



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15747-TDI/1492

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS CANAIS AIRS ÀS ALTERAÇÕES NA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO NA ATMOSFERA

Rudinei Martins de Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Fernando Manoel Ramos e Rodrigo Augusto Ferreira de
Souza, aprovada em 27 de fevereiro de 2009

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.09.16.31>>

INPE
São José dos Campos
2009

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

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)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15747-TDI/1492

ESTUDO DA SENSIBILIDADE DOS CANAIS AIRS ÀS ALTERAÇÕES NA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO NA ATMOSFERA

Rudinei Martins de Oliveira

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Fernando Manoel Ramos e Rodrigo Augusto Ferreira de
Souza, aprovada em 27 de fevereiro de 2009

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/02.09.16.31>>

INPE
São José dos Campos
2009

O4e Oliveira, Rudinei Martins de.
Estudo da sensibilidade dos canais AIRS às alterações na concentração de monóxido de carbono na atmosfera / Rudinei Martins de Oliveira. – São José dos Campos : INPE, 2009.
100p. ; (INPE-15747-TDI/1492)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientadores : Drs. Fernando Manoel Ramos e Rodrigo Augusto Ferreira de Souza.

1. Monóxido de carbono. 2. Efeito estufa. 3. Mudanças climáticas. 4. Satélites artificiais. 5. AIRS. 6. Modelo direto. 7. Modelo inverso. I.Título.

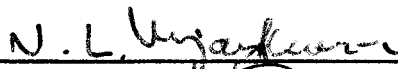
CDU 551.5

Copyright © 2009 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.

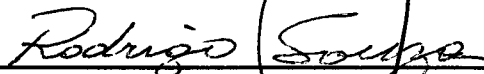
Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material 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 Mestre em
Computação Aplicada

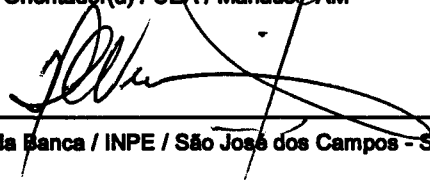
Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar


Presidente / INPE / SJCampos - SP

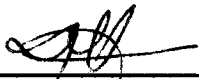
Dr. Rodrigo Augusto Ferreira de Souza


Orientador(a) / UEA / Manaus - AM

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

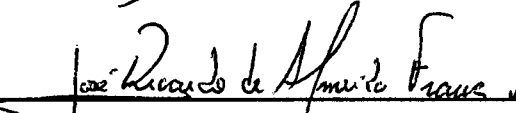
Dra. Simone Marilene Sievert da Costa


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Elcio Hideiti Shiguemori


Convidado(a) / IEAv/CTA / São José dos Campos - SP

Dr. José Ricardo de Almeida França


Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

Aluno (a): Rudinei Martins de Oliveira

São José dos Campos, 27 de fevereiro de 2009

*“Os que esperam no SENHOR renovam as suas forças, sobem com
asas como águias, correm e não se cansam, caminham e não se
fatigam”.*

ISAÍAS 40:31

*A minha mãe Maria Rosa, a meu pai Sebastião, a minha
tia Joana (in memoria) e as minhas irmãs Dalila e Júnia.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo seu infinito amor e bondade.

Aos meus orientadores Fernando Manoel Ramos e Rodrigo Augusto F. de Souza pelo incentivo e conhecimento compartilhado, pelos quais sou muito grato.

Ao meu orientador de graduação Edilson Ferreira Flores pelos conselhos e motivação acadêmica.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela infraestrutura e a oportunidade de realizar meus estudos.

Aos professores do Laboratório de Computação e Matemática Aplicada (LAC).

As secretárias do LAC e CAP: Cristina e Cláudia, pela paciência.

A Yolanda pelas correções desta dissertação.

Ao Adenilson Roberto Carvalho e Jurandir Ventura Rodrigues pelo apoio técnico.

Aos meus amigos do INPE, pelo companheirismo.

Ao PROAP/INPE-CAP pelo apoio financeiro no trabalho de campo realizado em Manaus - AM.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro.

RESUMO

Esta dissertação tem por objetivo estudar a sensibilidade dos diversos canais do sensor AIRS às alterações na concentração de monóxido de carbono na atmosfera, sobre uma região tropical. Primeiramente, foram utilizados 49 conjuntos de perfis atmosféricos para simular as radiâncias medidas pelo sensor. Para a seleção de canais sensíveis ao CO utilizou-se o método da perturbação, proposto por Schaerer e Wilhelm (1979). Este procedimento permitiu a identificação de um conjunto inicial de 55 canais AIRS, localizados na faixa de número de onda de 2182 a 2227 cm^{-1} . Em seguida, diferentes subconjuntos destes 55 canais foram testados na inversão de perfis de CO, comparando-se os resultados obtidos com medidas de campo (Alta Floresta - MT, período de queimadas) e reconstruções feitas pelo CPTEC e pela NASA na mesma região. As simulações realizadas mostram que um modelo inverso com os 34 canais AIRS tem desempenho superior ao produto oferecido pelo CPTEC/INPE, e similar às reconstruções com o modelo da NASA, que utiliza 36 canais em bandas ligeiramente diferentes, selecionados por um método diferente. Espera-se que os resultados obtidos nesta dissertação contribuam para o aprimoramento do procedimento de inversão de gases traço, em particular de CO, realizado operacionalmente pelo CPTEC/INPE sobre a América do Sul.

STUDY OF THE AIRS CHANNELS SENSIBILITY TO VARIATIONS ON THE CARBON MONOXIDE ATMOSPHERIC CONCENTRATION.

ABSTRACT

The objective of this work is to study the sensibility of the different channels of the AIRS sensor to variations on the CO atmospheric concentration over a tropical region. Firstly, 49 sets of CO atmospheric concentration profiles were used to simulate the radiances measured by the sensor. In order to select the channels that are sensible to the CO content, we used the perturbation method proposed by Schaerer e Wilheit (1979). This procedure allowed us to identify a preliminary set of 55 channels, located within the wave number range of 2182 to 2227 cm^{-1} . Then, different subsets of these 55 channels were tested comparing the resulting CO profile inversions with data measured on the field (Alta Floresta - MT, forests fire season), and reconstructions made by CPTEC and NASA in the same region. These simulations show that the inverse model with 34 AIRS' channels has a performance that is superior to that of the CPTEC/INPE product, and similar to the reconstruction made by the NASA inverse model, that uses 36 channels in slightly different wavelengths, selected by a different methodology. We expect that the results obtained in this work will improve the accuracy of the trace gas reconstructions, particularly of CO, offered by CPTEC/INPE over South America.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	23
1.1	Perspectivas	26
1.2	Objetivos específicos	26
2	SONDAGEM ATMOSFÉRICA	27
3	PROBLEMA DIRETO E PROBLEMA INVERSO	35
3.1	Problema direto para simular radiância	37
3.2	Problema inverso para estimar CO	39
4	DADOS E METODOLOGIA	43
4.1	Dados	43
4.2	Metodologia	44
4.2.1	Modelo direto	44
4.2.2	Modelo inverso	49
4.2.3	Validação: estudo de casos	50
5	RESULTADOS	51
5.1	Seleção de canais AIRS sensíveis ao CO: modelo direto.	51
5.2	Simulações com o modelo inverso: estudo de casos	57
5.2.1	1º caso - dia 08 de outubro de 2007	59
5.2.2	2º dia 11 de outubro de 2007	72
5.2.3	3º caso - dia 20 de outubro de 2007	78
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

A APÊNDICE A	97
------------------------	----

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Representação de efeito estufa.	35
3.2 Representação de problema direto e problema inverso na sondagem atmosférica.	36
4.1 Diagrama da metodologia.	45
5.1 Perfis de temperatura, umidade e monóxido de carbono do banco de dado do modelo SARTA, típicos da região tropical.	51
5.2 Espectros de temperatura de brilho dos canais AIRS para quatro diferentes conjuntos de perfis atmosféricos localizados em diferentes regiões do globo terrestre (latitudes).	52
5.3 Jacobiano do CO para os 2378 canais do sensor AIRS, considerando uma perturbação de 10% na concentração do CO para um perfil tropical (a), para um perfil de média latitude (b) e um perfil de latitude alta (c). . . .	54
5.4 Jacobiano do CO para os canais AIRS que se mostraram sensíveis às alterações na concentração desse gás, considerando um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c). . . .	55
5.5 Gráfico dos diferentes níveis de pressão atmosférica do modelo direto SARTA.	55
5.6 Espectro de radiância em função do número de onda dos canais AIRS com a identificação dos canais sensíveis às alterações na concentração do perfil de CO (a) e uma ampliação desse espectro (b).	56
5.7 Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão o canal AIRS mais sensível às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007.	60
5.8 Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 5 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007. . .	60
5.9 Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 15 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007. . .	61

5.10	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, para o dia 08 de outubro de 2007.	61
5.11	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 36 canais AIRS utilizados pela NASA, para o dia 08 de outubro de 2007.	62
5.12	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 55 canais AIRS sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007. . .	62
5.13	Perfis verticais de CO (PPBV) para diferentes subconjuntos de canais AIRS sensíveis ao CO, juntamente com dados observados.	64
5.14	Perfis verticais de CO (ppbv) para o dia 08 de outubro de 2007 sobre a área de cobertura do experimento de campo, usando três subconjuntos de canais AIRS no modelo inverso, juntamente com dados observados e o desvio padrão do perfil de 34 canais.	65
5.15	Perfis verticais de CO para o dia 8 de outubro de 2007 inferidos com os canais utilizados na NASA e o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera, juntamente com os dados observados.	67
5.16	Perfil vertical do desvio padrão observado nas estimativas de CO para o dia 08 de outubro de 2007, utilizando três diferentes subconjuntos de canais AIRS.	68
5.17	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007. .	69
5.18	Diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais AIRS mais sensíveis e as da DSA/CPTEC/INPE, para o dia 8 de outubro de 2007. . .	69
5.19	Pluma de fumaça observada durante experimento de campo no dia 8 de outubro de 2007 na região de Alta Floresta (MT).	70
5.20	Focos de queimadas detectadas entre as 9:00 GMT do dia 08 de outubro e as 9:00 GMT do dia 09 de outubro de 2007	71
5.21	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 11 de outubro de 2007. .	73

5.22	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, para o dia 11 de outubro de 2007.	73
5.23	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 36 canais AIRS utilizados pela NASA, para o dia 11 de outubro de 2007.	74
5.24	Diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais AIRS mais sensíveis e as da DSA/CPTEC/INPE, para o dia 11 de outubro de 2007. . .	75
5.25	Focos de queimadas detectadas pelos satélites TERRA e AQUA entre as 9:00 GMT do dia 11 de outubro e as 9:00 GMT do dia 12 de outubro de 2007.	76
5.26	Perfis verticais de CO (ppbv) para o dia 11 de outubro de 2007 sobre a área de cobertura do experimento de campo, usando três subconjuntos de canais AIRS no modelo inverso, juntamente com dados observados e o desvio padrão do perfil de 34 canais.	77
5.27	Perfil vertical do desvio padrão observado nas estimativas de CO para o dia 08 de outubro de 2007, utilizando três diferentes subconjuntos de canais AIRS.	77
5.28	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 20 de outubro de 2007. .	79
5.29	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, para o dia 20 de outubro de 2007.	79
5.30	Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 36 canais AIRS utilizados pela NASA, para o dia 20 de outubro de 2007.	80
5.31	Diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais AIRS mais sensíveis e as da DSA/CPTEC/INPE, para o dia 20 de outubro de 2007. . .	81
5.32	Focos de queimadas detectadas pelos satélites TERRA e AQUA entre as 9:00 GMT do dia 20 de outubro e as 9:00 GMT do dia 21 de outubro de 2007.	82
5.33	Perfis verticais de CO (ppbv) para o dia 20 de outubro de 2007 sobre a área de cobertura do experimento de campo, usando três subconjuntos de canais AIRS no modelo inverso, juntamente com dados observados e o desvio padrão do perfil de 34 canais.	83

5.34	Perfil vertical do desvio padrão observado nas estimativas de CO para o dia 20 de outubro de 2007, utilizando três diferentes subconjuntos de canais AIRS.	84
A.1	Jacobiano do CO para os 2378 canais do sensor AIRS, considerando uma perturbação de 10% na concentração do CO para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c). . . .	97
A.2	Jacobiano do ozônio considerando a uma perturbação de 10% para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).	98
A.3	Jacobiano de temperatura considerando a uma perturbação de 10% para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).	99
A.4	Jacobiano de umidade considerando a uma perturbação de 10% para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).	100

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Composição da atmosfera.	31
4.1 Cabeçalho de dados em RTP.	46
4.2 Informações dos dados em RTP.	46
5.1 Número de onda (cm^{-1}) dos 55 canais AIRS sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera por ordem decrescente de sensibilidade.	57
5.2 Número de onda (cm^{-1}) dos 55 canais AIRS sensíveis ao CO em ordem crescente de número de onda, além dos canais utilizados na NASA e na DSA/CPTEC.	58
5.3 Número de onda (cm^{-1}) dos três diferentes subconjuntos de canais AIRS ilustrados da Figura 5.14 utilizados para inferir a concentração do CO. .	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIRS	– Atmospheric Infrared Sounder
AMSU	– Advanced Microwave Sounding Unit
Ar	– Argônio
ATOVs	– Advanced TIROS Operational Vertical Sounder
CAP	– Computação Aplicada
CFCs	– Clorofluorcarbonetos
CO	– Monóxido de carbono
CO ₂	– Dióxido de carbono
CH ₄	– Metano
CNES	– Centre National d' Etudes Spatiales
CPTEC	– Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DGE	– Divisão de Geofísica Espacial
DRM	– Data Resolution Matrix
DSA	– Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
EOS	– Earth Observing System
ETR	– Equação de Transferência Radiativa
EUMETSAT	– European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites
FAPESP	– Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GMT	– Greenwich mean time
H ₂	– Hidrogênio
He	– Hélio
H ₂ O	– Vapor d' Água
H ₂ S	– Sulfato de hidrogênio
HNO ₃	– Vapor de ácido nítrico
HSB	– Humidity Sounder for Brazil
HIRS	– High Resolution Infrared Radiation Sounder
IASI	– Infrared Atmospheric Sounding Interferometer
INPE	– Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	– Intergovernmental Panel on Climate Change
Ke	– Criptônio
LAC	– Laboratório de Computação e Matemática Aplicada
MAPS	– Measurement of Atmospheric Pollution from Space
METOP	– Meteorological Operational
MODIS	– Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	– Measurement Of Pollution In The Troposphere
MSU	– Microwave Sounding Unit
MT	– Mato Grosso
NASA	– National Aeronautics and Space Administration
NCEP	– National Centers for Environmental Prediction

Ne	–	Neônio
NH ₃	–	Amônia
NO	–	Óxido Nítrico
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
NO _x	–	Óxido de nitrogênio
N ₂	–	Nitrogênio
NO ₂	–	Dióxido de nitrogênio
N ₂ O	–	Óxido nitroso
OH	–	Radical hidroxila
O ₂	–	Oxigênio
O ₃	–	Ozônio
PD	–	Problema direto
PI	–	Problema inverso
PNT	–	Previsão Numérica do Tempo
PPBV	–	Partes por Bilhão por Volume
PROAP	–	Programa de Apoio à Pós - Graduação
RTP	–	Radiative Transfer Profile
SARTA	–	The Stand-alone AIRS Radiative Transfer Algorithm
SO ₂	–	Dióxido de enxofre
SRES	–	Special Report on Emission Scenarios
SVD	–	Singular Value Decomposition
T	–	Temperatura
TES	–	Tropospheric Emission Spectrometer
UMBC	–	University of Maryland Baltimore County
Xe	–	Xenônio

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Uma das grandes preocupações da comunidade científica na última década diz respeito às mudanças climáticas e suas conseqüências para a humanidade. A sensibilidade, a capacidade adaptativa, a vulnerabilidade do sistema natural e humano a essas mudanças são estudados por diversos grupos de pesquisadores. Mudanças observadas no clima e suas causas são avaliadas no terceiro relatório do IPCC - “Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas” (IPCC, 2007). Segundo este relatório, a temperatura média global aumentou entre 0,3 e 0,6 °C desde o final do século passado, e pela escala dos diferentes cenários desenvolvidos pelo IPCC “Special Report on Emission Scenarios” (SRES) a média global da temperatura do ar, projetada por modelos numéricos, sofrerá uma elevação de 1,4 a 5,8 °C para 2100. É provável que a maior parte desse aquecimento seja decorrente da emissão, por atividades humanas, de gases que retêm radiação térmica. As moléculas de alguns gases que têm baixíssimas concentrações na atmosfera, interagem com a radiação eletromagnética na faixa do espectro conhecida como infravermelho termal e com isso dificultam a perda para o espaço da radiação térmica, produzindo o aquecimento da superfície da Terra. Esses gases são fundamentais para manter o equilíbrio climático e condições ambientais adequadas para a vida na Terra, isto é, temperaturas que permitam a existência de água nas formas líquida e gasosa essencial à vida e ao ciclo hidrológico, respectivamente.

Os três anos mais quentes dos últimos cem anos da história da Terra aconteceram na última década. Atualmente, as análises sistemáticas do IPCC, que sintetizam o conhecimento científico sobre o sistema climático, levam a um razoável consenso de que o aquecimento global observado nos últimos 50 anos é explicado principalmente pelas emissões humanas de gases de efeito estufa, gases traço e de aerossóis e não por eventual variabilidade natural do clima.

A menos que ações globais de controle das emissões de gases sejam efetivadas nas próximas décadas, a demanda futura de energia, em especial nos países em desenvolvimento, ocasionará alterações climáticas significativas, como um conseqüente aumento na temperatura da superfície da Terra, acompanhado de fortes e perturbadoras alterações no ciclo hidrológico em todo o planeta. Os países em desenvolvimento, historicamente menos capazes de responder à variação natural do clima, são os mais vulneráveis às futuras alterações climáticas. O Brasil pode ser duramente atingido já que sua economia é fortemente dependente de recursos naturais ligados

diretamente ao clima, como na agricultura e na geração de energia hidroelétrica. Mudanças climáticas afetariam ainda vastas parcelas das populações de menor renda, como as do semi-árido nordestino ou as que vivem em área de risco de deslizamentos, enxurradas e inundações nos grandes centros urbanos.

Importantes instrumentos para estudar esses componentes atmosféricos em grande escala são sondadores a bordo de satélites. Atualmente, esforços têm se concentrado no desenvolvimento de sistemas de sondagem com alta resolução espectral, por exemplo, o “Infrared Atmospheric Sounding Interferometer” - IASI (possuindo mais de 8000 canais, lançado em julho de 2006) e o “Atmospheric Infrared Sounder” - AIRS (2378 canais). O AIRS é o primeiro sondador avançado de radiação infravermelha operacional com essa característica (PARKINSON, 2003).

Um acontecimento de importância histórica para a agência espacial americana (NASA) foi o lançamento do sensor AIRS a bordo da plataforma AQUA no dia 4 de maio de 2002, na base aérea americana de Vandenberg, na Califórnia. Com os 2378 canais do sondador AIRS tem-se um aumento significativo na quantidade de informação sobre a atmosfera, sem precedentes na história da meteorologia por satélites. Todavia, não é imediatamente óbvio quantificar essa informação ou utilizá-la de forma eficiente. A informação espectral incluída nos canais refere-se não apenas a perfis de temperatura e de umidade, mas também de outros gases presentes na atmosfera (gases traço e de efeito estufa). A aproximação usual para a utilização desse conjunto de dados é a seleção de bandas estreitas com um número limitado de canais, de tal forma que cada banda selecionada corresponda a um constituinte atmosférico ou um parâmetro a ser inferido (RODGERS, 1998; SUSSKIND et al., 2003; BARNET et al., 2004).

O desenvolvimento/aperfeiçoamento de metodologias para recuperação de perfis atmosféricos é de fundamental importância para a Previsão Numérica de Tempo (PNT), principalmente para o Hemisfério Sul onde existe um baixo número de radiossondas. Além disso, devido à grande extensão territorial do Brasil e à existência de áreas remotas, como é o caso da Amazônia, torna-se difícil manter redes de observações convencionais. A missão AQUA oferece uma grande oportunidade para coletar dados valiosos que poderão ser utilizados para o avanço do “estado da arte”, particularmente, na seleção de canais para a otimização do procedimento de inversão sob condições tropicais. Dessa forma, estudos que possam contribuir no sentido de utilizar-se de forma mais eficiente as informações obtidas a partir de dados de

satélites são necessários.

Atualmente, a Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (DSA/CPTEC/INPE) recebe o fluxo de dados do sistema de sondagem do satélite EOS-PM (AQUA). O sistema de pré-processamento (navegação e calibração) destes dados encontra-se instalado operacionalmente na divisão. Além disso, o modelo de inversão da NASA (SUSSKIND et al., 2003) que faz inferência de perfis atmosféricos de temperatura, umidade e da concentração de alguns gases também se encontra instalado na DSA. Esta Divisão é a única no país que recebe o fluxo de dados desse satélite, os quais não foram aplicados no país e ainda constituem fonte de pesquisa nos Estados Unidos da América e Europa. Em um estudo recente (MCMILLAN et al., 2005) mostraram a possibilidade de utilizar o sensor AIRS para estimar a concentração de CO na média troposfera e monitorar possíveis variabilidades diárias na concentração deste gás, uma vez que o satélite AQUA possui cobertura global diária.

No entanto, é importante observar que a qualidade das sondagens remotas depende de condições de contorno impostas (por exemplo, temperatura e umidade à superfície) assim como da escolha apropriada de canais do sistema sondador. Neste contexto, busca-se estudar a sensibilidade dos canais do sensor AIRS/AQUA às alterações na concentração de monóxido de carbono na atmosfera, a fim de adaptar o modelo de inversão utilizado operacionalmente no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) às condições climáticas da região tropical, particularmente, na seleção de canais AIRS utilizados no procedimento de inversão.

A organização dos capítulos dessa dissertação é enunciada em seguida: O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica de trabalhos pioneiros até os mais atuais. Além disso, é apresentada a descrição dos sensores mais importantes para a sondagem atmosférica, bem como, a introdução de alguns gases que compõem a atmosfera terrestre, com ênfase no monóxido de carbono, por este ser o foco desse estudo. O Capítulo 3 aborda o conceito de problema direto e problema inverso, e uma representação no contexto de sondagem remota da atmosfera. O Capítulo 4 mostra os diferentes tipos de dados utilizados (simulados e observados) e suas aplicações no desenvolvimento deste trabalho de dissertação, além disso, apresenta a metodologia adotada com a descrição dos procedimentos realizados com os modelos numéricos (direto e inverso), e etapa de validação dos resultados a partir de dados observados. O Capítulo 5 traz os resultados obtidos, ou seja, os canais (sensíveis ao

CO) selecionados com o modelo de transferência radiativa (modelo direto), além das inferências de CO realizadas com um modelo de inversão com diferentes subconjuntos de canais sensíveis ao monóxido de carbono e a validação dos resultados com os dados observados. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões, considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

1.1 Perspectivas

O aprofundamento das investigações científicas em estudos sobre estimativas da concentração de gases a partir de informações de satélites, bem como a adaptação de códigos de inversão às condições climáticas brasileiras, permitirá que as informações inferidas por satélites na DSA/CPTEC sejam assimiladas em modelos numéricos, como por exemplo, no modelo de qualidade do ar do CPTEC/INPE (http://www.cptec.inpe.br/meio_ambiente/). Além disso, a análise proposta nesse trabalho poderá ser aplicada a outros constituintes atmosféricos (gases), contribuindo para criar uma independência local no que diz respeito à seleção de canais em futuros sensores hiperspectrais, no desenvolvimento de modelos de inversão e/ou na regionalização de modelos disponibilizados pela comunidade científica, para estimar a concentração de gases na atmosfera. Finalmente, além do interesse científico, deve-se ressaltar que o melhor conhecimento das emissões de gases sobre o Brasil é fundamental para adoção de políticas públicas que reduzam queimadas e desmatamentos, nossa maior fonte de emissões.

1.2 Objetivos específicos

Estudar a sensibilidade dos canais do sensor AIRS/AQUA às alterações na concentração de monóxido de carbono na atmosfera. Neste contexto, será utilizado um modelo de transferência radiativa para identificação/seleção de canais AIRS sensíveis ao CO, a fim de que os canais selecionados sejam utilizados para inferir a concentração desse constituinte atmosférico. Com isso, buscar-se-á contribuir para a melhoria dos produtos de satélite, reestruturando algoritmos a fim de aperfeiçoar o procedimento de inversão sob as condições climáticas da região tropical (América do Sul), particularmente, na seleção de canais AIRS utilizados nas estimativas da concentração de CO na atmosfera, uma vez que esse gás é um importante traçador de gases de efeito estufa. Finalmente, pretende-se realizar estudos de casos com diferentes subconjuntos de canais AIRS, a fim de verificar quais canais geram melhores resultados sobre o Brasil.

2 SONDAGEM ATMOSFÉRICA

O conhecimento espacial atual foi construído ao longo do tempo. Durante a Segunda Guerra Mundial no início dos anos 40, os avanços tecnológicos, conduziram às primeiras imagens de nuvens obtidas do espaço. No entanto, a primeira proposta para explorar a emissão espectral da atmosfera terrestre para inferir sua estrutura vertical de temperatura e umidade só teve início na década seguinte.

A física básica sobre sondagens remotas da atmosfera para inferência de perfis verticais de temperatura a partir de sensores de radiação a bordo de satélites foi proposta inicialmente por King (1956). O autor sugeriu que os perfis verticais de temperatura poderiam ser inferidos a partir da intensidade de radiação monocromática em um único canal espectral, proveniente de várias direções. Posteriormente, Kaplan (1959) avançou nos conceitos sobre as técnicas de sondagem remota da atmosfera sugerindo que fossem utilizados diversos comprimentos de onda associados à banda de absorção CO_2 em $15 \mu\text{m}$, porém a análise foi realizada com a radiação emergente de apenas uma direção fixa.

Na década seguinte, com o desenvolvimento tecnológico dos projetos espaciais associados aos avanços nos recursos computacionais, houve um maior interesse na utilização de novas técnicas de sondagem remota da atmosfera. Wark e Fleming (1966) apresentaram um esquema de tratamento estatístico com dados de radiossondagem para aproximar os perfis obtidos por satélite. Chahine (1970) propôs um método iterativo para inversão da Equação de Transferência Radiativa (ETR), visando estimar os perfis verticais de temperatura na atmosfera utilizando a banda de absorção do CO_2 . Em outro estudo, Smith (1970) desenvolveu um método implícito para resolução desse problema.

Os resultados obtidos a partir dessas técnicas eram expressivos quando aplicados a situações de céu claro. Para condições de céu nublado, os dados de satélite contaminados pela presença de nuvens deixavam a desejar devido, principalmente, à baixa resolução dos sensores da época. Assim, a presença de nuvens nos campos de visada dos sensores representava o maior desafio. A introdução de uma nova geração de radiômetros em micro-ondas foi o próximo passo no sentido de solucionar esse problema. Como as informações em micro-ondas não são afetadas pela maioria dos tipos de nuvem, esses instrumentos apresentavam uma vantagem em relação aos instrumentos que operavam no infravermelho e no visível. Isso motivou o lançamento de

sensores passivos em micro-ondas a bordo de plataformas espaciais, principalmente, nas décadas de 80 e 90 quando se observou um acentuado aumento no uso de produtos em micro-ondas pela comunidade científica em todo o mundo, sobretudo, por organizações oceanográficas e meteorológicas.

Um acontecimento de importância particular para a “National Oceanic and Atmospheric Administration” (NOAA) foi o lançamento, em maio de 1998, do satélite NOAA-15 contendo o sensor “Advanced Microwave Sounding Unit” (AMSU), com vinte canais divididos em dois módulos, AMSU-A e AMSU-B. Conjuntamente com o sensor “High Resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS)”, esses instrumentos constituem o sistema “Advanced TIROS Operational Vertical Sounder” (ATOVS) que opera a bordo dos satélites NOAA-15, 16, 17 e 18 e foram inicialmente projetados para aperfeiçoar as sondagens de temperatura realizadas com os quatro canais do “Microwave Sounding Unit” (MSU), que operava a bordo do NOAA-14. Os resultados obtidos com esse novo sistema têm mostrado uma melhora na qualidade dos perfis verticais de temperatura e de umidade, principalmente sob condições de nebulosidade, melhorando o desempenho dos dados de satélites em modelos de previsão numérica de tempo (PNT) (ENGLISH et al., 1999; ENGLISH et al., 2000). No entanto, as informações espectrais incluídas nesses canais não possibilitam estimativas das concentrações de outros gases, como por exemplo, gases de efeito estufa.

Atualmente, os esforços têm se concentrado no desenvolvimento de sondadores com alta resolução espectral. Com o lançamento da plataforma AQUA no dia 4 de maio de 2002 tem-se uma nova geração de sensores para obtenção de sondagens atmosféricas sob diferentes condições de nebulosidade. O AIRS é o primeiro sondador avançado de radiação infravermelha operacional com 2378 canais espectrais e representa um grande passo para a tecnologia de sensoriamento remoto por satélites ambientais (AUMANN; MILLER, 1995; MORSE et al., 1999; AUMANN; PAGANO, 1994; AUMANN et al., 2000; FISHBEIN et al., 2003). Ressalta-se ainda o desenvolvimento do sensor IASI pela “European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites” (EUMETSAT) em cooperação com o “Centre National d’ Etudes Spatiales” (CNES), lançado em outubro de 2006 a bordo do satélite “ Meteorological Operational” (METOP). Esse instrumento conta com 8461 canais espectrais (645 a 2760 cm^{-1}) e representa a nova geração dos sondadores de alta resolução espectral no infravermelho (LERNER J. A.; WEISZ, 2002).

Dos instrumentos que compõem o conjunto AQUA três deles juntos formam o mais

avanzado sistema de sondagem lançado ao espaço: o AIRS, o “Advanced Microwave Sounding Unit” (AMSU-A) e o “Humidity Sounder for Brazil” (HSB) (atualmente desligado por problemas técnicos). Juntos representam uma versão sofisticada do sistema ATOVS, complementado com o sensor “Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS) no mesmo satélite. Esses instrumentos foram projetados para satisfazer as exigências de previsão de tempo operacionais da NOAA, os objetivos de pesquisa sobre mudanças globais da NASA (CHAHINE et al., 2000; AUMANN et al., 2003; GOLDBERG et al., 2003), e também disponibilizam um número ainda maior de informação (canais), sem precedentes na história da Meteorologia por Satélites. Logo, tem-se um aumento significativo na quantidade de dados sobre a atmosfera, mas não é imediatamente óbvio como quantificá-los ou utilizá-los de forma eficiente.

A informação espectral incluída nos canais dos sensores espaciais refere-se não apenas a perfis de temperatura e umidade, mas também à concentração de alguns gases (CO_2 , CH_4 , O_3 , CO , entre outros). Além disso, um único canal pode ser sensível a mais de um gás ou variável que se deseja inferir. Pensando nesse problema, com o passar do tempo surgiram propostas com objetivo de selecionar melhor os canais utilizados nos modelos de PNT. Dessa maneira, em estudo realizado por Aoki (2004) inspirado em trabalhos de Schaerer e Wilheit (1979), Aires et al. (2002) propôs um método para seleção de canais por meio de análises realizadas na função peso, reduzindo assim, os dados desnecessários e diminuindo também os “loops” executados pelo algoritmo, a fim de contribuir com melhorias na qualidade da sondagem atmosférica por sensores espaciais.

Os sensores espaciais modernos como o AIRS e o IASI são capazes de fornecer medidas de radiação no infravermelho com alta resolução espectral. Com isso, para inferir a concentração de temperatura e umidade na atmosfera, apenas seriam necessárias centenas de canais, ao invés dos milhares que esses sensores dispõem. Coerente a essa dedução, Rabier et al. (2001) buscou obter a solução estável de suas estimações (temperatura e umidade) utilizando-se de apenas cem canais ao invés de todos os 8461 canais que o IASI possui.

Além disso, neste artigo Rabier procurou responder a duas perguntas básicas que envolvem o campo das inferências atmosféricas: (1) entre os vários caminhos percorridos para selecionar um número limitado de canais para cada perfil atmosférico, qual conduz à melhor precisão? (2) uma vez tendo selecionado um “ótimo” conjunto de canais para cada perfil atmosférico, como este método pode ser aplicado robu-

tamente para todas as condições atmosféricas? Assim, para responder essas duas questões quatro métodos de seleção de canais foram testados: (1) “Data Resolution Matrix”(DRM), (2) “Singular Value Decomposition” (SVD), (3) “Iterative Method” e (4) “Jacobian Method”, dos quais, dois se sobressaíram (“Iterative Method” e “Jacobian Method”).

Seguindo a linha de Rabier et al. (2001), o pesquisador Sokolov et al. (2007) em sua busca por um conjunto “ótimo” de canais sensíveis a temperatura e umidade, afirmou que as principais fontes de erros nas estimações são decorrentes da instabilidade no instrumento, devido a perda de precisão do equipamento em decorrência do desgaste sofrido em função do tempo de uso, além da escolha errada do comprimento de onda associado ao canal do sondador. Sendo assim, Sokolov propôs selecionar apenas os canais sensíveis e sugeriu a calibração da função custo no modelo de inversão usado.

A inferência de constituintes atmosféricos a partir de informações de radiância espectral é realizada por meio da inversão matemática da equação de transferência radiativa. A inversão desse tipo de equação apresenta soluções múltiplas e instáveis, por se tratar de um problema mal-posto. Dessa maneira, para interpretar a radiância de satélite e obter a estrutura vertical (perfil vertical) dos constituintes atmosféricos, foram desenvolvidos vários métodos de inversões. Inicialmente, esses métodos eram procedentes de pacotes numéricos padronizados (produzido pela própria empresa que lançava os satélites), projetados para o processamento de dados adquiridos de sensores espaciais. Comentários e testes com alguns desses modelos numéricos podem ser encontrados em Conruth (1965).

Ao longo dos anos, técnicas novas foram surgindo, quebrando o vínculo com os modelos numéricos padrões. Relativo a isso, Aires et al. (2002) elaborou uma rede neural para o sensor IASI com objetivo de retornar perfis de temperatura. No Brasil, Carvalho (1998) realizou inferências de perfis verticais de temperatura utilizando-se de uma técnica iterativa implícita de inversão. Souza (2004) teve seu trabalho voltado em analisar o desempenho do AQUA sobre a região tropical, em particular sobre a região amazônica, para o período de setembro e outubro de 2002 e selecionaram-se também canais AIRS sensíveis a temperatura e umidade, verificando se estes conseguiriam representar o comportamento espectral dos canais HSB sob condições de céu claro. Além desses pesquisadores, Shiguemori (2007), empregando diferentes tipos de redes neurais para a solução inversa da ETR, realizou inferências de temperatura e umidade sobre a atmosfera brasileira.

Diante do desenvolvimento e aperfeiçoamento dessas ferramentas computacionais capazes de inverter a ETR, tornou-se possível a inferência com boa precisão de perfis de gases minoritários e de outros constituintes atmosféricos. Todavia, o conhecimento do ciclo global desses constituintes ainda é limitado, haja vista a grande complexidade das reações químicas envolvidas.

A atmosfera terrestre é composta por dois grupos de gases, o primeiro com uma quase estabilidade de concentração e o segundo com concentrações variáveis. A Tabela 2.1 apresenta a maioria dos gases que compõem a atmosfera terrestre. Nela é possível ver a divisão entre os gases de concentrações permanentes e variáveis, além da porcentagem de volume que cada gás representa.

Tabela 2.1 - Composição da atmosfera.

Constituintes permanentes		Constituintes variáveis	
Constituintes	% de volume	Constituintes	% de volume
Nitrogênio (N ₂)	78.084	Vapor de água (H ₂ O)	0-4
Oxigênio (O ₂)	20.948	Ozônio (O ₃)	$0-12 \times 10^{-4}$
Argônio (Ar)	0.934	Dióxido de enxofre (SO ₂)	0.001×10^{-4}
Dióxido de carbono (CO ₂)	0.034	Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	0.001×10^{-4}
Neônio (Ne)	18.18×10^{-4}	Amônia (NH ₃)	0.004×10^{-4}
Hélio (He)	5.24×10^{-4}	Óxido nítrico (NO)	0.0005×10^{-4}
Criptônio (Kr)	1.14×10^{-4}	Sulfato de hidrogênio (H ₂ S)	0.00005×10^{-4}
Xenônio (Xe)	0.089×10^{-4}	Vapor de ácido nítrico (HNO ₃)	-
Hidrogênio (H ₂)	0.5×10^{-4}	Clorofluorcarbonetos (CFCs)	-
Metano (CH ₄)	1.7×10^{-4}		
Óxido nítrico (N ₂ O)	0.3×10^{-4}		
Monóxido de carbono (CO)	0.08×10^{-4}		

Fonte: Adaptada de Liou (1992).

Os gases permanentes têm seu volume até uma altitude de 60 km. Além disso, mais de 99.96% do volume dos gases atmosféricos são compostos por nitrogênio, oxigênio e argônio (LIOU, 1992). Por outro lado, a quantidade de gases variáveis é pequena, mas são extremamente importantes no transporte de radiação na atmosfera.

Dentre os gases variáveis, o que apresenta a maior quantidade na atmosfera é o vapor de água. Esse gás é o mais radioativo e dinâmico e varia significativamente com o espaço e o tempo. Sua distribuição troposférica é determinada via evaporação, condensação e precipitação. Ele é o mais importante contribuinte do efeito estufa, desempenhando um papel de destaque como absorvedor de radiação solar na troposfera, e agindo como controlador da temperatura na superfície terrestre Mazza e Roth (1999).

Outro gás variável de grande influência no controle da temperatura terrestre é o ozônio. A concentração de ozônio ocorre nas altitudes entre 15 a 30 km, área conhecida como camada de ozônio. A sua máxima concentração está entre 20 a 25 km, dependendo da latitude e estação do ano. Continuamente, ele é criado e destruído pelo processo fotoquímico associado com a radiação solar ultravioleta sobre as moléculas de oxigênio, sendo a absorção deste tipo de radiação essencial a vida no planeta Terra. Uma ameaça a camada de ozônio são os clorofluorcarbonetos (CFCs), produzidos em grande quantidade pelas indústrias sendo usados desordenadamente em solventes, sprays em lata, geladeiras, entre outros.

A determinação da quantidade de concentração de ozônio troposférico e estratosférico também pode ser influenciada pelo óxido de nitrogênio (NO_x). O termo NO_x é usado para descrever vários óxidos de nitrogênio e dentre os mais comuns encontrados na atmosfera se tem o óxido nitroso (N_2O), óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). O NO_x é emitido pelo transporte e processos de combustão na superfície e por aviões na alta troposfera e baixa estratosfera. Na estratosfera, sua maior fonte é a dissociação do N_2O pela excitação do átomo de oxigênio, e na baixa troposfera, sua fonte principal vem da combustão antropogênica, combustíveis fósseis e a queima de biomassa.

Dentro desse contexto, a comunidade científica tem interesse na inferência da concentração desses gases atmosféricos, principalmente, os considerados minoritários (H_2O , CO_2 , N_2O , CH_4 , CFCs, O_3 , CO , entre outros). Em virtude disso, um dos gases que tem sido estudado ultimamente e foco deste trabalho é o monóxido de carbono (CO).

O monóxido de carbono é um dos poucos gases troposféricos que podem ser monitorados do espaço em tempo real com grande percentual de acerto (EDWARDS et al., 2004). Considerado um gás tóxico, suas principais fontes de emissão na atmosfera estão associadas com processos tecnológicos (atividades industriais), pela queima de biomassa, processos biogenéticos e oceanos.

Aproximadamente 50% das emissões de CO na atmosfera são de origem antropogênica (LOGAN et al., 1981; THOMPSON et al., 1994). O ciclo de vida químico do CO na atmosfera pode variar de poucos dias na região tropical até vários meses nas regiões polares durante o inverno, proporcionando uma grande variabilidade espacial e temporal de sua distribuição global na atmosfera. É o mais importante gás

minoritário atuando na formação de gases de efeito estufa como o metano (CH_4), o ozônio (O_3) e dióxido de carbono (CO_2). Por outro lado, o CO é o principal sumidouro de radical hidroxila (OH), influenciando na capacidade oxidante da atmosfera.

A reação de CO com o radical hidroxila permite retirar da atmosfera entre 90% a 95% de CO (LOGAN et al., 1981) e 75% de OH (THOMPSON et al., 1994). Essa reação acontece da seguinte forma: $\text{CO} + \text{OH} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ (NOVELLI et al., 1998). Desse modo, se a quantidade de CO aumenta o CO_2 também aumenta, em contraposição, a quantidade de OH diminui. O problema é que a diminuição do volume de OH implica no aumento do volume de outros gases, como metano.

Assim, apesar do monóxido de carbono não ser um considerado um grande absorvedor de radiação infravermelha, atua indiretamente na composição química e nas propriedades radiativas da atmosfera. Por essa razão, em 1981 foi realizado o primeiro experimento para se medir globalmente a concentração de CO por um instrumento chamado “Measurement of Atmospheric Pollution from Space” (MAPS) que operava a bordo do ônibus espacial (REICHLE H. G. et al., 1982), com subseqüentes experimentos realizados nos anos de 1984 (REICHLE et al., 1990) e 1994 (CONNORS et al., 1999). No entanto, o MAPS fazia estimativas de CO apenas para visadas no nadir e demorava mais de uma semana para fazer um mapa global da distribuição espacial desse gás.

Um instrumento que possui uma tecnologia similar ao MAPS é o “Measurement Of Pollution In The Troposphere” (MOPITT). Ele opera a bordo do satélite TERRA (programa EOS) e tem sido utilizado para realizar estimativas da concentração de CO na troposfera (DEETER et al., 2003). Mesmo o MOPITT apresentando uma tecnologia mais avançada e cobertura espacial superior ao MAPS, ainda são necessários de três a cinco dias para se construir um mapa global da concentração de CO (mosaico de CO), uma vez que as estimativas são efetuadas apenas em regiões de céu claro e o sensor faz uma varredura na horizontal de 640 km de largura. Com isso, alguns fenômenos de escala diária não podem ser observados.

O satélite AURA contendo o “Tropospheric Emission Spectrometer” (TES) foi lançado dia 15 de julho de 2004 (FILIPIAK et al., 2005; RICHARDS et al., 2006). Além de proporcionar inferências da distribuição global de CO, o sensor TES também possibilita o retorno de medidas de ozônio, umidade e óxido de nitrogênio. Ademais, ele leva quatro dias para realizar uma análise completa da atmosfera terrestre. Em

suma, tanto o TES como o MAPS e o MOPITT necessitam de vários dias de dados para obter uma cobertura global, e assim, fica inviável a obtenção da variação de CO diariamente.

No entanto, um sensor que apresenta uma sensibilidade muito próxima às dos sensores MAPS, MOPITT e TES para medir a concentração de CO na média troposfera é o AIRS, que se encontra a bordo do AQUA. Além do satélite AQUA possuir cobertura global diária e varredura horizontal de 1650 km de largura, ele conta com sensores em micro-ondas que operam em conjunto com o AIRS, os quais auxiliam no processo de inferência de perfis atmosféricos mesmo em condições de nebulosidade parcial. Com isso, é possível criar um mosaico de CO em menos tempo do que o TES e ainda estudar, possivelmente, fenômenos de escala diária (MCMILLAN et al., 2005).

A utilização de plataformas espaciais para a inferência das concentrações de gases minoritários pode fornecer informações valiosas para estudos de fontes e sumidouros desses gases, bem como, os processos de transporte envolvidos. Desta forma, a inferência remota da concentração de CO na atmosfera pode ser vista como uma ferramenta importante no monitoramento do ciclo de carbono e em estudos sobre mudanças climáticas (SZE, 1997). Nesse contexto, este trabalho desenvolve uma ferramenta computacional para seleção de canais AIRS sensíveis ao CO (entre outros gases), a fim de aprimorar o desempenho do modelo de inversão sobre as condições climáticas brasileiras. Espera-se que os resultados desse trabalho sejam úteis para fins operacionais no CPTEC, que incluem a assimilação das informações obtidas em modelos para a qualidade do ar.

3 PROBLEMA DIRETO E PROBLEMA INVERSO

Este capítulo explica o conceito de problema direto (PD) e problema inverso (PI). A explanação desses dois assuntos é relevante, visto que, na metodologia são abordados os modelos numéricos (modelo direto e inverso) utilizados para solução desses problemas. Assim, para a definição de PD e PI utiliza-se um exemplo obtido em Neto (2005), que é relacionado ao efeito estufa.

O descontrole do efeito estufa é prejudicial, já que aumenta a temperatura da atmosfera e traz consigo sérias alterações climáticas, decorrentes do aprisionamento da radiação terrestre na atmosfera por causa da poluição e dos gases absorvedores como o dióxido de carbono. A Figura 3.1 apresenta um exemplo de efeito estufa na atmosfera terrestre.

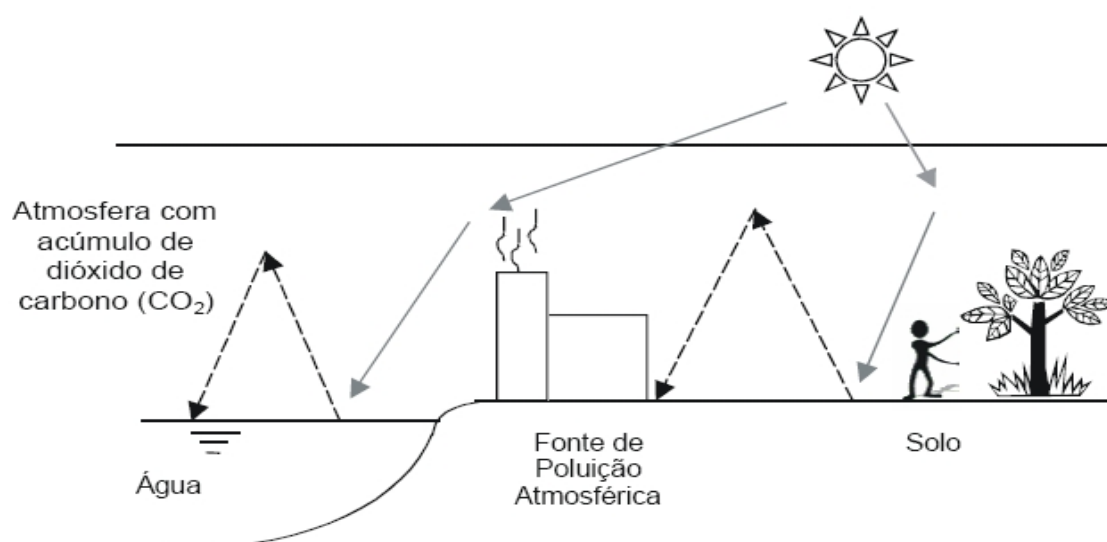


Figura 3.1 - Representação de efeito estufa.

Fonte: Adaptada de Neto (2005).

Desse modo, conhecido o volume de dióxido de carbono na atmosfera (causa), por exemplo, e através de um modelo matemático (modelo direto), é possível calcular seu impacto na temperatura de equilíbrio da atmosfera (efeito). Por outro lado, quando se dispõe de alguma informação experimental sobre a temperatura da atmosfera, ou a radiância medida por um instrumento a bordo de um satélite (efeito),

é possível por meio de um modelo inverso, identificar a quantidade de CO₂ liberada por algumas fontes poluidoras (causa). Este é um exemplo de problema inverso. Maiores informações sobre a solução de problema inverso para estimação de fontes de poluição atmosférica podem ser encontradas em Luz (2007).

Segundo Engl et al. (1996), resolver um problema inverso é determinar causas desconhecidas a partir de efeitos desejados ou observados. Matematicamente se associam às causas as condições iniciais e de contorno, fontes e sumidouros e propriedades do material, e aos efeitos as propriedades calculadas a partir de um modelo direto, como o campo de temperatura, concentração de partículas, corrente elétrica, entre outros (VELHO, 2001).

Na Figura 3.2 tem-se uma representação esquemática de um problema direto e inverso, no contexto de sondagem remota da atmosfera, a partir de instrumentos embarcados em plataformas espaciais. Neste exemplo, a causa é o estado atmosférico: perfis de temperatura, umidade e monóxido de carbono; o efeito é representado pela radiação simulada e medida.

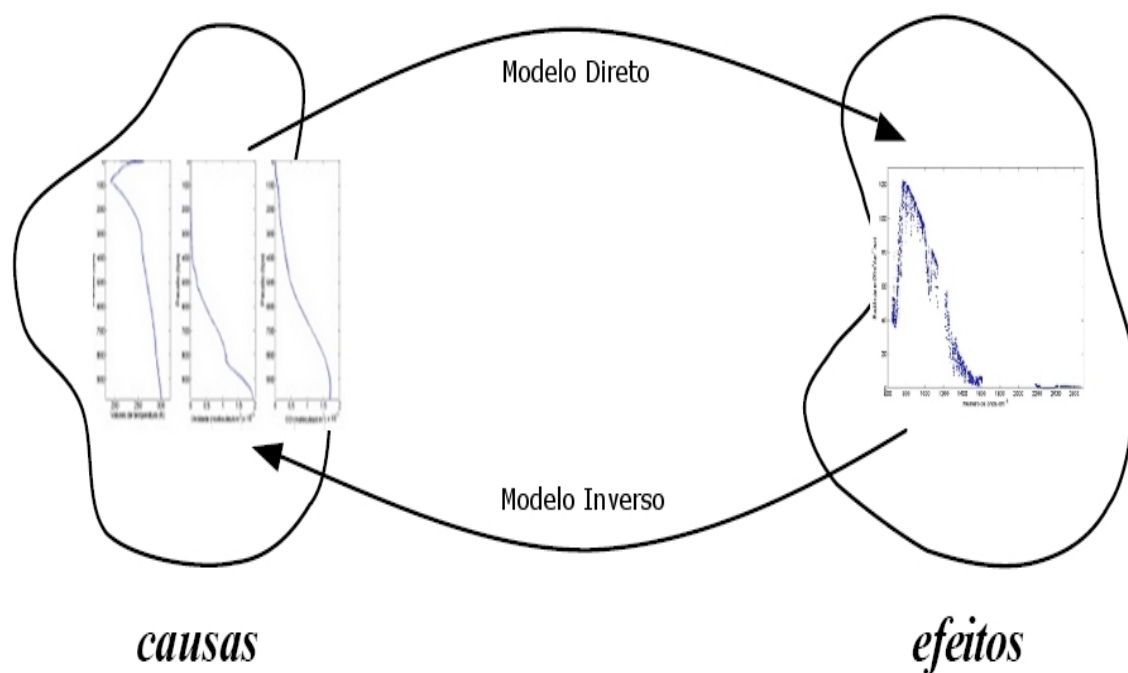


Figura 3.2 - Representação de problema direto e problema inverso na sondagem atmosférica.

Fonte: Adaptada de Velho (2001).

Os problemas diretos em geral pertencem à classe dos problemas bem-postos, podendo ser descritos matematicamente, para um caso linear da seguinte forma:

$$Ax = f \tag{3.1}$$

onde A é um operador diferencial com domínio D_A com $x \in X$ e $f \in F$. Segundo o matemático francês Hadamard (1902) um problema bem-postos cumpre as seguintes condições:

- Existência: $\forall f \in F \implies \exists x \in D_A$ de modo que $Ax = f$;
- Unicidade: $\forall x_1 \text{ e } x_2 \in D_A$ com $x_1 = x_2$;
- Estabilidade: $\forall x_1 \text{ e } x_2 \in D_A$ com $Ax_1 = f_1$ e $Ax_2 = f_2 \implies x_1 \longrightarrow x_2$ em x logo $f_1 \longrightarrow f_2$ em F .

Problemas inversos pertencem à classe dos problemas mal-postos, pois, falham em cumprir um ou mais dos critérios acima. Em geral, os PIs são mal condicionados falhando na terceira condição a de estabilidade, pois pequenas alterações nos dados de entrada ocasionadas por ruído nos dados, podem gerar grandes erros nos resultados finais.

Os problemas inversos possuem aplicações em diversas áreas: engenharia, medicina, geofísica, meteorologia, reconstrução de imagens, entre outras. As técnicas para solução de PIs são divididas em duas categorias: a explícita, onde métodos de inversão são obtidos através de uma inversão direta do operador que representa o modelo direto: e a implícita, que explora iterativamente o espaço de solução, até que o critério de parada seja satisfeito. Existem diferentes métodos para a solução de PIs: Inversão Direta; Decomposição em Valores Singulares; Mínimos Quadrados; Métodos de Regularização; Métodos Variacionais; Redes Neurais; Algoritmos Genéticos; Colônias de Formigas, entre outros: (MUNIZ et al., 1999; MUNIZ et al., 2000; RAMOS et al., 1999; VELHO, 2001).

3.1 Problema direto para simular radiação

Em seguida apresenta-se o problema direto e inverso estudado nesse trabalho. A resolução do problema direto busca determinar a radiação espectral a partir

de parâmetros atmosféricos, utilizados como condição inicial do modelo direto. A radiância simulada para todos os i canais espectrais do sensor AIRS segundo Strow et al. (2003) é definida como:

$$R^i = \epsilon_\nu B_\nu(T_s) \mathfrak{S}_s^i(\theta_{sat}) + \sum_{l=1}^{l_s} B_\nu(T_l) (\mathfrak{S}_{l-1}^i(\theta_{sat}) - \mathfrak{S}_l^i(\theta_{sat})) + R_{refl.th.}^i + H^\nu(\theta_{sun}) \cos(\theta_{sun}) \rho_{solar} \mathfrak{S}_s^i(\theta_{eff}) \quad (3.2)$$

onde as camadas atmosféricas são numeradas do topo da atmosfera em direção à superfície, de 1 a L_s . O termo ϵ_ν é a emissividade da superfície, $B_\nu(T_s)$ é a função de Planck, $R_{refl.th.}^i$ é a radiância com influência da reflectância termal, $H^\nu(\theta_{sun})$ é a radiação incidente no topo da atmosfera, θ_{sat} é o ângulo zenital do satélite, ρ_{solar} é a reflectância solar pela superfície e $\mathfrak{S}$ é a transmitância da camada l para o espaço. A função de Planck consiste de informações de temperatura, enquanto que a transmitância esta associada com o coeficiente de absorção e com o perfil de densidade dos gases absorventes. A equação da transmitância é definida como:

$$\mathfrak{S}_l^i(\theta) \equiv \int_{\Delta\nu_i} \tau_\nu(p_l \rightarrow 0, \theta) SRF_i(\nu) d\nu \quad (3.3)$$

onde τ_ν é transmitância solar, p_l é a pressão na camada l e $SRF_i(\nu)$ é a resposta espectral do instrumento (AIRS) em função do número de onda ν sobre um intervalo finito ($\Delta\nu$). A parametrização da transmitância dos gases não é trivial, assim para um simples caso, assumindo que o algoritmo necessite apenas de três gases A, B e C, a transmitância monocromática atmosférica segundo Strow e Hannon (2002) para esses gases pode ser expressa como:

$$\tau_{ABC} = \tau_A \tau_{Beff} \tau_{Ceff} \quad (3.4)$$

onde

$$\tau_{Beff} = \frac{\tau_{AB}}{\tau_A} \quad (3.5)$$

$$\tau_{Ceff} = \frac{\tau_{ABC}}{\tau_{AB}} \quad (3.6)$$

Cada termo τ_A , τ_{AB} e τ_{ABC} é a transmitância para cada conjunto de gases, enquanto que a transmitância efetiva τ_{Beff} e τ_{Ceff} vem da razão entre as transmitâncias. No modelo direto é possível alterar os valores de concentrações de 5 gases: H_2O , O_3 , CO , CH_4 e CO_2 sendo estes considerados variáveis e todos os outros são mantidos como constantes.

A relação entre a transmitância e os diferentes perfis dos preditores é enunciada em Hannon et al. (1996) da seguinte forma:

$$- \ln(\tau_{eff}) = \sum_{i=1}^N C_i Q_i \quad (3.7)$$

onde τ_{eff} é transmitância efetiva da camada,

$$\tau_{eff}(l) = \frac{\tau_z(l)}{\tau_z(l-1)} \quad (3.8)$$

Os preditores são função simples de parâmetros como camadas de pressão, temperatura, gases atmosféricos e ângulo de visada. O termo Q_i é o i -ésimo perfil preditor, N é o número de preditores e C_i são os coeficientes de transmitância determinados por regressão linear da equação acima para um conjunto representativo de perfis atmosféricos.

3.2 Problema inverso para estimar CO

O problema inverso apresentado aqui foi retirado do artigo de Susskind et al. (2003) e é uma formulação para a inferência de vapor d' água.

A básica metodologia de inversão tem como objetivo obter a máxima informação da radiância, uma vez que essa carrega as marcas de sua interação com os diversos constituintes atmosféricos. O processo de recuperação dos parâmetros geofísicos com o algoritmo é composto do seguintes passos:

- a) Obter um perfil inicial para temperatura, umidade e ozônio;

- b) Fornecer uma primeira estimativa de radiância para áreas livres de nuvens;
- c) Recuperar parâmetros de superfície.
- d) Recuperar o perfil de temperatura
- e) Recuperar o perfil de vapor de água;
- f) Recuperar o perfil de ozônio;
- g) Estimar radiâncias para áreas livres de nuvens;
- h) A partir dos passos (g), (d) e (e) são estimados novamente os parâmetros de superfície e temperatura.

A solução do problema inverso em cada um desses passos é encontrada de forma análoga, linearizando o problema com condições iniciais dos parâmetros atmosféricos, e realizando iterações até que a resposta convirja. Esse procedimento é feito da seguinte forma:

$$X^m = X^0 + \sum_{l=1}^L F_l A_l^m \quad (3.9)$$

onde l são os níveis de pressão, o m corresponde ao número de iterações, F_l é um conjunto de J funções com o nível de pressão L , A_l^m são os coeficientes da regressão, os quais juntamente com o parâmetro X determinam a solução. A_l^m é descrito da forma:

$$A_l^m = A_l^{m-1} + \Delta A_l^m \quad (3.10)$$

ΔA_l^m é determinado em cada iteração de forma a minimizar o residual $\Delta \Theta^m$. O residual para o canal i é definido como:

$$\Delta \Theta_i^m = (\hat{R}_i - R_i^m) \left(\frac{dB_i}{dT} \right)_{\Theta_i^m}^{-1} \quad (3.11)$$

onde $\hat{R}_i$ é a radiância reconstruída livre de nuvens, R_i^m é a radiância calculada para o m -ésimo parâmetro iterativo e Θ_i^m é a temperatura de brilho correspondente a

R_i^m . Os procedimentos para estimar valores de vapor d' água e de CO (foco desse trabalho) são resolvidos de forma análoga à da Eq. 3.9:

$$q^m = q^0[1 + \sum_{l=1}^L F_l A_l^m] \quad (3.12)$$

4 DADOS E METODOLOGIA

Na primeira parte deste capítulo são apresentados os diferentes tipos de dados utilizados (simulados e observados) e suas aplicações no desenvolvimento deste trabalho. Na segunda parte é discutida a metodologia, juntamente com a descrição dos procedimentos realizados com os modelos numéricos (direto e inverso), além da etapa de validação dos resultados a partir de dados observados.

4.1 Dados

Os dados utilizados nesse trabalho foram: (1) perfis verticais atmosféricos; (2) radiância simulada; (3) radiância observada; (4) previsões de modelo numérico de tempo; (5) dados observados de CO coletados em experimento de campo. Esses dados são apresentados em detalhes abaixo:

- (1) Os perfis verticais atmosféricos correspondem a medidas de temperatura, umidade, monóxido de carbono, ozônio e metano e fazem parte do banco de dados do modelo direto. Estão dispostos em forma de colunas, num total de 49 perfis para cada constituinte atmosférico e são organizados com informações das diferentes regiões do globo terrestre. Neste trabalho esses perfis foram utilizados como condição inicial do modelo direto no cálculo de radiância espectral para os 2378 canais do AIRS.
- (2) Os dados de radiância simulada foram gerados através de simulações realizadas pelo modelo direto. Esses dados foram utilizados para o cálculo do jacobiano dos canais AIRS, procedimento necessário para a seleção de canais sensíveis ao CO.
- (3) Os dados espectrais de radiância observada foram obtidos das observações ambientais do sensor AIRS, que se encontra a bordo do satélite AQUA. Os arquivos apresentam as radiâncias no infravermelho, num intervalo espectral de 3,7 - 15,5 μm , calibradas para os 2378 canais do AIRS. Cada um dos 240 arquivos diários, também chamados de grânulos, apresenta um tamanho médio de 130 MB. O grânulo é definido como a menor agregação de dados que pode ser manipulada de forma independente (CHAHINE et al., 2001). Ele consiste de uma matriz com 135 linhas por 90 colunas (CARRIER, 2004). Os dados de radiâncias observadas foram utilizados pelo modelo inverso para realizar estimativas de CO sobre a região de interesse.

- (4) As Previsões Numéricas de Tempo (PNT) são perfis atmosféricos fornecidos pelo “National Centers for Environmental Prediction” (NCEP), os quais são utilizados como informação auxiliar no procedimento de inversão. Esses perfis têm uma resolução horizontal de um grau em latitude por um grau em longitude. Para a utilização desses dados no modelo inverso são escolhidos os pontos de grade mais próximos, no espaço e no tempo, dos dados do satélite AQUA.
- (5) Os dados observados de CO foram coletados em experimento de campo (projeto FAPESP n° 06/53277-6), através de vôos realizados com o avião do INPE, sobre a região de Alta Floresta - MT nos dias 08, 11, e 20 de outubro de 2007. Esses dados foram utilizados para validação dos resultados obtidos com o modelo inverso.

4.2 Metodologia

Nesta seção apresenta-se a metodologia adotada, acompanhada das discussões pertinentes, em particular, no que concerne a: (1) simulação das radiâncias dos 2378 canais do sensor AIRS a partir de um modelo direto (modelo de transferência radiativa); (2) seleção de canais AIRS sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera; (3) inferência das concentrações de CO a partir de um modelo de inversão utilizando diferentes subconjuntos de canais do sensor AIRS; (4) validação dos resultados obtidos com dados observados (estudos de caso). O diagrama da Figura 4.1 ilustra as diferentes fases da metodologia desenvolvida.

4.2.1 Modelo direto

Na primeira fase do trabalho foram realizadas simulações de radiâncias para todos os canais do sensor AIRS, a partir de um modelo de transferência radiativa (modelo direto). Nessas simulações foram utilizados os 49 diferentes conjuntos de perfis atmosféricos (temperatura, umidade, concentração de gases, entre outras variáveis) encontrados no banco de dados do modelo direto, os quais são representativos das diferentes condições atmosféricas encontradas no globo terrestre. É importante comentar que esses conjuntos de perfis atmosféricos do banco de dados do modelo direto foram construídos com base em dados observados.

O modelo direto utilizado foi o SARTA (“The Stand-alone AIRS Radiative Transfer Algorithm”) (STROW et al., 2003). Esse algoritmo, desenvolvido pela Universidade

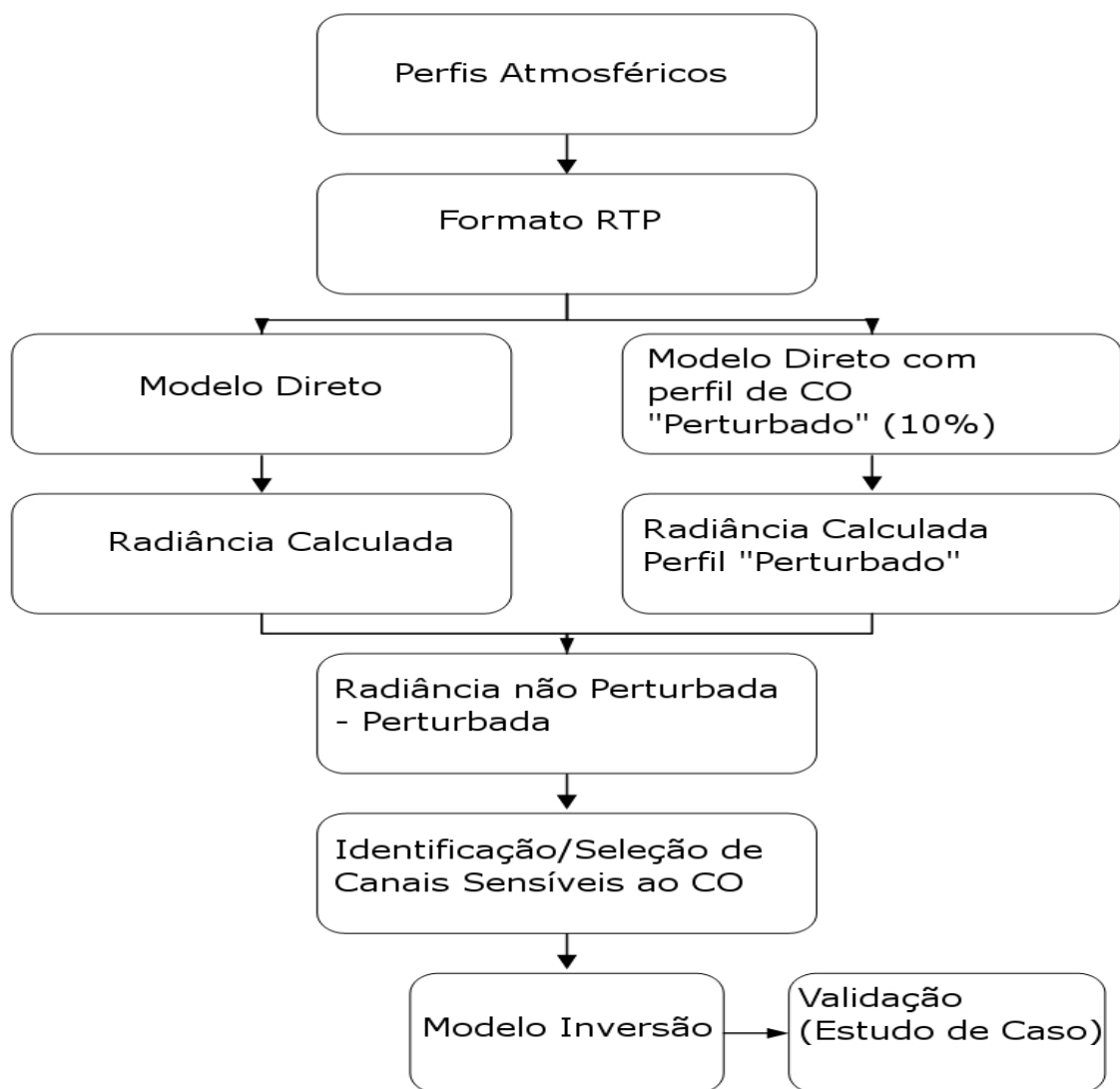


Figura 4.1 - Diagrama da metodologia.

de Maryland (UMBC), utiliza um formato específico de entrada e saída de dados, chamado de RTP (“Radiative Transfer Profile”). O arquivo RTP é um arquivo binário que contém um cabeçalho com informações gerais sobre a simulação, seguido dos dados dos perfis atmosféricos utilizados na simulação de radiação, entre outras informações. As Tabelas 4.1 e 4.2 ilustram alguns exemplos de informações que podem ser encontradas nos arquivos RTP. É importante comentar que o usuário tem liberdade de criar novas variáveis dentro do formato RTP e introduzir informações adicionais em suas simulações (detalhes em Baltimore: UMBC (2002)).

Tabela 4.1 - Cabeçalho de dados em RTP.

Cabeçalho de dados	
Nome do campo	Descrição
pmin	Valor mínimo de níveis de pressão (plevs)
pmax	Valor máximo de níveis de pressão (plevs)
ngas	Número de gases
glist	Lista de gases
gunit	Unidade dos gases
nchan	Número de canais
vchan	Frequência central
vcmin	Frequência mínima
vcmax	Frequência máxima

Tabela 4.2 - Informações dos dados em RTP.

Informações dos dados	
Nome do campo	Descrição
plat	Latitude do perfil
plon	Longitude do perfil
nrho	Número de pontos de reflexão
rho	Reflexão da superfície
rfreq	Frequência da reflexão
nemis	Número de pontos de emissividade
emis	Emissividade da superfície
efreq	Frequência da emissividade
nlevs	Número de níveis de pressão
plevs	Níveis de pressão
plays	Camadas de pressão
palts	Níveis de altitude
ptemp	Perfil de temperatura
gas_<i>	Gases atmosféricos
pobs	Pressão observada
zobs	Altura observada
rcalc	Radiância Calculada
rlat	Latitude da radiância observada
r lon	Longitude da radiância observada

As simulações de radiâncias a partir de modelos diretos têm papel fundamental na seleção de canais espectrais para serem utilizados em procedimentos de inversão. Como o sensor AIRS possui 2378 canais no infravermelho, há necessidade de selecionar canais sensíveis às alterações na concentração monóxido de carbono na

atmosfera, uma vez que nem todos os canais apresentam essa propriedade. Além disso, a utilização dos 2378 canais do AIRS não é recomendada pelo fato de existir redundância de informação (RODGERS, 1998). Desse modo, os canais redundantes e os canais não sensíveis ao monóxido de carbono poderão ser eliminados do procedimento de inversão para a inferência de CO. Assim, quando se está resolvendo diferentes parâmetros geofísicos, é aconselhável escolher um conjunto apropriado de canais sensíveis aos parâmetros que se quer recuperar e relativamente insensíveis a outros parâmetros (PARKINSON; GREENSTONE, 2000).

No contexto dos problemas relacionados com transferência radiativa atmosférica, a transmitância normalmente aparece expressa em termos de uma função, conhecida na literatura por função peso. A função peso encontrada na Equação de Transferência Radiativa (ETR) forma a base para todos os esquemas de inversão de perfis de temperatura a partir de medidas de radiômetros, sendo importante no processo de seleção de canais espectrais de diferentes instrumentos (MEEKS; LILLEY, 1963). Para recuperar perfis verticais de temperatura, a ETR pode ser expressa da seguinte forma:

$$T_{B\uparrow}(\infty) = \int_0^\infty K(\nu, h)T(h)dh + A \quad (4.1)$$

onde A representa os termos independentes do perfil de temperatura atmosférico $T(h)$, onde h é a altitude e $K(\nu, h)$ a função peso, que é ligeiramente dependente do perfil de temperatura e $T_{B\uparrow}(\infty)$ é a temperatura de brilho ascendente no topo da atmosfera.

Contudo, a recuperação de constituintes atmosféricos, como o monóxido de carbono, é intrinsecamente mais difícil pelo fato desses constituintes estarem presentes nos valores de radiância ou de temperatura de brilho dentro do coeficiente de absorção atmosférica. De fato, seria desejável selecionar um formalismo similar de função peso para a recuperação de perfis de constituintes atmosféricos, como apresentado pela equação anterior:

$$T_{B\uparrow}(\infty) = \int_0^\infty G(\nu, h)\gamma(h)dh + B \quad (4.2)$$

onde B representa os termos que independem do perfil $\gamma(h)$ e $G(\nu, h)$ a função

peso do constituinte atmosférico. No entanto, não é possível representar a ETR dessa forma. Por outro lado, pode-se contornar o problema representando a equação acima de uma forma variacional. O que se faz é introduzir pequenas perturbações na absorção atmosférica, ou seja, podem-se expressar pequenas mudanças na temperatura de brilho ou na radiância que chega ao topo da atmosfera devido a pequenas mudanças na absorção como função da altitude (ou pressão), da seguinte forma:

$$\Delta T_{B\uparrow}(\infty) = \int_0^\infty G[h, \gamma(h), T(h)] \Delta \gamma(h) dh \quad (4.3)$$

onde $\Delta T_{B\uparrow}$ é uma variação infinitesimal na temperatura de brilho introduzida por uma variação infinitesimal $\Delta \gamma(h)$ no perfil vertical de um constituinte atmosférico, por exemplo, causado por uma mudança no perfil de CO. Então, a forma variacional da função peso (G) irá descrever a informação do CO contida na temperatura de brilho para uma dada frequência. Essa função também é conhecida na literatura como função peso ou jacobiano do CO. Esse método também é conhecido como método da perturbação (SCHAERER; WILHEIT, 1979).

O método da perturbação foi aplicado a todos os 49 perfis de monóxido de carbono do banco de dados do modelo direto, para os 100 diferentes níveis de pressão atmosférica que o modelo considera. Além disso, foram introduzidas perturbações nos perfis de monóxido de carbono que variavam de 1% a 100%, de dez em dez por cento, com o objetivo de verificar se as diferentes taxas de perturbação (11 diferentes taxas) com os diferentes perfis influenciariam na quantidade de canais sensíveis. Basicamente, faz-se uma comparação do espectro de radiância do perfil inicial sem perturbação com o do perfil perturbado, para todas as camadas de pressão atmosférica do modelo direto, a fim de identificar quais são os canais sensíveis às alterações introduzidas. Com essas diferenças é possível reconstruir os jacobianos de CO para todos os canais sensíveis. Os testes realizados com o modelo direto totalizaram 53900 simulações.

Identificados os canais AIRS sensíveis às alterações nas concentrações de CO, conforme descrito anteriormente, estes canais foram agrupados em ordem decrescente de sensibilidade, levando em conta o jacobiano de cada canal, sendo o canal mais sensível o que apresentou a maior diferença entre as radiâncias dos perfis perturbados e não perturbados. Uma vez ordenados os canais AIRS, deu-se o início das simulações como o modelo inverso para inferência de perfis de CO.

4.2.2 Modelo inverso

Identificado o conjunto de canais sensíveis ao CO nas simulações com o modelo direto, no procedimento seguinte utilizou-se um modelo de inversão com diferentes subconjuntos de canais AIRS para inferir a concentração de CO na atmosfera. O modelo de inversão utilizado nesse trabalho foi desenvolvido pela NASA (SUSSKIND et al., 2003). A primeira versão desse modelo é utilizada operacionalmente pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do INPE (DSA/CPTEC/INPE). Além de inferir as concentrações de CO ele também estima os perfis de temperatura e de umidade, entre outros constituintes atmosféricos. Seus dados de entrada (condição inicial) são as radiâncias espectrais observadas pelo AIRS e dados meteorológicos (perfis atmosféricos) do modelo de Previsão Numérica de Tempo (PNT) do NCEP.

Dessa forma, os canais AIRS selecionados foram agrupados em diferentes subconjuntos para simulação com o modelo inverso. O critério utilizado para a formação dos subconjuntos de canais sensíveis ao CO foi o de agrupá-los em ordem decrescente de sensibilidade (jacobiano) de um em um canal, ou seja, o primeiro subconjunto era composto pelo canal mais sensível, o segundo subconjunto possuía os dois canais mais sensíveis e assim sucessivamente, até o subconjunto que incluía todos os canais AIRS sensíveis ao CO. Com estes diferentes subconjuntos de canais foram realizadas as simulações com o modelo inverso. O procedimento foi iniciado com o subconjunto que incluía todos os canais AIRS selecionados e o último experimento foi realizado com o subconjunto que possuía o canal mais sensível.

É importante comentar que esse agrupamento de canais foi realizado com base nos jacobianos calculados com o modelo direto para o perfil tropical típico para o hemisfério sul, uma vez que um dos objetivos é melhorar o desempenho do modelo de inversão sobre a região tropical, particularmente no que diz respeito à seleção canais para inferência de CO na atmosfera. Os resultados encontrados nessas simulações foram comparados com os resultados obtidos na DSA/CPTEC/INPE, onde o modelo de inversão utiliza um subconjunto de 20 canais AIRS para inferir a concentração de CO, e com os resultados obtidos com a utilização de um subconjunto de 36 canais sugerido por pesquisadores da NASA em Warner et al. (2007). Além disso, foram realizados alguns estudos de caso com dados observados sobre a região central do Brasil, com o objetivo de validar os resultados encontrados.

4.2.3 Validação: estudo de casos

Realizadas as estimativas de CO com os diferentes subconjuntos de canais AIRS fez-se uma validação (estudo de caso) com dados observados. Os dados observados foram coletados em experimento de campo sobre a região de Alta Floresta, Mato Grosso, região central do Brasil. É importante comentar que o experimento de campo foi realizado no período de queimadas nessa região.

As amostras de CO foram coletadas em garrafas de aço. Os conteúdos dessas garrafas foram analisados no Laboratório de Ozônio da Divisão de Geofísica Espacial (DGE) do INPE. As concentrações do CO foram determinadas utilizando a técnica de cromatografia gasosa. Nessa técnica, as medidas de CO são identificadas de acordo com a quantidade de vapor de mercúrio liberado pela reação entre o monóxido de carbono e o óxido de mercúrio (SEILER; JUNG, 1970). O erro padrão dessas medidas é de aproximadamente 3% (SEILER, 1974).

5 RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se os resultados encontrados na seleção de canais AIRS sensíveis às alterações na concentração de monóxido de carbono na atmosfera e as inferências de concentração de CO a partir de um modelo inverso. Os resultados encontrados foram comparados com as estimativas de CO obtidas operacionalmente na DSA/CPETC/INPE, com as obtidas utilizando o conjunto de canais da NASA (WARNER et al., 2007) e com dados observados em experimento de campo (estudo de caso).

5.1 Seleção de canais AIRS sensíveis ao CO: modelo direto.

Para realizar a simulação de temperatura de brilho e/ou radiância com um modelo direto, é necessário conhecer o estado atmosférico (condição inicial). Esse estado atmosférico é descrito pelos perfis verticais de temperatura, umidade, concentração de gases, entre outras variáveis. A Figura 5.1 apresenta um exemplo do perfil de temperatura (K), umidade (moléculas/cm²) e concentração de CO (moléculas/cm²), típicos da região tropical, com as respectivas unidades utilizadas pelo modelo direto SARTA.

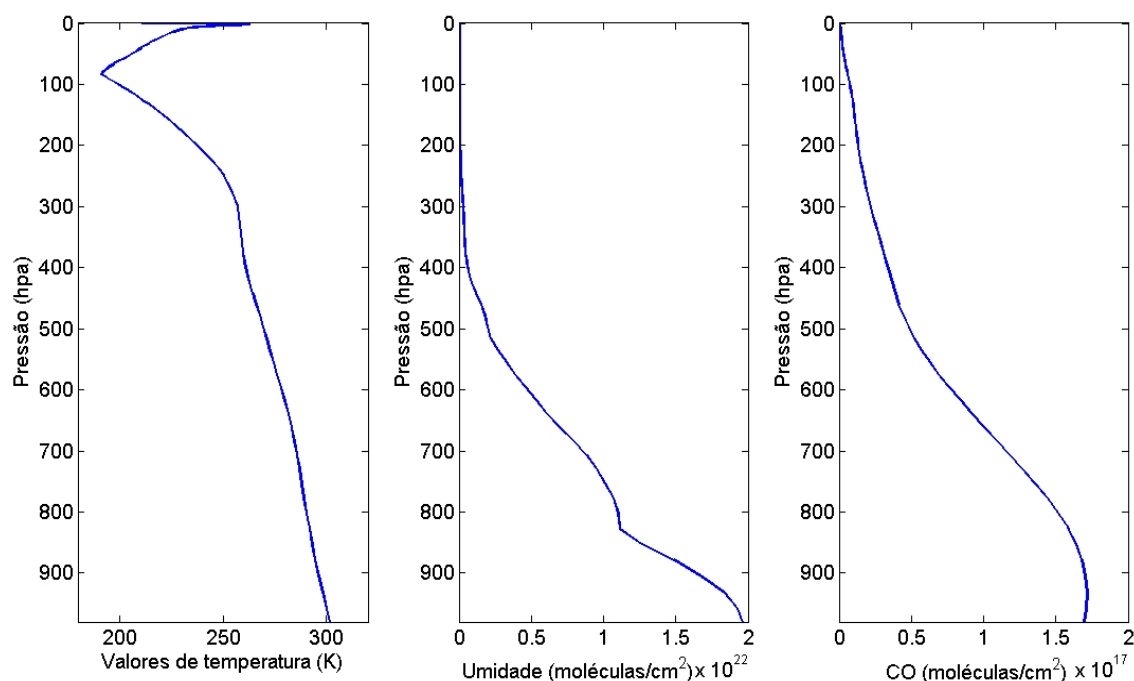


Figura 5.1 - Perfis de temperatura, umidade e monóxido de carbono do banco de dado do modelo SARTA, típicos da região tropical.

A Figura 5.2 apresenta exemplos de simulações de temperatura de brilho (ou radiância espectral) para todos os 2378 canais do sensor AIRS em função do número de onda, para diferentes conjuntos de perfis atmosféricos que representam quatro regiões do globo terrestre (diferentes latitudes). Observa-se nessa figura que o AIRS possui seus canais distribuídos em três bandas do infravermelho entre os números de onda de 650 cm^{-1} a 2700 cm^{-1} . Essa faixa espectral inclui importantes comprimentos de onda localizados em bandas de absorção de diversos gases presentes na atmosfera terrestre. Dentre eles citam-se: CO, CO₂, O₃, H₂O, dentre outros. Assim, tem-se que nem todos os canais do sensor AIRS são sensíveis ao CO.

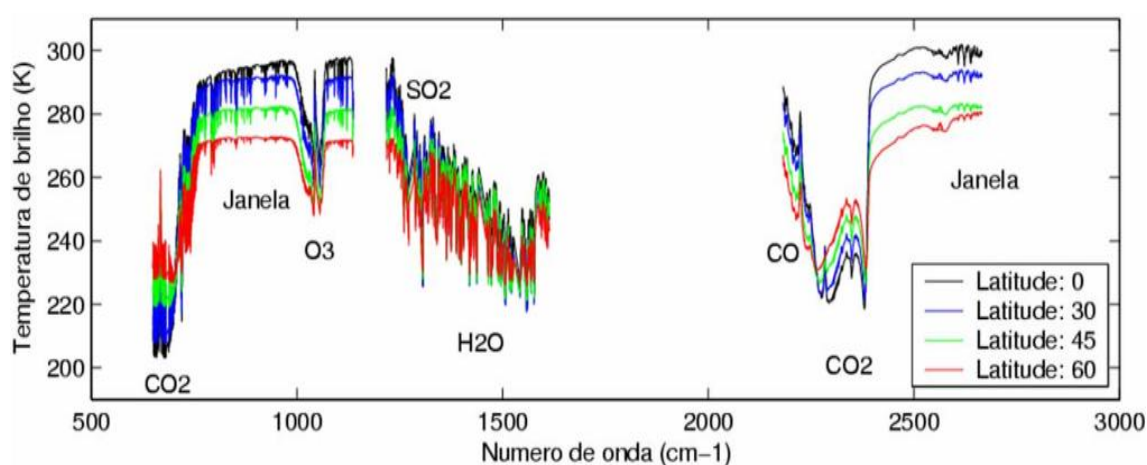


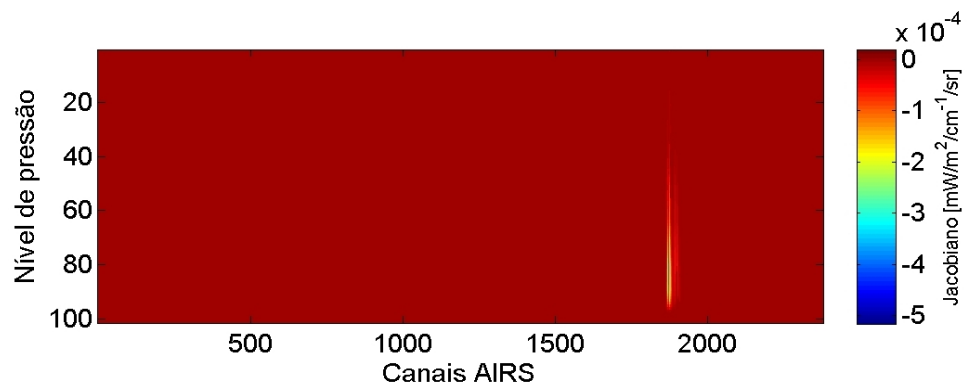
Figura 5.2 - Espectros de temperatura de brilho dos canais AIRS para quatro diferentes conjuntos de perfis atmosféricos localizados em diferentes regiões do globo terrestre (latitudes).

Dentro desse contexto, o método da perturbação foi aplicado a todos os 49 perfis de monóxido de carbono do banco de dados do modelo SARTA, para os 100 diferentes níveis de pressão atmosférica que o modelo considera. Como resultado das simulações realizadas com o modelo direto, observou-se que para os 49 diferentes conjuntos de perfis de CO utilizados, os quais são representativos de diferentes regiões do globo terrestre, e para os diferentes níveis de perturbações introduzidas (de 1% a 100%) o número de canais AIRS sensíveis ao CO se manteve constante. Isto é, foram identificados 55 canais AIRS sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera. Basicamente, as diferenças são observadas nas intensidades dos jacobianos de um perfil para o outro.

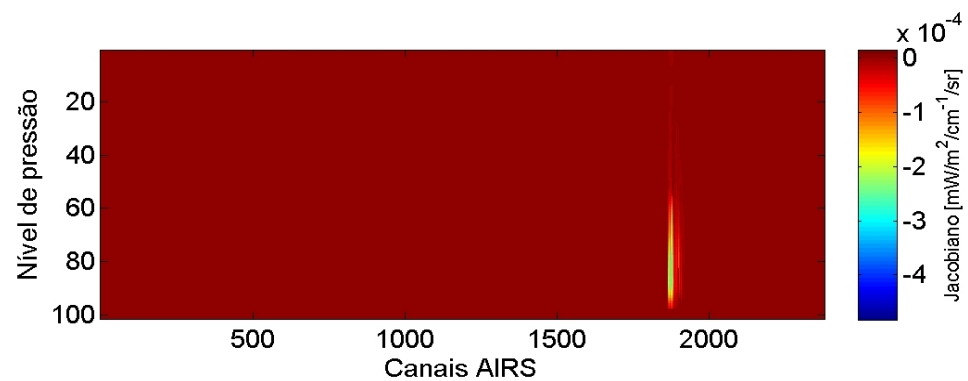
A Figura 5.3 apresenta os jacobianos dos 2378 canais AIRS para uma perturbação

de 10% na concentração inicial de CO (como sugerido por Garand et al. (2001), considerando três diferentes perfis (perfil tropical, de média latitude e de latitude alta) e a Figura 5.4 apresenta uma ampliação da Figura 5.3. A sensibilidade dos canais é ilustrada por uma combinação de cores, variando do vermelho para o azul. O vermelho representa sensibilidade nula e o azul representa sensibilidade máxima. Observa-se nessas figuras que apenas um subconjunto de canais localizados entre os canais 1800 e 2000 se mostraram sensíveis às alterações introduzidas. Ressalta-se ainda que esses canais identificados como sensíveis ao CO estão localizados na banda de absorção do CO, entre os números de onda 2180 e 2230 cm^{-1} . É importante notar ainda a existência de uma variação de sensibilidade em função da altitude (nível de pressão). A Figura 5.5 apresenta como a pressão varia com a altitude no modelo direto.

a)



b)



c)

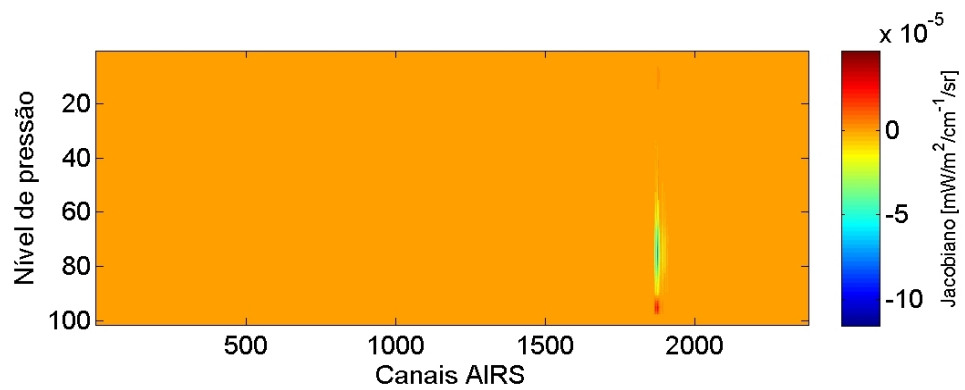
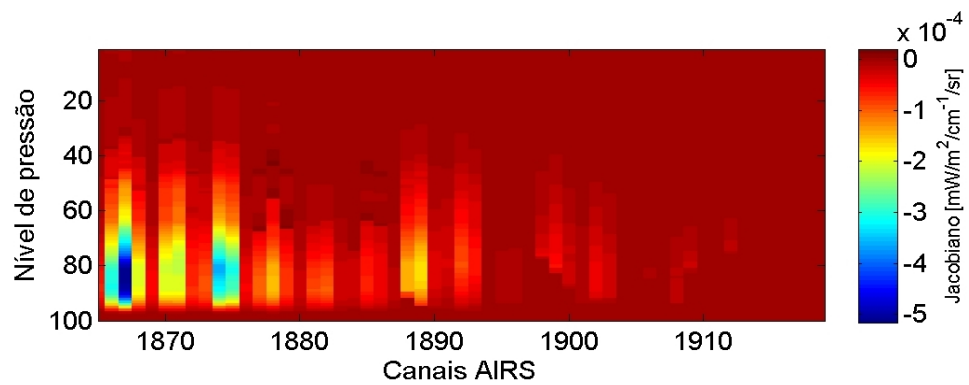
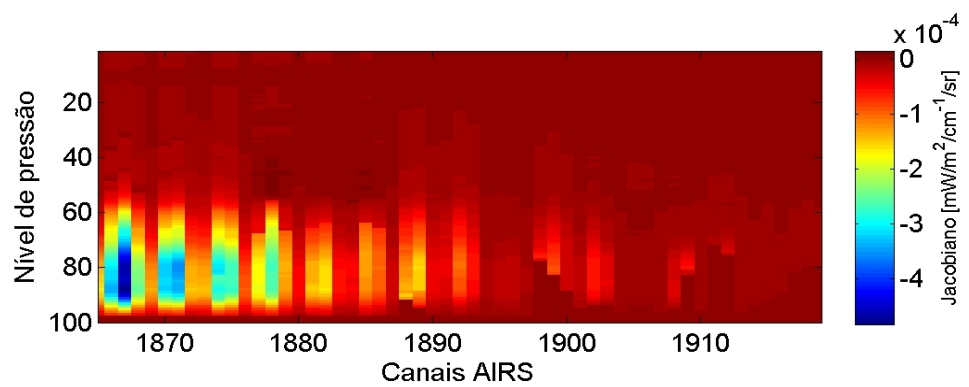


Figura 5.3 - Jacobiano do CO para os 2378 canais do sensor AIRS, considerando uma perturbação de 10% na concentração do CO para um perfil tropical (a), para um perfil de média latitude (b) e um perfil de latitude alta (c).

a)



b)



c)

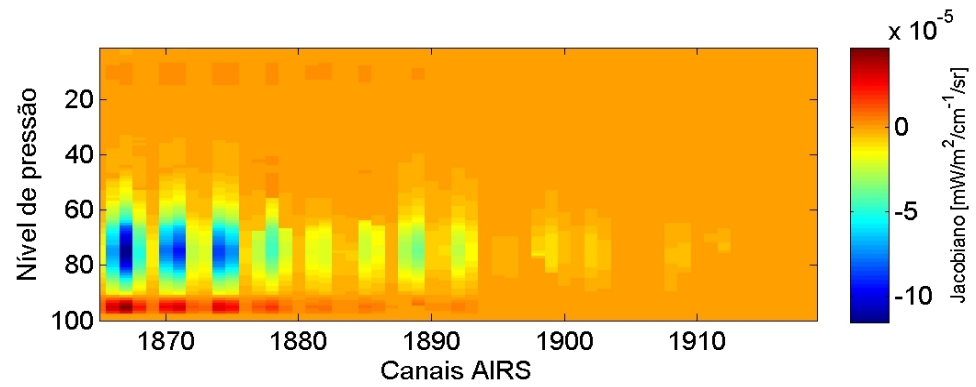


Figura 5.4 - Jacobiano do CO para os canais AIRS que se mostraram sensíveis às alterações na concentração desse gás, considerando um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).

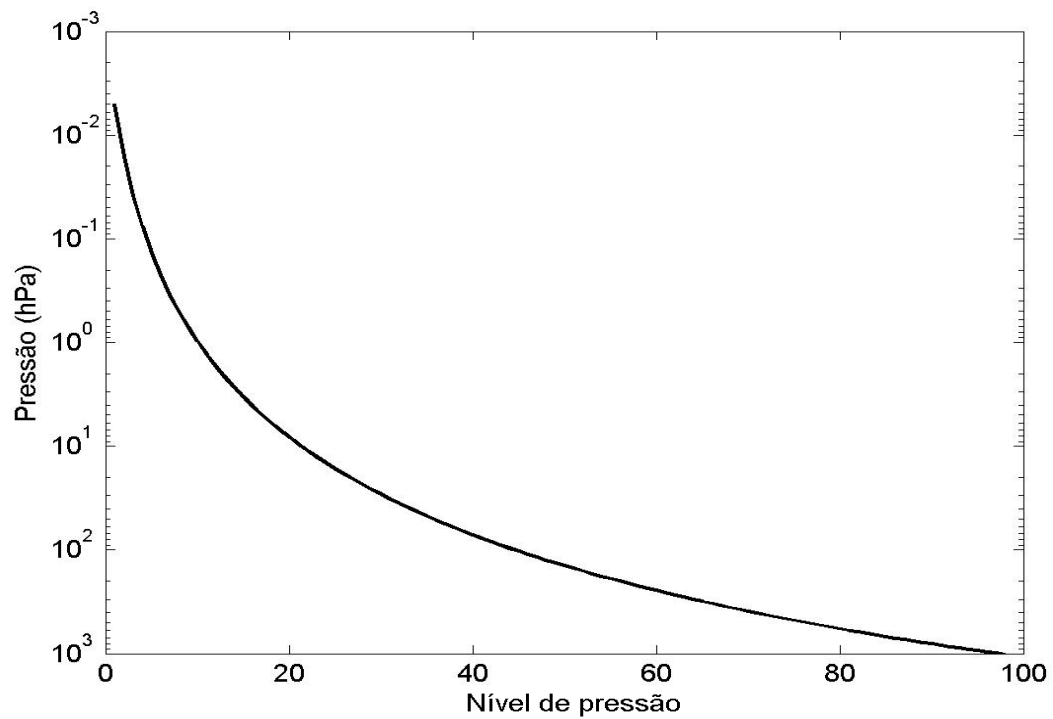


Figura 5.5 - Gráfico dos diferentes níveis de pressão atmosférica do modelo direto SARTA.

Fonte: Adaptada de Strow et al. (2003).

O espectro de radiância em função do número de onda para os canais AIRS, com a respectiva localização dos 55 canais identificados como importantes para serem utilizados no procedimento de inferência da concentração de CO com o modelo inverso são apresentados nas Figuras 5.6a e 5.6b. Esses canais estão localizados na faixa de número de onda de 2182 a 2227 cm^{-1} , a qual corresponde a uma banda de absorção característica do CO.

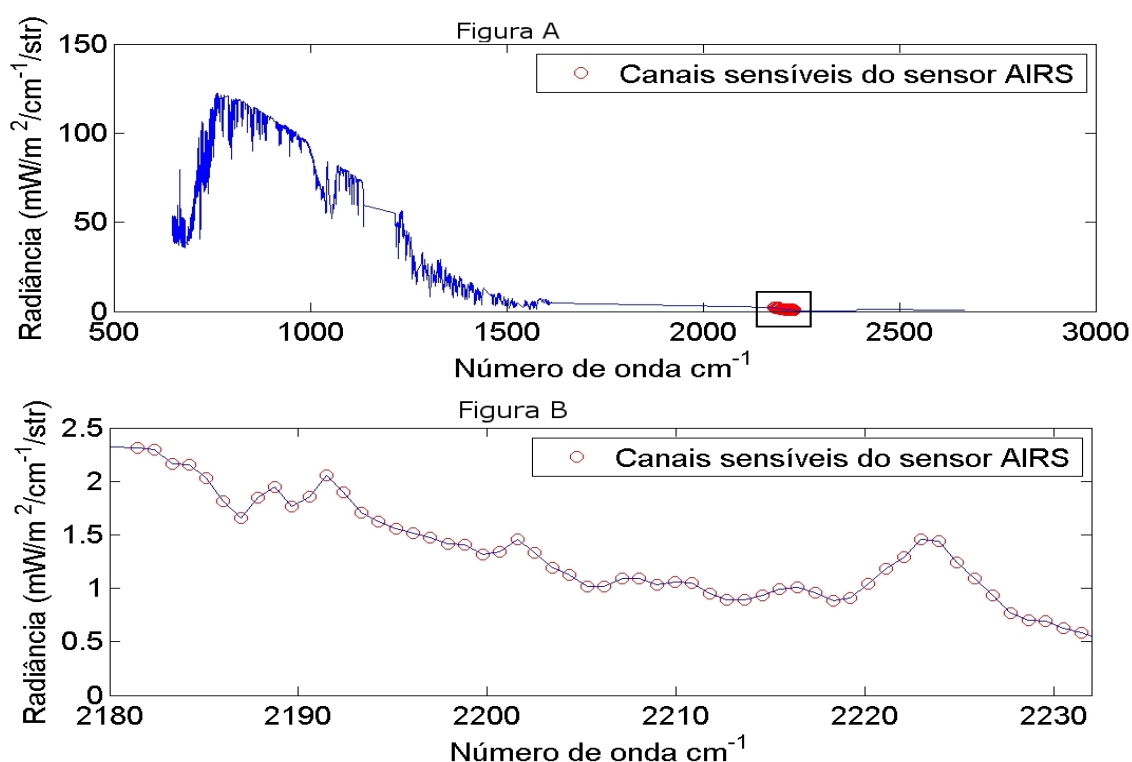


Figura 5.6 - Espectro de radiância em função do número de onda dos canais AIRS com a identificação dos canais sensíveis às alterações na concentração do perfil de CO (a) e uma ampliação desse espectro (b).

Como foram identificados 55 canais sensíveis ao CO independente do perfil utilizado, as análises com o modelo de inversão foram realizadas tomando como referência os resultados encontrados na simulação que utilizou o perfil representativo da região tropical, uma vez que o objetivo é regionalizar o modelo inverso, particularmente, no que diz respeito à seleção de canais AIRS para serem utilizados nas estimativas da concentração de CO na atmosfera sobre a América do Sul. A Tabela 5.1 apresenta o número de onda (cm^{-1}) dos 55 canais AIRS sensíveis ao CO, organizados em ordem decrescente de sensibilidade utilizando, como referência, os resultados obtidos para

uma atmosfera típica da região tropical do Hemisfério Sul. Nesse contexto, o canal 2183.31cm^{-1} mostrou-se ser o canal mais sensível às alterações na concentração de CO na atmosfera.

Tabela 5.1 - Número de onda (cm^{-1}) dos 55 canais AIRS sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera por ordem decrescente de sensibilidade.

1	2183.31	12	2188.76	23	2200.67	34	2201.59	45	2210.85
2	2189.67	13	2187.85	24	2215.50	35	2221.12	46	2223.94
3	2190.58	14	2192.41	25	2191.50	36	2214.57	47	2230.54
4	2182.40	15	2196.99	26	2204.36	37	2222.06	48	2223.00
5	2186.94	16	2207.14	27	2205.29	38	2209.92	49	2220.18
6	2186.03	17	2196.07	28	2216.44	39	2208.99	50	2217.37
7	2184.21	18	2194.24	29	2197.91	40	2224.88	51	2231.48
8	2203.44	19	2199.75	30	2213.64	41	2218.31	52	2229.59
9	2202.51	20	2181.49	31	2195.16	42	2208.06	53	2227.70
10	2193.33	21	2185.12	32	2198.83	43	2219.24	54	2228.65
11	2206.21	22	2212.71	33	2211.78	44	2225.82	55	2226.76

5.2 Simulações com o modelo inverso: estudo de casos

Uma vez identificado que o sensor AIRS possui 55 canais sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera, o próximo passo foi o de inferir a concentração desse gás a partir do modelo de inversão da NASA, o qual é utilizado operacionalmente na DSA/CPETC/INPE. Esse procedimento foi realizado para diferentes subconjuntos de canais AIRS ilustrados na da Tabela 5.1. O critério utilizado para a formação desses subconjuntos de canais foi o de agrupá-los por ordem decrescente de sensibilidade, de um em um canal, através da análise do jacobiano desses canais, isto é, o primeiro subconjunto formado pelo canal mais sensível, o segundo subconjunto com os dois canais mais sensíveis e assim sucessivamente, até o subconjunto que incluía todos os 55 canais sensíveis ao CO.

Os resultados encontrados nas diferentes simulações que utilizaram os diferentes subconjuntos de canais AIRS foram comparados com as inferências obtidas operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, que utiliza apenas 20 canais AIRS no procedimento de inversão, e com os resultados obtidos com um subconjunto de 36 canais AIRS utilizados na NASA. A Tabela 5.2 apresenta os 55 canais sensíveis ao CO em ordem crescente de número de onda (cm^{-1}), além dos conjuntos de canais utilizados na

NASA (36 canais) e na DSA (20 canais).

Tabela 5.2 - Número de onda (cm^{-1}) dos 55 canais AIRS sensíveis ao CO em ordem crescente de número de onda, além dos canais utilizados na NASA e na DSA/CPTEC.

55 Canais	NASA	DSA	55 Canais	NASA	DSA
2181.49	2181.49	2181.49	2207.13	2207.14	2207.14
2182.40	2182.40	2182.40	2208.06		
2183.31	2183.31	2183.31	2208.99	2208.99	
2184.21	2184.21	2184.21	2209.92		
2185.12	2185.12	2185.12	2210.85		
2186.03	2186.03	2186.03	2211.78		
2186.94	2186.94	2186.94	2212.71	2212.71	
2187.85	2187.85	2187.85	2213.64	2213.64	
2188.76	2188.76		2214.57	2214.57	
2189.67	2189.67	2189.67	2215.50	2215.50	
2190.58	2190.58	2190.58	2216.44	2216.44	
2191.50	2191.50	2191.50	2217.37		
2192.41	2192.41	2192.41	2218.31		
2193.33	2193.33	2193.33	2219.24		
2194.24	2194.24	2194.24	2220.18		
2195.16	2195.16		2221.12	2221.12	
2196.07	2196.07		2222.06		
2196.99	2196.99	2196.99	2223.00		
2197.91	2197.91		2223.93		
2198.83	2198.83		2224.88		
2199.75	2199.75		2225.82		
2200.67	2200.67		2226.76		
2201.59	2201.59		2227.70		
2202.51	2202.51	2202.51	2228.65		
2203.44	2203.44	2203.44	2229.59		
2204.36	2204.36	2204.36	2230.54		
2205.29	2205.29		2231.48		
2206.21	2206.21	2206.21			

Finalmente, foram realizadas algumas comparações com dados observados em um experimento de campo realizado com o avião do INPE, sobre a região de Alta Floresta (MT), região central do Brasil, com o objetivo de validar os resultados encontrados (estudo de casos). As comparações a seguir são apresentadas para três dias do experimento de campo, os quais foram escolhidos aleatoriamente.

5.2.1 1° caso - dia 08 de outubro de 2007

As figuras a seguir apresentam as estimativas do conteúdo total de CO na coluna atmosférica (em ppbv) para um grânulo de informação do satélite AQUA sobre a América do Sul, para o dia 08 de outubro de 2007. Vale comentar que um grânulo de informação do satélite AQUA corresponde a seis minutos de registro de dados. Além disso, são apresentadas as estimativas realizadas operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, que faz uso de um subconjunto de 20 canais, e as estimativas da NASA que utiliza 36 canais no procedimento de inversão. A área escolhida para estudo encontra-se entre as latitudes 5.55°S a 29.01°S e longitudes 41.43°W a 62.29°W. Essa região de cobertura do satélite AQUA foi escolhida pelo fato de cobrir a área onde foi realizado o experimento de campo com o avião do INPE.

A Figura 5.7 apresenta a estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica utilizando um único canal do AIRS (o mais sensível). As Figuras 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 apresentam os resultados das estimativas de CO utilizando no modelo inverso o subconjunto com 5, 15, 20 (DSA), 36 (NASA) e 55 canais AIRS, respectivamente. É importante observar que todos os 55 subconjuntos de canais foram utilizados no modelo de inversão. Todavia, apenas algumas estimativas serão apresentadas.

De maneira geral, observam-se nas Figuras 5.7 a 5.10 que na medida em que um maior número de canais espectrais é introduzido nas simulações com o modelo inverso as concentrações de CO tornam-se mais heterogêneas, se aproximando do campo que é estimado operacionalmente na DSA com 20 canais (Figura 5.10). Além disso, observam-se nas Figuras 5.11 e 5.12 maiores concentrações de CO, particularmente no centro da passagem do satélite, em relação às estimativas operacionais da DSA. Isso sugere que um maior o número de canais AIRS (sensíveis ao CO) no procedimento de inversão, possibilita identificar um maior número de pixels na imagem de satélite com altas concentrações de CO, muito comuns nessa época do ano devido aos eventos de queimadas nessa região. Nesse sentido, a subestimativa verificada na Figura 5.7, em relação às estimativas operacionais da DSA, pode ser justificada pelo fato de que um único canal AIRS não contém informação suficiente para inferir a concentração de CO na atmosfera com precisão. Por outro lado, isso também não quer dizer que as simulações com todos os 55 canais AIRS sensíveis ao CO apresentarão os melhores resultados. Isso porque alguns canais podem introduzir informações redundantes e até mesmo ruído no procedimento de inversão.

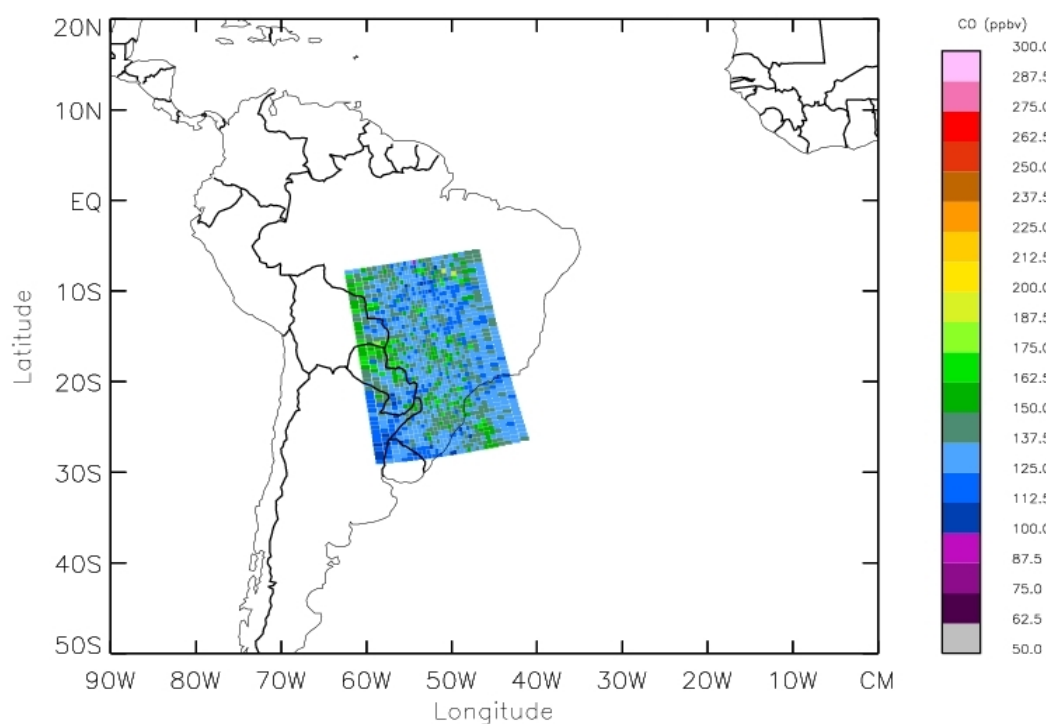


Figura 5.7 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão o canal AIRS mais sensível às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007.

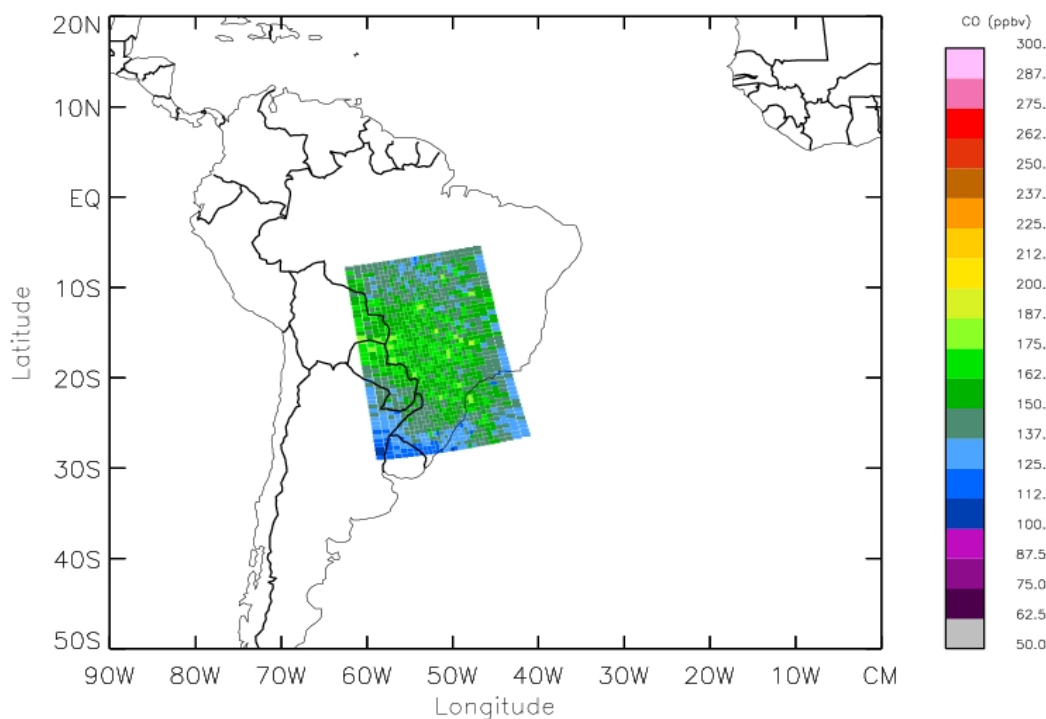


Figura 5.8 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 5 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007.

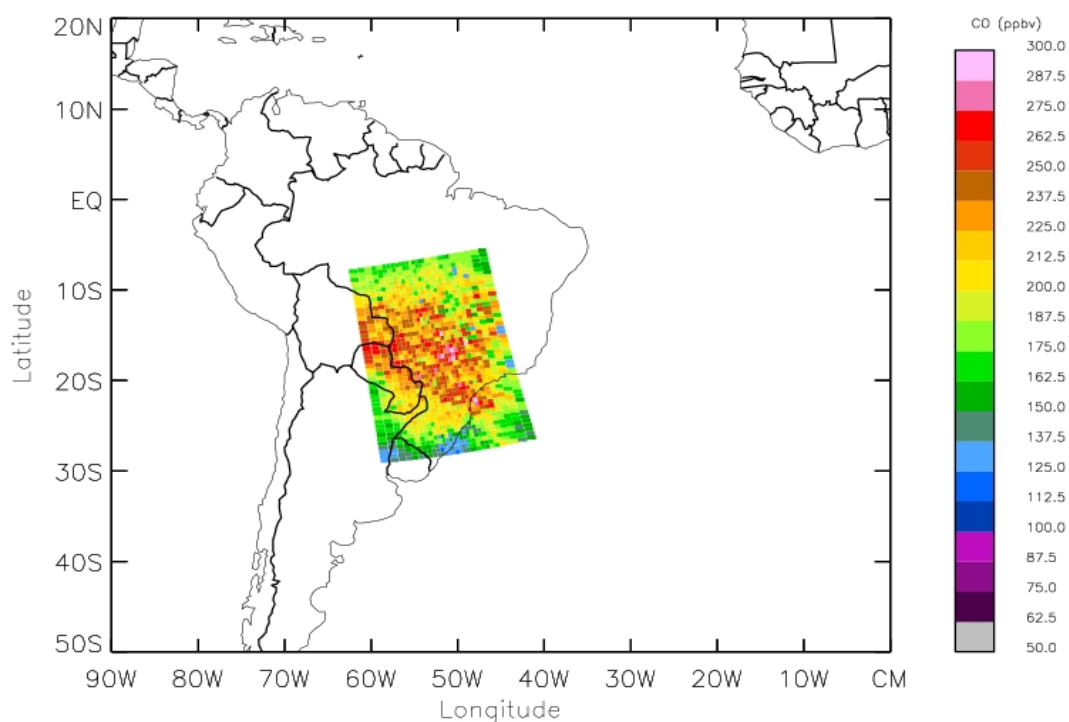


Figura 5.9 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 15 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007.

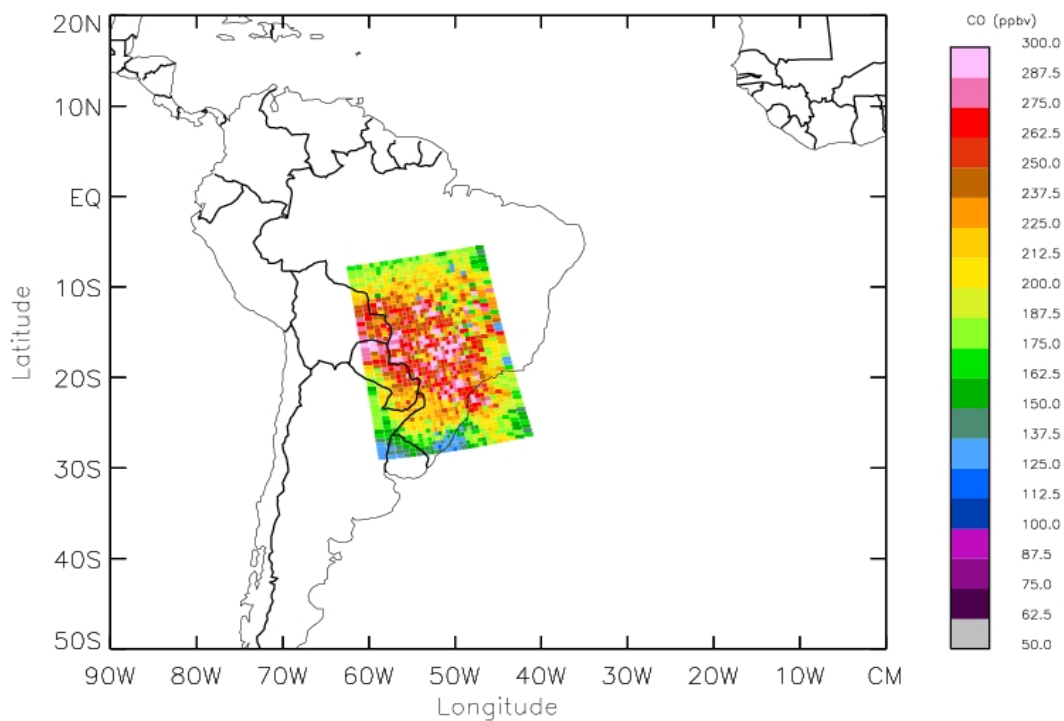


Figura 5.10 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, para o dia 08 de outubro de 2007.

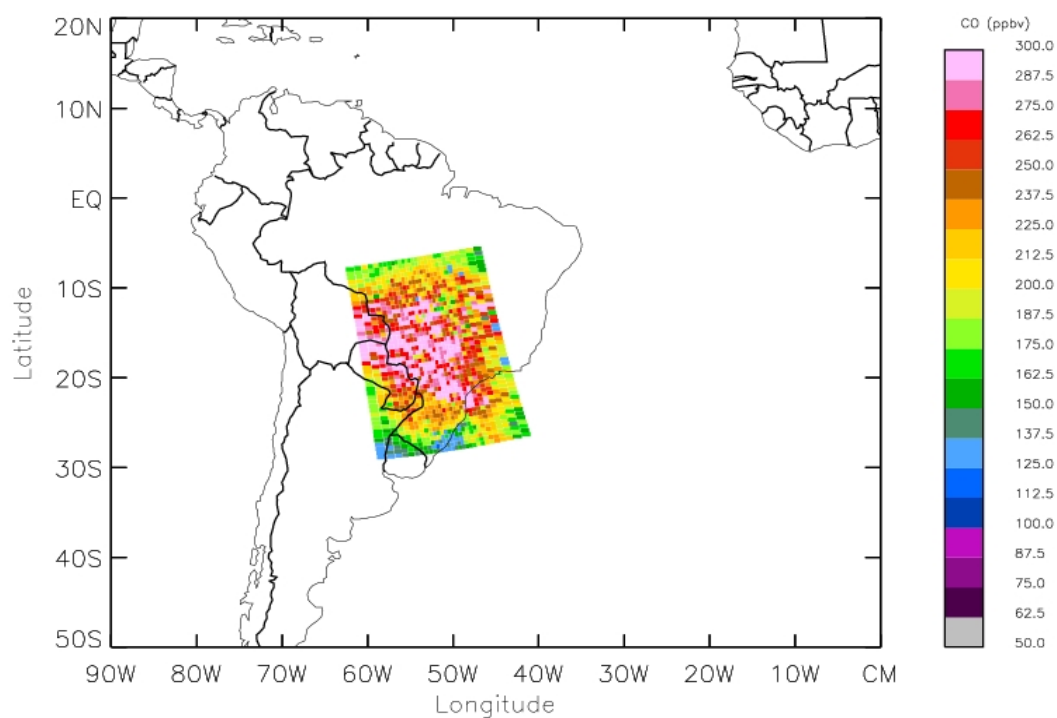


Figura 5.11 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 36 canais AIRS utilizados pela NASA, para o dia 08 de outubro de 2007.

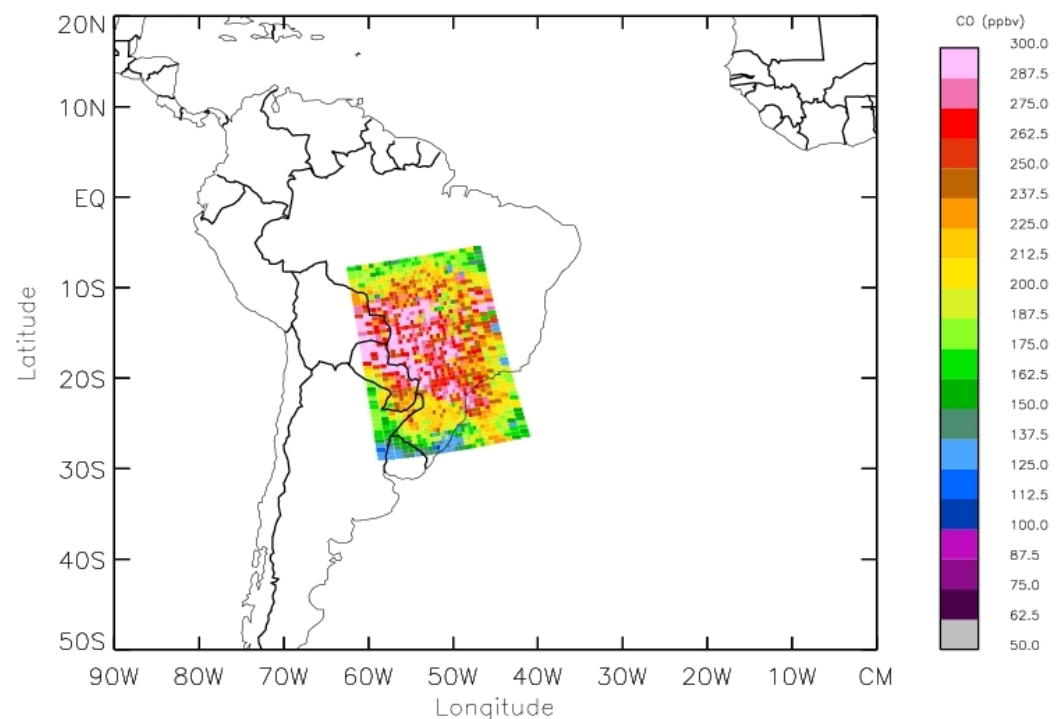


Figura 5.12 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 55 canais AIRS sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007.

Além dos campos horizontais de CO, foram realizadas comparações dos perfis verticais de CO inferidos com todos os 55 subconjuntos de canais AIRS com o perfil obtido na DSA/CPTEC, com o perfil obtido com o subconjunto de canais da NASA e com dados observados em experimento de campo com avião do INPE. A Figura 5.13 apresenta os perfis de CO para diferentes subconjuntos de canais AIRS, juntamente com os dados observados em dois diferentes níveis de altitude (avião). De maneira geral, observou-se que os subconjuntos com mais de 30 canais foram os que inferiram as maiores concentrações de CO na atmosfera e mais se aproximaram dos dados observados e do perfil da NASA. Observa-se ainda que as estimativas com 45 e 55 canais AIRS apresentou desempenho inferior ao subconjunto com 35 canais e ao subconjunto da NASA (36 canais) quando comparado com os dados observados. Lembrando que foram testados todos os subconjuntos agrupados em ordem decrescente de sensibilidade e observou-se que o subconjunto com 34 canais foi o que conseguiu estimar a máxima concentração de CO na atmosfera, em relação aos demais subconjuntos. Isto é, quando foi adicionado o trigésimo quinto canal mais sensível ao CO no procedimento de inversão, a concentração de CO na atmosfera foi inferior à estimada com 34 canais. O mesmo comportamento foi observado quando mais canais foram adicionados no modelo inversão. Isso sugere que a inclusão de mais de 34 canais não necessariamente agrega informação adicional ao procedimento de inversão. Além disso, todos os subconjuntos com mais de 21 canais apresentaram concentrações de CO superiores às estimadas no CPTEC.

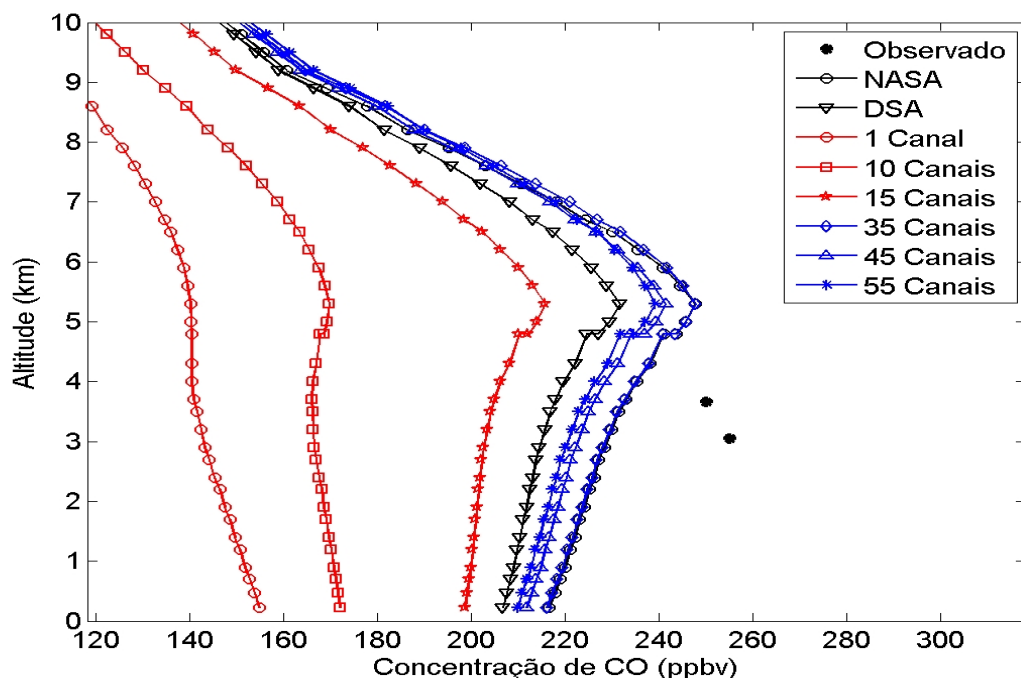


Figura 5.13 - Perfis verticais de CO (PPBV) para diferentes subconjuntos de canais AIRS sensíveis ao CO, juntamente com dados observados.

Em relação aos dados observados, o subconjunto que apresentou a menor diferença entre as estimativas com o modelo inverso para o dia 8 de outubro, para os dois níveis de pressão ilustrados na Figura 5.13, foi o subconjunto com os 34 canais mais sensíveis às alterações de CO na atmosfera. No entanto, vale ressaltar que os dados observados foram coletados em garrafas de aço para análise futura das concentrações de CO em laboratório. Nesse sentido, vale ressaltar que as amostras de gás coletadas nas garrafas de aço são representativas de uma área pequena (aproximadamente 15 km) comparada com a resolução espacial das estimativas por satélite (aproximadamente 50 km). As análises dos conteúdos dessas garrafas foram realizadas no Laboratório de Ozônio da Divisão de Geofísica Espacial (DGE) do INPE. Essas comparações foram realizadas para uma área de aproximadamente 150 km², centrada sobre a área de sobrevôo do avião na região de Alta Floresta (MT).

Pelo fato das estimativas realizadas com os 34 canais mais sensíveis ao CO terem apresentado melhor desempenho, comparado com os dados observados, os resultados que seguem serão apresentados tomando como referência esse subconjunto de canais, o subconjunto utilizado operacionalmente na DSA e o subconjunto da NASA.

A Tabela 5.3 apresenta esses três conjuntos de canais AIRS e a Figura 5.14 apresenta o perfil de CO que utilizou o subconjunto com 34 canais AIRS, bem como o perfil da DSA/CPTEC, o perfil da NASA e os dados de CO observados. Observa-se ainda na Figura 5.14 que as inferências com 34 canais foram as que mais se aproximaram dos dados observados, com desempenho superior ao obtido no CPTEC e em concordância com o resultado inferido com os canais utilizados na NASA. Além disso, o desvio padrão calculado para o subconjunto de 34 canais sensíveis ao CO é ilustrado pelas linhas tracejadas (vermelho), onde é possível notar que para a altitude de aproximadamente 4 km o dado observado encontra-se dentro do intervalo de medida delimitado na figura. A maior concentração de CO foi observada na altitude de 5 km, nível onde o perfil da DSA apresentou a maior diferença em relação aos perfis que utilizam o subconjunto de 34 canais e o subconjunto da NASA. Essas diferenças tornam-se menores para níveis acima de 5 km onde as concentrações de CO diminuem gradativamente com a altitude. A Figura 5.15 apresenta uma ampliação da Figura 5.14, onde é possível observar que as estimativas de CO com o subconjunto de 34 canais superestimam, ligeiramente, as estimativas com os canais da NASA.

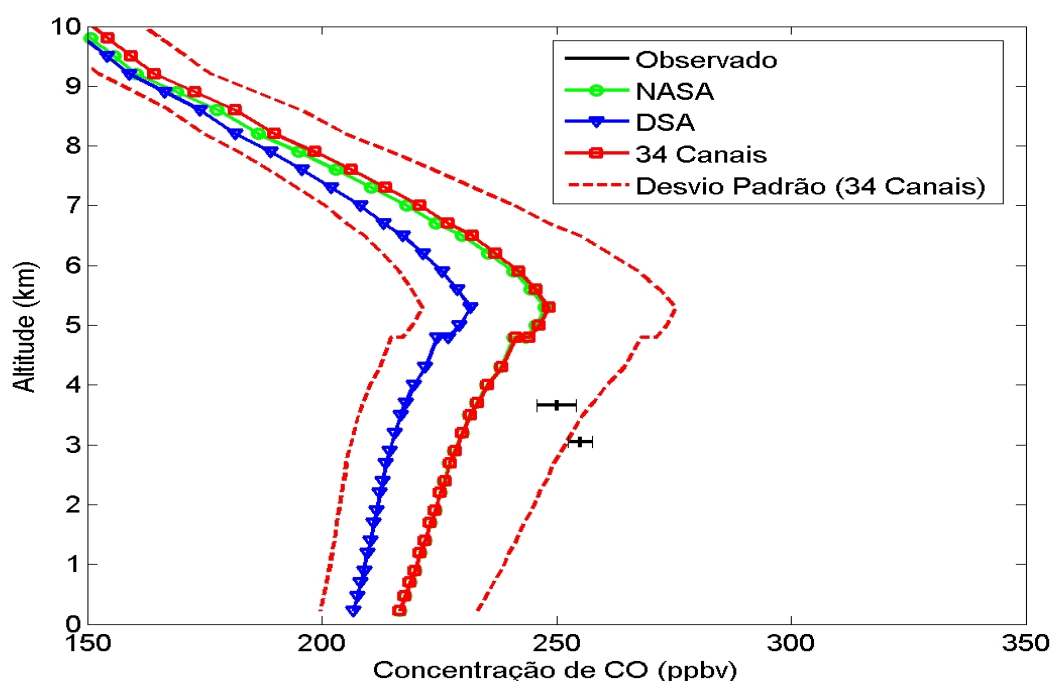


Figura 5.14 - Perfis verticais de CO (ppbv) para o dia 08 de outubro de 2007 sobre a área de cobertura do experimento de campo, usando três subconjuntos de canais AIRS no modelo inverso, juntamente com dados observados e o desvio padrão do perfil de 34 canais.

Tabela 5.3 - Número de onda (cm^{-1}) dos três diferentes subconjuntos de canais AIRS ilustrados da Figura 5.14 utilizados para inferir a concentração do CO.

34 Canais	NASA	DSA
2181.49	2181.49	2181.49
2182.40	2182.40	2182.40
2183.31	2183.31	2183.31
2184.21	2184.21	2184.21
2185.12	2185.12	2185.12
2186.03	2186.03	2186.03
2186.94	2186.94	2186.94
2187.85	2187.85	2187.85
2188.76	2188.76	
2189.67	2189.67	2189.67
2190.58	2190.58	2190.58
2191.50	2191.50	2191.50
2192.41	2192.41	2192.41
2193.33	2193.33	2193.33
2194.24	2194.24	2194.24
2195.16	2195.16	
2196.07	2196.07	
2196.99	2196.99	2196.99
2197.91	2197.91	
2198.83	2198.83	
2199.75	2199.75	
2200.67	2200.67	
2201.59	2201.59	
2202.51	2202.51	2202.51
2203.44	2203.44	2203.44
2204.36	2204.36	2204.36
2205.28	2205.29	
2206.21	2206.21	2206.21
2207.13	2207.14	2207.14
	2208.99	
2211.78		
2212.71	2212.71	
2213.64	2213.64	
	2214.57	
2215.50	2215.5	
2216.44	2216.44	
	2221.12	

É importante observar que em todas as simulações realizadas anteriormente o modelo inverso utilizado foi o mesmo. A diferença nas simulações está apenas no número de canais (comprimento de onda) utilizados no procedimento de inversão.

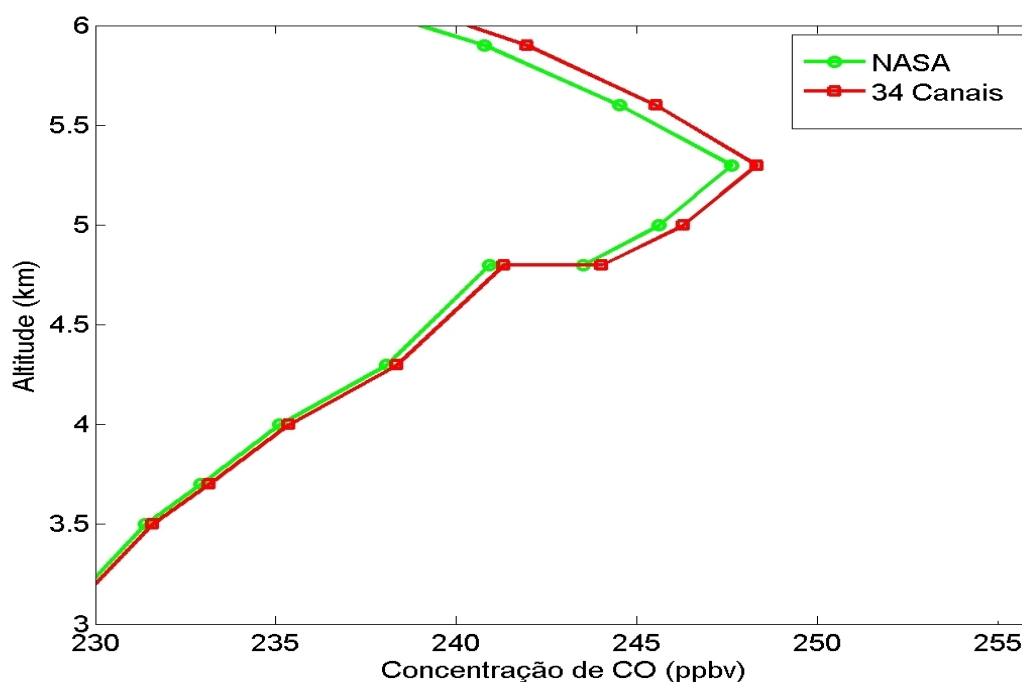


Figura 5.15 - Perfis verticais de CO para o dia 8 de outubro de 2007 inferidos com os canais utilizados na NASA e o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera, juntamente com os dados observados.

Para se ter uma idéia do erro nessas estimativas, a Figura 5.16 apresenta os desvios padrões para os três conjuntos de canais da Figura 5.14. Observa-se nessa figura que os maiores desvios encontram-se em torno de 5 km de altitude. Outra característica observada, com base no estudo de caso analisado, foi que os resultados obtidos com o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis são similares aos resultados inferidos com o conjunto de canais da NASA. Além disso, essas estimativas foram as que mais se aproximaram dos dados observados. Vale ressaltar que na literatura científica os erros esperados para as estimativas de CO utilizando o sensor AIRS são da ordem de 15% (MCMILLAN et al., 2005).

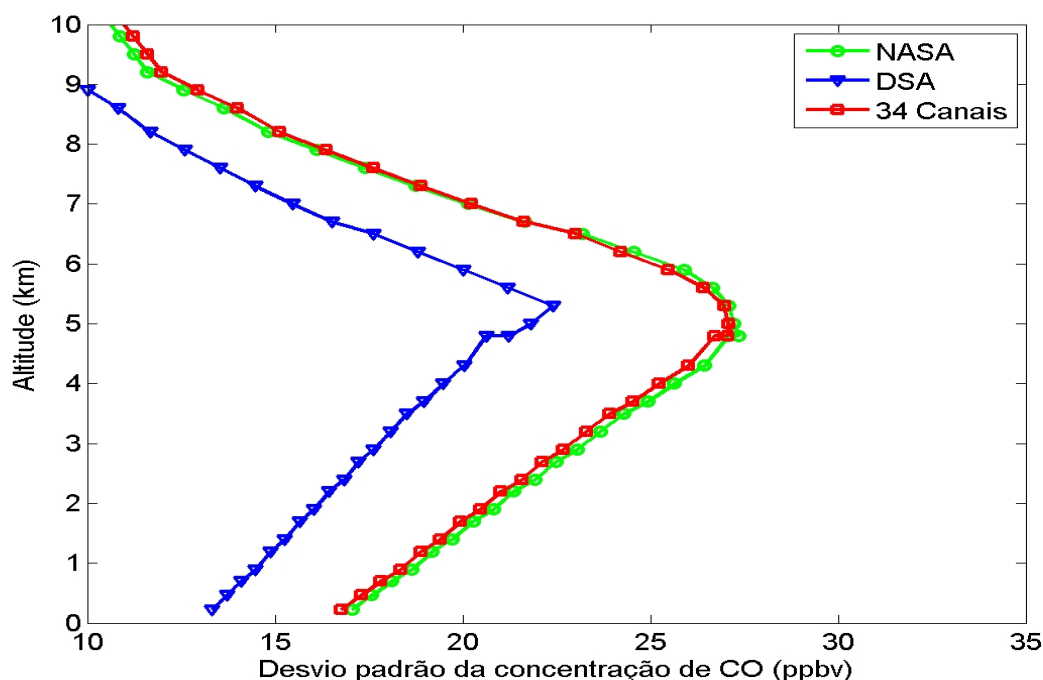


Figura 5.16 - Perfil vertical do desvio padrão observado nas estimativas de CO para o dia 08 de outubro de 2007, utilizando três diferentes subconjuntos de canais AIRS.

Quando se observa o campo da concentração de CO integrada na coluna atmosférica inferido com os 34 canais AIRS mais sensíveis, ilustrado na Figura 5.17, verificam-se concentrações de CO maiores que 250 ppbv em alguns pixels da imagem, principalmente, na porção central da passagem do satélite. De maneira geral, esse campo superestima as concentrações obtidas operacionalmente na DSA/CPTEC e concorda com os resultados encontrados com o subconjunto de canais da NASA (Figura 5.11). Fazendo a diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais mais sensíveis e as da DSA/CPTEC, ilustrada na Figura 5.18, observa-se de forma clara que o subconjunto de canais AIRS utilizados na DSA subestima as concentrações de CO realizadas com o subconjunto de 34 canais, em grande parte da imagem. Esses resultados sugerem que o subconjunto com 34 canais é mais sensível do que o conjunto utilizado atualmente no CPTEC para detectar emissões mais intensas de CO, particularmente para a região tropical, visto que os canais foram ordenados tomando como referência os jacobianos calculados para um perfil tropical típico do Hemisfério Sul.

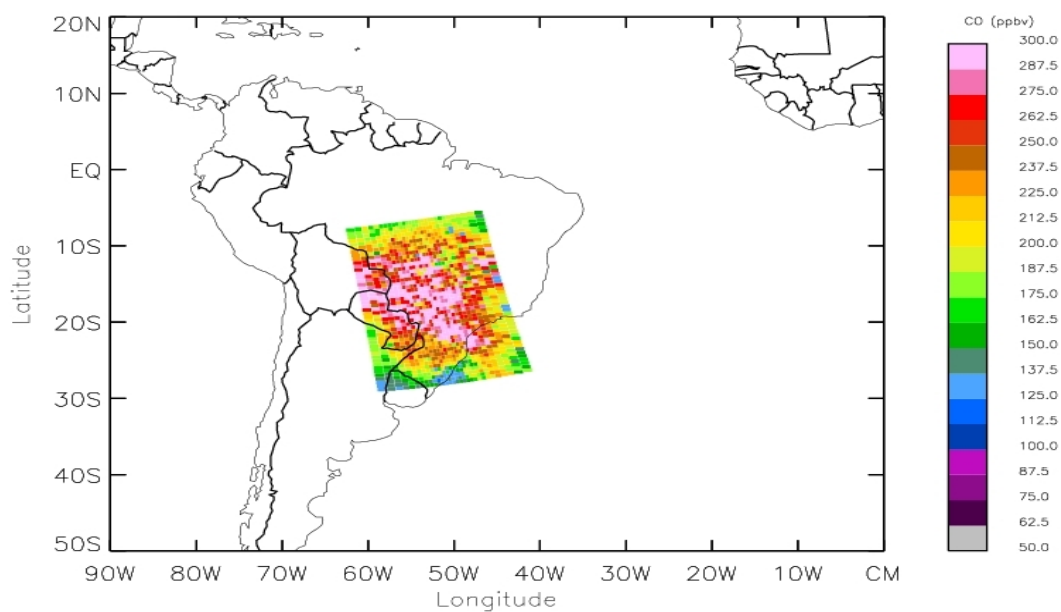


Figura 5.17 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 08 de outubro de 2007.

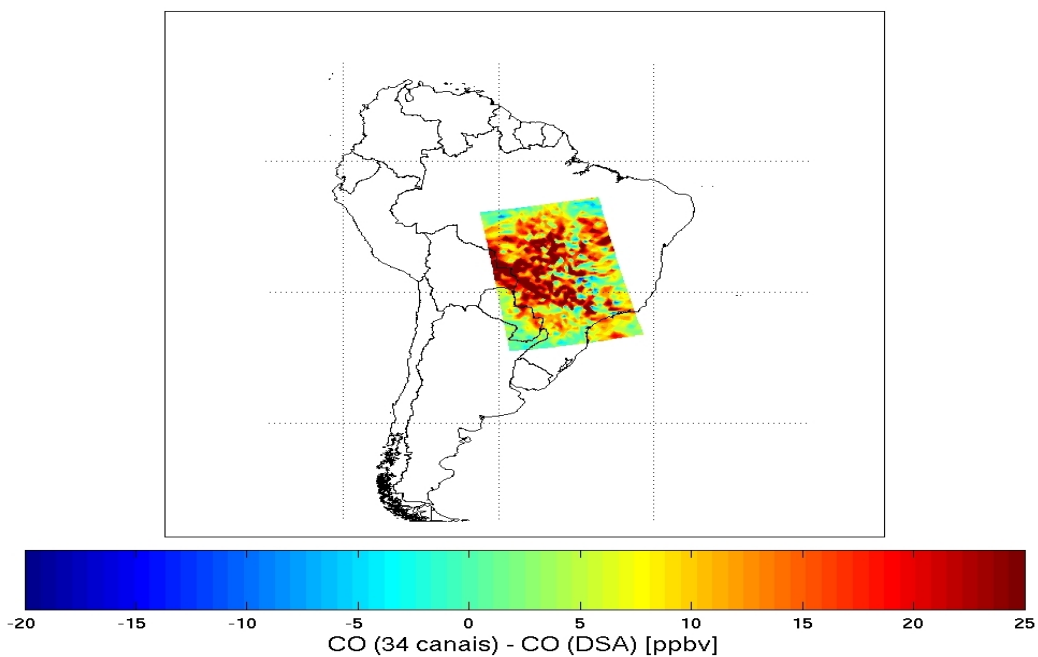


Figura 5.18 - Diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais AIRS mais sensíveis e as da DSA/CPTEC/INPE, para o dia 8 de outubro de 2007.

Vale comentar, que os dados observados com o avião do INPE durante o experimento de campo nos níveis de altitude abaixo de 3 km não aparecem nas figuras anteriores por apresentarem concentrações de CO maiores do que 300 ppbv (fora da escala do gráfico). Esses valores elevados de CO em baixos níveis da troposfera podem estar associados às plumas de fumaça muito comuns nos primeiros quilômetros da troposfera, como ilustrado em uma foto do dia 8 de outubro de 2007 tomada durante o experimento de campo realizado em Alta Floresta, Figura 5.19.

Todavia, devido à resolução espacial do sensor AIRS não é possível identificar essas plumas de fumaça a partir das informações remotas. Isso porque os produtos gerados pelo modelo de inversão, dentre eles a concentração de CO, apresentam uma resolução horizontal de aproximadamente 50 km² e, além disso, os canais do sensor AIRS sensíveis ao CO não são sensíveis às alterações na concentração desse gás próximas à superfície. Dentro desse contexto, as comparações com dados observados limitaram-se aos níveis de coleta de dados de maior altitude.



Figura 5.19 - Pluma de fumaça observada durante experimento de campo no dia 8 de outubro de 2007 na região de Alta Floresta (MT).

As altas estimativas de CO na região de Alta Floresta são justificadas pelo fato do Estado do Mato Grosso estar localizado na região central do Brasil e nos meses de agosto, setembro e outubro é comum a ocorrência de um grande número de queimadas na região. A Figura 5.20 ilustra o número de focos de queimadas detectados pelos satélites TERRA e AQUA do programa “Earth Observing System” (EOS) sobre a América do Sul, entre as 9:00 GMT (“Greenwich mean time”) do dia 8 de outubro e as 9:00 GMT do dia 9 de outubro de 2007. Observa-se nessa figura a ocorrência de muitos focos sobre o Brasil, particularmente, na região norte do Estado do Mato Grosso onde foi realizado o experimento de campo. Além disso, do ponto de vista qualitativo, as diferenças nas concentrações de CO apresentadas na Figura 5.18 estão coerentes com o número de focos de queimadas observados pelos satélites do programa EOS ilustrados na Figura 5.20. Por outro lado, não há informação sobre a intensidade dos focos de queimadas identificados na Figura 5.20. Assim, outros casos devem ser analisados.

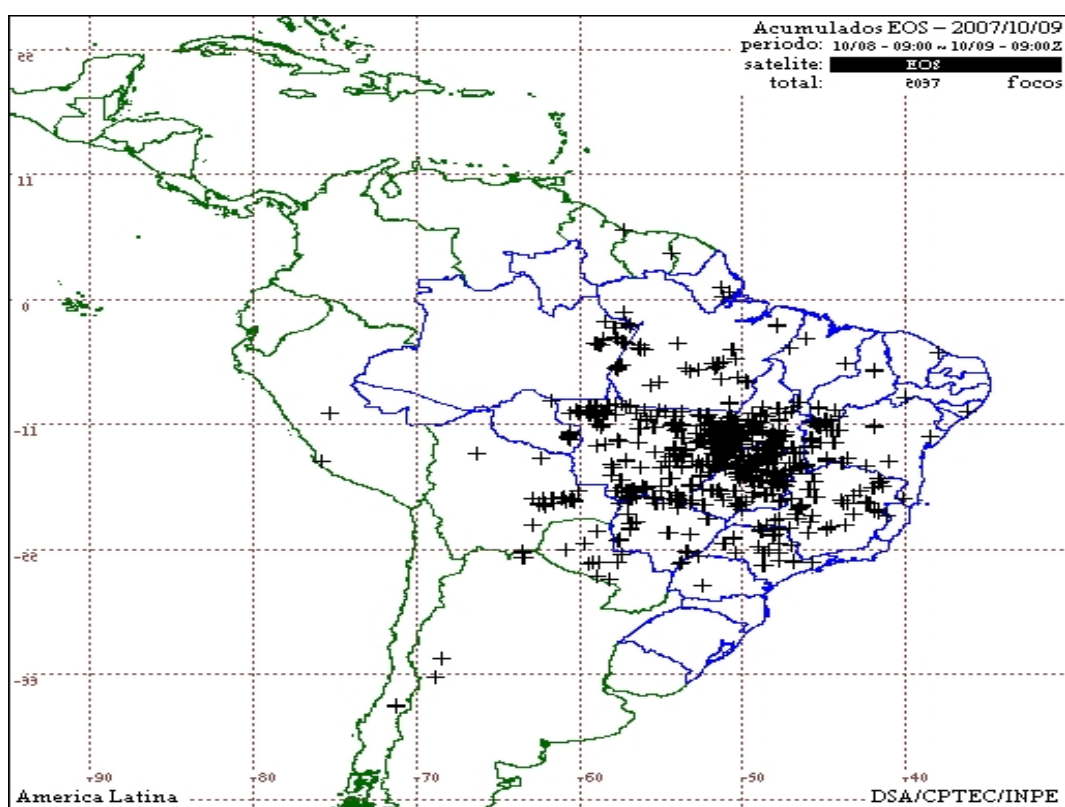


Figura 5.20 - Focos de queimadas detectadas entre as 9:00 GMT do dia 08 de outubro e as 9:00 GMT do dia 09 de outubro de 2007

Fonte: www.cptec.inpe.br/queimadas

5.2.2 2º dia 11 de outubro de 2007

O segundo caso analisado é referente ao dia 11 de outubro de 2007. As figuras apresentadas a seguir referem-se ao grânulo do satélite AQUA que cobre a região localizada entre as latitudes 8.66°S e 32.14°S e as longitudes 48.09°W e 69.41°W, o qual cobre a área onde houve coleta de dados com o avião do INPE. Ressalta-se que para esse estudo de caso, também foram testados todos os subconjuntos de canais AIRS comentados anteriormente (não apresentados aqui). Os resultados obtidos com essas simulações também apontaram que o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera foi o que mostrou melhor desempenho.

Nesse contexto, as Figuras 5.21, 5.22 e 5.23 apresentam a concentração de CO na coluna atmosférica para as estimativas realizadas com o modelo inverso utilizando os 34 canais AIRS mais sensíveis ao CO, os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC e os 36 canais AIRS utilizados na NASA, respectivamente. De maneira geral, pode-se observar nessas figuras que as estimativas realizadas com 34 e 36 canais são similares e identificam áreas com maiores concentrações de CO em relação às estimativas realizadas operacionalmente no CPTEC, particularmente sobre o Brasil. As máximas concentrações de CO encontram-se em torno de regiões onde a ocorrência de queimadas é muito comum nesse período do ano, como por exemplo, Bolívia, Paraguai e Região Centro-Oeste do Brasil. Observa-se ainda que essas concentrações de CO vão diminuindo gradativamente em direção ao sul da passagem do satélite AQUA (região da Argentina).

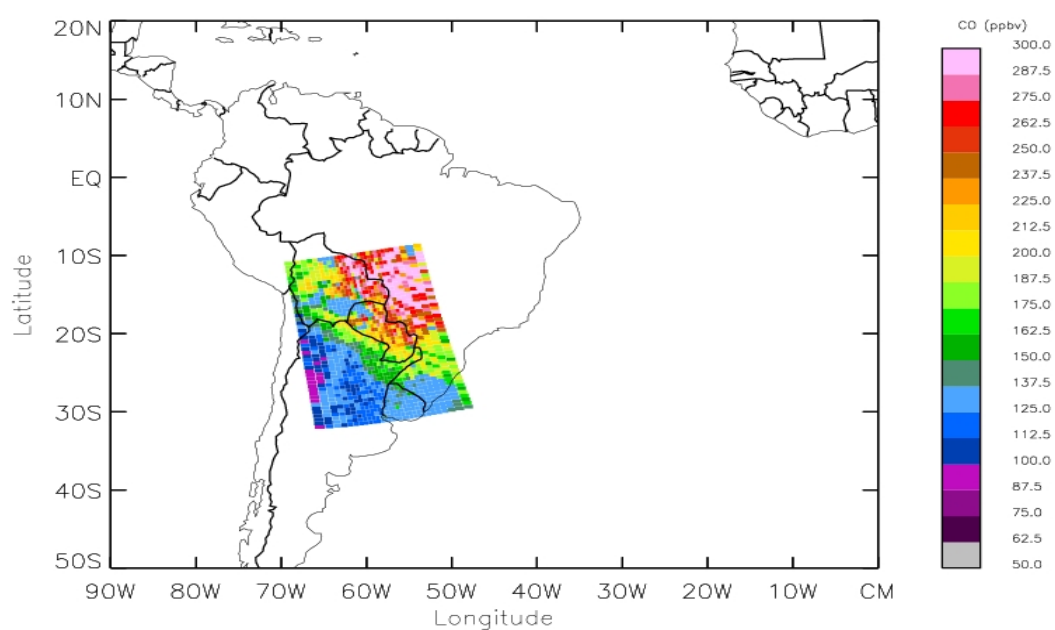


Figura 5.21 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 11 de outubro de 2007.

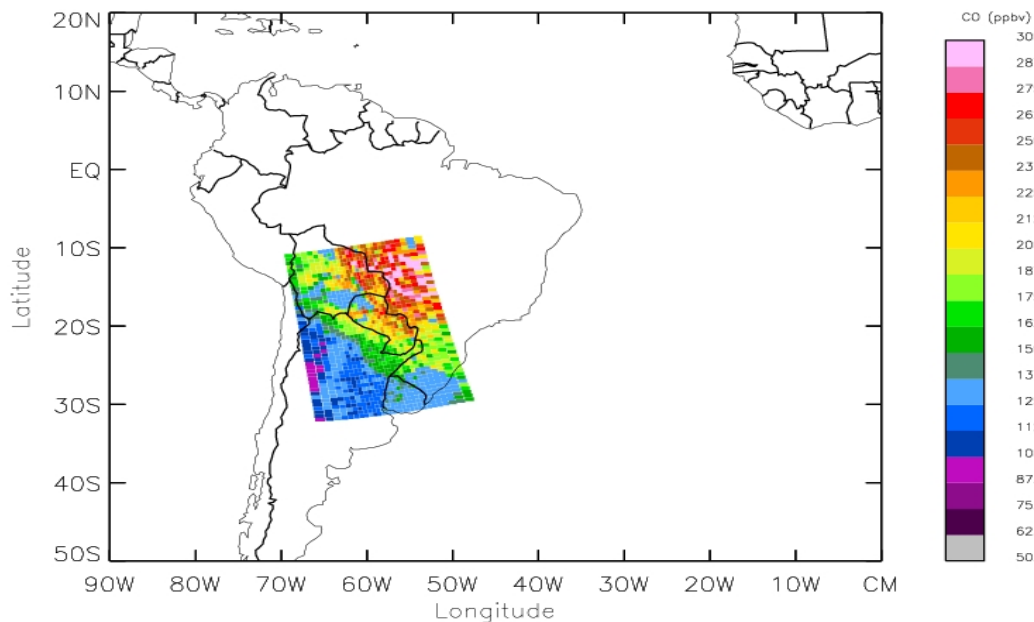


Figura 5.22 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, para o dia 11 de outubro de 2007.

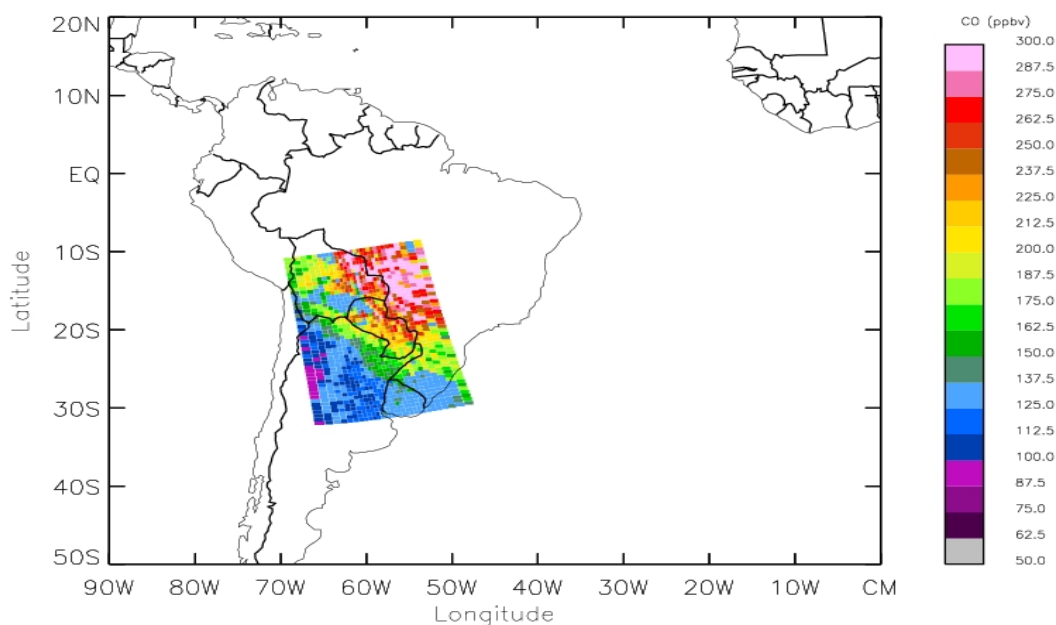


Figura 5.23 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 36 canais AIRS utilizados pela NASA, para o dia 11 de outubro de 2007.

A diferença entre as estimativas de CO realizadas utilizando os 34 canais AIRS e o conjunto de 20 canais utilizados na DSA é apresentada na Figura 5.24. Essa figura mostra que de fato as estimativas da DSA subestimam (em aproximadamente 10%) as concentrações de CO realizadas com o subconjunto de 34 canais, principalmente sobre o Brasil e nas fronteiras com a Bolívia e o Paraguai. Esse comportamento está em concordância com o mapa que apresenta o número de focos de queima identificados pelos satélites TERRA e AQUA, ilustrados na Figura 5.25, que apresenta o número de focos de queimadas sobre a América do Sul para os horários entre 9:00 GMT do dia 11 de outubro e as 9:00 GMT do dia 12 de outubro de 2007. Apesar dos focos de queimadas serem mais numerosos sobre o nordeste do Brasil, a análise se concentrou sobre a área onde houve coleta de dados observados com o avião do INPE (região Centro-Oeste).

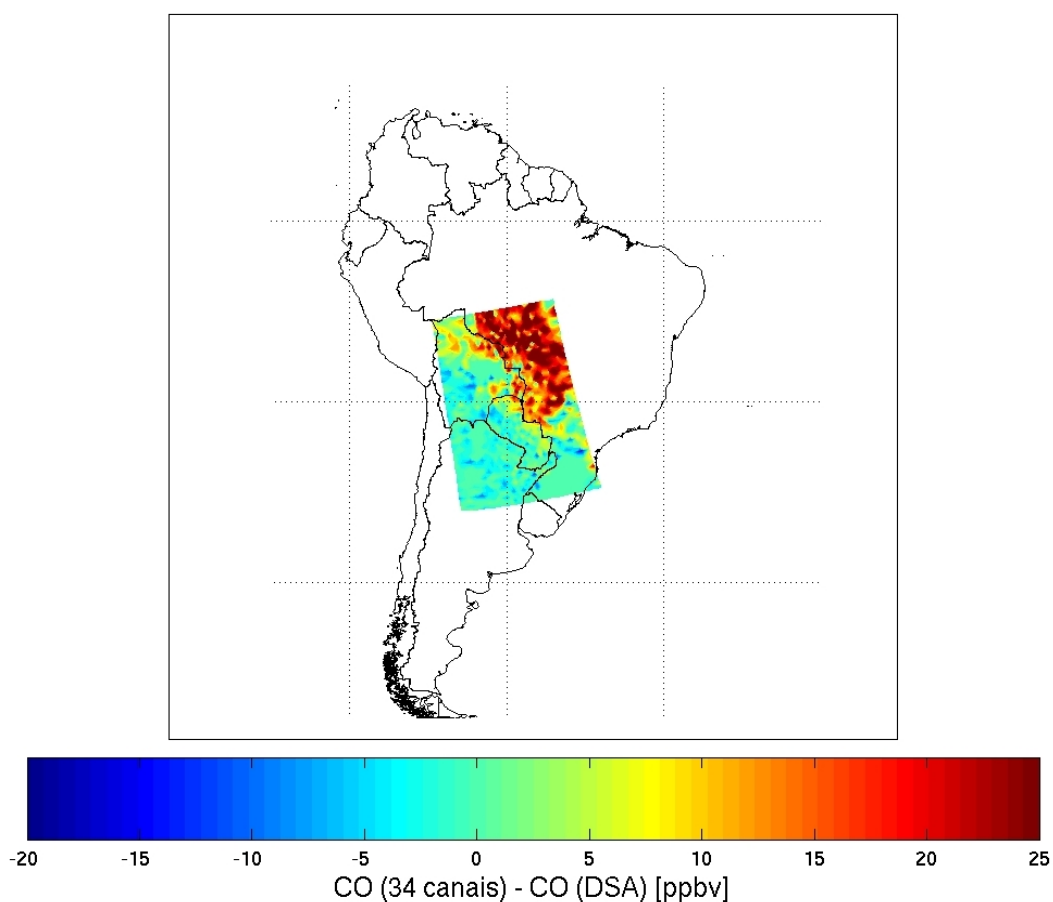


Figura 5.24 - Diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais AIRS mais sensíveis e as da DSA/CPTEC/INPE, para o dia 11 de outubro de 2007.

Assim, observa-se que foram identificados focos de queimadas sobre a passagem do satélite AQUA do dia 11 de outubro de 2007 sobre regiões da Bolívia e do Paraguai, além dos estados de Rondônia, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Vale lembrar que não se tem informação sobre a intensidade das queimadas identificadas na Figura 5.25. Todavia, as áreas onde foram identificadas como focos de queimadas coincidem com as áreas onde foram observadas as maiores diferenças entre as estimativas com 34 canais AIRS e as estimativas com 20 canais da DSA (Figura 5.24).

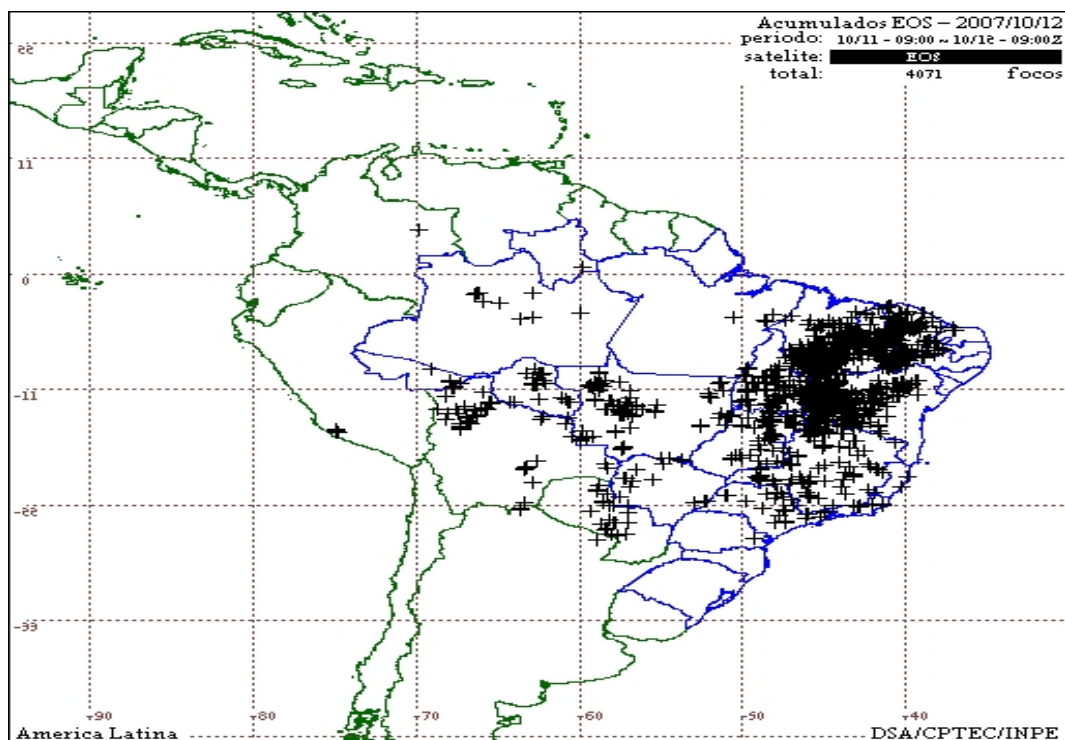


Figura 5.25 - Focos de queimadas detectadas pelos satélites TERRA e AQUA entre as 9:00 GMT do dia 11 de outubro e as 9:00 GMT do dia 12 de outubro de 2007.

Fonte: www.cptec.inpe.br/queimadas

Com relação aos perfis verticais de CO, a Figura 5.26 apresenta o perfil de CO estimado com os 34 canais AIRS mais sensíveis, o perfil da NASA e o perfil obtido operacionalmente na DSA/CPTEC. Nessa figura também é apresentado o desvio padrão calculado para o subconjunto com 34 canais AIRS (linhas tracejadas), onde nota-se que existem dados observados dentro do intervalo de medida delimitado na figura. A Figura 5.27 apresenta os respectivos desvios padrões para cada uma das estimativas de CO (NASA, DSA e 34 canais). Observa-se novamente que a inversão que utilizou o subconjunto com os 34 canais mais sensíveis e as estimativas que utilizou os canais da NASA, foram as que mais se aproximaram dos dados observados e mantiveram desempenho superior ao conjunto de canais utilizados na DSA. Com relação aos dados observados, nota-se uma maior variabilidade em relação aos dados de satélite que deve estar relacionadas com a ocorrência de plumas de fumaça muito comum na região onde os dados foram coletados. De maneira geral, os resultados encontrados nas análises do dia 11 de outubro de 2007 concordam com os resultados do dia 08 de outubro de 2007, mostrados anteriormente.

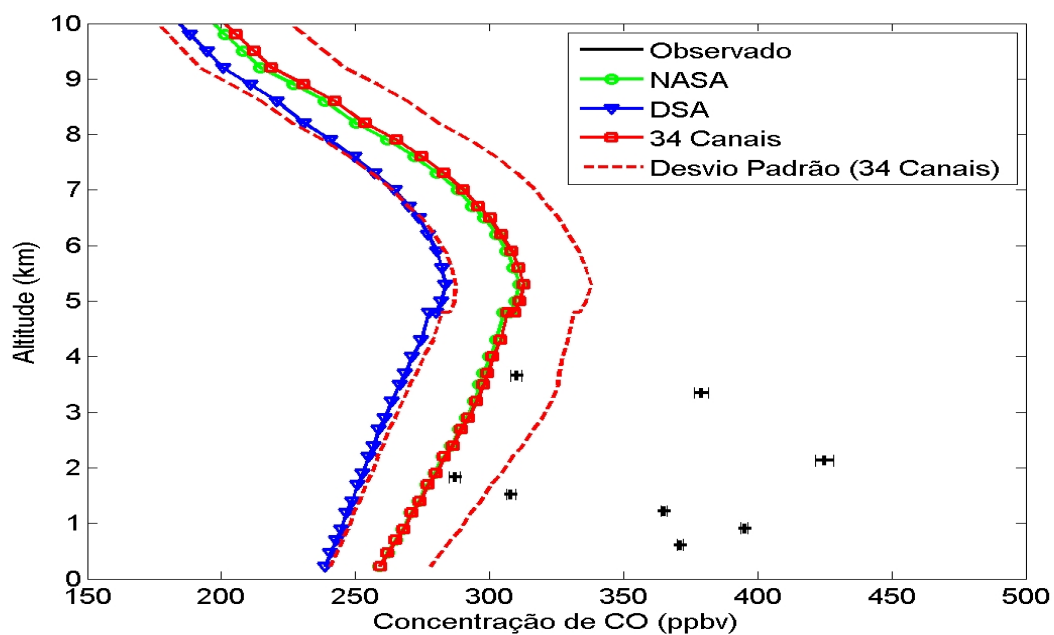


Figura 5.26 - Perfis verticais de CO (ppbv) para o dia 11 de outubro de 2007 sobre a área de cobertura do experimento de campo, usando três subconjuntos de canais AIRS no modelo inverso, juntamente com dados observados e o desvio padrão do perfil de 34 canais.

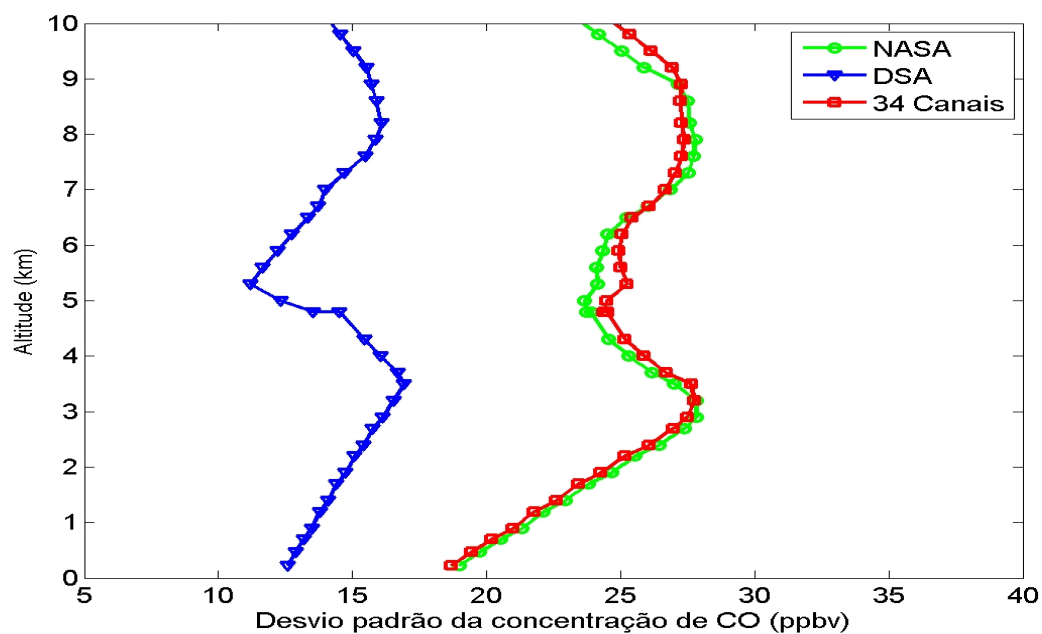


Figura 5.27 - Perfil vertical do desvio padrão observado nas estimativas de CO para o dia 08 de outubro de 2007, utilizando três diferentes subconjuntos de canais AIRS.

5.2.3 3º caso - dia 20 de outubro de 2007

O terceiro caso analisado é referente ao dia 20 de outubro de 2007. As figuras apresentadas a seguir referem-se ao grânulo do satélite AQUA que cobre a região localizada entre as latitudes 7,64°S e 31,11°S e as longitudes 46,87°W e 68.05°W, o qual cobre a área onde houve coleta de dados com o avião do INPE. Ressalta-se que também foram testados todos os subconjuntos de canais AIRS comentados anteriormente. Os resultados obtidos com essas simulações também apontaram que o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera foi o que mostrou melhor desempenho.

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam a concentração de CO na coluna atmosférica para as estimativas realizadas com o modelo inverso utilizando os 34 canais AIRS mais sensíveis ao CO, os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC e os 36 canais AIRS utilizados na NASA, respectivamente. De maneira geral, pode-se observar nessas figuras que as estimativas são similares entre si. As máximas concentrações de CO continuam sendo encontradas nas regiões onde a ocorrência de queimadas é muito comum nesse período do ano, como por exemplo, na Região Centro-Oeste do Brasil. Observa-se ainda que essas concentrações de CO vão diminuindo gradativamente em direção ao sul da passagem do satélite AQUA.

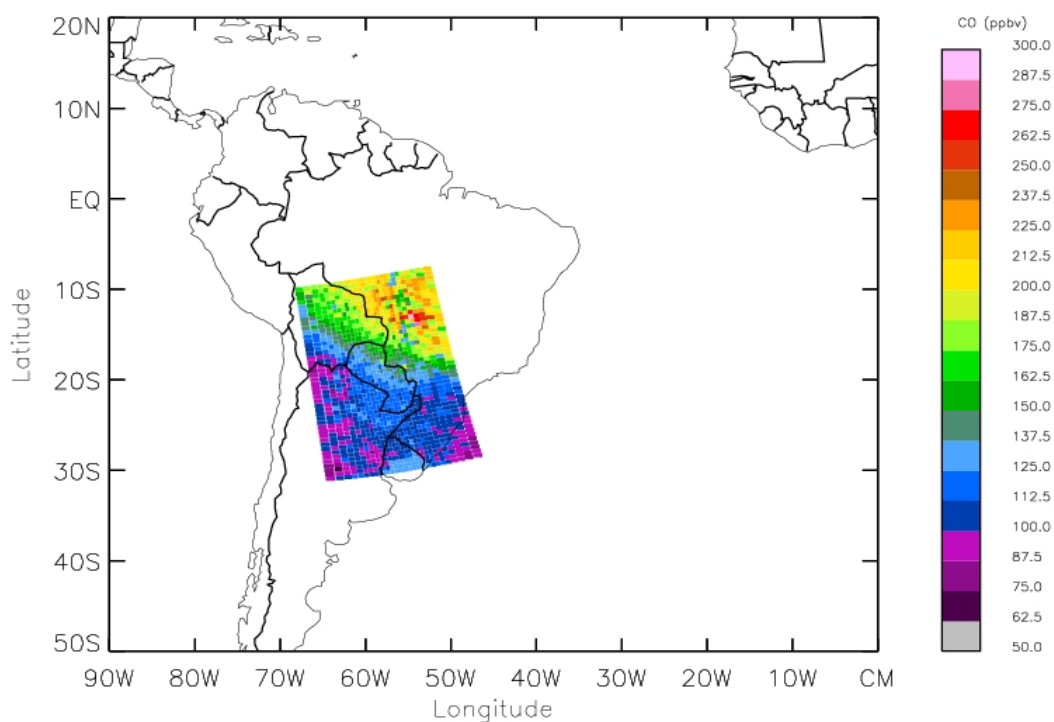


Figura 5.28 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações na concentração desse gás, para o dia 20 de outubro de 2007.

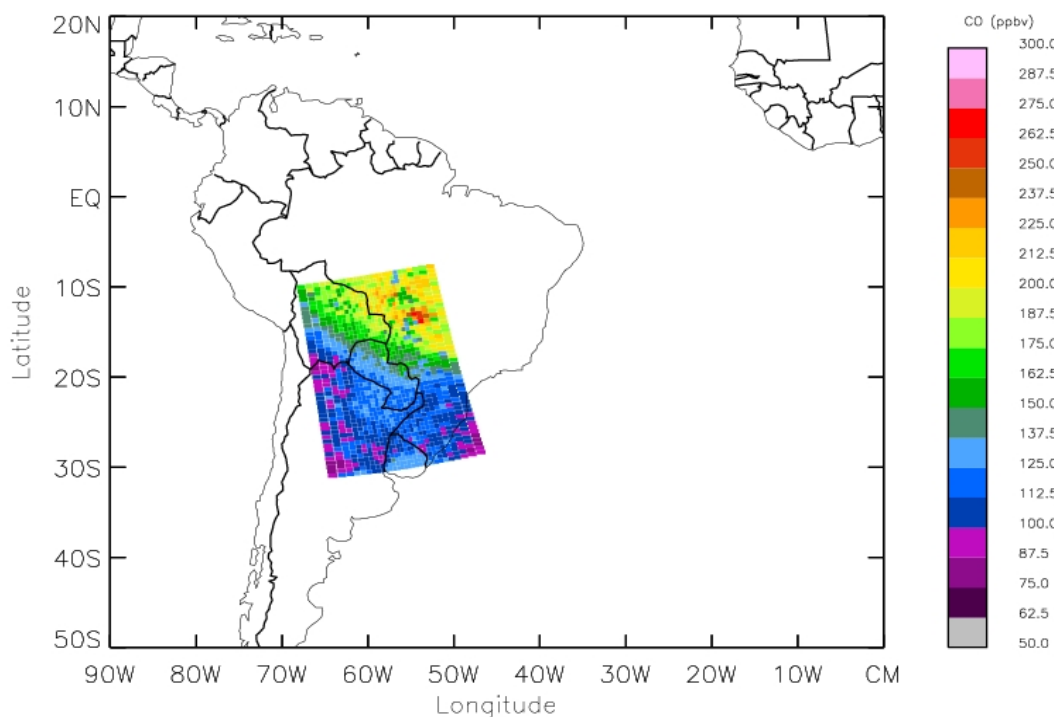


Figura 5.29 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando os 20 canais AIRS utilizados operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, para o dia 20 de outubro de 2007.

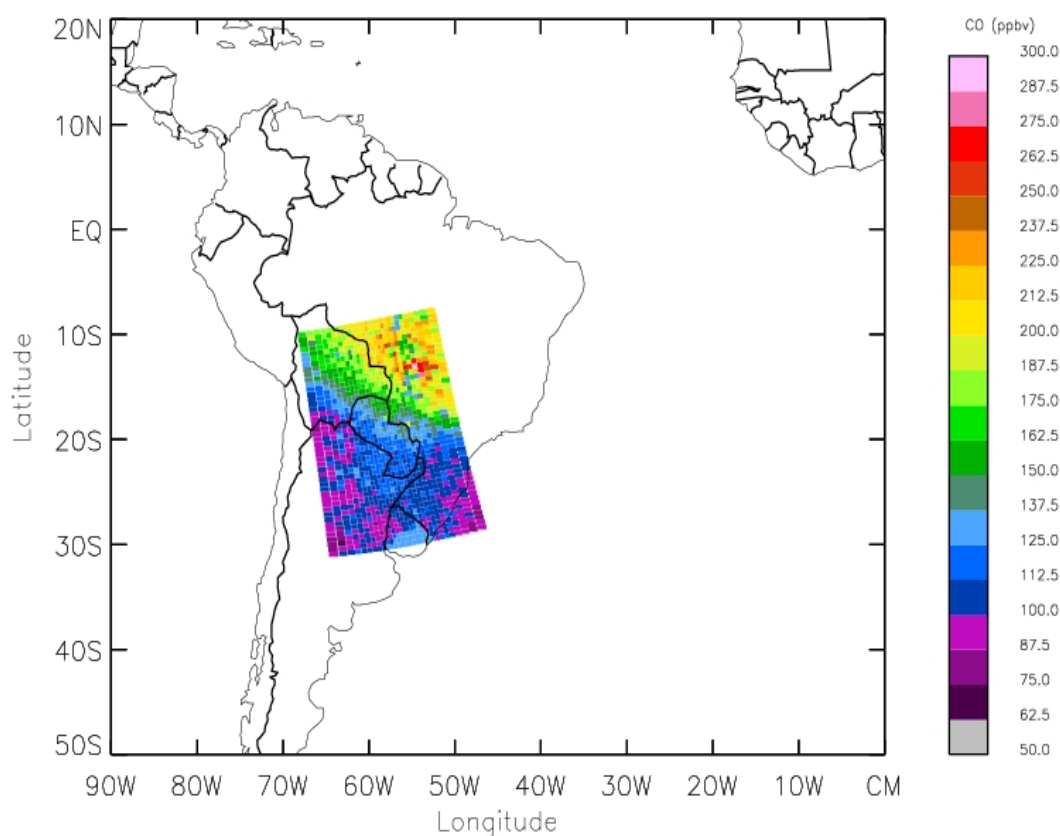


Figura 5.30 - Estimativa da concentração de CO na coluna atmosférica (ppbv) utilizando no procedimento de inversão os 36 canais AIRS utilizados pela NASA, para o dia 20 de outubro de 2007.

A diferença entre as estimativas de CO realizadas utilizando os 34 canais AIRS e o conjunto de 20 canais utilizados na DSA é apresentada na Figura 5.31. Essa figura mostra que as estimativas realizadas com o conjunto de canais da DSA continuam subestimando as concentrações realizadas com os 34 canais AIRS mais sensíveis ao CO, principalmente sobre o Brasil. Esse comportamento está em concordância com os dois casos analisados anteriormente.

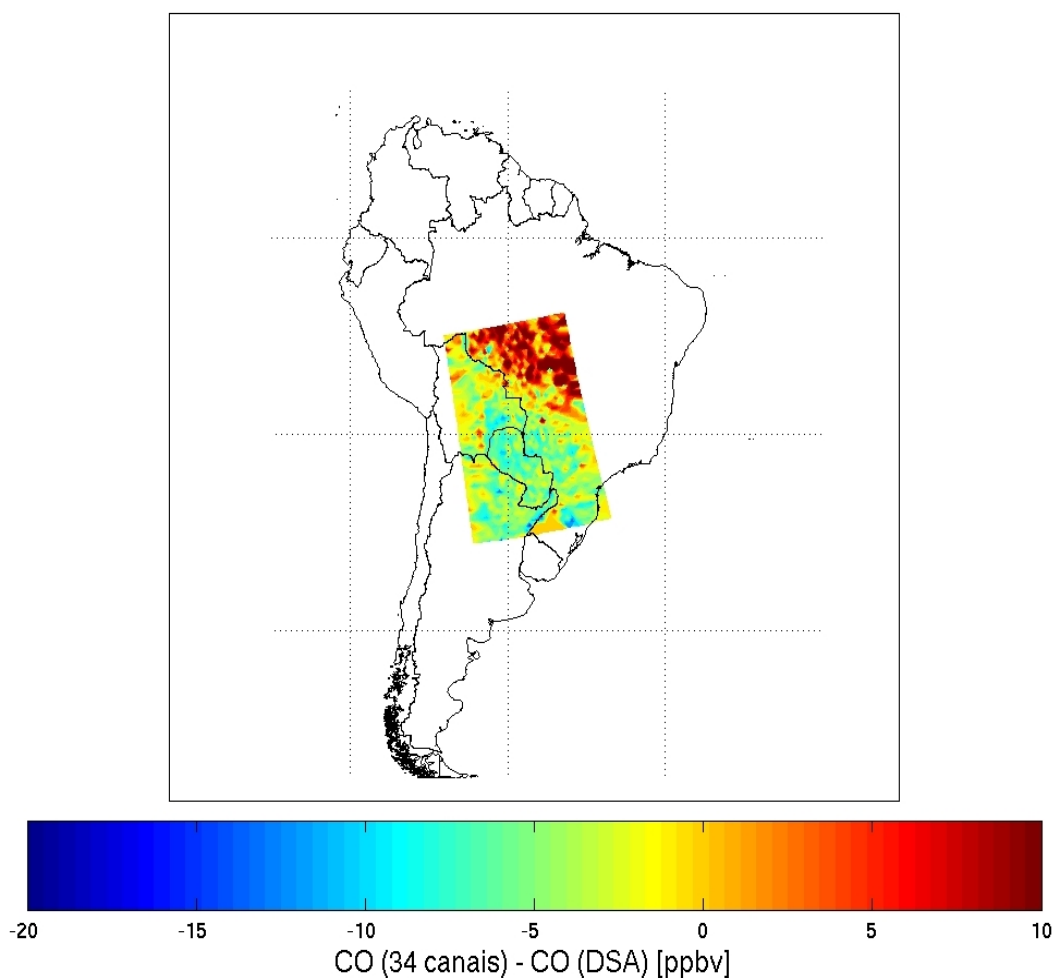


Figura 5.31 - Diferença entre as estimativas de CO com os 34 canais AIRS mais sensíveis e as da DSA/CPTEC/INPE, para o dia 20 de outubro de 2007.

O mapa que apresenta os focos de queimadas, identificados pelos satélites TERRA e AQUA, está ilustrado na Figura 5.32. Vale lembrar que essa figura apresenta o número de focos de queimadas sobre a América do Sul para os horários entre 9:00 GMT do dia 20 de outubro e as 9:00 GMT do dia 21 de outubro de 2007. Isto é, ela apresenta o número de focos de queimadas acumulados em 24 horas. Todavia, um grânulo de informação do satélite AQUA possui apenas 6 minutos de dados. Assim, algumas queimadas da Figura 5.32 poderiam não existir no momento da passagem do satélite. Além disso, não há informação sobre a intensidade desses focos de queimadas.

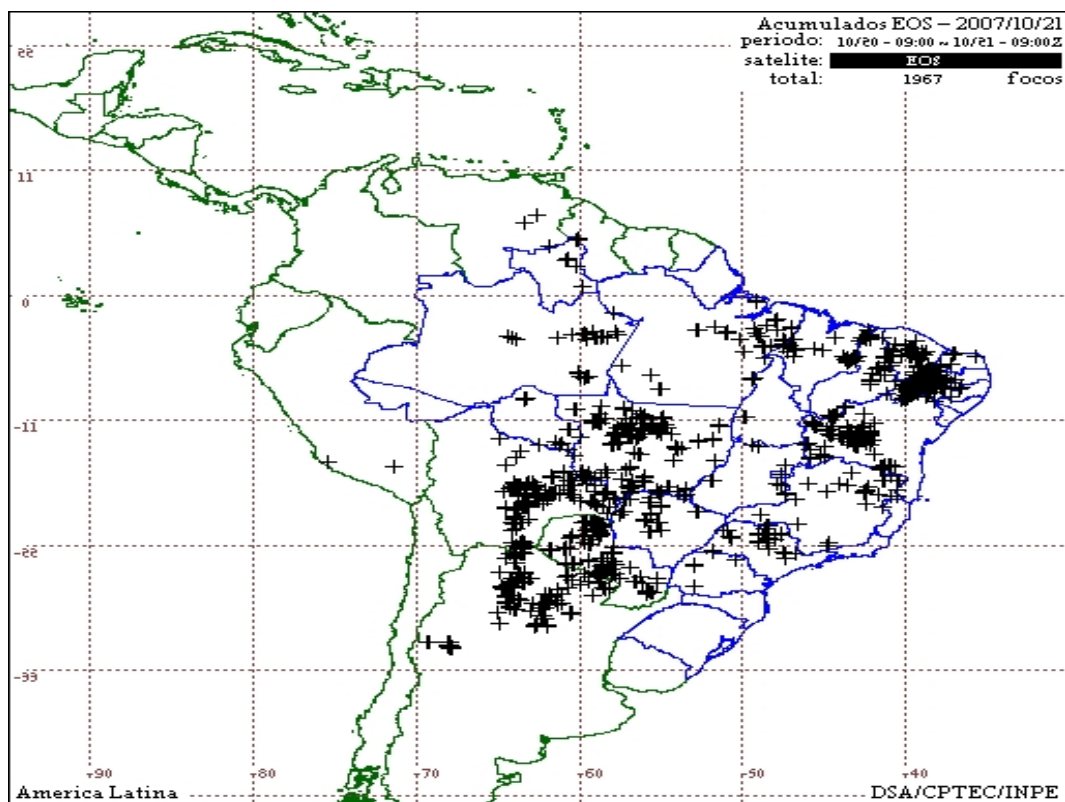


Figura 5.32 - Focos de queimadas detectadas pelos satélites TERRA e AQUA entre as 9:00 GMT do dia 20 de outubro e as 9:00 GMT do dia 21 de outubro de 2007.

Fonte: www.cptec.inpe.br/queimadas

Com relação aos perfis verticais de CO, a Figura 5.33 apresenta o perfil de CO estimado com os 34 canais AIRS mais sensíveis, o perfil da NASA e o perfil obtido operacionalmente na DSA/CPTEC. O desvio padrão calculado para subconjunto de 34 canais sensíveis ao CO também é apresentado nessa figura. Assim como na Figura 5.14, a medida observada próxima a altitude de 4 km encontra-se dentro do intervalo de medida delimitado na figura. A Figura 5.34 apresenta os respectivos desvios padrões para cada uma das estimativas de CO (perfil vertical). De maneira geral, observam-se maiores concentrações de CO estimadas por satélite em torno de 5 km de altitude e que praticamente não há diferenças entre as três estimativas para níveis acima de 6 km de altitude. O desvio padrão mostrado na Figura 5.34 apresenta maiores variações no mesmo nível onde as máximas concentrações foram observadas (5 km de altitude).

Com relação aos dados observados, foram coletadas duas amostras de gás no nível

mais alto onde houve coleta de dados (entre 3 e 4 km), uma seguida da outra. Verificou-se nessas amostras uma diferença de aproximadamente 10% nas concentrações de CO, sugerindo que a atmosfera não estava bem misturada na região. Além disso, plumas de fumaça também foram observadas no dia 20 de outubro de 2007 e isso, em geral, resulta em concentrações elevadas de CO em baixos níveis de altitude (próximos à superfície). Todavia, a inversão que utilizou o subconjunto com os 34 canais mais sensíveis, juntamente com as estimativas que utilizou os canais da NASA, foi a que mais se aproximou dos dados observados e manteve desempenho superior ao conjunto de canais utilizados operacionalmente na DSA. De maneira geral, os resultados encontrados nas análises do dia 20 de outubro de 2007 concordam com os resultados do dia 08 e 11 de outubro de 2007, mostrados anteriormente.

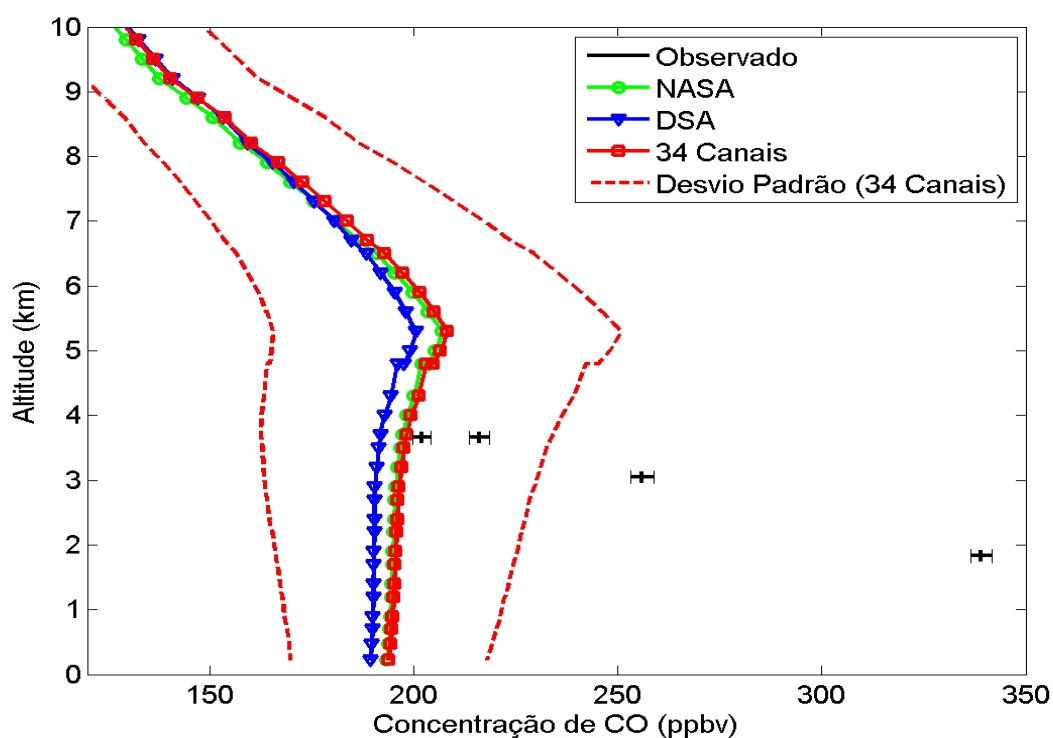


Figura 5.33 - Perfis verticais de CO (ppbv) para o dia 20 de outubro de 2007 sobre a área de cobertura do experimento de campo, usando três subconjuntos de canais AIRS no modelo inverso, juntamente com dados observados e o desvio padrão do perfil de 34 canais.

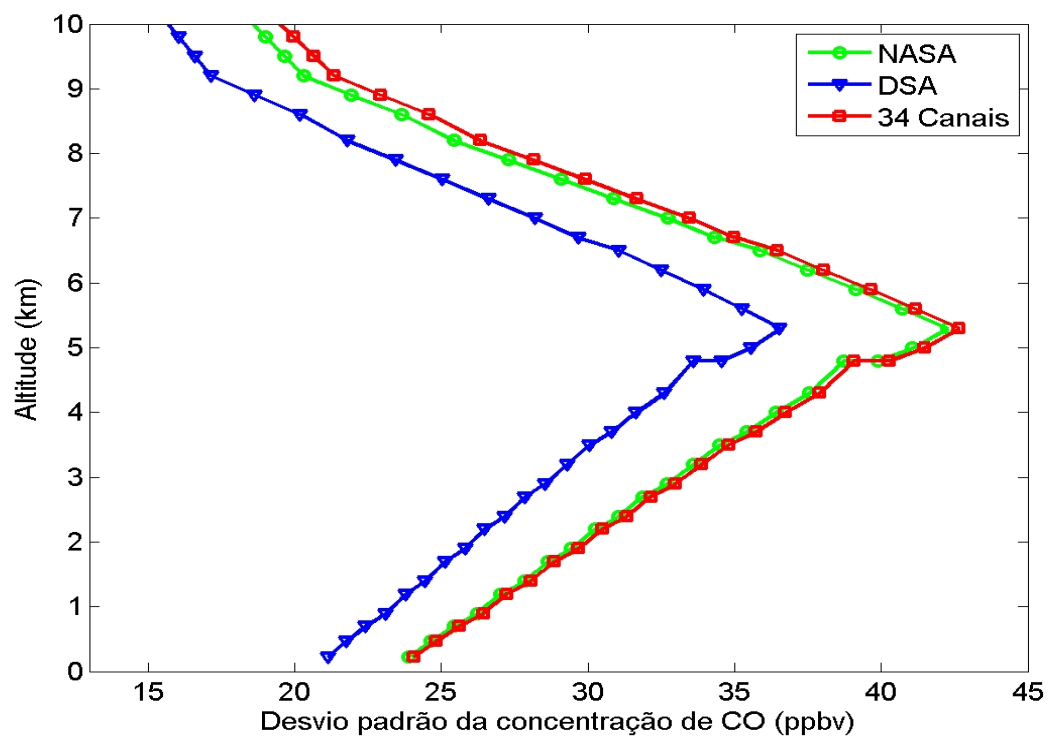


Figura 5.34 - Perfil vertical do desvio padrão observado nas estimativas de CO para o dia 20 de outubro de 2007, utilizando três diferentes subconjuntos de canais AIRS.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve por finalidade estudar a sensibilidade dos diversos canais do sensor AIRS às alterações na concentração de monóxido de carbono na atmosfera, procurando identificar subconjuntos de canais sensíveis ao CO para que fossem testados em um modelo de inversão. Dentro desse contexto, buscou-se contribuir no aprimoramento do procedimento de inversão que é realizado operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, particularmente, na seleção de canais para a inferência de CO sobre a região tropical (América do Sul).

Na primeira fase do trabalho foram realizadas simulações de radiâncias para todos os canais do sensor AIRS, a partir de um modelo de transferência radiativa (modelo direto). Nessas simulações foram utilizados os 49 diferentes conjuntos de perfis atmosféricos encontrados no banco de dados do modelo direto. Para a seleção de canais sensíveis ao CO foi utilizado o método da perturbação, proposto por Schaerer e Wilheit (1979). Esse método é uma ferramenta útil para escolha adequada de canais de sensores espaciais, uma vez que nem todos os canais do AIRS são sensíveis ao CO. Como resultado das simulações com o modelo direto, observou-se que para os diferentes conjuntos de perfis de CO utilizados e para os diferentes níveis de perturbações introduzidas o número de canais AIRS sensíveis ao CO se manteve constante, mudando apenas a intensidade da sensibilidade de cada canal. Isto é, foram identificados 55 canais AIRS sensíveis às alterações na concentração de CO na atmosfera. Esses canais estão localizados na faixa de número de onda de 2182 a 2227 cm^{-1} , a qual corresponde a uma banda de absorção característica do CO. O canal 2183.31 cm^{-1} mostrou-se ser o canal mais sensível às alterações na concentração de CO na atmosfera.

Como foram identificados 55 canais sensíveis ao CO independente do perfil utilizado, as análises com o modelo de inversão foram realizadas tomando como referência os resultados encontrados na simulação que utilizou o perfil representativo da região tropical, uma vez que o objetivo é regionalizar o modelo inverso sobre essa região. Além disso, observou-se que a sensibilidade desses canais varia com a altitude.

Identificados os canais AIRS sensíveis às alterações nas concentrações de CO, eles foram agrupados em ordem decrescente de sensibilidade, sendo o canal mais sensível o que apresentou a maior diferença entre as radiâncias dos perfis perturbados e não perturbados. Uma vez ordenados os canais AIRS, deu-se o início das simulações como

o modelo inverso para inferência de perfis de CO. Nessa fase, diferentes inversões com os distintos conjuntos de canais foram comparadas com os dados observados em experimento de campo, com as estimativas da DSA e da NASA. Lembrando que nessas estimativas são utilizados no procedimento de inversão 20 e 36 canais AIRS, respectivamente. Nos resultados encontrados observou-se que:

- A utilização de um único canal AIRS no procedimento de inversão é insuficiente para inferir a concentração de CO na atmosfera com precisão;
- Na medida em que um maior número de canais espectrais é introduzido nas simulações com o modelo inverso as concentrações de CO tornam-se mais heterogêneas, sugerindo que um maior número de canais AIRS (sensíveis ao CO) no procedimento de inversão, possibilita identificar um maior número de pixels na imagem de satélite com altas concentrações de CO, muito comuns nos meses de agosto, setembro e outubro devido aos eventos de queimadas nessa região. Por outro lado, isso também não quer dizer que as simulações com todos os 55 canais AIRS sensíveis ao CO apresentarão os melhores resultados. Isso porque alguns canais podem introduzir informações redundantes e até mesmo ruído no procedimento de inversão;
- Com base na metodologia aplicada e nos casos analisados concluiu-se que o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações de CO na atmosfera foi o que apresentou melhor desempenho, tanto na comparação com os dados observados como na comparação com os produtos da DSA. Além disso, o desempenho do modelo inverso com os 34 canais AIRS foi similar ao desempenho do modelo com 36 canais sugeridos pela NASA. Vale ressaltar que esses subconjuntos de canais são ligeiramente diferentes e que os canais sugeridos pela NASA foram selecionados com base numa outra metodologia (análise de componentes principais). Apesar das metodologias serem diferentes o resultado é semelhante, o que indiretamente valida a metodologia utilizada nesse trabalho;
- Essa metodologia também pode ser aplicada a outros constituintes atmosféricos (gases), criando uma independência local no que diz respeito à seleção de canais em futuros sensores hiperespectrais, no contexto de se construir modelos de inversão e/ou regionalizar modelos disponibilizados pela

comunidade científica, para estimar a concentração de gases na atmosfera. Isso é fundamental, uma vez que praticamente não existem trabalhos na literatura científica que mostram quais os canais que devem ser utilizados no modelo inverso. O APÊNDICE A apresenta essa metodologia aplicada ao metano (CH_4), ao ozônio (O_3), a temperatura e ao vapor d'água. As Figuras apresentam os jacobianos para cada um desses constituintes em função dos níveis de pressão;

- O sensor AIRS não é sensível para detectar alterações na concentração de CO devido a ocorrência de plumas de fumaça para altitudes próximas à superfície, principalmente, devido à sua resolução espacial de aproximadamente 50 km. Além disso, os jacobianos dos 55 canais sensíveis ao CO apresentaram maior sensibilidade na média e alta troposfera.

Finalmente, pode-se afirmar que é possível regionalizar o modelo de inversão utilizado operacionalmente na DSA/CPTEC/INPE, particularmente, no que diz respeito à seleção de canais para serem utilizados no procedimento de inversão sobre a América do Sul.

Com relação às sugestões para trabalhos futuros, propõe-se:

- Que o subconjunto com os 34 canais AIRS mais sensíveis às alterações de CO na atmosfera seja utilizado no procedimento de inversão operacional da DSA/CPTEC;
- Que a metodologia utilizada nesse trabalho seja aplicada às demais variáveis do APÊNDICE A, a fim de regionalizar outras variáveis do modelo de inversão utilizado na DSA/CPTEC;
- Que novas atividades de validação sejam realizadas com dados de outros experimentos de campo e que novos experimentos sejam realizados para coleta de dados observados com vôos em altitudes acima de 4 km.
- Que as estimativas de CO realizadas com o subconjunto de canais AIRS sugerido nesse trabalho sejam comparadas com as estimativas de CO realizadas por outras plataformas de observação ambiental, como por exemplo, estimativas do satélite TERRA e AURA.

- Para pesquisas futuras relacionadas ao tema estudado sugere-se que sejam feitos novos testes com outros métodos de seleção de canais para que sejam testados outros subconjuntos de canais sensíveis ao CO;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES, F.; CHÉDIN, A.; SCOTT. A regularized neural net approach for retrieval of atmospheric and surface temperatures with the IASI instrument. **Journal of Applied Meteorology**, v. 41, n. 2, p. 144–159, 2002. 29, 30
- AOKI, T. Channel compression of trace gas remote sounder by expanding the weighting function with empirical orthogonal functions. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 82, n. 4, p. 1081–1093, May 2004. 29
- AUMANN, H. H.; CHAHINE, M. T.; GAUTIER, C.; GOLDBERG, M. D.; KALNAY, E.; MCMILLIN, L. M.; REVERCOMB, H.; ROSENKRANZ, P. W.; SMITH, W. L.; STAELIN, D. H.; STROW, L. L.; SUSSKIND, J. AIRS/AMSU/HSB on the AQUA mission: design, science objectives, data products and processing systems. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 253–264, 2003. 29
- AUMANN, H. H.; GREGORICH, D. T.; GAISER, S. L.; HAGAN, D. F.; PAGANO, T. S.; STROW, L. L.; TING, D. **AIRS level 1B algorithm theoretical basis document (ATBD) Part I - Infrared Spectrometer.**, Washington-DC: NASA, p. 236, 2000. Acesso em: Disponível em: <eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_home-page/for_scientists/atbd.php> Acesso em: outubro 2008. 28
- AUMANN, H. H.; MILLER, C. Atmospheric infrared sounder (AIRS) on the earth observing system. **Proceeding of the SPIE**, v. 2583, n. 6, p. 332–343, 1995. 28
- AUMANN, H. H.; PAGANO, R. J. Atmospheric infrared sounder on the earth observing system. **Optical Engineering**, v. 333, n. 3, p. 776–784, 1994. 28
- BALTIMORE: UMBC. **RTP Format Specification and User's Guide - Version 1.05.** [S.l.], out. 2002. 34 p. 45
- BARNET, C.; GOLDBERG, M.; MCMILLIN; CHAHINE, M. Remote sounding of trace gases with the EOS/AIRS instrument. **Proceedings of SPIE**, v. 5548, p. 300–312, 2004. 24
- CARRIER, M. J. **Preliminary steps towards improving short-term QPF using AIRS observations through 4D-VAR data assimilation.** Dissertação (Mestrado) — The Florida State University College of Arts and Sciences, 2004. 43

CARVALHO, J. C. **Inferência de perfis verticais de temperatura utilizando uma técnica iterativa implícita de inversão**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998. 30

CHAHINE, M. T. Inverse problems in radiative transfer: Determination of atmospheric parameters. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 27, p. 960–967, 1970. 27

CHAHINE, M. T.; AUMANN, H.; GOLDBERG, M.; MCMILLIN, L.; ROSENKRANZ, P.; STAELIN, D.; STROW, L.; SUSSKIND, J. **AIRS Algorithm Theoretical Basis Document - AIRS-Team Retrieval for Core Products and Geophysical Parameters**, Washington-DC: NASA, April 2001. 43

CHAHINE, M. T.; GUNSON, M.; AUMANN, H.; STROW, L.; HAGAN, D. e. a. **AIRS Algorithm Theoretical Basis Document - The AIRS team science data validation plan**, Washington-DC: NASA, jun. 2000. 29

CONNORS, V. S.; GORMSEN, B. B.; NOLF, S.; JR, H. G. R. Spaceborne observations of the global distribution of carbon monoxide in the middle troposphere during april and october 1994. **J. Geophys**, v. 104, n. 21, p. 455–470, 1999. 33

CONRUTH, B. J. A survey of the methods developed for the inversion of the radiative transfer problem for planetary atmospheres. **Nasa Technical Note**, p. 1–23, August 1965. 30

CONTRIBUTION OF WORKING GROUP I TO THE FOURTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**: Summary for policymakers. Paris, 2007. 21 p. 23

DEETER, M. N.; EMMONS, L. K.; FRANCIS, G. L.; EDWARDS, D. P.; GILLE, J. C.; WARNER, J. X.; KHATTATOV, B.; ZISKIN, D.; LAMARQUE, J.; HO, S.; YUDING, V.; ATTIE, J.; PACKMAN, D.; CHEN, J.; MAO, D.; DRUMMOND, J. R. Operational carbon monoxide retrieval algorithm and selected results for the MOPITT instrument. **J. Geophys**, v. 108, n. D14, p. 4399–4409, 2003. 33

EDWARDS, D. P.; EMMONS, L. K.; HAUGLUSTAIN, D. A.; CHU, A.; GILLE, J. C.; KAUFMAN, Y. J.; PÉTRON, G.; YURGANOV, L. N.; GIGLIO, L.;

DEETER, M. N.; YUDIN, V.; ZISKIN, D. C.; WARNER, J.; LAMARQUE, J. F.; FRANCIS, G. L.; HO, S. P.; MAO, D.; CHEN, J.; GRECHKO, E. I.; DRUMMOND, J. R. Observations of carbon monoxide and aerosols from the terra satellite: Northern hemisphere variability. **Journal of geophysical research**, v. 109, n. D24, p. 1–50, 2004. 32

ENGL, H. W.; HANKE, M.; NEUBAUER, A. **Regularization of inverse problems: mathematics and its applications**. [S.l.]: Kluwer, 1996. 36

ENGLISH, S. J.; JONES, D. C.; DIBBEN, P. C.; RENSHAW, R. J.; EYRE, J. R. The impact of cloud and precipitation on ATOVS soundings. in: International TOVS study conference, 10. (ITSC). **Proceedings ...**, Colorado – USA, 27 January – 02 February 1999. Bolder: ITSC. 28

ENGLISH, S. J.; RENSHAW, R. J.; DIBBEN, P. C.; SMITH, A. J.; RAYER, P. J.; POULSEN, C.; SAUNDERS, F. W.; EYRE, J. R. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts. **Q. J. R. Meteorol. Soc**, v. 126, p. 2911–2931, 2000. 28

FILIPIAK, M. J.; HARWOOD, R. S.; JIANG, J. H.; LI, Q.; LIVESEY, N. J.; MANNEY, G. L.; READ, W. G.; SCHWARTZ, M. J.; WATERS, J. W.; WU, D. L. Carbon monoxide measured by the EOS microwave limb sounder on aura: First results. **Geophysical research letters**, v. 32, n. L14825, p. 1–5, 2005. 33

FISHBEIN, E.; FARMER, C. B.; GRANGER, S. L.; GREGORICH, D. T.; GUNSON, M. R.; HANNON, S. E.; HOFSTADTER, M. D.; LEE, S. Y.; LEROY, S. S.; STROW, L. L. Formulation and validation of simulated data for the atmospheric infrared sounder (AIRS). **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 314–329, 2003. 28

GARAND, L.; TURNER, D. S.; LAROCQUE, M.; BATES, J.; BOUKABARA, S.; BRUNEL, P.; CHEVALLIER, F.; DEBLONDE, G.; ENGELEN, R.; HOLLINGSHEAD, M.; JACKSON, D.; JEDLOVEC, G.; JOINER, J.; KLEESPIES, T.; MCKAGUE, D. S.; MCMILLIN, L.; MONCET, J. L.; PARDO, J. R.; RAYER, P. J.; SALATHE, E.; SAUNDERS, R.; SCOTT, N. A.; DELST, P. V.; WOOLF, H. Radiance and jacobian intercomparison of radiative transfer models applied to HIRS and AMSU channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, n. D20, p. 24,017 – 24,031, October 2001. 53

- GOLDBERG, M. D.; QU, Y.; MCMILLIN, L. M.; WOLF, W.; ZHOU, L.; DIVAKARLA, M. AIRS near-real-time products and algorithms in support of numerical weather prediction. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 379–389, 2003. 29
- HADAMARD, J. Sur les proleues aux derivees partielles et leur signification physique. **Princeton Univ.**, v. 13, p. 1–20, 1902. 37
- HANNON, S.; STROW, L. L.; W, M. W. Atmospheric infrared fast transmittance models: A comparison of two approaches. in: Hays, p. b. ; wang, j. (eds). **Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research II**, v. 2830, n. 2, p. 94–105, 1996. Proceeding SPIE conference. 39
- KAPLAN, L. Inferences of atmospheric structures from satellite remote radiation measurements. **Journal of the Optical Society of America**, v. 49, p. 1004, 1959. 27
- KING, J. I. F. **The radiative heat transfer of planet Earth**. [S.l.]: In: Van, J.A. (ed.). Scientific Uses of Earth Satellites: Second Revised Edition. Michigan: University Press, 1956. 133-136 p. 27
- LERNER J. A.; WEISZ, E. K. G. Temperature and humidity retrieval from simulated infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D14, p. 1–11, 2002. 28
- LIOU, K. N. **Radiation and Cloud Processes in the atmosphere**. New York: Oxford University Press, 1992. 31
- LOGAN, J. A.; PRATHER, M. J.; WOFSY, S. C.; MCELROY, M. B. Tropospheric chemistry: A global perspective. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, n. C8, p. 7210–7254, Aug. 1981. 32, 33
- LUZ, E. F. P. da. **Estimação de fonte de poluição atmosférica usando otimização por enxame de partículas**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. 36
- MAZZA, P.; ROTH, R. ., global warming is here: The scientific evidence. **Atmosphere Alliance**, 1999. Disponível em: <http://www.climatesolutions.org/publications/CS_Global_Warming_is_Here_The_Scientific_Evidence_2000-02-5_31.pdf>. 31

- MCMILLAN, W. W.; BARNET, C.; STROW, L.; CHAHINE, M. T.; MCCOURT, M. L.; WARNER, J. X.; NOVELLI, P. C.; KORONTZI, S.; MADDY, E. S.; DATTA, S. Daily global maps of carbon monoxide from NASA's atmospheric infrared sounder. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 2, p. 1–4, 2005. 25, 34, 67
- MEEKS, M. L.; LILLEY, A. E. The microwave of oxygen in the earth's atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 68, n. 6, p. 1683–1703, March 1963. 47
- MORSE, P.; BATES, J.; MILLER, C. Development and test of the atmospheric infrared sounder (AIRS) for the NASA earth observing system (EOS). **Proceeding of the SPIE Meeting**, v. 3759, n. 27, p. 281–292, 1999. 28
- MUNIZ, W. B.; RAMOS, F. M.; VELHO, H. F. C. Entropy and tikhonov-based regularization techniques applied to the backwards heat equation. **Computers & Mathematics with Application**, v. 40, n. 1, p. 1071–1084, 2000. 37
- MUNIZ, W. B.; VELHO, H. F. C.; RAMOS, F. M. Comparison of some inverse methods for estimating the initial condition of the heat equation. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 103, n. 1, p. 145–163, 1999. 37
- NETO, A. J. S. **Problemas Inversos: Aplicações em Engenharia e Medicina**. Instituto Politécnico - UERJ, 2005. Disponível em: <http://www.ime.uerj.br/~coloquios/PblInv_Silva-Neto.pdf>. Acesso em: 02 janeiro 2009. 35
- NOVELLI, P. C.; MASARIE, K. A.; LANG, P. M. Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere. **Journal of geophysical research**, v. 103, n. D15, p. 10,015–19,033, August 1998. 33
- PARKINSON, C. L. Aqua: an earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 173–183, 2003. 24
- PARKINSON, C. L.; GREENSTONE, R. Greenbelt: NASA goddard space flight center. **EOS data products hand-book**, v. 2, p. 1–253, 2000. 47
- RABIER, F.; FOURRIÉ, N.; CHAFAÏ, D.; PRUNET, P. Channel selection methods for infrared atmospheric sounding interferometer radiances. **Q. J. R. Meteorol. Soc.**, v. 128, p. 1–17, Sep. 2001. 29, 30

RAMOS, F. M.; VELHO, H. F. C.; CARVALHO, J. C.; FERREIRA, N. J. Novel approaches on entropic regularization. inverse problems. v. 15, p. 1139–1148, 1999.

37

REICHLE, H. G.; CONNORS, V. S.; HOLLAND, J. A.; SHERRILL, R. T.; WALLIO, H. A.; CASAS, J. C.; CONDON, E. O.; GORMSEN, B. B.; SEILER, W. The distribution of middle tropospheric carbon monoxide during early october 1984. **J. Geophys**, v. 95, p. 9845–9856, 1990. 33

REICHLE H. G., J.; BECK, S. M.; HAYNES, R. E.; HESKETH, W. D.; HOLLAND, J. A.; HYPES, W. D.; ORR, H. D.; SHERILL, R. T.; WALLIO, H. A.; CASAS, J. C.; SAYLOR, M. S.; GORRSEN, B. B. Carbon monoxide measurements in the troposphere. **Science**, v. 218, p. 1024–1026, 1982. 33

RICHARDS, N. A. D.; LI, Q.; BOWMAN, K. W.; WORDEN, J. R.; KULAWIK, S. S.; OSTERMAN, G. B.; WORDEN, H. M.; LAMARQUE, J.-F.; ; KHATTATOV, B. V. Assimilation of tes co into a global ctm: first results. **Atmos. Chem. Phys. Discuss.**, v. 6, p. 11727–11743, 2006. Disponível em: <www.atmos-chem-phys-discuss.net/6/11727/2006/>. 33

RODGERS, C. D. Information content and optimization of high spectral resolution remote measurements. **Advanced Space Research**, v. 21, n. 3, p. 361–367, 1998. 24, 47

SCHAERER, G.; WILHEIT, T. T. A passive microwave technique for profiling of atmospheric water vapor. **Radio Science**, v. 14, n. 3, p. 371–375, 1979. 9, 11, 29, 48, 85

SEILER, W. The cicle of atmospheric co. **Tellus**, v. 2, p. 116–135, 1974. 50

SEILER, W.; JUNGE, C. Carbon monoxide in the atmosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 75, p. 2217–2226, 1970. 50

SHIGUEMORI, E. H. **Recuperação de Perfis de temperatura e umidade da atmosfera a partir de dados de satélite - abordagens por redes neurais artificiais e implementação em hardware**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. 30

SMITH, W. L. Iterative solution of the radiative transfer equation for the temperature and absorbing gas profile of an atmosphere. **Applied Optics**, v. 9, n. 9, p. 1993–1999, 1970. 27

SOKOLOV, A.; KHOMENKO, G.; DUBUISSON, P. Sensitivity of atmospheric-surface parameters retrieval to the spectral stability of channel in thermal ir. **Journal of quantitative spectroscopy e radiative tranfer**, n. 12, p. 1–8, Nov. 2007. 30

SOUZA, R. A. F. **Análises de sondagens AQUA sobre o Brasil e simulação da temperatura de brilho dos canais HSB a partir de informações do sensor AIRS**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Abril 2004. 30

STROW, L. L.; HANNON, S. E. Fast model for the atmospheric infrared sounder. 2002. 38

STROW, L. L.; HANNON, S. E.; SOUZA-MACHADO, S. D.; MOTTELER, H. E. An overview of the airs radiative transfer model. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 303–313, FEBRUARY 2003. 38, 44, 55

SUSSKIND, J.; BARNET, C.; BLAISDELL, J. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 2, p. 390–409, 2003. 24, 25, 39, 49

SZE, N. D. Anthropogenic CO emissions: Implications for atmospheric CO-OH-CH₄ cycle. **Science**, v. 195, p. 673–675, 1997. 34

THOMPSON, A. M.; PICKERING, K. E.; DICKERSON, R. R.; JR., W. G. E.; JACOB, D. J.; SCALA, J. R.; TAO, W.-K.; MCNAMARA, D. P.; SIMPSON, J. Convective transport over the central united states and its role in regional CO and ozone budgets. **J. Geophys**, v. 99, n. 18, p. 703–711, 1994. 32, 33

VELHO, H. F. C. Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações. 2001. Disponível em: <<http://www.lac.inpe.br/~haroldo/CursoPI/CursoPI.pdf>>. 36, 37

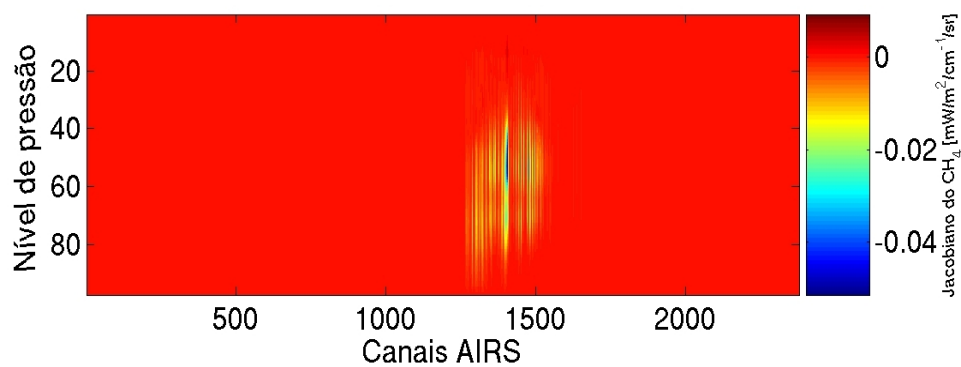
WARK, D.; FLEMING, H. Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites: Introduction. **Monthly Weather Review**, v. 94, p. 351–362, 1966. 27

WARNER, J.; COMER, M. M.; BARNET, C. D.; MCMILLAN, W. W.; WOLF, W.; MADDY, E.; SACHSE, G. A comparison of satellite tropospheric carbon monoxide measurements from AIRS and MOPITT during INTEx-A. **Journal of geophysical research**, v. 112, p. 1–12, 2007. 49, 51

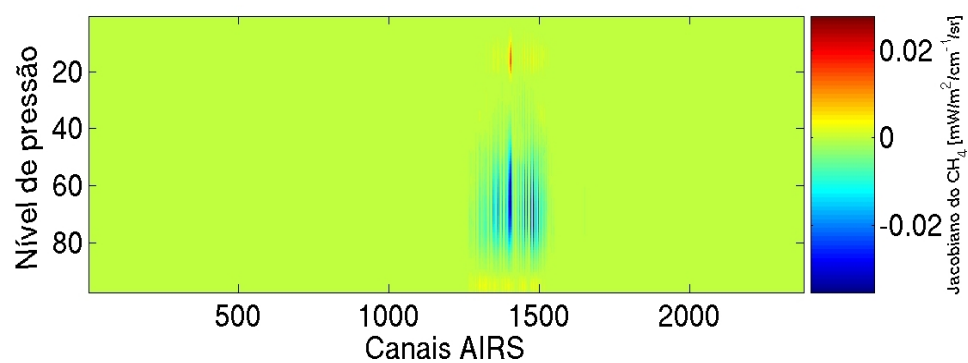
A APÊNDICE A

Metano (CH_4)

a)



b)



c)

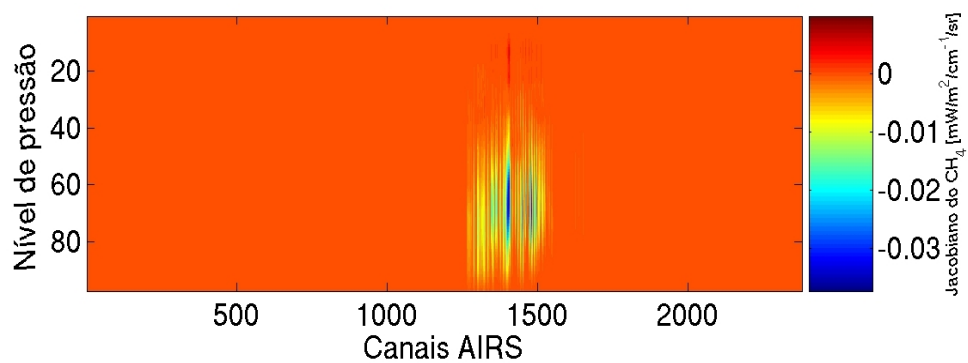
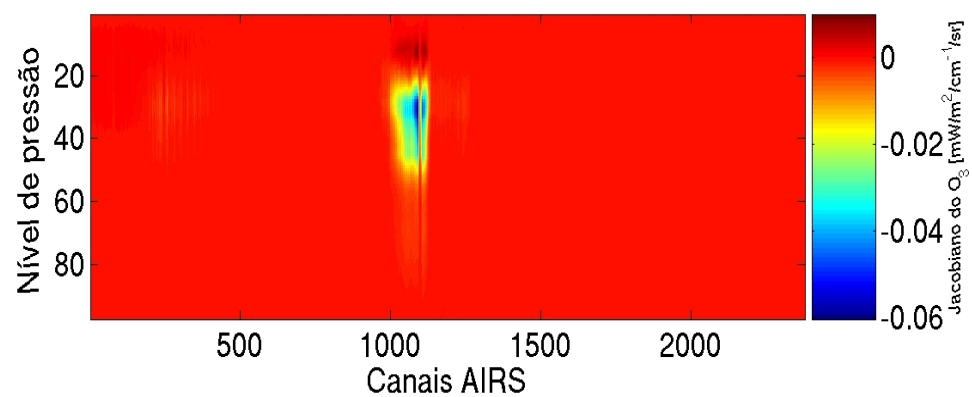


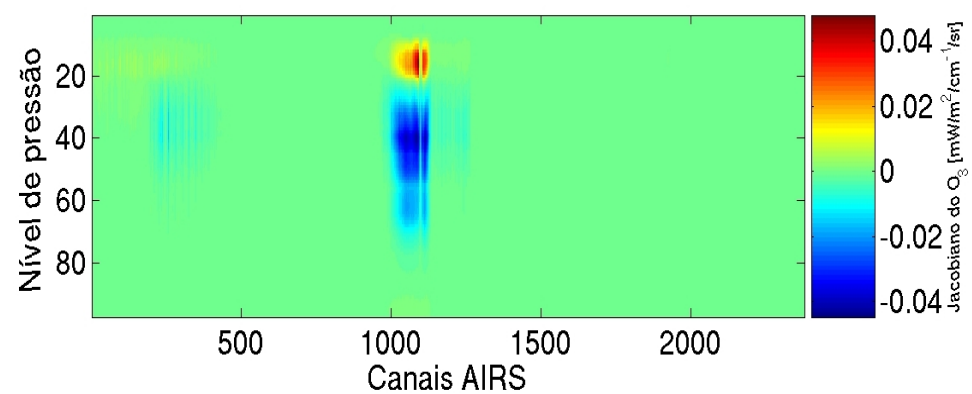
Figura A.1 - Jacobiano do CO para os 2378 canais do sensor AIRS, considerando uma perturbação de 10% na concentração do CO para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).

Ozônio (O_3)

a)



b)



c)

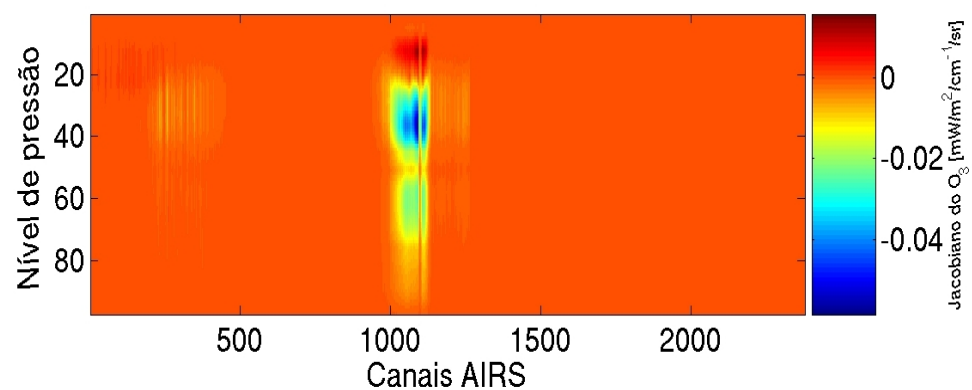
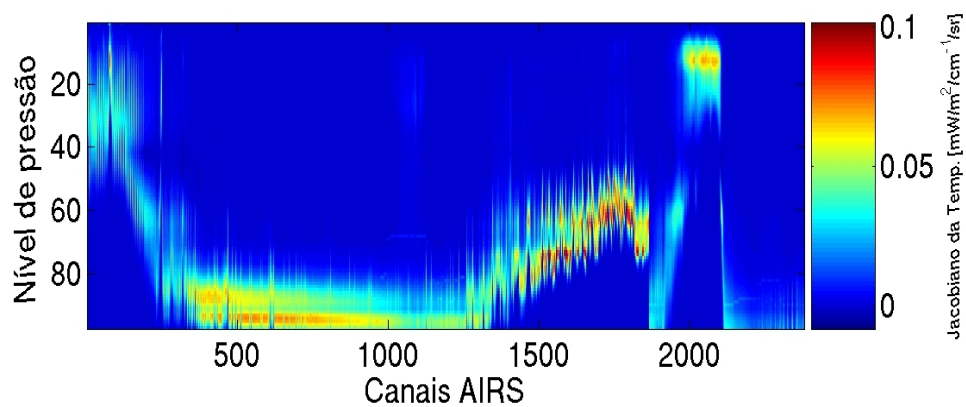


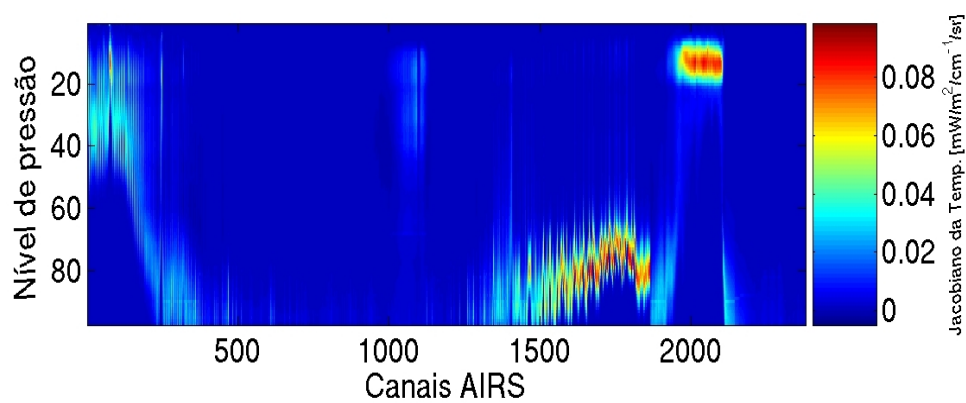
Figura A.2 - Jacobiano do ozônio considerando a uma perturbação de 10% para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).

Temperatura (T)

a)



b)



c)

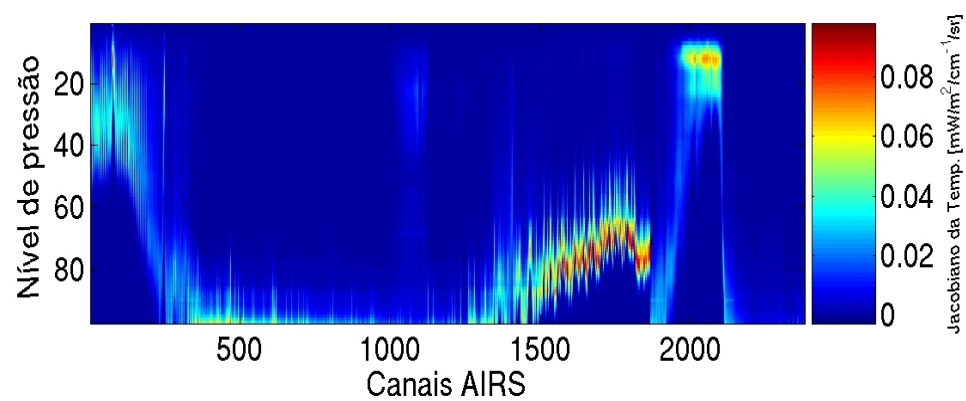
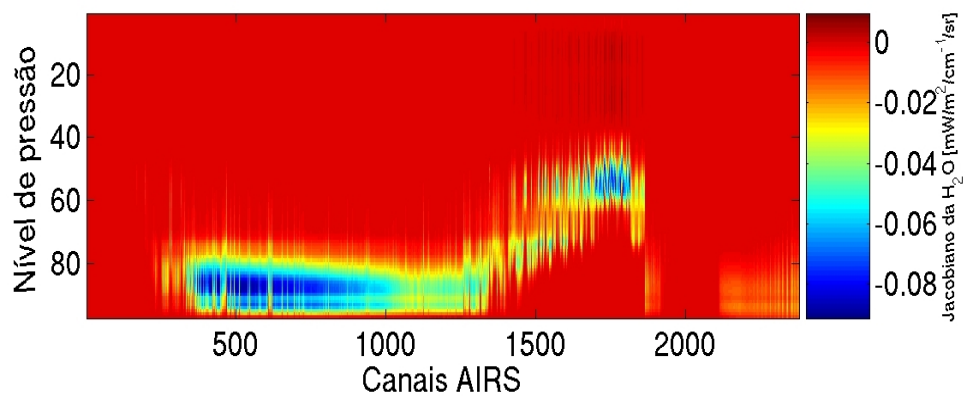


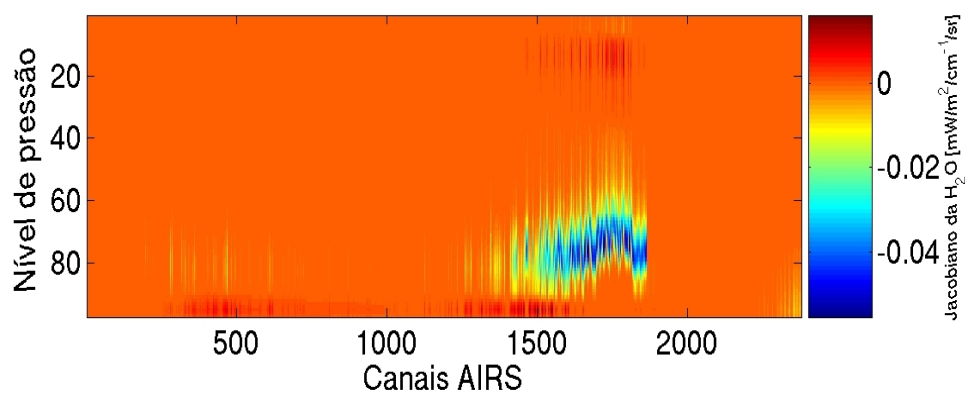
Figura A.3 - Jacobiano de temperatura considerando a uma perturbação de 10% para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).

Vapor d'água (H_2O)

a)



b)



c)

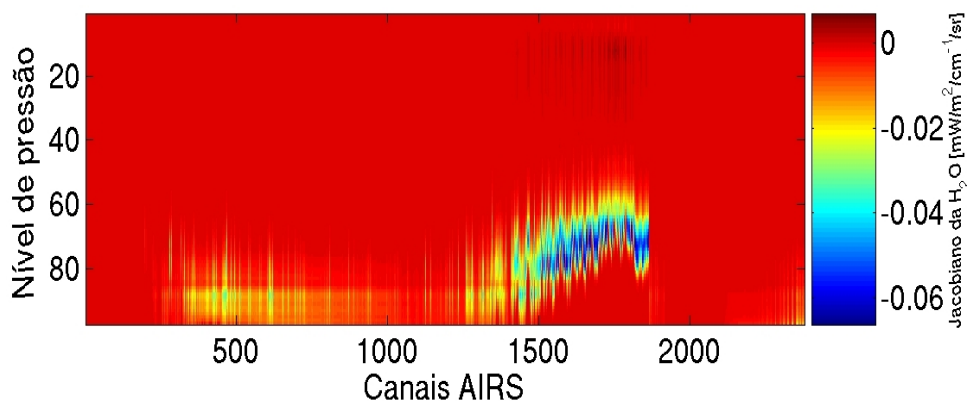


Figura A.4 - Jacobiano de umidade considerando a uma perturbação de 10% para um perfil tropical (a), para um perfil de latitude média (b) e um perfil de latitude alta (c).