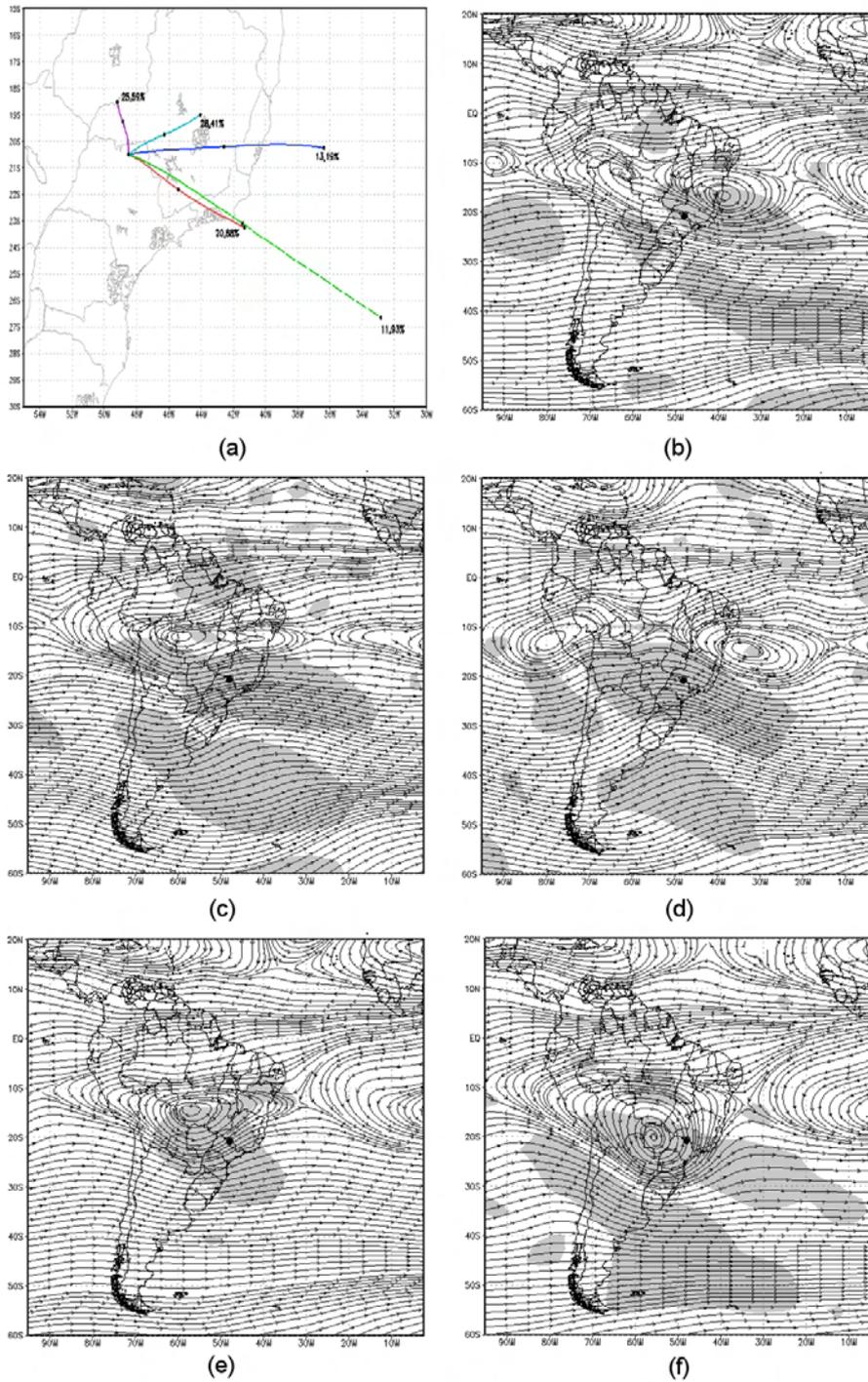


Figura A.9 - Trajetórias médias (a) da parcelas de ar para o primavera em 500hPa (24h) forward e campo de linhas de corrente para seus respectivos grupos com significância estatística acima de 95% (b-grupo 1 (vermelho). c-grupo 2 (azul escuro); d-grupo 3 (verde); e-grupo 4 (azul claro); f-grupo 5 (violeta))

## A.2 Anexo B - Dias com detecção de queimadas pelo sistema Lidar em São Paulo

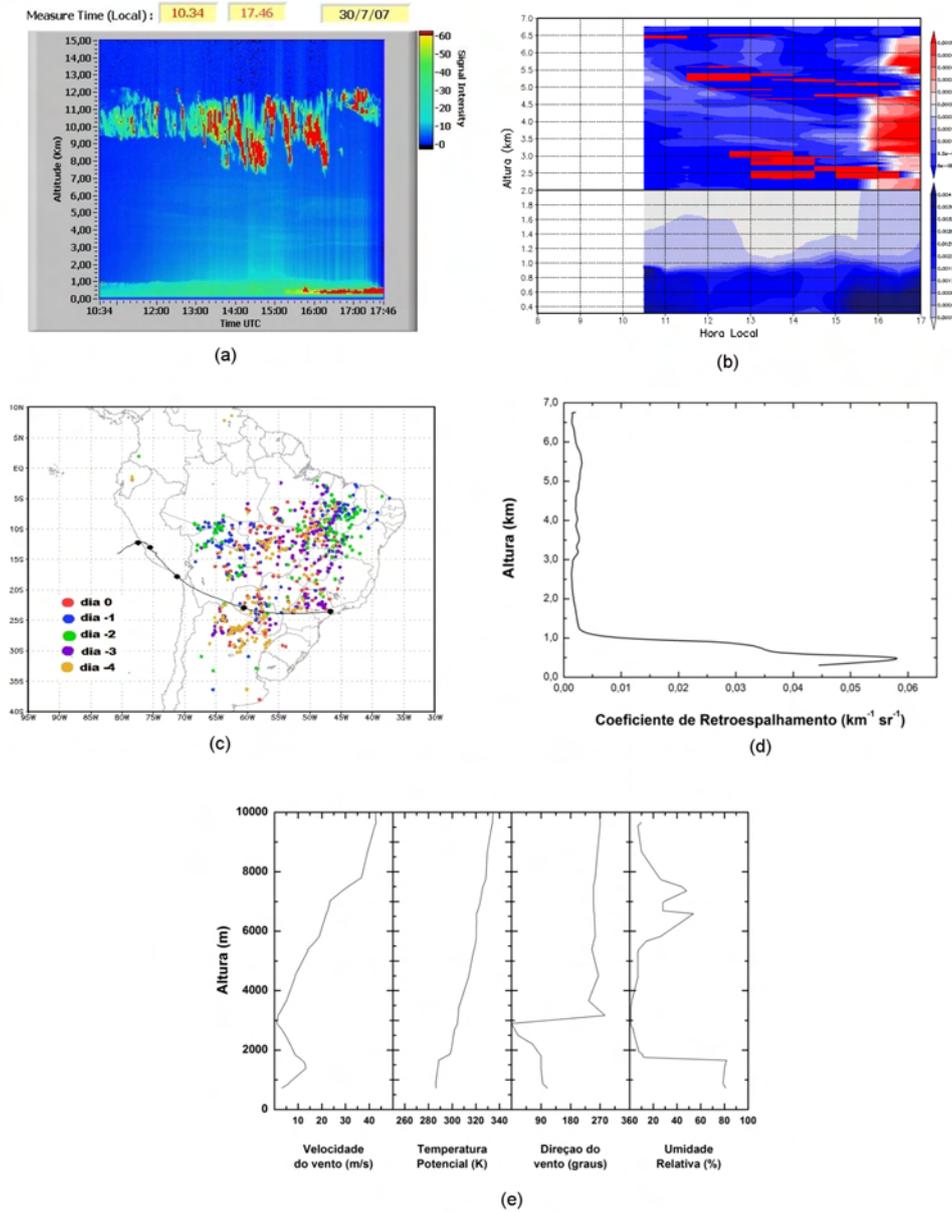
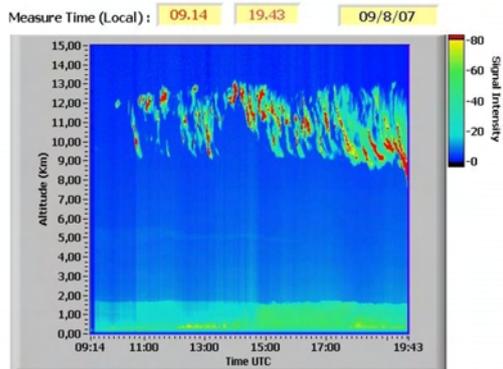
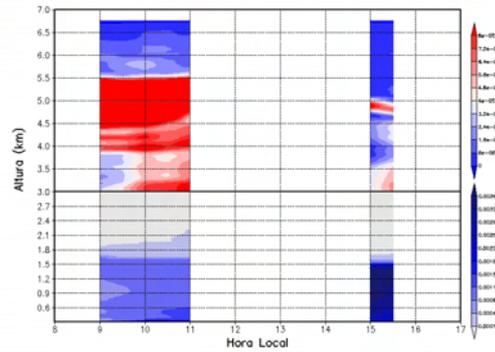


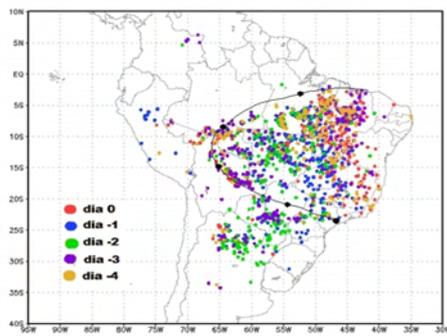
Figura A.10 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 18Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 30 de julho de 2007



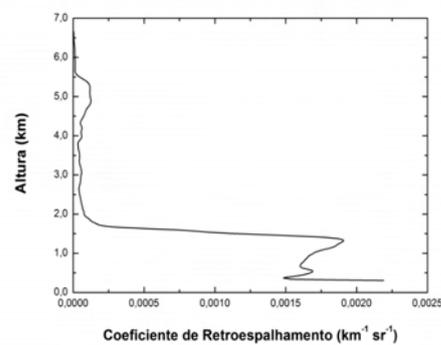
(a)



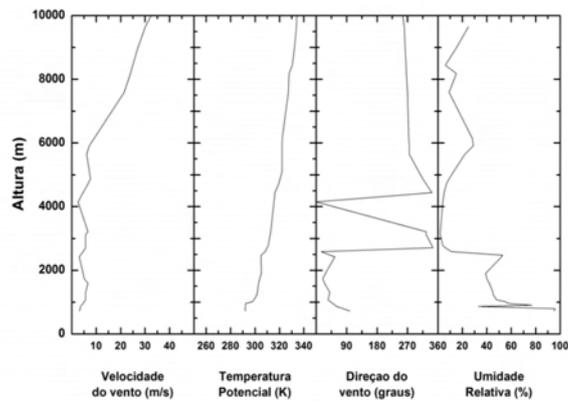
(b)



(c)

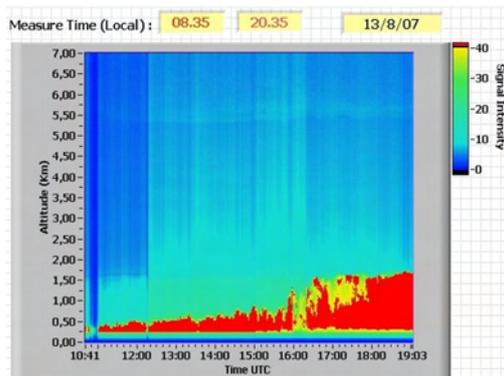


(d)

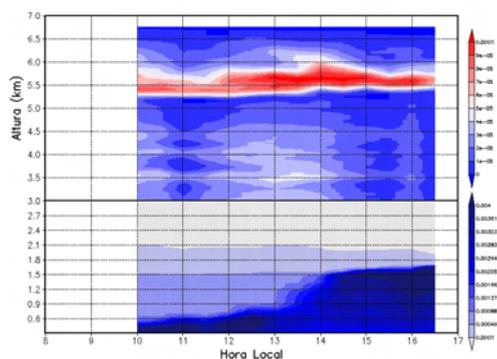


(e)

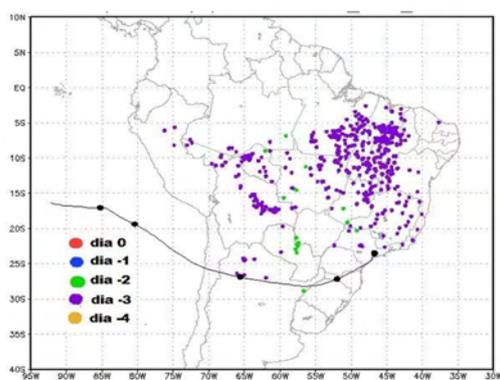
Figura A.11 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retrospalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 16Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retrospalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 09 de agosto de 2007



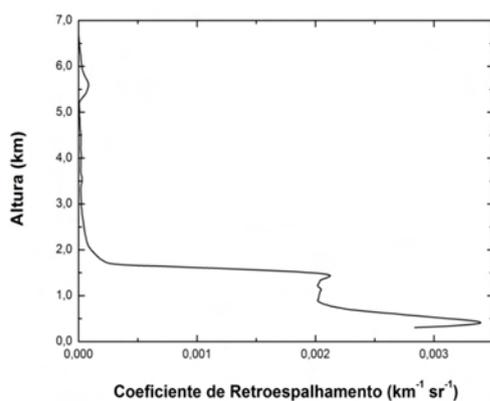
(a)



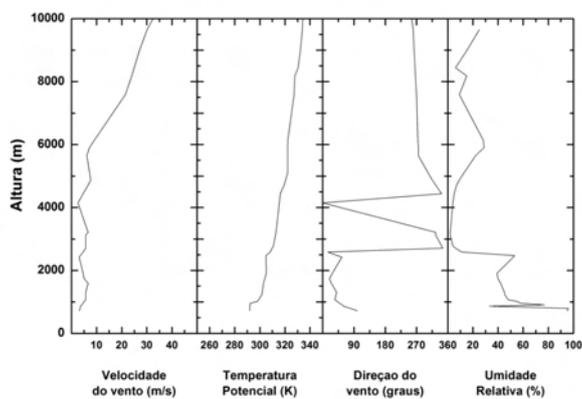
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura A.12 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retrospalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 16Z em 6km de altura; (d) Coeficiente de retrospalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 13 de agosto de 2007

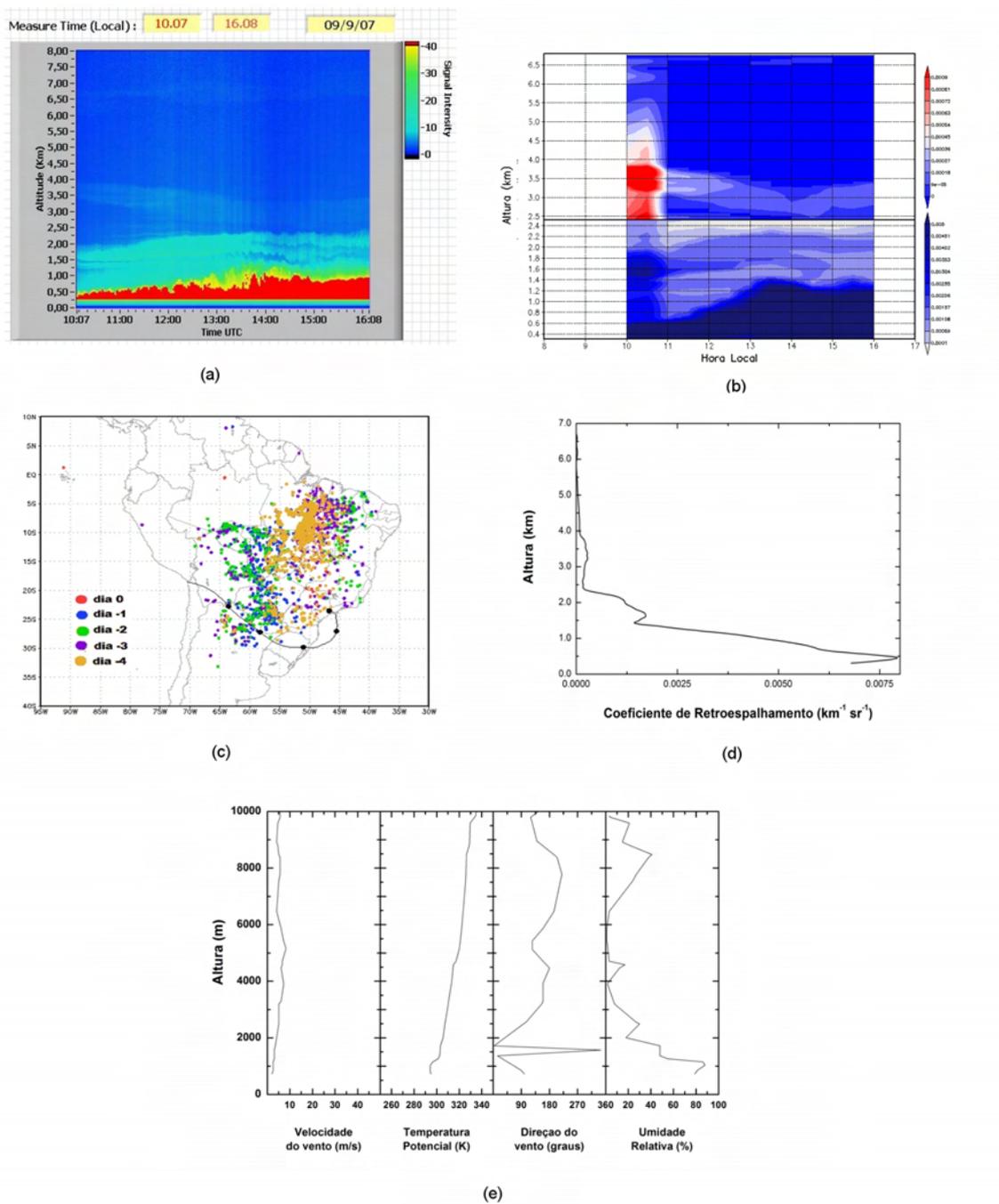
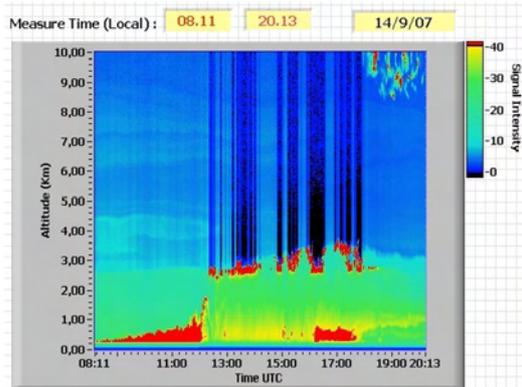
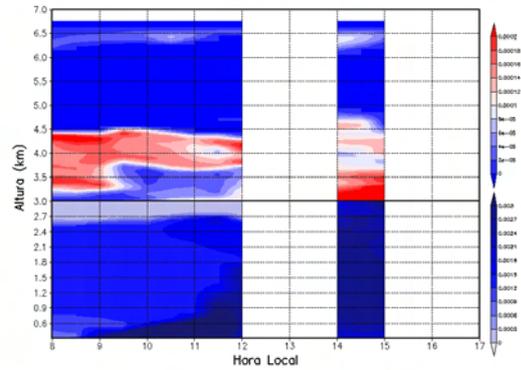


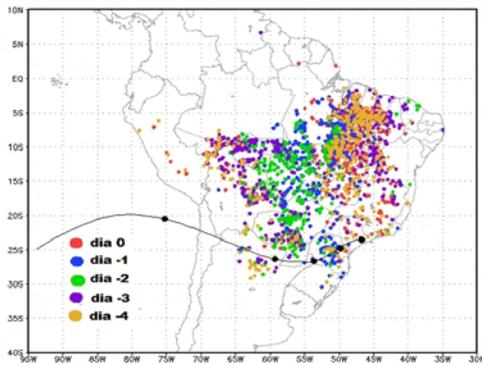
Figura A.13 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 4km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 09 de setembro de 2007



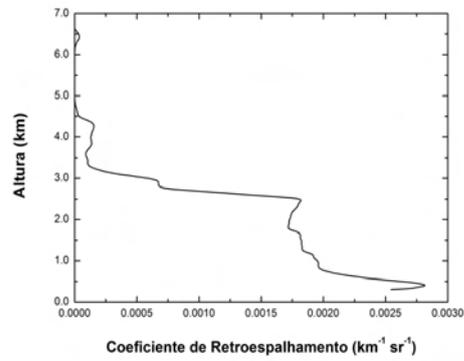
(a)



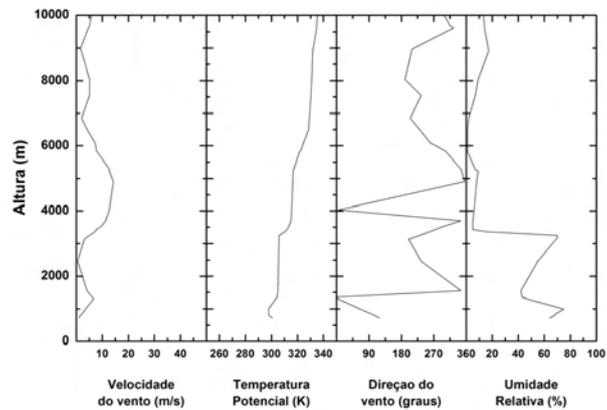
(b)



(c)

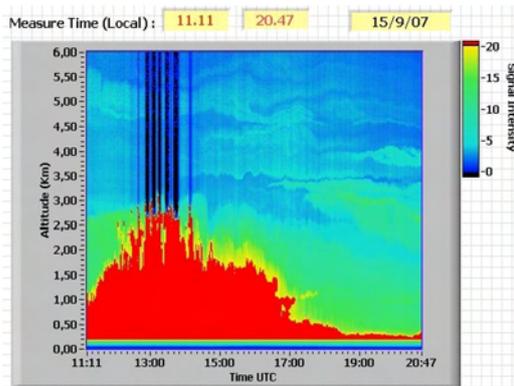


(d)

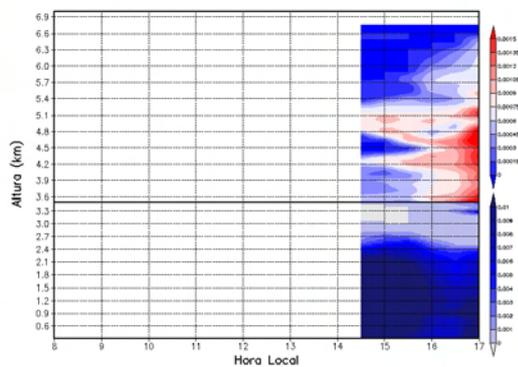


(e)

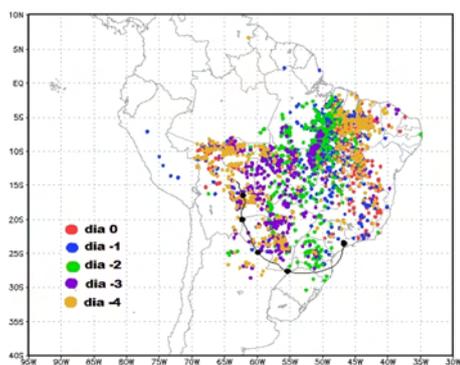
Figura A.14 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retrospalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 8km de altura; (d) Coeficiente de retrospalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 14 de setembro de 2007



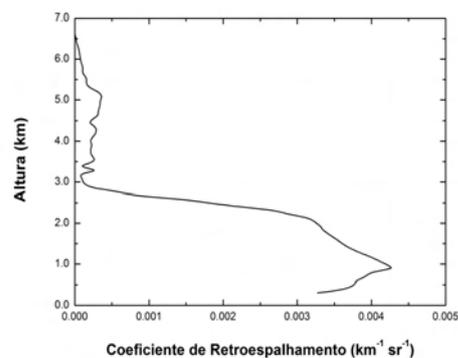
(a)



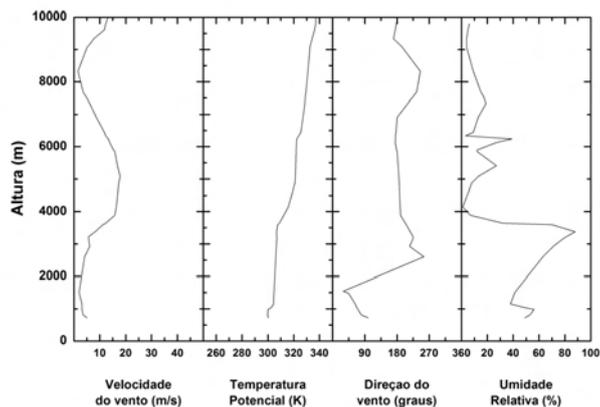
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura A.15 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retrospalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 18Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retrospalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 15 de setembro de 2007

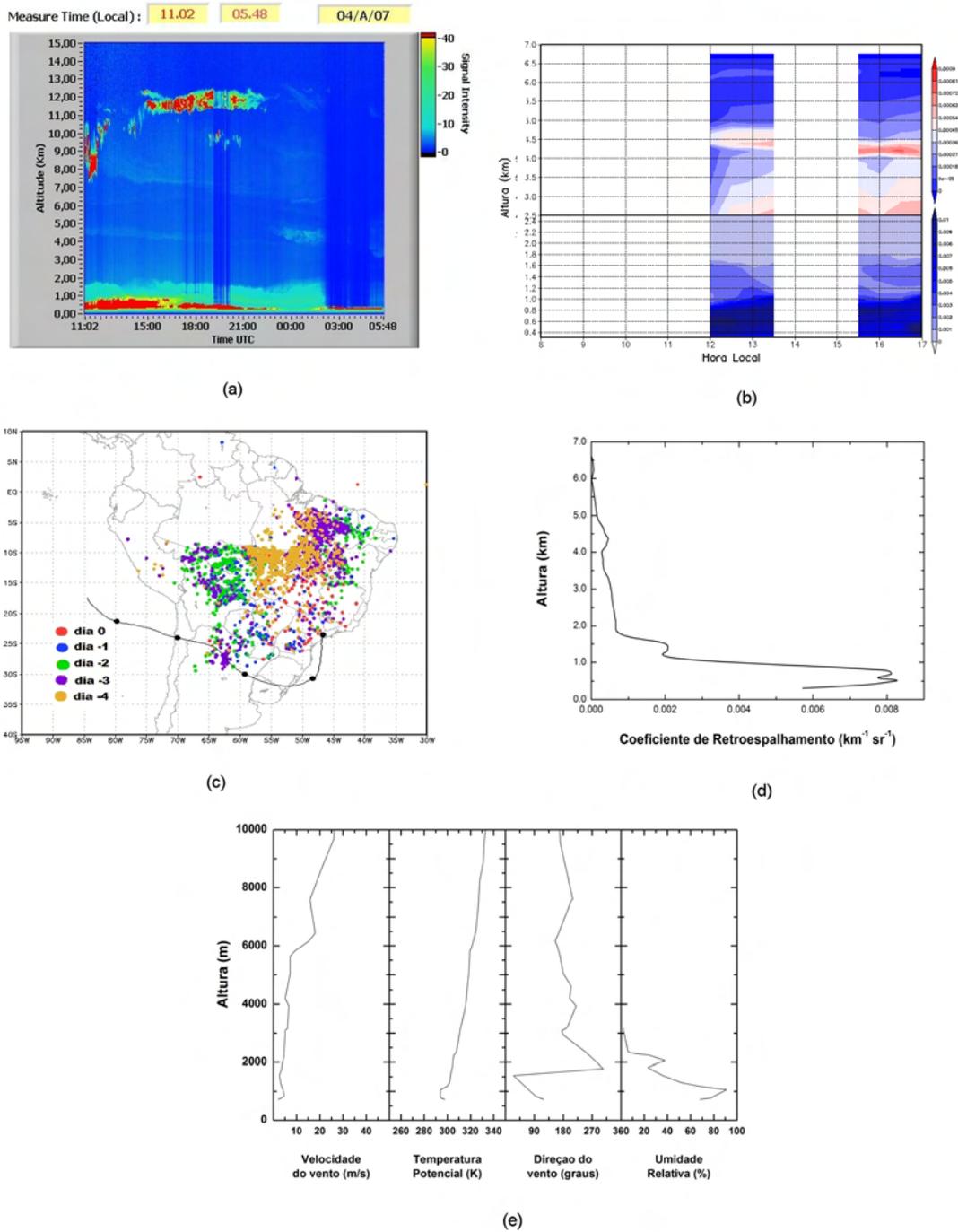


Figura A.16 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retrospalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 18Z em 5km de altura; (d) Coeficiente de retrospalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 04 de outubro de 2007

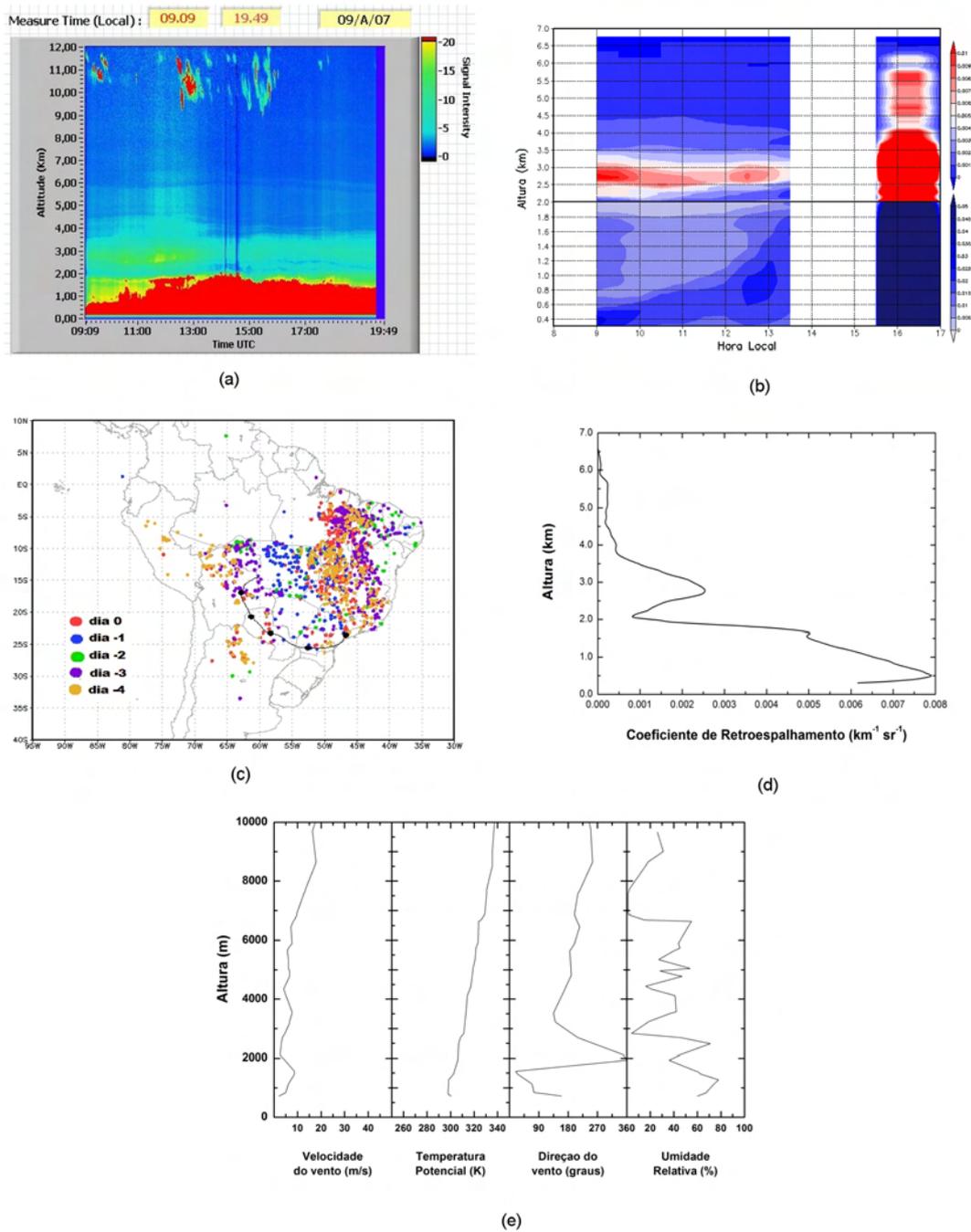


Figura A.17 - (a) Imagem do sistema Lidar; (b) Perfil de coeficiente de retroespalhamento; (c) Focos de queimadas e trajetória reversa à partir de 15Z em 6km de altura; (d) Coeficiente de retroespalhamento médio para o dia e (e) Radiosondagem do aeroporto campo de Marte para o dia 09 de outubro de 2007

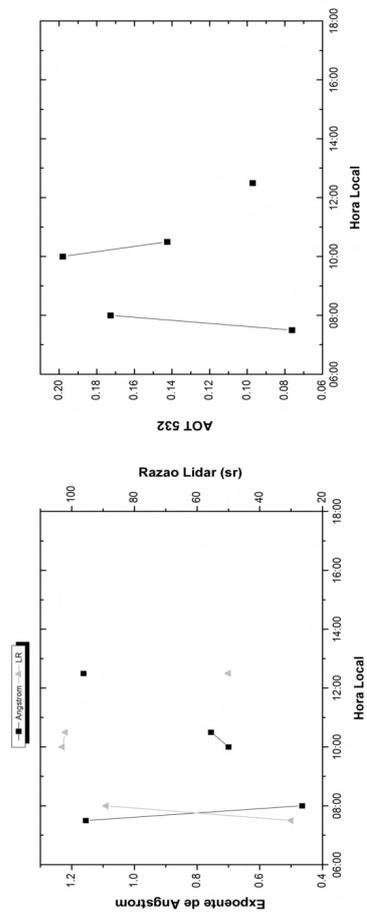


Figura A.18 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 30 de julho de 2007

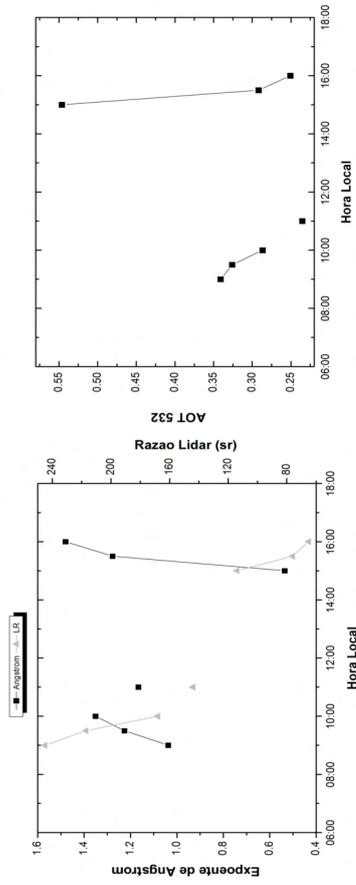


Figura A.19 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 04 de agosto de 2007

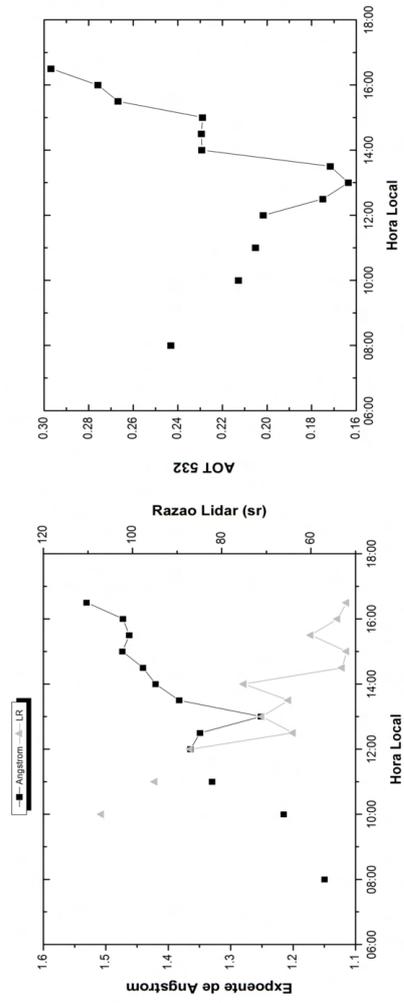


Figura A.20 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 13 de agosto de 2007

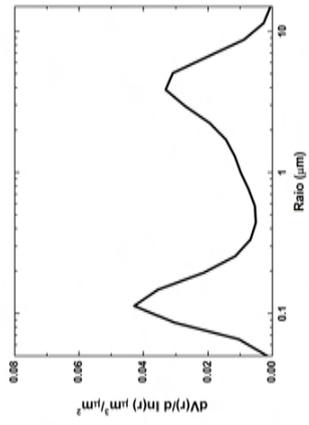


Figura A.21 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 13 de agosto de 2007

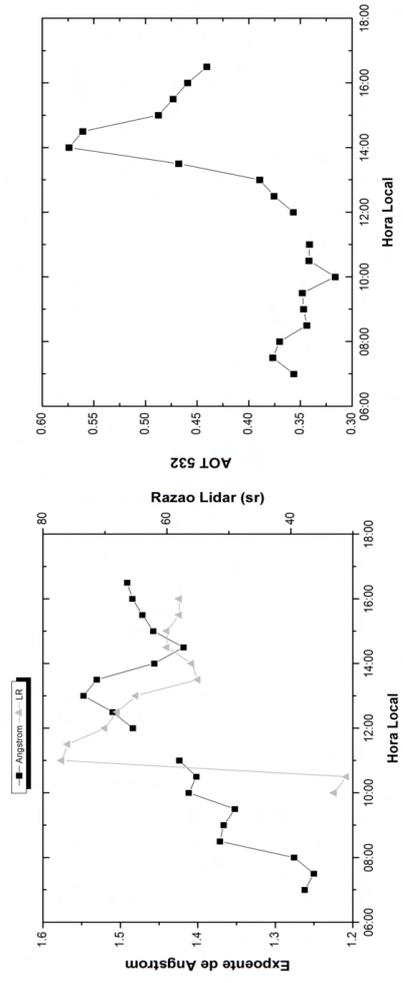


Figura A.22 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 09 de setembro de 2007

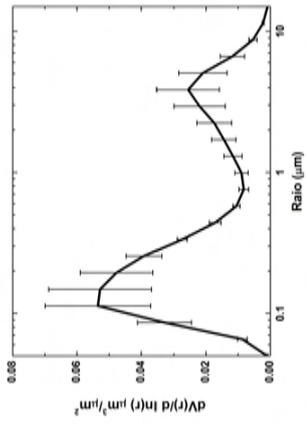


Figura A.23 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 09 de setembro de 2007

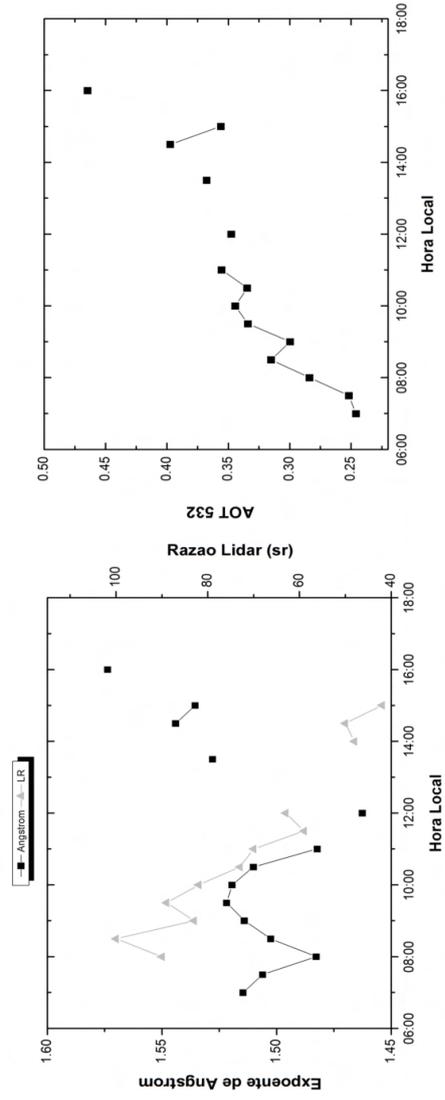


Figura A.24 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 14 de setembro de 2007

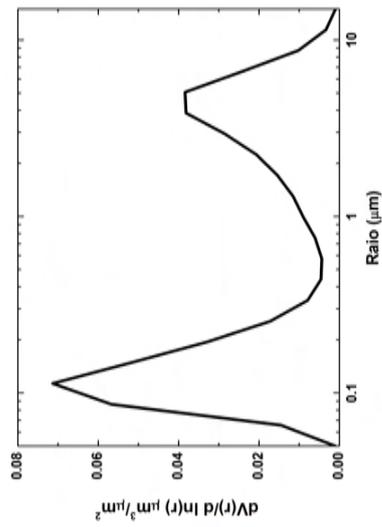


Figura A.25 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 14 de setembro de 2007

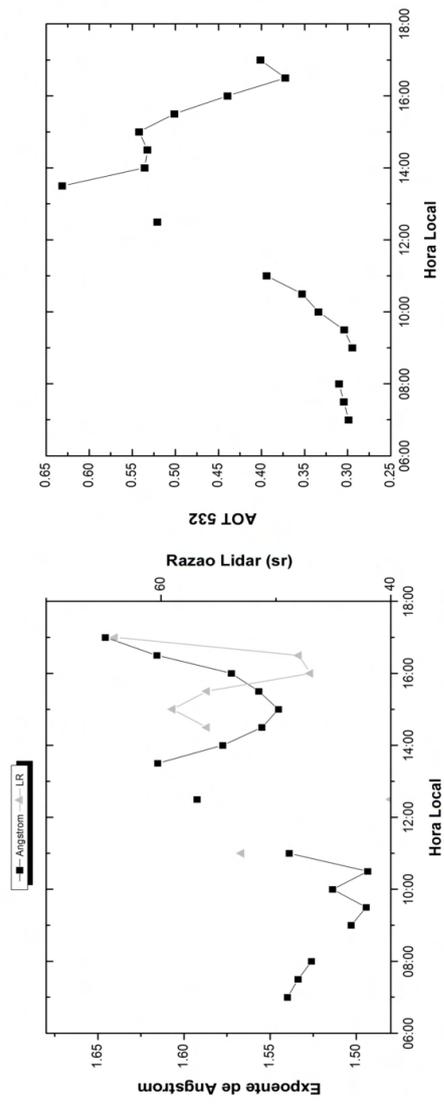


Figura A.26 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 15 de setembro de 2007

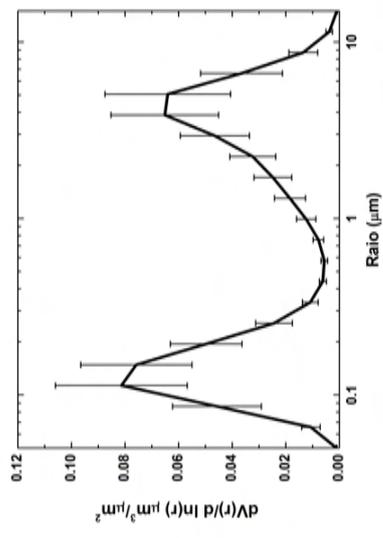


Figura A.27 - Distribuição de tamanho de aerossóis ( $dV(r)/d \ln(r) \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) para o dia 15 de setembro de 2007

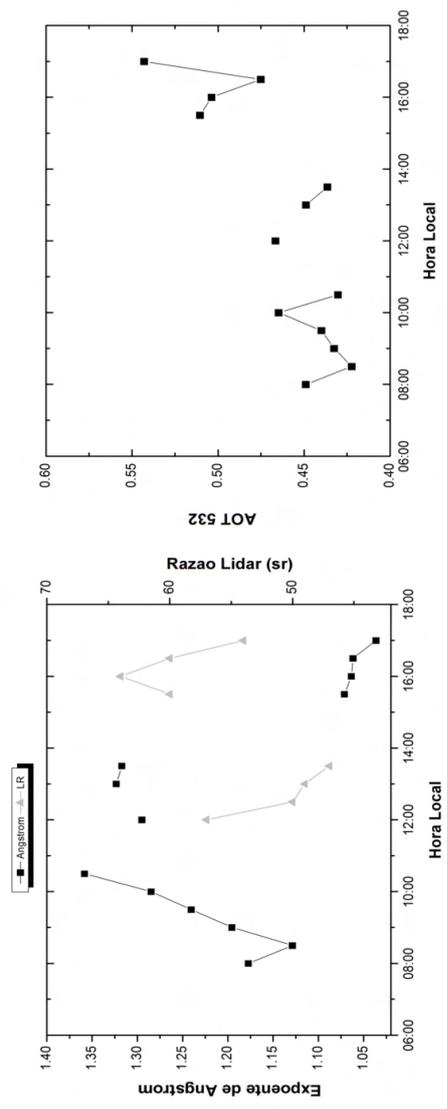


Figura A.28 - Expoente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 04 de outubro de 2007

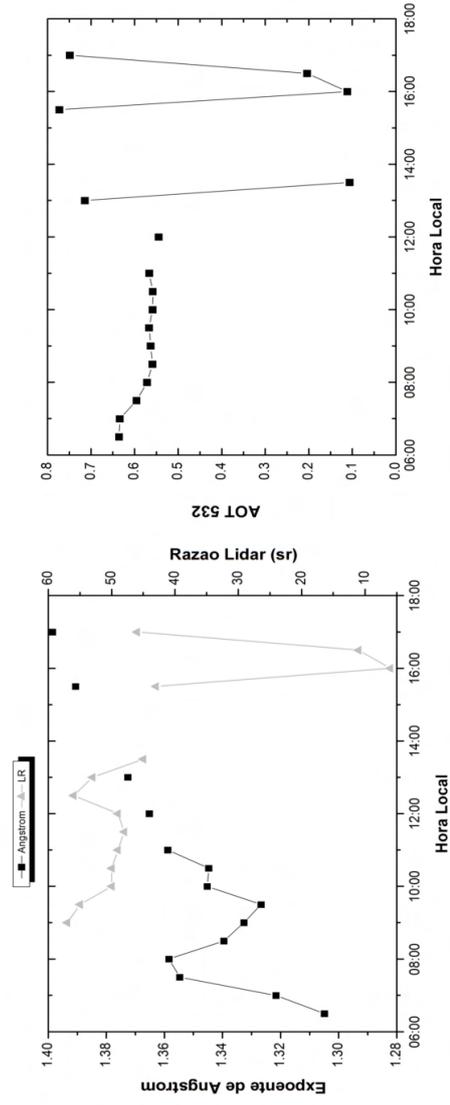


Figura A.29 - Exponente de Angstrom, Razão Lidar e AOT 532nm a partir de dados da AERONET em 09 de outubro de 2007