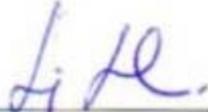


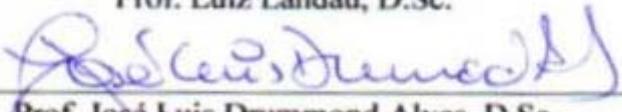
APLICAÇÃO DE UM MODELO DE TRAJETÓRIAS NA SIMULAÇÃO DO  
TRANSPORTE DE RADIONUCLÍDEOS NA ATMOSFERA

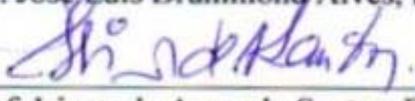
Nilo José do Nascimento Franco

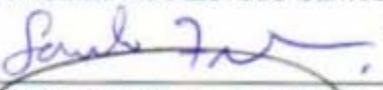
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS  
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

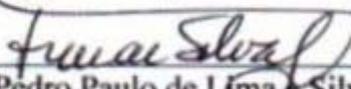
Aprovada por:

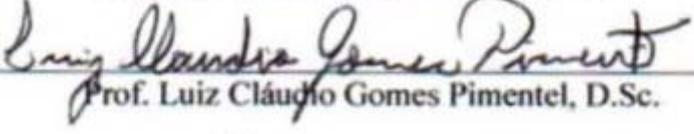
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Landau, D.Sc.

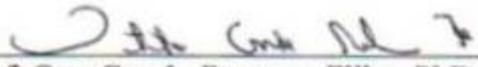
  
\_\_\_\_\_  
Prof. José Luis Drummond Alves, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Isimar de Azevedo Santos, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Saulo Ribeiro de Freitas, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Pedro Paulo de Lima e Silva, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Luiz Cláudio Gomes Pimentel, D.Sc.

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Otto Corrêa Rotunno Filho, PhD.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2005

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FRANCO, NILO JOSÉ DO NASCIMENTO

Aplicação de um Modelo de Trajetórias na  
Simulação do Transporte de Radionuclídeos na  
Atmosfera [Rio de Janeiro] 2005

XXI, 213 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,  
Engenharia Civil, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, COPPE

1 - Modelagem Numérica 2 – Modelagem de  
Transporte Cinemático 3 – Transporte de  
Radionuclídeos

I. COPPE/UFRJ II. Título ( série )

*Ao meu pai THEÓPHILO (em memória)*

*A minha mãe ACYR (em memória)*

*E ao meu filho THALES.*

## **AGRADECIMENTOS**

Como todo o trabalho de pesquisa, defrontamos com diferentes problemas, que vão dos mais simples até os mais complexos. Nesse período aprendemos que, pelo desgaste ou pela insistência, os problemas diminuem. Por essa razão agradecerei as pessoas que, diretamente ou indiretamente ajudaram-me nesse trabalho que será apresentado.

Gostaria de agradecer: a COPPE, que me acolheu e tornou possível a viabilização do presente trabalho, concedendo os recursos e materiais necessários; ao departamento de meteorologia da UFRJ e a CAPES, pela bolsa de estudos. Reconheço e sou grato ao apoio dos professores e funcionários do Programa de Engenharia Civil.

Quero agradecer, primeiramente, ao professor Landau que nestes últimos anos (oito anos), além de orientador, ensinou-me a ser um pesquisador. Nesse período, sempre procurou dar uma palavra amiga para que eu pudesse continuar no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao professor e amigo Isimar, que ajudou integralmente nessa pesquisa, e nos, piores momentos, sempre acreditou no desenvolvimento e realização desse projeto.

Ao professor José Luis, que além de orientar, apresentou a importância de se conhecer a modelagem numérica como maneira de entender os problemas relacionados com as geociências.

Gostaria de agradecer aos seguintes pesquisadores das diferentes instituições internacionais que foram consultados e deram as suas colaborações e sugestões:

Alexander Baklanov, Senior Scientist Meteorological Research Department Danish Meteorological Institute (DMI).

Alexander Mahura, Arctic Risk, Danish Meteorological Institute, DMI.

Roy Pollanen STUK-Radiation and Nuclear Safety Authority, Helsinki, Finland.

Paolo Martano, CNR-ISAC, Itália.

Gostaria também de registrar os seguintes agradecimentos, aos pesquisadores brasileiros que trabalham na CNEN e ELETRONUCLEAR.

Ao pesquisador Saulo de Freitas, por ter fornecido o modelo de trajetórias.

A economista Eny Brener, pois sem a sua participação, carinho, amizade, compreensão e colaboração, talvez este trabalho não pudesse ter sido concluído.

Aos amigos do LAMCE, em especial ao Luís Fernando e ao Ricardo.

A Mônica, que sempre ajudou e procurou dar assistência em todos os momentos.

A Rita (PEC), que ajudou em todos os momentos.

E a bióloga Clarisse, que deu algumas sugestões.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## APLICAÇÃO DE UM MODELO DE TRAJETÓRIAS NA SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE RADIONUCLÍDEOS NA ATMOSFERA

Nilo José do Nascimento Franco

Junho/2005

Orientadores: Luiz Landau

José Luis Drummond Alves

Isimar de Azevedo Santos

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho é apresentado em três etapas: a primeira corresponde aos estudos dos diferentes modelos de dispersão atmosférica e de trajetórias, que são utilizados nas indústrias e usinas de geração de energia nuclear; a segunda apresenta alguns conceitos das ciências atmosféricas; a terceira demonstrou a importância da atmosfera em uma hipotética situação de vazamento de radionuclídeos para o meio ambiente, em especial na baixa troposfera. Foram utilizados dois modelos acoplados, o primeiro de mesoescala e o segundo de trajetórias cinemáticas. Para o teste de sensibilidade e validação da modelagem utilizou-se das trajetórias oriundas do vulcão Etna. No estudo de casos, considerou o Complexo Nuclear de Angra dos Reis como uma fonte pontual. Finalizando, nessa pesquisa ficou evidenciado que o comportamento da dinâmica da atmosfera associado com os deslocamentos das massas de ar corresponde aos fatores principais para estudar os possíveis deslocamentos dos radionuclídeos na microescala, na mesoescala e na escala sinótica.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

APPLICATION OF A MODEL OF TRAJECTORIES IN THE SIMULATION OF  
THE TRANSPORT OF RADIONUCLIDE IN THE ATMOSPHERE

Nilo José do Nascimento Franco

June/2005

Advisors: Luiz Landau

José Luis Drummond Alves

Isimar de Azevedo Santos

Department: Civil Engineering

This work is presented in three stages: the first one corresponds to the studies of the different models of atmospheric dispersion and trajectories, that are used in the industries and plant of generation of nuclear energy; the second stage presents some concepts of atmospheric sciences; the third phase demonstrates the importance of the atmosphere in a hypothetical situation of emanation of radionuclides to the environment, in special in lower the troposphere. Two connected models have been used, the first one was a mesoscale model and the other one was a kinematic trajectories scheme. For the sensitivity test and validation of the modeling, it was simulated the trajectories derived from the Etna volcano. In the case studies, it was considered the Nuclear Complex of Angra dos Reis as a punctual source. Finishing, in this research it was evidenced that the behavior of the atmospheric dynamics associated with the displacements of the air masses corresponds to the main factors to knowledge the possible displacements of the radionuclides in the microscale, mesoscale or synoptic scale.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	01
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	06
	2.1. Escalas de Poluição Atmosférica e Meteorológica	08
	2.2. Tipos de Fontes Poluidoras	13
	2.3. Desenvolvimento dos Modelos Numéricos de Dispersão	15
	2.4. Modelo Determinístico	24
	2.5. Abordagem Numérica Euleriana e Lagrangeana	26
	2.6. Modelo Gaussiano de Dispersão de Pluma	28
	2.6.1. Coeficientes de Dispersão de Pasquill-Gifford	31
	2.6.2. Elevação da Pluma ( $\Delta h$ )	35
	2.7. Modelo Gaussiano do Tipo <i>Puff</i>	38
	2.8. Modelos de Dispersão de Contaminantes na Atmosfera	42
	2.9. Limitações dos Modelos	49
	2.10. Modelos Meteorológicos Acoplados	50
	2.11. Pesquisas Relacionadas com as Trajetórias	52
	2.12. Trajetórias Cinemáticas	56
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO DE ESTUDO</b>	58
	3.1. A Composição dos Gases na Atmosfera	58
	3.2. A Estrutura Vertical da Atmosfera	62
	3.3. Camada Limite Atmosférica	64
	3.3.1. Camada Limite Estável – CLE	68
	3.3.2. Camada de Mistura Convectiva – CMC	68
	3.3.3. Camada de Mistura	69

3.3.4. Técnicas para Medir a Camada de Mistura	73
3.3.4.1. Radiossondagens	73
3.4.4.2. Sistemas de Sensoriamento Remoto	74
3.5. Definição de Poluentes Atmosféricos	77
3.6. Aerossol Atmosférico	80
3.6.1. Radionuclídeos	82
3.7. Técnicas para Medir as Concentrações de Poluentes na Atmosfera	89
3.8. Formas de Deposição dos Poluentes	91
3.9. Rejeitos Radioativos	92
3.10. Caracterização do Complexo Nuclear e da Região de Estudo	93
3.10.1. Aspectos Geográficos	96
3.10.2. Aspectos Climáticos	98
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>METODOLOGIA E MODELAGEM</b>	<b>102</b>
4.1. Reanálises	102
4.2. Modelo RAMS	103
4.2.1 Parametrização dos Processos de Difusão Turbulenta	110
4.2.2. Os Processos de Parametrizações em Cumulus	114
4.2.3. Parametrizações na Superfície	117
4.2.4. Cálculo dos Fluxos Efetivos para a Atmosfera	121
4.2.5. Sistemas de Coordenadas	122
4.2.6. Assimilação dos Dados de Entrada	123
4.3. Modelo de Trajetória	125
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>SIMULAÇÃO E ESTUDOS DE CASOS</b>	<b>136</b>
5.1. Estudo da Climatologia Via Modelagem Numérica	137
5.2. Validação da Modelagem das Trajetórias	144
5.3. Simulação em Situação Atmosférica não Perturbada	154
5.4. Grades Usadas nas Simulações	157
5.5. Estudo de Caso sob Influência de ZCAS	162

5.6. Estudo de Caso, sob Influência de um Sistema Frontal	182
<b>CAPÍTULO VI CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	191
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	195
<b>ANEXO I</b>	210

# LISTA DE ABREVIACOES

ARAC	Atmospheric Release Advisory Capability
ARPS	Advanced Regional Prediction System
BLP	Bouyant Line and Point Source Model
CALGRID	California Photochemical GridModel
CALINE4	California Line Source Dispersion Model
CAMRAQ	Consortium for Advanced Modeling of Region Air Quality
CDAS	Sistema de Assimilação de Dados Climáticos
CERUM	Centre for Regional Science
CLA	Camada Limite Atmosférica
CNAAA	Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
COVs	Compostos Orgnicos Volteis
CTDMPLUS	Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms por Instable Situations
DMI	Danish Meteorological Institute
DOE	Department of Energy
ECMWF	European Center for Medium Range Weather Forecasting
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ELETRORAS	Centrais Eltricas Brasileiras SA
EPA	Environmental Protection Agency
FURNAS	Furnas Centrais Eltricas S/A
GEE	Gases de Efeito Estufa
HOTMAC	Higher-order Turbulent Model for Atmospheric Circulation
INES	International Nuclear Event Scale
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISC	Industrial Source Complex
ISCT	Industrial Source Complex Short Term
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JHU	Universidade de Johns Hopkins
LBA	Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
MASTER	Meteorologia Aplicada a Sistemas do Tempo Regionais
MC2	Mesoscale Compressible Community
MQAR	Modelos de Qualidade de Ar
MP	Material Particulado
NASA	National Aeronautics & Space Administration
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NHECM	Non-hydrostatic E-e Closure Model
NUCLEN	Nuclebrás Engenharia S/A
OCD	Offshore and Coastal Dispersion Model
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RAPTAD	Random Puff Transport and Diffusion
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RIMPUFF	RIIsø Mesoscale PUFF
RTMOD	Real Time Model Evaluation
RODOS	Real-time On-line DecisiOn Support.
SCAR-B	Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil
SLPTDM	Seven-level Puff Transport and Diffusion Moldel
SNAP	Severe Nuclear Accident Program
STUK	Radiation and Nuclear Safety Authority
USP	Universidade de São Paulo

# LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	fração da área horizontal da grade da célula coberta por nuvens cumulus
$c$	constante
$con$	representa os processos convectivos úmidos e profundos parametrizados
$g$	aceleração da gravidade
$i$	índice
$l_c$	extensão dos subdomínios de uma nuvem
$l_e$	extensão dos subdomínios do ambiente
$n$	índice referente para cada espécie
$\mathbf{r}(t)$	é a posição da parcela de ar no espaço e tempo $t$
$rad$	denota a tendência para a parametrização da radiação
$r_n$	razão de mistura líquida do total de água, chuva, cristal e neve
$r_t$	razão de mistura total
$r_v$	vapor da água
$t_o$	tempo inicial
$t$	tempo
$u$	componente zonal leste – oeste
$v$	componente meridional norte – sul
$\mathbf{v}$	vetor velocidade do vento
$w$	componente vertical
$\overline{w}$	velocidade vertical na escala resolvível que neste caso é fornecida pelo modelo atmosférico
$\overline{w}^c$	velocidade vertical na região da nuvem dada pela equação
$B$	termo de flutuação
$K_h$	coeficiente de troca turbulenta viscosa de mistura e umidade
$K_m$	coeficiente de troca turbulenta de momento

$Q_{lw}$	razão de mistura da água líquida
$T_{Vc}$	temperatura virtual (obtida a partir de uma média entre as correntes descendentes e ascendentes)
$T_{Ve}$	temperatura virtual do ambiente
$\alpha$	coeficiente de massa virtual
$\Delta x$	domínio da média
$\eta$	constituente
$\theta_0$	temperatura potencial do estado básico (ambiente)
$\theta_{il}$	temperatura potencial do gelo e da água
$\theta_v$	temperatura potencial virtual ( $\theta_v = \theta(1,0 - 0,61q)$ )
$\pi$	função de Exner total
$\pi'$	perturbação da função de Exner
$\rho$	densidade
$\rho_0$	densidade do ar no estado básico
$\overline{u_i s'}$	fluxo turbulento médio
$\overline{u' \phi'}$	média do fluxo turbulento

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Conexão entre os diversos módulos de um modelo de dispersão e a sua integração no processo de tomada de decisões (Adaptado de GALLARDO, 2003)._____	7
Figura 2.2:	Escalas horizontais dos movimentos típicos da atmosfera (Adaptado de ARAKAWA, 1997)._____	11
Figura 2.3:	Escala de fenômenos horizontais e com diferentes características de tempo (Adaptado de ORLANSKI, 1975)._____	12
Figura 2.4:	Os processos que afetam o transporte de partículas e em especial os radionuclídeos na atmosfera (Adaptado de ZANNETTI, 1990)._____	14
Figura 2.5:	Alguns procedimentos numéricos para desenvolver um sistema de dispersão atmosférica._____	16
Figura 2.6:	Distribuição gaussiana._____	19
Figura 2.7:	Modelo de pluma gaussiana (Adaptado de BRAGA, 2002)._____	28
Figura 2.8:	Desvio padrão da distribuição horizontal de concentração em função da distância à fonte (Adaptado de PASQUILL, 1961)._____	32
Figura 2.9:	Desvio padrão da distribuição vertical de concentração em função da distância à fonte (Adaptado de PASQUILL, 1961)._____	33
Figura 2.10:	Altura efetiva de lançamento._____	36
Figura 2.11:	Diagrama dos <i>puffs</i> formando uma pluma (Adaptado de CHIARAMONTE & LEAL, 2003)._____	39
Figura 3.1:	Variabilidade espacial e temporal de alguns gases na atmosfera (Adaptado de BRASSEUR <i>et al.</i> , 2003)._____	61
Figura 3.2:	Perfil vertical da atmosfera._____	63
Figura 3.3:	Diagrama esquemático da estrutura da camada limite atmosférica (Adaptado de SCOFANO, 1991)._____	66
Figura 3.4:	Perfil e variação da camada limite em 24 horas (Adaptado de STULL, 1999)._____	67

Figura 3.5:	Comportamento de <i>Looping</i> de uma pluma (adaptado de BRAGA <i>et al.</i> , 2002).	70
Figura 3.6:	Comportamento <i>Coning</i> de uma pluma (adaptado de BRAGA <i>et al.</i> , 2002).	71
Figura 3.7:	Comportamento <i>Fanning</i> de uma pluma (adaptado de BRAGA <i>et al.</i> , 2002).	71
Figura 3.8:	Comportamento <i>Fumigation</i> de uma pluma (adaptado de BRAGA <i>et al.</i> , 2002).	72
Figura 3.9:	Comportamento <i>Lofting</i> de uma pluma (adaptado de BRAGA <i>et al.</i> , 2002).	72
Figura 3.10:	Comportamento de <i>Trapping</i> de uma pluma (adaptado de BRAGA <i>et al.</i> , 2002).	73
Figura 3.11:	O SODAR (Fonte: <a href="http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm">http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm</a> ).	75
Figura 3.12a:	Sistema lidar de JHU. (Fonte: <a href="http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm">http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm</a> ).	76
Figura 3.12b:	O transmissor (laser e periscópio) e os componentes do receptor (telescópio e detector) (Fonte: <a href="http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm">http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm</a> ).	77
Figura 3.13:	Partícula nuclear, detectada em um sedimento marinho (Fonte: PÖLLÄNEN, 1997).	83
Figura 3.14:	Foto aérea de Angra 1 e um desenho da estrutura interna do reator (Fonte: ELETRONUCLEAR).	93
Figura 3.15:	Foto aérea do Complexo Nuclear de Angra 1 e 2, e com a montagem de onde ficará localizada Angra 3 (Fonte ELETRONUCLEAR).	95
Figura 3.16:	Topografia da região (Gerada pelo modelo RAMS).	98
Figura 3.17:	Normais climatológicas das temperaturas médias (Adaptado de PAIVA <i>et al.</i> , 1998).	100
Figura 3.18:	Normais climatológicas das temperaturas máximas (Adaptado de PAIVA <i>et al.</i> , 1998).	100
Figura 3.19:	Normais climatológicas das temperaturas mínimas (Adaptado de PAIVA <i>et al.</i> , 1998).	100
Figura 3.20:	Normais climatológicas do total de precipitação (Adaptado de PAIVA	

	<i>et al.</i> , 1998)._____	100
Figura 4.1:	Esquema descrevendo a separação dos domínios, utilizando o método <i>top – hat</i> (Fonte: FREITAS, 1999)._____	131
Figura 4.2:	Obtenção do valor médio, utilizando o método “ <i>top-hat</i> ” (adaptado de Freitas, 1999)._____	133
Figura 5.1:	Imagem com sombreamento que denota o relevo acidentado da região de estudo (Adaptado de FRANCO <i>et al.</i> , 2004)._____	138
Figura 5.2:	Perfil do movimento vertical às 9 horas local, para os meses climatológicos de (a) de janeiro e (b) julho._____	139
Figura 5.3:	Perfil do movimento vertical às 15 horas local, para os meses climatológicos de (a) janeiro e (b) julho._____	140
Figura 5.4:	Perfil vertical longitudinal da componente meridional do vento médio climatológico às 9 horas locais para (a) janeiro e (b) julho._____	142
Figura 5.5:	Perfil vertical longitudinal da componente meridional do vento médio climatológico às 15 horas locais para (a) janeiro e (b) julho._____	143
Figura 5.6:	Trajетórias produzidas pelo vulcão Etna, obtidas através do satélite NOAA – 16 LAC em 30/10/2002 as 12:54 UTC (Fonte NOAA)._____	146
Figura 5.7:	Trajетórias produzidas pelo vulcão Etna (Fonte NOAA)._____	147
Figura 5.8:	Simulação das trajetórias em sete níveis diferentes._____	148
Figura 5.9:	Simulação das trajetórias em sete níveis diferentes._____	149
Figura 5.10:	(a) Trajetórias obtidas pelo satélite NOAA (Fonte NOAA)._____	150
Figura 5.10:	(b) Resultado da simulação numérica das trajetórias._____	151
Figura 5.11:	Simulação da trajetória para a altura de 3.500 m._____	152
Figura 5.12:	Simulação da trajetória para a altura de 4.500 m._____	153
Figura 5.13:	Comportamento das trajetórias em 72 horas de integração numérica para janeiro._____	155
Figura 5.14:	Comportamento das trajetórias em 72 horas de integração numérica para julho._____	156
Figura 5.15:	Área do estudo, apresenta duas grades aninhadas a externa (grade mãe) corresponde a 27 km x 27 km, e a grade interna (G2, colorida) corresponde a 9 km x 9 km._____	159
Figura 5.16:	Área do estudo, apresenta duas grades aninhadas a externa (G2) corresponde a 9 km x 9 km, e a grade interna (G3, colorida)	

	corresponde a 3 km x 3 km._____	160
Figura 5.17:	Área do estudo, apresenta duas grades aninhadas a externa (G3) corresponde a 3 km x 3 km, e a grade interna (G4, colorida) corresponde a 1 km x 1 km._____	161
Figura 5.18:	Imagens do evento de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS no período de 8 a 13 de dezembro de 2002 (Fonte CPTEC/INPE)._____	163
Figura 5.19:	Componente meridional do vento._____	164
Figura 5.20:	Precipitação obtida através do modelo RAMS (08/12/2002)._____	165
Figura 5.21:	Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 7z._____	166
Figura 5.22:	Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 12z._____	167
Figura 5.23:	Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 17z._____	168
Figura 5.24:	Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 0z._____	170
Figura 5.25:	Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 6z._____	171
Figura 5.26:	Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 12z._____	172
Figura 5.27:	Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 18z._____	173
Figura 5.28:	Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 0z._____	174
Figura 5.29:	Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 6z._____	175
Figura 5.30:	Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 12z._____	176
Figura 5.31:	Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 18z._____	177
Figura 5.32:	Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 0z._____	178
Figura 5.33:	Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 6z._____	179
Figura 5.34:	Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 12z._____	180
Figura 5.35:	Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 18z._____	181
Figura 5.36:	Imagem do satélite GOES 12 no canal do infravermelho do dia 31 de outubro de 2003 as 09z (Fonte CPTEC – INPE)._____	183
Figura 5.37:	Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km._____	184
Figura 5.38:	Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km._____	185
Figura 5.39:	Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km._____	186

Figura 5.40:	Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.	187
Figura 5.42:	Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.	189

# ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1:	Escalas e categorias dos problemas de poluição do ar (Adaptado de STERN, 1984)._____	09
Tabela 2.2:	Categoria de Estabilidade de Pasquill._____	34
Tabela 2.3:	Coefficientes de Pasquill para o cálculo de $\sigma_y$ e $\sigma_z$ ._____	35
Tabela 2.4:	Relação entre os tipos de estabilidade de acordo com Pasquill – Gifford, e a estratificação térmica._____	38
Tabela 2.5:	Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica (Adaptado de SALAS, 2004)._____	46
Tabela 2.5:	Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica - continuação (Adaptado de SALAS, 2004)._____	47
Tabela 2.5:	Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica - continuação (Adaptado de SALAS, 2004)._____	48
Tabela 2.5:	Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica – continuação (Adaptado de SALAS, 2004)._____	48
Tabela 3.1:	Composição média dos 100 km inferiores da atmosfera terrestre (JACOBSON, 2000)._____	59
Tabela 3.2:	Alguns gases emitidos para a atmosfera oriundos de fontes naturais (BAIRD, 2002)._____	79
Tabela 3.3:	Alguns tipos de materiais particulados (BAIRD, 2002)._____	82
Tabela 3.4:	Características dos radionuclídeos primordiais (adaptado de BUCHMANN, 2000)._____	84
Tabela 3.5:	Tempo da meia-vida dos radionuclídeos encontrados no solo (BUCHMANN, 2000)._____	85
Tabela 3.6:	Alguns isótopos mais indicados para a detecção das atividades nucleares (Adaptado de BUCHMANN, 2000)._____	87
Tabela 3.7:	Isótopos de urânio._____	88
Tabela 3.8:	Classificação Climática (Adaptado de PAIVA <i>et al.</i> , 1998).	99
Tabela 4.1:	Dados que são obtidos pelas reanálises. _____	103

Tabela 4.2:	Algumas características e opções para inicialização do modelo RAMS._____	105
Tabela 5.1:	Configuração espacial e temporal das simulações._____	157
Tabela 5.2:	Dimensões verticais das quatro grades usadas nas simulações.___	158

# CAPÍTULO I

---

## INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial nas últimas décadas fez aumentar a demanda do consumo energético, induzida a implementação de unidades geradoras de energia. Em diferentes países, surgiram, a partir do final da década de 1940, vários tipos de usinas: hidrelétricas, termelétricas, nucleares, eólicas e outras fontes alternativas de abastecimento energético, demandando, portanto, a busca de soluções e alternativas para a melhoria do potencial de energia em operação e, sobretudo, para a melhoria de eficiência energética. A utilização racional de fontes de energia conhecida é de extrema importância para os países desenvolvidos e em desenvolvimento. No Brasil, nas últimas quatro décadas, muitas medidas para a melhoria do nosso potencial energético têm sido implementadas. Um motivo que muito contribuiu para que o Governo Federal acelerasse o Programa Nacional Energético foi a interrupção do fornecimento de energia elétrica, no final da década de 1990, nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Apesar de ter causado enormes transtornos para a população, esse evento serviu como alerta para os possíveis riscos de se implementar reformas, que priorizem apenas o aspecto financeiro, sem que haja uma profunda reflexão sobre suas conseqüências para o consumidor, ou seja, para a população brasileira, considerando-se todas as questões tecnológicas relacionadas ao planejamento energético (ROSA *et al.*, 1998; ROSA, 2001).

Fatores ambientais poderiam estar relacionados com as trocas gasosas entre os sistemas águas e atmosfera que se refletem diretamente nos processos hidrológicos,

resultando na diminuição do volume de água contido nas bacias hidrográficas e, conseqüentemente, interferindo diretamente na operacionalização de represas hidrelétricas.

Uma das hipóteses para as alterações que estão ocorrendo no ciclo hidrológico é a associação com as mudanças climáticas, efeito agravado potencialmente pelo aumento dos gases de efeito estufa (GEE), oriundos principalmente de emissões de CO<sub>2</sub>. Adiciona-se, ainda para agravar a situação, as constantes queimadas em significativas e extensas áreas de floresta, plantadas ou naturais, emissoras de gás metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Emissões oriundas das queimadas florestais propiciam vários efeitos no equilíbrio climático e no sistema biogeoquímico da Terra. Acrescente-se aos efeitos diretos das emissões das queimadas florestais, o fato de que, ao atingirem escalas globais, estariam alterando ainda o balanço radioativo da atmosfera. Dessa maneira, os aerossóis passam a refletir a radiação de volta para o espaço. Portanto, o ciclo hidrológico poderá estar sendo afetado, com as nuvens passando por um retardo na formação dos seus núcleos higroscópicos. Evidencia-se, portanto, a influência das nuvens sobre o clima do planeta (KAUFMAN *et al.*, 1998). Alterações dessa natureza conduziram as agências governamentais, diretamente ligadas ao setor energético, a tomar medidas para implementar ações no sentido de antecipar possíveis problemas pertinentes às alterações climáticas.

Para suprir a crescente demanda energética, uma das soluções encontradas pelo governo brasileiro foi dar continuidade ao seu programa nuclear, optando pela construção de mais uma usina eletrônica no complexo de Angra do Reis, denominada Angra III. Entretanto, torna-se importante quantificar os possíveis impactos que poderão ocorrer na atmosfera, em caso de emissões radioativas e suas conseqüências para os ecossistemas encontrados nas áreas de abrangência das usinas nucleares.

Nesta tese, através de informações bibliográficas, procurou-se realizar diagnósticos relativos a determinados cenários meteorológicos e climatológicos tendo a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA) como centro da grade de estudo. A metodologia apresentada a seguir, conjuntamente com seus resultados e conclusões, poderão servir como ferramenta adicional para o Programa Energético Nacional, na ocorrência de um vazamento de radionuclídeos para a atmosfera.

Foram considerados, durante a execução deste trabalho, os mecanismos da dinâmica e da termodinâmica da atmosfera. O diagnóstico e análises desses mecanismos

relacionados com a atmosfera, tiveram como ferramenta dois modelos numéricos o *Regional Atmospheric Modeling System* - RAMS. O conjunto de dados dos campos de ventos, gerados pelo referido modelo foi acoplado ao segundo modelo para definição do comportamento das trajetórias cinemáticas, resultantes das interações atmosféricas. Por intermédio desse acoplamento, foi possível monitorar sistematicamente diferentes sistemas atmosféricos que envolvem o CNAA.

Em caso de vazamento de radionuclídeos na micro escala para a atmosfera, não é necessário levar em consideração todas as interações com a mesma. Caso ocorram vazamentos que chegam alcançar a mesoescala ou que ultrapasse essa, o conhecimento instantâneo sobre o campo dos ventos é fundamental. Pois, o vetor velocidade, em parte, é devido aos movimentos de rotação e não somente aos movimentos de translação das massas de ar. Logo, fica evidenciado, que ao demonstrar a importância das variações meteorológicas, em especial o campo de vento, cuja direção e sentido apresentam um comportamento bastante variável (AIRES & KIRCHHOFF, 2001). Cálculos das trajetórias de massa de ar em função do tempo constituem-se nos instrumentos importantes para o estudo de transporte dos contaminantes atmosféricos. Ressalta-se que elementos radioativos com tempo de meia vida muito baixo não são considerados dentro dessa metodologia, pois o que se procura representar é a interface entre os diferentes mecanismos da atmosfera, associados aos possíveis deslocamentos das parcelas de ar.

O monitoramento sistemático da atmosfera fornece valiosos dados e informações relativas ao transporte de partículas radioativas na atmosfera. Este procedimento ficou evidente após o acidente ocorrido na usina nuclear de Chernobyl<sup>1</sup> (1986), quando inúmeros radionuclídeos alcançaram altos níveis de concentração na atmosfera. Partículas radioativas alcançaram países vizinhos e chamaram a atenção da comunidade científica. A Dinamarca, por exemplo, país que não utiliza a energia nuclear, mantém um centro para o monitoramento dos transportes radioativos (BAKLANOV & MAHURA, 2001). Sendo assim, existe a necessidade de utilização de ferramentas para diagnosticar e prognosticar os deslocamentos de contaminantes para regiões iguais ou superiores a meso escala.

---

<sup>1</sup>Ressalta-se que a tecnologia utilizada na construção da usina de Chernobyl, é diferente da CNAAA.

A modelagem numérica da atmosfera é possivelmente a ferramenta mais adequada para quantificar e estimar os efeitos dos diferentes tipos de poluentes, sendo eficaz para se calcular as dispersões e as interações, que ocorrem entre os poluentes atmosféricos, independentes das escalas que se queira estudar. Os radionuclídeos oriundos de uma fonte pontual podem ser quantificados e estimados em uma determinada área ou região. Para que esses cenários possam ser compreendidos, é necessário conhecer a topografia regional e os parâmetros meteorológicos que participam em diferentes processos de dispersão de poluentes na atmosfera: a velocidade e direção dos ventos, a turbulência atmosférica, a temperatura do ar e a radiação solar.

Para realizar o controle de emissões que envolvem as diferentes espécies químicas (aerossóis e materiais particulados), são considerados: transporte vertical e horizontal, mistura turbulenta, convecção, vários elementos químicos e deposição seca e úmida do material na superfície. Existem ainda as espécies secundárias e as inúmeras reações químicas que ocorrem (não acontecem com os radionuclídeos) e são processadas em diferentes níveis da atmosfera. Tais reações são afetadas diretamente pela umidade relativa, energia solar, temperatura e na presença de água líquida nas nuvens. Para as pequenas concentrações dos gases traços e dos materiais particulados, as coletas e registros desses elementos sofrem certa dificuldade em função do custo operacional. Normalmente, essas medições não são contínuas, dificultando assim a compreensão do estado real do meio ambiente.

Por outro lado, resultados dos modelos numéricos de qualidade do ar – MQAR, como o euleriano e o lagrangeano, permitem compreender os processos que envolvem a dispersão dos poluentes. O resultado final serve para que as indústrias e os órgãos ambientais tomem medidas para o controle das emissões, além de permitir formas de monitoramento mais eficientes, criando sistemas de informações e alerta à população.

Apesar do avanço da tecnologia computacional e da obtenção e qualidade dos dados, as pesquisas têm demonstrado que a modelagem pode resultar em alguns erros nos MQAR. A causa desses erros deve-se às condições de inicialização dos modelos, tais como as taxas de concentrações e emissões nas amostras dos elementos em suspensão e por não considerar todas as reações químicas. Um outro fator que pode alterar o resultado final deve-se ao número reduzido dos campos meteorológicos utilizados nos MQAR, não

considerando todos os elementos significativos que envolvem a termodinâmica da atmosfera. Assim, as componentes meridionais, zonal e vertical do vento, a temperatura, a razão de mistura do vapor de água, a quantidade de água líquida, a precipitação, o fluxo da radiação solar, a pressão ao nível do mar, a altura da camada limite, a intensidade da turbulência (energia cinética turbulenta ou coeficiente de difusão vertical) e os fluxos superficiais de calor, umidade e momentum devem ser considerados nos modelos e, conseqüentemente, receber um tratamento especial na medida que a contribuição dessas variáveis nos modelos Gaussianos é primordial para uma boa qualidade dos resultados.

Em síntese, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia para ser utilizada pelas agências nucleares, onde será levado em consideração o transporte da atmosfera associada com as trajetórias cinemáticas. Ressalta-se que será considerado o domínio que está dentro das normas dos padrões ambientais utilizados nas usinas nucleares em operação, considerando-se que os limites para o transporte e difusão ficam restritos até um raio de 80 km. Além desse raio, é importante considerar as informações do transporte atmosférico da grande escala (US-NRC, 1999).

De forma a cumprir o objetivo proposto, a apresentação do texto é dividida em capítulos. O Capítulo II mostrará uma revisão da literatura sobre emissões de poluentes de instalações industriais, modelagens usadas nos diversos setores das atividades industriais. O Capítulo III apresenta uma caracterização da atmosfera e do espaço de estudo. O Capítulo IV, serão apresentados à metodologia e modelagem utilizada. O Capítulo V serão apresentadas à simulação e estudos de casos e, no Capítulo VI, as conclusões e recomendações finalizando-se a tese com as referências bibliográficas.

# **CAPÍTULO II**

---

## **REVISÃO DA LITERATURA**

Em 1998 o Banco Mundial, considerou que a poluição do ar através de particulados é a segunda maior prioridade para o Brasil, antes mesmo do tratamento de esgotos e gestão de resíduos sólidos, ficando atrás do abastecimento de água e coleta de esgotos. É importante, compreender as origens das emissões dos poluentes para o desenvolvimento de estratégias eficientes na melhoria da qualidade do ar. O conhecimento nesse campo e as habilidades para quantificar os impactos das diversas fontes de poluição, melhoraram significativamente durante os últimos anos. Isso tem permitido que as agências ambientais tomem medidas mitigadoras em várias partes do mundo, com o objetivo de reverter às tendências no crescimento das emissões (BANCO MUNDIAL, 1998; AMANN, 2001; LUCON, 2003).

Assim, ao procurar desenvolver um sistema de gestão e de proteção da qualidade do ar deve pressupor o conhecimento do estado do ambiente. Tal conhecimento envolve um aspecto propriamente cognitivo e um interpretativo. A rede de pesquisa, juntamente com o inventário das fontes de emissão, é importante para a construção do quadro cognitivo, mas não do interpretativo. Na realidade, o controle da qualidade do ar requer instrumento interpretativo capaz de extrapolar no espaço e no tempo os valores medidos na posição dos analisadores, enquanto a melhoria da atmosfera pode ser obtida somente com planos que reduzam as taxas de emissões e, então, com os instrumentos numéricos de dispersão atmosférica, que são capazes de conectar a causa (a fonte) de poluição com o efeito (a concentração do poluente) MOREIRA & TIRABASSI (2004).

Dentro dessa ótica, a elaboração de uma ferramenta computacional destinada a simular situações de descargas de chaminés, é de grande utilidade para minimizar e analisar os efeitos das dispersões de poluentes na atmosfera. Logo, a modelagem numérica é um instrumento auxiliar e fundamental para o gerenciamento ambiental nas instalações industriais e eletronucleares.

Na modelagem da dispersão atmosférica de poluentes, um dos objetivos é estimar a concentração e a distribuição espacial das partículas lançadas na atmosfera através de uma fonte pontual ou de várias fontes, como por exemplo, uma chaminé. Ao estudar as concentrações esperadas em torno da fonte, deve-se levar em consideração suas características físicas, a sua vazão, os componentes nocivos presentes na emissão, como também as condições atmosféricas locais, permitindo prever e caracterizar o impacto dessa poluição no meio ambiente.

Os estudos dos transportes dos poluentes emitidos pelas indústrias são fundamentais para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e proteção da qualidade do ar (Figura 2.1).

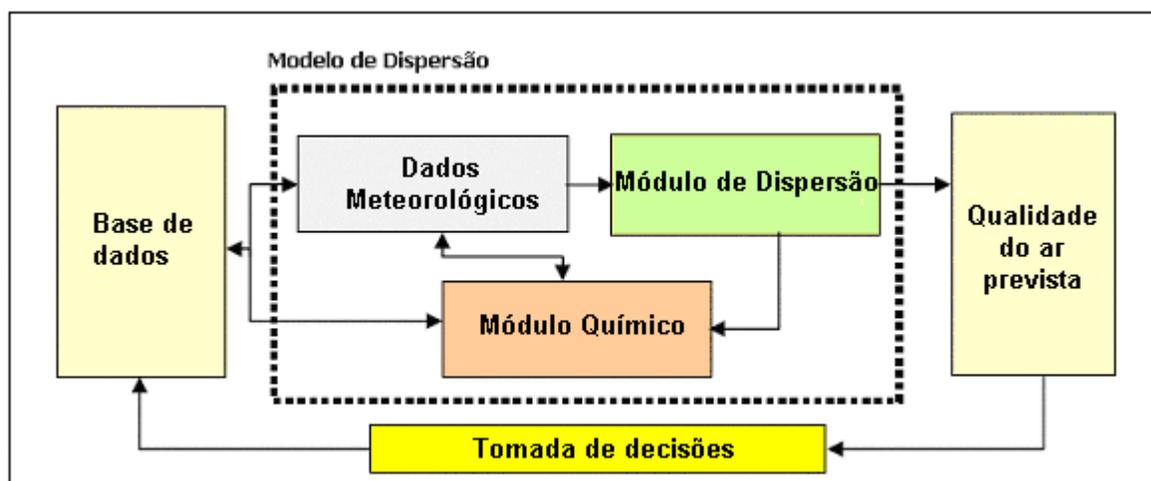


Figura 2.1: Conexão entre os diversos módulos de um modelo de dispersão e a sua integração no processo de tomada de decisões (Adaptado de GALLARDO, 2003).

A Figura 2.1 mostra as interfaces que estão envolvidas para diagnosticar a poluição, através de um modelo dispersão. Um dos objetivos principais dos padrões de qualidade do ar é definir as concentrações máximas de poluentes na atmosfera visando preservar a saúde e o bem estar da população. No Brasil, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos através da Portaria Normativa do IBAMA n.º 348, de 14/03/90 e Resolução CONAMA n.º 03/90. É importante ressaltar, que a legislação ambiental sobre poluição atmosférica tem imposto gradativamente ao longo dos últimos anos limites de emissões cada vez restritivos. A autorização para instalação e operação de um empreendimento industrial estabelece atividades de previsão e controle da emissão e dispersão dos poluentes na atmosfera. Logo, os modelos de qualidade do ar devem ser utilizados pelas agências ambientais, durante o processo de licenciamento de uma nova fonte de poluição atmosférica, para verificar se os padrões estabelecidos pela legislação ambiental vão ser ultrapassados ou não. O processo de implantação desse licenciamento converge diretamente no documento de licenciamento ambiental, isto é: EIA – Estudo de Impacto Ambiental e RIMA – Relatório de Impacto Ambiental.

Assim, é fundamental que se conheça os seguintes fatores, primeiro a dimensão do problema a ser estudado e nesse caso é denominado de escalas, o segundo a característica da indústria. Esses elementos em conjunto contribuem na escolha do modelo a ser utilizado. Os resultados gerados na modelagem, permitem o gerenciamento e o monitoramento das emissões contínuas e fugitivas, acidentes nas instalações industriais ou nucleares na atmosfera. Por isso, nesse capítulo serão apresentados as escalas e alguns modelos numéricos que são utilizados nas indústrias e pelas agências reguladoras. Ressalta-se que nessa tese pretende-se enfatizar a aplicação de um modelo meteorológico acoplado a um modelo de trajetórias.

## **2.1. Escalas de Poluição Atmosférica e Meteorológica**

Segundo TULLET (2000), os episódios graves da poluição afetam normalmente os domínios que variam da escala local, urbana, regional e sinótica. Para esse pesquisador as plumas oriundas de Alemanha e da região de Benelux (Bélgica e Holanda), alcançam e afetam fortemente a França e o norte da Inglaterra. Um dos fatores importantes

para a definição de estratégias eficientes na melhoria da qualidade do ar, é a compreensão das origens das emissões dos poluentes.

Por isso, é fundamental o conhecimento dos transportes das emissões dos poluentes para poder quantificar o seu impacto ao meio ambiente, a sua dimensão e a escala geográfica. Assim, na Tabela 2.1 que foi desenvolvida por STERN *et al.*, (1984), as escalas são apresentadas em quatro categorias: (a) horizontal, verifica-se a troca de energia entre a superfície e a atmosfera; (b) vertical, variações das camadas atmosféricas; (c) o tempo em que os poluentes são transportados; (d) e o tipo de organização necessária para desenvolver medidas de mitigação.

Tabela 2.1. Escalas e categorias dos problemas de poluição do ar (Adaptado de STERN, 1984).

<b>Escala</b>	<b>Categorias do Problema da Poluição Atmosférica</b>				
<b>horizontal</b>	local	urbana	regional	continental	global
<b>vertical</b>	altura da chaminé	primeiros quilômetros	troposfera	estratosfera	atmosfera
<b>temporal</b>	horas	dias	meses	anos	décadas
<b>tipo de organização</b>	municipal	metropolitana	estadual ou nacional	nacional ou internacional	internacional

A Tabela 2.1 demonstra que o problema de poluição do ar de uma certa localidade, pode impactar outras regiões através de uma indústria ou de um complexo industrial. Assim, sem deixar de reconhecer o maior peso das emissões locais, o ar que se respira numa região pode conter além da poluição industrial, vestígios de elementos antrópicos e naturais, como por exemplo, as erupções vulcânicas, queimadas de florestas e areia de desertos que são transportadas a milhares de quilômetros de distância (STERN, 1984). Na mesma Tabela 2.1, considera-se a dimensão local a região em que a fonte e o receptor estão muito próximos um do outro. Logo, a ação da poluição de uma fonte ou um conjunto dessas sobre um receptor pode ser identificada não havendo necessidade de aplicar um traçador. A área urbana corresponde ao centro da cidade, o subúrbio e a zona rural. Nessas áreas urbanas estão concentradas inúmeras atividades humanas como as industriais e as de transportes que

geram enorme quantidade de poluentes lançados na atmosfera. Na dimensão regional, pode ocorrer um transporte de poluentes para áreas não contaminadas, isso decorre das condições semelhantes nos mecanismos de dispersão favorecidos por fatores topográficos, além de condições meteorológicas. Assim, as áreas não poluídas são afetadas pelas emissões de outras áreas, surgindo uma condição de homogeneidade com a diluição do ar poluído original. O problema da poluição do ar nessa dimensão mostra que o transporte de poluentes através das fronteiras internacionais, é muito comum nos países europeus. A dimensão global considera o transporte de poluentes ao redor do globo terrestre, como exemplo o transporte estratosférico de radionuclídeos em decorrência dos testes de armas nucleares, a redução da camada de ozônio e a variação do efeito estufa, alterando assim o clima do planeta (KEMP, 1994; PIRES, 2005).

Outra escala importante é a meteorológica, que permite compreender os fenômenos atmosféricos e suas interações, por isso é preciso separar o espectro da atmosfera em escalas. Assim, a natureza dos termos dominantes das equações governantes depende da escala horizontal dos movimentos atmosféricos. Os movimentos com escalas horizontais de poucos quilômetros tendem a ter escalas pequenas de tempo, onde os termos que envolvem a rotação da Terra são desprezíveis. Já nos movimentos de escalas maiores, esses termos tornam-se importantes (HOLTON, 1992). Na Figura 2.2, observa-se três tipos de escalas bem definidas: a planetária, a mesoescala<sup>2</sup> e a microescala turbulenta, sendo que a última faixa é subdividida em uma faixa inercial e viscosa.

---

<sup>2</sup> A mesoescala inclui sistemas de movimentos que tem escalas horizontais em torno de 10 – 1000 km. Incluindo trovoadas e ondas de gravidade interna, variam da pequena escala até frentes e furacões.

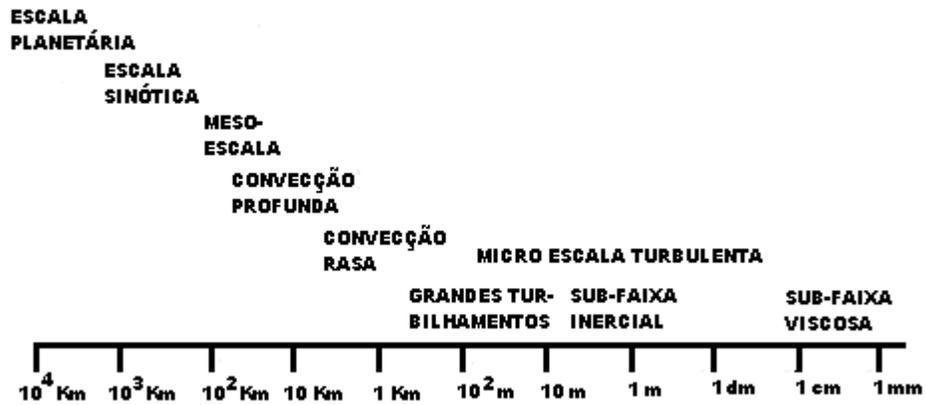


Figura 2.2: Escalas horizontais dos movimentos típicos da atmosfera (Adaptado de ARAKAWA, 1997).

ORLANSKI (1975) subdividiu as escalas dos diferentes processos atmosféricos em:  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . A Figura 2.2 apresenta a classificação espacial e temporal dos processos atmosféricos segundo ORLANSKI.

**MESOESCALA**

	1 MÊS	1 DIA	1 HORA	1 MINUTO	1 SEG.	
10,000 Km	ondas longas	marés				MACRO $\alpha$ ESCALA
2,000 Km	ondas baroclínicas					MACRO $\beta$ ESCALA
200 Km		frentes e furacões				MESO $\alpha$ ESCALA
20 Km		jatos baixos ondas inerciais				MESO $\beta$ ESCALA
2 Km			tempestades			MESO $\gamma$ ESCALA
200 m			tornados convecção profunda ondas de gravidade			MICRO $\alpha$ ESCALA
20 m				poeiras		MICRO $\beta$ ESCALA
				plumas rugosidade turbulência		MICRO $\gamma$ ESCALA
	ESCALA CLIMATOLÓGICA	ESCALA SINÓTICA	MESO ESCALA	MICRO ESCALA		DEFINIÇÃO

Figura 2.3: Escala de fenômenos horizontais e com diferentes características de tempo (Adaptado de ORLANSKI, 1975).

Observa-se na Figura 2.3, que escoamentos com escalas horizontais de 2 até 2.000 km e escalas de tempo que variam de 1 a 48h são chamados de escoamentos de mesoescala. Essa escala engloba fenômenos como furacões, ventanias, brisas em continentes e mares. Essa larga classe de fenômenos em mesoescala pode ainda ser subdividida. Com base na escala

vertical, são chamadas de movimentos “profundos” as tempestades com trovoadas que envolvem quase a troposfera, e os movimentos rasos como os sistemas de ventos sobre vales e montanhas que são confinados nos primeiros quilômetros da atmosfera, isto é, na camada limite.

## **2.2. Tipos de Fontes Poluidoras**

A agência americana de controle ambiental - *Environmental Protection Agency* – EPA - classifica os padrões de qualidade do ar, como também desenvolve modelos de dispersões atmosféricas para os Estado Unidos da América do Norte dependendo do tipo de fonte. Essa agência divide em dois grupos os tipos das fontes poluidoras: fonte área e principal. A fonte área é um conjunto de poluentes perigosos que não são originários de uma fonte principal, são fontes pequenas que o somatório dessas, podem afetar a qualidade do ar de uma determinada região. As fontes principais são fontes fixas que emitem 10 toneladas por ano ou mais de um único poluente perigoso, ou ainda, 25 toneladas por ano ou mais de qualquer combinação de poluentes perigosos (USEPA, 1997). Os poluentes emitidos dos processos industriais são considerados como fontes fixas, têm origem principalmente na combustão de carvão, petróleo e através das emissões fugitivas. Nesses processos industriais estão incluídas as refinarias, indústrias químicas e fundições. Lembrando, que as indústrias químicas emitem vários poluentes perigosos e quantidades consideráveis de compostos orgânicos voláteis. Como foi apresentada a fonte pontual ou estacionária são instalações fixas e também podem ser classificadas, como contínuas quando emitem continuamente, formando uma pluma, ou instantâneas quando emitem por um curto período de tempo, sendo denotado de *puff*.

Segundo HAVENS & SPICER (1985), ERMAK & CHAN (1990), as liberações de gases pesados ao nível do solo para a atmosfera ocorrem durante acidentes: indústrias e em transportes de produtos químicos.

Ressalta-se, que essa pesquisa tem o objetivo de estudar os transportes cinemático da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – CNAAA e esse complexo será considerado como uma fonte pontual. Essas liberações apresentam o comportamento

instantâneo, contínuo ou intermitente. A Figura 2.4 representa os processos físicos que estão envolvidos através da emissão de poluentes.

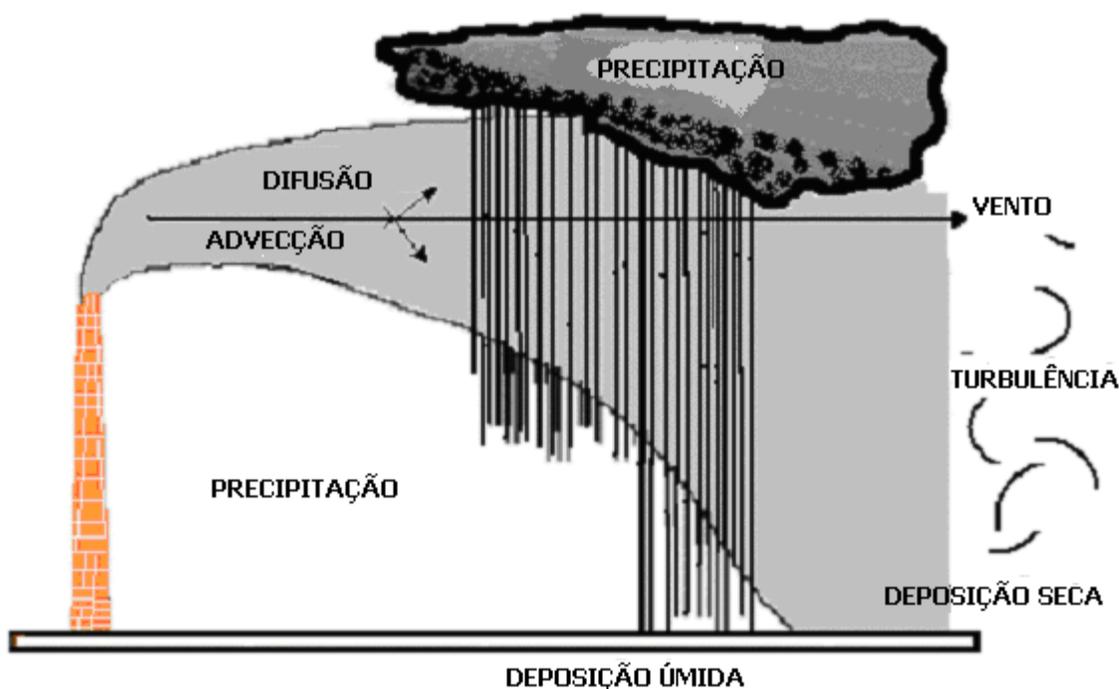


Figura 2.4: Os processos que afetam o transporte de partículas e em especial os radionuclídeos na atmosfera (Adaptado de ZANNETTI, 1990).

A Figura 2.4 representa o campo do vento e a turbulência (flutuações do campo médio do vento), que controlam os mecanismos de transporte e dispersão de poluentes na atmosfera. Segundo CARVALHO (1999) e ZANNETTI (1990), os principais fatores meteorológicos que influenciam esses elementos supracitados são: radiação solar, vento meridional e zonal, estabilidade atmosférica, o nível da camada de inversão, movimento vertical devido aos sistemas atmosféricos de alta e baixa pressão, rugosidade e a topografia. A turbulência, principal fator na dispersão vertical dos poluentes, é resultado direto dos efeitos térmicos (movimentos convectivos), e mecânicos (cisalhamento do vento

horizontal). Por isso, ao desenvolver um modelo de dispersão é importante considerar algumas dessas variáveis.

Para que haja o licenciamento de novas unidades industriais e de usinas nucleares, é importante a análise do impacto ambiental que poderá causar essas futuras instalações industriais. Para as emissões atmosféricas utilizam-se programas computacionais de modelagem numérica. Conseqüentemente, o resultado gerado pelos modelos apresenta um grau de incerteza, pois não representam todos os fenômenos que estão envolvidos. Nesse caso, para que os modelos computacionais sejam validados, considera-se suas condições específicas, e para isso são necessários dados das emissões e o mapeamento das concentrações dos poluentes no seu entorno.

Logo, a previsão dos níveis de concentração de poluentes é um fator indispensável para determinação dos possíveis danos a serem provocados por instalações de novas fontes ou mesmo por fontes existentes a serem modificadas. Assim, mesmo que fossem mantidas constantes as emissões de poluentes em uma determinada região, a qualidade do ar poderia mudar em função das condições de dispersão, portanto, pode-se concluir que a percepção da poluição é a resultante da combinação entre emissão e dispersão de poluentes, ou seja, da concentração de poluentes (MARTINS, 1996). Nesse âmbito, a modelagem matemática (Figura 2.5) é uma ferramenta importante para saber quantificar todos os cálculos necessários para a realização de diagnósticos e previsões das emissões emanadas, além de obter resultados confiáveis e com menor custo. Será apresentado a seguir o desenvolvimento dos modelos de dispersão atmosférica e da sua parte numérica.

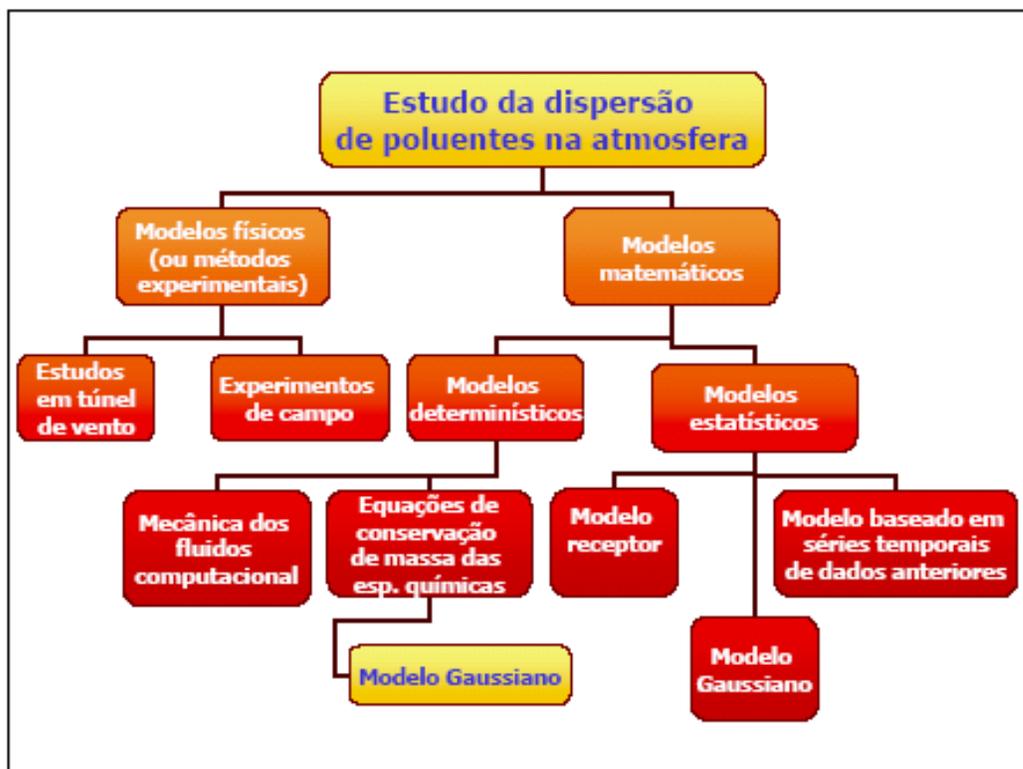


Figura 2.5: Alguns procedimentos numéricos para desenvolver um sistema de dispersão atmosférica.

### 2.3. Desenvolvimento dos Modelos Numéricos de Dispersão

Antes de apresentar o desenvolvimento dos modelos de dispersão, é importante saber como são divididos e conhecer algumas de suas características. Os modelos são divididos basicamente em quatro classes:

a) Gaussiano

Esses modelos são baseados na forma de decaimento da função de Gauss, e utilizados em fontes pontuais para estimar impactos e concentrações de poluentes não reativos.

b) Numéricos

Nesses modelos envolvem poluentes reativos.

c) Estatísticos e empíricos

São utilizados nos casos em que existem poucos parâmetros físicos.

d) Físico

O seu método corresponde a dinâmica do fluido computacional, são utilizados em problemas específicos como exemplo, o impacto da pluma em prédios.

Em termos de precisão ou sofisticação dos resultados existem 2 níveis:

a) os que induzem a uma avaliação ampla e conservativa sem detalhamento meteorológico, e dependem apenas da localização e topografia (plana ou complexa).

b) técnicas analíticas que envolvem tratamentos mais detalhados dos fenômenos. Em geral, as aplicações são utilizadas nos modelos hidrodinâmicos e apresentam um enorme detalhamento meteorológico, e posteriormente os seus resultados são acoplados aos modelos de dispersão.

Os modelos também podem ser divididos em oito categorias: rural, urbano, complexo industrial, poluente reativo, fontes móveis, terreno mais alto que a fonte, visibilidade e transporte de longa distância. A aplicação do modelo visa verificar o atendimento dos padrões da qualidade do ar, e se esses estão influenciando na degradação do ar. Os modelos incluem algumas características:

- receptores - definição adequada da área de influência;
- coeficientes de dispersão: rural/urbana;
- categoria de estabilidade;
- estimativa de elevação da pluma;
- transformação química;
- classificação do terreno urbano ou rural, baseado-se na ocupação do solo e densidade populacional;
- pulverização;
- estagnação com elevada concentração no nível do solo.

Os dados de entrada dos modelos incluem:

- caracterização do tipo de fonte: pontual, linha (modelo para auto-estrada), área e volume;
- local e características físicas da emissão junto à chaminé: diâmetro; altura; temperatura dos gases (NEGRI, 2002);
- concentração da poluição de fundo pré-existente, quando disponível;
- dados meteorológicos.

Finalmente, os modelos podem ser classificados de acordo com a resolução temporal da concentração produzida:

- modelo episódico (resolução temporal inferior a uma hora);
- modelo de breve intervalo temporal (resolução temporal superior ou igual à uma hora e inferior ou igual a 24 horas);
- modelo climatológico (com resolução temporal superior a uma semana).

Foi demonstrada alguma das categorias dos modelos de dispersão, a seguir será apresentado como ocorreu o seu desenvolvimento. O estudo dos modelos gaussianos inicia-se através de Taylor em 1915, onde a sua pesquisa consistia na análise do fluxo de calor em correntes sobre o oceano, basicamente esse pesquisador foi um dos pioneiros que realizou estudos das misturas dos fluxos verticais nas camadas da baixa troposfera. Dando prosseguimento nessa área de pesquisa de dispersão de substâncias na atmosfera, consideram-se também os seguintes trabalhos de RICHARDSON & PROCTOR (1925), RICHARDSON (1926), ROSSBY (1932), HEWSON (1945), BARON *et al.*, (1949).

Em 1932, o pesquisador Sutton apresentou sua teoria que estava relacionada com os processos que envolvem a difusão turbulenta na atmosfera. Posteriormente esse pesquisador em 1947 e 1950, apresentou os resultados de suas pesquisas de difusão turbulenta na baixa atmosfera, estudando as fontes pontuais contínuas oriundas das chaminés. Esse trabalho levou em consideração os gases quentes em que nesse caso, foi assumida uma distribuição gaussiana da concentração (Figura 2.6), a partir da linha central da pluma.

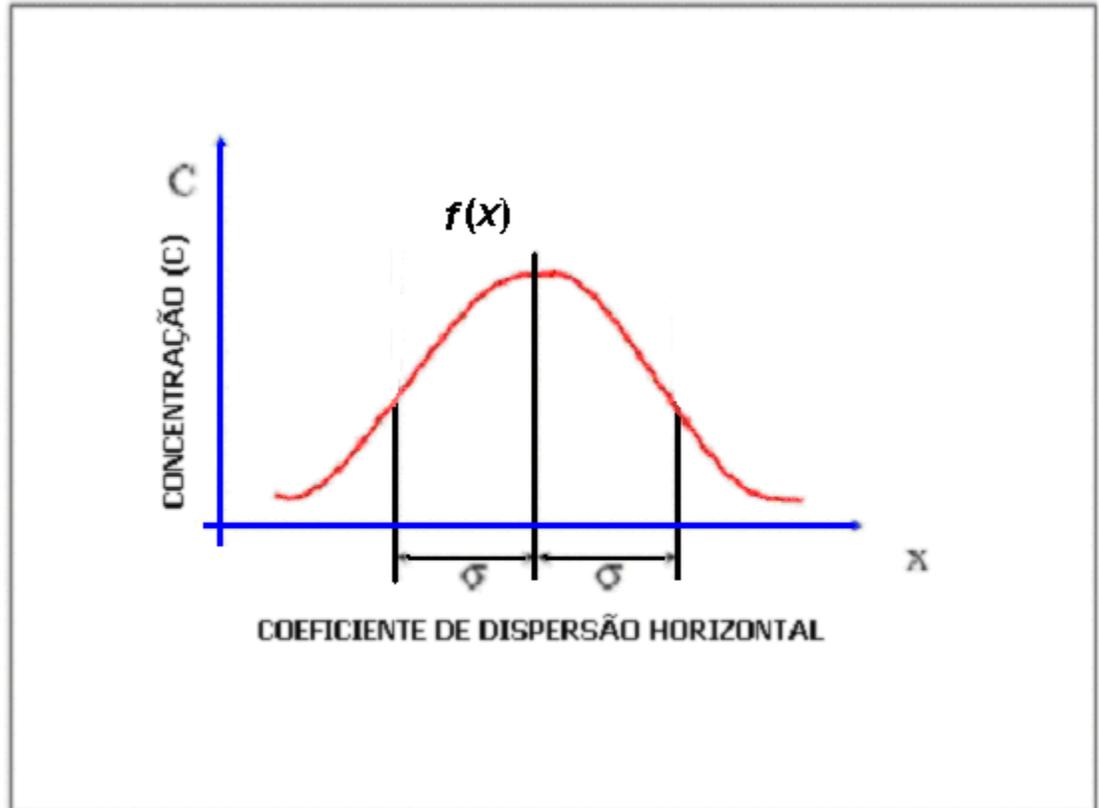


Figura 2.6: Distribuição gaussiana.

HOLLAND (1953), considera alguns parâmetros fundamentais como a altura efetiva da fonte e da chaminé associada aos efeitos da diferença de temperatura entre o poluente e a atmosfera. As variáveis que também devem estar no modelo são: velocidade de escape do poluente, do diâmetro da chaminé, da pressão atmosférica e da velocidade do vento.

FRENKIEL (1952) e PASQUILL (1962), estudaram uma fonte pontual de emissões instantâneas denotada de *puff*, sendo esses os pioneiros a realizarem essas pesquisas, e assumiram também a distribuição gaussiana nas direções transversais em relação ao vento.

PASQUILL (1961), apresentou o conceito das classes de estabilidade, e foi uma enorme contribuição para os cálculos de dispersão atmosférica, que utilizam o modelo de pluma gaussiana como metodologia. A necessidade de desenvolver um método que permitisse diagnosticar essas classes de estabilidade atmosférica, foi primordial para o

prossequimento dos seus estudos, já que esses se basearam em rotineiras observações meteorológicas como: velocidade do vento, intensidade de radiação solar e fração de cobertura de nuvens.

GIFFORD (1961), dando prossequimento aos trabalhos de Pasquill, procurou determinar os coeficientes de dispersão, sendo denotadas de curvas de Pasquill – Gifford, que relacionam os coeficientes de dispersão horizontal  $\sigma_y$  e os coeficientes de dispersão vertical  $\sigma_z$ .

SLAWSON e CSANADY (1967) são responsáveis pelo desenvolvimento de uma teoria relativamente simples de pluma com impulsão, na presença de vento ambiente, formulado para uma fonte fixa. Esses pesquisadores sugeriram seguintes hipóteses: para a aproximação de Boussinesq, considera a densidade constante (portanto igual à ambiente); as variáveis, tanto da pluma como do meio ambiente são consideradas como independentes do tempo. Não se considera qualquer transferência de calor, a não ser por via da advecção. O campo da pressão no interior da pluma, é igual ao admitido ao ambiente. Os perfis da velocidade longitudinal (do eixo da pluma), ou de qualquer outra propriedade (temperatura, concentração) são constantes no seu interior, com uma descontinuidade no seu entorno. O meio ambiente possui uma frequência de Brunt-Väisällä constante. Para a velocidade horizontal da pluma é igual à velocidade do vento, que é constante. A mistura dos gases na atmosfera efetua-se através de um processo chamado entranhamento, que corresponde a entrada de ar exterior pela pluma. Toda a difusão molecular, e conseqüentemente as forças de atrito, são desprezadas. em função de estar na micro escala o escoamento em questão, a força de coriolis é desprezada. Finalizando, esses contribuíram com essa teoria para o desenvolvimento de outros modelos de dispersão.

SUTTON (1947) e KLUG (1969), ressaltaram em suas pesquisas as dificuldades em estimar os parâmetros de dispersão  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  que dependem das condições de estabilidade atmosférica, vento e da turbulência. Esses pesquisadores sugeriram a partir de extensos estudos de campo, um método para a estimativa dos parâmetros de dispersão.

ARAI (1980), utiliza um modelo de dispersão em três dimensões para estudo da concentração de poluentes na região de Angra dos Reis, quando se tem velocidade de vento menor que 1 m/s, para uma fonte pontual e contínua.

ALAM & SEINFELD (1981), ao estimarem a dispersão de SO<sub>2</sub> obtiveram soluções analíticas para a equação da concentração em regime permanente, considerando os coeficientes de difusão constantes que levou em consideração os mecanismos de primeira ordem (linear) de conversão de gás para particulado, bem como a deposição seca e úmida. Foi considerado no modelo a presença de uma extensa camada de inversão térmica.

LLEWELYN (1983) e LEE (1985) desenvolveram um modelo tridimensional analítico para a dispersão de gases e de material particulado. Esse método é caracterizado como modelo gaussiano, pois foram consideradas as velocidades terminais do material particulado. Nesse método existe um mecanismo de primeira ordem que dependendo da situação que se queira estudar, pode ser utilizado em uma deposição úmida ou numa reação química.

ANDRÉN (1987) idealizou uma metodologia que leva em consideração a rugosidade do terreno. Considera também a difusão vertical que é prevista no modelo de turbulência de primeira ordem, e a difusão lateral que apresenta como característica o perfil gaussiano.

DAWSON *et al.*, (1987) simulou a dispersão de um poluente utilizando dois códigos desenvolvidos em laboratório. O primeiro denotado de TEMPEST, esse código é um programa em três dimensões não hidrostático e a sua parte numérica corresponde em diferenças finitas que é utilizada para resolver as equações do movimento, continuidade e energia para escoamentos incompressíveis e turbulentos, incluindo também a aproximação de Boussinesq. Esse pesquisador também usou um modelo de turbulência, que foi usado para representar os termos das escalas não resolvidas explicitamente pelo modelo em função do tipo de resolução. Foi desenvolvido o segundo código PEST, baseado na equação de convecção e difusão, utilizando modelos de turbulência de primeira e segunda ordem.

ANDRETTA *et al.*, (1993), desenvolveram o modelo MRBT, usando uma solução analítica transiente da equação da concentração. Definiu o termo transiente em uma altura de mistura com domínio finito ( $h$ ), com reflexão total (difusão nula) em  $z = 0$  e  $z = h$ , e nesse caso as difusividades turbulentas são consideradas constantes.

Para SEINFELD & PANDIS (1998), devido à simplicidade das equações dos modelos de pluma gaussiana, os seus resultados têm sido amplamente utilizadas nas indústrias. Ao considerar que a concentração do poluente apresenta uma característica de

distribuição normal, com pico de concentração ao longo da linha no centro da pluma, uma dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  na direção horizontal e vertical respectivamente. Esses parâmetros de dispersão são obtidos a partir das concentrações medidas nos experimentos de campo. Em relação as flutuações que ocorrem na direção e velocidade do vento, também podem ser medidas nesses experimentos, nesse caso é possível determinar  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para situações específicas. Os resultados encontrados se aproximam mais da realidade, lembrando que devem ser levados em considerações os efeitos de rugosidade do terreno local, turbulência e estabilidade atmosférica.

ASSUNÇÃO (2002), analisou vários modelos matemáticos, propostos para determinar a elevação da pluma de fumaça de uma chaminé. Os mais comuns são o SCREEN e o ISC – *Industrial Source Complex*, ambos desenvolvidos pela EPA. O primeiro serve para realizar estudos preliminares em uma fonte, dispensando os dados meteorológicos. O ISC permite a simulação da dispersão e de estimar ao mesmo tempo a qualidade do ar resultante da emissão de muitas fontes ao mesmo tempo, porém esse modelo necessita de dados meteorológicos horários e da topografia detalhada da região. Alguns modelos de dispersão da EPA modelam as estradas como fonte linha, assumindo continuamente que as emissões ocorrem ao longo das vias, continuamente. As cidades, devido às várias fontes pontuais e volume são tratadas como fontes áreas. Para essas fontes, a forma geométrica representa um papel importante na distribuição dos poluentes.

A modelagem da dispersão de uma pluma é um procedimento usual para a estimativa ao nível do solo das concentrações de particulados na atmosfera, emitidos por fontes estacionárias. Diversos modelos desenvolvidos de pluma gaussiana pela EPA com objetivo de estimar as emissões são o AUSPLUME e ISC3ST. Um fator importante é supor uma condição estacionária para os campos dos ventos nesses modelos gaussianos. Isso significa que para um certo período de tempo (usualmente uma hora), o vento e as outras condições meteorológicas são considerados uniformes na área que está sendo modelada e que a pluma movimenta-se, instantaneamente, numa linha reta. Na hora seguinte, baseada nas condições de vento naquele instante, a pluma move-se numa linha reta diferente. Logo, o comportamento da pluma não possui memória em relação às condições do campo de vento, pois esse elemento é extremamente variável dependendo das condições atmosféricas (ZANNETTI, 1990; SEIGNEUR, 2001).

As pesquisas se intensificaram e foram desenvolvidas em função do crescente aumento da capacidade computacional, e nos últimos anos os modelos matemáticos de dispersão de poluentes ficaram mais complexos, pois levam em consideração as topografias acidentadas, além de considerar os elementos químicos que estão nos processos que envolvem a dispersão atmosférica dos complexos industriais ou das usinas nucleares. Poderia também acrescentar as dificuldades de reproduzir nos laboratórios um modelo na microescala, e nesse caso levar em consideração a maioria das reações químicas e das condições atmosféricas. Assim, os resultados obtidos para situações reproduzidas nos experimentos em escala reduzida são questionáveis, pois só se consegue simular no modelo de micro escala uma parte dos fenômenos presentes nas situações reais. Porém, nesse caso os experimentos realizados em laboratório utilizando túnel de vento e modelo físico, são comuns para fins de regulamentação ambiental. Os modelos matemáticos que apresentam maior complexidade também podem apresentar tais limitações decorrentes das diferentes escalas envolvidas, logo como os custos das simulações nos computadores estão diminuindo, isso contribuirá para o crescente aumento da modelagem numérica. O que ainda falta são modelos de dispersão que consigam representar bem os fenômenos complexos envolvidos na atmosfera. Assim, os modelos hidrodinâmicos atmosféricos são importantes de serem utilizados, pois embora apresentem limitações em função das escalas meteorológicas, esses ainda representam a atmosfera de uma maneira mais próxima da realidade.

Os modelos de dispersão atmosférica ou de qualidade do ar, são ferramentas importantes para a indústria quando são utilizados progressivamente como um instrumento de mecanismos de gerenciamento ambiental (SEIGNEUR, 1992), logo esses podem ser usados como:

- desenvolvimento de projetos para montagem de complexo industrial ou de fábrica com o objetivo de minimizar os impactos dos possíveis poluentes atmosféricos. É importante o cálculo para adequar a altura e posição da chaminé ou das chaminés como também para localização das futuras usinas nucleares;

- desenvolver e elaborar programas de redução das emissões, por exemplo, determinando quais tipos de fontes e químicas contribuem em maior parte para os riscos previstos para a saúde pública;
- o desenvolvimento de medidas de prevenção e diminuição de danos para minimizar as possíveis conseqüências de grandes vazamentos acidentais, em especial nas centrais nucleares que será apresentado nessa tese.

Quando a topografia da região é suficientemente plana, os modelos podem ser empregados, pois nesse caso as precisões dos seus resultados são satisfatórias como foi apresentado anteriormente. Muitos modelos matemáticos analíticos são aceitos por instituições responsável pelo meio ambiente como a EPA, e para fins de regulamentação e implementação de normas no controle da qualidade do ar. Uma das limitações desses, é no caso de regiões com topografia complexa (colinas, montanhas ou vales), nesses casos esses modelos matemáticos simples já não produzem resultados satisfatórios (BOÇON, 1998).

Finalizando, os modelos físicos e os experimentos de campo em escala real continuam indispensáveis para o estudo desses fenômenos, visando o aperfeiçoamento dos modelos matemáticos e para sua validação.

#### **2.4. Modelo Determinístico**

Todos os modelos determinísticos que são usados para estimar a concentração de poluentes na atmosfera, independentemente do material particulado ou radionuclídeos, são baseados na equação de difusão. Assim, num meio contínuo ao considerar um volume de controle fixo  $V$ , delimitado por uma superfície  $S$ , existem duas formas pelas quais uma propriedade desse meio pode variar ou seja, aumentar ou diminuir, ao longo do tempo no interior de  $V$ , esse fato decorre da existência de fontes ou sumidouros em  $V$  ou por via do fluxo através da fronteira  $S$ . Logo, ao utilizar a equação de difusão que representa a variação da concentração de um poluente  $c$  em um determinado volume  $dv$  é função da intensidade da fonte emissora ou emissão do transporte por convecção, resultado do comportamento do vento e da difusidade molecular e turbulenta. Ressalta-se que existem

equações que representam os processos de remoção seca e úmida dos contaminantes, a seguir é mostrada a equação da difusão:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V q dv = \underbrace{\iiint_V q dv}_{\text{Emissão}} + \underbrace{\iint_{\Sigma} c \bar{u} \bar{\Sigma}}_{\text{Convecção}} + \underbrace{\iint_{\Sigma} \bar{F} d\Sigma}_{\text{Difusão}} \quad (2.1)$$

onde  $c$  é a concentração do poluente,  $\bar{u}$  são as componentes do vento ( $u, v, w$ ),  $q$  representa a fonte de emissão do poluente,  $V$  volume limitado pela superfície e  $\bar{F}$  fluxo de massa através da superfície. A equação da difusão pode ser também escrita desse modo:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{u} \nabla c - \nabla \bar{F}_t + q + R \quad (2.2)$$

onde  $\bar{F}_t$  representa o fluxo turbulento de poluentes,  $R$  é o termo de remoção das reações dos poluentes através da deposição seca ou úmida. Alguns modelos representam o fluxo de poluentes  $\bar{F}_t$  através dos coeficientes de difusividade aleatória  $K_H$  e  $K_z$ :

$$\bar{F}_t = \bar{u}'c' = -k\nabla c \quad (2.3)$$

onde  $k$  é o tensor de difusividade aleatória ou estocástica. Finalizando, a Equação 2.1 resulta em:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \left( u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} K_H \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} K_H \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} K_z \frac{\partial c}{\partial z} + q + R \quad (2.4)$$

onde  $K_H$  é o termo horizontal e  $K_z$  é o termo vertical. A Equação 2.4 está representada na maioria dos modelos de dispersão de contaminantes atmosféricos, ressalta-se que só pode ser resolvida através de métodos numéricos. Porém, dependendo da situação a ser estudada podem ser consideradas algumas suposições e parametrizações, assim nesses casos a

solução analítica pode ser encontrada, como por exemplo, o modelo gaussiano que será abordado posteriormente.

## 2.5. Abordagem Numérica Euleriana e Lagrangeana

Um dos problemas encontrados para resolver as limitações impostas pelas hipóteses que simplificam os modelos analíticos e que em alguns casos são necessárias, é procurar modelos genéricos que procuram solucionar a Equação 2.1, cujas difusividades turbulentas e as componentes da velocidade sejam funções do espaço e conseqüentemente do tempo. Assim, existem duas maneiras de abordar o problema. O primeiro é denominado de euleriano, onde o comportamento das espécies refere-se a um sistema fixo de coordenadas. O segundo é o lagrangeano, onde as variações de concentração são descritas com relação ao fluxo. Para o método euleriano, a concentração de cada espécie deve satisfazer a equação da continuidade:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} u_j c_i + D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, \dots, c_N, T) + s_i(x, t) \quad (2.5)$$

onde  $j$  componente da velocidade,  $i=1,2,3,\dots,N$ , espécie química,  $u_j$  componente  $j$  da velocidade do fluido,  $D_j$  difusividade molecular da espécie e do fluido portador,  $R_i$  velocidade de geração a espécie  $i$  por reação química que depende geralmente da temperatura do fluido  $T$ ,  $s_i$  velocidade de adição de espécies  $i$  no tempo  $t$ . Ressalta-se que quando se trata de poluentes atmosféricos assume-se que as presenças dos mesmos não afetam os parâmetros atmosféricos, logo a Equação 2.5 pode ser resolvida independentemente das equações de momento e energia. Considerando que a turbulência do fluxo  $u_j$  como função aleatória no tempo e espaço, e formada por uma componente determinística  $\overline{u_j}$  e uma componente estocástica  $u'_j$ , ou seja  $u_j = \overline{u_j} + u'_j$ , será substituída na Equação 2.5 resultando:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u} + u'_j) c_i = D_i \frac{\partial^2 c_i}{\partial x_j \partial x_j} + R_i(c_1, \dots, c_N, T) + s_i(x, t) \quad (2.6)$$

Como  $u_j$  corresponde a uma variável aleatória, as concentrações obtidas como solução da Equação 2.6 e  $c_i$  são também variáveis aleatórias. Posteriormente, o que se faz é obter algumas propriedades estatísticas de  $c_i$  que nesse caso corresponde ao valor médio. Como exemplo, pode ser ressaltado, que entre os modelos eulerianos o *box*, é um modelo constituído de uma aproximação matemática simples, pois não considera os fenômenos que estão envolvidos. Esse considera que os poluentes são distribuídos uniformemente no interior de um paralelepípedo (um *box*). Do ponto de vista teórico, isso equivale a assumir infinitos coeficientes de difusão, provocando uma propagação instantânea do poluente imerso no *box* considerado. O poluente presente no *box* provém da fonte interna, da contribuição externa transportada pelo vento ou flui através do topo em consequência da variação de altura do *box*, que geralmente coincide com a altura da camada limite.

O método lagrangeano procura descrever o comportamento das partículas de um fluido durante a difusão turbulenta, ou seja, considera-se uma partícula representativa, e um volume de fluido grande, comparado com as dimensões das moléculas. Esse método apresenta o conceito de densidade probabilística:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(x, t) dx = 1 \quad (2.7)$$

onde  $\varphi(x, t)dx$  é a probabilidade que a partícula num determinado momento  $t$  encontra-se inserido no elemento de volume correspondente  $x_1$  a  $x_1 + dx_1$ ,  $x_2$  a  $x_2 + dx_2$ ,  $x_3$  a  $x_3 + dx_3$ . Logo, se um número arbitrário de partículas estão inicialmente presentes e a posição da partícula é dada por  $\varphi_i(x, t)dx$ . Segundo SEINFELD & PANDIS (1998), que ao estimar à concentração média utilizando o método lagrangeano, resulta em:

$$c(\vec{r}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(\vec{r}, t | \vec{r}_0, t_0) c(\vec{r}_0, t_0) d\vec{r}_0 + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q(\vec{r}, t | \vec{r}', t') c(\vec{r}', t') dt' d\vec{r}' \quad (2.8)$$

O primeiro termo do segundo membro representa a influência das partículas presentes no tempo  $t_0$  e o segundo termo representa a influência de novas partículas adicionadas desde o

tempo inicial. Onde  $q$  representa a função de probabilidade na transição, e que informa que uma partícula na posição  $\vec{r}'$  no instante  $t'$  ao deslocar-se para a posição  $\vec{r}$  no instante  $t$  onde  $t > t'$ . No método lagrangeano o tratamento matemático é mais fácil, pois não existe o problema de fechamento, porém a aplicabilidade das equações resultantes limita-se na dificuldade de encontrar expressões que possam descrever com alguma precisão as propriedades estatísticas das partículas. Por outro lado, as equações não são diretamente aplicáveis aos problemas que envolvam as reações químicas não lineares. Finalizando, é importante ressaltar que as equações resultantes dos modelos de pluma gaussiana podem ser obtidas tanto pela abordagem euleriana ou lagrangeana.

## 2.6. Modelo Gaussiano de Dispersão de Pluma

Como já foi mencionado anteriormente, os modelos de pluma gaussiana consideram que a concentração do poluente assuma uma determinada distribuição normal, com o pico de sua concentração ao longo da linha de centro da pluma, assumindo uma dispersão  $\sigma_y$  na direção horizontal e  $\sigma_z$  na vertical conforme Figura 2.7.

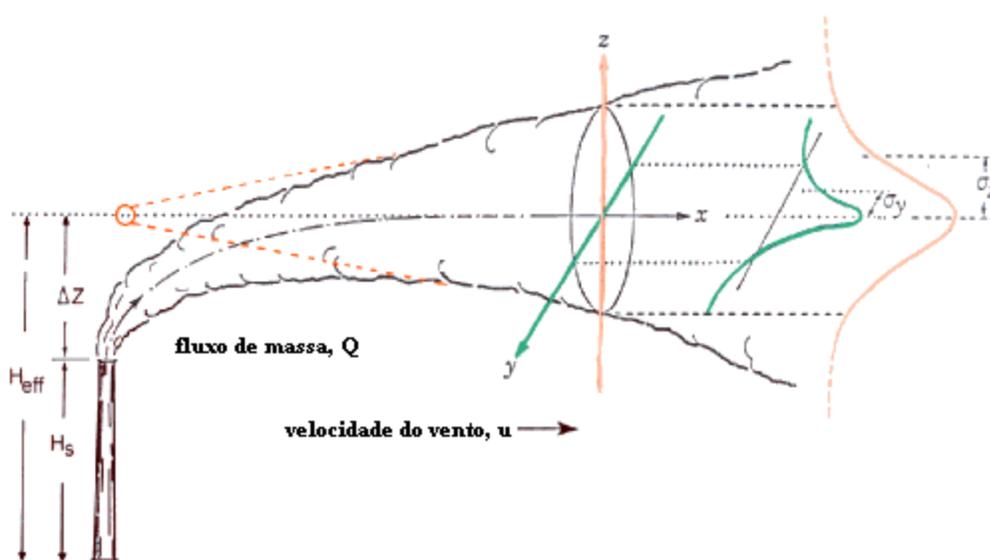


Figura 2.7: Modelo de pluma gaussiana (Adaptado de BRAGA, 2002).

Existem algumas hipóteses que são fundamentais para elaborar e construir um modelo de pluma gaussiana como: topografia plana, velocidade unidirecional, vento constante, condições homogêneas e estacionárias de turbulência atmosférica. A segunda hipótese é bastante questionável, em função da velocidade do vento variar em relação com a altura, especialmente nas proximidades do solo. E a terceira hipótese, diz respeito com relação da turbulência atmosférica, como esse é um fenômeno complexo de ser considerado, e por isso considera-se que nesses casos os coeficientes de difusão turbulenta sejam constantes (PANOFKY & DUTTON, 1984; SEINFELD, 1986).

Ressalta-se que as equações de concentração do modelo gaussiano são soluções analíticas da equação de conservação de uma determinada espécie química sob certas hipóteses, e assim são reduzidas a uma equação diferencial mais simplificada e apresenta uma solução analítica. No caso das três hipóteses acima citadas, e ainda desprezando a difusão molecular e turbulenta e considerando que não haja reações químicas no processo, a equação da concentração de um gás emitido a partir de uma fonte pontual contínua em regime permanente resulta:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + S \quad (2.9)$$

que conforme as condições de contorno:

$$\left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (2.10)$$

que nessa condição é a reflexão total do solo, e para calcular  $S$  supondo uma fonte pontual de intensidade  $q$  a uma altura  $H$ :

$$S = q\delta(x)\delta(y)\delta(z-H) \quad (2.11)$$

A solução da Equação 2.9 é uma função de distribuição gaussiana (normal) e apresenta para uma fonte pontual continua com intensidade de emissão  $q$ , localizada de uma dada altura da superfície e resulta em:

$$c(x, y, z, H) = \frac{q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (2.12)$$

onde  $c$ , é a concentração do contaminante em qualquer ponto de coordenadas  $(x, y, z)$ ,  $\sigma_y^2 = 2K_y t$ ,  $t = 2K_y \frac{x}{u}$ ,  $\sigma_z^2 = 2K_z t$  e  $t = 2K_z \frac{x}{u}$ ,  $H$  altura efetiva da fonte,  $t$  tempo necessário para uma partícula deslocar-se da fonte até a posição indicada pelas coordenadas  $x, y, z$ .

A constante  $q$  é determinada através do balanço de massa de poluentes. Assim, ao longo da pluma a taxa de emissão de poluentes ( $q_e$ ) da chaminé é igual à taxa que atravessa de uma secção da pluma, sendo representada:

$$q_e = \int_A u c(x, y, z) dA = u q \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{1}{2\pi \sigma_y \sigma_z} \right] \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(z-H)}{\sigma_z}\right)^2\right] dz dy \quad (2.13)$$

A equação de Gauss pode ser simplificada e estimar a concentração de poluentes no nível do solo logo  $z=0$ , resulta em:

$$c(x, y, 0, H) = \frac{q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2.14)$$

Para estimar a concentração de poluente na linha central da pluma ao nível do solo  $z=0$  e no valor máximo que ocorre abaixo da pluma  $y=0$  fica:

$$c(x,0,0,H) = \frac{q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

O dado de entrada importante para o cálculo da dispersão nos modelos gaussianos é a altura efetiva de emissão, que é a soma da altura física da chaminé e a altura de elevação da pluma antes de tomar a direção do vento. Essa segunda parcela deve incorporar os efeitos de quantidade de movimento vertical, devido à velocidade de saída do jato e de empuxo, no caso em que os gases forem lançados à temperatura diferente. Várias equações foram propostas para estimar a elevação da pluma. Dentre elas destacam-se as fórmulas propostas por BRIGGS (1969, 1971, 1974). Ressalta-se que a caracterização da elevação da pluma em termos das condições de lançamento dos gases e da atmosfera no local de emissão, constitui num problema complexo que para ser resolvido, envolve uma solução acoplada das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia para resolver o escoamento do jato descarregado na atmosfera. Como nos modelos de pluma gaussiana, isso não é realizado e para suprir esse problema são apenas adotadas as estimativas baseadas nos casos reais já estudados, sendo que essas simplificações podem alterar no resultado final do modelo. Os parâmetros necessários para utilização da formulação gaussiana são:  $u$ ,  $H$ ,  $z$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , a condição de insolação e nebulosidade.

### 2.6.1. Coeficientes de Dispersão de Pasquill-Gifford

Os valores de coeficientes de dispersão lateral  $\sigma_y$  e vertical  $\sigma_z$  são baseados em dados experimentais, sendo dependentes do grau de estabilidade da atmosfera, da distância ( $x$ ) e do tipo de terreno. Existem duas formulações para o cálculo desses coeficientes. O primeiro conjunto denotado de coeficiente de Pasquill para área rural, é baseado em levantamentos experimentais realizados em 1950, numa planície no Nebraska (EUA). O segundo conjunto, denominado coeficientes de Briggs para área urbana, foi obtido em 1960 na área metropolitana de Saint Louis (EUA). Os coeficientes de dispersão foram parametrizados para seis classes de estabilidade (A a F), representadas nas Figuras 2.8 e 2.9.

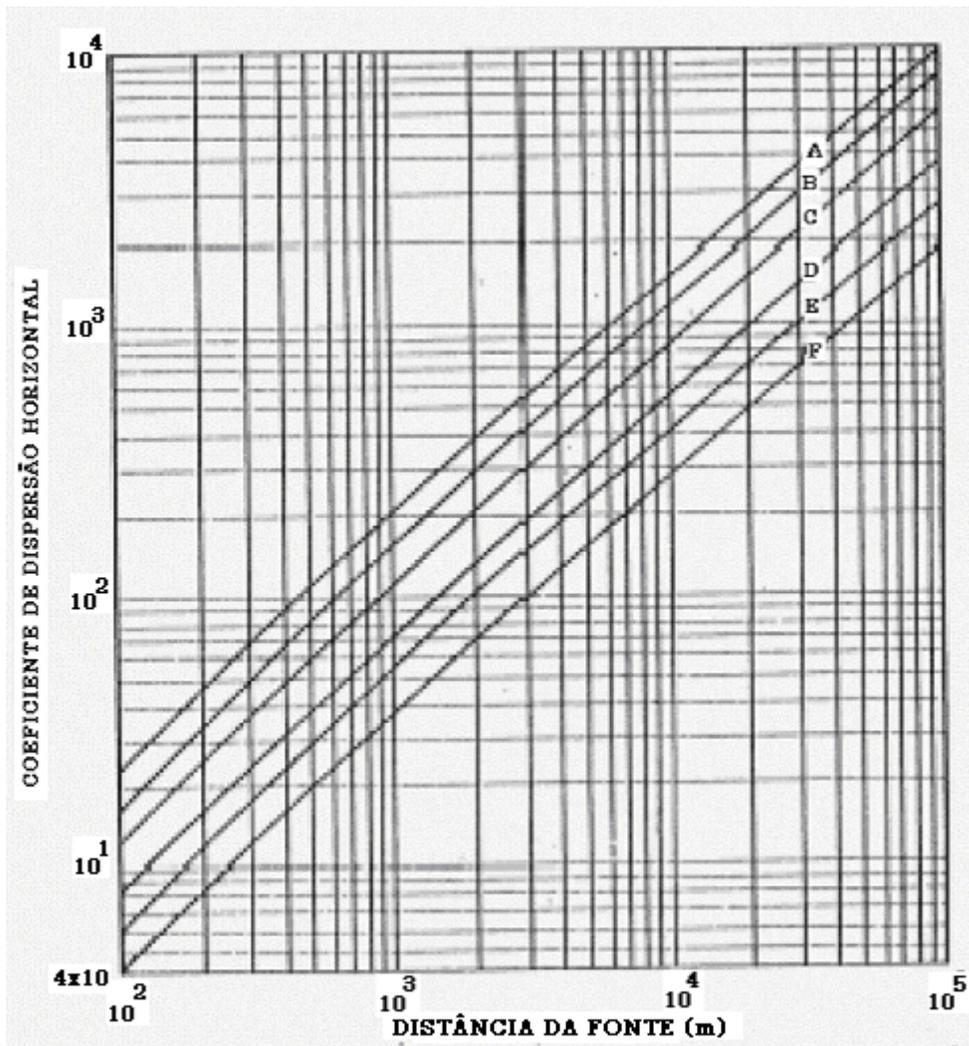


Figura 2.8: Desvio padrão da distribuição horizontal de concentração em função da distância à fonte (Adaptado de PASQUILL, 1961).

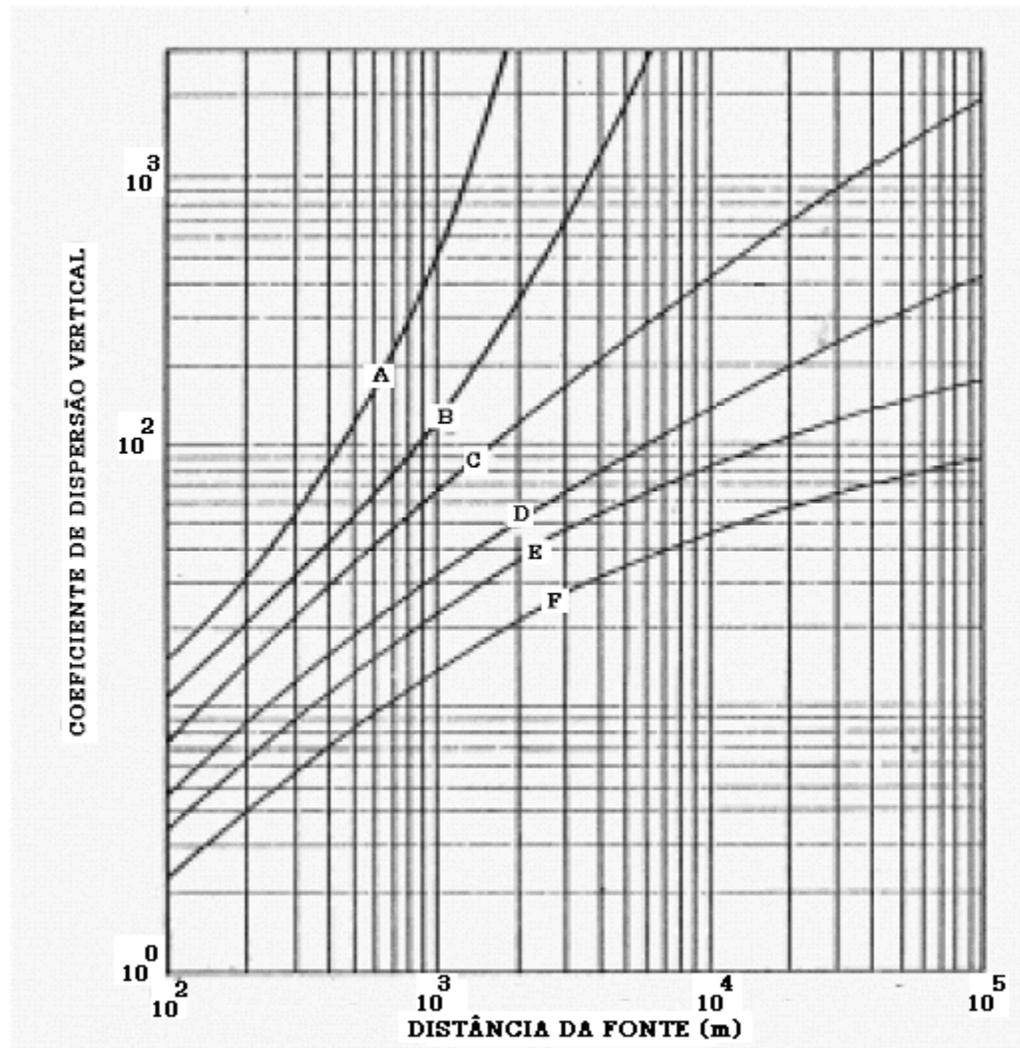


Figura 2.9: Desvio padrão da distribuição vertical de concentração em função da distância à fonte (Adaptado de PASQUILL, 1961).

Os dois coeficientes de dispersão são representados nos gráficos acima (Figuras 2.8 e 2.9), esses correspondem a uma amostragem de 10 minutos. O cálculo para períodos maiores é corrigido através de fatores de correção empíricos, aplicados sobre os valores de  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ .

Esses valores podem ser obtidos das curvas de Pasquill - Gifford, ou pelas equações de Pasquill (condições rurais) e Briggs (condições rurais e urbanas). Os

coeficientes de dispersão foram parametrizados para seis classes de estabilidade (A a F), descritas na Tabela 2.2 a seguir:

Tabela 2.2: Categoria de Estabilidade de Pasquill.

Velocidade do vento (m/s) a 10m de altura do solo	Insolação			Noite	
	Forte	Moderada	Fraca	Levemente coberto ou $\geq 4/8$ de nuvens baixas	$\leq 3/8$ nuvens
<2	A	A - B	B	-	-
2-3	A - B	B	C	E	F
3-5	B	B - C	C	D	E
5-6	C	C - D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

- A e B – são classes altamente instáveis, ocorrendo em condições de vento fraco e aquecimento solar de moderado para elevado (tarde ensolarada no verão);
- C – classe levemente instável, ocorrendo com velocidade de vento de moderada para alta e aquecimento leve (por de sol de verão);
- D – classe neutra ocorrendo com tempo encoberto, na qual o aquecimento solar tem pouca influência;
- E e F – classes estáveis, ocorrendo à noite com ventos leves e céu parcialmente encoberto, nas quais o resfriamento radioativo inibe a convecção natural das camadas da atmosfera.

A atmosfera instável é caracterizada por uma boa dispersão de poluentes onde a parcela de ar está mais quente que a atmosfera circundante, e assim continuará ascendente. Por outro lado, a atmosfera estável é caracterizada por um gradiente menor com pouca dispersão dos poluentes. Deve-se ressaltar que mesmo mantendo-se a emissão de poluentes constante a qualidade do ar pode piorar ou melhorar, dependendo das condições meteorológicas estarem favoráveis ou desfavoráveis à dispersão. Embora a utilização das curvas de estabilidade proposta por Pasquill seja questionável para as fontes elevadas, sugere-se o uso das mesmas quando os dados de fluxo de calor à superfície não forem

disponíveis, assim são usadas as equações para cálculo dos coeficientes de dispersão, que são as seguintes:

$$\sigma_y = \exp\left(I_y + J_y \ln x + K_y (\ln x)^2\right) \quad (2.16)$$

$$\sigma_z = \exp\left(I_z + J_z \ln x + K_z (\ln x)^2\right) \quad (2.17)$$

onde os valores de  $I$ ,  $J$  e  $K$  são retirados da Tabela 2.3 abaixo que representa o tipo de estabilidade:

Tabela 2.3: Coeficientes de Pasquill para o cálculo de  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ .

Coeficiente de Dispersão	Tipo de Estabilidade					
	A	B	C	D	E	F
$I_y$	-1.104	-1.634	-2.054	-2.555	-2.754	-3.143
$J_y$	0.9878	1.0350	1.0231	1.0423	1.0106	1.0148
$K_y$	-0.0076	-0.0096	-0.0076	-0.0087	-0.0064	-0.0070
$I_z$	4.679	-1.999	-2.341	-3.186	-3.783	-4.490
$J_z$	-1.7172	0.8752	0.9477	1.1737	1.3010	1.4024
$K_z$	0.2770	0.0136	-0.0020	-0.0316	-0.045	-0.054

### 2.6.2. Elevação da Pluma ( $\Delta h$ )

Definindo-se a altura da chaminé como  $h$ , a altura efetiva  $H$  (Figura 2.10) é obtida pela soma da altura da chaminé ( $h$ ) com a altura da elevação da pluma ( $\Delta h$ ). Após alcançar a altura máxima da chaminé, a elevação da pluma segue a trajetória na direção do vento, ocorrendo dessa forma ao longo do percurso a dispersão da pluma.

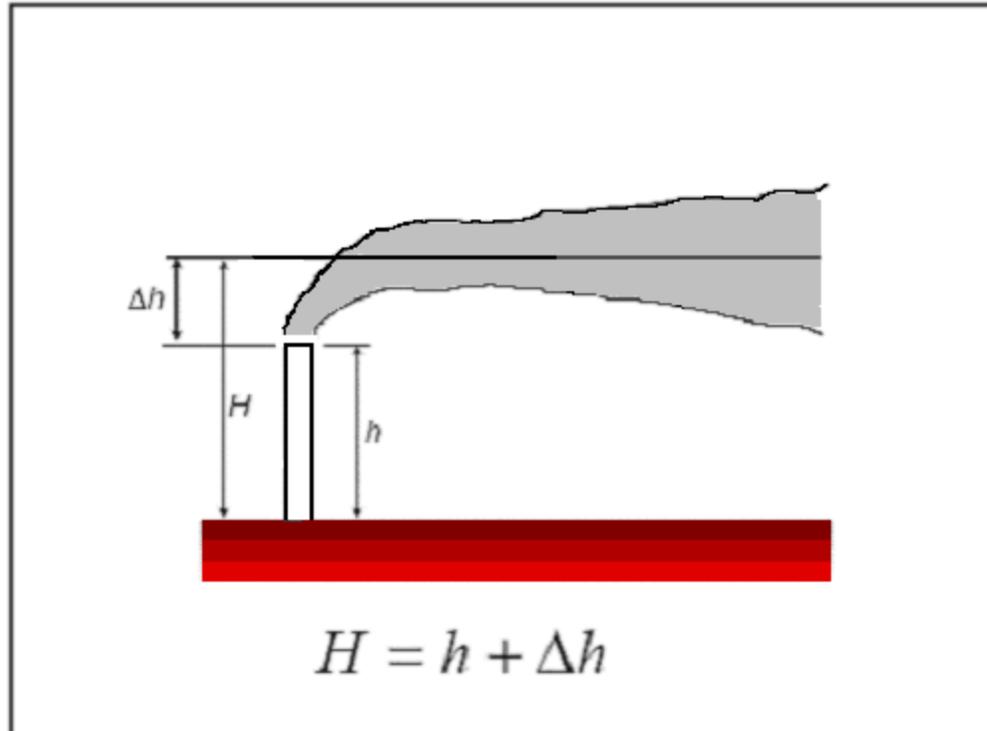


Figura 2.10: Altura efetiva de lançamento.

As condições meteorológicas representam o fator fundamental na dispersão dos poluentes, e definem dois componentes principais: a componente vertical comandada pela turbulência gerada pelo gradiente térmico entre as camadas da baixa atmosfera, e a componente horizontal em que o vento é o principal agente tanto no transporte como na mistura. Assim, para uma atmosfera instável:

$$\Delta H = 15 \left( \frac{F}{u} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (2.18)$$

onde  $u$ , é a velocidade do vento na altura da chaminé,  $F$  é o parâmetro de fluxo de flutuação. A atmosfera com estabilidade neutra e instável, são utilizadas as equações desenvolvidas por BRIGGS (1993), e essas são usadas nos modelos desenvolvidos pela EPA:

$$\Delta H = 1.6F^{\frac{1}{3}}u^{-1}\rho^{\frac{2}{3}} \quad \rho \leq 3.5x \quad (2.19)$$

$$\Delta H = 1.6F^{\frac{1}{3}}u^{-1}(3.5x^*)^{\frac{2}{3}} \quad \rho > 3.5x^* \quad (2.20)$$

$$x^* = 14F^{\frac{5}{8}} \quad F \leq 55 \quad (2.21)$$

$$x^* = 34F^{\frac{2}{5}} \quad F > 55 \quad (2.22)$$

$$F = \frac{g}{4}v_s d^2 \left( \frac{(T_s - T_a)}{T_s} \right) \quad (2.23)$$

onde  $\rho$  corresponde a distância da fonte ao receptor, e nesse caso  $3.5x^*$  corresponde ao comprimento da origem das coordenadas até o ponto no eixo  $x$ ,  $v_s$  é a velocidade média de saída dos gases da chaminé,  $d$  diâmetro,  $T_s$  temperatura média dos gases na saída da chaminé,  $T_a$ , temperatura ambiente.

Para estimar  $\Delta H$  em uma atmosfera estável:

$$\Delta H = 2.6 \left[ \frac{F T_a}{ug \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.24)$$

onde  $\frac{\partial \theta}{\partial z}$  corresponde ao gradiente de temperatura potencial, na Tabela 2.4 mostra a relação entre esse gradiente e o tipo de estabilidade atmosférica:

Tabela 2.4: Relação entre os tipos de estabilidade de acordo com Pasquill – Gifford, e a estratificação térmica.

Tipo de Estabilidade	Gradiente de Temperatura	
	Ambiente $\frac{\partial T}{\partial z}$	Potencial $\frac{\partial \theta}{\partial z}$
<b>A</b>	< -1.9	< -0.9
<b>B</b>	-1.9 ÷ -1.7	-0.9 ÷ -0.7
<b>C</b>	-1.7 ÷ -1.5	-0.7 ÷ -0.5
<b>D</b>	-1.5 ÷ -0.5	-0.5 ÷ 0.5
<b>E</b>	0.5 ÷ 1.5	0.5 ÷ 2.5
<b>F</b>	> 1.5	> 2.5

## 2.7. Modelo Gaussiano do Tipo *Puff*

Os modelos denominados de *puffs* podem ser aplicados nos processos de soma e combinação das liberações instantâneas, sendo útil no processo de representar as liberações contínua ou intermitente, ou seja, um conjunto de *puffs* é liberado. A Figura 2.11, mostra graficamente a representação de emissões contínuas com valor de vazão constante (CHIARAMONTE & LEAL, 2003).

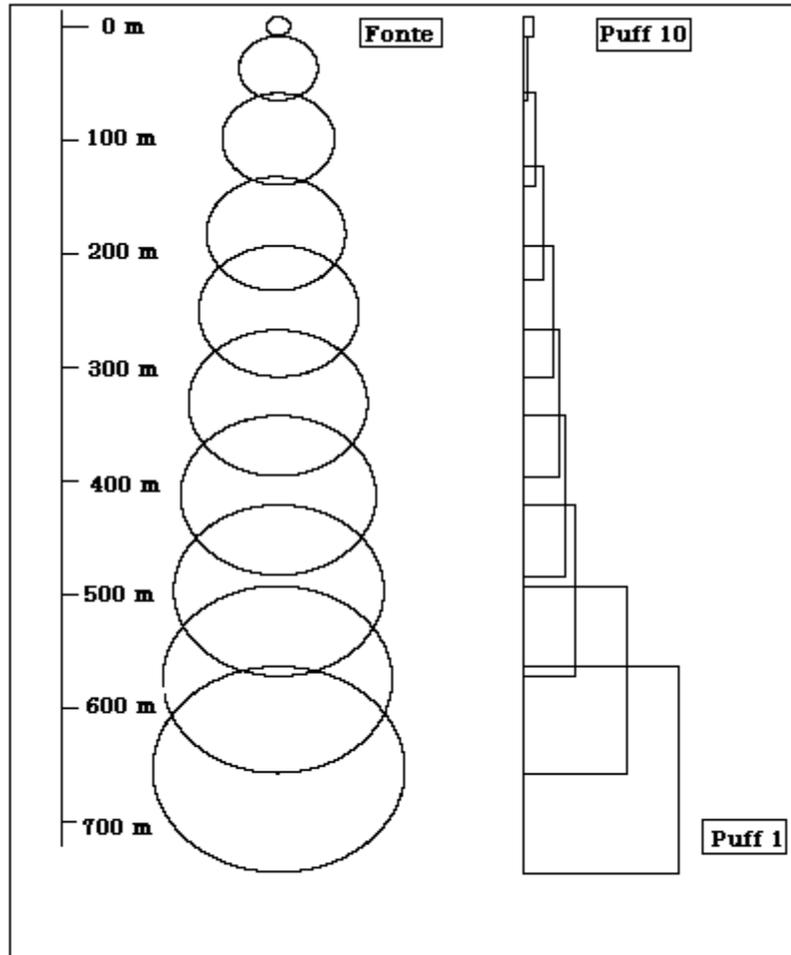


Figura 2.11: Diagrama dos *puffs* formando uma pluma (Adaptado de CHIARAMONTE & LEAL, 2003).

O modelo *puffs* é constituído de várias etapas: o modelo matemático que descreve a dispersão e o transporte de uma liberação instantânea na atmosfera ao nível do solo, o que estima as propriedades físicas e termodinâmicas da liberação (por exemplo, densidade e entalpia), o de liberação de *puffs* na fonte de emissão contínua, o sistema que realiza o processo de soma e combinação de *puffs* e o modelo de dispersão e transporte de gás leve. As equações de balanço de propriedades para o *puff*:

- massa

$$\frac{dm_p}{dt} = \frac{dm_{ar}}{dt} \quad (2.25)$$

como:

$$m_{p,0} = m_{gp,0} \quad (2.26)$$

$$m_p = m_{gp,0} + m_{ar} \quad (2.27)$$

onde  $m_p$  é a massa total do *puff* no tempo,  $t$  é o tempo total transcorrido desde a liberação do *puff* na fonte,  $m_{ar}$  é a massa de ar incorporada ao *puff* no tempo  $t$ ,  $m_{p,0}$  massa inicial do *puff*,  $m_{gp,0}$  é a massa inicial de gás liberada na fonte.

Para estimar a relação empírica de entrada de ar:

$$\frac{dm_{ar}}{dt} = w_e(t) \cdot \pi \cdot R(t)^2 \rho_{ar} + U_e(t) 2\pi R(t) h(t) \rho_{ar} \quad (2.28)$$

onde  $w_e$  é a velocidade de entrada de ar pela superfície de topo do *puff*,  $R$  é o raio do *puff* no tempo  $t$ ,  $\rho_{ar}$  densidade do ar,  $U_e$  é a velocidade de entrada de ar pela superfície lateral do *puff*,  $h$  altura do *puff*.

Quantidade de movimento na direção do vento:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{[\bar{U}_{ar} - U(t)] \left( \frac{dm_{ar}}{dt} \right)}{(m_{gp} + m_{ar})} + \frac{[U_{ar} - U(t)] \left( \frac{dm_{ar}}{dt} \right)}{(m_{gp} + m_{ar})} + \frac{\frac{C_D}{2} R \cdot h \rho_{ar} [\bar{U}_{ar} - U(t)]^2}{(m_{gp} + m_{ar})} + \frac{\frac{C_D}{2} \pi \rho_p U(t)^2 R^2}{(m_{gp} + m_{ar})} \quad (2.29)$$

onde  $\bar{U}_{ar}$  velocidade média do vento calculada do solo até a altura do *puff*,  $U_{ar}$  velocidade do vento na altura do topo do *puff*,  $\rho_p$  densidade do *puff*,  $C_D$  é o coeficiente de arrasto do vento sobre o *puff*,

Energia:

$$\left[ m_{ar} \bar{C}_{P,ar} + m_{gp} \bar{C}_{P,gp} \right] \frac{dT}{dt} = \frac{dm_{ar}}{dt} \int_T^{T_{AR}} \bar{C}_{P,ar} dT + \frac{C_f}{2} U \rho_p \bar{C}_{P,p} (\pi R^2) (T_{ar} - T) \quad (2.30)$$

onde  $\bar{C}_{P,gp}$  é o calor específico à pressão constante para a mistura de gás pesado da fonte,  $\bar{C}_{P,ar}$  calor específico à pressão constante para o ar,  $\bar{C}_{P,p}$  é o calor específico à pressão constante para o *puff* de gás pesado,  $T_{ar}$  temperatura do ar.

onde

$$\bar{C}_{P,ar} = C1_{ar} + C2_{ar} T_{ar} + C3_{ar} T_{ar}^2 + C4_{ar} T_{ar}^3 \quad (2.31)$$

$$\bar{C}_{P,gp} = C1_{gp} + C2_{gp} T + C3_{gp} T^2 + C4_{gp} T^3 \quad (2.32)$$

$$\bar{C}_{P,p} = \frac{(m_{gp} \bar{C}_{P,gp} + m_{ar} \bar{C}_{P,ar})}{m_{gp} + m_{ar}} \quad (2.33)$$

A dispersão lateral do *puff*:

$$U_G = \frac{dR}{dt} = 1.3 \sqrt{gh \frac{(\rho_p - \rho_{ar})}{\rho_p}} \quad (2.34)$$

A densidade do *puff* de gás pesado resulta:

$$\rho = \frac{p_{amb} \overline{M}}{Z R_{gas} T} \quad (2.35)$$

onde  $R_{gas}$  constante dos gases,  $\overline{M}$  peso molecular do gás,  $Z$  fator de compressibilidade do *puff* do gás.

O método para determinar o tempo de formação de um *puff* é estimado no tempo de liberação das variáveis da vazão e do diâmetro da fonte, velocidade do vento e características de estabilidade atmosférica. Esse tempo estabelece a quantidade de massa de gás pesado contida no interior de cada *puff* cilíndrico no instante de sua liberação na fonte.

O modelo de gás pesado representa a pluma contínua pela soma de um conjunto de *puffs* (SCIRE *et al.*, 2000 e ZANNETTI, 1981), esse sistema também faz uma combinação das propriedades dos *puffs*. Essas etapas são:

- a) O modelo de liberação de *puffs* na fonte;
- b) O sistema que realiza a soma e combinação de *puffs* para representar a pluma;
- c) O procedimento que faz a passagem para o modelo de pluma gaussiana, quando o *puff* for um gás leve.

## 2.8. Modelos de Dispersão de Contaminantes na Atmosfera

A EPA é a grande agência mundial de pesquisa da qualidade do ar. Já desenvolveu cerca de 10 modelos para aplicações das normas ambientais e mais 20 modelos adicionais desenvolvidos por outros grupos de pesquisa. Os modelos de análise são amplamente difundidos e aplicados por agências de controle ambiental fora dos Estados Unidos. A seguir serão apresentados alguns modelos com as suas características específicas, e que podem ser utilizados para estudos de material particulados ou mesmo de radionuclídeos.

YAMADA (1992) desenvolveu o seguinte modelo atmosférico tridimensional HOTMAC - *Higher-order Turbulent Model for Atmospheric Circulation* e o modelo *puff* lagrangeano denominado de RAPTAD - *Random Puff Transport and Diffusion*. Foram realizadas observações de vento na superfície, sondagens de ar superior e dados reais das concentrações de partículas obtidas na superfície, usando a técnica de fluorescência.

Segundo o pesquisador, esses modelos podem ser utilizados como ferramenta muito útil no caso de situações de emergência como por exemplo, emissões acidentais perigosas como de radionuclídeos para atmosfera.

HANSEN *et al.*, (1993) procurando elaborar um sistema de modelagem de qualidade do ar desenvolveu o CAMRAQ – *Consortium for Advanced Modeling of Region Air Quality*. O objetivo foi de criar uma série de ferramentas computacionais confiáveis, que permitem prever a variação dos índices de qualidade do ar em diferentes escalas de tempo e espaço, variando para qualquer substância de interesse.

O AUSTAL *View* é uma interface gráfica, e modela a dispersão dos poluentes atmosféricos de forma lagrangeana, e foi desenvolvido pela agência ambiental do governo alemão. O modelo leva em consideração a influência da topografia e do campo de vento. A entrada dos dados do modelo necessita das fontes e receptores, e gera também um sistema de séries temporais das emissões. Permite controlar eficientemente os parâmetros dependentes do tempo e, verifica a adequação das informações do projeto antes de realizar as simulações.

O HEGABOX, é um modelo *box*, e considera a liberação como sendo um volume cilíndrico de gás, e essa configuração se mantém ao longo de todo o campo. É utilizado no cálculo para previsão da dispersão das liberações instantâneas. Apresenta uma grande limitação, ou seja, descreve unicamente a dispersão do gás próxima da fonte. São fornecidos os valores de distância do centro de massa à fonte, concentração (constante em toda a nuvem), raio e altura da nuvem (PUTTOCK, 1987).

Os modelos ISC – *Industrial Source Complex* e o ISCT - *Industrial Source Complex Short Term* são de dispersão atmosférica e para o estudo da qualidade do ar. Esses modelos são de difusão gaussiana e foram desenvolvidos pela EPA ao longo dos anos (PUTTRÉ, 1994), sendo utilizados em complexos industriais e nucleares. Posteriormente, existem novas versões desses, atualmente o modelo ISC já está na versão ISC3 e permite resolver os seguintes problemas: deposição seca das partículas, fonte área, fonte linha, ascensão da pluma em função da distância dos ventos descendentes em topografia de área limitada. Existe o modelo *COMPLEX – 1*, que é utilizado quando a região de estudo apresentar uma topografia complexa, o *Urban Airshed* é usado para reações fotoquímicas. Além disso, o modelo ISCST permite associar cenários climáticos próximos da realidade

física, sendo usado tanto pela comunidade acadêmica como pelas agências nacionais e internacionais de controle ambiental. Através dos seus resultados gerados das concentrações de poluentes, permitem também a obtenção de resultados nas escalas espacial e temporal, os quais são comparados posteriormente aos padrões vigentes no país, que no caso deve obedecer a Resolução CONAMA N° 003/90. O modelo aceita dados de entrada de mais de 500 fontes simultâneas do tipo pontual e área e gera cerca de mais de 1.500 receptores na superfície. Esses são distribuídos dentro de uma malha de resolução variável (PUTTRÉ, 1994). Finalizando, o modelo ISCST utilizado é aceito pelos órgãos ambientais, apresenta resultados confiáveis e representativos. Os documentos de licenciamento EIA/RIMA, por exemplo, utilizam as saídas do modelo ISCST para avaliar e discutir o impacto das usinas termoeletricas. O modelo ISCST é suficientemente robusto, permitindo especificação de vários tipos de fontes de emissão com multiplicidade de unidades e pontos de recepção (NEGRI, 2002).

O modelo de dispersão SCREEN-3 - EPA, é uma versão do ISC3 que utiliza o modelo gaussiano para a pluma de uma única fonte. Ele fornece a concentração máxima no nível do solo para fonte pontual, por área, *flare* ou por volume. Esse modelo foi desenvolvido para se obter a concentração no nível do solo em regiões, onde não existam dados meteorológicos disponíveis. Portanto, é de grande utilidade para a estimativa da concentração em regiões carentes de informações meteorológicas. Os resultados das concentrações são gerados e vinculados às classes de estabilidade atmosféricas, e são obtidos na direção radial da fonte, visto que não há especificação da direção do vento. Contudo, no caso de disponibilidade de dados meteorológicos locais, o modelo SCREEN possibilita diretamente a entrada dessas informações. Uma das suas principais limitações é que esse modelo considera apenas uma fonte pontual, e não existe uma rotina que possibilite o estudo de fonte do tipo área (USEPA, 1995).

BLP - *Buoyant Line and Point Source*, é um modelo gaussiano de dispersão de pluma desenvolvido pela EPA, foi projetado para indústrias de alumínio que tem o objetivo de reduzir a dispersão atmosférica, podendo também ser usado em outros tipos de fontes industriais, onde os efeitos da ascensão e de queda da pluma das fontes estacionárias forem importantes para minimizar os impactos. Esse modelo requer os seguintes parâmetros de entrada para os dados meteorológicos (classes de estabilidade, velocidade e direção do

vento, altura da mistura e temperatura ambiente) e dados da fonte emissora (altura da chaminé, taxa da emissão do poluente, diâmetro da chaminé, velocidade de saída do gás e temperatura), e pode atender a 50 fontes fixas (SCHULMAN & SCIRE, 1980).

CALINE4 - *California Line Source Dispersion Model*, é um modelo gaussiano que serve para estudar as concentrações dos ventos descendentes da pluma de poluição de ar em relação a posição do receptor. Esse modelo foi desenvolvido pela EPA, e serve para estimar as concentrações emitidas por fontes móveis ao longo de uma rodovia. É calculada a concentração média dos poluentes tradicionalmente emitidos pela frota de veículos de acordo com o tipo e o tamanho da frota circulante. Permite realizar estudos das concentrações atmosféricas de monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), material particulado (MP) em localidades próximas às rodovias. Outras opções estão disponíveis para a modelagem de localidades próximas a cruzamentos, estacionamentos, rodovias elevadas ou abaixo do nível do solo. O modelo é alimentado pelas informações meteorológicas geradas pelo CALMET - *California Micrometeorological Model*, é um modelo desenvolvido para gerar o campo micrometeorológico (USEPA, 1995).

CALPUFF é um modelo de dispersão de vários níveis, simula as variações do espaço e tempo das concentrações, do transporte meteorológico, das transformações e na remoção da poluição. O modelo CALPUFF pode ser aplicado em diferentes escalas que variam de metros a vários quilômetros. Pode ser usado nos estudos de remoção de poluentes na mesoescala, incluindo também a dispersão úmida, deposição seca e a transformação química, usa o campo de vento tridimensionalmente, podendo ser ajustado para fonte linha, pontual, volume ou área (SCIRE *et al.*, 2000).

O modelo OCD - *Offshore and Coastal Dispersion Model - Version 5*, desenvolvido pela EPA e do tipo gaussiano. Serve para determinar os impactos das emissões pontuais oriundas de plataforma *offshore*. São usadas as equações do transporte e da dispersão da pluma em relação ao oceano. Nesse modelo os dados meteorológicos são atualizados de hora em hora.

WANG & JIANG (1998) desenvolveu um sistema de modelos em conjunto, o de camada limite denominado de NHECM - *Non-hydrostatic E-e Closure Model* e o puff lagrangeano chamado de SLPTDM - *Seven-level Puff Transport and Diffusion Model*, que foi desenvolvido e utilizado para estudar o transporte e dispersão de SO<sub>2</sub>. Nessa pesquisa

foi simulado o poluente liberado de uma fonte elevada, em condições típicas de formação de brisa. Os resultados obtidos pelo sistema indicaram que as variações temporais, a não uniformidade das circulações e da turbulência afeta as distribuições das concentrações, principalmente durante as transições entre as brisas marítima e terrestre.

O RIMPUFF - *RIsø Mesoscale PUFF*, foi desenvolvido por NIELSEN *et al.*, (1998) é um código de processamento rápido e operacional. O modelo simula em tempo real a dispersão da pluma usando dados meteorológicos, e pode ser utilizado em topografias irregulares. Uma potencialidade do RIMPUFF, é obtida através da ligação de dados prognósticos da atmosférica regional dos centros de previsão dos diversos institutos meteorológicos europeus. Esse modelo está implementado no sistema europeu de monitoramento de partículas radioativas, em especial na atmosfera denotado de RODOS – *Real-time On-line DecisiOn Support*. A seguir, a Tabela 2.5 apresenta o resumo de alguns modelos disponíveis.

Tabela 2.5: Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica (Adaptado de SALAS, 2004).

Nome	Emissions and Dispersion Modeling System - EDMS 3.1	Industrial Source Complex Model – ISC3	Offshore and Coastal Dispersion Model – OCD	IFDM
<b>Origem</b>	US EPA	US EPA	US EPA	VITO Mol, Bélgica
<b>Aplicação</b>	Contaminantes associados a aeroportos civis e militares	Fontes Pontuais área, linha, volume, associadas a complexos industriais	Fontes Pontuais, linha, área e costeiras	Fontes pontuais
<b>Tipo</b>	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana
<b>Contaminantes</b>	Contaminantes primários reativos	Contaminantes primários e emissões contínuas de contaminantes tóxico, resíduos perigosos. Considera a deposição seca	Contaminantes primários.	Contaminantes primários
<b>Escala Geográfica</b>	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km
<b>Escala Temporal</b>	1 hora a 1 ano	1 hora a 1 ano	1 hora	1 hora a 1 ano
<b>Transformações Químicas</b>	Não são consideradas	Considera o decaimento linear	Considera o decaimento linear	Não disponível
<b>Classificação de Estabilidade</b>	Pasquill-Gifford	Fórmulas de Turner e Pasquill-Gifford	Pasquill-Gifford	Bulynk - Malet
<b>Dados Meteorológicos</b>	Horária	Horária	Horária	Horária
<b>Elevação da Pluma</b>	Fórmulas de Briggs	Fórmulas de Briggs	Fórmulas de Briggs	Fórmulas de Briggs
<b>Topografia</b>	Linear	Linear e Complexo	Complexo	Linear
<b>Tipo de Solo</b>	Urbana e rural	Urbana e rural	Não disponível	Rural
<b>Referência</b>	BENSON (1979)	US EPA (1995)	DiCRISTOFARO & HANNA (1989)	COSEMANS <i>et al.</i> , (1992)

Tabela 2.5: Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica - continuação (Adaptado de SALAS, 2004).

Nome	Bouyant Line Point Source Model - BLP	CALINE 3	CALPUFF	Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Instable Situations - CTDMPUS
<b>Origem</b>	US EPA	US EPA	US EPA	US EPA
<b>Aplicação</b>	Fontes pontuais, linhas, indústrias de alumínio e outras fontes industriais	Fontes linhas	Fontes pontuais, área linha e volume	Fontes pontuais
<b>Tipo</b>	Pluma gaussina	Pluma gaussina	Pluma gaussina	Pluma gaussina
<b>Contaminantes</b>	Contaminantes primários. No uso depósito e deposição de contaminantes	Contaminantes primários	Contaminantes primários, substâncias perigosas, amoníaco	Contaminantes primários não reativos
<b>Escala Geográfica</b>	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km
<b>Escala Temporal</b>	1 hora, 1 ano	1 a 24 horas	1 hora a um ano	1 hora a um ano
<b>Transformações Químicas</b>	Considera o decaimento linear	Não considera	Considera Parametrizações para o SO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , NO <sub>3</sub> e aerossóis orgânicos. Considera a deposição seca e úmida	Não considera
<b>Classificação de Estabilidade</b>	Fórmulas de Turner (1969)	Fórmulas de Turner (1969)	Paquill-Gifford (rural) e McElroy – Pooler (urbana)	Parametrização da camada limite
<b>Dados Meteorológicos</b>	Horário	Horária	Completa e tridimensional utilizando o CALMET	Horária
<b>Elevação da Pluma</b>	Fórmulas de SHULMAN & SCIRE (1980)	Não considerada	Fórmulas de SHULMAN & SCIRE (1980); BRIGGS (1974, 1975)	Fórmulas de BRIGGS (1984)
<b>Topografia</b>	Linear	Linear	Linear e Complexa	Complexa
<b>Tipo de Solo</b>	Rural	Urbana e Rural	Urbana e Rural	Urbana e Rural
<b>Referência</b>	SCHULMAN & SCIRE (1980)	BENSON (1979)	SCIRE <i>et al.</i> , (2000)	PERRY <i>et al.</i> , (1989, 1990)

Tabela 2.5: Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica - continuação (Adaptado de SALAS, 2004).

Nome	PLUIMPLUS	AUSTAL 86	OML	UK-ADMS
<b>Origem</b>	Staatsvitgeverij, 's Gravenhage, Nederland	TA-LUFT, Germany	National Environmental Research Institute, Denmark	CERC & UK Meteorological Office, United Kingdom
<b>Aplicação</b>	Emissão de Chaminés	Emissão de Chaminés	Emissão de Chaminés	Emissão de Chaminés
<b>Tipo</b>	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana
<b>Contaminantes</b>	Contaminantes primários não reativos	Contaminantes primários não reativos	Contaminantes primários não reativos	Contaminantes primários não reativos
<b>Escala Geográfica</b>	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km
<b>Escala Temporal</b>	1 hora a 1 ano	1 ano	1 hora a 1 ano	1 hora a 1 ano
<b>Transformações Químicas</b>	Não considerada	Não considerada	Não considerada	Não considerada
<b>Classificação de Estabilidade</b>	KNMI, superfície rugosa	TA-LUFT classe 4	Parametrização da camada limite	Parametrização da camada limite
<b>Dados Meteorológicos</b>	Distribuição de frequência	Distribuição de frequência	Horária	Horária
<b>Elevação da Pluma</b>	Fórmula de Briggs	Fórmula de Briggs	Fórmula de Briggs	Fórmula de Briggs
<b>Topografia</b>	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível
<b>Tipo de Solo</b>	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível
<b>Referência</b>	KLEINE (1976)	TA-LUFT (1986)	LØFSTRØM & OLESEN (1994)	CARRUTHERS <i>et al.</i> , (1992)

Tabela 2.5: Resumo de alguns modelos de dispersão atmosférica - continuação (Adaptado de SALAS, 2004).

Nome	HPDM	INPUFF	SCALTURB	CAR
<b>Origem</b>	Sigma Research Corporation, USA	US EPA	Norwegian Institute for Air Research (NILU), Norway	RIVM, TNO (The Netherlands)
<b>Aplicação</b>	Emissão de chaminés	Emissão de chaminés	Emissão de chaminés	Emissão de carros
<b>Tipo</b>	Pluma gaussiana	Pluma gaussiana do tipo <i>puff</i>	Pluma gaussiana	Relações semi-empíricas baseadas em experiência de túnel de vento
<b>Contaminantes</b>	Contaminantes primários não reativos	Contaminantes primários não reativos	Contaminantes primários não reativos	Contaminantes primários
<b>Escala Geográfica</b>	< 50 Km	< 50 Km	< 50 Km	Dezenas de metros
<b>Escala Temporal</b>	1 hora a 1 ano	1 hora a 1 ano	1 hora a 1 ano	1 ano
<b>Transformações Químicas</b>	Não considerados	Não considerados	Não considerados	NO <sub>2</sub>
<b>Classificação de Estabilidade</b>	Parametrização da camada limite	Pasquill-Gifford	Parametrização da camada limite	-----
<b>Dados Meteorológicos</b>	Horária	Horária	Horária	Horária
<b>Elevação da Pluma</b>	Fórmula de Briggs	Fórmula de Briggs	Fórmula de Briggs	-----
<b>Topografia</b>	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível
<b>Tipo de Solo</b>	Não disponível	Não disponível	Não disponível	Não disponível
<b>Referência</b>	HANNA & PAINE (1989)	PETERSEN & LAVDAS (1986)	GRYNING <i>et al.</i> , (1987)	EERENS <i>et al.</i> , (1993)

## 2.9. Limitações dos Modelos

Os modelos existentes de dispersão de poluentes atmosféricos apresentam sempre algumas limitações, no sentido de não representar por completo os fenômenos físicos que estão envolvidos. Como exemplo, as limitações de uma fonte pontual em áreas urbana, a sua deficiência está no fato de não haver um tratamento adequado da estrutura da turbulência acima das cidades. A estrutura é modificada pelos maiores elementos urbanos como a rugosidade e aspereza das áreas rurais relativas aos efeitos das propriedades térmicas das diferentes superfícies e com a aproximação de lagos, rios e o mar. Essas modificações decorrem da camada limite noturna rasa, em que as partículas são bem misturadas em função da forte turbulência. Como consequência, as plumas das altas chaminés dispersam-se mais rapidamente e pode-se produzir concentrações elevadas ao nível do solo.

Conforme foi apresentado, os modelos numéricos mais avançados de dispersão de poluentes na atmosfera procuram enfatizar e representar com mais atenção os processos químicos, e os outros procuram detalhar os fenômenos atmosféricos envolvidos no transporte de mesoescala, ou concentram esforços na determinação dos parâmetros de difusão turbulenta associados aos efeitos topográficos na pequena escala, e nesse caso alguns modelos enfatizam os fenômenos meteorológicos. O que fica claro, é que existe uma deficiência no estudo da dispersão atmosférica, ou seja, não existe um modelo matemático relativamente complexo que possa representar e descrever os problemas que acontecem nas diferentes escalas, e que também, esteja relacionado ao escoamento turbulento na camada limite, por outro lado, que sejam considerados os fenômenos físicos relevantes que ocorrem na baixa atmosfera e a sua interação da pluma com o vento, aliado a um modelo de dispersão que permita prever os campos das concentrações de poluentes primários e secundários emitidos por fontes industriais.

É importante lembrar, que os modelos de dispersão tentam estimar as concentrações para locais específicos, e que em determinados casos representam a média do conjunto de repetidas medições do mesmo evento. E nessa situação, podem ocorrer variações de 50% e apresentar erros na ordem de 5 a 10% em relação à direção do vento,

provocando assim, erros no resultado da concentração final de 20 a 70%. Estimativas de longo prazo são mais confiáveis que de curto prazo (NEGRI, 2002).

Como a escala de tempo do fenômeno da dispersão de plumas na microescala atmosférica é da ordem de uma hora, fica evidente que nessa escala de tempo os parâmetros atmosféricos relevantes como a condição de estabilidade, estratificação e altura da camada limite são consideradas como constantes nos modelos. Desta forma, fica limitada uma boa representação do sistema como um todo. Por isso, os modelos meteorológicos acoplados procuram suprir essas deficiências.

## **2.10. Modelos Meteorológicos Acoplados**

No Brasil não é definido um procedimento padrão de avaliação da performance dos modelos. É evidente, então, a necessidade de iniciarem ações que contenham a formulação de um procedimento aprovado pela comunidade científica e possível de ser realizado na prática, e que permita expressar um julgamento sobre o desempenho dos modelos. Na realidade, uma correta utilização dos modelos de transporte e difusão na atmosfera não podem prescindir de um estudo sobre suas capacidades de representarem corretamente situações reais. Quando possível, deve-se verificar a confiabilidade do modelo utilizado com os dados, cenários topográficos e meteorológicos próprios da área de seu emprego. Por exemplo, modelos considerados seguros nos EUA e aplicados em uma configuração particular no Brasil poderão ter um comportamento não correspondente à expectativa (MOREIRA & TIRABASSI, 2004).

Assim, como foi exposto acima, os modelos meteorológicos acoplados podem suprir esse problema, ao resolverem numericamente as equações de conservação, procuram representar a atmosfera de maneira mais próxima da realidade. Esses modelos fornecem os campos de velocidades, temperaturas e outras variáveis na escala de interesse. O grande avanço na modelagem numérica da atmosfera obtidos nas últimas décadas, tornou-se possível, que esses modelos possam prever com um grande grau de precisão as circulações atmosféricas relevantes para a dispersão de poluentes em um determinado local. Isso, é obtido através das integrações das equações governantes, cuja solução é por métodos numéricos, tarefa que hoje é conhecida como previsão numérica do tempo. Com os avanços computacionais, das técnicas de solução e melhorias na representação dos processos físicos,

é possível hoje em dia representar com um grande grau de precisão os fenômenos atmosféricos das mais diversas escalas de tempo e espaço (JACOBSON, 2000).

Os modelos: RAMS - *Regional Atmospheric Modeling System* (PIELKE *et al.*, 1992) que será apresentado posteriormente, MM5 - *NCAR - Penn State Mesoscale Model* (GRELL *et al.*, 1994), MC2 - *Mesoscale Compressible Community* (BENOIT *et al.*, 1997) e ARPS - *Advanced Regional Prediction System* (XUE *et al.*, 2000) estão entre os mais conhecidos e utilizados hoje em dia de modo operacional e nos centros de pesquisas, e os seus resultados gerados são utilizados nos acoplamentos dos modelos de dispersão.

Por isso, problemas de poluição que envolve a mesoescala, os modelos de dispersão atmosférica devem incorporar os aspectos de previsão meteorológica, já que as escalas de tempo envolvidas são da ordem de dias (JACOBSON, 2000).

Ao modelar os transportes de poluentes devem ser considerados as condições atmosféricas e sua variação no tempo, e com isso, adicionou-se uma vantagem aos modelos de dispersão. Dessa forma pode-se obter uma melhor representação da dispersão de poluentes. Uma enorme variedade de pesquisas que se utilizam desses acoplamentos, os resultados disso são denotados sistemas de modelos de dispersão ou de qualidade do ar, ou sejam, são modelos atmosféricos acoplados a modelos de dispersão, que podem ser utilizados para um monitoramento constante da qualidade do ar com um maior grau de precisão. Os modelos que já utilizam dessa metodologia são CALGRID - *California Photochemical Grid Model* (YAMARTINO *et al.*, 1992) e o CALPUFF - *California Puff Model* (SCIRE *et al.*, 2000).

Essa tese apresentará uma metodologia que permite minimizar as dificuldades encontradas nos modelos de dispersão. Serão utilizados dois modelos acoplados: meteorológico de mesoescala e de trajetórias cinemáticas. Assim, independente do tipo de transporte de concentração dos poluentes ou de radionuclídeos emitidos por uma fonte pontual em um terreno de topografia complexa, o modelo meteorológico pode representar os eventos mais próximos da realidade. Embora, seja de mesoescala, existe a possibilidade de ser ajustado para escalas reduzidas, além de gerar um melhor refinamento em sua grade, a representação do comportamento dos poluentes na micro escala fica mais detalhado. Logo, caso haja um vazamento de partículas radioativas para a atmosfera, essa proposta pode trazer benefícios independente das partículas ultrapassarem a micro escala, pois o

modelo permite trabalhar em diferentes grades ao mesmo tempo, e nesse caso são denotadas de grades aninhadas, ou seja, pode-se ter em tempo real a caracterização da trajetória das partículas nas diferentes escalas. Ressalta-se, que nessa dissertação não será considerado o tempo de meia vida dos radionuclídeos, além dos modelos acoplados, o uso dos dados das reanálises do *National Centers for Environmental Prediction* e o *National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) permitem em tempo real representar a camada limite da atmosfera e os campos dos ventos, como já foi frisado independente das escalas. Finalizando, serão apresentados alguns estudos relacionados com as trajetórias, que representam uma parte dessa metodologia.

### **2.11. Pesquisas Relacionadas com as Trajetórias**

Após o acidente de Chernobyl, alguns centros de pesquisas, localizados no hemisfério norte procuraram realizar estudos das trajetórias. O *Centre for Regional Science* - CERUM (Suécia), *Radiation and Nuclear Safety Authority* – STUK (Finlândia), *Danish Meteorological Institute* - DMI (Dinamarca), *Center for Atmospheric Chemistry* (Rhode Island), e o *Geophysical Institute* (Alaska) viabilizaram metodologias capazes de realizar diagnósticos e prognósticos do comportamento das trajetórias, associados aos deslocamentos das massas atmosféricas. A seguir, serão apresentados alguns trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores envolvidos.

BAKLANOV *et al.*, (1994 e 1996) realizavam simulações das trajetórias isentrópicas em diferentes cenários atmosféricos no complexo de *Kola Nuclear Power Plant* - Kola NPP, antiga União Soviética. Nessa pesquisa, fica evidenciada a importância da meteorologia agindo diretamente no transporte das partículas radioativas. Sendo assim, velocidade e o sentido dos deslocamentos das trajetórias estariam associados com a atmosfera, podendo alcançar distantes regiões, conforme as condições meteorológicas.

BELLASIO *et al.*, (1999) após o acidente de Chernobyl em 1986, que causou a liberação para a atmosfera de inúmeras substâncias radioativas, resultando na contaminação da maioria dos territórios europeus. Nesse evento ficou evidenciado que deve haver um conjunto de procedimentos de medidas de decisão, por isso, é importante o uso de modelos da dispersão de longo alcance. O processo de confiabilidade dos modelos é através de testes

de sensibilidade, onde são avaliados e verificados e comparados com dados gerados durante experimentos ou liberações acidentais, resultando em medidas para um planejamento. Dentro dessa ótica, esses pesquisadores desenvolveram um sistema baseado na Internet o RTMOD - *Real Time Model Evaluation* com o objetivo de usar em tempo real, e possui uma base gráfica e numérica. O sistema RTMOD também pode ser usado como uma ferramenta útil em validar modelos matemáticos de dispersão.

FREITAS (1999), modelou o transporte de queimadas na região Amazônica e Centro – Oeste do Brasil. Nessa pesquisa usou o modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), e usou os métodos lagrangeano e euleriano. No primeiro o transporte é estudado por meio de cálculo de trajetórias cinemáticas tridimensional de massas de ar, utilizando o campo de simulado, na escala resolvida. No método euleriano, é resolvida a equação da conservação de massa dos principais elementos emitidos.

SALTBONES *et al.*, (2000), realizaram testes analisando as trajetórias e a deposição dos radionuclídeos oriundos do complexo de Kola. É demonstrada nessa pesquisa, a importância das trajetórias para descrever o transporte dos radionuclídeos associados aos diferentes cenários atmosféricos, pois após o acidente de Chernobyl em 1986, as autoridades norueguesas consideraram como uma enorme ameaça ao meio ambiente os efeitos das liberações acidentais ocorridas das instalações nucleares para os países circunvizinhos. Uma dessas instalações nucleares é o complexo nuclear de Kola NPP. Como o nível de segurança desse complexo não atende as normas de segurança internacionais, a Noruega tem demonstrado uma preocupação em relação a esse complexo. Assim, o *Danish Meteorological Institute* - DNMI desenvolveu um projeto para estudar os potenciais acidentes que poderiam ser oriundos desse complexo nuclear, através das análises do transporte de radionuclídeos na atmosfera e da deposição. A pesquisa baseou-se em duas metodologias, a primeira correspondeu a um estudo de trajetórias isentrópicas, como uma ferramenta para descrever o transporte dos radionuclídeos em diferentes cenários atmosféricos, sendo que o complexo de Kola ficou no centro da grade de estudo, e considerou-se como uma fonte pontual. E o segundo método, foi usado o programa de acidente nuclear denominado de SNAP - *Severe Nuclear Accident Program*, e nesse sistema foi utilizado um modelo de dispersão atmosférica gaussiano desenvolvido no DNMI.

MAHURA *et al.*, (2001), dando prosseguimento às pesquisas na região de Kola, ressaltaram a importância do monitoramento sistemático das trajetórias, pois nesse complexo apresentam equipamentos obsoletos, e por estar localizado em uma região onde os fatores meteorológicos estão em constantes mudanças, isso pode levar a um maior impacto ambiental, caso ocorra um vazamento.

BAKLANOV *et al.*, (2002) realizou estudos sobre possíveis impactos que a região de Kola poderia proporcionar no período de 1991 a 1996. Foi utilizado o modelo de trajetórias isentrópicas para frente, tendo o complexo de Kola como uma fonte pontual. Nessa pesquisa, também foram estimados os possíveis impactos que em longo prazo, a população próxima da região de estudo poderia sofrer em decorrência de um hipotético acidente. Os modelos utilizados para estimar a contaminação através dos radionuclídeos foram os seguintes MATHEW/ADPIC, DERMA e o Randon, que através dos seus resultados foram correlacionados com o modelo de trajetórias isentrópicas. O MATHEW/ADPIC são códigos desenvolvidos no DOE – *Department of Energy* e no LLNL - *Lawrence Livermore National Laboratory*, ambos funcionam na Universidade da Califórnia. Esses modelos são usados para simular a dispersão de uma enorme variedade de liberações do material perigoso na atmosfera. Existe um outro modelo desenvolvido nessa universidade, o ARAC - *Atmospheric Release Advisory Capability* que é usado para obter em tempo real as avaliações de liberações radiológicas ou de produtos químicos, e nesse modelo são utilizados dados meteorológicos. Esse modelo pode ser ajustado para micro ou mesoescala e considera a topografia: O ARAC consiste de seis códigos principais:

TOPOG – Código de topografia que gera a grade;

MEDIC – Código de dados meteorológico;

CG-MATHEW – Ajuste do campo tridimensional do vento usando gradientes conjugados;

ADPIC – Dispersão atmosférica por partícula na grade;

PLCNT – Gera os gráficos;

TIMHIS – Realiza os processos estatísticos.

A parte numérica é em diferenças finitas, e uma das limitações do modelo consiste no processo de interpolação dos dados meteorológicos, caso esses sejam escassos,

e de não poder realizar estudos que envolvam as transformações químicas (LANGE, 1989; ERMAK *et al.*, 1995).

BAKLANOV (2003) realizou estudos de modelagem do transporte atmosférico e deposição de partículas radioativas, supondo possíveis vazamentos de radionuclídeos no complexo da nuclear da península de Kola, estendendo sua pesquisa para outras regiões a noroeste da antiga União Soviética. Usou como ferramenta dois modelos, um de escala local e um modelo atmosférico de mesoescala, procurando estudar as trajetórias em diferentes cenários e eventos meteorológicos. Foi realizada uma análise dos possíveis locais, onde os radionuclídeos poderiam alcançar dentro da região de domínio previamente definida. O modelo de escala local utilizado é de três dimensões, o modelo de mesoescala que procurou representar a dinâmica da atmosfera e o transporte das partículas em topografias complexas foi desenvolvido no DMI, e esse sistema foi denotado de PHOENICS. Esse inclui um método euleriano para o tratamento do transporte, difusão e deposição dos poluentes. O sistema foi desenvolvido para modelar as possíveis situações em que apresentar uma enorme fonte de calor após uma liberação acidental de radiação.

MAHURA & BAKLANOV (2004) baseando-se na metodologia desenvolvida no projeto denominada Risco Ártico, utilizaram as trajetórias isentrópicas no período de 1991 a 1996, evidenciando a importância de estudos para o desenvolvimento de indicadores relacionados com a atmosfera que permitam uma melhor sistemática no momento de tomar as decisões.

Hoje em dia, existe por parte da Organização Meteorológica Mundial (OMM), um interesse em monitorar, no nível global os possíveis vazamentos oriundos das usinas nucleares. Caso isto aconteça, alguns centros devem ser imediatamente comunicados. São denominados de Centros Meteorológicos Regionais Especializados (RSMC) a saber: RSMC Montreal-CMC, RSMC Washington-NOAA, RSMC Bracknell-UK, RSMC Toulouse-Météo-France, RSMC Beijing, Obninsk, RSMC Tokyo, RSMC Melbourne, IAEA (International Atomic Energy Agency), WMO, RTH Offenbach. O objetivo desses centros é desenvolver uma metodologia capaz de monitorar as trajetórias em tempo hábil.

## 2.12. Trajetórias Cinemáticas

Os modelos de trajetórias descrevem a direção das parcelas de ar, utilizando estudos da dinâmica atmosférica. Em 1940, Peterssen destacou-se como primeiro pesquisador a desenvolver essa metodologia por meio de técnicas gráficas que representavam as trajetórias, construídas e registradas em mapas. Atualmente, essas informações são obtidas numericamente a partir dos campos meteorológicos. Desde então, foram aprimorados diferentes métodos de trajetórias por diversos pesquisadores (PETERSEN & UCCELLINI, 1979; MERRIL *et al.*, 1986). O desenvolvimento da representação dos campos de ventos, na utilização dos modelos de previsão numérica do tempo, contribuiu para melhoria dos métodos cinemáticos. As trajetórias apresentam inúmeras aplicações para a meteorologia, como por exemplo, estudos relacionados com a química e física da atmosfera, climatologia e estudos ambientais (STOHL, 1998). Diversos estudos de química e física da atmosfera frequentemente utilizam trajetórias de parcelas de ar como ferramenta auxiliar na interpretação de resultados de medidas experimentais. No Brasil, as trajetórias das parcelas de ar são usadas intensivamente em estudos atmosféricos, principalmente com relação ao transporte de gases e material particulado emitidos por e queimadas (LONGO, 1999).

A trajetória é definida através da equação diferencial:

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}[\mathbf{r}(t)] \quad (2.1)$$

onde  $t$  é o tempo,  $\mathbf{r}$  é o vetor posição e  $\mathbf{v}$  é o vetor velocidade do vento. Se conhecer a posição  $\mathbf{r}_0$  e o tempo  $t_0$  inicial da parcela, o caminho é completamente determinado usando a Equação 2.1 e escrita:

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t) \quad (2.2)$$

onde  $\mathbf{r}_0 = (r_1, r_2, r_3)$ . Os deslocamentos de tais parcelas podem também ser calculado para frente ou para trás no tempo:

$$\mathbf{r}_0(t = t_0) = \mathbf{r}_0(r, t) \quad (2.3)$$

A coordenada espacial  $\mathbf{r}_0$  e  $t_0$  fornece a média de cada parcela de ar e a identifica durante todo o tempo. Essas coordenadas são chamadas coordenadas materiais ou coordenadas lagrangeanas.

O importante nos estudos de trajetória é a possibilidade de se realizar um diagnóstico preliminar na direção das parcelas de ar, com vista à colocação de equipamentos específicos para que possam monitorar a quantidade de material radioativo, no caso de uma instalação nuclear.

# **CAPÍTULO III**

---

## **CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO DE ESTUDO**

Neste capítulo pretende-se apresentar determinados conceitos sobre o comportamento da atmosfera e o conjunto de gases e partículas que a constitui. O intuito é a compreensão de problemas relacionados com a dispersão de poluentes, particularmente os radionuclídeos na atmosfera, pois a intensidade e a direção dos ventos são primordiais na distribuição das concentrações dos poluentes independente das escalas que se queira estudar. Faz-se então necessário estudar diversas combinações de direção e intensidade de ventos para determinar as situações potencialmente críticas, com respeito às altas concentrações, caso se deseje fazer a previsão da qualidade do ar ou do impacto de uma determinada fonte de poluentes. Finalizando, será apresentado a área e os aspectos climáticos da região de estudo.

### **3.1. Composição dos Gases na Atmosfera**

Não existe um limite superior que represente a atmosfera no sentido físico. Verifica-se apenas uma progressiva rarefação do ar à medida que a altitude aumenta. Sob o ponto de vista da termodinâmica, a atmosfera é um sistema aberto, onde ocorre um intercâmbio de massa entre a Terra e o espaço.

Para a meteorologia, a região que se destaca é denominada troposfera, onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos, envolvendo 75% da massa total

atmosférica. Na troposfera, são encontrados inúmeros gases e ocorrem diferentes reações químicas.

Na Tabela 3.1, são apresentados os principais gases e suas respectivas quantidades que constituem a atmosfera. A composição do ar inclui um considerável número de diferentes espécies químicas, disponíveis em pequeníssimas quantidades que adquirem funções importantes no processo de determinação química. As concentrações desses compostos são caracterizadas espacial e temporariamente, e estão relacionadas a grande diversidade de suas fontes, reações e transformações químicas e fotoquímicas que ocorrem na atmosfera (GOODY & YUNG, 1989).

Tabela 3.1: Composição média dos 100 km inferiores da atmosfera terrestre (JACOBSON, 2000).

<b>GÁS</b>	<b>Volume da razão de mistura</b>	
<b>Gases Fixos</b>	<b>(%)</b>	<b>(ppmv*)</b>
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	78.08	780.000
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	20.95	209.500
Argônio (Ar)	0.093	9.300
Neônio (Ne)	0.0015	15
Hélio (He)	0.0005	5
Kriptônio (Kr)	0.0001	1
Xenônio (Xe)	0.000005	0.05
<b>Gases Variáveis</b>	<b>(%)</b>	<b>(ppmv)</b>
Vapor d'água (H <sub>2</sub> O)	0.00001 - 4.0	0.1 - 40.000
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0.0360	360
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.00017	1.7
Ozônio (O <sub>3</sub> )	0.00003 - 0.001	0.03 - 10

ppmv\*= partes por milhão em volume.

Ainda com relação à Tabela 3.1, constata-se que, juntos, o nitrogênio e o oxigênio correspondem a quase 99.03 % do volume do ar seco e limpo. O percentual restante é ocupado pelo gás inerte argônio (0.093 %) e outros gases nobres com taxas ainda menores.

Embora o nitrogênio e o oxigênio sejam abundantes, sua influência sobre os fenômenos do tempo é muito pouca. A importância de um determinado gás não está relacionada a sua abundância relativa. Por exemplo, o dióxido de carbono, o vapor de água, o ozônio e os aerossóis ou material particulado ocorrem em pequenas concentrações e, no entanto, são extremamente importantes para os fenômenos meteorológicos e para a vida aeróbica na Terra.

O oxigênio, além de possibilitar a formação da camada de ozônio na atmosfera, contribui para a formação do dióxido de carbono que não é quimicamente reativo e sua concentração é praticamente constante. O dióxido de carbono encontra-se num teor de aproximadamente 365 ppmv até os 100 km de altitude. O CO<sub>2</sub> é o segundo gás em importância para o efeito estufa pela sua relativamente elevada concentração na atmosfera (JACOBSON, 2000).

Por ser um eficiente absorvente de energia radiante de onda longa emitida pela Terra, o CO<sub>2</sub> influencia o fluxo energético através da atmosfera, propiciando a retenção do calor na baixa atmosfera e contribuindo para ocorrência natural do efeito estufa (GOODY & YUNG, 1989).

Conforme as projeções apresentadas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, em caso de não ocorrer qualquer medida mitigadora para a redução das emissões do CO<sub>2</sub> na atmosfera e de outros gases que contribuem para o efeito estufa, estima-se que, em 2035, a temperatura global do ar aumentará entre 1<sup>o</sup>C a 3,5<sup>o</sup>C. Ainda que estes valores possam parecer pequenos, é oportuno lembrar que a temperatura média atual do ar é quase 6<sup>o</sup>C mais quente que nos períodos mais frios das eras glaciais (BAIRD, 2002). Embora o impacto causado pelo aumento da temperatura seja difícil de prever, acredita-se que ocorrerá um aquecimento na baixa troposfera que contribuirá no processo das mudanças climáticas globais.

As pesquisas referentes à química da atmosfera demonstram a importância da concentração dos gases de efeito estufa para entender o processo de aquecimento do clima, porém, para isso, envolve uma análise histórica do desenvolvimento econômico dos países desenvolvidos. O tempo de vida desses gases na atmosfera pode permanecer por muitos anos. Por exemplo, o CO<sub>2</sub> emitido permanece em média, 140 anos na atmosfera. Um outro gás de efeito estufa, o SF<sub>6</sub>, possui potencial de aquecimento global cerca de 24900 vezes

maior do que o potencial de aquecimento global do  $\text{CO}_2$  e seu tempo de vida é de 3200 anos (BAIRD, 2002). A Figura 3.1 mostra a variação de alguns gases e o seu tempo de vida nas diferentes escalas.

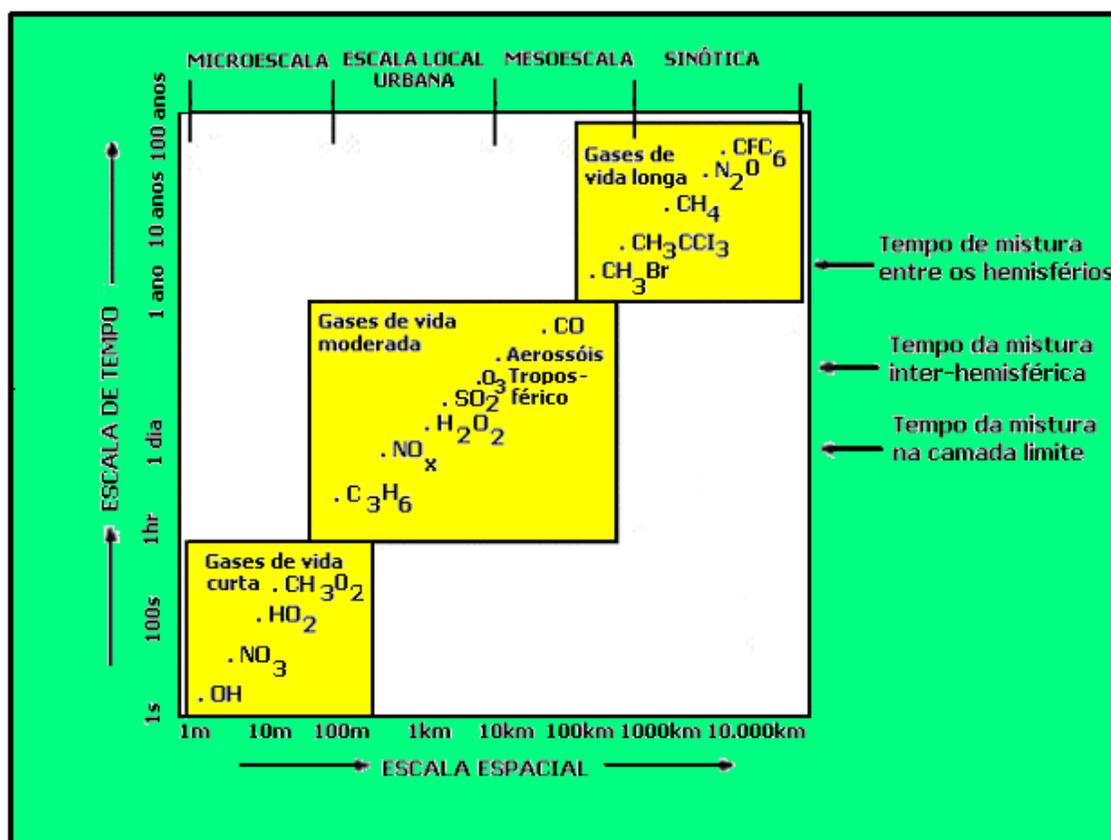


Figura 3.1: Variabilidade espacial e temporal de alguns gases na atmosfera (Adaptado de BRASSEUR *et al.*, 2003).

A Figura 3.1, mostra que os gases variam tanto espacialmente quanto no tempo, e podem ultrapassar os hemisférios. Independente das escalas, as moléculas da água encontradas na atmosfera permitem absorção da luz infravermelha térmica, devido a sua vibração durante o processo de deformação angular de H-O-H. Portanto, o vapor de água é o gás mais importante na atmosfera, sob o ponto de vista de sua interação com a radiação solar e terrestre (STEPHENS & TSAY, 1990). Na troposfera, esse gás participa do processo de formação das nuvens, precipitação e no transporte de quantidades significativas de energia, na forma de calor latente. Trata-se de um dos gases mais variáveis na atmosfera, com a peculiaridade de absorver radiação na região espectral do infravermelho próximo.

Nesta região o vapor de água bloqueia a emissão térmica da superfície, excetuando a janela atmosférica, região compreendida entre 7 e 12  $\mu m$  do espectro eletromagnético.

Ressalta-se que água é a única substância encontrada na atmosfera nos três estados: sólido, líquido e gasoso, de acordo com as diferentes variações de temperatura e pressão. Em sua mudança de estado, pode absorver ou liberar calor latente. Sendo assim, o calor latente liberado fornece energia para formação de tempestades ou modificações nas circulações atmosféricas. Nos trópicos úmidos e quentes, constitui não mais que 4% do volume na baixa atmosfera, enquanto, sobre os desertos e regiões polares pode constituir uma pequena fração de 1%. O vapor de água também possui uma grande capacidade para absorver energia, seja ela através de ondas longas ou curtas.

Finalmente, registra-se que o ozônio é a forma triatômica do oxigênio ( $O_3$ ). É diferente do oxigênio que respiramos, que é diatômico ( $O_2$ ). Sua presença é relativamente pequena e sua distribuição não é uniforme. Concentra-se entre 10 e 50 km de altitude. Sua distribuição varia também com a latitude, estação do ano, ciclo diurno, podendo estar associado a erupções vulcânicas e atividades solares. A formação do ozônio na camada entre 10-50 km é resultado de uma série de processos que envolvem a absorção de radiação solar. Moléculas de oxigênio ( $O_2$ ) são dissociadas em átomos de oxigênio após absorverem radiação solar de ondas muito curtas (ultravioleta).

### **3.2. A Estrutura Vertical da Atmosfera**

A atmosfera é classificada de acordo com a sua estratificação térmica. A Figura 3.2 apresenta a estrutura da atmosfera tendo como base o gradiente de temperatura em função da altitude.

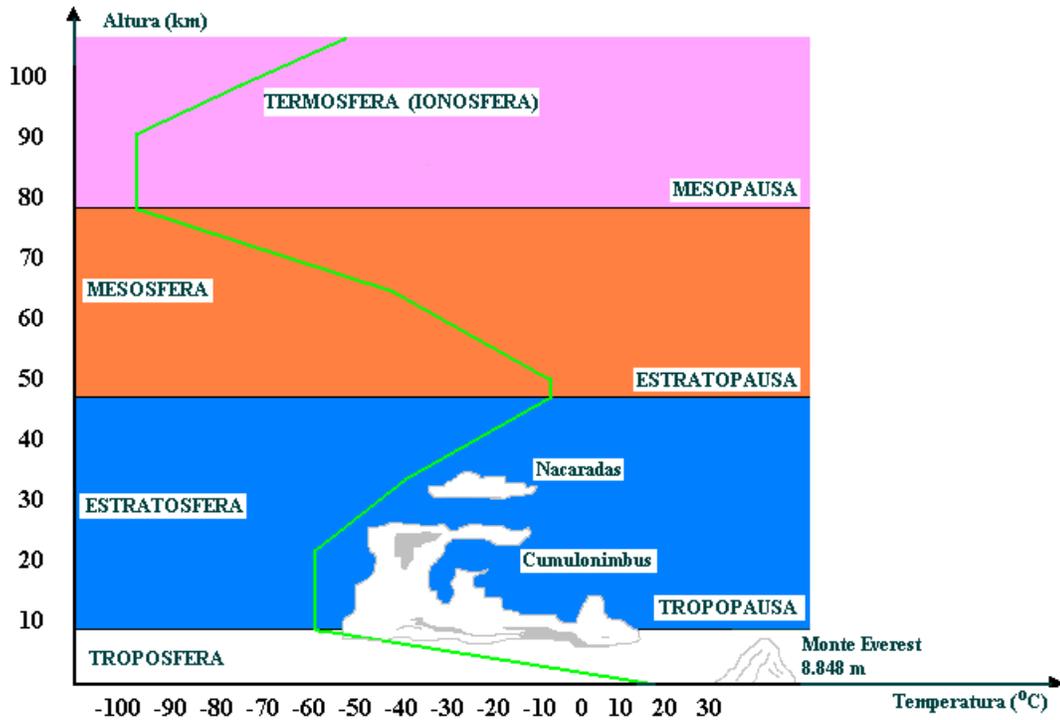


Figura 3.2: Perfil vertical da atmosfera.

A Figura 3.2 demonstra a variação da camada da atmosfera em diferentes níveis de altura. A troposfera corresponde à camada inferior da atmosfera, cuja altura varia conforme a latitude. Nessa região, a temperatura diminui linearmente com a altitude. A camada de ar ao se expandir é convertida em trabalho através de sua energia cinética. Essa troca ocorre uma diminuição da temperatura. A temperatura do ar é um importante parâmetro meteorológico que contribui para caracterizar a estabilidade atmosférica e para os processos de dispersão dos poluentes. Logo, essa camada facilita ou dificulta, dependendo das condições atmosféricas, a mistura das partículas. Na tropopausa, mesmo com a altura crescente, a temperatura do ar é constante (isoterma). Com o aquecimento da baixa troposfera, desenvolvem-se as correntes ascendentes, provocando-se as transferências convectivas de calor e vapor da água para os níveis mais elevados da troposfera. Em relação à velocidade do vento, ocorre um aumento com a altitude na troposfera atingindo valores máximos próximo da tropopausa. A altura da tropopausa no equador varia de 15 a 18 km e, nos pólos, oscila entre um mínimo de 6 km no inverno e um máximo de 10 km no verão, em média (JACOBSON, 2000).

A estratosfera estende-se para além da tropopausa, aproximadamente 50 km de altitude. Nessa região, observa-se a isoterma, que corresponde aos seus primeiros 20 km. A partir dessa altura, a temperatura do ar aumenta com a altitude. O aquecimento progressivo da atmosfera com a altitude, principalmente na parte superior da estratosfera, deve-se à liberação de energia no processo de formação de ozônio. Por isso, as moléculas de  $O_2$  e  $O_3$  na estratosfera absorvem a radiação ultravioleta do Sol e emitem a radiação infravermelha. Aproximadamente 90% das moléculas de ozônio na atmosfera estão presentes na estratosfera, e o restante encontra-se na troposfera (JACOBSON, 2000).

A mesosfera estende-se dos 50 aos 80 km de altitude, aproximadamente, apresentando um gradiente vertical médio de temperatura negativo, indicando que há uma nova diminuição com a altitude, com valor mínimo de temperatura estimado em  $-95^{\circ}C$ . Essa região não apresenta vapor de água, sua composição não difere do ar seco, e os níveis do ozônio são baixos (JACOBSON, 2000).

A termosfera situa-se além dos 90km de altitude e caracteriza-se por um contínuo aumento da temperatura média do ar com a variação de altura. Esse fenômeno ocorre porque o oxigênio e o nitrogênio absorvem radiação de ondas curtas. Essa região contém poucas moléculas de gases, sendo os íons altamente energizados. Os gases acima mencionados absorvem radiação de onda curta nessa camada (JACOBSON, 2000).

### **3.3. Camada Limite Atmosférica**

A troposfera é delimitada pela camada limite atmosférica - CLA ou também denominada de camada limite planetária - CLP. A CLA está próxima da superfície terrestre e dos oceanos, e suas principais características são regidas pelas interações da atmosfera com a superfície através de troca de calor, e da evaporação do solo. A CLA também pode ser definida como a camada inferior da troposfera que está sobre influência direta da superfície, e é caracterizado por turbilhões em um amplo intervalo de escalas espaciais e temporais. O ciclo diurno da CLA é diretamente influenciado pela temperatura na superfície, onde oscila conforme a variação e intensidade da radiação solar (STULL, 1993). Nessa camada, as forças viscosas deixam de ser desprezíveis e, ao mesmo tempo, passam a

sofrer influência da topografia ou da superfície na Terra como um todo. As interações que resultam desse intercâmbio dependem da viscosidade molecular.

Os escoamentos que acontecem na CLA são em geral, turbulentos. Algumas características específicas desses escoamentos são: irregularidade, tridimensionalidade e vorticidade. Contudo, em microescala, os fenômenos que ocorrem na CLA, como os vórtices turbulentos, são processos que interagem com a viscosidade, sendo importantes porque contribuem para a diminuição da velocidade do escoamento próximo à superfície. Como está muito próximo da superfície, e devido à própria rugosidade natural, o escoamento do ar provoca atrito e, como resultado, afeta o próprio escoamento. A complexidade dos processos envolvidos na evolução da atmosfera, principalmente os associados à descrição da turbulência na CLA, necessita do uso de modelos matemáticos para determinar com alguma precisão, o transporte de poluentes na atmosfera. Com relação ao problema da dispersão nessa escala, influencia o transporte e a dispersão de poluentes. Dentro da CLA os ventos são levemente influenciados pelo escoamento de ar acima e pelos efeitos de fricção, topografia e trocas de calor com a superfície. Os ventos na região acima da camada limite atmosférica são chamados de ventos geostróficos ou sinóticos.

A Figura 3.3 representa a região de domínio da camada limite, e, no anexo I, são apresentadas as equações que representam a CLA.

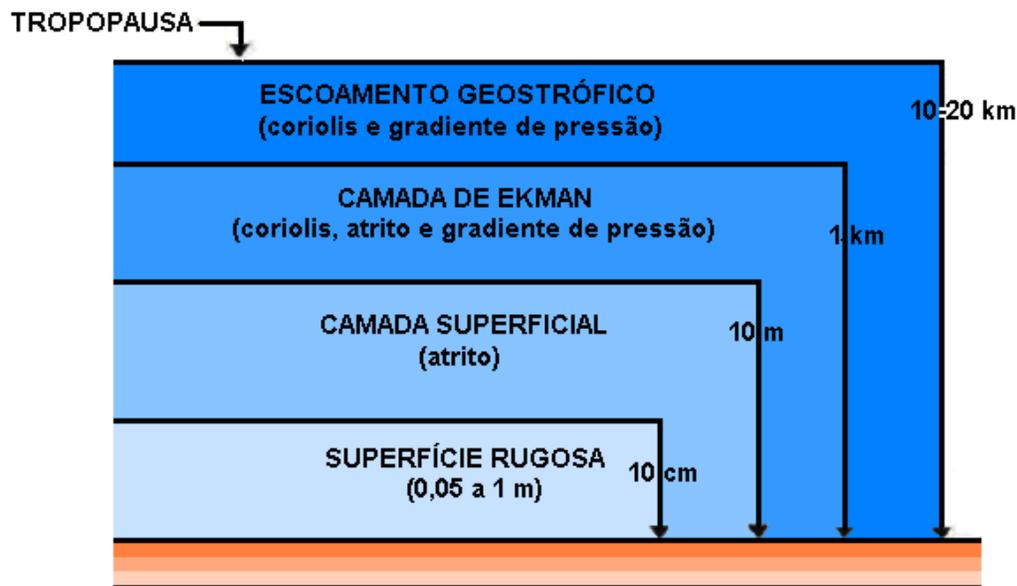


Figura 3.3: Diagrama esquemático da estrutura da camada limite atmosférica (Adaptado de SCOFANO, 1991).

A Figura 3.3 mostra a CLA subdividida em alguns níveis, variando sua espessura de milímetros, metros e quilômetros de altitude, não ultrapassando a faixa dos vinte quilômetros a partir do solo. Alguns elementos contribuem na espessura da CLA como: intensidade da turbulência, podendo ser mecânica ou térmica, do campo de vento, topografia e das condições de estabilidade.

A camada superficial ou camada de Prandtl, que se estende de cinco a cinquenta metros, é caracterizada pelo fato dos fluxos turbulentos serem aproximadamente constantes com relação à altura, ou seja, os fluxos turbulentos de quantidade de movimento, calor e vapor de água não diferem significativamente dos valores à superfície.

A camada de Ekman situada acima da camada limite superficial. É uma zona de transição entre o nível turbulento e a atmosfera livre. Nessa camada, o atrito é menor e as forças de Coriolis, do gradiente de pressão e da convecção são consideradas. Como o vento varia em intensidade e direção com a altura, a sua projeção tende a assumir o aspecto de uma espiral. Logo, esse movimento permite deslocar o vapor de água, as trocas de calor e dispersar os poluentes atmosféricos como os radionuclídeos.

Os processos que envolvem as trocas de energia, misturas e a convecção durante um período de 24 horas são representados na Figura 3.4. Logo, os transportes de partículas que passam por uma turbulência, em função dessas trocas e interações, podem alcançar poucas dezenas de metros, mas, em situações em que a atmosfera apresenta uma enorme instabilidade estática, esse sistema pode alcançar aproximadamente 3 km (HOLTON, 1992).

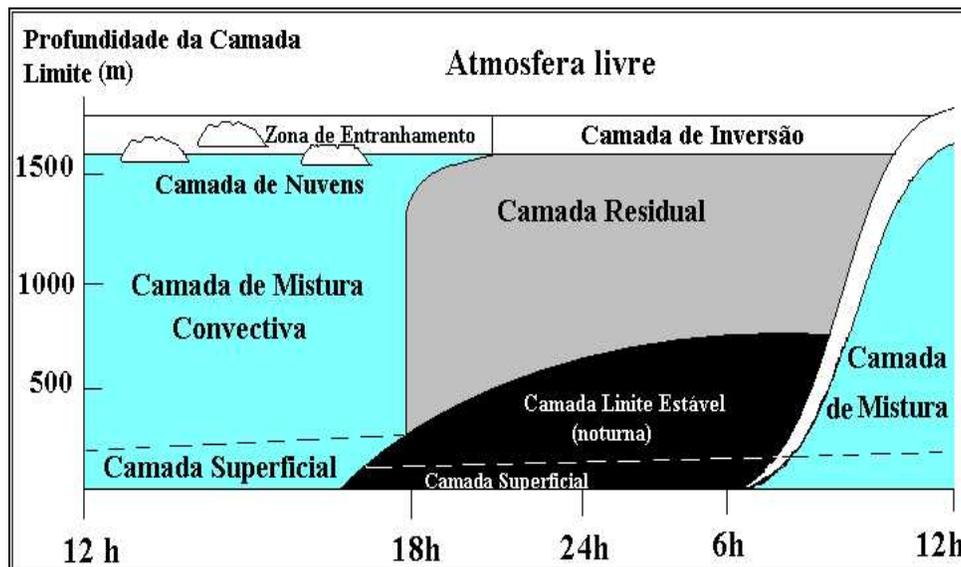


Figura 3.4: Perfil e variação da camada limite em 24 horas (Adaptado de STULL, 1999).

Observando-se a Figura 3.4, conclui-se que, caso ocorram emissões de poluentes próximos ao nível do solo no período da noite, haverá maior concentração durante esse intervalo de tempo. Essa afirmativa fundamenta-se em função da espessura da camada de mistura ser menor ao anoitecer, após um dia de intensa atividade poluidora. Atualmente os pesquisadores têm procurado estudar com detalhes a camada de mistura, em decorrência da legislação de diagnósticos ambientais para complexos industriais potencialmente poluidores da atmosfera. A capacidade de diluição de poluentes da camada de mistura varia em função do ciclo diurno.

### 3.3.1. Camada Limite Estável - CLE

A camada limite estável, também denominada de camada limite noturna, mantém contato direto com o solo durante a noite. A baixa intensidade da turbulência, geralmente próxima aos limites de detecção, a intermitência e a coexistência de ondas de gravidade dificultam a modelagem simplificada dessa camada. Associado a isso, a forte sensibilidade, a não homogeneidade da topografia, gerada por terrenos ainda que levemente inclinados e o resfriamento radioativo em longos comprimentos de onda dificultam compreender essa camada (DEGRAZIA & MORAES, 1989). O topo da camada estável não é muito bem definido. Considera-se, normalmente, como a região onde a temperatura potencial virtual deixa de variar ou como a região onde a intensidade turbulenta atinge uma pequena fração pré-estabelecida de seu valor na superfície (PELLEGRINI, 2001).

### 3.3.2. Camada de Mistura Convectiva - CMC

A camada de mistura convectiva corresponde à região da atmosfera que se inicia sobre a camada superficial até a altitude em que ocorrer uma inversão térmica. Essa região caracteriza-se por uma forte mistura vertical, decorrente do fluxo de calor turbulento. Determina-se o parâmetro na subfaixa viscosa através de:

$$w^* = \left[ \left( \frac{g}{\theta_m} \right) \overline{(w'\theta')}_o z_i \right]^{1/3} \quad (3.1)$$

onde  $\overline{(w'\theta')}_o$  é o fluxo de calor turbulento superficial,  $\theta_m$  é a temperatura potencial média,  $w'$  a velocidade média, e  $z_i$ , a altura da base da primeira inversão.

Nessa camada predomina a turbulência de origem térmica, na qual ocorre a elevação de correntes de ar quente, na microescala, são denominadas térmicas. Um outro mecanismo responsável pela geração de turbulência é o gradiente de velocidade do vento observado na região de entranhamento (Figura 3.4).

A característica importante dessa camada é a intensa homogeneização vertical promovida pela turbulência convectiva sobre as variáveis médias do escoamento como a velocidade horizontal do vento, temperatura, umidade do ar e as concentrações dos poluentes. Essas apresentam um valor constante em toda a extensão vertical da camada com a região de entranhamento, que funciona como limite para esse comportamento.

Essa região foi formada pela elevação do ar noturno e, portanto, a sua temperatura absoluta é menor do que a do ar abaixo dela. Logo, a temperatura potencial virtual é maior, devido ao alto conteúdo de umidade das regiões próximas do solo. Caso o ar venha dos níveis inferiores, perde-se, portanto, sua capacidade de flutuação, que se restringe aos movimentos verticais.

Sendo assim, a região de entranhamento serve como um tampão para a camada limite atmosférica. A umidade e as concentrações dos poluentes mostram a distribuição mais ou menos constantes devido à turbulência.

### **3.3.3. Camada de Mistura**

A camada de mistura é importante, para os estudos dos transportes e dispersão de partículas, gases e radionuclídeos. Algumas variáveis são importantes para considerar esse processo, pois a própria concentração de radionuclídeos na camada de mistura estará ligada às condições de estabilidade atmosférica e à intensidade de radiação solar que pode gerar uma turbulência térmica ou mesmo mecânica, dependendo do escoamento do campo de vento predominante associado à topografia local.

Os poluentes e os radionuclídeos que são emitidos na microescala, e dependentes das condições atmosféricas são gradativamente dispersos horizontalmente e verticalmente. Após um determinado tempo, as partículas são completamente misturadas. Nesta etapa as fontes deixam de ser significativas. Em vista disso, a altura  $h$  do nível da mistura é um dos parâmetros importantes para os modelos de dispersão dos poluentes na microescala (SEIBERT *et al.*, 2000).

A turbulência que ocorre na camada de mistura geralmente é de origem convectiva. As fontes convectivas incluem a transferência de calor próximo da superfície da Terra e no topo da nuvem onde ocorre o resfriamento radiativo. Em uma situação com o

ar ascendente, na ocorrência do resfriamento, cria-se uma corrente térmica de ar mais frio que penetra na nuvem. Esta situação pode acontecer simultaneamente ou durante a formação de estratocumulus.

Na ausência de nuvens o nível da mistura e do seu desenvolvimento está diretamente ligado ao aquecimento solar. Iniciando-se cerca de meia hora após o nascimento do sol, a turbulência intensifica-se com o passar do tempo. Nesta etapa, o nível da mistura é denominado de mistura intensa e corresponde a uma situação estaticamente instável, pois as térmicas oriundas desta interação do ar elevam-se em decorrência do aquecimento.

O nível da mistura alcança a profundidade máxima no período da tarde, contribuindo no desenvolvimento do entranhamento das nuvens. Assim, a turbulência resultante mistura-se uniformemente com o calor, umidade e o movimento vertical.

Para compreender os mecanismos que envolvem uma pluma na CLA, considera-se que o meio atmosférico esteja sendo poluído continuamente por uma fonte pontual e que serão dispersos no ar. As formas da pluma dos poluentes emitidos são classificadas de acordo com o perfil da atmosfera. Como um primeiro exemplo, os poluentes emitidos das fontes pontuais formam os *Looping* (Figura 3.5).

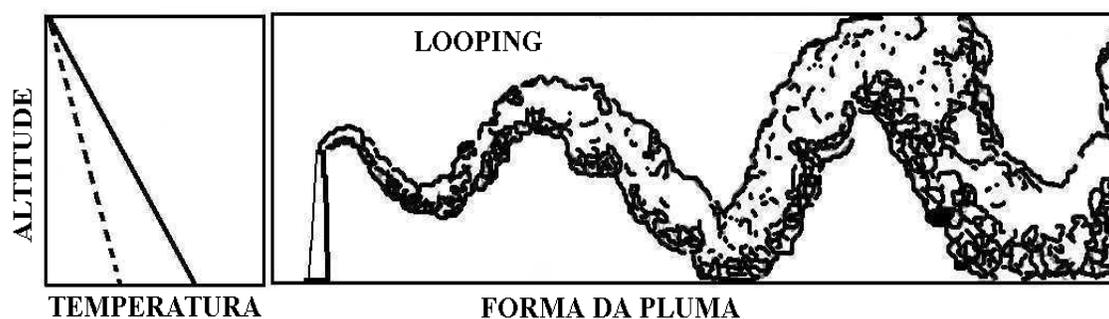


Figura 3.5: Comportamento de *Looping* de uma pluma (adaptado de BRAGA *et al.*, 2002).

Este tipo de pluma ocorre em uma situação onde o perfil térmico é superadiabático<sup>3</sup>, ou seja, existe muita turbulência na atmosfera. A pluma *Looping* acontece durante os dias de céu claro com poucas nuvens e muita insolação. Neste caso a turbulência de origem térmica

<sup>3</sup> A atmosfera é dita superadiabática, quando a temperatura do ambiente diminui mais rápido que a adiabática.

contribui para a rápida dispersão da pluma. Nos locais próximos da fonte junto ao solo podem ocorrer elevados índices de poluição, devido à própria turbulência que transporta a pluma ao nível do solo.

A pluma *Coning* (Figura 3.6) forma-se quando o perfil é do tipo subadiabático<sup>4</sup>. Essa pluma apresenta a forma cônica e sua dispersão é menor que a pluma na forma de *Looping*. O efeito da atmosfera provoca o aumento da concentração de poluentes no solo em locais distantes da fonte de emissão. Este tipo de pluma forma-se nos dias nublados e com ventos moderados.

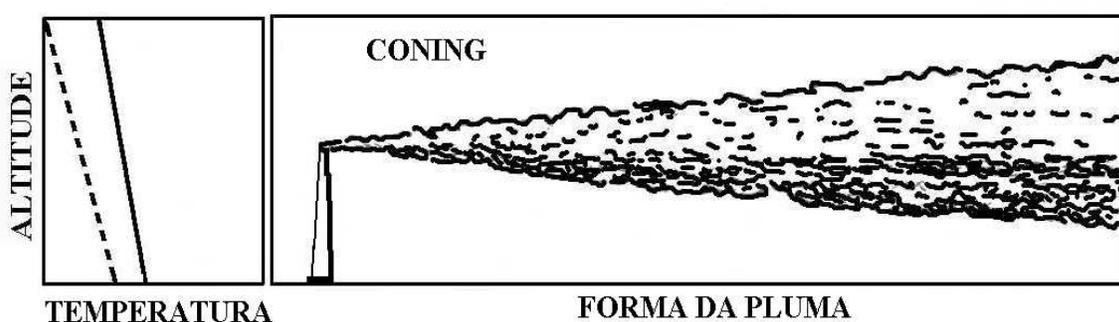


Figura 3.6: Comportamento *Coning* de uma pluma (adaptado de BRAGA *et al.*, 2002).

A pluma *Fanning* (Figura 3.7) surge quando toda a massa de poluentes está contida numa camada de inversão, onde predomina a estabilidade e a mistura vertical é quase inexistente.

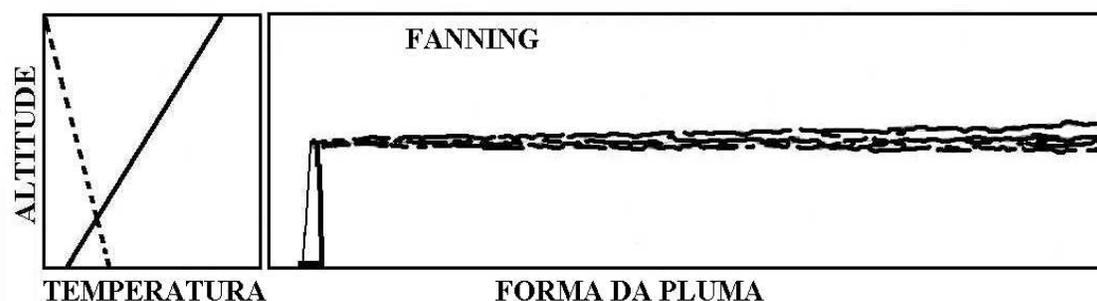


Figura 3.7: Comportamento *Fanning* de uma pluma (adaptado de BRAGA *et al.*, 2002).

<sup>4</sup> Se a temperatura da atmosfera diminuir mais lentamente do que a adiabática, a atmosfera é denominada de subadiabática.

Outro tipo é a pluma *Fumigation* (Figura 3.8) causada pela quebra da inversão por radiação, e varia em média de trinta a sessenta minutos. Com o aquecimento do Sol na superfície do solo, a inversão desaparece e ocorre mistura na região do gradiente negativo. Se o ar estiver instável ao atingir a pluma, resulta em um aumento da mistura vertical e conseqüentemente as concentrações no nível do solo. Numa situação de brisa marítima, esse tipo de mistura pode durar várias horas.

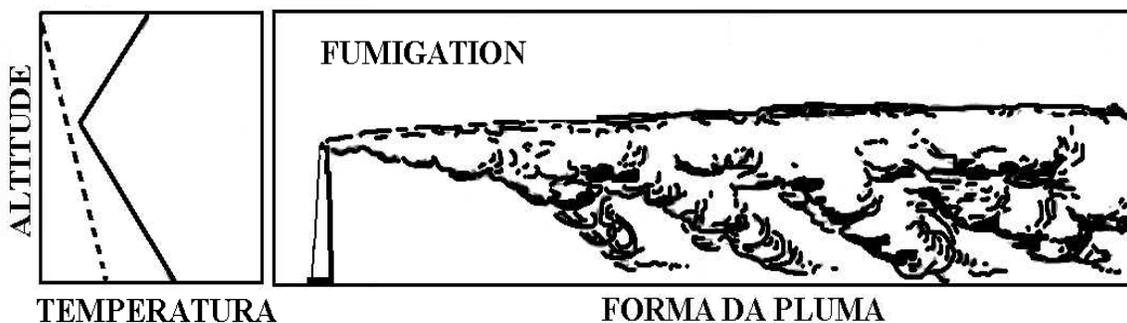


Figura 3.8: Comportamento *Fumigation* de uma pluma (adaptado de BRAGA *et al.*, 2002).

Em uma situação em que os efluentes são lançados acima da camada de inversão ocorre a pluma do tipo *Lofting* (Figura 3.9). Esta pluma surge ao anoitecer, quando inicia a inversão por radiação.

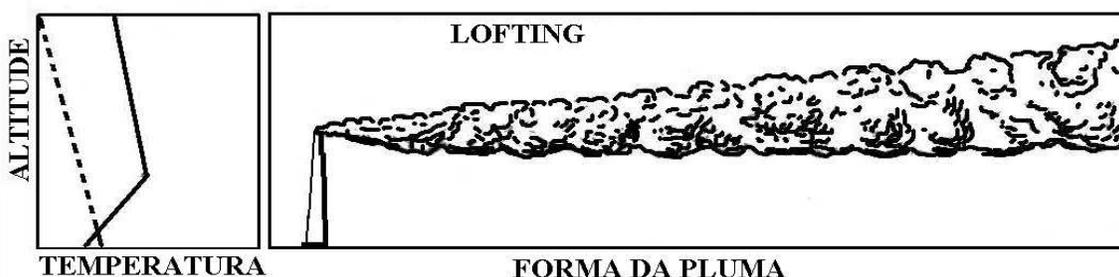


Figura 3.9: Comportamento *Lofting* de uma pluma (adaptado de BRAGA *et al.*, 2002).

Quando a camada atmosférica comporta-se como um bloqueador, ocorre a *Trapping* (Figura 3.10), permitindo que os poluentes fiquem abaixo da camada de inversão, comum nas regiões de alta pressão. A inversão pode durar alguns dias, diminuindo inclusive a sua espessura em relação ao solo. Com o decorrer do dia, a atividade urbana

aumenta e, conseqüentemente, a poluição nos níveis baixos da atmosfera. Também aumenta no inverno, pois a atmosfera é mais estável do que no verão. Nesse período de maior estabilidade, ocorre calma e ventos fracos, favorecendo as inversões de temperatura. Os diversos tipos de inversões limitam a espessura da Camada de Mistura e, conseqüentemente, a diluição de poluentes.

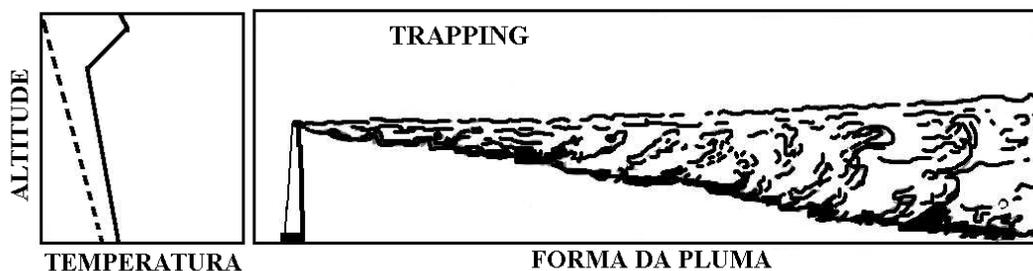


Figura 3.10: Comportamento de *Trapping* de uma pluma (adaptado de BRAGA *et al.*, 2002).

### 3.3.4. Técnicas para Medir a Camada de Mistura

Existem várias técnicas que permitem conhecer e diagnosticar o perfil vertical da atmosfera, e através destes resultados são realizados outros diagnósticos para a previsão atmosférica e outros estudos meteorológicos. A seguir, serão apresentados alguns métodos para obter a altura da mistura.

#### 3.3.4.1. Radiossondagens

As radiossondagens são utilizadas, na meteorologia, há vários anos. Através dessas, obtém-se pressão, temperatura, direção e velocidade do vento, com o objetivo de estudar as propriedades físicas da atmosfera.

Uma radiossonda consiste em um pequeno transmissor de rádio, composto de sensores que medem os parâmetros supracitados, sendo conduzido por um balão de borracha inflado com gás hidrogênio ou hélio. Existe no solo um receptor de rádio apropriado, que analisa continuamente os sinais recebidos e transforma a frequência em

valores das variáveis meteorológicas. Os dados são registrados em um diagrama específico, e a altura da camada limite pode ser determinada.

As radiossondagens são amplamente distribuídas em alguns pontos específicos do planeta de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (OMM), onde os dados são registrados, controlados e analisados.

Por outro lado, na maioria das estações, as radiossondagens são feitas somente duas vezes ao dia em horários sinóticos pré - estabelecidos (00UTC, 12UTC).

No Brasil, em face do custo operacional, só é realizada uma vez ao dia (12UTC). Uma das limitações das radiossondagens são as resoluções verticais, pois existem poucos dados aerológicos obtidos nos níveis verticais, prejudicando um estudo mais específico da camada limite.

#### **3.3.4.2. Sistemas de Sensoriamento Remoto**

Os sistemas de sensoriamento remoto como o SODAR e o LIDAR são cada vez mais utilizados. Esses sistemas fornecem uma alternativa para estimar e obter a altura da mistura. As vantagens básicas desses sistemas de sensoriamento são a operação contínua e não causarem modificações nos escoamentos investigados.

O SODAR é um sistema simples e com baixo custo operacional. Esse sistema é bastante conveniente para operações de rotina, consistindo na emissão de um sinal sonoro é espalhado a uma temperatura ambiente. A Figura 3.11 apresenta um modelo desse equipamento.



Figura 3.11: O SODAR (Fonte: <http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm>).

O SODAR emite um sinal sonoro e registra as condições atmosféricas, como por exemplo, as condições estáveis e convectivas e através da emissão de um eco. É usado para obter a altura da mistura e apresenta uma característica de radar dopler, determinada através do espalhamento da energia acústica associada às flutuações do perfil do vento médio, aos perfis de variância da velocidade vertical, à amplitude da temperatura e à inversão térmica da atmosfera. O objetivo das medidas do SODAR é realizar uma estimativa da altura da camada de mistura e das dimensões verticais da inversão. O sinal detectado pelo SODAR corresponde à amplitude do espalhamento dos pulsos acústicos que são transmitidos verticalmente. Esse espalhamento é causado na maior parte pelas flutuações rápidas da temperatura associada com as inversões térmicas, acopladas aos movimentos da mistura mecânica da atmosfera.

O LIDAR (detecção clara e variável) é um equipamento muito versátil. Registra as propriedades térmicas, estruturais e dinâmicas da atmosfera. É utilizado para monitorar a poluição do ar e é também uma ferramenta excelente para obter informação muito detalhada sobre o comportamento da camada limite atmosférica. As aplicações possíveis do LIDAR são:

- dinâmica atmosférica da camada limite;
- campo do vento (poluição);
- propriedades óticas da nuvem (importantes para os modelos do clima);
- altura da nuvem;

- interações aerossol-nuvem;
- monitoramento do aerossol;
- propriedades óticas da atmosfera (espalhamento).

O LIDAR opera com um princípio similar ao do radar, mas utiliza um feixe de laser para realizar a varredura da atmosfera. A luz de “laser” é dispersa pelas moléculas e por partículas da atmosfera. A luz que se dispersa, ao retornar para o sistema do LIDAR, é coletada por um telescópio e medida por um fotodetector. O sinal é gravado em função do tempo (tempo do curso para a luz de laser do LIDAR). Assim, a dependência da altura dos aerossóis pode ser explorada. A Figura 3.12a mostra o sistema LIDAR da Universidade Johns Hopkins (JHU) e a Figura 3.12b apresentam o transmissor e o receptor do LIDAR.



Figura 3.12a: Sistema LIDAR de JHU. (Fonte: <http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm>).



Figura 3.12b: O transmissor (laser e periscópio) e os componentes do receptor (telescópio e detector) (Fonte: <http://www.jhu.edu/~dogee/mbp/research/lidar/main.htm>).

### **3.5. Definição de Poluentes Atmosféricos**

Embora, para a grande população, a energia nuclear e meio ambiente temas situados em campos aparentemente opostos – fruto da intensa campanha negativa empreendida por militantes ambientalistas em todo o mundo – o setor nuclear vem oferecendo uma importante contribuição à preservação do meio ambiente e ao combate à poluição. O elenco de benefícios ambientais é amplo e começa pelo fato de que as usinas nucleares não emitem poluentes para a atmosfera. Ao suprirem uma boa parte das necessidades de energia elétrica no mundo, reduzem a queima de combustíveis fósseis utilizados nas usinas térmicas. Com isso, contribuem diretamente para evitar o aumento do gás carbônico, um dos gases do efeito estufa, o dióxido de enxofre e o óxido de nitrogênio, gases que causam a chuva ácida. Se isso não fosse suficiente, os institutos de pesquisa da área nuclear utilizando-se de seus recursos humanos altamente qualificados vêm

desenvolvendo, em todo o mundo, técnicas e processos para monitorar e reduzir a poluição do ar, do solo e da água. Para as regiões urbanas, o conhecimento e o diagnóstico dos diferentes tipos de poluentes são elementos importantes para estruturar e dinamizar as áreas onde se pretende realizar construções como: aterros sanitários, pólos petroquímicos, usinas nucleoeletricas e termoeletricas.

Para elaborar uma previsão da poluição do ar, são necessárias duas etapas a serem realizadas. A primeira corresponde à coleta de dados de campo dos diferentes tipos de gases e particulados e, a segunda ao uso de uma formulação matemática.

A poluição é definida como um distúrbio dos elementos e das diferentes espécies químicas naturais em decorrência das atividades humanas, não sendo consideradas as emissões naturais como as erupções vulcânicas (PITTS & PITTS, 2000).

As conseqüências de se liberar partículas para a atmosfera são freqüentemente prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. O interesse em estudar a qualidade do ar é bastante antigo. No século XII, o cientista e filósofo Mose Maimonides realizou pesquisas sobre as diferenças da qualidade do ar no centro das cidades e nos desertos. Em 1257, o uso do óleo como combustível foi proibido na cidade de Londres. Esta lei permitiu uma diminuição dos efeitos prejudiciais relacionados com a fumaça. No ano de 1661, John Evelyn escreveu o primeiro tratado sobre a deterioração da qualidade do ar, no célebre livro *Fumifigium*, descrevendo seus efeitos na saúde pública (PITTS & PITTS, 2000).

Depois de alguns séculos, foram realizadas estimativas sobre o problema da poluição pelos compostos das emissões de enxofre durante a combustão do carvão. Estes causaram 4.000 mortes durante o ano de 1952 na cidade de Londres (PITTS & PITTS, 2000).

Após esta introdução, é preciso se conhecer a diferença entre poluentes e contaminantes. Quando uma substância na atmosfera atinge níveis de concentrações cujos efeitos podem ser prejudiciais ao homem, às plantas e aos animais ou causam danos materiais, esta substância é considerada um poluente. O contaminante, por outro lado, é toda substância adicionada ao ar que provoca desvio na sua média global na atmosfera, não causando necessariamente danos imediatos ao meio ambiente (PITTS & PITTS, 2000).

Os poluentes podem ser classificados como:

- Poluentes primários: originados das próprias fontes emissoras;

- Poluentes secundários: originados de reações químicas e fotoquímicas dos poluentes primários na atmosfera.

O principal contaminante medido é o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e as principais fontes de CO<sub>2</sub> são as respirações das plantas, o decaimento de material orgânico e também a queima dos combustíveis fósseis e madeira pelo homem. Esta fonte antropogênica tem contribuído para o aumento relevante deste elemento na atmosfera nas últimas décadas.

Deve-se ressaltar que o CO<sub>2</sub> é considerado um contaminante, pois não é tóxico. A produção anual de CO<sub>2</sub> por fontes naturais corresponde a 1.0 x 10<sup>12</sup> toneladas, onde, de acordo com estudos atuais, o homem é responsável pela emissão de 56 % deste total. O CO<sub>2</sub> é um dos elementos que contribuem para o efeito estufa, pois a radiação da onda longa emitida pela superfície da Terra é fortemente absorvida por este elemento. Isto provoca um aumento na temperatura média da atmosfera terrestre (PITTS & PITTS, 2000).

Outro contaminante também importante é o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), que é encontrado nas fontes naturais, como por exemplo os vulcões (Tabela 3.2), mas também é emitido por fontes antropogênicas.

Tabela 3.2: Alguns gases emitidos para a atmosfera oriundos de fontes naturais (BAIRD, 2002).

NOME DO GÁS		FONTES NATURAIS
CH <sub>4</sub>	Metano	Decomposição biológica anaeróbia
NH <sub>3</sub>	Amônia	Decomposição biológica anaeróbia
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio	Decomposição biológica anaeróbia
HCL	Ácido clorídrico	Decomposição biológica anaeróbia, vulcões
CH <sub>3</sub> CL	Cloreto de metila	Oceanos
CH <sub>3</sub> Br	Brometo de metila	Oceanos
CH <sub>3</sub> I	Iodeto de metila	Oceanos
CO	Monóxido de carbono	Vulcões
SO <sub>2</sub>	Dióxido de enxofre	Vulcões
NO	Óxido nítrico	Relâmpagos

### 3.6. Aerossol Atmosférico

O aerossol é definido como um conjunto de partículas sólidas ou líquidas em suspensão num meio gasoso (HINDS, 1982). Os aerossóis atmosféricos são constituídos por uma mistura de partículas de origem primária (emissão direta da fonte) e secundária (transformação gás – partícula).

Estes elementos podem ter origem natural, como por exemplo, a poeira do solo suspensa pela ação do vento, ou antrópica, como os produtos oriundos da combustão dos veículos e emissões industriais. Estas partículas na atmosfera são removidas principalmente por nuvens e através dos processos de deposição seca ou úmida (CHARLSON & HEINTZENBERG, 1995; YAMASOE, 1999 e McMURRY, 2000).

A deposição seca pode ocorrer por difusão e sedimentação. O processo de difusão ocorre pela agitação térmica da partícula chamada de movimento Browniano. Nesse, as partículas são significativamente menores, variando de  $10^{-8} < D_B < 10^{-4} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ , quando comparadas com o coeficiente de difusão turbulenta que varia de  $10^2 < D_T < 10^5 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ . A dimensão da difusão depende da proximidade com a superfície, como também das condições de estabilidade local da atmosfera, e do tamanho das partículas dos aerossóis. Normalmente a difusão turbulenta é maior que a difusão Browniana (YAMASOE, 1999).

As partículas dos aerossóis apresentam uma distribuição que varia de 0.001 - 100  $\mu\text{m}$  (Tabela 3.3), sendo classificadas pelo seu tamanho. As partículas finas possuem diâmetros menores que 2  $\mu\text{m}$ , e as partículas maiores do que isso são denominadas grossas. As partículas finas normalmente são formadas por processos químicos, como por exemplo, a combustão. As partículas grossas são geradas por processos mecânicos como a ressuspensão da poeira do solo pela turbulência. O material particulado inferior a 10  $\mu\text{m}$  é também classificado como material particulado inalável, que tem por característica penetrar no sistema respiratório humano (YAMASOE, 1999).

As partículas finas interagem principalmente com a radiação solar na região espectral do visível e infravermelho próximo, pois apresentam a mesma ordem de grandeza que o comprimento de onda da radiação incidente.

O tempo de residência das partículas grossas é baixo (partículas maiores que  $15\ \mu\text{m}$ ), apresentando pequenas concentrações na atmosfera, e são removidas principalmente por deposição seca. A interação das partículas grossas com a radiação solar é menor quando comparadas com a das partículas finas, excetuando-se casos de queimadas e tempestades de poeiras (YAMASOE, 1999).

A metade dos compostos orgânicos presentes na atmosfera na fase particulada é formada através das reações dos compostos orgânicos voláteis (COVs) e de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), que ocorrem nas reações do nevoeiro com a fumaça (*smog* fotoquímico) (YAMASOE, 1999).

Um destes compostos orgânicos são hidrocarbonetos que, parcialmente oxidados, incorporam oxigênio para formar os ácidos carboxílicos e o nitrogênio para a formação de nitratos (BAIRD, 2002).

Tabela 3.3: Alguns tipos de materiais particulados (BAIRD, 2002).

TERMOS	DEFINIÇÃO
Poeira	Partículas com as seguintes características secas e sólidas, geralmente formadas por processos de desintegração, como os encontrados em minas, em operações de redução de minério, ou por qualquer processo de atrito sobre material depositado e projetados no ar por forças naturais como o vento, e com uma faixa de $\approx 1 - 100 \mu m$ .
Fumos	Partículas sólidas, formadas a partir de reações químicas como a oxidação, os processos de sublimação ou destilação seguida por condensação. A faixa de tamanho comumente encontrada nas indústrias metalúrgicas correspondem a $\approx 0.01 - 1 \mu m$ .
Fumaça	Aerossol visível resultante da combustão incompleta da matéria orgânica, consistindo de carbono e partículas dispersáveis produzidas por combustão incompleta, a faixa corresponde a $\approx 0.5 \mu m$ .
Neblina	Termo geral aplicado a uma suspensão de gotículas em um gás. A faixa $5 - 40 \mu m$ .
Névoa	Também como neblina, consiste de gotículas líquidas produzida por processos de condensação.
Cinzas	Partículas de cinzas arrastadas em gases combustíveis resultantes da queima do mesmo.
Smog Fotoquímico	Resultado da mistura de ozônio, nitrato de peroxiacetila, aldeídos e outros produtos de oxidação de hidrocarbonetos, óxido de nitrogênio, aerossóis, formados nas atmosferas urbanas altamente poluídas sob as condições de estagnação e alta intensidade solar.
Metais	Existem também como material particulado, associados a minerações, combustão de carvão e usinas siderúrgicas.
Abestos (amianto)	Tipo de material particulado que produz problemas de saúde, associados à sua presença na atmosfera, gerada durante a etapa de mineração do amianto.

### 3.6.1. Radionuclídeos

Na atmosfera e na superfície terrestre são encontrados mais de 60 radionuclídeos naturais, subdivididos em duas categorias: primordiais e cosmogênicos.

Os radionuclídeos de natureza cosmogênica são formados principalmente pela interação dos raios cósmicos com a atmosfera. Uma vez formados podem interagir na forma gasosa com outros componentes da estratosfera, ou mesmo chegar à superfície terrestre através de precipitações, após serem absorvidos por partículas sólidas na atmosfera (Figura 3.13).

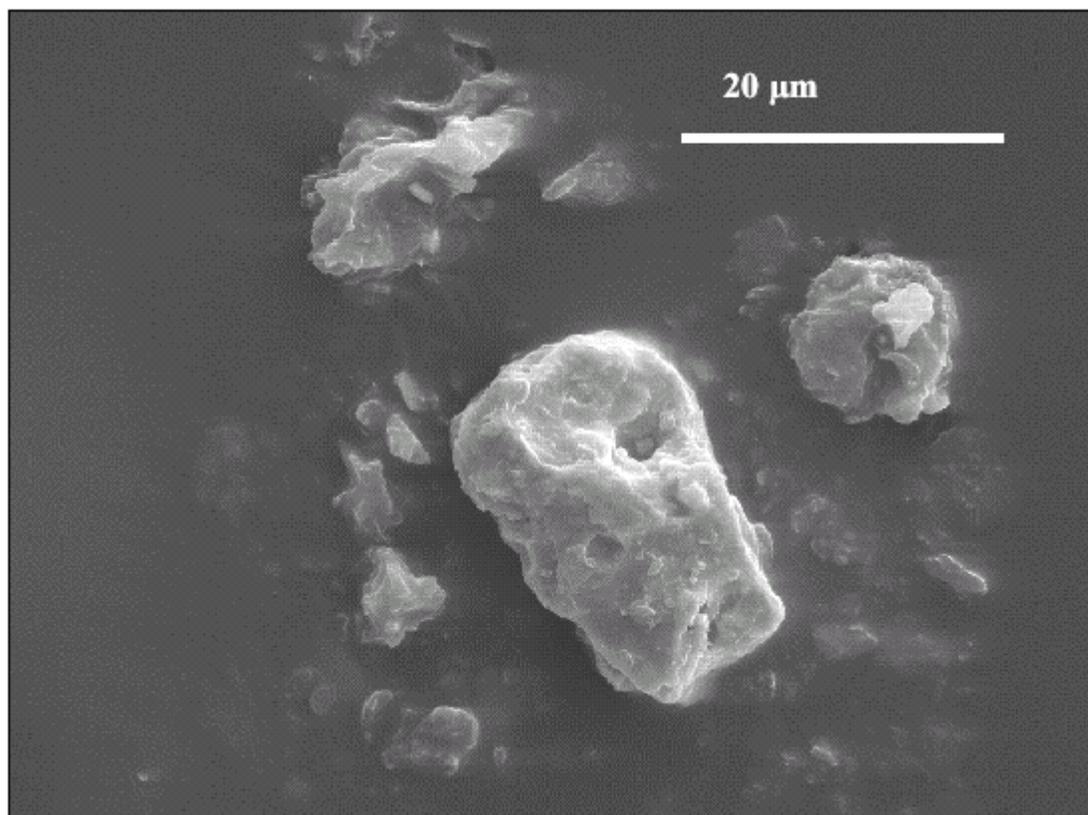


Figura 3.13: Partícula nuclear, detectada em um sedimento marinho (Fonte: PÖLLÄNEN *et al.*, 1997).

Dos inúmeros elementos radioativos formados junto com a Terra, somente alguns possuem uma meia-vida que chega a alcançar séculos e milênios, que são suficientemente longas e capazes de justificar sua presença nos dias atuais, onde neste caso são chamados de radionuclídeos primordiais. Considerando que o planeta Terra foi formado há cerca de  $6 \times 10^9$  anos atrás, este elemento primordial deve possuir uma meia-vida de pelo menos  $10^8$  anos, estando presente na crosta terrestre em quantidades mensuráveis (BUCHMANN, 2000).

Os radionuclídeos primordiais podem ser subdivididos em dois grupos. O primeiro inclui elementos que pertencem às mais variadas posições na Tabela periódica, possuindo a meia-vida comparável à idade da Terra de  $10^9$  a  $10^{15}$  anos (Tabela 3.4) e que se originaram durante o seu processo de formação. A geração de alguns desses radionuclídeos,

como o  $^{138}\text{La}$  e  $^{147}\text{Sm}$ , estão relacionadas à fissão espontânea do urânio. O segundo grupo é formado por radionuclídeos existentes na biosfera, resultantes do decaimento dos isótopos do tório e do urânio (BUCHMANN, 2000).

Tabela 3.4: Características dos radionuclídeos primordiais (adaptado de BUCHMANN, 2000).

Radionuclídeo	Meia – Vida (anos)	Radiação Emitida
$^{40}\text{K}$	$1,26 \times 10^9$	beta (anexo2), gama
$^{50}\text{V}$	$6,00 \times 10^{15}$	beta, gama
$^{87}\text{Rb}$	$4,80 \times 10^{10}$	Beta
$^{115}\text{In}$	$6,00 \times 10^{14}$	Beta
$^{123}\text{Te}$	$1,20 \times 10^{13}$	captura de elétron
$^{138}\text{La}$	$1,10 \times 10^{11}$	beta, gama
$^{142}\text{Ce}$	$> 5 \times 10^{16}$	alfa
$^{144}\text{Nd}$	$2,40 \times 10^{15}$	alfa
$^{147}\text{Sm}$	$1,10 \times 10^{11}$	alfa
$^{149}\text{Sm}$	$> 5 \times 10^{15}$	alfa
$^{154}\text{Gd}$	$1,10 \times 10^{14}$	alfa
$^{174}\text{Hf}$	$2,00 \times 10^{15}$	alfa
$^{176}\text{Lu}$	$2,20 \times 10^{10}$	beta, gama
$^{180}\text{Ta}$	$> 5 \times 10^{15}$	beta
$^{187}\text{Re}$	$4,30 \times 10^{10}$	beta
$^{190}\text{Pt}$	$6,90 \times 10^{11}$	alfa
$^{232}\text{Th}$	$1,40 \times 10^{10}$	alfa, gama
$^{238}\text{U}$	$4,50 \times 10^9$	alfa, gama

Alguns radionuclídeos primordiais, que são considerados os mais importantes e estão presentes na biosfera terrestre, os isótopos de ocorrência natural do urânio são:  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ . A abundância média desses isótopos na natureza é de 0,00548 % (em percentagem atômica) para o  $^{234}\text{U}$ , 0,7200 % para o  $^{235}\text{U}$  e 99,2745% para o  $^{238}\text{U}$  (BUCHMANN, 2000).

Apesar dos radionuclídeos primordiais estarem presentes, suas concentrações variam nas diversas camadas da biosfera. A Tabela 3.5 apresenta os tipos de radionuclídeos naturais possíveis que são encontrados no solo. Para o urânio, sua concentração média na atmosfera em função do processo de ressuspensão do solo é de aproximadamente 0,1

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , enquanto nas águas potáveis corresponde a  $0,15\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , e nos solos varia de 1 a  $5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

Tabela 3.5: Tempo da meia-vida dos radionuclídeos encontrados no solo (BUCHMANN, 2000).

Radionuclídeo	Meia – Vida (anos)	Concentração ( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )
$^{40}\text{K}$	$1,26 \times 10^9$	$2 \times 10^{-2}$
$^{87}\text{Rb}$	$4,80 \times 10^{10}$	$3 \times 10^{-4}$
$^{115}\text{In}$	$6,00 \times 10^{14}$	$1 \times 10^{-7}$
$^{138}\text{La}$	$1,10 \times 10^{11}$	$2 \times 10^{-5}$
$^{176}\text{Lu}$	$2,20 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{-12}$
$^{180}\text{Ta}$	$> 5 \times 10^{15}$	$4 \times 10^{-14}$
$^{187}\text{Re}$	$4,30 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{-9}$
$^{234}\text{U}$	$2,50 \times 10^5$	$8 \times 10^{-11}$
$^{235}\text{U}$	$7,10 \times 10^8$	$7 \times 10^{-9}$
$^{236}\text{U}$	$4,5 \times 10^9$	$5 \times 10^{-6}$
$^{230}\text{Th}$	$8,00 \times 10^4$	$2 \times 10^{-10}$
$^{232}\text{Th}$	$1,40 \times 10^{10}$	$1 \times 10^{-5}$
$^{226}\text{Ra}$	620	$1 \times 10^{-12}$
$^{210}\text{Pb}$	20	$4 \times 10^{-14}$

Um dos aspectos principais sobre a importância do urânio existente na natureza está relacionado com a sua própria característica dentro do ciclo do combustível nuclear, ressaltando que o urânio abastece a maioria dos reatores nucleares.

Sua principal aplicação é para o  $^{235}\text{U}$ , cuja característica deste elemento físsil é de ser utilizado na geração de energia nos reatores e artefatos nucleares. No primeiro caso, a concentração isotópica do  $^{235}\text{U}$  deve elevar-se dos 0,72% naturais para algo em torno de 3%. No segundo caso, para uma massa crítica de 37kg, esta elevação deve chegar em torno dos 60%. Nos dois casos, existe a necessidade de utilização de um processo tecnológico capaz de realizar esta tarefa, ou seja, de enriquecer<sup>5</sup> o urânio natural de seu isótopo físsil de interesse (BUCHMANN, 2000).

<sup>5</sup> É o aumento da concentração isotópica.

Nas instalações onde ocorrem os processos de enriquecimento isotópico, o urânio é tratado na forma de um gás, o hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ). Este gás apresenta a característica de ser altamente higroscópico. Assim, ao reagir com a água, resultará em um composto sólido denominado fluoreto de uranila ( $\text{UO}_2\text{F}_2$ ) (BUCHMANN, 2000).

Existe um extremo cuidado no manuseio do hexafluoreto de urânio no interior das instalações de enriquecimento isotópico, porém, uma pequena fração acaba sendo emanada para a atmosfera, juntamente com pequenas quantidades de  $^{234}\text{Th}$  e de  $^{234}\text{Pa}$ , que são produtos de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . O hexafluoreto de urânio reage imediatamente com a umidade do ar, vindo a coalescer em torno das partículas de poeiras existentes, e posteriormente cair sobre o ecossistema vizinho à instalação (BUCHMANN, 2000).

Deve-se ressaltar que em qualquer tipo de tecnologia de enriquecimento isotópico sempre haverá um mínimo de contaminação do produto no rejeito do elemento, ou na forma de cascata de separação isotópica, e que inevitavelmente escapará para o meio ambiente, principalmente através dos sistemas de exaustão dos gases ou através das dispersões não planejadas. Desta forma, as amostras coletadas nas instalações de enriquecimento isotópico ou nas suas proximidades podem apresentar um urânio antropogênico.

Os principais mecanismos que contribuem para a transferência do urânio para um ecossistema próximo a uma instalação nuclear são primeiramente os transportes atmosféricos e águas superficiais. A identificação da presença de urânio antropogênico nos locais mais afastados em relação à fonte de emissão pode decorrer do transporte, através dos esgotos e drenagens naturais localizadas na superfície ou mesmo dos transportes atmosféricos.

Para o caso específico do urânio, sob o ponto de vista das normas técnicas, as amostras de ar podem ser coletadas a uma distância de 5 a 100 km a partir do ponto de emissão, enquanto amostras de solo e vegetação são significativas apenas em distâncias de 50m a um máximo de 5 km, conforme informações apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Alguns isótopos mais indicados para a detecção das atividades nucleares (Adaptado de BUCHMANN, 2000).

Tipo de amostra	Alcance máximo	Isótopos mais indicados
Ar	5 km – 100 km	$^3\text{H}$ , $^{85}\text{Kr}$ , Pu, $^{241}\text{Am}$ , $^{95}\text{Zr}$ , U
Deposição	50 m – 5 km	$^{129}\text{I}$ , Pu, U
Solo, poeira	50 m – 5 km	$^{90}\text{Sr}$ , $^{95}\text{Zr}$ , $^{95}\text{Nb}$ , $^{106}\text{Ru}$ , $^{129}\text{I}$ , Pu, $^{241}\text{Am}$ , U
Vegetação	50 m – 5 km	$^3\text{H}$ , $^{129}\text{I}$ , $^{95}\text{Zr}$ , $^{95}\text{Nb}$ , U, Pu
Rios	100 km–1000 km	$^3\text{H}$ , $^{125}\text{Sb}$ , $^{129}\text{I}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{237}\text{Np}$ , Pu, $^{241}\text{Am}$
Sedimento fluvial	1000 km	$^{95}\text{Nb}$ , $^{125}\text{Sb}$ , $^{237}\text{Np}$ , Pu, $^{241}\text{Am}$ , Cm
Vegetação fluvial	1000 km	$^{95}\text{Nb}$ , $^{110}\text{Ag}$ , Pu, $^{241}\text{Am}$
Água marinha	5 km	Pu, $^{241}\text{Am}$ , $^{237}\text{Np}$
Sedimento marinho	1000 km	$^{95}\text{Zr}$ , $^{95}\text{Nb}$ , $^{144}\text{Ce}$ , $^{237}\text{Np}$ , Pu, $^{241}\text{Am}$ , Cm
Alga marinha	5 km	Pu, $^{241}\text{Am}$

Ao detectar elevadas concentrações dos elementos no meio ambiente próximo, onde são realizadas as atividades nucleares, caracteriza-se uma forte evidência de uma determinada operação não submetida ao controle de salvaguardas naquele local. Porém, para verificar a existência das operações não compatíveis com os processos de segurança necessita-se de uma combinação das diferentes evidências.

O aumento dos níveis das concentrações de alguns elementos não é conclusivo a menos que esteja combinado com outros fatos. Muitos elementos possuem aplicações industriais legítimas e dispersões acidentais ou planejadas que podem ter ocorrido no passado.

As deposições dos rejeitos radioativos oriundos das instalações industriais podem elevar as concentrações de certos elementos nos solos e na vegetação e as variabilidades das distribuições naturais nas regiões podem ser grandes. A seguir, serão apresentados alguns radionuclídeos utilizados.

O  $^{234}\text{U}$  que é um nuclídeo natural, também enriquecido no processo de separação isotópica. Este elemento corresponde ao produto de decaimento do  $^{238}\text{U}$ . Encontra-se em equilíbrio secular com seu progenitor. Trata-se de um nuclídeo fértil, ou seja, que através de reações nucleares se transforma em um núcleo físsil. Finalizando, o seu

conteúdo em urânio de origem reprocessada é maior do que o encontrado no urânio natural (BUCHMANN, 2000).

O  $^{235}\text{U}$  é o único nuclídeo físsil presente em quantidades significativas no urânio de origem natural. Sua característica físsil significa que pode sofrer uma fissão através da ação de nêutrons (BUCHMANN, 2000).

Finalizando, o  $^{236}\text{U}$  juntamente com o  $^{237}\text{U}$  (meia-vida de 6,75 dias) são nuclídeos artificialmente produzidos por sucessivas capturas de nêutrons a partir da irradiação do  $^{235}\text{U}$ . O  $^{236}\text{U}$  é considerado um “veneno”, devido à sua característica de absorver um nêutron, produzindo o  $^{237}\text{U}$  que rapidamente decai a  $^{237}\text{Np}$ , sendo este não físsil. Possui uma massa atômica situada entre a do  $^{235}\text{U}$  e a do  $^{238}\text{U}$ , fato este que dificulta a tarefa de sua separação isotópica (BUCHMANN, 2000).

Conseqüentemente, o urânio manuseado nas instalações de enriquecimento isotópico por ultracentrifugação na forma de hexafluoreto de urânio ( $\text{UF}_6$ ), pode conter vários isótopos, naturais ou artificiais.

A Tabela 3.7 reproduz as características, sob o ponto de vista isotópico do  $\text{UF}_6$  de origem natural e reprocessado, manipulado em instalações de enriquecimento isotópico de urânio. Ressalta-se que a limitação na concentração isotópica do  $^{235}\text{U}$  (5% percentagem atômica), citada na Tabela 3.7, é apenas para comparações, não implicando numa limitação técnica do processo separativo, permitindo alcançar valores superiores a 90% em uma instalação de enriquecimento isotópico de urânio.

Tabela 3.7: Isótopos de urânio (Adaptado de BUCHMANN, 2000).

<b>Isótopo</b>	$^{232}\text{U}$ ( $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$^{234}\text{U}$ (% em peso)	$^{235}\text{U}$ (% em peso)	$^{236}\text{U}$ (% em peso)
<b><math>\text{UF}_6</math></b>				
Natural	0	0,006	0,711	0
Natural enriquecido	0	0,015 a 0,04	2 a 4	0
<b><math>\text{UF}_6</math></b>				
Reprocessado	0,5 a 5	0,015 a 0,25	0,6 a 1,25	0,2 a 0,7
Reprocessado, enriquecido	2 a 25	0,03 a 0,15	2,5 a 5	0,5 a 2,5

A presença de cada um desses isótopos em um composto de urânio é função de uma série de fatores. O principal motivo para o aparecimento de dois isótopos artificiais é decorrente do  $UF_6$ , sendo oriundo de uma etapa do reprocessamento. A concentração de cada um dos isótopos presentes num dado material pode ser derivada do processo físico a que ele foi submetido na fase de enriquecimento, ou dos tipos de materiais que foram misturados para compor a matéria prima a ser processada (BUCHMANN, 2000).

As razões de abundância isotópica do  $^{235}U$ : $^{238}U$  e  $^{234}U$ : $^{238}U$  podem evidenciar um processo de enriquecimento isotópico de urânio, uma vez que dentro de certos limites mantêm-se constantes na natureza. Já o  $^{236}U$  não existe na natureza. Ele é produzido através da captura de nêutrons pelo  $^{235}U$ . Quando um nêutron atinge o núcleo do  $^{235}U$  forma-se um núcleo composto ( $^{236}U_{92}$ ), que é instável. Este núcleo instável pode então ser estabilizado de diferentes maneiras.

### **3.7. Técnicas para Medir as Concentrações de Poluentes na Atmosfera**

Quando a qualidade do ar é monitorada, a medida de concentração de partículas mais comumente utilizada é o índice MP, o qual representa a quantidade de matéria particulada presente num determinado volume. A matéria envolvida não é homogênea e, portanto, nenhuma massa molecular pode ser atribuída. As concentrações são fornecidas em termos de massa dessas partículas, em detrimento de seu número de mols. As unidades usuais são microgramas de matéria particulada por metro cúbico de ar. Portanto, para as partículas em suspensão como também para os gases existem técnicas específicas para quantificar os diferentes elementos, algumas das quais são apresentadas a seguir.

Para as partículas totais em suspensão é usada a absorção de raios beta. Estes ao passarem através da matéria dependem, sobretudo, da massa a ser analisada. Uma amostra de ar contendo partículas em suspensão é forçada a passar por um determinado período através de um filtro limpo a uma vazão controlada. A leitura de absorção de raios beta é feita no início e no fim de cada ciclo de medição, sendo a diferença de leitura proporcional à massa de partículas retidas no material filtrante. A leitura de massa do filtro é feita continuamente pela variação da frequência de vibração do conjunto filtrante, e, quanto

maior for a quantidade de poeira coletada pelo filtro, menor será a frequência do conjunto (BUCHMANN, 2000).

Para os gases como, por exemplo, para medir óxidos de nitrogênio, recomenda-se à quimiluminescência. Este princípio baseia-se na luminescência gerada pela reação química do NO com O<sub>3</sub> injetado juntamente com a amostra, resultando NO<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>. Uma porção de NO<sub>2</sub> gerada nesta reação retorna ao estado básico, liberando energia luminosa. A intensidade de luz gerada é proporcional à concentração de moléculas de NO contidas na amostra. Após a análise deste elemento, a amostra é passada por um dispositivo que promove a desoxidação do NO<sub>2</sub>. As amostras são reanalisadas e a concentração de NO<sub>2</sub> é obtida através da diferença entre as duas leituras (BUCHMANN, 2000).

No ozônio utiliza-se a absorção de radiação ultravioleta. Esta medição consiste no fato de que o ozônio absorve energia luminosa ultravioleta. Assim, é possível medir a concentração de O<sub>3</sub> presente em uma amostra de ar ambiente. Em suma, corresponde na diferença entre a quantidade de energia luminosa específica emitida por uma fonte, e recebida por um sensor localizado em uma extremidade oposta ao caminho ótico que contém a amostra de ar.

Na medição dos hidrocarbonetos utiliza-se a técnica de detecção de ionização em chama. Isto corresponde ao resultado da energia de alta temperatura proveniente da combustão de compostos orgânicos que são introduzidos numa chama de hidrogênio localizada entre dois eletrodos. Quando uma tensão elétrica é aplicada através desses eletrodos, uma pequena corrente iônica proporcional à concentração de hidrocarbonetos é produzida. Essa corrente é processada gerando o sinal que indica a concentração de hidrocarboneto.

Uma das técnicas nucleares empregadas para determinar o nível de poluição atmosférica é a de análise por ativação neutrônica. Ela utiliza como princípio básico à irradiação de elementos estáveis com nêutrons provenientes de um reator nuclear, formando isótopos radioativos que podem ser detectados por espectrometria alfa, beta e gama. Essa metodologia permite detectar quantidades muito pequenas de elementos existentes na atmosfera, possibilitando a identificação e caracterização de fontes poluidoras (BUCHMANN, 2000).

Ela também pode ser empregada para identificar elementos contaminantes nas embalagens plásticas que são jogadas no lixo. Ao serem incineradas, essas embalagens podem contaminar a atmosfera com metais pesados altamente tóxicos, como o cádmio, através das cinzas que são formadas no processo (BUCHMANN, 2000).

Outra forma de detectar a poluição ambiental é através dos biomarcadores ou biomonitores, que possuem sensibilidade para absorver as alterações na natureza causadas pela ação do homem. Entre os biomonitores estão os líquens, vegetais parecidos com musgos, que se encontram nos troncos das árvores.

### **3.8. Formas de Deposição dos Poluentes**

Para as partículas suspensas na atmosfera existem duas maneiras de alcançarem a superfície do solo, por meio da deposição seca ou úmida. A primeira corresponde ao processo em que os produtos químicos não aquosos são depositados sobre as superfícies. Como exemplo, grande parte do SO<sub>2</sub> gasoso original nunca é oxidada no ar. A sua remoção decorre da deposição seca antes que a reação possa ocorrer, sendo que a oxidação e a conversão deste elemento para ácido sulfúrico ocorre após a deposição.

A deposição úmida ocorre por dois processos: remoção dentro e fora das nuvens (*washout* e *rainout* respectivamente, SEINFELD & PANDIS, 1998). A primeira remoção das partículas é através dos núcleos de condensação de hidrometeoros como, por exemplo, gotas de nuvens, interações eletrostáticas ou agitação térmica. A segunda remoção é abaixo da nuvem, onde os hidrometeoros interceptam as partículas de aerossol durante a precipitação.

Além destes processos de remoção dos aerossóis, estes participam de reações químicas e físicas na atmosfera. Nesta etapa, as partículas podem crescer por colisão e coalescência ou por condensação de vapores, ou mesmo diminuir de tamanho por evaporação de material volátil. A colisão decorre do movimento das partículas que se difundem pela atmosfera, ocasionando colisões umas com as outras, por causa do movimento produzido por forças hidrodinâmicas, eletrostática e gravitacional.

### 3.9. Rejeitos Radioativos

Em uma usina nuclear, o rejeito radioativo corresponde ao material ou substância que se origina da operação da usina e é emissor de radiação em quantidades superiores aos padrões de isenção que são especificados pelo setor regulador e que não seja reaproveitado ou reutilizado. Assim, as emissões e efluentes são substâncias gasosas e líquidas que são resultados do tratamento dado ao rejeito, sendo a concentração de radionuclídeos considerada baixa, o que não justifica um novo tratamento. Para a CNEN, considera-se rejeito radioativo qualquer material resultante de atividades humanas, e que contenha radionuclídeos em quantidades superior aos limites estabelecidos pelas normas CNEN, cuja reutilização é imprópria ou não prevista (CNEN, 2001). Para a CNEN, o rejeito radioativo divide-se em duas situações: a primeira, os rejeitos nucleares, envolve todas as instalações do ciclo do combustível, que se inicia na mineração, seguindo os processos de beneficiamento, conversão e reconversão, as produções de pastilhas e elemento combustível, como o próprio uso nas centrais nucleares e seu armazenamento final. A segunda, os rejeitos radioativos, que são oriundas das demais instalações, como por exemplo, as clínicas odontológicas, hospitais, indústrias e centros de pesquisas. (CNEN, 2001).

Existe toda uma metodologia para garantir a não ocorrência de danos ao homem e ao meio ambiente. O conjunto dos procedimentos é denominado de Gerência de Rejeitos. Primeiramente os rejeitos são separados conforme a sua natureza, como os rejeitos sólidos, compactáveis, não compactáveis, incineráveis, não incineráveis, biológicos e fontes seladas. Os rejeitos líquidos são separados como os orgânicos, inorgânicos, ácidos, alcalinos, inflamáveis e não inflamáveis (CNEN, 2001). Estes procedimentos incluem a coleta, a segregação dos diversos tipos de rejeitos, o tratamento, o armazenamento e a disposição final. A coleta corresponde em colocar os rejeitos nos recipientes específicos. A segregação corresponde à separação física de cada tipo de rejeito no momento da coleta a fim de otimizar o tratamento posterior. Ressalta-se que este procedimento leva em consideração as propriedades química e radiológica de cada material. As classificações utilizadas são pelo estado físico, sólido, líquido, gasoso e o tipo de radiação emitida, e a através da natureza radiológica como, por exemplo: se a atividade é baixa, média ou alta.

Para cada um desses tipos caberá um tipo de blindagem específica. Considera-se também o tipo de meia vida como curta, intermediária e longa. Como exemplo de vida longa o  $^{239}\text{P}$ , pois o seu tempo de meia vida corresponde a 24.000 anos (CNEN, 2001).

### 3.10. Caracterização do Complexo Nuclear e da Região de Estudo

A construção de ANGRA1 foi iniciada em 1972 (Figura 3.14), e a primeira reação em cadeia foi alcançada em 1982. A usina entrou em operação comercial em 1985, após a fase de testes. Desde então, ANGRA 1 já produziu mais de 30 milhões de MWh, energia suficiente, por exemplo, para abastecer uma cidade de 2 milhões de habitantes ao longo deste período (TEIXEIRA, 2002).

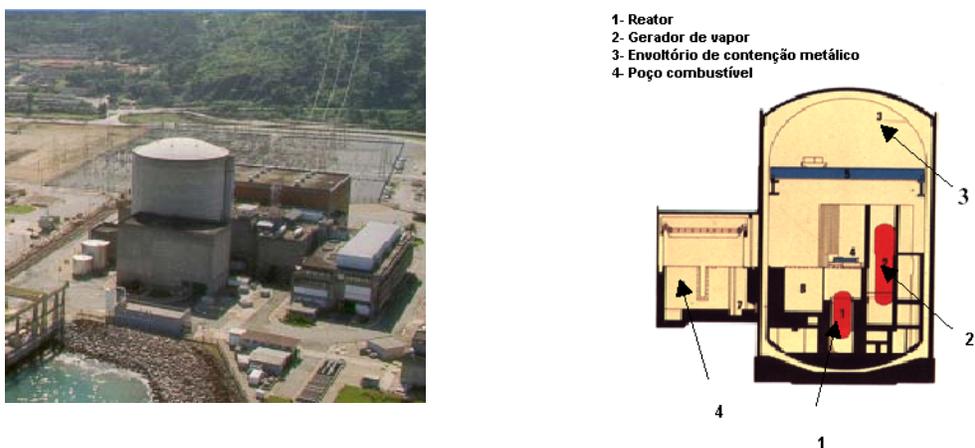


Figura 3.14: Foto aérea de Angra 1 e um desenho da estrutura interna do reator (Fonte: ELETRONUCLEAR).

A escolha do Estado do Rio de Janeiro para instalação da usina Angra 1 está relacionada à economia para sua implementação, uma vez que o município de Angra dos Reis dispõe de grandes quantidades de recursos hídricos para fins de geração de energia, adquirindo importância no planejamento do setor elétrico nacional.

Antes de ser concluída a construção da usina Angra 1, em 1974, a administração federal implementou o programa nuclear brasileiro, com o propósito de disponibilizar uma alternativa a mais para o mercado consumidor de energia elétrica. No

ano de 1975, assinou com a República Federal da Alemanha, o Acordo de Cooperação Nuclear que previa a aquisição de oito reatores nucleares e uma usina de enriquecimento de urânio.

Para tanto, foi criada a Nuclebrás Engenharia S/A – NUCLEN, empresa subsidiária da Empresas Nucleares do Brasil S.A. - NUCLEBRÁS responsável pela complementação do projeto básico, engenharia de detalhamento, gerenciamento de aquisição de equipamentos nacionais, contratação da montagem eletromecânica, de usinas nucleares, sob a supervisão técnica da empresa alemã KWU, subsidiária da Siemens.

Técnicos da NUCLEN – responsáveis pela transferência de tecnologia do projeto nuclear brasileiro e pela garantia e controle da qualidade de nosso setor industrial envolvido também na fabricação dos equipamentos – juntamente com os técnicos da KWU, empresa responsável pela coordenação da execução da usina de Angra 1, fornecedora de equipamentos importados e supervisora de montagem e garantia dos mesmos, uniram-se para instalar duas outras usinas nucleares na mesma enseada de Itaorna, aproveitando a infraestrutura recém implantada para viabilização da usina de ANGRA 1 (Figura 3.15): acesso marítimo e rodoviário, heliporto, moradias, comunicação, suprimento de água, tratamento de esgotos sanitários, serviços médicos, sistemas de coletas de dados meteorológicos, laboratório de monitoração ambiental e linhas de transmissão.



Figura 3.15: Foto aérea do Complexo Nuclear de Angra 1 e 2, e com a montagem de onde ficará localizada Angra 3 (Fonte ELETRONUCLEAR).

As obras para a instalação da usina Angra 2 foram iniciadas em 1976 e desaceleradas em 1985, em consequência de uma série de fatores, sobretudo, a revisão do projeto das fundações, exigência para o seu licenciamento e a diminuição de recursos financeiros.

O progressivo aumento de demanda de energia na região sudeste, retornou as discussões pela continuidade do projeto de conclusão de Angra 2 no início da década de 90. Estudos realizados pela ELETROBRÁS recomendam a sua conclusão com base na avaliação de investimentos já realizados e respectivos custo marginal de expansão do setor elétrico nacional. Em 1993, o Governo Federal, autorizou a retomada de decisões para sua conclusão. A FURNAS Centrais Elétricas S/A promoveu a realização de concorrência para contratação de montagem eletromecânica de Angra 2.

A concretagem dos prédios de ANGRA 2 chegou a 95% em 1996, quando foram firmados contratos com o consórcio UNAMON para a execução da montagem eletromecânica, tanto da parte nuclear quanto da convencional. Após a conclusão da avaliação de todos os sistemas da usina, a cargo da CNEN, foi por esta concedida a licença

para a criticalização da usina, em 14 de julho de 2000 e posteriormente em 21 de julho de 2000, ANGRA 2 foi finalmente sincronizada à rede elétrica com potência de 150MW.

Para enfrentar a crise energética brasileira, o setor eletronuclear nacional apresentou como alternativa para a matriz energética o desenvolvimento e a construção das instalações da usina de Angra 3. Ainda que esta usina não tenha sido concluída, o setor energético nacional argumenta a compra da maioria dos equipamentos necessários, a conclusão de 30% das obras preparatórias e a remota possibilidade de ocorrerem riscos nucleares. Esclarece que nos últimos quarenta e quatro anos ocorreram apenas dois acidentes sérios (serão apresentados posteriormente), decorrentes de falhas humanas que promoveram medidas de segurança capazes de evitar a repetição dos danos.

É oportuno ressaltar, a atual tendência mundial de maximizar os riscos de geração de energia nuclear e minimizar a geração de energia elétrica por outras fontes. A usina nuclear apresenta as seguintes peculiaridades:

- não exige o alagamento de grandes superfícies, conseqüentemente, não causam danos maiores à biodiversidade da fauna e flora;
- não emitem CO<sub>2</sub> na atmosfera;
- não produzem óxidos de nitrogênio (NOx), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e oxidantes que provocam chuvas ácidas;
- a formação de compostos orgânicos voláteis de hidrocarbonetos não queimados e materiais particulados, ao serem minimizados, pode diminuir os possíveis problemas climáticos (efeito estufa) e ambientais.

### **3.10.1. Aspectos Geográficos**

O município de Angra dos Reis está localizado na Costa Verde Fluminense, região da Baía da Ilha Grande, Sul do Estado do Rio de Janeiro (23°00'24"S e 44°19'05"W), abrangendo uma área de 819 km<sup>2</sup>, distribuída da seguinte forma: 645 km<sup>2</sup> no continente e 174 km<sup>2</sup> de ilhas e ilhotas banhadas por águas claras, nas quais respectivamente centenas de pousadas atraem a cada ano turistas de diversas nacionalidades e cuja demanda é cada vez mais crescente durante o verão. Encontra-se distante 190 km do

centro da cidade do Rio de Janeiro e aproximadamente 400 km do centro da cidade de São Paulo (MATTOS, 1993).

Suas principais vias de acesso são a rodovia federal BR-101 (Rio-Santos), a rodovia estadual RJ-155 (Angra/Lídice) e as rodovias municipais: Contorno, Marinas, Monsuaba e Aquidabã. A Ferrovia Centro-Atlântica é a responsável pelo transporte de minérios de Volta Redondos (CSN) para o porto de Angra dos Reis (MATTOS, 1993).

O espaço geográfico do Complexo Nuclear de Angra dos Reis apresenta peculiaridades de topografia acentuada e vegetação, associados à sua proximidade do Oceano Atlântico. Tais circunstâncias propiciam condições micrometeorológicas bastante complexas que também podem influenciar nos sistemas de mesoescala (MATTOS, 1993).

Sua geomorfologia é composta pelo Planalto da Bocaina, que corresponde a um bloco montanhoso basculado em direção ao litoral. Na superfície do Planalto há morros arredondados. De modo geral as encostas têm fortes declividades. Na parte superior a rocha aflora, na parte intermediária encontra-se uma fina camada coluvial e no sopé o colúvio é mais espesso. A drenagem apresenta forte controle estrutural, é profunda e apresenta segmentos retilíneos que acompanham as linhas de fraturas, em geral perpendiculares à direção geral da escarpa. Nas maiores baixadas surgem morros isolados com encostas convexas e altitudes menores do que 100 m e, às vezes, formam depósitos coluviais espessos no contato com a planície. O litoral é recortado, com pontões rochosos intercalados por baixadas que geralmente apresentam sedimentos marinhos, fluviais e coluviais, de jusante para montante (MATTOS, 1993). A topografia da região de estudo é mostrada na Figura 3.16.

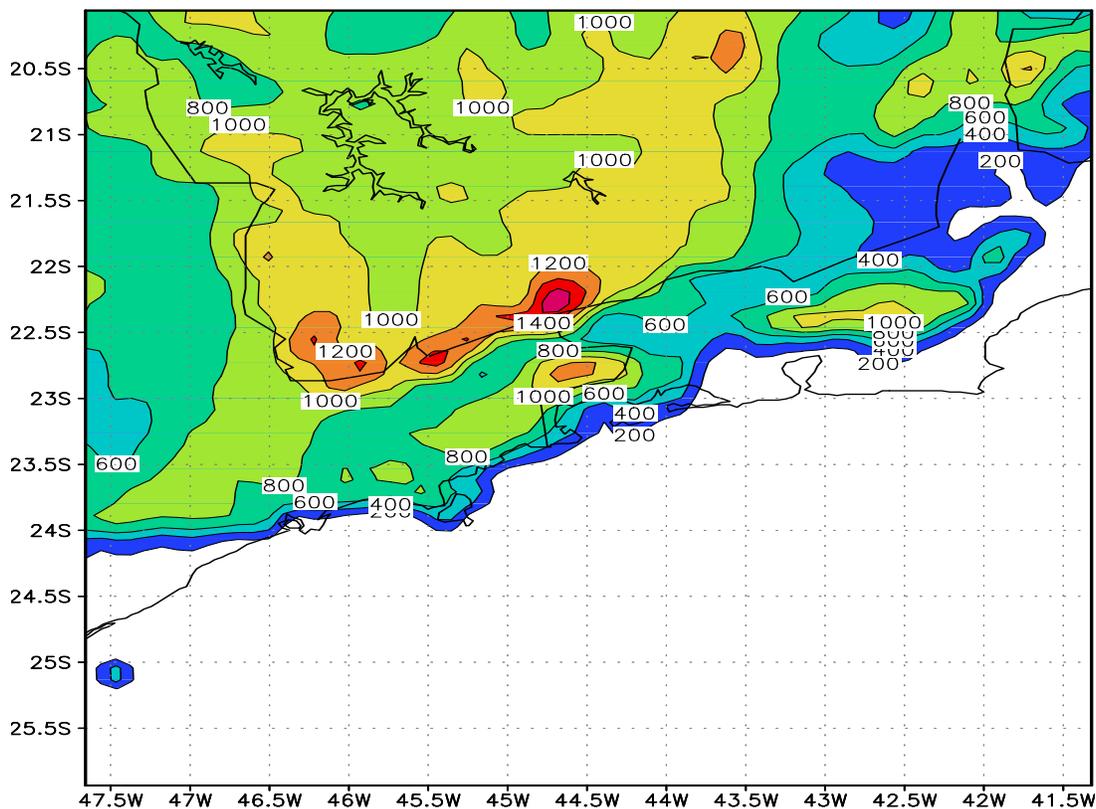


Figura 3.16: Topografia da região (Gerada pelo modelo RAMS).

Nesta região os rios são de pequena extensão, nascem no planalto ou nas escarpas da Serra do Mar. Apresentam regime torrencial com picos de vazão acentuados no verão e reduzidos no inverno. A bacia hidrográfica do rio Mambucaba, com 58 km de extensão, inicia-se no planalto a 2000 m de altitude. Apresenta um padrão de drenagem retilíneo, devido ao controle estrutural. Os demais rios que se destacam são: Ariró, Jurumirim, Bracuí, Florestão, Floresta, Japuiba, dentre outros (KRONENBERGER & CARVALHO, 1999).

### 3.10.2. Aspectos Climáticos

O complexo nuclear de Angra dos Reis está localizado na praia de Itaorna, dentro da Baía da Ilha Grande. Em função da sua proximidade com o mar, fica bem caracterizado que o regime de ventos segue o ciclo diurno na região de estudo bem como

em seu entorno. Em outras palavras, o efeito das brisas fica definido em função das trocas de energia da atmosfera com o oceano e a topografia da região.

Na região de Angra dos Reis, existem elementos específicos que permitem caracterizar o clima como tropical em função da latitude, de insolação (contrastes térmicos) e influência do mar. Esses elementos, associados à topografia, contribuem para induzir as circulações locais, tais como as brisas. Dessa maneira, nas faixas litorâneas da região de estudo, as circulações de brisa marítima são praticamente perpendiculares às linhas da costa. Estudos realizados por PAIVA *et al.*, (1998), para diagnosticar e caracterizar o clima da região de Angra dos Reis, utilizando a metodologia de classificação climática de Thornthwaite e Mather, demonstram, que, nas últimas décadas, o clima dessa região passou de mesotérmico para megatérmico (Tabela 3.8).

Tabela 3.8: Classificação Climática (Adaptado de PAIVA *et al.*, 1998).

Normais Climatológicas	Tipo Climático	Vegetação Associada
N1 (1931 – 1960)	Mesotérmico	Floresta Temperada Úmida
N2 (1961 – 1990)	Megatérmico	Floresta Tropical Úmida

Portanto, o clima atual de Angra dos Reis pode ser classificado como megatérmico úmido, com precipitação em todas as estações do ano, associado à floresta tropical úmida.

O mês mais quente corresponde a fevereiro, conforme as normais climatológicas de temperaturas médias (Figura 3.17). As temperaturas máximas e mínimas registradas em Angra dos Reis são apresentadas respectivamente nas Figuras 3.18 e 3.19. Observa-se na Figura 3.19, que se verificou que o mês mais frio é junho. Os meses mais chuvosos são dezembro, janeiro, fevereiro e março, com valores normais de: 265,0; 276,4; 240,2 e 237,1 mm. Os meses mais secos correspondem a junho, julho e agosto, com valores normais respectivamente iguais a 78,3, 76,2 e 78,2 mm (Figura 3.20).

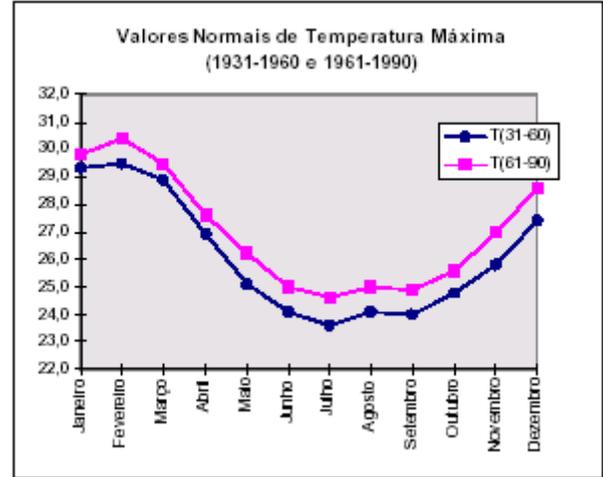
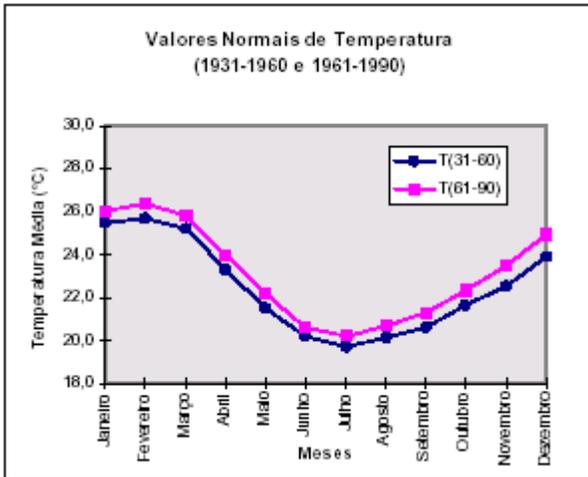


Figura 3.17: Normais climatológicas das temperaturas médias (Adaptado de PAIVA *et al.*, 1998).

Figura 3.18: Normais climatológicas das temperaturas máximas (Adaptado de PAIVA *et al.*, 1998).

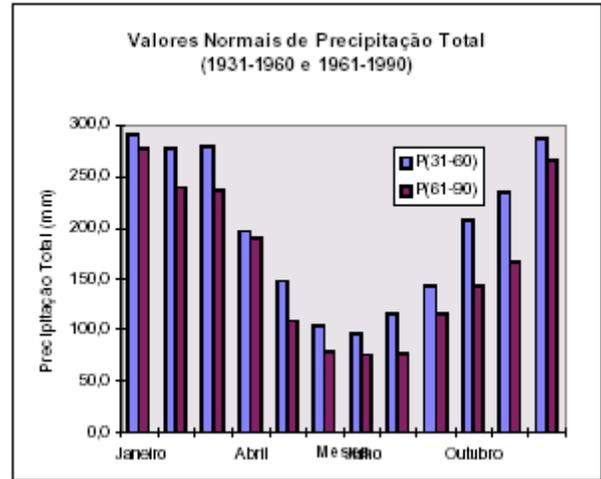
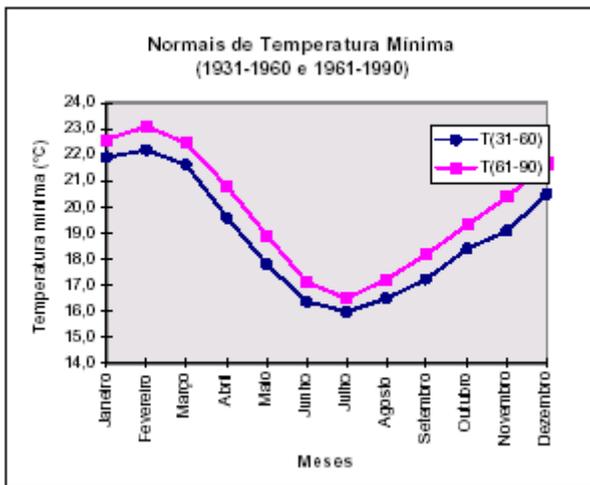


Figura 3.19: Normais climatológicas das temperaturas mínimas (Adaptado de PAIVA *et al.*, 1998).

Figura 3.20: Normais climatológicas do total de precipitação (Adaptado de PAIVA *et al.*, 1998).

Porém, se reutilizar a classificação climática de Köppen, dentro de um raio de cerca de 80km em torno do complexo nuclear, são encontrados os seguintes climas:

- Clima quente e úmido sem estação seca do tipo Af, na área costeira entre Mangaratiba e o litoral paulista, local da central CNAEA.

É importante ressaltar que, na região de Angra dos Reis, estão presentes fatores geográficos que conduzem a formação do clima tropical. São eles: latitude, insolação intensa e a quantidade de água para os processos de evapotranspiração.

Estudos desenvolvidos por Nicolli em 1992, relacionados ao comportamento da rosa dos ventos na cidade de Angra dos Reis, no período de 1951 a 1982, demonstram a frequência de calmarias com mais de 74% e direções dos ventos que não obedecem ao padrão da circulação global. Esse padrão atípico pode ser encontrado em Itaorna no complexo nuclear.

# CAPÍTULO IV

---

## METODOLOGIA E MODELAGEM

### 4.1. Reanálises

O *National Centers for Environmental Prediction* e o *National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) participaram em conjunto, desde 1989, do projeto denominado de Reanálises (KALNAY *et al.*, 1996 e 1998). O objetivo inicial consistia no desenvolvimento do Sistema de Assimilação de Dados Climáticos (CDAS) e na melhoria dos sistemas operacionais de previsão numérica do tempo para melhoria dos resultados.

Inicialmente, o *European Center for Medium Range Weather Forecasting* (ECMWF) e NCEP realizaram uma revisão de todos os registros armazenados do sistema de rede de observações. Essa revisão consistiu em analisar os dados obtidos através do monitoramento global das observações diárias de superfície desde 1948. Os registros das observações são relacionados com as previsões feitas pelas reanálises. No Hemisfério Sul, suas observações, a serem usadas nas reanálises, começaram primeiramente na Antártida e posteriormente na América Sul em 1957. Porém, as primeiras sondagens realizadas por satélites ao redor da Terra começaram em abril de 1969 e foram também utilizadas nas reanálises do NCEP/NCAR desde então. Através das reanálises, foi possível obter e processar muitas séries de dados obtidos das diferentes observações realizadas, que foram feitas durante o período de 1948 até os dias de hoje (JENNE, 1999). A Tabela 4.1 apresenta alguns dados que são documentados pelas reanálises.

Tabela 4.1: Dados obtidos pelas reanálises (KALNAY, *et al.*, 1996).

Descrição dos Campos	Nome	Unidades	Níveis Verticais
Componente do Vento Zonal	U	m/s	Todos
Componente do Vento Meridional	V	m/s	Todos
Velocidade do Vento Horizontal	VMAG	m/s	Todos
Vorticidade Relativa	VOR	1/s	Todos
Divergência Relativa	DIV	1/s	Todos
Altura do Geopotencial	ZA	m	Todos
Temperatura	T	K	Todos
Umidade Relativa do Ar	RH	%	Todos
Umidade Específica do Ar	Q	kg/kg	Todos
Pressão à Superfície	PS	Pa	Superfície
Pressão ao Nível do Mar	PMSL	Pa	Superfície
Água Precipitável	PWAT	Kg/m <sup>2</sup>	Todos
Energia Cinética Específica	KE	J/kg	Todos

Finalizando as reanálises, usa a técnica denominada de interpolação estatística espectral que permite eliminar as mudanças climáticas de curta duração ou variabilidade climática interanual. Essas alterações surgem devido às diversas modificações que são introduzidas nos sistemas de assimilação de dados globais. As reanálises são disponibilizadas em uma grade com espaçamento de 2,5 graus de latitude e longitude e 17 níveis isobáricos.

## 4.2. Modelo RAMS

O modelo atmosférico - RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) teve origem no Departamento de Ciências Atmosféricas Universidade Estadual do Colorado, a partir de um modelo de microescala, cujo objetivo era analisar os processos de microfísica de nuvens, e um modelo de mesoescala, ambos desenvolvidos na década de 70. A equipe de pesquisadores foi coordenada por Craig Tremback e Robert L. Walko (TRIPOLI &

COTTON, 1982). Concluiu-se que a unificação desses códigos, mantendo-se os atributos originais de cada um, facilitava mais efetivamente a pesquisa científica.

Em 1986, os dois modelos foram acoplados em um único código de simulação numérica do tempo. Dois anos mais tarde, a primeira versão do RAMS foi lançada e, em outubro de 1995, foi apresentada a versão 3b. Atualmente, são utilizadas as versões 4.3 e 4.4 por diversos centros de previsões, instituições de pesquisa e universidades.

O RAMS consiste basicamente em três etapas: análise e preparo de dados iniciais de observações, elaboração de simulações simultâneas da atmosfera, visualizações e análise de dados para pós-processamento. O RAMS é um modelo numérico de área limitada, podendo sua configuração inicial ser alterada, abrangendo uma escala maior ou mesmo parte de um hemisfério, assim pode ser configurado para simular sistemas atmosféricos de mesoescala e de grande escala, e se caso ajustado pode ser também utilizado para a microescala. Existe o sistema de aninhamento de grades, que é baseado no método de grades iterativas de CLARK & FARLEY (1984), o RAMS possui a habilidade para representar a larga escala, e então se aninha progressivamente para escalas menores. Mais do que uma grade aninhada pode ser utilizada dentro da grade de grande escala.

A técnica de *downscaling*, que consiste na redução de escalas, permitiu que as informações das escalas maiores passassem para as escalas menores e vice-versa com o aninhamento *two-way*.

O RAMS é utilizado operacionalmente nas universidades, centros de pesquisas e na previsão do tempo. Basicamente, a estrutura do RAMS compõe-se das equações primitivas da dinâmica da atmosfera. O modelo foi desenvolvido dentro do formalismo de diferenças finitas para obter a solução numérica, estando escrito, quase que exclusivamente na linguagem computacional FORTRAM 90. O código é dividido em módulos funcionais, de maneira que a evolução temporal das quantidades físicas que são simuladas, é obtida através do acúmulo da contribuição individual do processo físico presente. Embora seja um modelo complexo, permite a realização de algumas parametrizações conforme a área de pesquisa: calor sensível e latente, radiação solar e terrestre, interação de nuvens, convecção de cúmulos, difusão turbulenta, interações com as diferentes camadas do solo e cobertura vegetal e superfície do mar são as parametrizações utilizadas pelo modelo. A maioria dos

parâmetros de entrada do modelo é, definida através do arquivo (*namelist*) denotado de RAMSIN. A Tabela 4.2 apresenta algumas características específicas do RAMS.

Tabela 4.2: Algumas características e opções para utilização do modelo RAMS.

Equações básicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Não hidrostático compressível (TRIPOLI &amp; COTTON, 1980)</li> <li>• Hidrostático compressível ou não (TREMBACK <i>et al.</i>, 1985)</li> </ul>
Dimensão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2D ou 3D</li> </ul>
Coordenada vertical	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sigma – Z</li> </ul>
Coordenada horizontal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Padrão cartesiano</li> <li>• Polar estereográfica</li> </ul>
Estrutura da grade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grade C de Arakawa.</li> <li>• Número ilimitado de grades aninhadas.</li> <li>• Número ilimitado dos níveis de aninhamentos (refinamento).</li> </ul>
Diferenças finitas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O passo de tempo de diferenças centradas para diante ou para trás na advecção.</li> </ul>
Turbulência	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de Smagorinsky coeficiente de viscosidade turbulenta.</li> <li>• Prognóstico da energia cinética turbulenta</li> </ul>
Condensação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pontos de grade inteiramente saturada ou insaturado</li> <li>• Não condensação</li> </ul>
Microfísica de nuvens	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A conversão da chuva morna, a nuvem de água em pingos de chuva, e evaporação e sedimentação (TRIPOLI &amp; COTTON, 1980).</li> <li>• Nucleação de cristais de gelo, crescimento de cristais de gelo, evaporação, derretimento e sedimentação.</li> <li>• Dissipação da concentração, da conversão e do crescimento de cristal agregados, derretimento, evaporação e sedimentação.</li> <li>• Nenhum processo de precipitação</li> </ul>
Radiação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O modelo da radiação da onda curta inclui o espalhamento molecular, transmitância, absorção do ar, o nível da camada de mistura (STEPHENS, 1977)</li> <li>• O modelo da radiação de onda curta MAHRER &amp; PIELKE (1977)</li> <li>• Radiação de onda longa descrita por MAHRER &amp; PIELKE (1977)</li> </ul>
Transporte e Difusão	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Advecção – difusão (SEGAL <i>et al.</i>, 1980)</li> </ul>

É importante ressaltar, que a solução numérica do conjunto de equações do modelo RAMS, deve passar por uma análise de escalas adequadas para que tipo de sistema deseja-se realizar a pesquisa, permitindo assim, simplificações dessas equações. O processo do contínuo, espaço – tempo são discretizados em uma malha de espaçamentos  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  e  $\Delta t$  e são realizado, em qualquer variável dependente de  $\phi(x, y, z, t)$  podendo ser decomposta utilizando o procedimento de Reynolds.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (4.1)$$

onde  $\bar{\phi}$  é:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot \Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_x^{x+\Delta x} \int_y^{y+\Delta y} \int_z^{z+\Delta z} \phi dz dy dx dt \quad (4.2)$$

onde  $\bar{\phi}$  corresponde o valor médio de  $\phi$  no intervalo de tempo  $\Delta t$  e dos intervalos nos espaços  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , deve ser lembrado que esses são os espaçamentos da grade, e  $\phi'$  representa o desvio da quantidade  $\phi$  de sua média, que são associados aos processos que não são resolvidos explicitamente das sub grades. Logo, várias propriedades são consideradas para o operador da Equação 4.2:

$$\begin{aligned} \overline{\phi'} &= 0 \\ \overline{\bar{\phi}} &= \bar{\phi} \\ \overline{\left( \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right)} &= \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x_i}, \text{ para } x_i = x, y, z, t \\ \overline{\phi' \chi} &= 0 \\ \overline{\frac{\partial \phi'}{\partial t}} &= 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Assim, o procedimento de Reynolds é aplicado ao conjunto das equações simplificadas, e gera um outro conjunto de equações que são expressas em termos das

médias e dos desvios das quantidades dependentes. No modelo RAMS 4.3 conforme TRIPOLE & COTTON (1982), a variável resolvida  $\bar{\phi}$  é decomposta da seguinte maneira:

$$\bar{\phi} = \phi_0 + \phi_m \quad (4.4)$$

ao considerar que o valor inicial do estado básico da atmosfera  $\phi_0$ , que é obtida através de uma média em relação a  $\phi$  em uma escala maior que a escala em estudo e  $\phi_m$  corresponde ao desvio associado a mesoescala. Lembrando que o estado básico é horizontalmente homogêneo e seco, devido as seguintes leis: do gás ideal, equilíbrio hidrostático e essas, devem estar em balanço geostrófico, logo o estado médio pode ser representado a seguir:

Lei do gás ideal:

$$\bar{p} = \bar{\rho}_m (1 + 1.61 \bar{r}_v) R \bar{T} \quad (4.5)$$

Equação de Poisson:

$$\bar{T} = \bar{\theta} \left( \frac{\bar{p}}{\bar{p}_\infty} \right)^{\frac{R}{C_p}} \quad (4.6)$$

Temperatura potencial  $\theta$  e temperatura potencial da água líquida e gelo:

$$\bar{\theta} = \bar{\theta}_{il} \left[ 1 + \frac{L_{lv} \bar{r}_{liq} + L_{iv} \bar{r}_{ice}}{C_p \max(\bar{T}, 253)} \right] \quad (4.7)$$

A Equação da termodinâmica em função da temperatura potencial da água líquida e gelo corresponde:

$$\frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} = \left( \frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} \right)_{adv} + \left( \frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} \right)_{turb} + \left( \frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} \right)_{con} + \left( \frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} \right)_{rad} + \left( \frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} \right)_{microf} \quad (4.8)$$

A Equação do momento utilizando a notação tensorial:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right)_{adv} + \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} \right)_{turb} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}_m}{\partial x_i} - \left( \frac{\bar{\rho}_m}{\rho_0} + \bar{r}_T \right) g \delta_{i,3} + \varepsilon_{ijk} f_k \bar{u}_i \quad (4.9)$$

A Equação da continuidade para a atmosfera:

$$\frac{\partial \bar{\rho}_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_0 \bar{u}_i) = 0 \quad (4.10)$$

Equação da continuidade para a água total:

$$\frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} = \left( \frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} \right)_{adv} + \left( \frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} \right)_{turb} + \left( \frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} \right)_{microf} + \left( \frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} \right)_{con} \quad (4.11)$$

Lembrando que: *turb*, *rad*, *microf*, *adv*, *con* representam as contribuições do transporte turbulento na camada limite, convergência de radiação, parametrização de microfísica, advecção na escala resolvível e transporte convectivo na escala não resolvível.

A taxa de variação local de um escalar ( $\xi$ ) em função do transporte advectivo na escala resolvida é:

$$\left( \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t} \right)_{adv} = -\bar{u}_i \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x_i} \quad (4.12)$$

onde  $\bar{u}_i$  é o componente  $i$  da velocidade média do vento, e  $\bar{\xi}$  corresponde o valor médio do escalar. A Equação 4.12 ao ser reescrita na forma de fluxo para se ter conservação de massa e energia:

$$\left(\frac{\partial \bar{\xi}}{\partial t}\right)_{adv} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_0 \bar{u}_i \bar{\xi}) + \frac{\bar{\xi}}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_0 \bar{u}_i) \quad (4.13)$$

onde  $\rho_0$  é a densidade do ar no estado básico.

É importante ressaltar, que ao utilizar o RAMS 4.3 nesse trabalho utilizou-se dos esquemas numéricos híbrido e esse, corresponde ao esquema de diferenças centradas (*leapfrog*) para a advecção das componentes do vento e o esquema para adiante (*upstream*) para os escalares. A discretização da Equação 4.13 somente para a componente  $x$  que será demonstrado a seguir:

$$\left(-\bar{u} \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x}\right)_j \approx -\frac{1}{\rho_{0j} \Delta x} \left[ \left( (\rho_0 F)_{j+\frac{1}{2}} - (\rho_0 F)_{j-\frac{1}{2}} \right) - \bar{\xi}_j \left( (\rho_0 \bar{u})_{j+\frac{1}{2}} - (\rho_0 \bar{u})_{j-\frac{1}{2}} \right) \right] \quad (4.14)$$

onde  $F = \bar{u} \bar{\xi}$  corresponde ao fluxo do escalar  $\bar{\xi}$  na direção  $x$ , o índice  $j$  denota a posição do ponto de grade onde os valores estão sendo tomados, e  $\Delta x$  espaçamento da grade na direção apresentada. Para representar o esquema para adiante, é usada uma aproximação de segunda ordem, assim o fluxo  $F$  fica:

$$F_{j+\frac{1}{2}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \left[ \frac{\alpha}{2} (\bar{\xi}_j + \bar{\xi}_{j+1}) + \frac{\alpha^2}{2} (\bar{\xi}_j - \bar{\xi}_{j+1}) \right] \quad (4.15)$$

onde  $\Delta t$  é o passo de tempo do modelo, e  $\alpha = \bar{u}_{j+\frac{1}{2}} \Delta t / \Delta x$ . Para a advecção de momento é utilizado o esquema de diferenças centradas de segunda ordem, onde os fluxos são:

$$F_{j+\frac{1}{2}} = (\bar{u} X)_{j+\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

### 4.2.1 Parametrização dos Processos de Difusão Turbulenta

O RAMS 4.3 apresenta 4 formas distintas para parametrizar a difusão turbulenta: deformação horizontal e vertical conhecida como MELLOR & YAMADA (1982), deformação isotrópica, o método de Deardorff desenvolvido em 1980, deformação anisotrópica que será apresentada a seguir. Essa última parametrização apresenta uma característica especial, pois atende as configurações cuja resolução horizontal é muito menor que a vertical. Nesse caso, a contribuição do transporte não resolvido pela escala do modelo, a tendência das variáveis prognosticada nessa escala é representada através da convergência do fluxo turbulento:

$$\left( \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial t} \right)_{turb} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (\rho_0 \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_i} \quad (4.17)$$

e

$$\left( \frac{\partial \overline{\xi}}{\partial t} \right)_{turb} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (\rho_0 \overline{u'_i \xi'})}{\partial x_i} \quad (4.18)$$

onde  $\overline{u'_i u'_j}$  é o fluxo turbulento que transporta o momento  $u'_j$  através do momento  $u'_i$ ,  $\overline{u'_i \xi'}$  é o fluxo turbulento transportando o escalar  $\xi$  através do momento  $u'_i$ . Deve ser lembrado, que os fluxos turbulentos são parametrizados utilizando a teoria  $K$  (teoria do fluxo gradiente). Essa teoria constitui um fechamento de primeira ordem, onde os fluxos turbulentos são proporcionais aos gradientes locais da correspondente quantidade média transportada. Os fluxos turbulentos de momento nessa parametrização, ou denominado tensor de Reynolds são:

$$\overline{u'_i u'_j} = -K_{mij} \left( \overleftrightarrow{D} \right)_{ij} \quad (4.19)$$

onde  $K_{mij}$  é denominado coeficiente de difusividade turbulenta para o momento  $i$  na direção  $j$ . A representação física desse tensor:

$$\overline{u'_i u'_j} = \overline{u'_j u'_i} \quad (4.20)$$

assim, essa simetria leva a seguinte igualdade:

$$K_{mij} = K_{mji} \quad (4.21)$$

logo, a expressão do gradiente da quantidade média transportada:

$$\left( \overset{\leftrightarrow}{D} \right)_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (4.22)$$

onde é denotado o componente  $i, j$  do tensor de deformação média. Assim, os fluxos turbulentos dos escalares podem ser representados dentro dessa maneira:

$$\overline{u'_i \xi'} = -K_{\xi i} \frac{\partial \bar{\xi}}{\partial x_i} \quad (4.23)$$

lembrando que  $K_{\xi i}$  representa o coeficiente de difusidade para o escalar  $\xi$  na direção  $i$ . Conforme a discussão documentada do RAMS 4.3 que está no DRAF, mostra que se o espaçamento da grade horizontal é muito maior que a vertical, assim nesse caso, não há necessidade de manter a simetria dos tensores de Reynolds entre as direções horizontal e vertical. Mas, como devem ser consideradas as razões de estabilidade numérica, logo será necessário valores para que os coeficientes de difusidade na horizontal sejam mais elevados que na vertical nessas configurações da grade. Dentro dessa maneira, o coeficiente de difusidade para o momento horizontal:

$$K_{mij} = K_{mh} \quad (4.24)$$

Para a direção vertical o fluxo turbulento de momento é:

$$\overline{u'_i u'_j} = -K_{mv} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \quad (4.25)$$

onde  $i$  e  $j=3$  e nesse caso existe um único coeficiente de difusidade de momento na vertical  $K_{mv}$ . Porém, para os escalares os coeficientes possuem somente distinção nas direções vertical ( $K_{\xi_v}$ ) e horizontal ( $K_{\xi_h}$ ) não importa o tipo de escalar que está sendo transportado, energia ou massa.

Para SMAGORINSKY (1963), a parametrização de deformação anisotrópica calcula os coeficientes de difusidade na horizontal, onde relaciona os coeficientes com a taxa de deformação do fluido. Como o coeficiente de difusidade momento na horizontal é:

$$K_{mh} = (cs_x \Delta x)^2 |D_h| \quad (4.26)$$

onde  $\Delta x$  é o espaçamento de grade na horizontal, o qual é assumido como sendo o comprimento da mistura, ou seja corresponde ao tamanho do maior turbilhão não resolvido,  $cs_x$  é um coeficiente de ajuste previamente calibrado, e  $|D_h|$  é a magnitude do tensor de deformação na horizontal que corresponde :

$$|D_h| = \sqrt{2 \left( \frac{\partial \overline{u}}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial \overline{v}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \overline{v}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u}}{\partial y} \right)^2} \quad (4.27)$$

o coeficiente tem um valor mínimo dado por:

$$K_{mh_{\min}} = 0.075 K_a (\Delta x)^{4/3} \quad (4.28)$$

e  $K_a$  é definido pelo usuário, e corresponde da ordem 1.

O pesquisador Lilly no ano de 1962, inclui no cálculo do coeficiente de difusidade na vertical uma dependência da estabilidade atmosférica através do número de

Richardson, enquanto que Hill no ano de 1974 modificou a formulação de Smagorinsky, e incluiu a contribuição da convecção na produção da turbulência (HILL, 1974). Assim, baseando nessas pesquisas, o coeficiente de difusidade de momento na vertical é parametrizado por:

$$K_{mv} = (cs_z \Delta z)^2 [ |D_v| + H(N) ] f(Ri) \quad (4.29)$$

onde  $Ri$  é o número de Richardson,  $\Delta z$  é o espaçamento de grade na direção vertical, deve ser ressaltando que corresponde ao tamanho do maior turbilhão na escala não resolvida,  $cs_z$  corresponde ao coeficiente de ajuste normalmente é pré-calibrado, o termo  $|D_v|$  é a magnitude do tensor deformação na vertical que é obtida:

$$|D_v| = \left[ \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.30)$$

Para calcular  $H(N)$  da Equação 4.29 que é a contribuição da convecção na produção de turbulência expressa em termos da frequência de Brunt-Vaisala:

$$N^2 = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \quad (4.31)$$

obtem-se:

$$H(N) = \sqrt{\max[0, N^2]} \quad (4.32)$$

logo, se intensificando a turbulência apenas em uma situação de estratificação instável, o termo  $f(Ri)$  da Equação 4.29 resulta em:

$$f(Ri) = \sqrt{\max\left[0, 1 - \frac{K_{hv}}{K_{mv}} Ri\right]} \quad (4.33)$$

ao observar a Equação 4.33 a relação  $\frac{K_{hv}}{K_{mv}}$  é a razão entre o coeficiente de difusividade de calor e momento, e nesse caso é especificado pelo usuário, assim  $Ri$ :

$$Ri = \frac{g \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}}{|D_v|^2} \quad (4.34)$$

da Equação 4.32 se  $f(Ri)=0$ , para:

$$Ri \geq \frac{1}{\frac{K_{hv}}{K_{mv}}} \quad (4.35)$$

Lembrando que os coeficientes de difusividade de escalares são calculados em função dos respectivos coeficientes de momento usando as seguintes relações:

$$K_{\xi v} = 3K_{mv} \quad (4.36)$$

$$K_{\xi h} = K_{mh} \quad (4.37)$$

Assim, da relação 4.36 e da Equação 4.35, nota-se que a parametrização aciona a difusão turbulenta na vertical apenas nos pontos de grade em que  $Ri < 1/3$ .

#### 4.2.2. Os Processos de Parametrizações em Cumulus

Foi apresentado até o presente momento, os processos que envolvem a turbulência. Como os transportes de umidade, momento, calor que estão associados nos processos de convecção úmida e não podem ser resolvidos explicitamente em modelos atmosféricos de grande escala. Porém, de acordo com a literatura a convecção úmida profunda contribui para que os movimentos de escalas maiores também sejam importantes, os efeitos da dinâmica e energia. Os estudos iniciais da parametrização foram desenvolvidos por Kuo em 1965, e dentro dessa metodologia o RAMS 4.3 desenvolve o seu formalismo matemático, pois esse, baseia-se na observação da existência de uma forte correlação entre convergência total de larga escala do vapor de água em uma coluna atmosférica e a precipitação convectiva (TREMBACK, 1990). Assim, a convecção ocorre para consumir a instabilidade convectiva fornecida na larga escala e que ocasiona o transporte de calor e umidade. Logo, as tendências locais da razão de mistura total de água em função da convecção úmida e da temperatura potencial são:

$$\left( \frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} \right)_{con} = \frac{bI}{\rho_0} \frac{Q_2}{\int_{z_g}^{z_{ct}} Q_2 dz} \quad (4.38)$$

e

$$\left( \frac{\partial \bar{\theta}_{il}}{\partial t} \right)_{con} = \frac{L(1-b)I}{\rho_0 \pi} \frac{Q_1}{\int_{z_g}^{z_{ct}} Q_1 dz} \quad (4.39)$$

onde  $\pi$  é a função de Exner,  $I$  corresponde a taxa com que a larga escala fornece umidade, sendo caracterizada como o fluxo que passa através do nível de condensação por levantamento (NCL) e  $L$  calor latente de condensação. A fração  $b$  umedece a atmosfera, sendo essa estimada empiricamente de acordo com o método de FRITSCH & CHAPPEL (1980), em função do cisalhamento vertical horizontal do vento, entre os níveis de convecção livre e o topo da nuvem,  $(1-b)$  será condensado e precipitará, aquecendo a

atmosfera. Onde  $Q_1$  e  $Q_2$  são os perfis verticais de aquecimento e umedecimento da atmosfera em função da convecção. Para obter  $I$ :

$$I = \left( \rho_0 \overline{r_v w} \right)_{NCL} \quad (4.40)$$

onde  $\overline{r_v}$  é razão de mistura de vapor,  $\overline{w}$  é a velocidade vertical na escala resolvida, todos esses são registrado no NCL. Para realizar a parametrização ou não, deve ser considerado como função as condições atmosféricas do ambiente do modelo e dos perfis convectivos. Inicialmente, são verificadas as existências de instabilidades condicionais utilizando-se o perfil da energia estática úmida, e a existência de um movimento vertical positivo, acima de um valor crítico. A variação do NCL para o nível fonte de ar para a convecção é calculada, e para isso, um modelo de nuvens com os fluxos de correntes ascendentes e descendentes são utilizados. Lembrando, que a corrente ascendente possui temperatura potencial equivalente constante, ou seja, não existe entranhamento, e a sua característica é ser saturada e não sólida. A camada profunda da nuvem tem que apresentar no mínimo 3 km, e com o seu topo (CT) acima de 500 hPa. Para a corrente descendente inicia-se no nível da temperatura potencial equivalente mínima. Com estes dois perfis, o perfil convectivo  $\theta_{con}$  é obtido através de uma média ponderada entre as temperaturas potenciais equivalentes das correntes ascendentes e descendentes. A estimativa de  $Q_1$ :

$$Q_1 = \theta_{con} - \theta_{env} \quad (4.41)$$

onde  $\theta_{env}$  corresponde a temperatura potencial ambiental que no modelo é interpolada na grade convectiva. Para calcular  $Q_2$  devem ser desconsideradas as correntes descendentes, e nesse caso é importante ressaltar, que o processo de umedecimento ocorre somente na região da bigorna (nuvem). Na região de desentranhamento ( $z_{det}$ ) que normalmente ocorre após dois terços do topo da nuvem ( $z_{ct}$ ), considera-se nesse nível um perfil de umedecimento constante igual a 1. Assim para estimar  $Q_2$ :

$$Q_2 = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & \text{para } z_{\text{det}} \leq z \leq z_{\text{ct}} \\ 0, & \text{para } z_{\text{ncl}} \leq z \leq z_{\text{det}} \\ -\frac{r_{\text{venv}}}{b}, & \text{para } z_g \leq z \leq z_{\text{ncl}} \end{array} \right\} \quad (4.42)$$

onde  $r_{\text{venv}}$  é razão de mistura de vapor do ambiente. Usando a Equação 4.42 e a 4.38, serve para obter o termo de tendência local da razão de mistura total da água devido à convecção, resulta em:

$$\left( \frac{\partial \bar{r}_T}{\partial t} \right)_{\text{con}} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{bI}{\rho_0(z_{\text{ct}} - z_{\text{det}})} & z_{\text{det}} \leq z \leq z_{\text{ct}} \\ 0 & z_{\text{ncl}} \leq z \leq z_{\text{det}} \\ -\frac{I}{\rho_0} \frac{r_{\text{venv}}}{\int_{z_g}^{z_{\text{ncl}}} r_{\text{venv}} dz} & z_g \leq z \leq z_{\text{ncl}} \end{array} \right\} \quad (4.43)$$

Como é importante estimar o fluxo de água na superfície do solo, assim é usada a taxa de precipitação convectiva que entra como uma condição de contorno, e essa taxa é dada por:

$$pcp_{\text{conv}} = (1 - b)I \quad (4.44)$$

### 4.2.3. Parametrizações na Superfície

A troca dos fluxos turbulentos do momento, calor sensível e latente que são trocados entre a atmosfera e as superfícies são importantes, para que os resultados da modelagem sejam mais realística. As escalas de temperatura  $\theta_*$ , escalas de umidade  $r_*$  da camada superficial, velocidade de atrito  $u_*$  camada superficial, essas variáveis são obtidas através da teoria da similaridade de uma camada superficial e foram elaboradas por LOUIS (1979). Essa metodologia desenvolvida por este pesquisador, permite determinar os fluxos

turbulentos entre a superfície e a atmosfera, e as expressões das escalas da camada superficial são:

$$\theta_* = \frac{a^2 \bar{U} \Delta \theta}{u_*} F_h \left( \frac{z}{z_0}, Ri_G \right) \quad (4.45)$$

$$r_* = \frac{a^2 \bar{U} \Delta r}{u_*} F_h \left( \frac{z}{z_0}, Ri_G \right) \quad (4.46)$$

$$u_*^2 = a^2 \bar{U}^2 F_m \left( \frac{z}{z_0}, Ri_G \right) \quad (4.47)$$

onde:

$$\Delta \theta = \bar{\theta}(z) - \bar{\theta}_s \quad (4.48)$$

$$a^2 = \frac{k^2}{\left( \ln \frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (4.59)$$

$$\bar{U} = \sqrt{\overline{u(z)^2} + \overline{v(z)^2}} \quad (4.50)$$

$$\Delta r = \bar{r}(z) - \bar{r}_s \quad (4.51)$$

onde  $Ri_G$  é o número de Richardson do tipo gradiente:

$$Ri_G = \frac{gz \Delta \theta}{\frac{1}{2} (\bar{\theta}(z) + \bar{\theta}_s) \bar{U}^2} \quad (4.52)$$

onde  $z_0$  é o parâmetro de rugosidade,  $z$  a altura acima da superfície do nível mais baixo do modelo, e na Equação 4.49  $k$  é a constante de von Karmann é igual 0.35. E  $F_h$  e  $F_m$  são obtidas:

1) Em uma situação de instabilidade:

$$F_h = 1 - \frac{3bRi_B}{1 + 3c_h ba^2 \sqrt{\frac{z}{z_0} |Ri_B|}} \quad (4.53)$$

$$F_m = 1 - \frac{2bRi_B}{1 + 2c_m ba^2 \sqrt{\frac{z}{z_0} |Ri_B|}} \quad (4.54)$$

2) Em uma situação de estabilidade:

$$F_h = \frac{1}{1 + 3bRi_B \sqrt{1 + dRi_B}} \quad (4.55)$$

$$F_m = \frac{1}{1 + \frac{2bRi_B}{\sqrt{1 + dRi_B}}} \quad (4.56)$$

onde  $c_m = 7.5$ ,  $c_h = 5$  e  $b = 5$ .

Para o RAMS cada célula divide-se em três classes: solo nu, água e vegetação sobre solo sombreado. É importante ressaltar, que para parametrizar cada categoria é necessária fornecer os valores de temperatura e umidade da superfície para que os fluxos turbulentos de momento, calor e umidade sejam representativa na interface atmosfera e superfície. Os fluxos efetivos são obtidos através de uma média dos fluxos individuais que é ponderada pela área que cada categoria ocupa na célula. Os fluxos de calor e umidade dentro do solo nu são obtidos através dos métodos McCUMBER & PIELKE (1981) e

TREMBACK & KESSLER (1985), onde os valores são obtidos através de um modelo de multicamadas que permite prognosticar temperaturas e umidades.

Para o fluxo de umidade entre camadas de solo, a Equação prognóstica é dada por:

$$\rho_w \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial w_s}{\partial z} \quad (4.57)$$

onde  $w_s$  é o fluxo de umidade dentro do solo e  $\rho_w$  é a densidade da água líquida. O fluxo de umidade dentro do solo é estimado por:

$$w_s = \rho_w K_\eta \frac{\partial(z + \psi)}{\partial z} \quad (4.58)$$

o  $\psi$  representa o potencial hidráulico,  $K_\eta$  é a condutividade hidráulica e  $z$  é a profundidade da camada. O fluxo de umidade pode ser representado:

$$w_s = \rho_w K_\eta + \rho_w D_\eta \frac{\partial \eta}{\partial z} \quad (4.59)$$

onde  $D_\eta = K_\eta \frac{\partial \psi}{\partial z}$

Assim, o prognóstico do conteúdo de umidade é dado:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_\eta + D_\eta \frac{\partial \eta}{\partial z} \right) \quad (4.60)$$

Para obter o potencial hidráulico:

$$\psi = \psi_f \left[ \frac{\eta_f}{\eta} \right]^b \quad (4.61)$$

Equação para encontrar a condutividade hidráulica:

$$K_\eta = K_f \left[ \frac{\eta}{\eta_f} \right]^{2b+3} \quad (4.62)$$

E, a difusividade hidráulica:

$$D_\eta = \frac{-bK_f\psi_f}{\eta} \left[ \frac{\eta}{\eta_f} \right]^{b+3} \quad (4.63)$$

onde  $b$  depende do tipo de solo, todos estes valores são inicializados por meio de uma Tabela contida no código do modelo.

A temperatura da superfície da água é mantida constante no tempo, pode ser interpolada a partir de dados de temperatura da superfície do mar para inicialização heterogênea, ou pode ser via parâmetro através do RAMSIN. A umidade na superfície é a razão de mistura de saturação definida na pressão e temperatura da água em superfície. A fração de água ocupando uma dada célula do modelo é dada por  $1 - pctland$ , e  $pctland$  é o percentual de terra no domínio entre 0 e 1.

#### 4.2.4. Cálculo dos Fluxos Efetivos para a Atmosfera

Os fluxos turbulentos calculados para cada um dos tipos de superfície compõem a superfície de uma célula do modelo. O modelo utiliza os fluxos individuais pela média sobre todos tipos de superfície, que é ponderada pela fração com que cada um ocupa a área da célula:

Fluxo Turbulento de Calor:

$$\overline{\theta'w'} = (1 - f_l)(\overline{\theta'w'})_w + f_l \left\{ (1 - f_{veg})(\overline{\theta'w'})_g + f_{veg} \left( (\overline{\theta'w'})_{sg} + 2I_{af}(\overline{\theta'w'})_{veg} \right) \right\} \quad (4.64)$$

Fluxo Turbulento de Momento

$$\overline{X'w'} = (1 - f_l)(\overline{X'w'})_w + f_l \left\{ (1 - f_{veg})(\overline{X'w'})_g + f_{veg} \left( (\overline{X'w'})_{sg} + (\overline{X'w'})_{veg} \right) \right\} \quad (4.65)$$

onde  $w$ ,  $g$ ,  $sg$  e  $veg$  representam as superfícies de água, solo nú, solo sombreado e vegetação.  $X$  corresponde a qualquer um dos componentes da velocidade do vento  $u$ ,  $v$  e  $w$ . E  $f_{veg}$  é a fração com que a vegetação ocupa a parte do solo da célula, e  $f_l$  é a porcentagem da terra. Os fluxos turbulentos calculados para a atmosfera, se tornam condição de contorno para o esquema de difusão na camada limite.

O RAMS 4.3 apresenta duas opções para a onda curta e onda longa, o esquema que é usado nessa pesquisa é de CHEN & COTTON (1983), pois este considera a interação da radiação com campos de água líquida.

#### 4.2.5. Sistemas de Coordenadas

Foi utilizado nesse trabalho a opção de coordenadas polar - estereográficas no plano horizontal  $(x,y)$  e  $\sigma_z$  na vertical. As equações de transformação de coordenadas geográficas de longitude  $\lambda$  e latitude  $\alpha$  e altura cartesiana  $z$  e para as coordenadas  $(x, y, \sigma_z)$  são:

$$x = 2R \frac{\cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0)}{1 + \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0)} \quad (4.66)$$

$$y = 2R \frac{\cos \varphi \sin \varphi - \sin \varphi_0 \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0)}{1 + \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0)} \quad (4.67)$$

$$\sigma_z = H \left( \frac{z - z_{top}}{H - z_{top}} \right) \quad (4.68)$$

onde  $R$  corresponde ao raio da Terra,  $z_{top}$  é a altura cartesiana da topografia em relação ao nível médio do mar,  $(\varphi_0, \lambda_0)$  são as coordenadas geográficas do pólo de projeção do plano polar-estereográfico e  $H$  é a altura do modelo.

#### 4.2.6. Assimilação dos Dados de Entrada

São utilizados os seguintes dados de entrada das reanálises, que o modelo necessita:

- componentes horizontais do vento;
- temperatura;
- umidade relativa;
- níveis de pressão.

Ressalta-se que os dados das reanálises são acessadas e interpoladas para os níveis isentrópicos e de  $\sigma_z$ . Usa o método de BARNES (1973) para realizar a análise objetiva, os dados são tratados pela rotina ISAN (*Isentropic Analysis Package*) do modelo RAMS. Os conjuntos de dados acima descritos são interpolados para a grade do modelo atmosférico, e que fornecerá a condição inicial e de contorno para a integração numérica. No que se refere ao processo de assimilação de dados, é utilizado o método de relaxação Newtoniana (denotada de *nudging*) desenvolvido por HOKE & ANTHES, (1976). Basicamente este método consiste em utilizar as componentes horizontais do vento, a temperatura potencial, a razão de mistura total e a função de Exner e são forçadas em direção aos correspondentes dos valores observados contidos nas reanálises. Esse procedimento, é realizado ao adicionar as tendências locais dessas quantidades da seguinte maneira:

$$\left(\frac{\partial \bar{\phi}}{\partial t}\right)_{nud} = \bar{w}(k, i, j) \frac{(\phi_0 - \bar{\phi})}{\tau} \quad (4.69)$$

onde  $\bar{\phi}$  corresponde ao valor atual da variável calculada pelo modelo,  $\phi_0$  é o valor dessa variável na análise,  $\tau$  é a escala de tempo do *nudging* que define a sua intensidade. No tempo  $t$  do modelo o valor da variável observada  $\phi_0(t)$  é obtido através de uma interpolação linear no tempo entre os valores de  $\phi_0$  em duas análises consecutivas.

Os pesquisadores ao desenvolverem o modelo, consideram que o fluxo de escala sinótica é uma primeira aproximação no sistema adiabático, logo uma análise objetiva feita numa superfície isentrópica irá melhorar a aproximação da variabilidade inter estações dos campos atmosféricos. Assim, as isentrópicas tendem a se compactar nas áreas frontais, aumentando assim a resolução ao longo das discontinuidades. E também, porque as isentrópicas são inclinadas nas proximidades das frentes, características de comprimentos de onda curta em coordenadas cartesianas, assim são transformadas em sistemas isentrópicos com características de comprimentos de onda longa, são objetivamente analisadas com menos suavização que outros sistemas de coordenadas comumente usados. Ressalta-se que existe alguma desvantagem nas coordenadas isentrópicas, que são a resolução vertical, pois decresce com a diminuição da estabilidade atmosférica na camada limite planetária e as isentrópicas freqüentemente interceptam a terra.

O RAMS e a rotina ISAN tem a habilidade de combinar ou misturar alguns conjuntos de dados para análise, e uma estrutura modular que simplifica a inserção de dados não convencionais. O código corrente suporta análises globais do NMC e ECMWF, radiossonda do NMC e dados observacionais de superfície, todos no formato do NCAR. Em todos os níveis de vento, temperatura e umidade podem ser usadas a partir de observações das radiossondagens. Também pode assimilar dados de sondagens especiais, falsas sondagens, ou alguma observação adicional de superfície que são disponíveis. O código é também adaptado para o sistema NOAA e denotado de MAPS - *Mesoscale Analysis and Prediction System*. A técnica de análise de dados pode ser sumarizada como se segue. As componentes horizontais do vento, pressão e umidade relativa a partir da grade

da análise global e alguns dados de radiossonda disponíveis são interpolados verticalmente para os níveis isentrópicos. O esquema de análise objetiva de BARNES (1973), é então aplicado para essas variáveis nas superfícies isentrópicas com o uso de parâmetros específicos no esquema de controle da intensidade de suavização. Depois que as variáveis foram objetivamente analisadas, através da função de corrente Montgomery é então realizado uma integração hidrostática a partir da análise objetiva das funções de corrente (condições de contorno) em nível isentrópico próximo da tropopausa. Algumas interpolações horizontais são usadas sobrepondo a técnica polinomial de BLECK & HAAGENSON (1968). As variáveis atmosféricas na superfície terrestre são analisadas de uma maneira similar às variáveis de níveis superiores. São analisados o vento, temperatura potencial e umidade relativa. Pressão e função de corrente Montgomery são obtidas hidrostáticamente a partir do primeiro nível isentrópico.

Após realizar o processo de análise isentrópica, as variáveis atmosféricas e topografia são transferidas para o modelo usando superposição de interpolações polinomiais. Primeiramente, as componentes do vento, função de corrente Montgomery, e umidade relativa são interpoladas de uma superfície isentrópica para a grade do modelo. A altura da superfície isentrópica pode ser estabelecida e o vento, temperatura potencial e umidade relativa são interpoladas linearmente na altura para os níveis na coordenada  $z$ . Uma última integração hidrostática é feita para encontrar a pressão na grade do modelo.

### **4.3. Modelo de Trajetória**

Compreender o comportamento das trajetórias é importante para os estudos da química da atmosfera, principalmente quando se pretende modelar possíveis vazamentos hipotéticos de radionuclídeos na atmosfera. Por isso, inúmeras pesquisas têm sido realizadas supondo o comportamento das trajetórias para frente ou para trás em relação ao tempo. A trajetória para frente é importante para estudos na aviação, modelagem lagrangeana e dispersão de poluentes atmosféricos. A segunda trajetória é utilizada para interpretação e diagnóstico dos possíveis vazamentos oriundos das indústrias químicas. De maneira geral, cada trajetória representa um segmento do movimento da parcela de ar no

espaço e tempo. Basicamente, considera-se a trajetória como uma estimativa do movimento médio de um volume de controle.

Existem algumas aproximações que servem para modelar as trajetórias atmosféricas como: isobárica, isentrópica e cinemática. As trajetórias isobáricas levam em consideração a hipótese de que as parcelas de ar estão movendo-se ao longo das superfícies com a pressão constante. Para as trajetórias isentrópicas, conforme PICKERING *et al.*, (1996), considera-se que as parcelas estão se movendo ao longo das superfícies de temperatura potencial constante, em relação à velocidade vertical do vento. A última trajetória leva em consideração os três componentes do vento para obter a trajetória cinemática, ressaltando-se não ser necessária qualquer consideração explícita sobre o movimento da parcela de ar.

Na presente pesquisa, optou-se pelo modelo cinemático tridimensional e foi utilizado o método não convectivo, devido à existência do campo de vento tridimensional, tamanho da área de estudo e a alta resolução utilizada no domínio.

Uma das formas de calcular as trajetórias cinemáticas é usar a velocidade vertical que é diagnosticada a partir das componentes horizontais. Estas trajetórias são integradas até cinco dias para fornecer situações realistas (FREITAS, 1999).

Os modelos de mesoescala permitem que as trajetórias obtidas apresentem uma característica realista através de assimilações dos dados observados. Para os estudos dos transportes a longa distância, as limitações computacionais impõem configurações espaciais para o modelo com uma resolução que não é suficiente para resolver explicitamente as circulações convectivas.

A convecção impõe uma forte advecção na camada limite para os níveis mais altos da troposfera. Assim, as trajetórias podem ser erroneamente calculadas se esta circulação na escala resolvível não for incluída adequadamente.

O modelo desenvolvido na Universidade de São Paulo – USP, foi primeiramente utilizado e validado no experimento SCAR-B - *Smoke, Clouds, and Radiation-Brazil*, durante a estação seca de 1995, em áreas de vegetação de cerrado e floresta na região Amazônica brasileira.

O projeto SCAR-B foi o resultado de um esforço em conjunto com diversas instituições de pesquisa do Brasil e dos Estados Unidos. A lista de participantes inclui

cientistas da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), da Universidade de Washington, e do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (FREITAS *et al.*, 1996; LONGO *et al.*, 1999). Posteriormente, o modelo foi utilizado no projeto LBA (*Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazonia*). Este experimento é uma iniciativa multidisciplinar e multi - institucional que pretende gerar conhecimentos que possibilitem a compreensão, de maneira integrada, do meio ambiente amazônico (FREITAS *et al.*, 1999; FREITAS *et al.*, 2000).

Atualmente, o modelo de trajetórias desenvolvido por FREITAS (1999) é empregado operacionalmente no MASTER (Meteorologia Aplicada a Sistemas do Tempo Regionais), do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências - USP. Os produtos desse laboratório podem ser acessados na página: [www.master.iag.usp.br](http://www.master.iag.usp.br).

O modelo inicia-se com a Equação que representa o transporte cinemático:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^t (\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}) dt \quad (4.70)$$

onde  $\vec{r}(t)$  é a posição da parcela de ar no espaço no tempo  $t$ ,  $\vec{r}(t_0)$  posição no tempo  $t_0$ , e  $(\bar{u}, \bar{v}, \bar{w})$  corresponde às três componentes do vento médio.

Ressalta-se que esse método utiliza somente a velocidade do vento para a obtenção da trajetória, sendo denotado de cinemático. Sendo assim, surge a questão das escalas resolvível. Supondo que na parametrização de cumulus, em situações convectivas, os feitos da convecção na velocidade vertical deveriam ser levados em conta, sendo assim, as parcelas de ar penetrando nessa região possam ser transportadas verticalmente até o topo da nuvem. Logo o termo de aquecimento dado pela parametrização de cumulus, intensifica a velocidade vertical na escala resolvida FREITAS (1999). O modelo de nuvens que FREITAS (1999) utiliza, corresponde ao mesmo método de parametrização de cumulus do RAMS, só que existe um termo a mais o de entranhamento. E nesse caso, a equação de conservação da temperatura potencial equivalente  $\theta_{ec}$  da corrente ascendente é:

$$\frac{d\theta_{e_c}}{dz} = -\mu(\theta_{e_c} - \bar{\theta}_e) \quad (4.71)$$

sendo  $\mu$  o termo de entranhamento, que este corresponde ao desenvolvido por SIMPSON & WIGGERT (1969):

$$\mu = \frac{0.183}{R} \quad (4.72)$$

onde  $R$  corresponde ao raio da corrente ascendente, e foi usado 5 km, e  $\bar{\theta}_e$  é a temperatura potencial equivalente do ambiente. É importante que haja a condição de contorno da base da nuvem:

$$\theta_{e_c}(z_{ncl}) = \bar{\theta}_e(z_{ncl}) \quad (4.73)$$

onde  $z_{ncl}$  é o nível de condensação por levantamento. FREITAS (1999) usou o método *top-hat* desenvolvido por ANTHES (1977) Esse método assume que a velocidade vertical para o cálculo das trajetórias é dada por:

$$\bar{w}_{conv\_traj} = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \int_{x-\frac{1}{2}\Delta x}^{x+\frac{1}{2}\Delta x} \int_{y-\frac{1}{2}\Delta y}^{y+\frac{1}{2}\Delta y} w dx dy = a \bar{w}_c + (1-a) \bar{w}_e \quad (4.74)$$

onde  $\bar{w}$  é a velocidade vertical na escala resolvível, que neste caso é fornecida pelo modelo atmosférico e  $\bar{w}_c$  corresponde a velocidade vertical na região da nuvem, dada pela Equação de SIMPSON & WIGGERT (1969):

$$\frac{1}{2} \frac{d(\bar{w}_c)^2}{dz} = \frac{gB}{1+\alpha} - gQ_{lw} - \mu(\bar{w}_c)^2 \quad (4.75)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\alpha$  é o coeficiente de massa virtual, sendo introduzida uma compensação por não considerar as perturbações não hidrostáticas na pressão, e  $Q_{lw}$  é a razão de mistura da água líquida; o termo de flutuação  $B$  é dado por:

$$B = \frac{T_{vc} - T_{ve}}{T_{ve}} \quad (4.76)$$

onde  $T_{vc}$  é a temperatura virtual, e  $T_{ve}$  é a temperatura virtual do ambiente. Para estimar a água líquida  $Q_{lw}$ , tem-se:

$$Q_{lw} = -c\Delta r_s = -c(r_s - r_s^{LCL}) \quad (4.77)$$

onde a constante  $c$  é determinada em um processo iterativo de modo que a velocidade vertical na nuvem  $\overline{w}_c^c$  é menor que  $1 \text{ cm s}^{-1}$  no nível correspondente ao topo da nuvem. Isto pode ser uma parcela de ar alcançando a região convectiva úmida no transporte vertical até o topo da nuvem.

Observando a Equação 4.75, o último termo representa a perda do momento em função da injeção lateral de massa na corrente ascendente, ou seja, corresponde ao processo de entranhamento. Essa mesma Equação pode ser integrada usando a seguinte condição de fronteira:

$$\overline{w}_{cNCL}^c = \max(1 \text{ m/s}, w^*) \quad (4.78)$$

onde  $w^*$  é a velocidade vertical do nível de condensação por levantamento da corrente ascendente em função dos processos turbulentos da camada subnuvem.

No modelo *top-hat*, as médias são calculadas separando o domínio em partes associadas às nuvens e ao meio ambiente. Como a resolução do modelo não permite resolver explicitamente as circulações induzidas por processos convectivos úmidos, os transportes dos gases e partículas precisam ser parametrizados e inseridos na Equação de tendência:

$$\frac{\partial \bar{s}_{[\eta]}}{\partial t} = \left( \frac{\partial \bar{s}_{[\eta]}}{\partial t} \right)_{adv} + \left( \frac{\partial \bar{s}_{[\eta]}}{\partial t} \right)_{turb} + \bar{Q}_{[\eta]} \quad (4.79)$$

onde  $\eta$  é o constituinte, sendo que o primeiro termo do lado direito corresponde a advecção na escala da grade, enquanto que o segundo termo refere-se ao transporte turbulento da camada limite atmosférica e o último ao termo fonte. Dessa forma, para parametrizar é feito o seguinte:

$$\left( \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right)_{con} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_0 \overline{u_i s'} \right) \quad (4.80)$$

onde  $\rho_0$  é a densidade do ar no estado básico, o índice *con* representa os processos convectivos úmidos e profundos parametrizados, e os outros símbolos possuem significados previamente definidos.

A parametrização do fluxo turbulento médio  $\overline{u_i s'}$  é realizada por meio do método *top-hat*. Nesse modelo, as médias são calculadas separando o domínio em partes associadas às nuvens e ao ambiente. Uma variável  $\phi$  assume o valor da nuvem  $\phi_c$  no domínio desta e o valor do ambiente  $\phi_e$  quando está no correspondente domínio. A fração da área ocupada por nuvens é denotada por  $a$ , sendo  $1-a$ , a fração ocupada pelo ambiente como mostra a Figura 4.1:

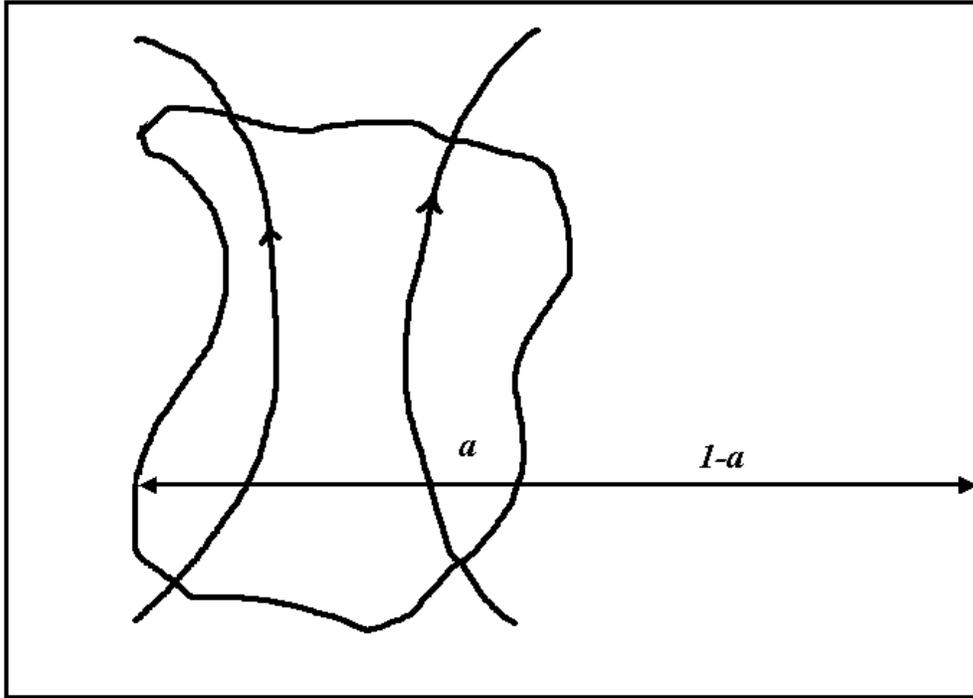


Figura 4.1: Esquema descrevendo a separação dos domínios, utilizando o método *top-hat*, (Fonte: FREITAS, 1999).

Na Figura 4.1,  $a$  representa a fração da área coberta pr nuvens, enquanto  $1-a$  representa a fração ocupada pelo ambiente. Como no formalismo de Reynolds, uma determinada quantidade  $\phi$  é decomposta num valor médio,  $\bar{\phi}$ , e uma flutuação em torno desta,  $\phi'$ , de modo que  $\phi = \bar{\phi} + \phi'$ , onde o valor médio é obtido como uma média móvel, da seguinte forma:

$$\bar{\phi}(x) = \frac{1}{\Delta x} \int_{x-\frac{\Delta x}{2}}^{x+\frac{\Delta x}{2}} \phi(x') dx' \quad (4.81)$$

Conforme mostra a Figura 4.2, sendo  $l_c$  e  $l_e$  a extensão dos subdomínios de uma nuvem e do ambiente, dentro do domínio de média  $\Delta x$ , a Equação 4.81 pode ser escrita como:

$$\bar{\phi}(x) = a\bar{\phi}_c^c + (1-a)\bar{\phi}_e^e \quad (4.82)$$

onde  $a$  é a fração da área horizontal da grade da célula coberta por nuvens cumulus e corresponde a:

$$a = \frac{l_c}{\Delta x} \quad (4.83)$$

e

$$\bar{\phi}_c^c = \frac{1}{l_c} \int_{x' \in l_c} \phi(x') dx' \equiv \frac{1}{l_c} \int_{x' \in l_c} \phi_c(x') dx' \quad (4.84)$$

com expressões análogas para o meio ambiente.

As definições em 4.82 e 4.84 produzem valores contínuos em  $x$  e são equivalentes às médias de Reynolds.

A média de um escoamento turbulento  $\overline{u'\phi'}$  é obtida por esse método, aplicando o resultado expresso na Equação 4.81 e suprimindo o índice  $i$  na componente turbulenta do vento  $u'_i$ :

$$\overline{u'\phi'} = a\overline{(u_c - \bar{u})(\phi_c - \bar{\phi})^c} + (1-a)\overline{(u_e - \bar{u})(\phi_e - \bar{\phi})^e} \quad (4.85)$$

com

$$\phi' = \begin{cases} \phi_c - \bar{\phi} & x \in l_c \\ \phi_e - \bar{\phi} & x \in l_e \end{cases}$$

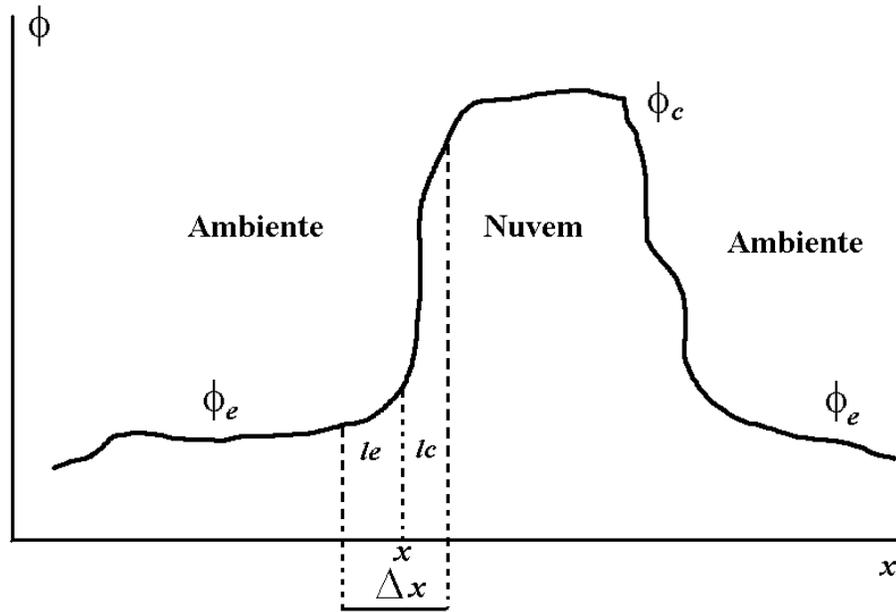


Figura 4.2: Obtenção do valor médio, utilizando o método *top-hat* (Adaptado de FREITAS, 1999).

Na Figura 4.2  $l_c$  e  $l_e$  representam respectivamente a extensão dos subdomínios de nuvem e do ambiente, dentro do domínio da média. Expandindo as operações constantes na Equação 4.85, têm-se:

$$\overline{u_c \phi_c} = \overline{u_c} \overline{\phi_c} \quad (4.86)$$

e

$$\overline{u_e \phi_e} = \overline{u_e} \overline{\phi_e}$$

e isolando  $\overline{u_e}$  e  $\overline{\phi_e}$  através da Equação 4.82, pode-se escrever a seguinte relação para a média do escoamento turbulento em termos de quantidades associadas à nuvem e ao modelo:

$$\overline{u_i \phi'} = \frac{a}{1-a} \left( \overline{u_{i_c}} - \overline{u_i} \right) \left( \overline{\phi_c} - \overline{\phi} \right) \quad (4.87)$$

A Equação 4.80 contém divergências dos fluxos horizontais e verticais, para frações típicas de áreas cobertas por nuvens, da ordem de 1%, assumindo que  $\overline{u_c^c}$  e  $\overline{v_c^c}$  são da mesma ordem que os respectivos valores médios do modelo,  $\overline{u}$  e  $\overline{v}$ , enquanto na vertical  $\overline{w_c^c} \gg \overline{w}$ . Além disso, as divergências são calculadas em espaçamentos de grade em que  $\Delta x \sim \Delta y \gg \Delta z$ .

Estas considerações permitem desprezar os termos horizontais desta Equação (4.80) e reescrevê-la na seguinte forma utilizando a Equação 4.87.

$$\left( \frac{\partial \overline{s}}{\partial t} \right)_{con} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \left[ \rho_0 \frac{a}{1-a} \left( \overline{w_c^c} - \overline{w} \right) \left( \overline{s_c^c} - \overline{s} \right) \right] \quad (4.88)$$

O fechamento desta Equação obtém-se com um modelo de nuvens que forneça as quantidades  $a$ ,  $\overline{w_c^c}$  e  $\overline{s_c^c}$ , uma vez que  $\rho_0$ ,  $\overline{w}$  e  $\overline{s}$  são fornecidos pelas variáveis na escala resolvida do modelo. A seguir, é apresentado o fluxograma do modelo:

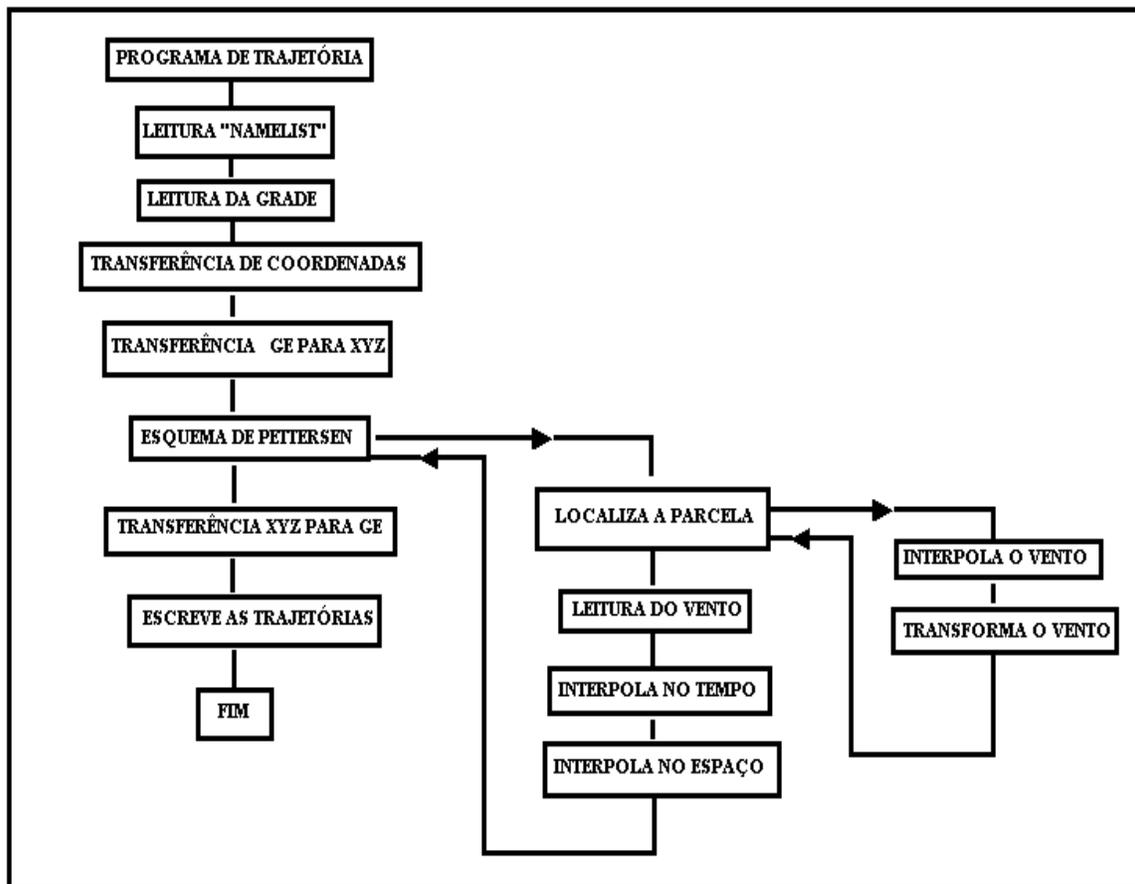


Figura 4.3: Fluxograma que representa as etapas do modelo (adaptado de LONGO, 1999).

Finalizando o modelo desenvolvido por FREITAS alimentado com as seguintes componentes do campo de vento ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) geradas pelo RAMS 4.3. Utilizou-se para visualização das trajetórias o programa *Grid Analysis and Display System* – GRADS.

# CAPÍTULO V

---

## SIMULAÇÃO E ESTUDOS DE CASOS

Nesse último capítulo, serão apresentados os resultados das simulações de transporte ocorridas no CNAAB com o propósito de evidenciar a metodologia que está sendo proposta como também, demonstrar a importância da circulação atmosférica nas escalas micro, meso e sinótica e planetária sobre a advecção de radionuclídeos para locais mais remotos (FRANCO *et al.*, 2002a).

Inicialmente, será apresentada a caracterização climatológica da região de estudo, através de modelagem numérica. Para a atmosfera foi empregado o modelo de mesoescala (RAMS) – implementado na versão 4.3. E nessa etapa serão utilizados os dados médios das reanálises obtidas no NCEP/NCAR - *National Centers for Environmental Prediction* e o *National Center for Atmospheric Research*, num período de 30 anos. O objetivo desse estudo é caracterizar o comportamento do campo dos ventos dentro do aspecto climatológico, além de dar condições para interpretar o comportamento dos mesmos dentro das interações com a topografia e o efeito das brisas na região. Assim, ao realizar essas simulações desses deslocamentos das parcelas de ar na troposfera e na baixa estratosfera, será possível evidenciar a ocorrência das circulações atmosféricas nas escalas micro, meso e sinótica. É importante ressaltar, que o modelo RAMS pode ser ajustado, para qual o tipo de escala melhor seja adequado levando em consideração o tipo de estudo a ser realizado.

Será enfatizado que o conhecimento da direção e da velocidade do vento, sob o ponto de vista climatológico, são de extrema importância para que construções de indústrias e de complexos nucleares através desses resultados permitam uma melhor compreensão do comportamento do vento. Tomando como referência às demonstrações de 2003 e 2004 apresentadas por FRANCO *et al.*, sobre a importância dos escoamentos dos ventos na região em questão, as diversas condições meteorológicas determinarão os processos de dispersão local e o transporte de material radioativo para grandes distâncias. Finalizando, este capítulo apresenta estudos de caso que foram selecionados para validar a metodologia que está sendo proposta nesta pesquisa.

### **5.1. Estudo da Climatologia Via Modelagem Numérica**

Inicialmente, esta tese realizará um estudo climatológico utilizando a modelagem numérica. Dentro desse contexto, foi utilizado um modelo de mesoescala (RAMS) que estava sendo implementado com uma versão mais nova a 4.3. Procurou-se simular o deslocamento de parcelas de ar na troposfera e baixa estratosfera, utilizando dados médios das reanálises do NCEP/NCAR num período de 30 anos. Ressalta-se, que para uma situação emergencial esse estudo climatológico não é recomendado. Porém a sua importância está no fato de caracterizar bem o comportamento dos ventos na região de estudo.

Estudos realizados na região de Angra dos Reis por MARTANO (1992) demonstraram a importância dos escoamentos de ventos e das condições da camada limite local. O acidente nuclear ocorrido na Ucrânia evidenciou o efeito da circulação atmosférica nas escalas micro, meso e sinótica sobre o transporte de material radioativo para locais remotos (JACOBSON, 1999).

A CNAAA como já citado está localizada na praia de Itaorna região costeira do município de Angra dos Reis (RJ), aproximadamente nas coordenadas 23.00° S e 44.27° W. A Figura 5.1 apresenta a topografia digitalizada da área modelada, demonstrando que, nesta área (centro da Figura), ocorrem vertentes muitas vezes escarpadas e muito próximas ao oceano. Está caracterizada por uma notável complexidade topográfica, sendo circundada por vegetação tropical de Mata Atlântica, diversificada em

espécies de fauna, flora e outros organismos (MARTANO, 1992).

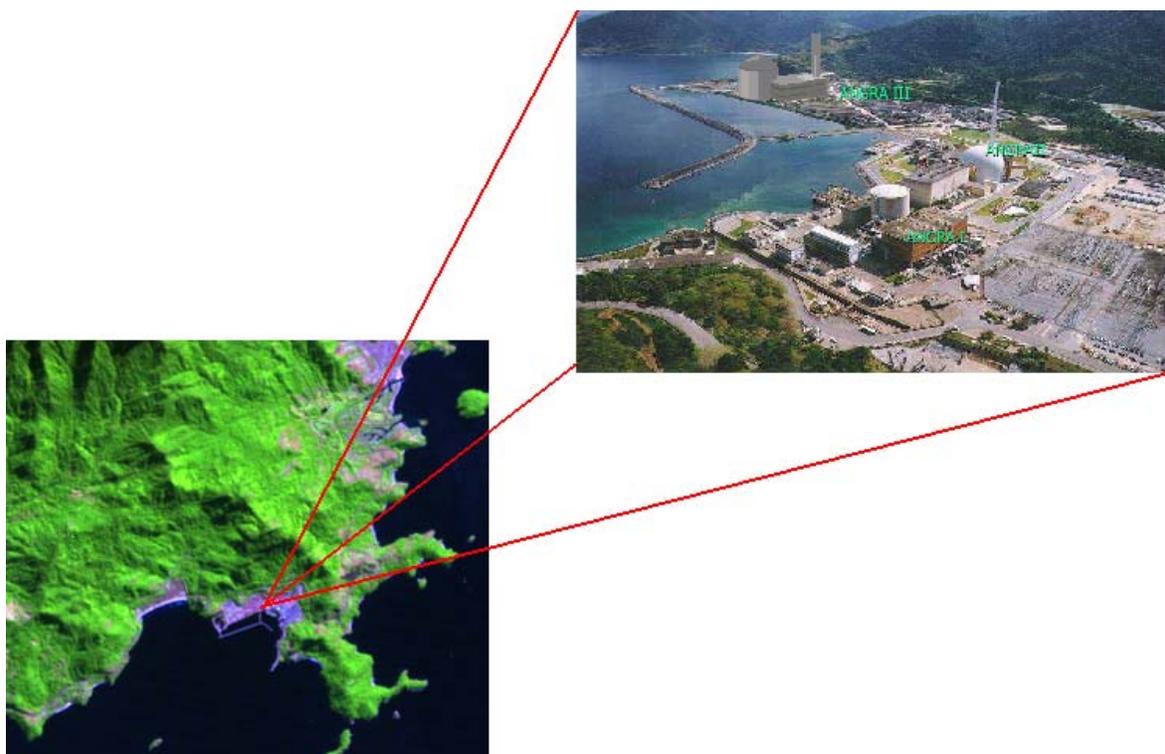


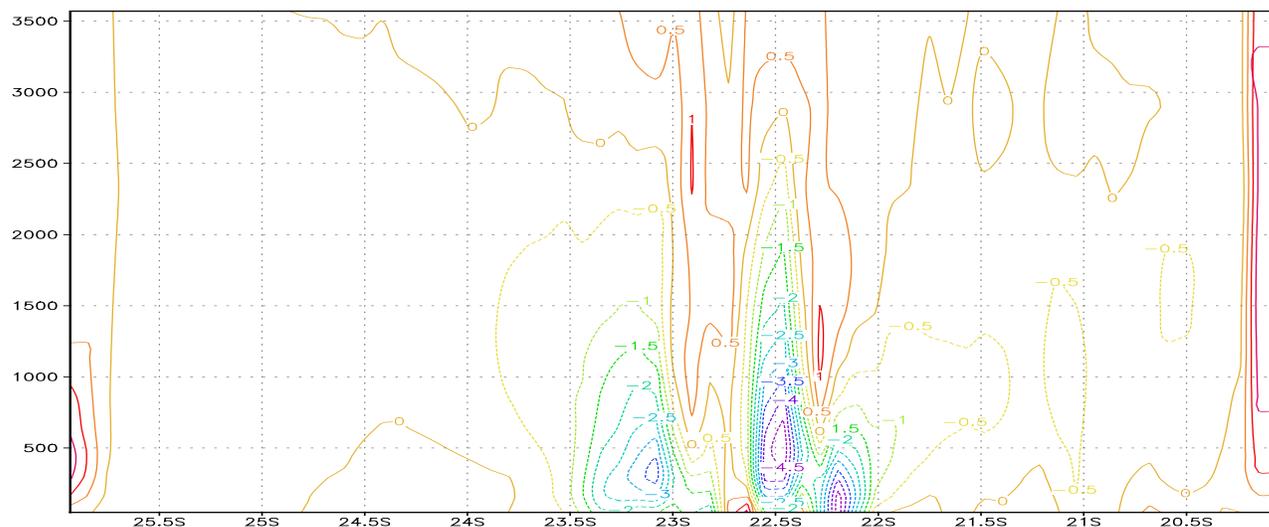
Figura 5.1: Imagem com sombreamento que denota o relevo acidentado da região de estudo (Adaptado de FRANCO *et al.*, 2004).

A simulação numérica em mesoescala foi feita aplicando a relaxação newtoniana sobre os dados médios das reanálises do NCEP para os meses de janeiro e julho, com 67 pontos na direção oeste-leste e 67 pontos na direção sul-norte, em uma única grade com espaçamento de 10 km, abrangendo a região sudeste do Brasil e adjacências. A área de estudo ficou localizada no centro da grade, permitindo um melhor enfoque.

As circulações médias, nesta região, apresentaram nos primeiros níveis da troposfera, uma enorme variação no comportamento dos campos do movimento tanto horizontal quanto vertical, indicando a predominância de uma turbulência persistente nos níveis iniciais. A Figura 5.2, tomada em um perfil transversal sul-norte, refere-se ao movimento vertical regional pela manhã. Observa-se um padrão de turbulência, caracterizado por uma sucessão de movimentos subsidentes e ascendentes, desde a superfície até 2.500 m. Constata-se, no mês de julho, predominância de movimentos

subsidentes acima da camada limite, fato que propicia agravamento das condições de diluição de poluentes nesta época do ano.

(a)



(b)

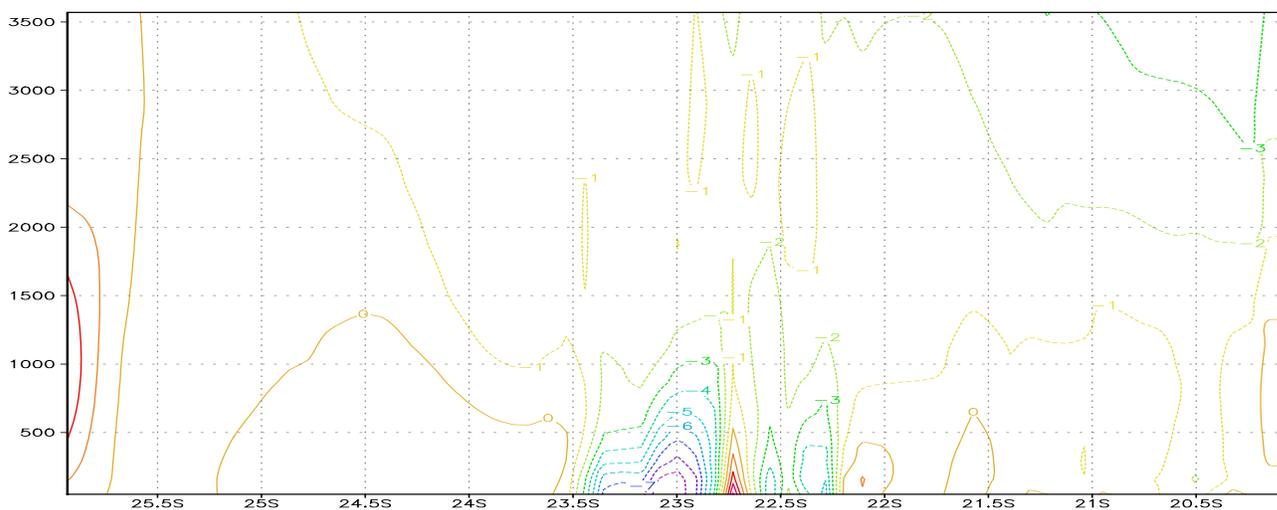
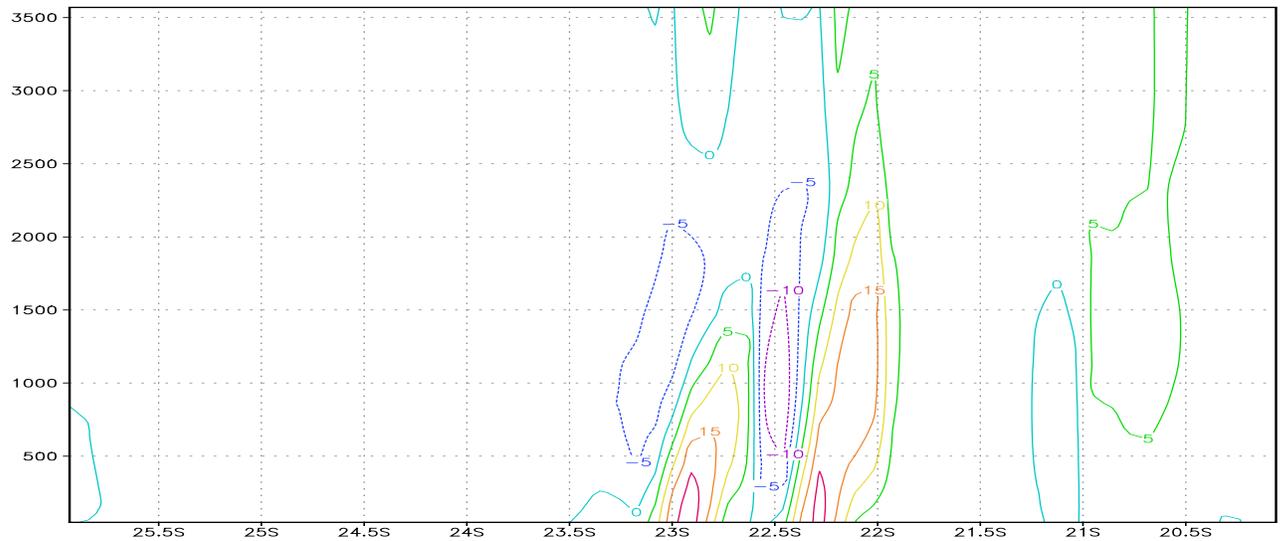


Figura 5.2: Perfil do movimento vertical às 9 horas local, para os meses climatológicos de (a) de janeiro e (b) julho.

Durante o mês de janeiro, no período da tarde, constatou-se (Figura 5.3a) uma amplificação da camada limite local (até cerca de 2.500 m), em resposta às influências do

oceano, associadas à topografia local. No mês de julho (Figura 5.3b), essa camada de movimentos verticais significativos restringe-se aos primeiros 1.500 m. A melhor definição da oscilação em escala menor no período da tarde mostra a importância da combinação oceano-topografia no ciclo diurno do escoamento local.

(a)



(b)

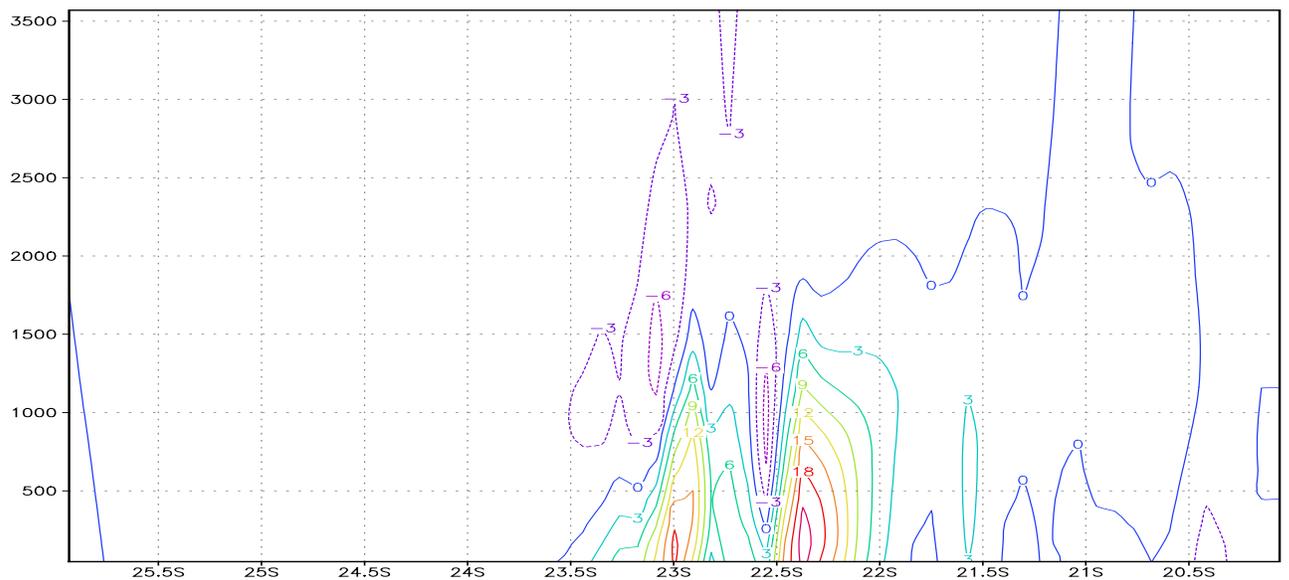
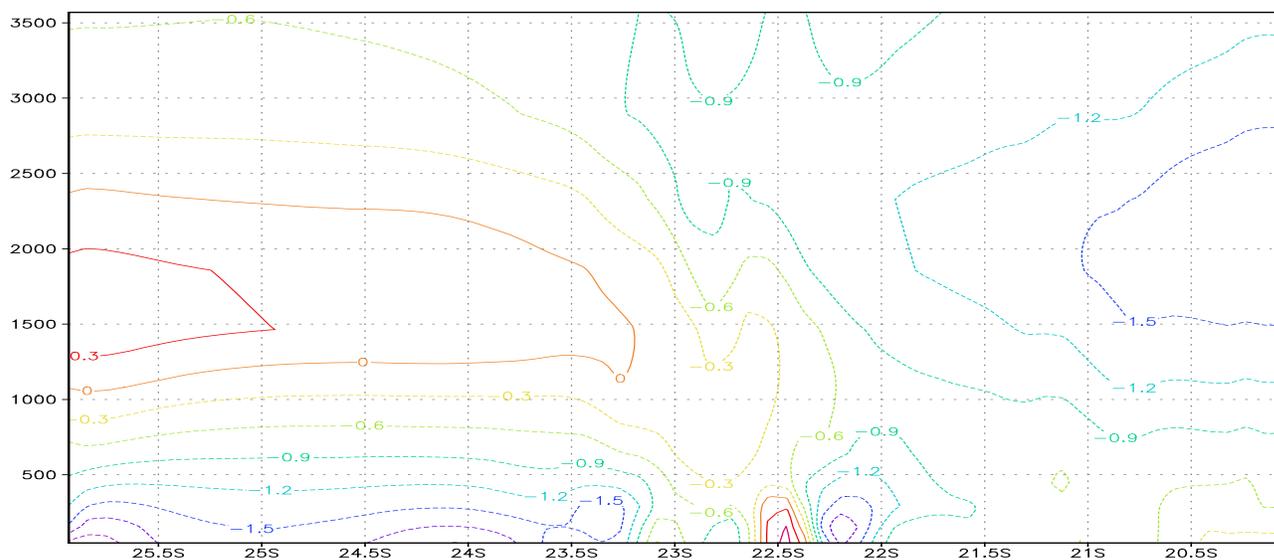


Figura 5.3: Perfil do movimento vertical às 15 horas local, para os meses climatológicos de (a) janeiro e (b) julho.

Para uma análise da parte horizontal do escoamento, através da componente meridional do vento sobre um perfil vertical sul-norte, apresentada na Figura 5.4, e referente às primeiras horas da manhã, observa-se à predominância de ventos ao sul da região de Angra dos Reis, fenômeno capaz de aprisionar os poluentes em caso de um acidente matinal. No mês de janeiro (Figura 5.4a), observa-se um pequeno cisalhamento da direção do vento, propiciando uma melhor dispersão, se comparado ao mês de julho.

(a)



(b)

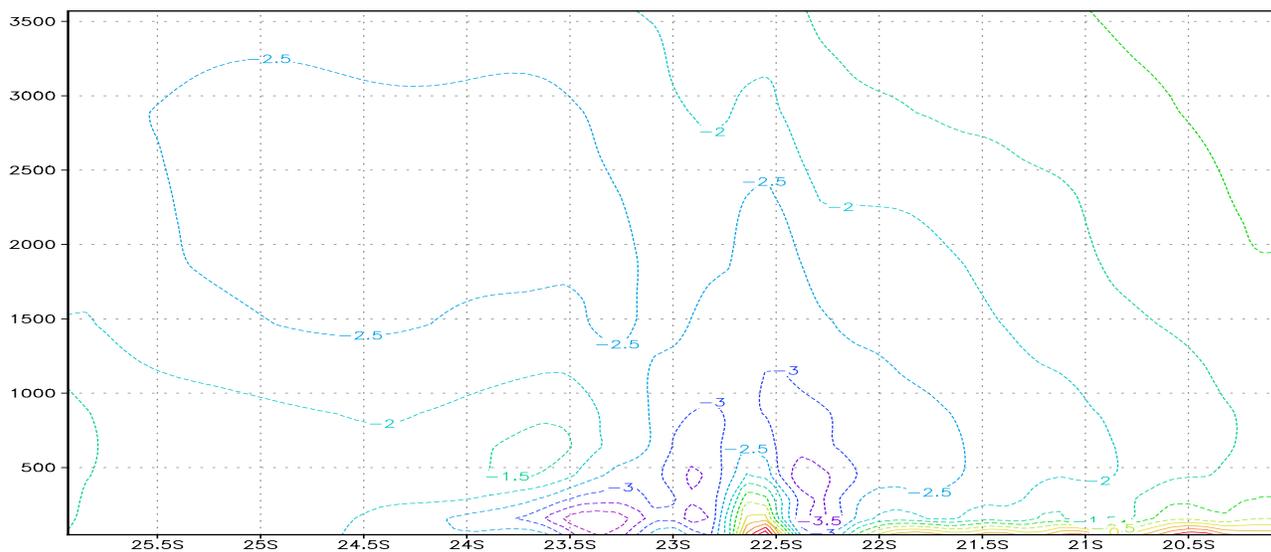
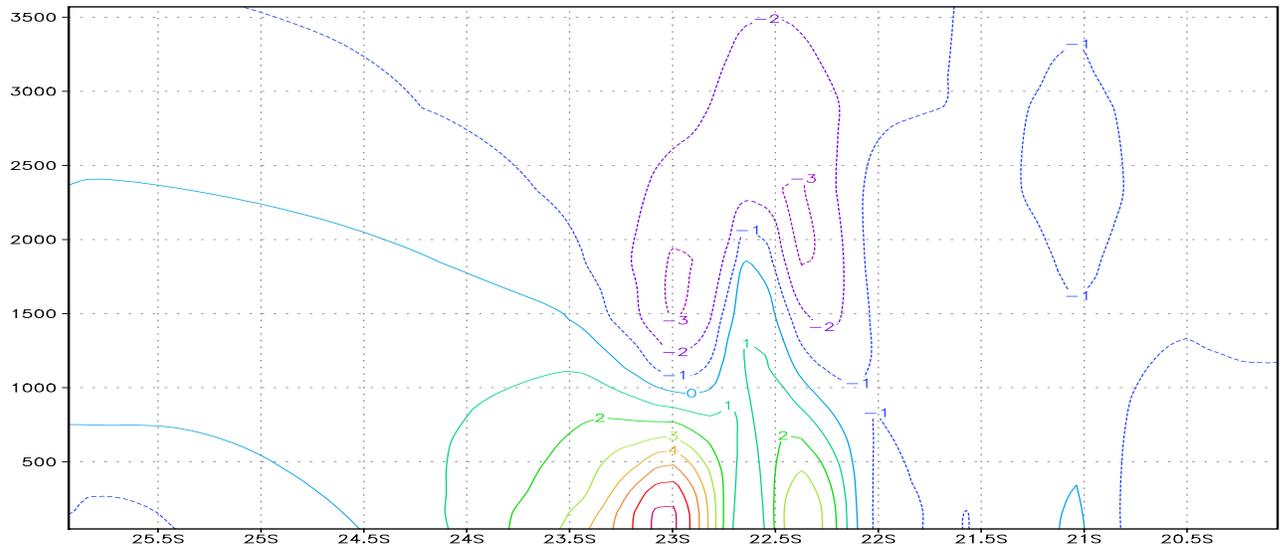


Figura 5.4: Perfil vertical longitudinal da componente meridional do vento médio climatológico às 9 horas locais para (a) janeiro e (b) julho.

A Figura 5.5, semelhante à Figura 5.4, refere-se ao período da manhã. No mês de janeiro (Figura 5.5a), há condições de transporte de poluentes em direção ao oceano, numa camada rasa de cerca de 1.000 m. Acima desta camada, os poluentes seriam transportados para região norte do domínio. No mês de julho, esta camada de transporte para o mar fica restrita tanto na horizontal quanto na vertical.

(a)



(b)

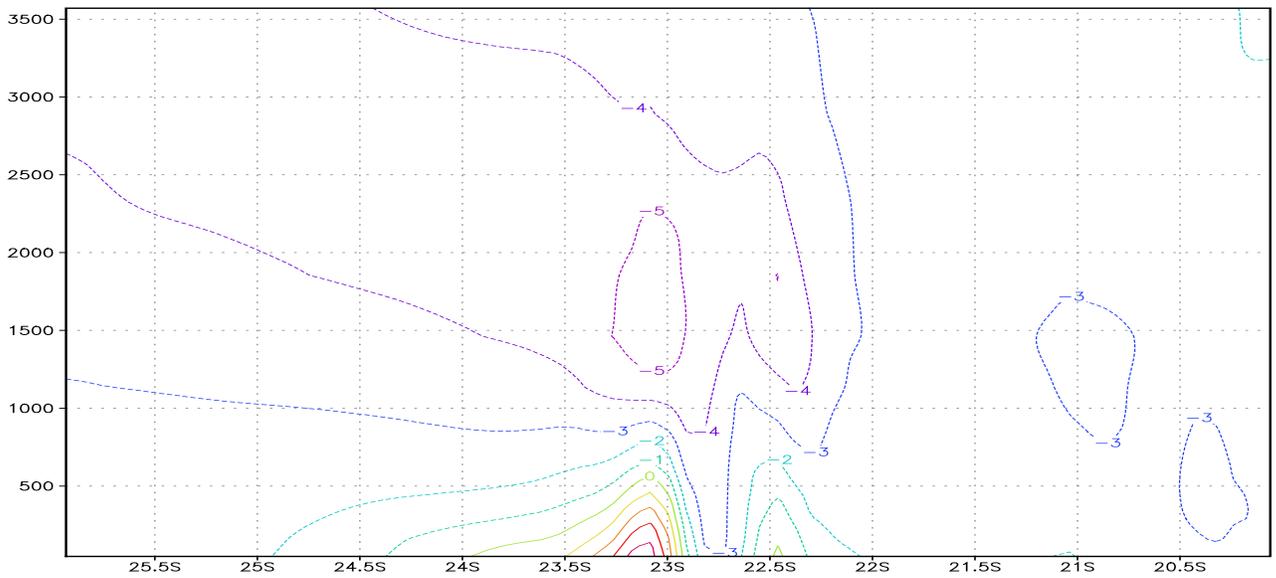


Figura 5.5: Perfil vertical longitudinal da componente meridional do vento médio climatológico às 15 horas locais para (a) janeiro e (b) julho.

Este estudo procurou diagnosticar o comportamento dos ventos e do movimento vertical na região de Angra dos Reis para demonstrar a influência da topografia associada às condições atmosféricas sobre o mar, características ambientais peculiares desta região. Ficou evidenciado que, dependendo do horário e da época do ano em que venha a ocorrer um vazamento de material particulado ou gases para a atmosfera, as variações da camada limite controla as diluições em maior escala e não somente a nível local. Por outro lado, a topografia bastante complexa e muito próxima ao mar permite a geração de ondas de gravidade que afetam as condições de diluição regional. Esse resultado foi constatado por MARTANO (1992) e FRANCO *et al.*, (2002a, 2003).

## **5.2. Validação da Modelagem das Trajetórias**

Como todo o trabalho de modelagem numérica é importante que tenha uma validação, logo fica evidenciada a necessidade de se ter um estudo de caso e para este caso é quase que impossível validar esta metodologia. Pois, o objeto de estudo é difícil de poder ter um caso real como a explosão de uma central nuclear, e o único acontecimento foi o de Chernobyl. Porém, em outubro de 2002, aconteceram emissões de diferentes partículas para a atmosfera, como, por exemplo, aerossóis e poeiras vulcânicas, oriundas do vulcão Etna (Itália). Neste estudo, foram consideradas estas emissões oriundas de uma fonte pontual, por trajetórias que podem ser caracterizadas como traçador de origem natural. Mesmo que os objetos de estudos apresentem escalas diferentes, como uma usina nuclear e um vulcão, é importante considerar, nesta etapa, o deslocamento das trajetórias associadas ao escoamento atmosférico, pois, o que se pretende é ilustrar um tipo de situação semelhante, embora deve ser ressaltado que em uma usina existem todos os processos de segurança que impedem que as partículas de poluentes alcancem escalas maiores. Sendo assim, para realizar esta modelagem, o RAMS foi ajustado para o hemisfério norte, pois, as forças como, por exemplo, de Coriolis devem ser consideradas assim, como toda a dinâmica da atmosfera. É importante ressaltar, que foram utilizados os dados de reanálises referentes ao mesmo período do evento, para poder representar e caracterizar as trajetórias geradas pelo modelo com as do vulcão Etna.

A região de estudo, o Etna, fica localizada na ilha da Sicília na Itália e a sua altura corresponde a 3.340m, cujas coordenadas geográficas correspondem a 37,73°N e 15,00°E. O Etna é um dos maiores vulcões continentais.

A seguir, são apresentadas, nas Figuras 5.6 e 5.7, as imagens obtidas através do satélite de monitoramento ambiental NOAA-16, ficando bem caracterizado o deslocamento da pluma vulcânica do Etna. Observando as imagens, constata-se os deslocamentos das partículas, trajetórias atravessando o mar Mediterrâneo em direção à Líbia, país localizado no nordeste do continente Africano. Assim, as trajetórias vulcânicas são consideradas como um traçado natural, isto é, seus deslocamentos são controlados pelos ventos na grande escala, sendo registrados nas imagens que podem ser comparadas com as análises feitas usando o modelo atmosférico RAMS e o modelo de trajetórias cinemáticas.

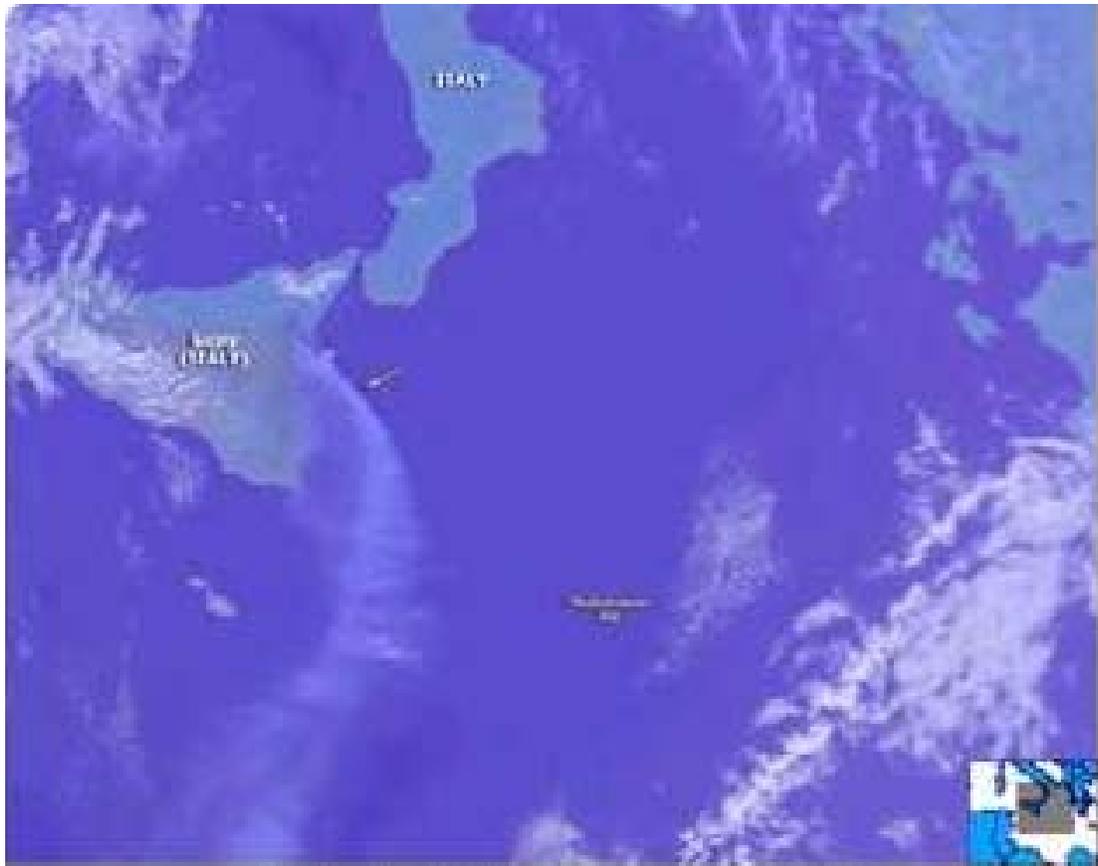


Figura 5.6: Trajetórias produzidas pelo vulcão Etna, obtidas através do satélite NOAA – 16 LAC em 30/10/2002 as 12:54 UTC (Fonte NOAA).

This NOAA-16 image (channel 4 minus channel 5) shows an ash plume (indicated by the yellow arrow) from an eruption of the Mt. Etna Volcano extending southward over the Mediterranean Sea. Subtracting channel 5 (12 micron) from channel 4 (11 micron) often enhances the signature of airborne silicate particles, such as volcanic ash.

CREDIT: NOAA

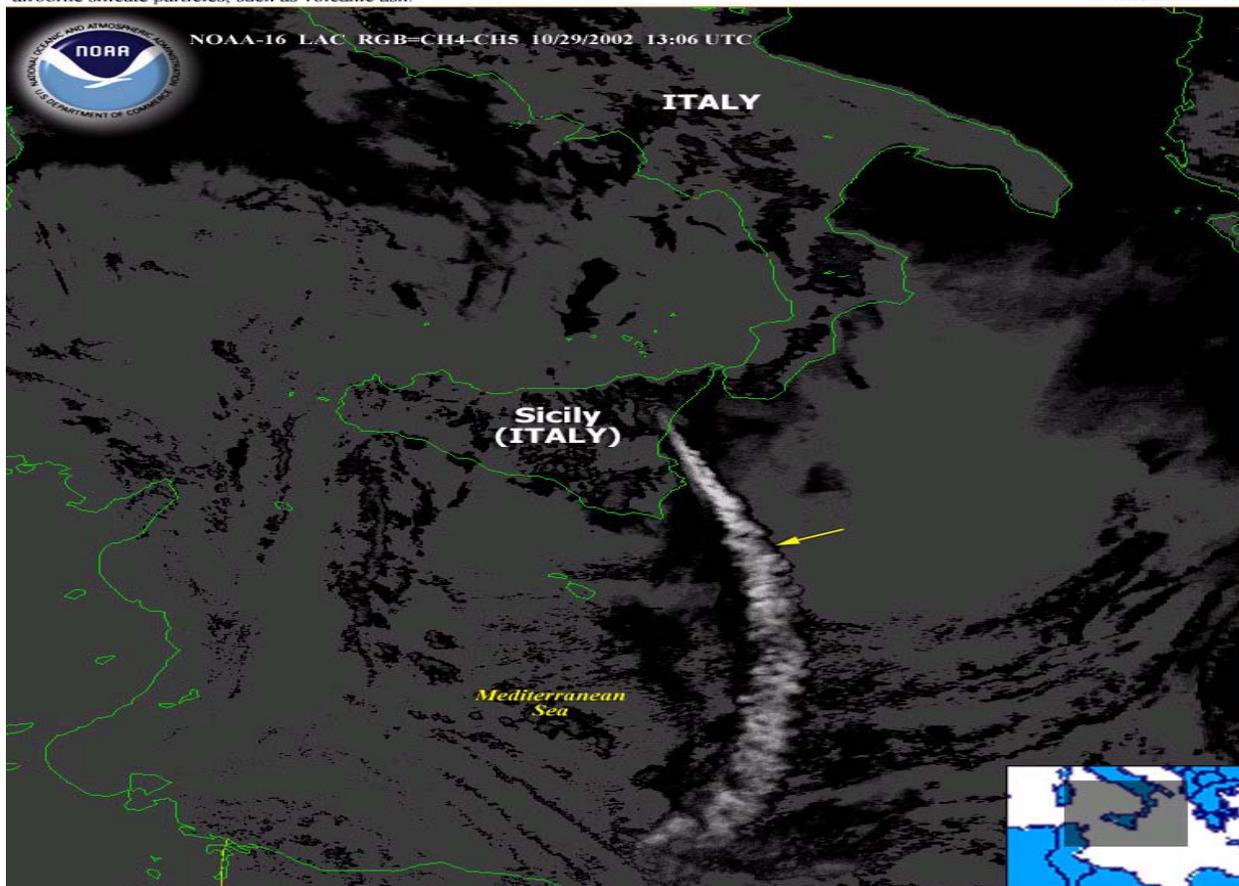


Figura 5.7: Trajetórias produzidas pelo vulcão Etna (Fonte NOAA).

Utilizando os dados de reanálises do mesmo período, a seguir, são apresentadas as trajetórias fundamentadas no método de FREITAS (1999), para o período em que ocorreu a liberação das partículas vulcânicas para atmosfera. A simulação correspondeu a um período de 24 horas de integração numérica. Esta modelagem representa um teste de sensibilidade que pretende justificar a metodologia apresentada. Foi realizada uma simulação no dia 25 de outubro de 2002, período anterior ao evento, para saber qual seria o comportamento da pluma.

## Trajetórias Cinemáticas - 2002.10.25 0z

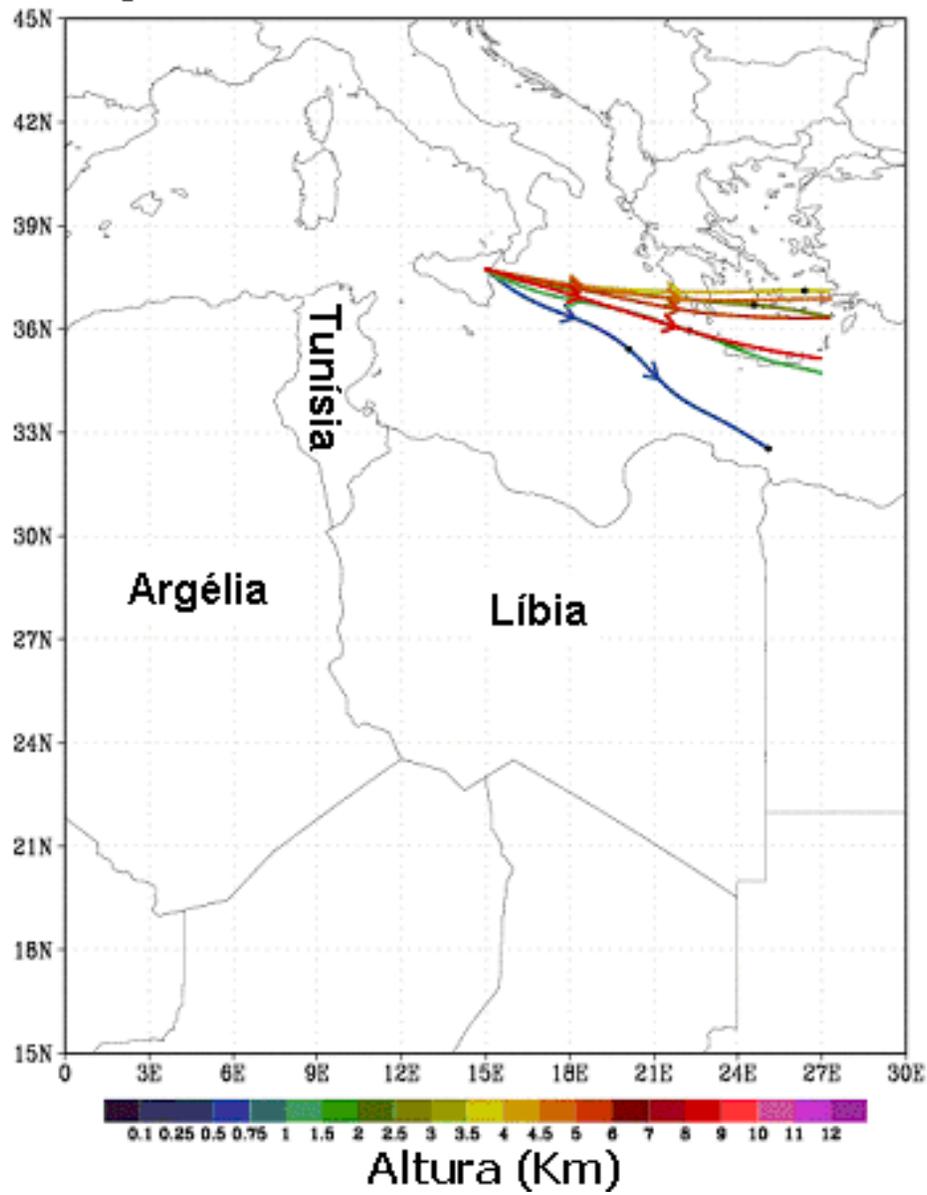


Figura 5.8: Simulação das trajetórias em sete níveis<sup>6</sup> diferentes.

<sup>6</sup> Os níveis correspondem a 3.500, 3.600; 3.700; 4.000; 4.500; 5.000 e 5.500 metros.

## Trajetoórias Cinemáticas - 2002.10.25 12z

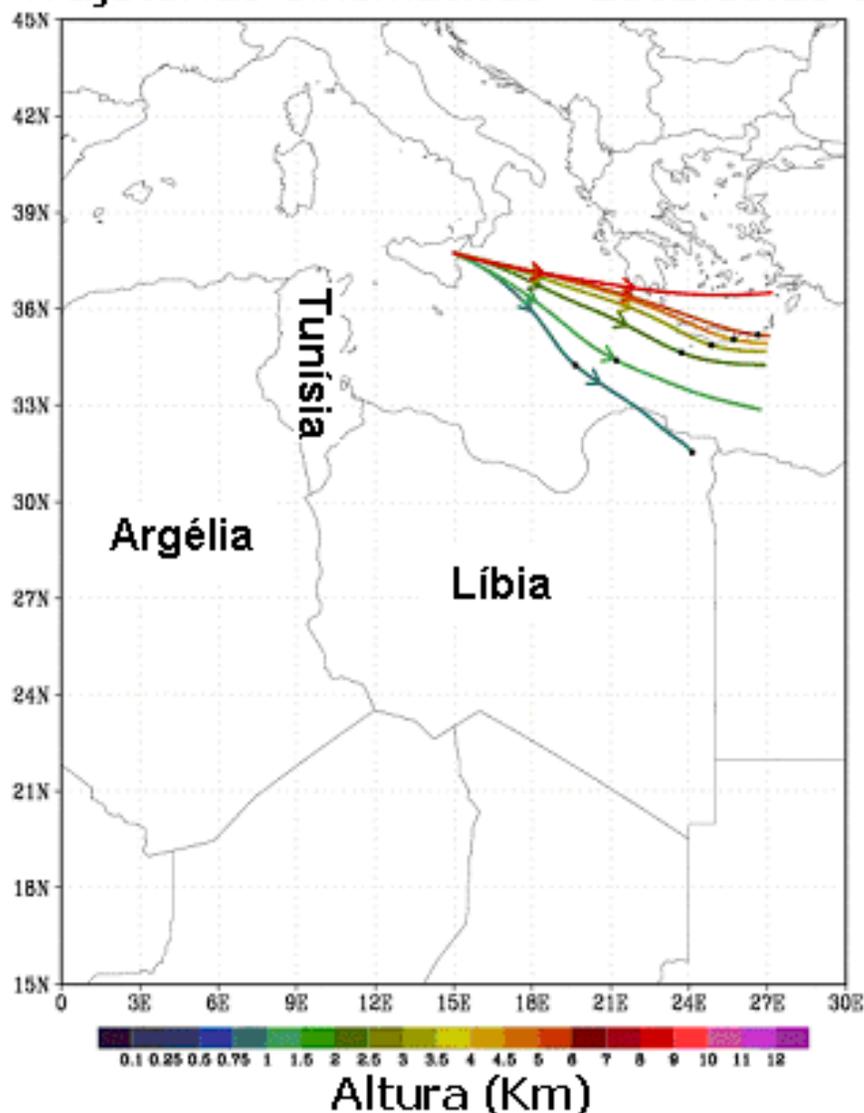


Figura 5.9: Simulação das trajetórias em sete níveis diferentes.

Observando-se as Figuras 5.8 e 5.9, constata-se que neste período os deslocamentos dos gases e partículas vulcânicas supostamente passariam sobre o mar Mediterrâneo. No entanto, a trajetória ocorrida demonstrou mudanças na direção leste, no sentido a região da Grécia. Desta maneira foi possível, através da simulação numérica, evidenciar constantes variações no comportamento da atmosfera que permitem rápidas alterações e mudanças do sentido de trajetórias. Assim, se o vulcão tivesse emitido material para a atmosfera nessa data, este material vulcânico se deslocaria para a região das ilhas gregas.

Observando-se a Figura 5.10 (a), gerada através dos canais 4 e 5 do satélite NOAA16, referente ao dia 28 de outubro de 2002, demonstra-se a presença das partículas do vulcão Etna, que em função das condições meteorológicas, a pluma vulcânica deslocou-se para sul sobre o mar Mediterrâneo e alcançou o continente africano, em direção à Líbia. Utilizando a metodologia apresentada, observa-se pela Figura 5.10 (b), que o comportamento simulado através da modelagem numérica corresponde à situação real apresentada na Figura 5.10 (a).

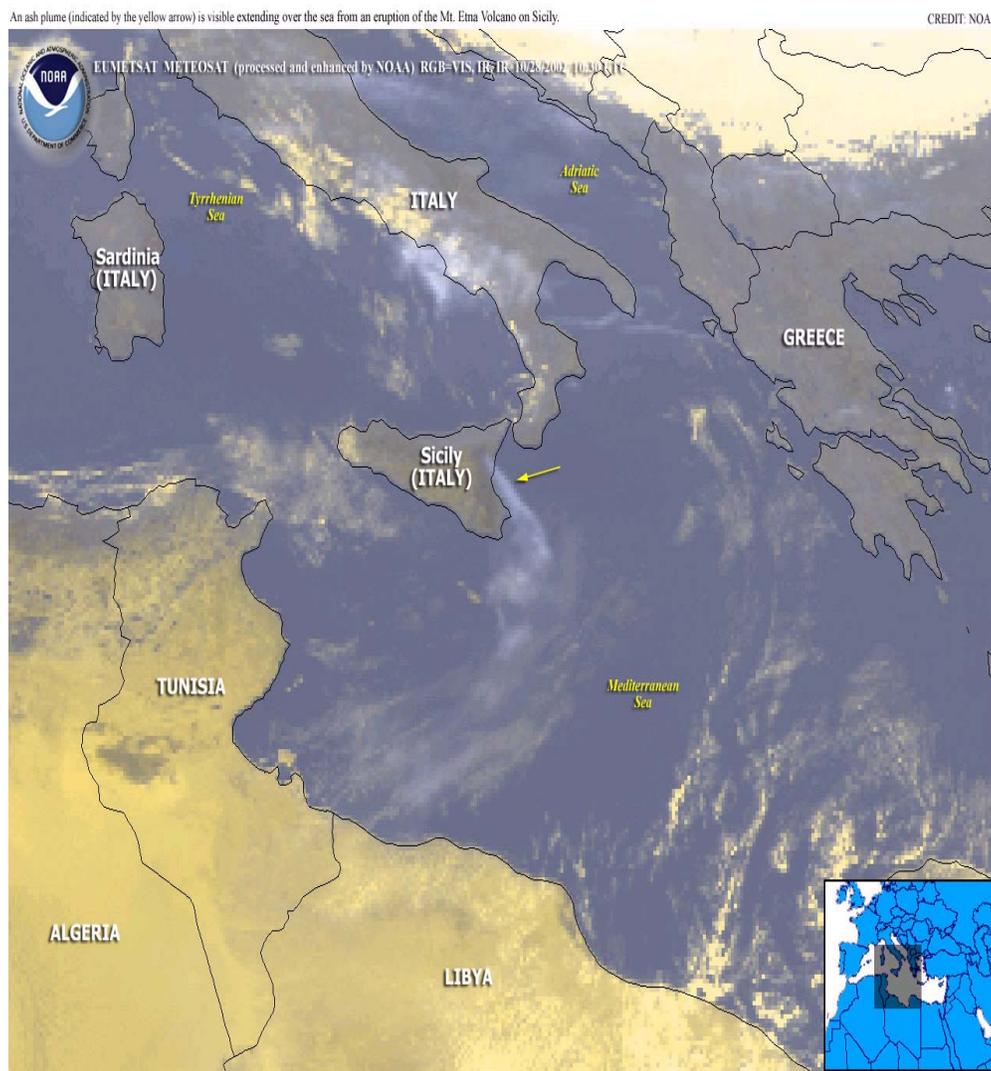


Figura 5.10: (a) Trajetórias obtidas pelo satélite NOAA (Fonte NOAA).

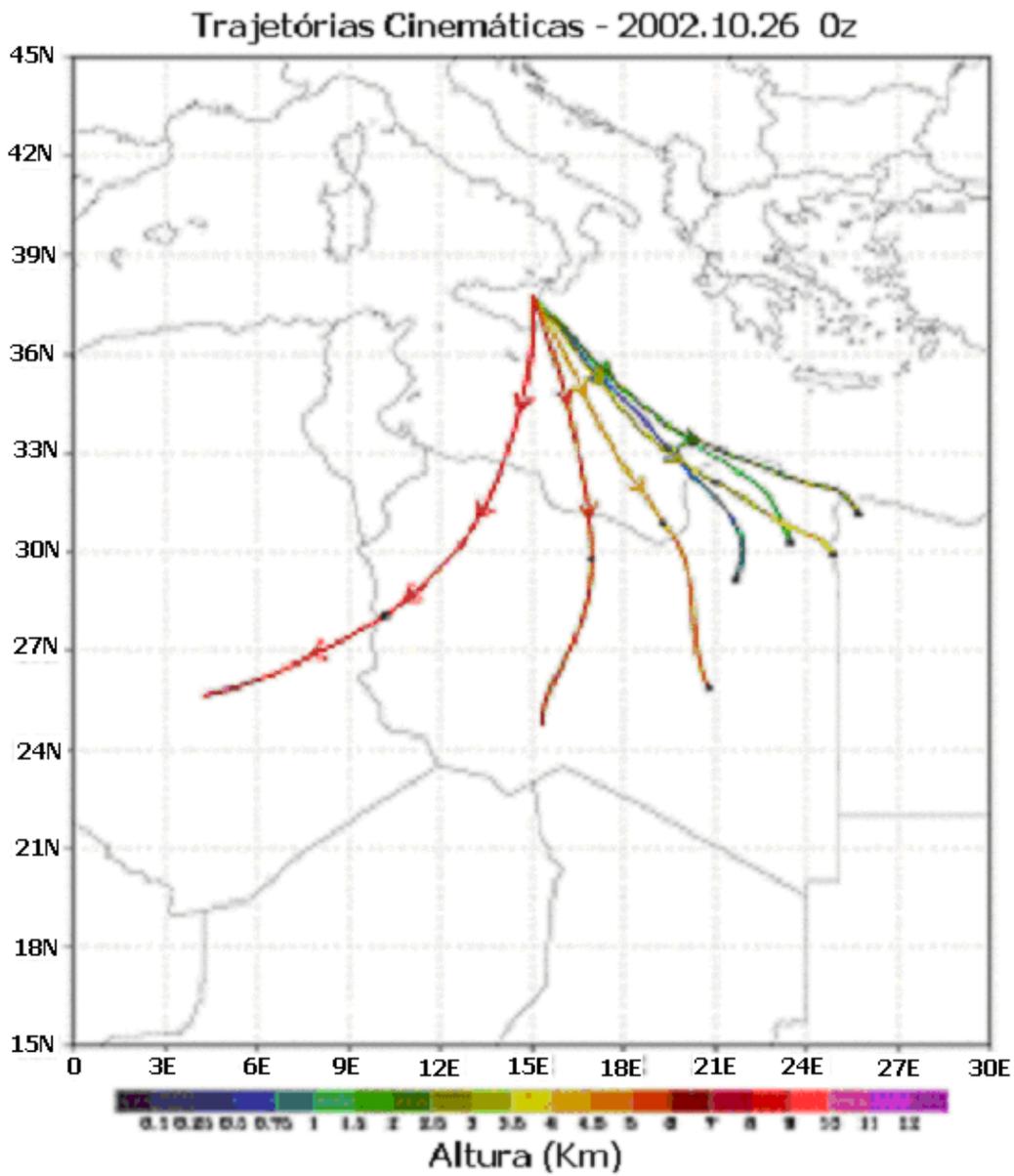


Figura 5.10: (b) Resultado da simulação numérica das trajetórias.

Neste teste de sensibilidade, os resultados apresentam uma boa aproximação quando comparados com a situação real. Além dos dois modelos acoplados, o fator que permitiu obter este resultado foi a qualidade dos dados meteorológicos que permitiram

reproduzir as condições atmosféricas de maneira realista, garantindo um bom resultado final. A seguir, serão apresentados os resultados das trajetórias referentes ao mesmo período para diferentes níveis de altitude (Figura 5.11 e Figura 5.12).

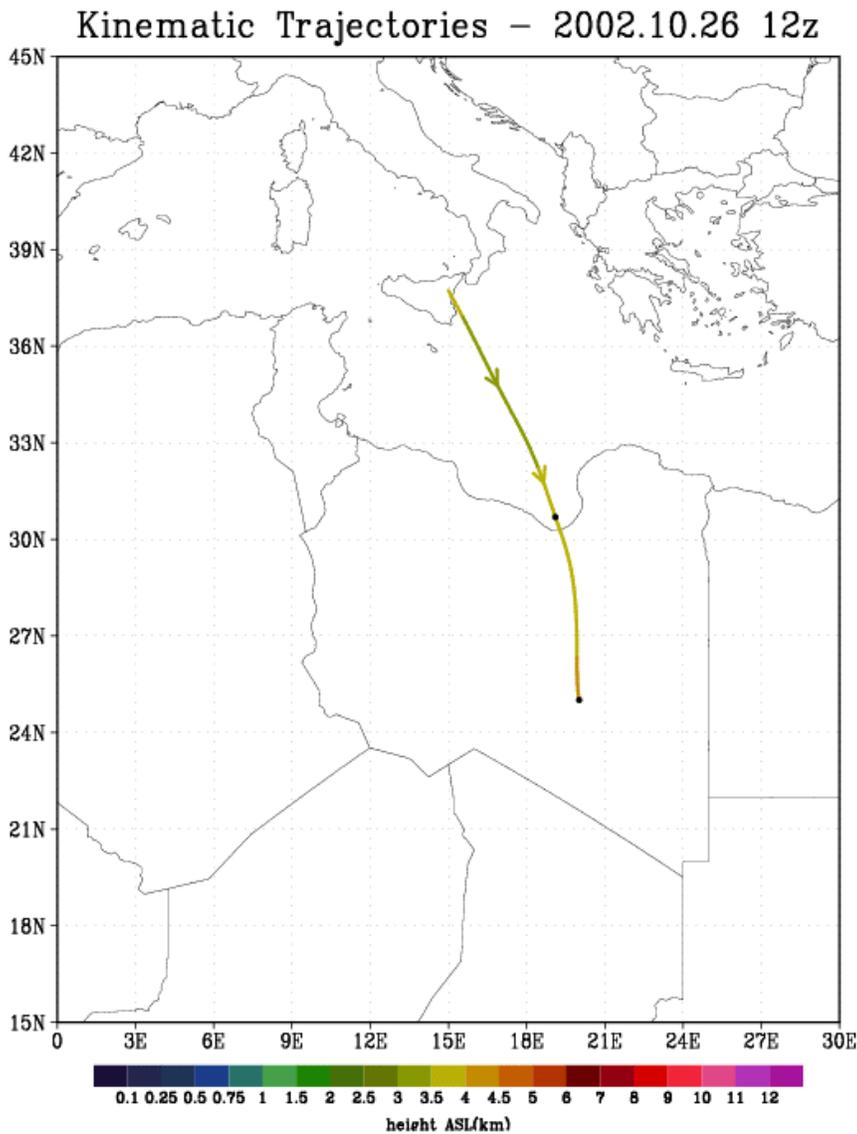


Figura 5.11: Simulação da trajetória para a altura de 3.500 m.

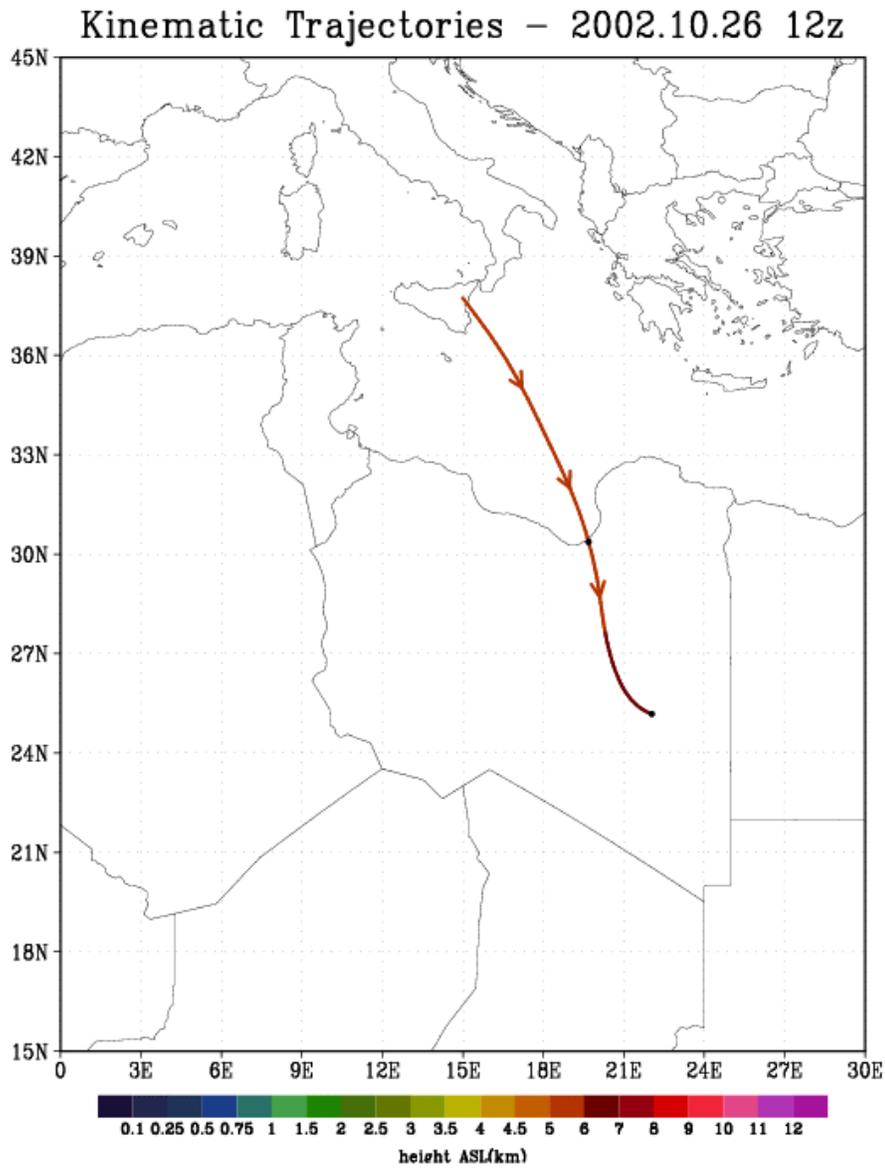


Figura 5.12: Simulação da trajetória para a altura de 4.500 m.

Observando-se as trajetórias exibidas nas Figuras 5.11 e 5.12, constata-se que seu comportamento, obtido através da simulação, corresponde ao comportamento das trajetórias reais. Desta forma, evidencia-se que os resultados, apresentados através das simulações, assemelham-se visualmente aos dados obtidos durante o evento.

O objetivo principal desse experimento foi à obtenção dos ajustes e calibração dos modelos, pois o RAMS estava sendo implementado na versão 4.3 e o modelo de Freitas também. Para a realização de simulações das condições atmosféricas reais, principalmente nos aspectos da evolução, desenvolvimento e dispersão dos gases ou de material particulado emitidos.

Finalmente, os resultados obtidos pelos testes de sensibilidade são importantes ferramentas para segurança do transporte aéreo. Partículas oriundas de explosões vulcânicas, quando em contato com turbinas de aeronaves podem afetar seu funcionamento e ocasionar pane no motor. Portanto, auxiliados por diagnósticos de possíveis trajetórias oriundas de partículas vulcânicas, pilotos poderão alterar rotas e evitar transtornos.

### **5.3. Simulação em Situação Atmosférica não Perturbada**

A seguir apresentamos as trajetórias médias climatológicas, utilizando a técnica sugerida por FREITAS (1999), para períodos correspondentes a 72 horas de integração numérica. Nestas simulações hipotéticas o objetivo é analisar os deslocamentos dos radionuclídeos considerando os seguintes fatos:

- a) o complexo nuclear como uma fonte pontual;
- b) os poluentes radioativos possuem a propriedade de não interagir com os demais elementos químicos da atmosfera, como acontece com outros tipos de poluentes.

Ressalta-se que tais resultados preliminares permitem uma análise generalizada do método. Para melhor compreensão desta metodologia, não foram considerados os elementos radioativos que possuem o tempo de meia vida curto, ou seja, com menos de 24 horas. Consideramos situações de não perturbação ao sistema atmosférico como a chegada de sistemas frontais ou eventos perturbadores semelhantes. Os dados usados pelo modelo RAMS foram às climatologias dos ventos troposféricos e estratosféricos nos meses de janeiro e julho. Estas climatologias ou ventos médios se referem aos últimos 30 anos das reanálises do NCEP/NCAR (KALNAY *et al.*, 1996; KISTLER *et al.*, 2000).

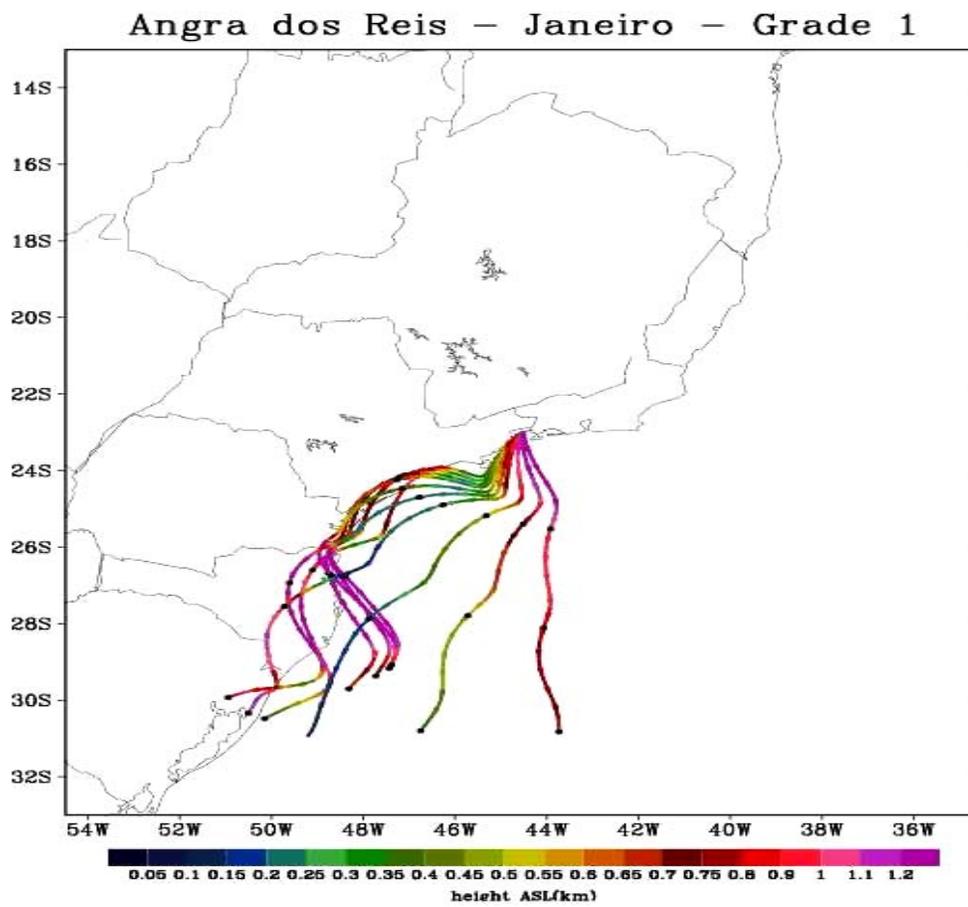


Figura 5.13: Comportamento das trajetórias em 72 horas de integração numérica para janeiro.

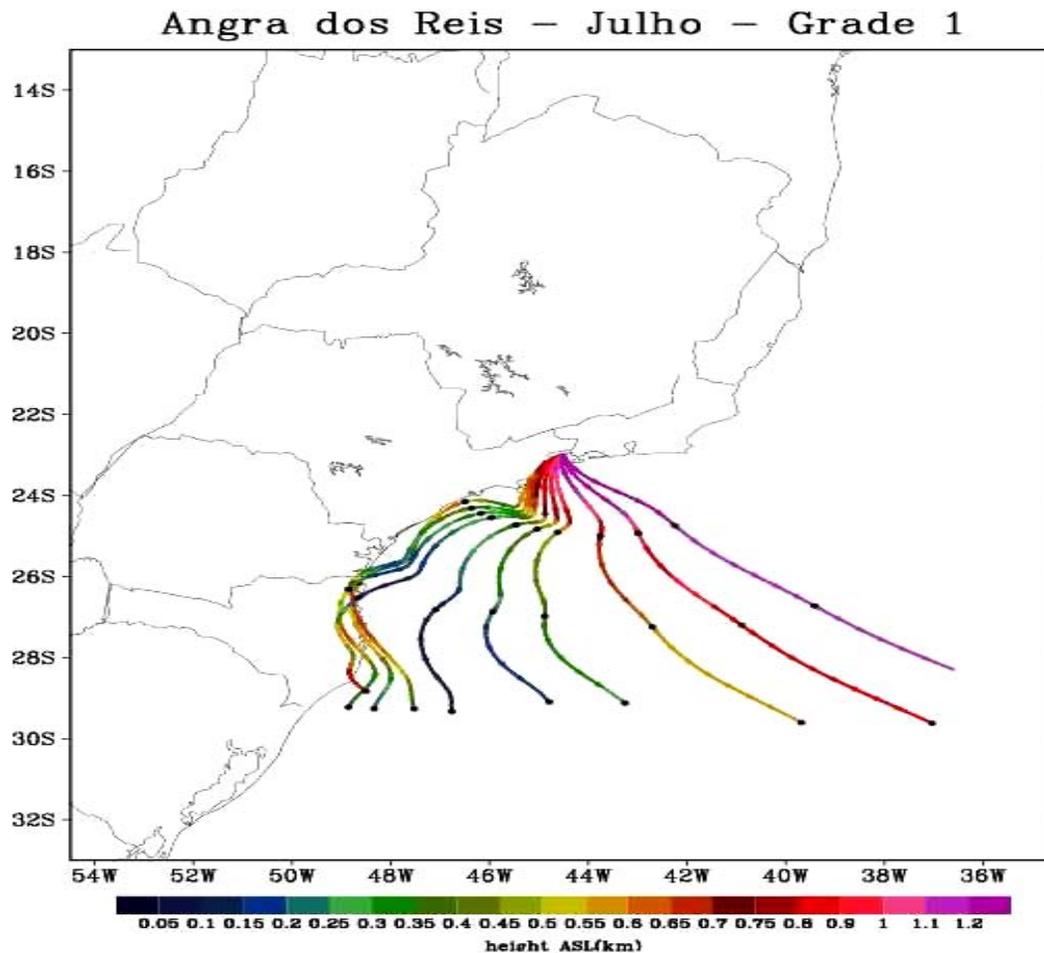


Figura 5.14: Comportamento das trajetórias em 72 horas de integração numérica para julho.

Nas Figuras 5.13 e 5.14, foram simuladas dez alturas de fontes de trajetórias (50, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 700, 900 e 1.100 metros), sendo que cada pequeno ponto ao longo da trajetória representa 24 horas de integração.

O conjunto destas trajetórias apresenta um comportamento típico com os poluentes seguindo ao longo do litoral, para sul da região da fonte, uma vez que os ventos climatológicos são de noroeste, de norte e nordeste. Ao longo da integração, a cada 24 horas, observa-se a existência de curvaturas que transportam as parcelas para o mar pela

manhã e as trazem de volta ao continente à tarde, representando o ciclo diurno da circulação regional ao longo do litoral sudeste e sul brasileiro.

Na Figura 5.13, referente ao mês de janeiro, a trajetória chega a alcançar a Lagoa dos Patos no Rio Grande do Sul. A tendência das trajetórias, no mês de janeiro, é de se manter nas proximidades do litoral. No mês de julho (Figura 5.14), especialmente em níveis mais altos, as trajetórias deslocaram-se para o oceano. Portanto, pode-se supor que, independentemente da época do ano, as trajetórias climatológicas provenientes da região de Angra dos Reis seguem próximo ao litoral sul e as cidades costeiras seriam as mais impactadas. É importante ressaltar, que nesta simulação foram utilizadas apenas as médias climatológicas e não foram consideradas quaisquer perturbações nos sistemas de circulação do vento.

#### 5.4. Grades Usadas nas Simulações

No presente estudo, foram utilizadas quatro grades; a primeira com menor resolução espacial (denotada de grade mãe), a segunda e a terceira chamada de G2 e G3, e a quarta grade mais refinada centrada na CNAAA, conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Configuração espacial e temporal das simulações.

Grade	$\Delta x^*$	$\Delta y^*$	$\Delta t^*$	Pontos em x	Pontos em y	Domínio
MÃE (G1)	27	27	60	32	28	Parte da Região Sudeste
G2	9	9	20	32	26	Parte dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro
G3	3	3	6,7	32	26	Região em torno do município de Angra dos Reis
G4	1	1	2,2	32	26	Região em torno da CNAAA

\*Medidas de espaço em km e tempo em segundos.

A grade mãe é importante para verificar o poder de simulação de fenômenos de mesoescala, como uma frente, a G2 espera-se a simulação um fenômeno de formação pré-frontal, as grades G3 e G4 representam os fenômenos que estão na micro escala, como as trocas de energia da camada limite. Na Tabela 5.2 mostra a quantidade de pontos usadas no eixo vertical para todas as grades utilizadas.

Tabela 5.2: Dimensões verticais das quatro grades usadas nas simulações.

	Grades verticais
Números de Pontos em z	32
$\Delta z$ mínimo (m)	50
$\Delta z$ máximo (m)	1200
Fator de crescimento	1,15

Como foram realizados experimentos em grades tridimensionais, nos quais investigou-se, por meio de simulações numéricas, se o modelo conseguiria simular sinais ou indicativos do fenômeno, sendo a diferença entre as configurações dos experimentos a parametrização de turbulência utilizada pelo RAMS. A seguir as Figuras 5.15 a 5.17 mostram o domínio que foi realizada a simulação.

## Grades 1 e 2

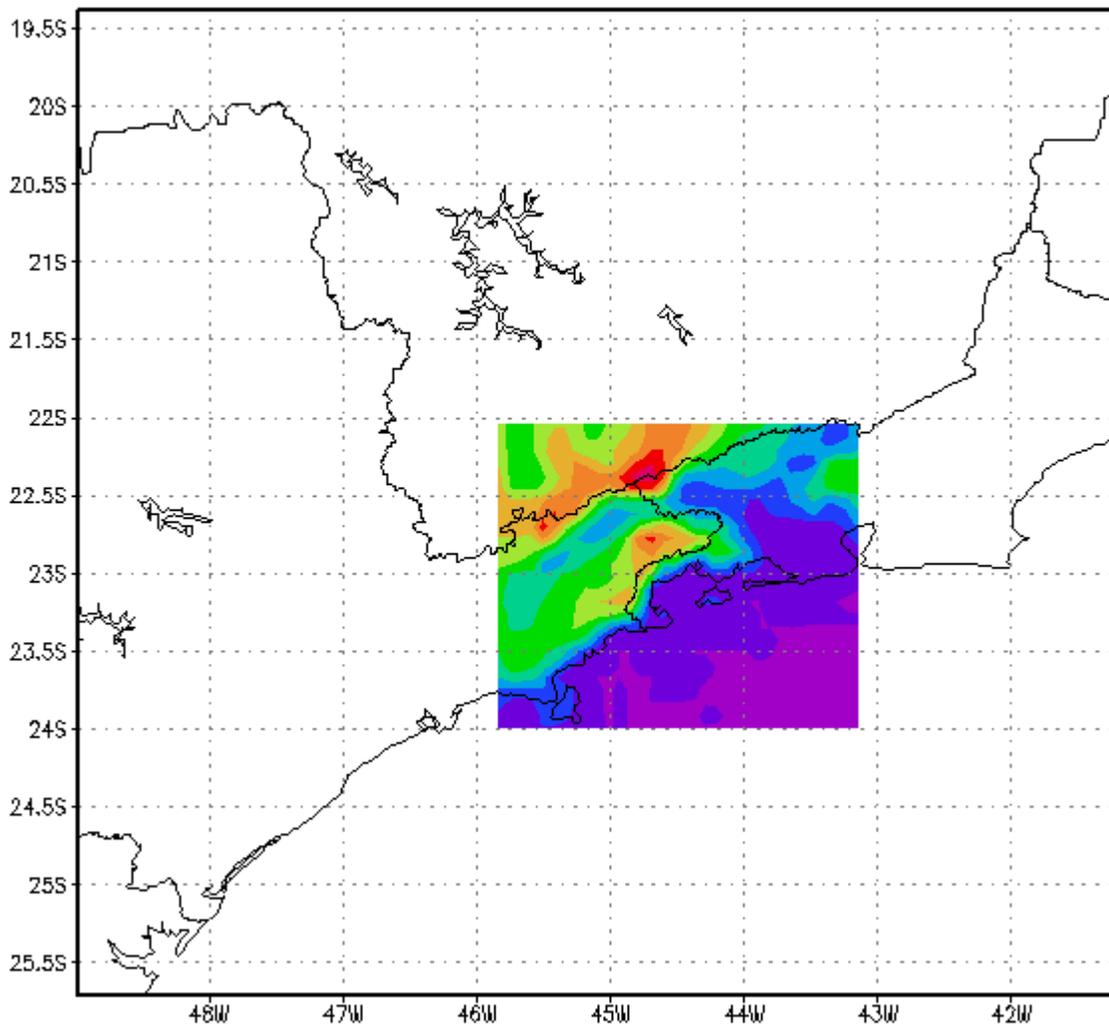


Figura 5.15: Área do estudo, apresenta duas grades aninhadas a externa (grade mãe) corresponde a 27 km x 27 km, e a grade interna (G2, colorida) corresponde a 9 km x 9 km.

## Grades 2 e 3

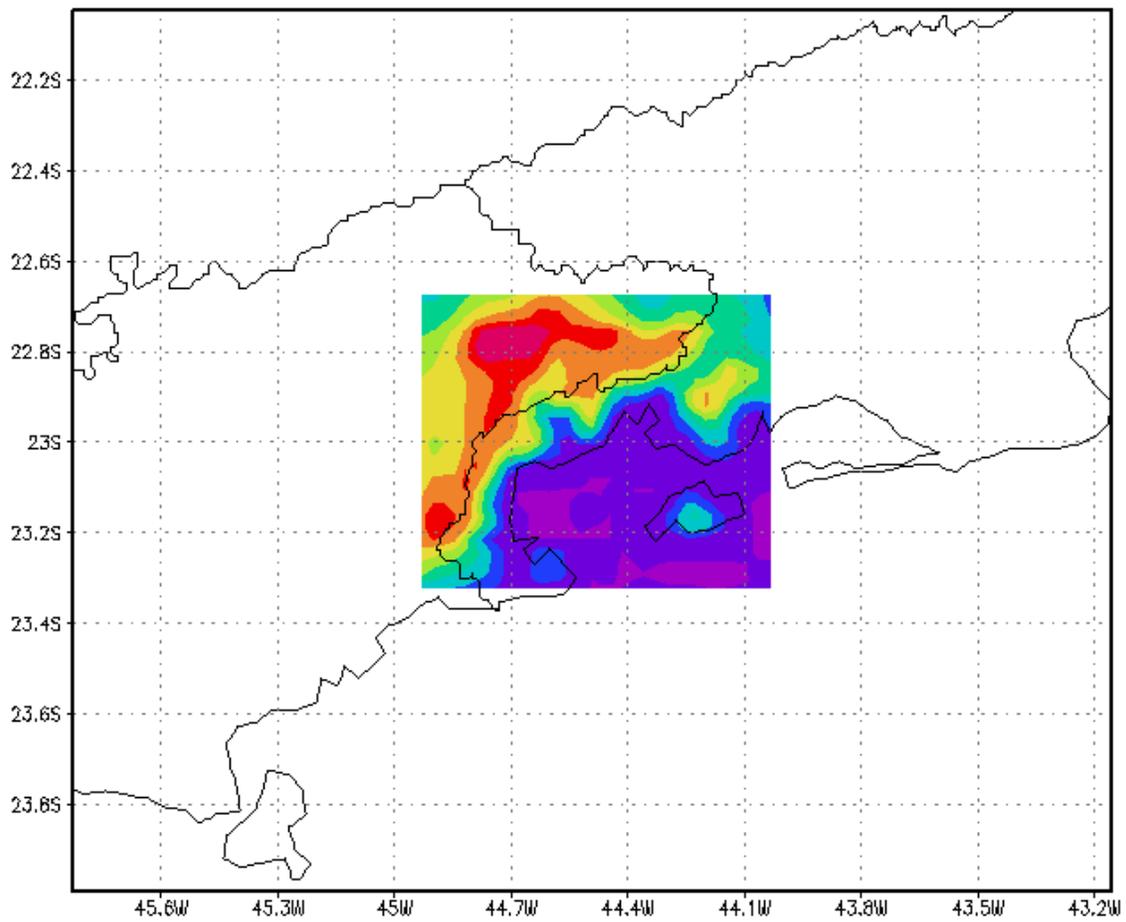


Figura 5.16: Área do estudo, apresenta duas grades aninhadas a externa (G2) corresponde a 9 km x 9 km, e a grade interna (G3, colorida) corresponde a 3 km x 3 km.

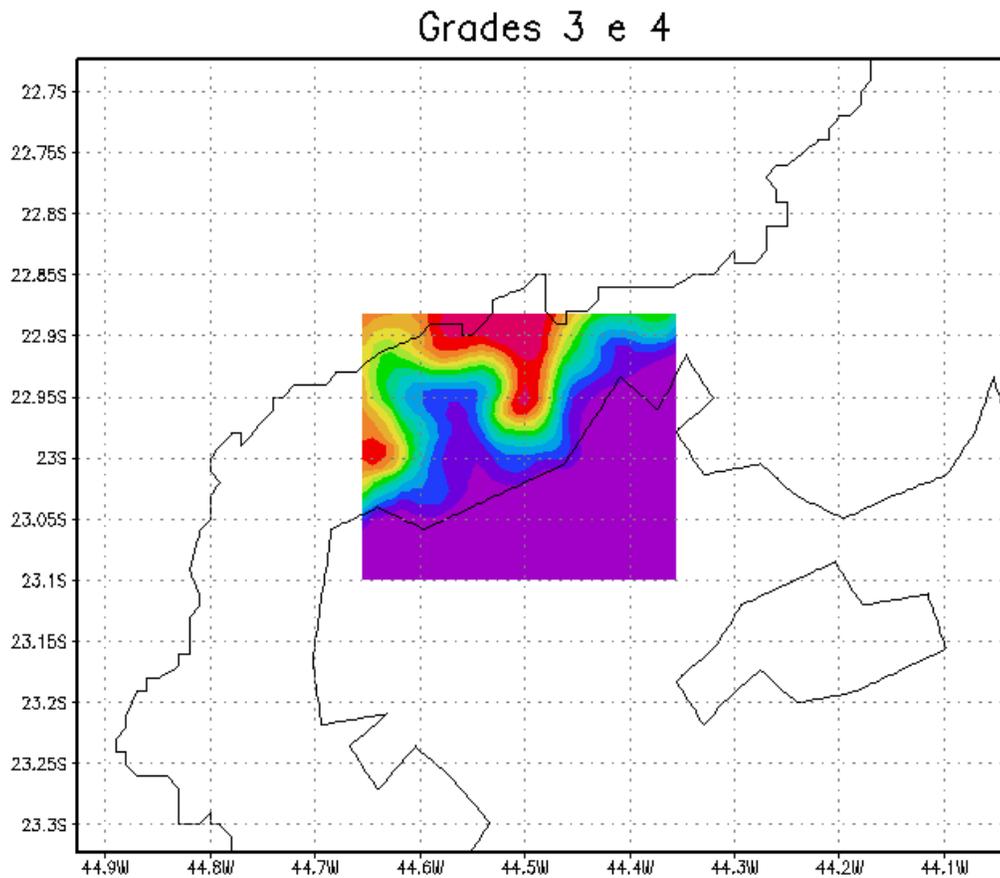


Figura 5.17: Área do estudo, apresenta duas grades aninhadas a externa (G3) corresponde a 3 km x 3 km, e a grade interna (G4, colorida) corresponde a 1 km x 1 km.

A Figura 5.15 mostra a grade com menor resolução espacial e composta de 32 pontos na direção leste-oeste e 28 na direção norte-sul e um espaçamento de 27 km x 27 km, centrada em  $-22,5^{\circ}$  sul e  $-43,12^{\circ}$  oeste, capturou as informações de larga escala. A técnica de *downscaling*, que consiste na redução de escalas, permitiu que as informações das escalas maiores passassem para as escalas menores e vice-versa com o aninhamento *two-way*.

A Figura 5.16 mostra a grade intermediária com resolução de 10 km x 10 km e com 32 pontos na direção leste-oeste e 26 na direção norte-sul facilitou a comunicação da grade mãe, além a região que cobre parte do estado de São Paulo e do Rio de Janeiro, capturando as características de mesoescala.

A Figura 5.17, composta de 32 pontos na direção leste-oeste e 26 pontos na direção norte-sul, com um espaçamento de 1,0 km x 1,0 km, cobriu o domínio da CNAAA, centrada em  $-23,0^{\circ}$  sul e  $-44,5^{\circ}$  oeste.

### **5.5. Estudo de Caso sob Influência de ZCAS**

Consideramos, neste trabalho, o Complexo Nuclear de Angra dos Reis como uma fonte pontual. A situação hipotética será correspondente a um acidente de nível 7, conforme a classificação *International Nuclear Event Scale* – INES, considerado como grave (anexo A). Em acidentes de nível 7 ocorre a liberação para o exterior de uma fração importante de material radioativo oriundo de uma instalação nuclear. Neste caso, os gases são constituídos tipicamente de uma mistura de diferentes produtos de fissão radioativos podendo apresentar características de vida curta ou longa. Esta liberação poderia ocasionar efeitos agudos para a saúde dos operários da unidade em questão e efeitos tardios para a saúde da população de uma vasta região, país, ou mesmo de outros países, com conseqüências diretas ao meio ambiente e em especial à atmosfera (FRANCO *et al.*, 2004).

Nesse estudo de caso, será realizado um diagnóstico das trajetórias, levando em consideração o evento ocorrido que, neste caso, corresponde a uma Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS. Assim, o principal enfoque é analisar o comportamento dos campos do vento durante o evento ocorrido no dia 8 de dezembro de 2002 (Figura 5.18), quando ocorreram chuvas intensas na região.

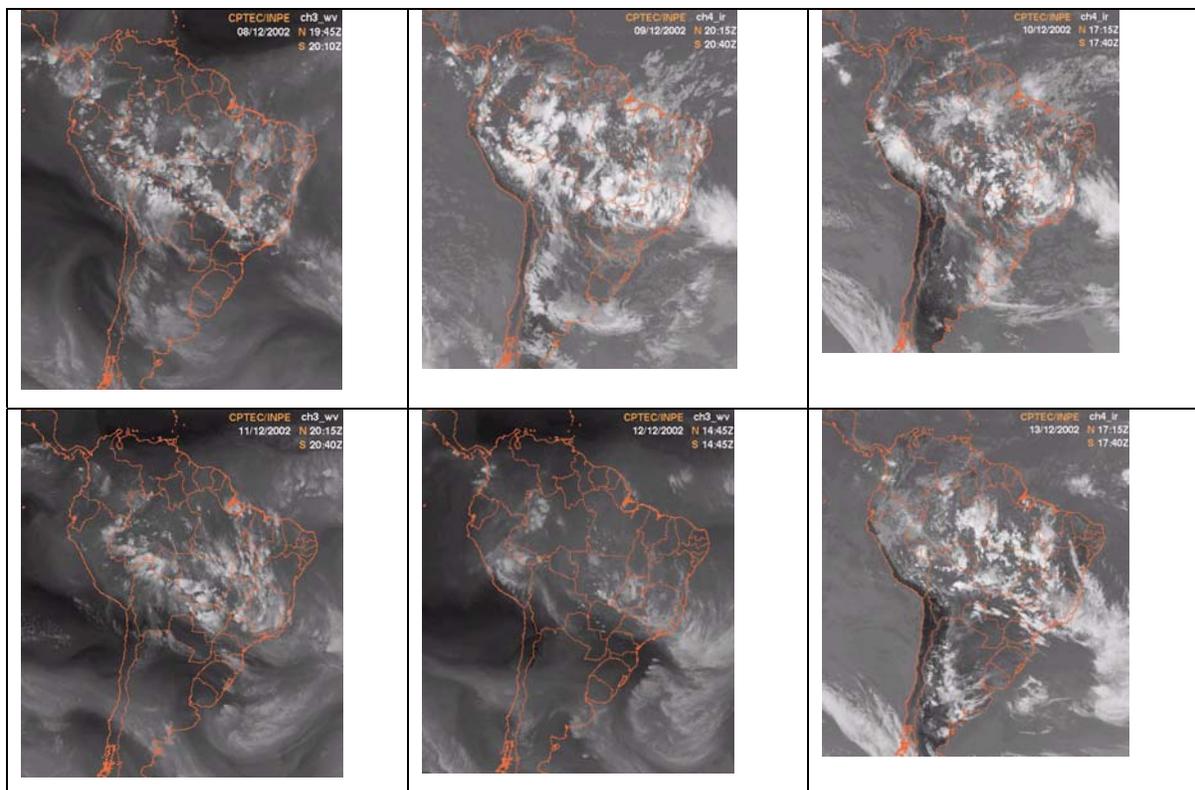


Figura 5.18: Imagens do evento de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS no período de 8 a 13 de dezembro de 2002 (Fonte CPTEC/INPE).

A Figura 5.18 mostra uma seqüência das imagens a partir do dia 8 de dezembro de 2002, com um intervalo de aproximadamente de 24 horas. Evidencia-se forte influência da Zona da Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), isto é, a frente fria permanece semi-estacionária por vários dias sobre a parte central da América do Sul e sobre grande extensão do Atlântico Sul. Este evento apresentou uma linha de nuvens estendendo-se desde o sul da Amazônia, atravessando a região Centro - Oeste e estendendo-se até a região Sudeste, especialmente na costa do estado do Rio de Janeiro e seguindo em direção ao Oceano Atlântico. Como característica marcante, ressalta-se a produção de chuvas intensas persistindo por alguns dias. No período de 08 a 09 de dezembro de 2002 o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrou na Estação Meteorológica do município de Angra dos Reis, 129 mm de precipitação. Ocorreu uma série de impactos geoambientais e de transtornos no tráfego, enchentes, alguns deslizamentos em diferentes locais e o fechamento da estrada Rio – Santos. A Figura 5.19

da componente meridional gerada do vento pelo RAMS mostra que existem ventos do quadrante sul.

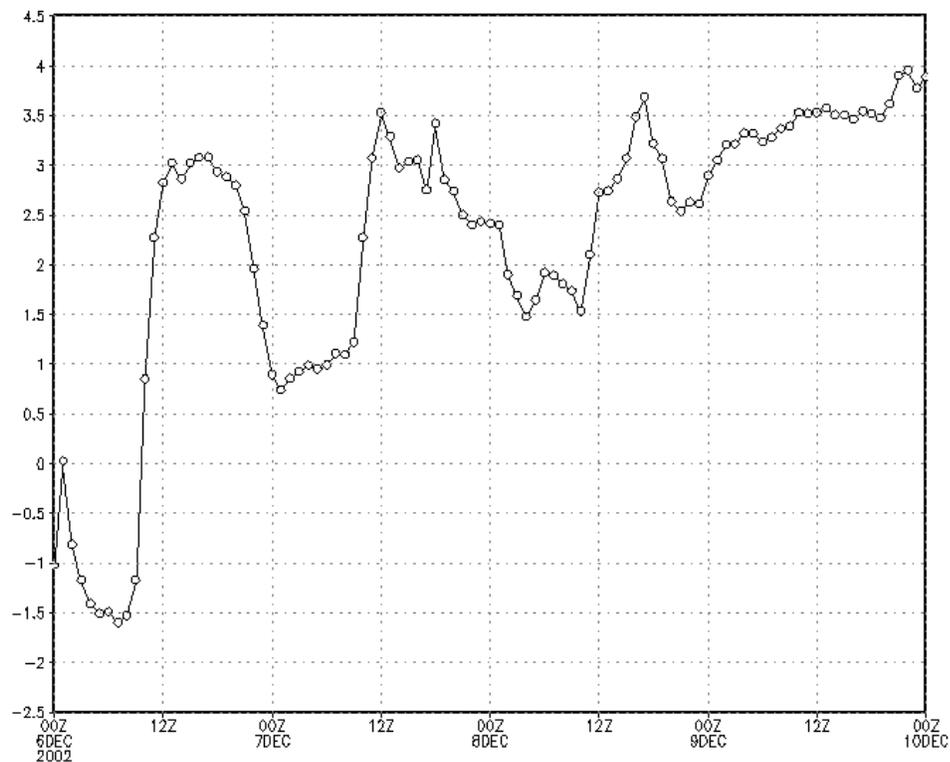


Figura 5.19: Componente meridional do vento.

Ao observar a Figura 5.19, mostra que no período entre 7 a 10 de dezembro de 2002 a componente meridional do vento apresenta valores positivos, o que garante a predominância de ventos do quadrante sul nessa situação. Logo, fica evidenciada a presença de um sistema frontal porém, no dia 6 a componente meridional dos ventos é negativa e nesse caso, corresponde ao quadrante norte. A seguir, a Figura 5.20 representa a precipitação gerada pelo modelo RAMS em 08/12/2002, utilizando os dados de reanálises desse período.

### Angra dos Reis - ZCAS

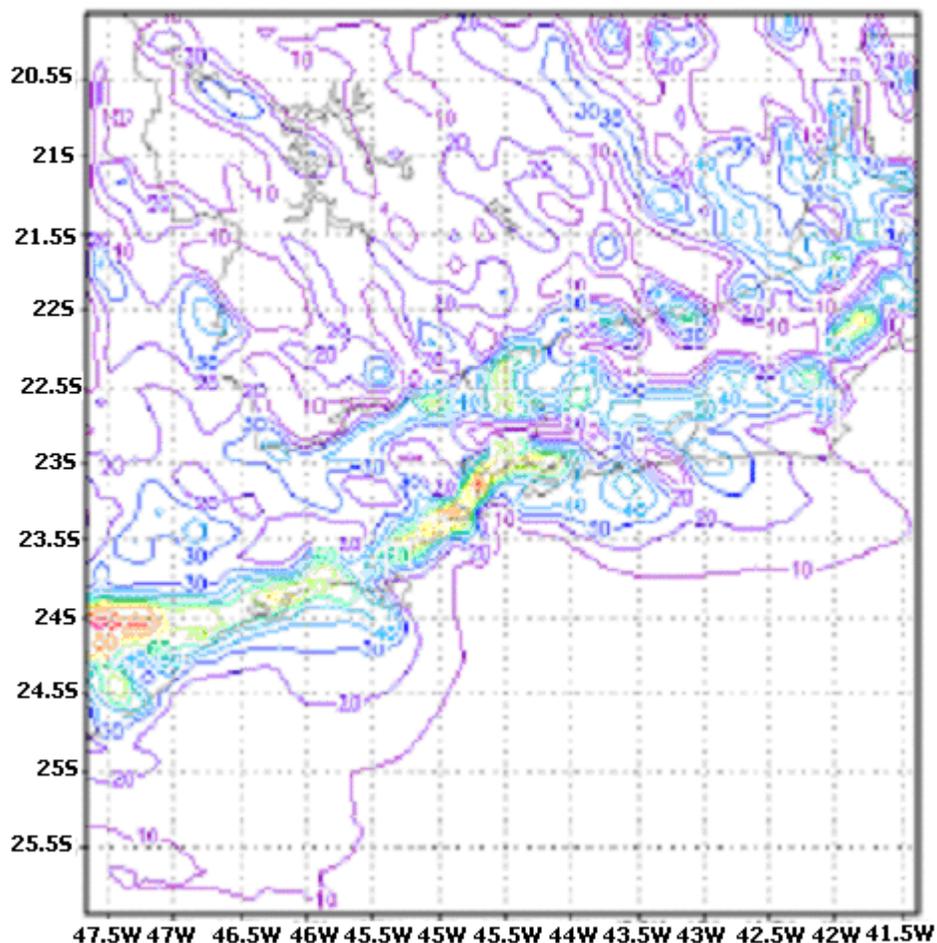


Figura 5.20: Precipitação obtida através do modelo RAMS (08/12/2002).

Comparando a Figura 5.20 com as imagens do satélite deste dia (Figura 5.18), nota-se que existe forte precipitação acompanhando o litoral. Este fato pode estar associado à topografia, elemento determinante para os processos termodinâmicos que ocorrem na região, sob a influência de uma ZCAS.

Para efeito comparativo consideramos as trajetórias correspondentes aos dias 6 e 7 de dezembro de 2002, geradas em seis níveis: 100, 150, 200, 300, 400 e 500 m em relação ao nível do mar. Através da Figura 5.21 constata-se o deslocamento das trajetórias para o oceano e posterior retorno para o continente. Este fato pode estar associado ao sistema de brisa local. Nos dois primeiros níveis a movimentação das trajetórias não

ocorreu de maneira rápida. Cada ponto sobre as referidas trajetórias representa um período de 24 horas. A movimentação das quatro outras trajetórias, ocorreu rapidamente, ultrapassando a latitude da região de origem. Ao final, todas as trajetórias se deslocam para a região sudeste de Minas Gerais.

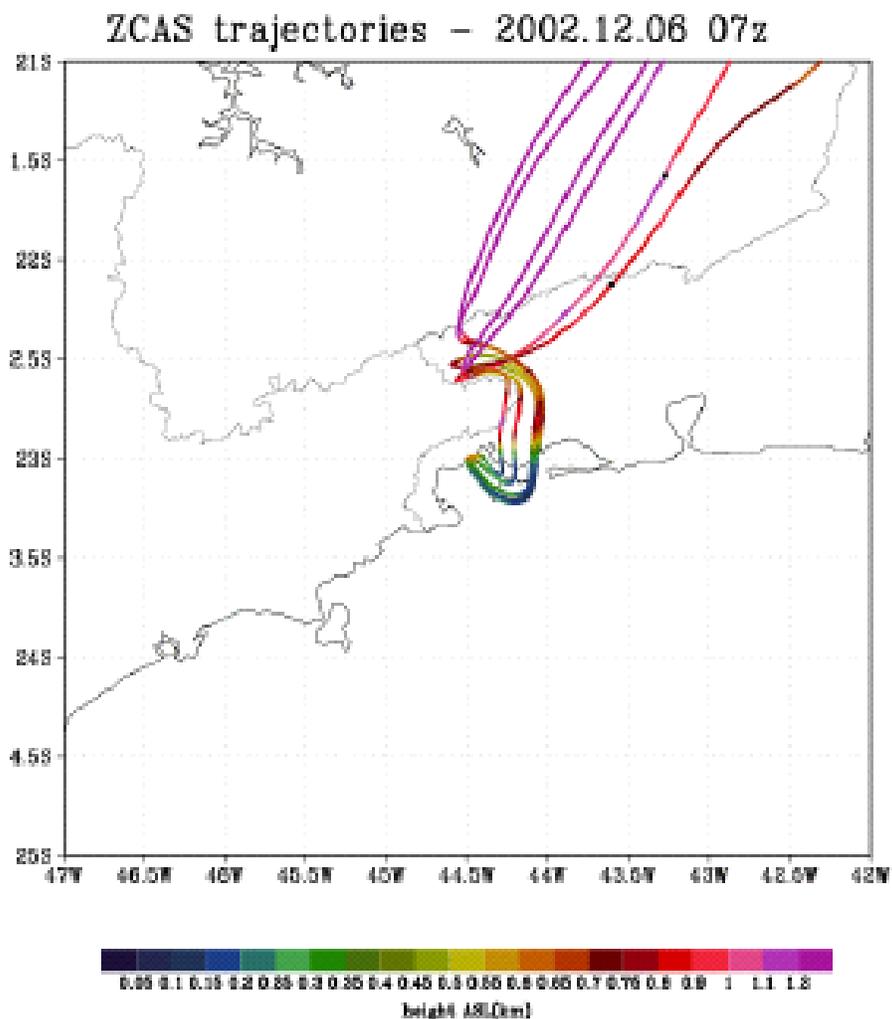


Figura 5.21: Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 7z.

Ocorre, de acordo com a Figura 5.21, uma forte influência da ZCAS capaz de gerar uma enorme perturbação no sentido das trajetórias. A Figura 5.22 referente ao dia 7 de dezembro de 2002, demonstra que todas as trajetórias simuladas alcançaram os níveis mais altos da camada limite e da baixa troposfera e que o deslocamento foi muito rápido

para todas as trajetórias, que continuaram deslocando-se para o setor sudeste do Estado de Minas Gerais.

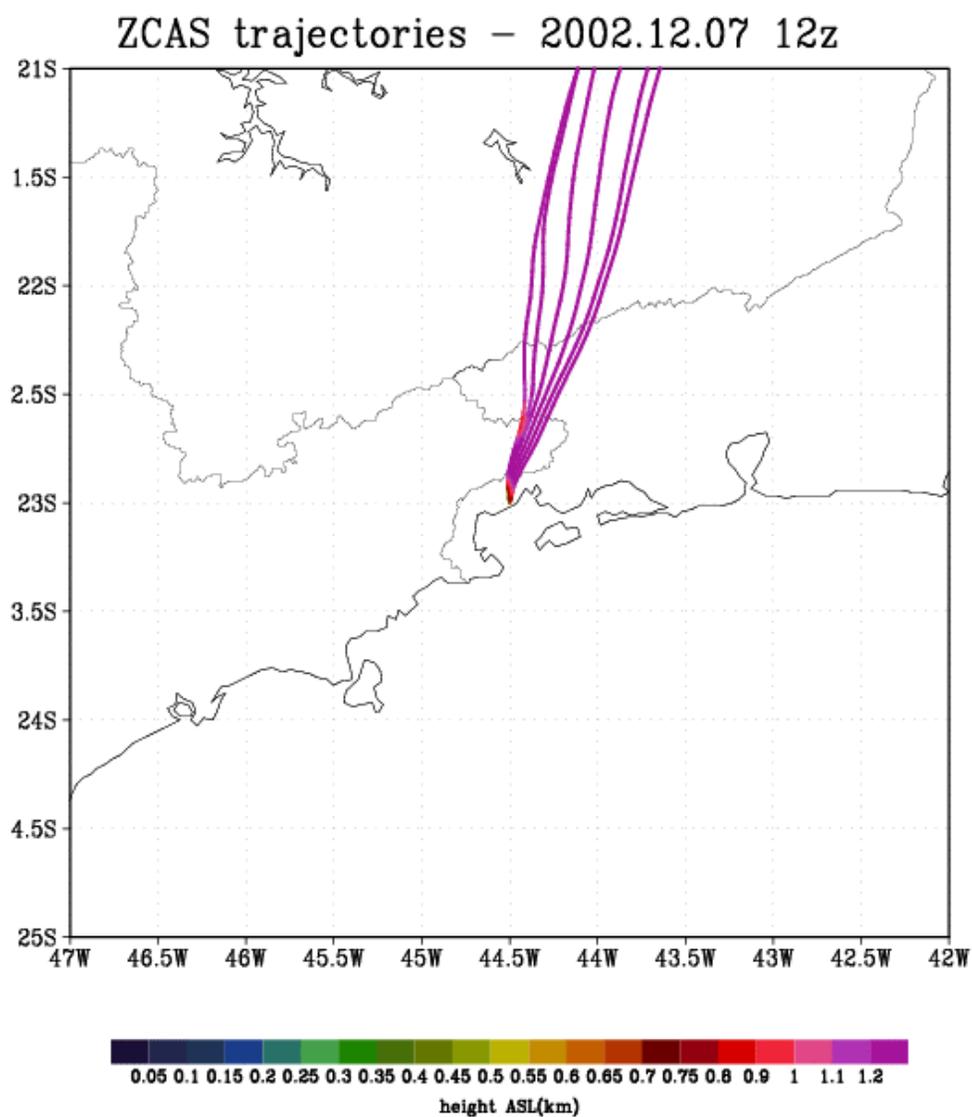


Figura 5.22: Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 12z.

A Figura 5.23 representa o dia 8 de dezembro de 2002, quando ocorreram os deslizamentos e quedas de barreiras. As trajetórias continuaram a se deslocar muito rapidamente chegando aos níveis mais altos da baixa troposfera em um pequeno espaço de tempo.

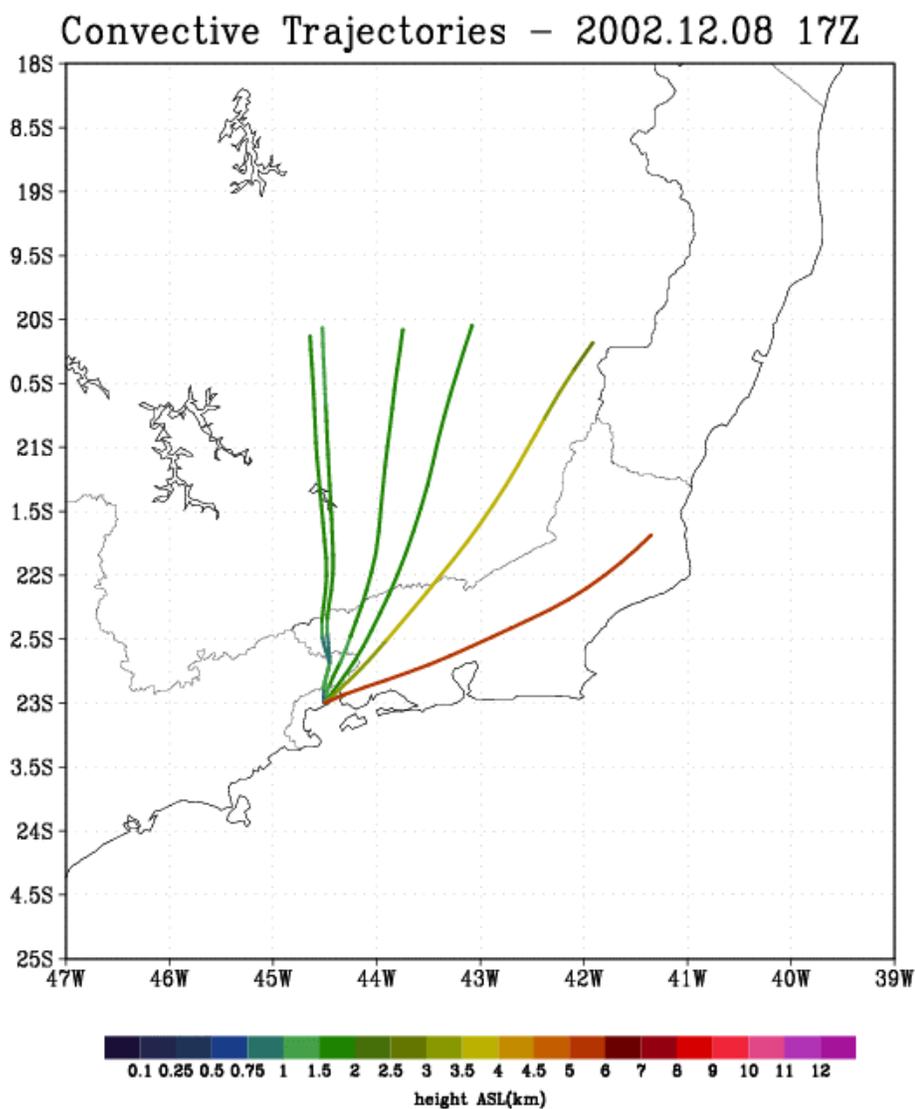


Figura 5.23: Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 17z.

O comportamento das trajetórias (Figuras 5.22 e 5.23) mantém quase as mesmas características, embora a Figura 5.23 apresenta que aconteceu uma variação em função dos ventos, esse fato que sugere haver uma forte convecção sobre a região, convecção esta garantida pela predominância da ZCAS. O setor à sudeste do Estado de Minas Gerais foi o que apresentou uma maior incidência no sentido das trajetórias, demonstrando que, em casos de fortes ventos, embora no nível mais alto (Figura 5.23) deslocou-se para o Estado do Rio de Janeiro, o que fica demonstrado que esses sistemas atmosféricos podem levar os radionuclídeos para longas distâncias muito rapidamente.

A seguir, serão apresentados os resultados das simulações em um domínio de 1 km x 1 km (Figura 5.24 a Figura 5.35), para esse refinamento pretende-se demonstrar a possibilidade de utilizar o modelo RAMS na micro escala.

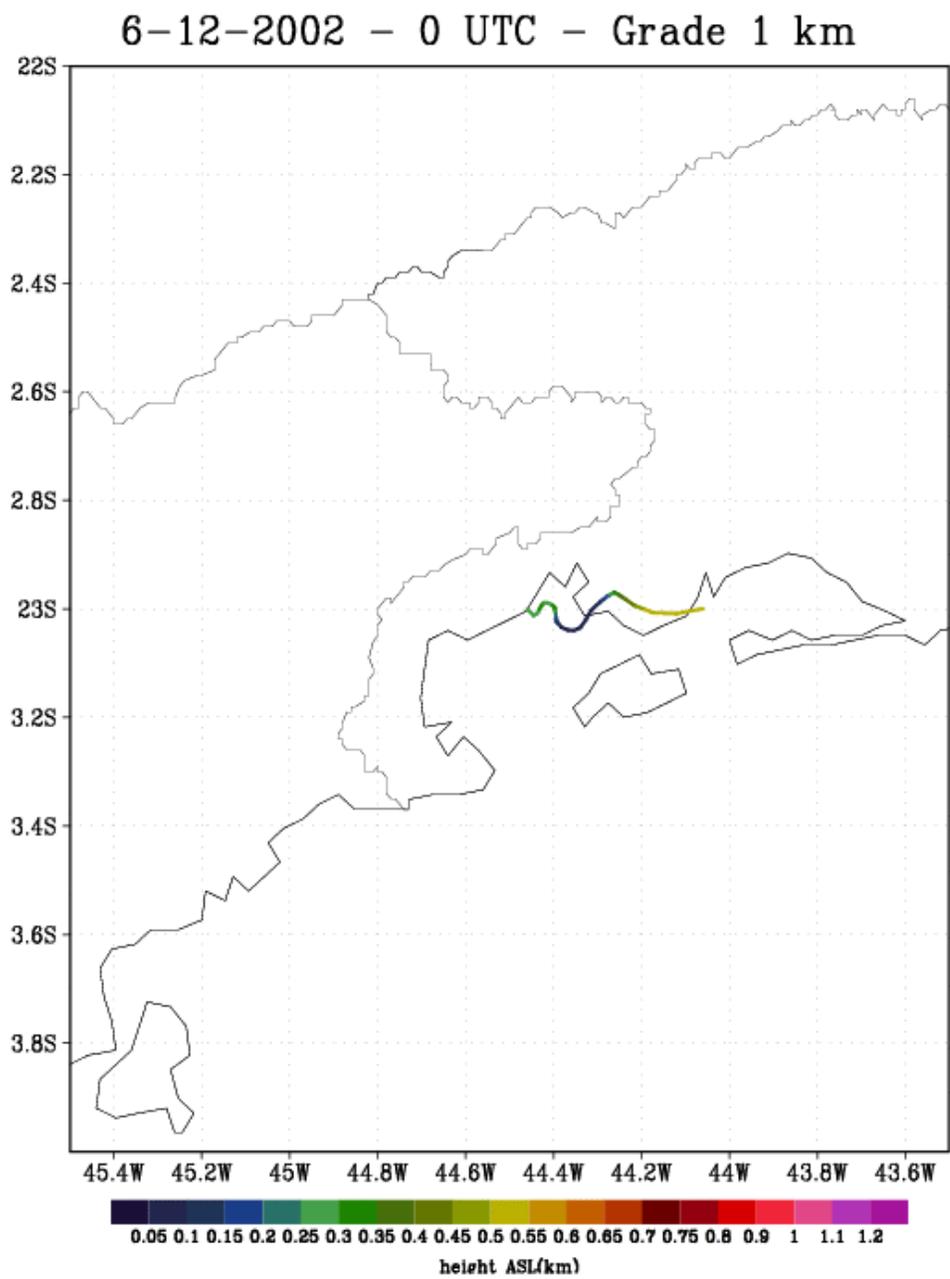


Figura 5.24: Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 0z.

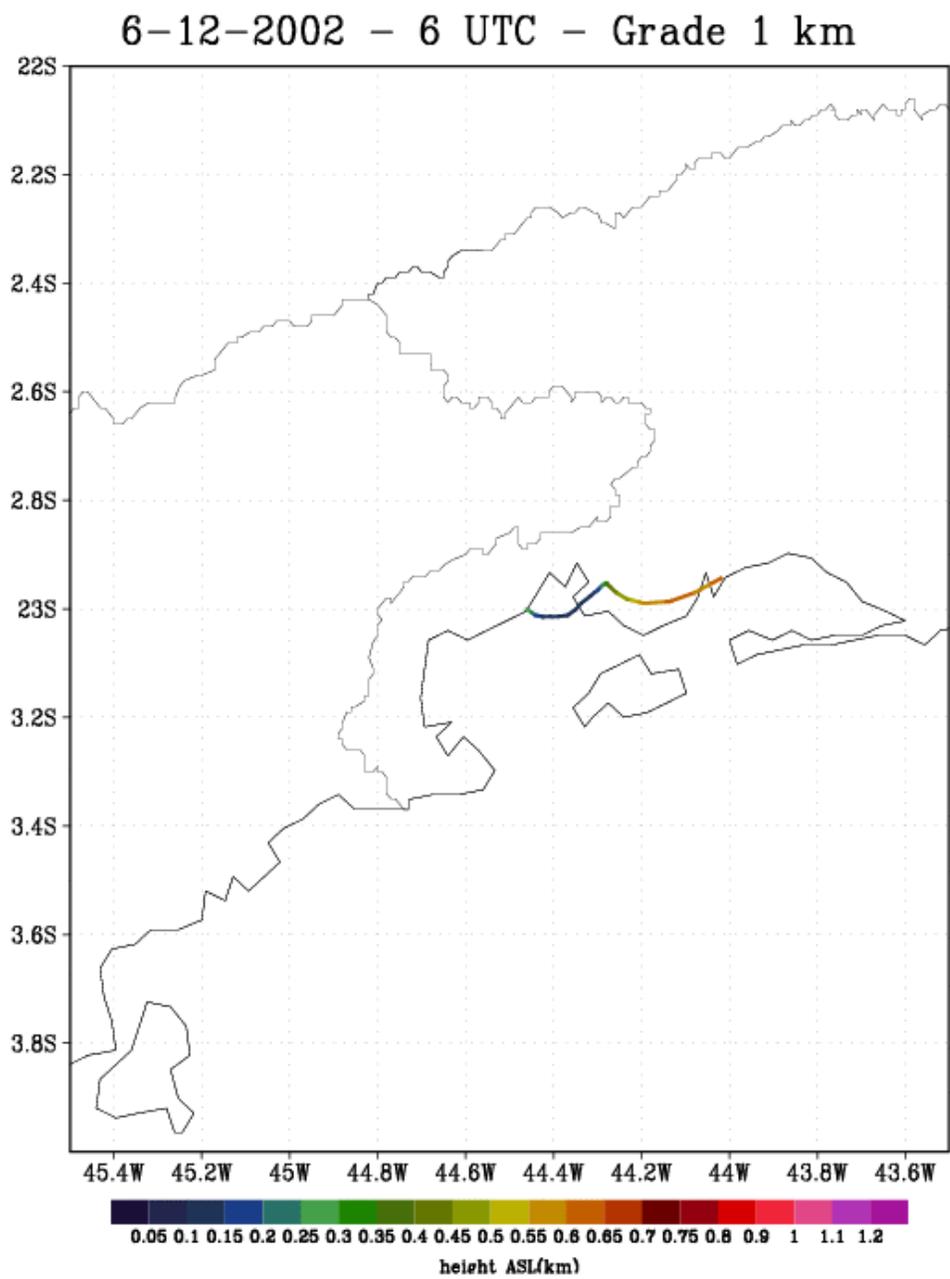


Figura 5.25: Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 6z.

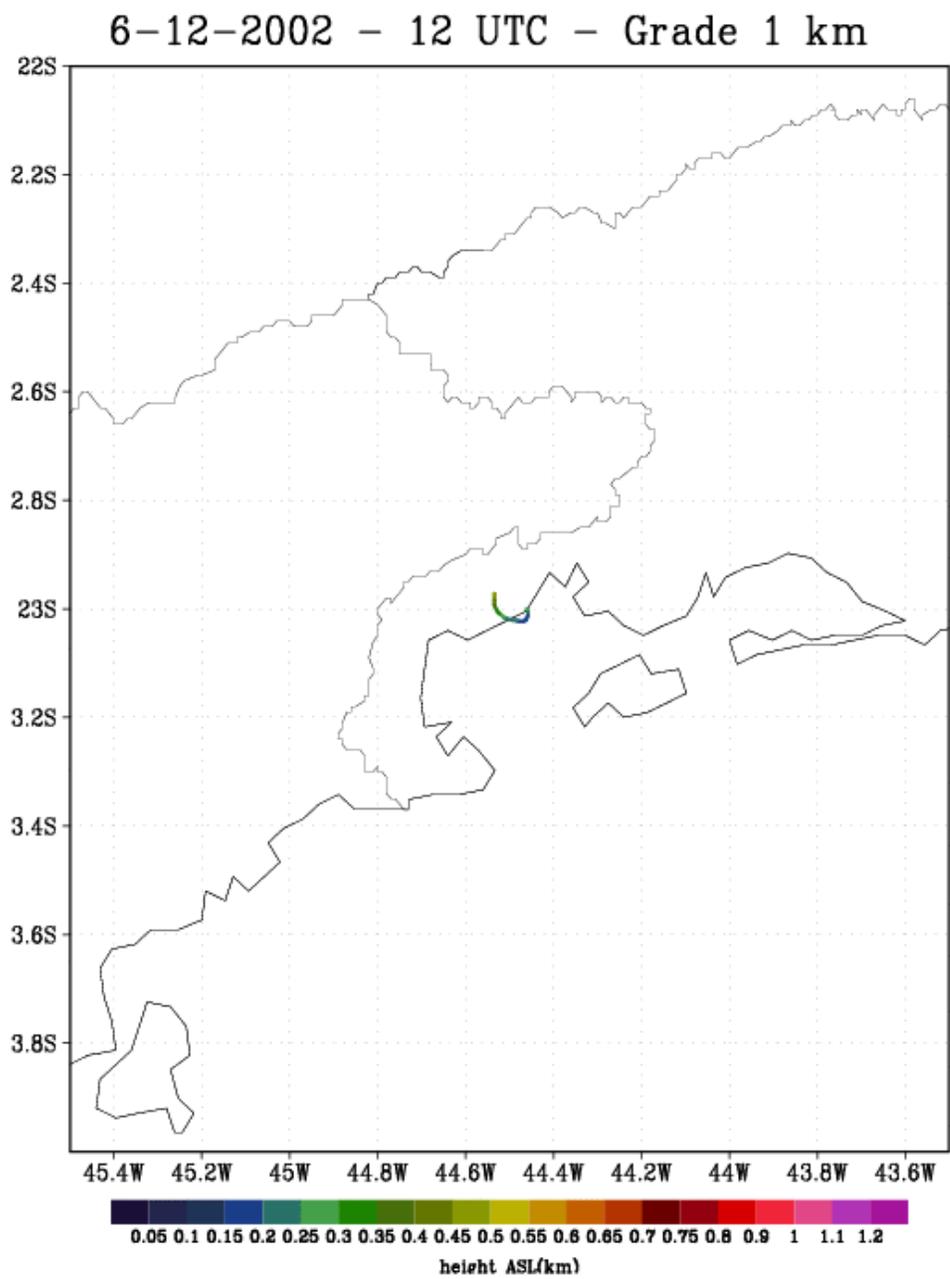


Figura 5.26: Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 12z.

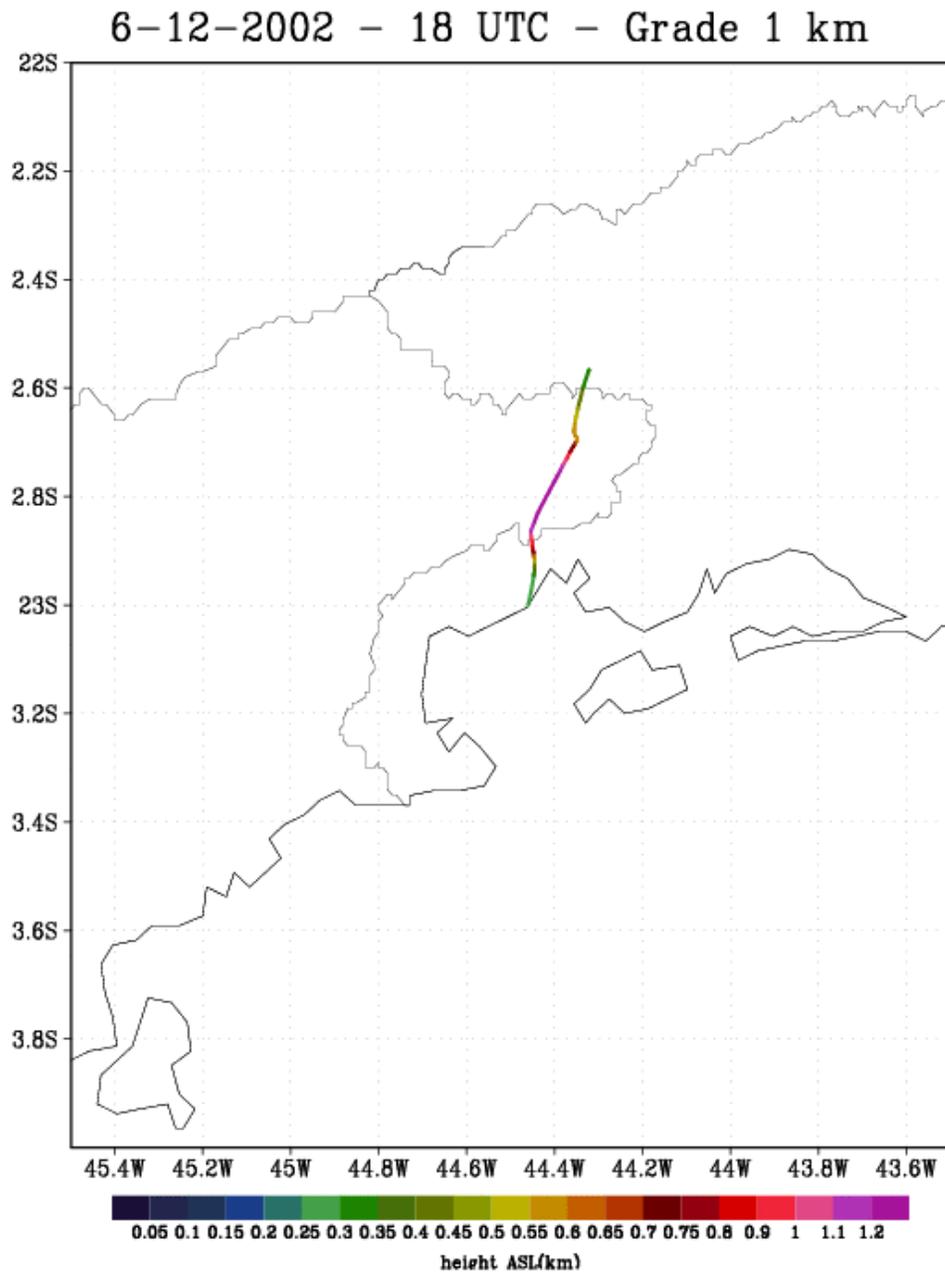


Figura 5.27: Comportamento das trajetórias para o dia 06/12/2002 às 18z.

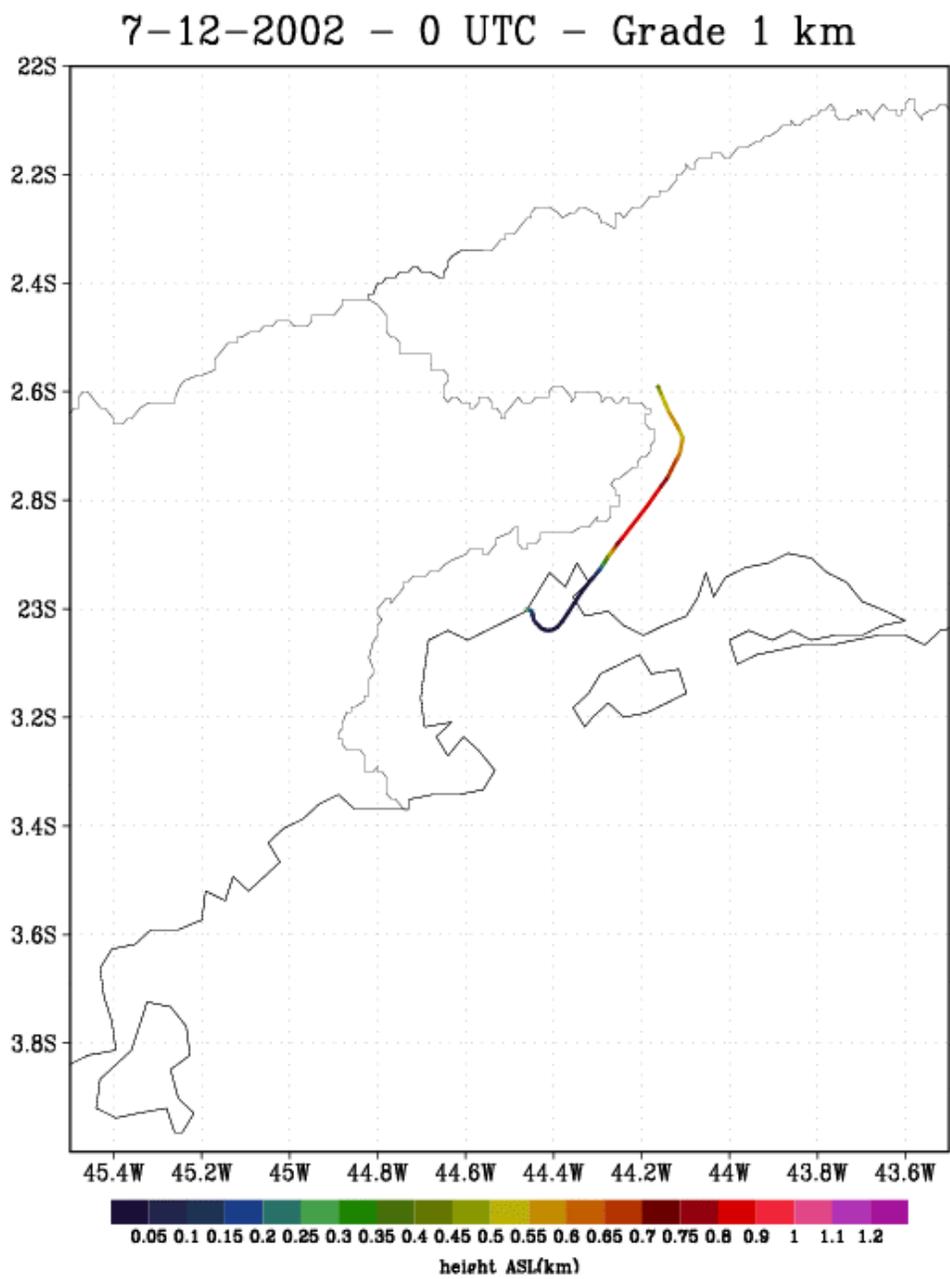


Figura 5.28: Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 0z.

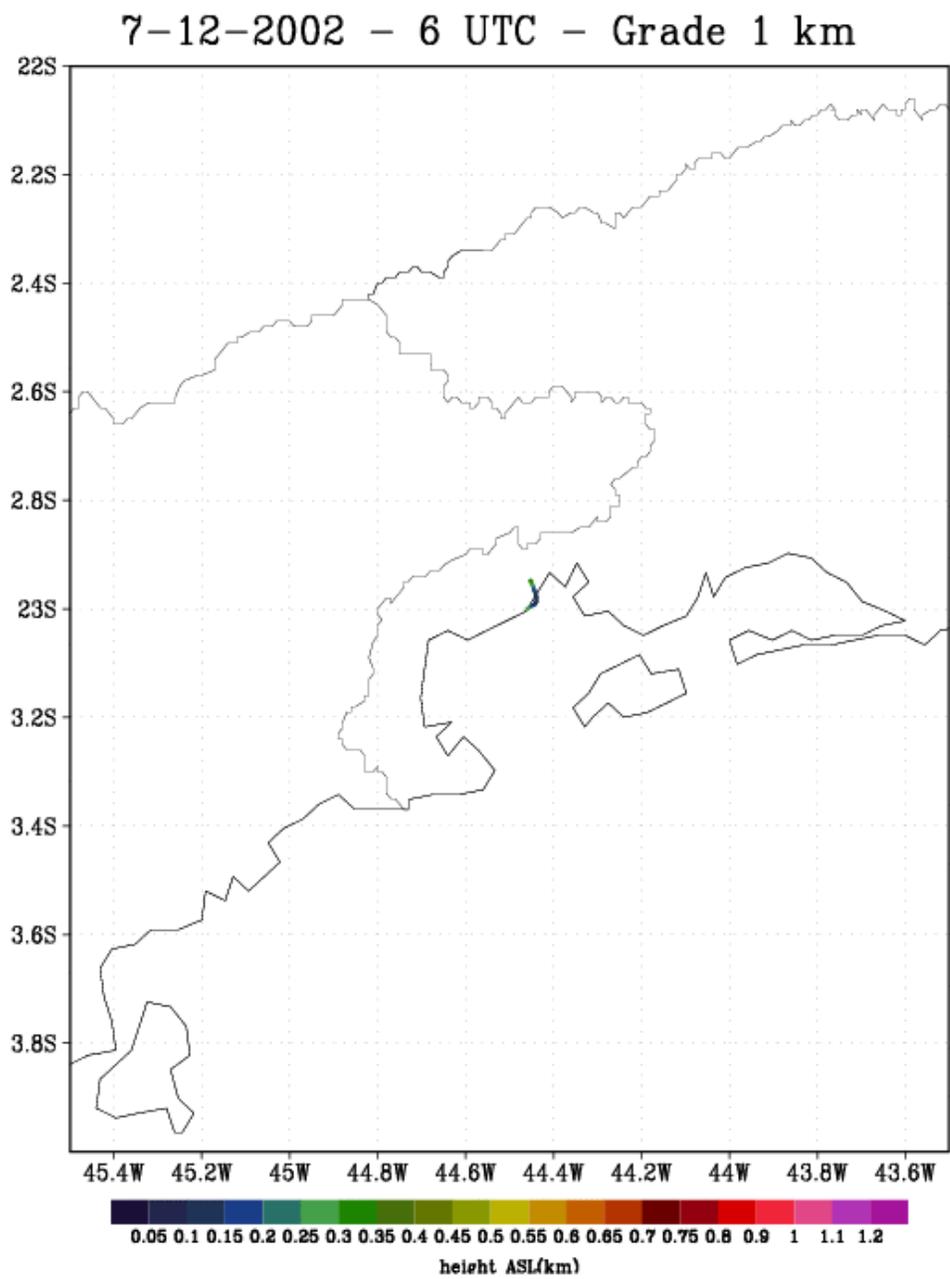


Figura 5.29: Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 6z.

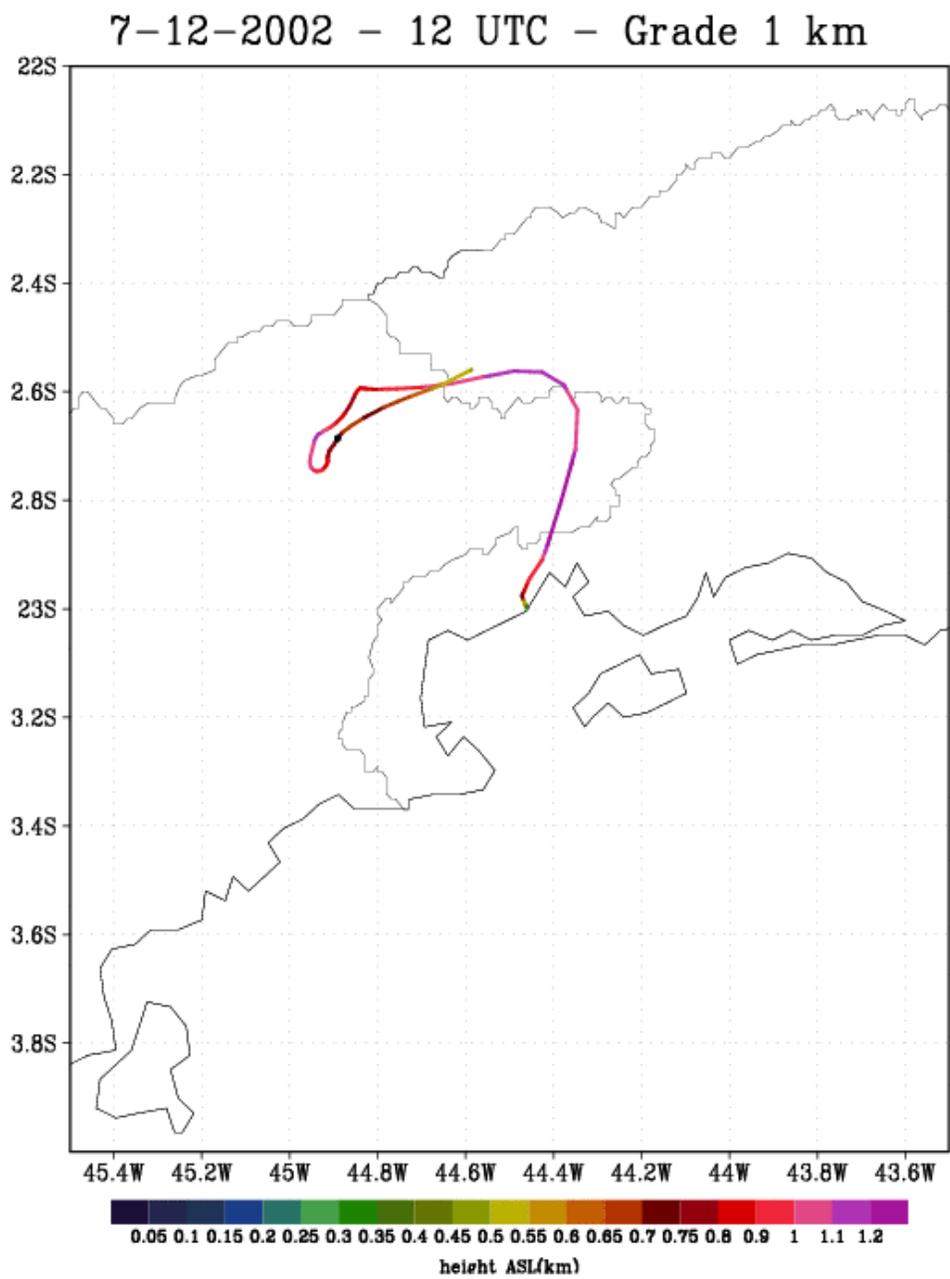


Figura 5.30: Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 12z.

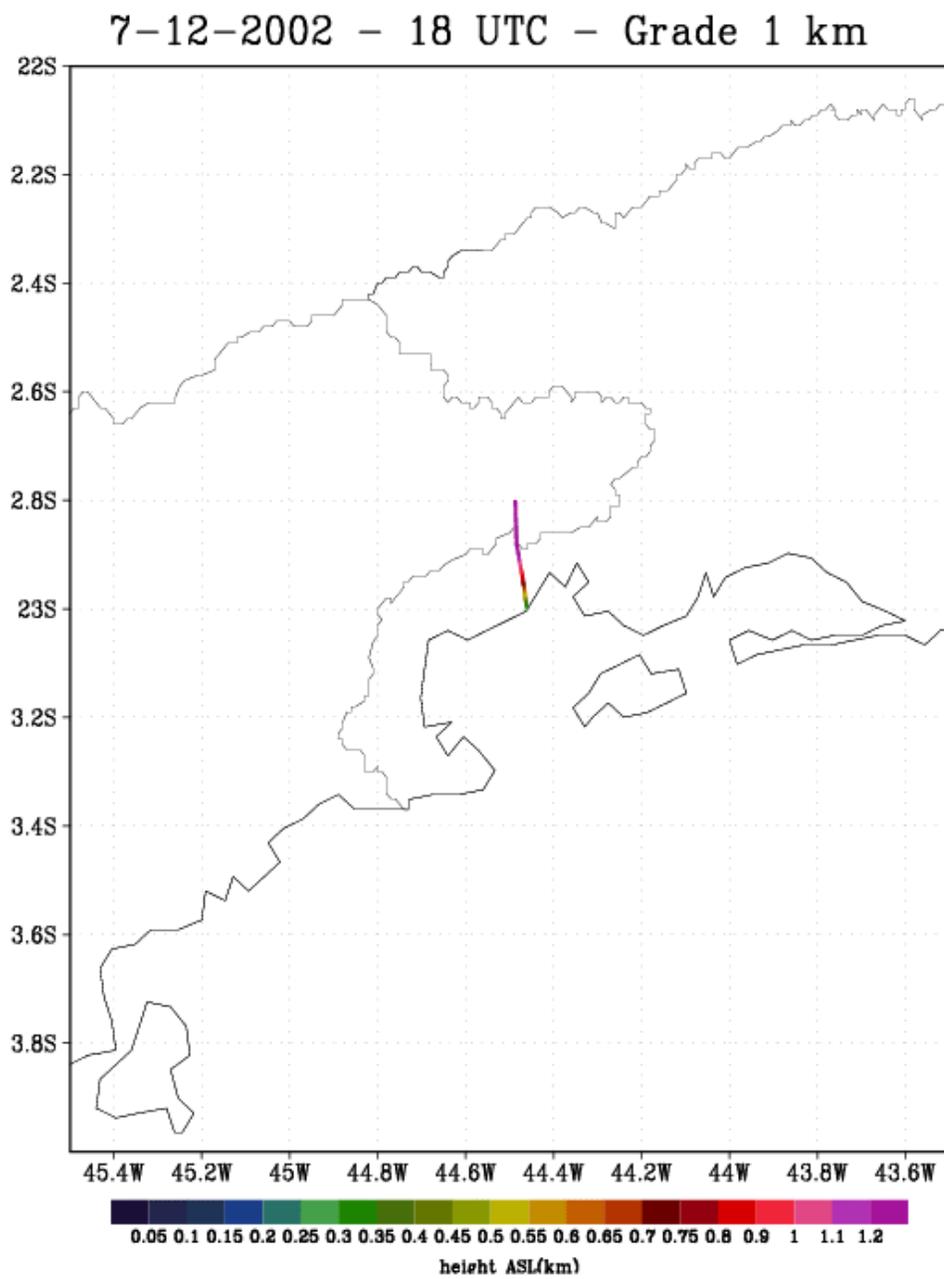


Figura 5.31: Comportamento das trajetórias para o dia 07/12/2002 às 18z.

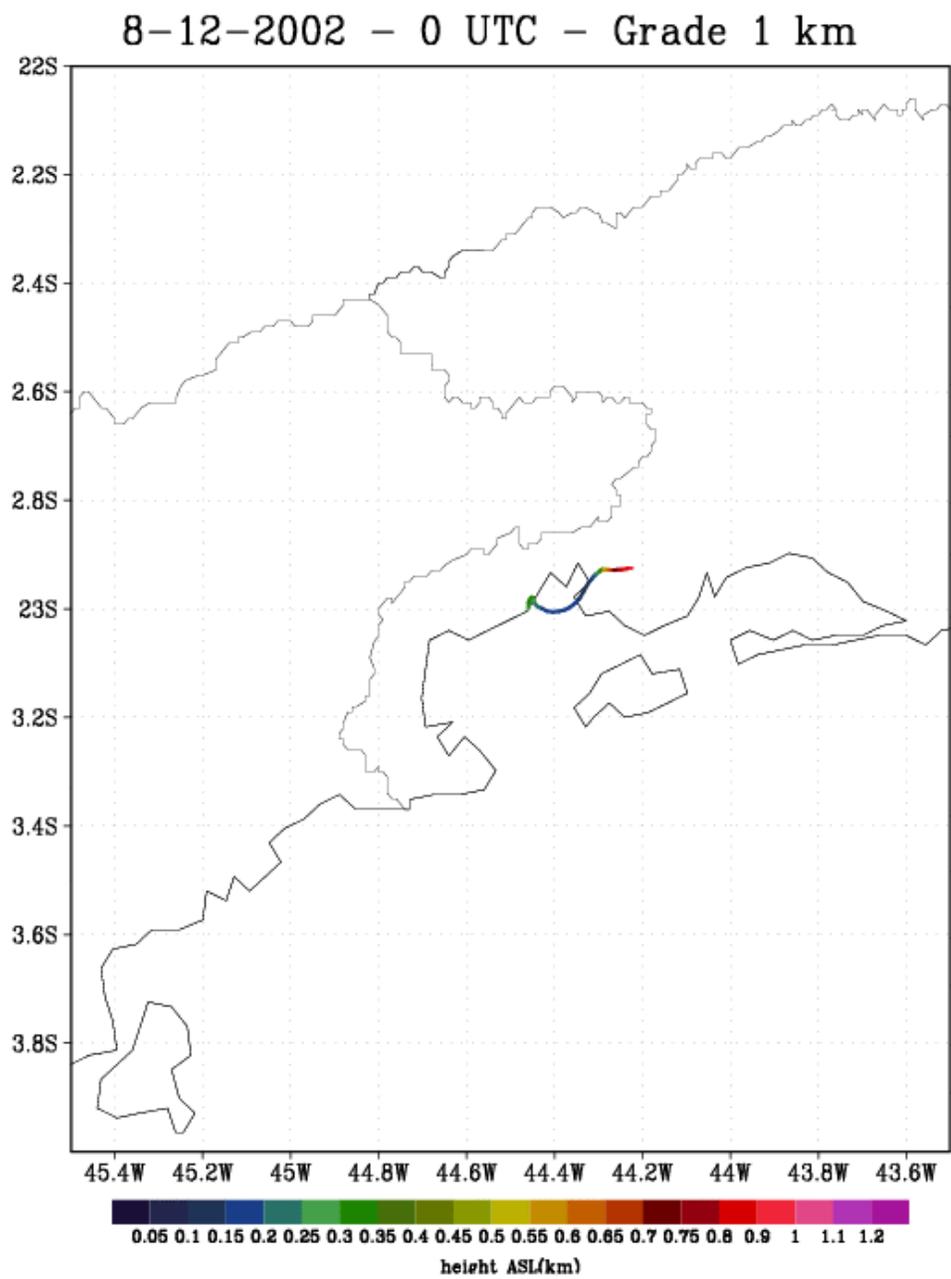


Figura 5.32: Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 0z.

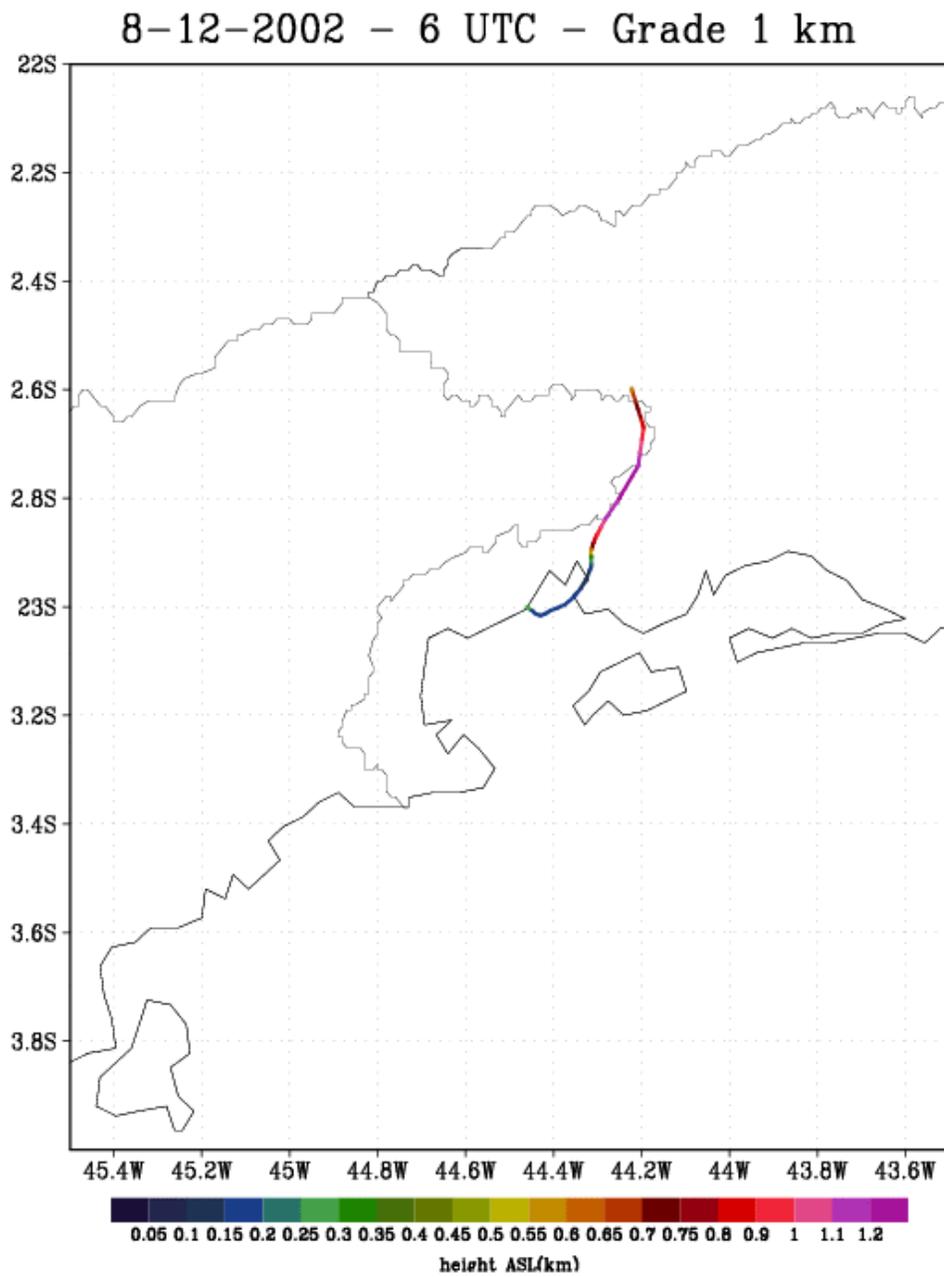


Figura 5.33: Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 6z.

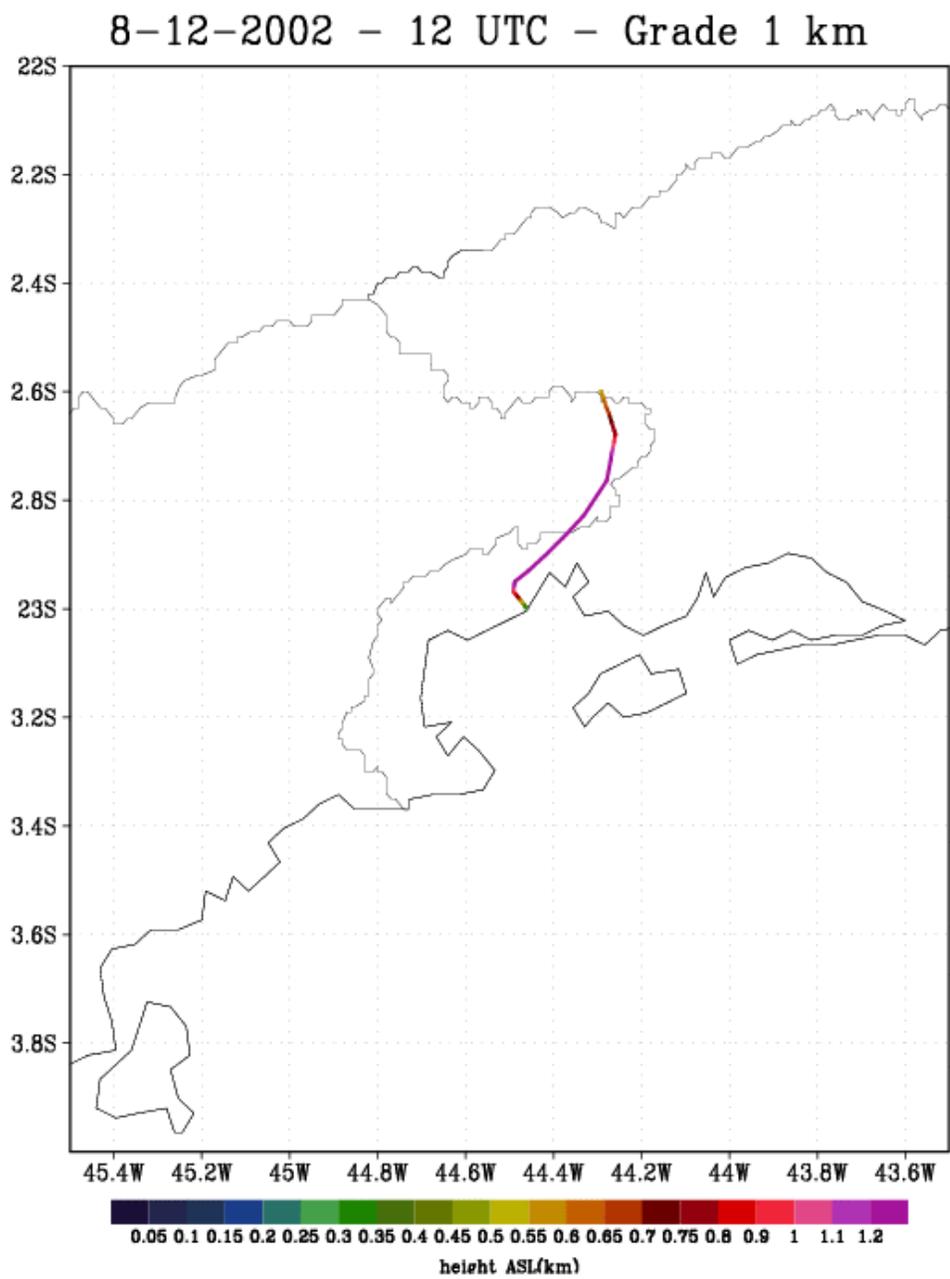


Figura 5.34: Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 12z.

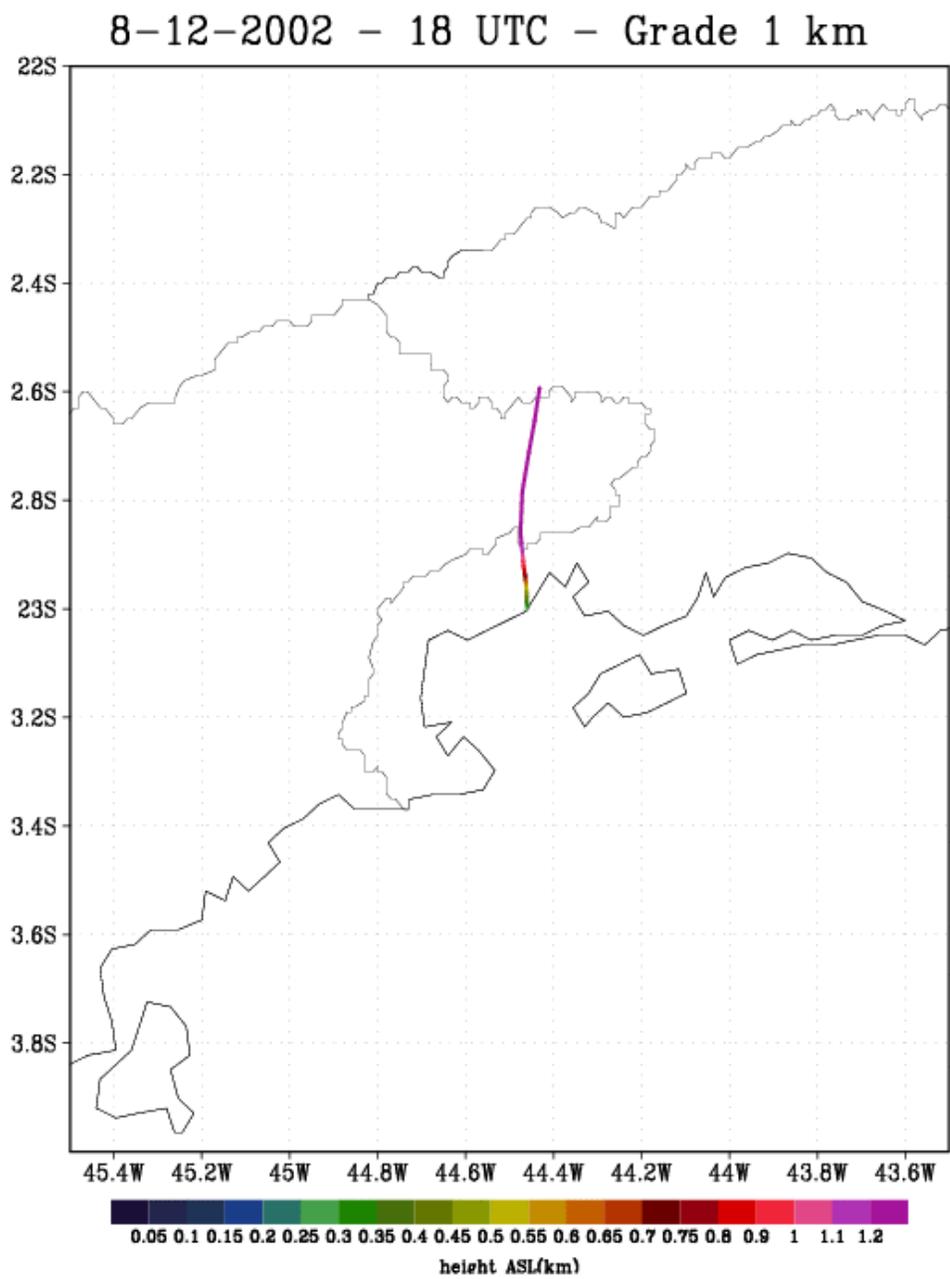


Figura 5.35: Comportamento das trajetórias para o dia 08/12/2002 às 18z.

A Figura 5.24 apresenta uma resolução de 1 km x 1 km referente ao dia 6/12/2002 das 0z, demonstra que o transporte de uma trajetória deslocando-se para o mar no nível de 250 m, e retorna para ao nível de 150 m seguindo para o município do Rio de Janeiro no nível de 500 m. Na Figura 5.25 do mesmo dia as 6z, mantém quase a mesma característica do comportamento da trajetória da Figura 5.24. Na Figura 5.26 das 12z a trajetória desloca-se em direção do oceano no nível de 150 m, e retorna para o continente no nível de 500m. A Figura 5.27 das 0z, demonstra a trajetória deslocando para o setor sul do Estado de Minas Gerais, e o seu nível oscilou de 100 m até 400 m aproximadamente. A Figura 5.28 referente ao mesmo dia as 6z, mostra que a trajetória ficou retida próxima da fonte pontual, o que caracteriza uma forte subsidência nesse período. Na Figura 5.29 das 12z, o tempo da trajetória alcança um período de 24 horas, deslocando-se para o setor sul do Estado de Minas Gerais, nesse caso não deve ter havido uma forte convecção. A Figura 5.30 das 18z, demonstra a influência de um jato no nível de 1.200 m indo para o setor sul do estado de Minas Gerais. A Figura 5.31 as 0z mostra o transporte da trajetória para o oceano, e logo após direciona-se no sentido do município do Rio de Janeiro. As Figuras 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35 apresentam quase as mesmas características deslocando-se para o setor sul do Estado de Minas Gerais. Assim, fica evidenciado que o comportamento das trajetórias estão sujeitas as condições atmosféricas.

## **5.6. Estudo de Caso, sob Influência de um Sistema Frontal**

O segundo estudo de caso, procurou diagnosticar uma situação sinótica que corresponde a um sistema frontal (Figura 5.36).

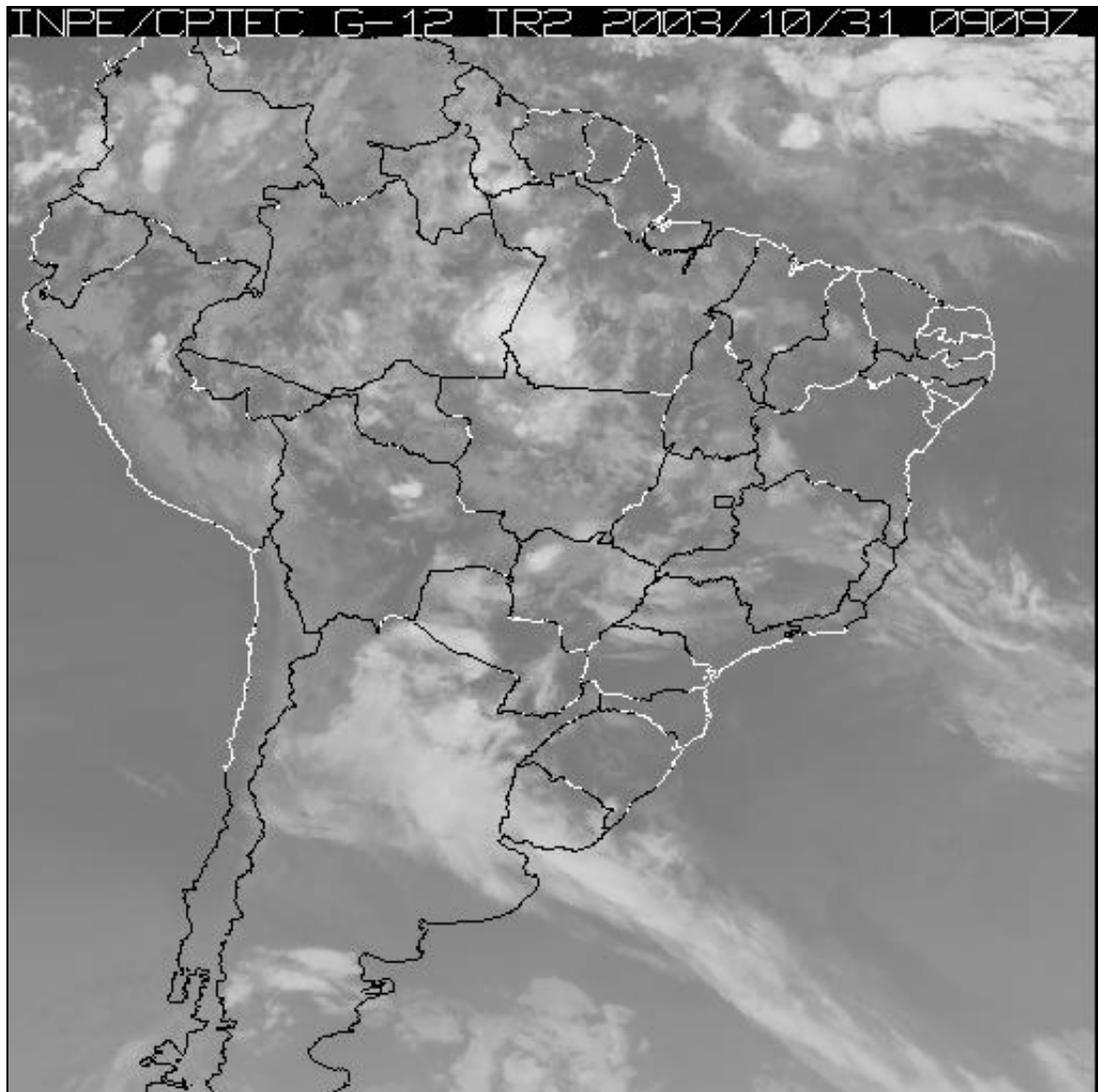


Figura 5.36: Imagem do satélite GOES 12 no canal do infravermelho do dia 31 de outubro de 2003 as 09z (Fonte CPTEC – INPE).

O período analisado iniciou-se em 31 de outubro de 2003. Os resultados das simulações correspondem às seqüências das Figuras 5.37 a 5.42, onde as trajetórias variam conforme as condições atmosféricas. O tempo de integração do modelo correspondeu há 72 horas. As trajetórias foram iniciadas às 9, às 12, às 15 e às 18 UTC do dia 31 de outubro.

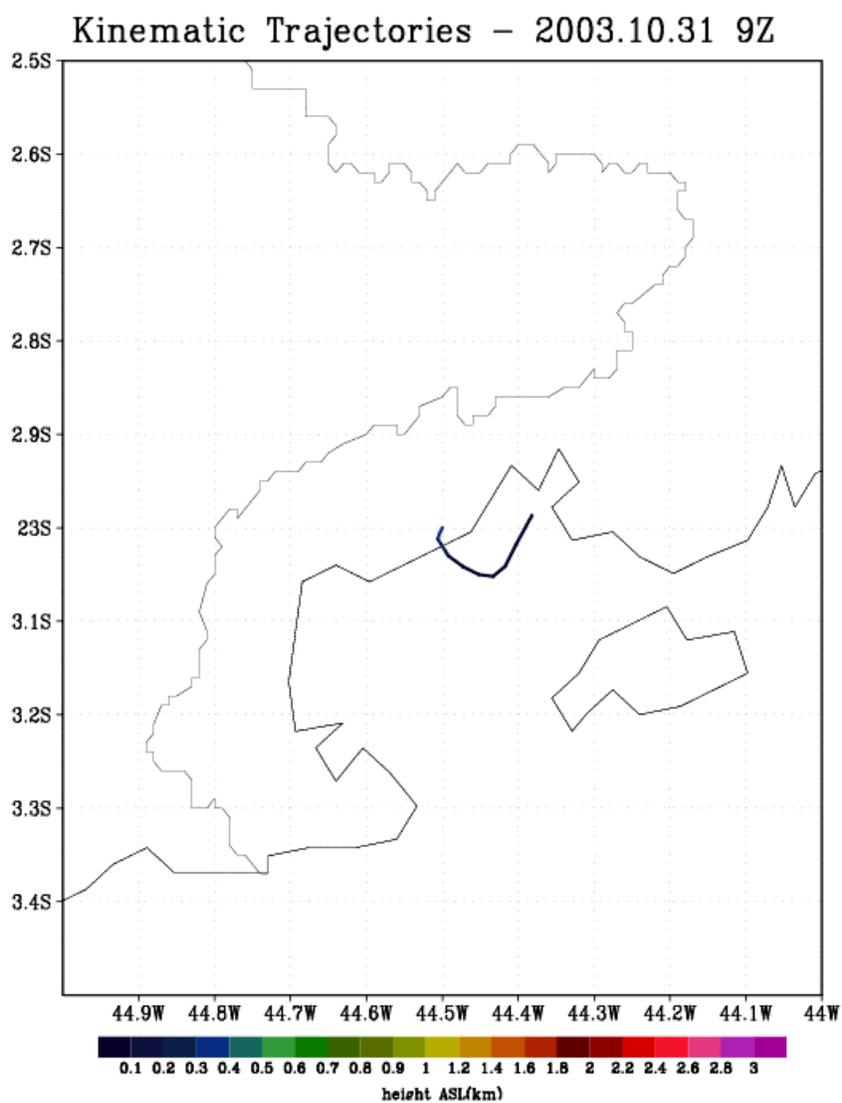


Figura 5.37: Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.

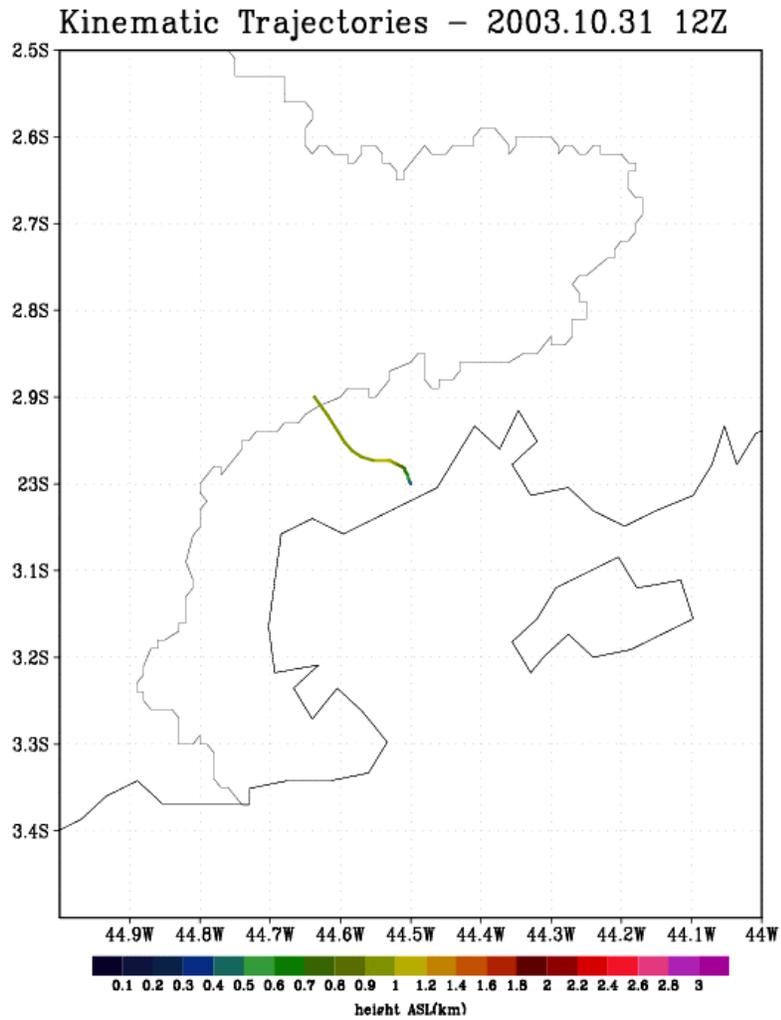


Figura 5.38: Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.

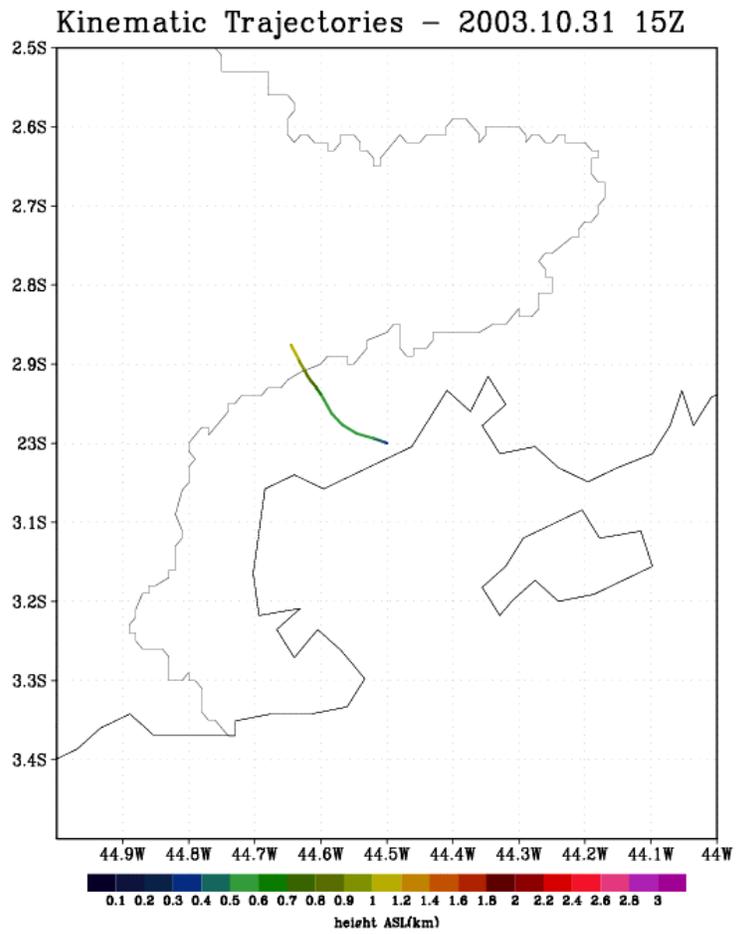


Figura 5.39: Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.

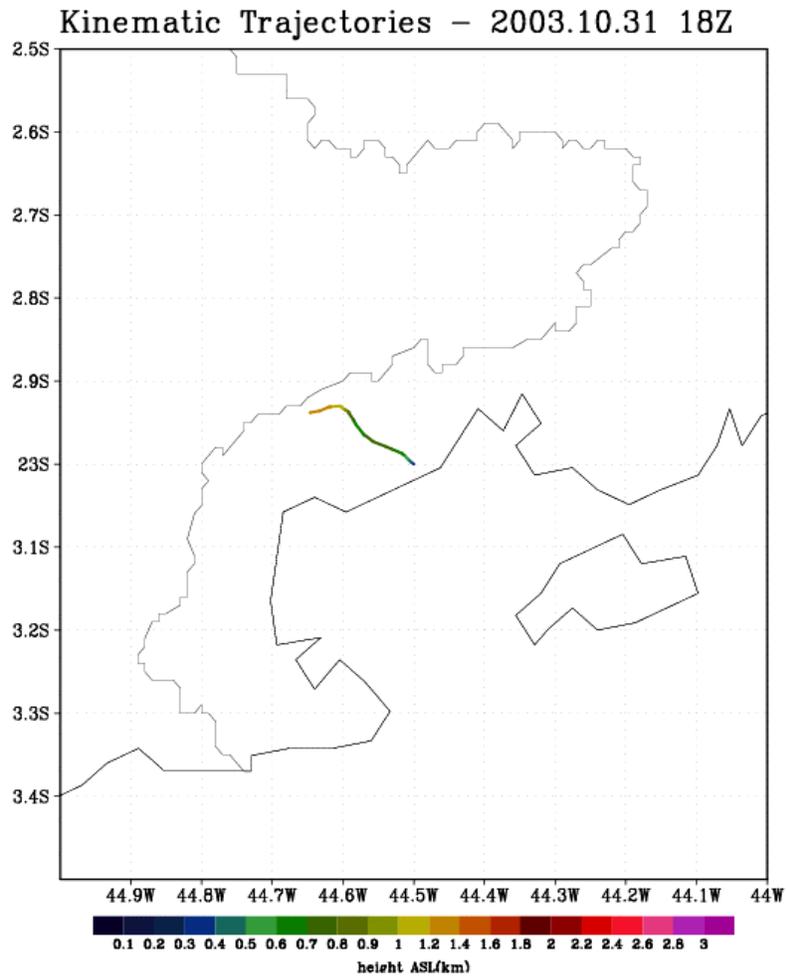


Figura 5.40: Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.

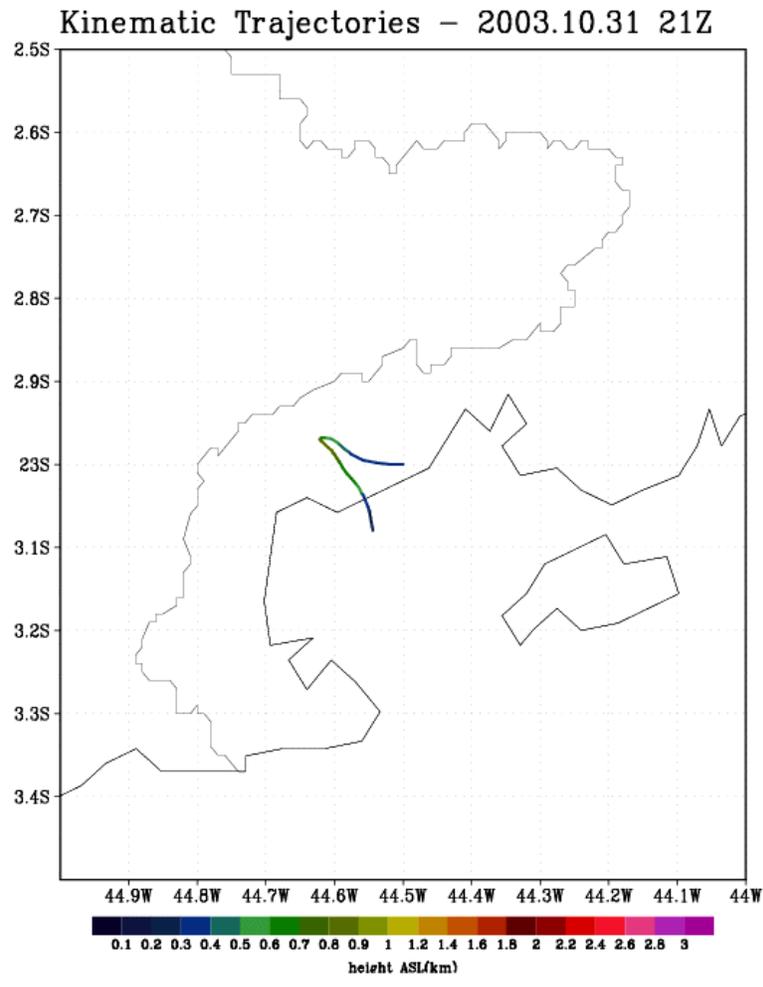


Figura 5.41: Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.

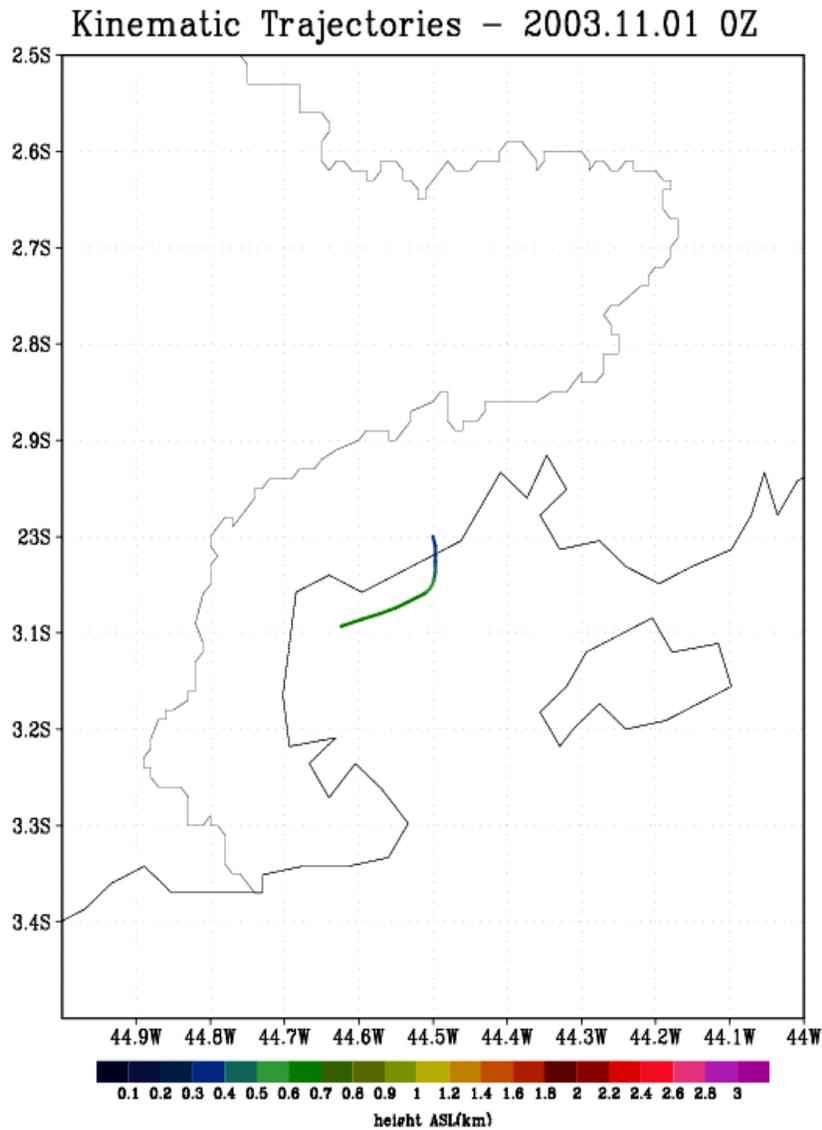


Figura 5.42: Resultado da modelagem de trajetórias utilizando uma grade refinada de 1 km x 1 km.

A Figura 5.37 a corresponde às 9 UTC do dia 31 de outubro de 2003. As trajetórias nos primeiros instantes deslocam-se de noroeste da região e, seguem depois para nordeste em direção ao continente, indicando os efeitos da brisa matinal e vespertina. Percebe-se que a trajetória termina no mar por influência das características locais, região de domínio previamente escolhida. As trajetórias variaram de 200 m a 300 m de altura. Na Figura 5.38 a trajetória iniciada às 12 UTC, a trajetória sofre uma deflexão, quando ultrapassa a Serra do Mar e se desloca para o setor nordeste do Estado de São Paulo. Na

Figura 5.39 (15 UTC), o comportamento das trajetórias praticamente se mantém, quando comparada ao comportamento registrado às 12UTC (Figura 5.38).

Na Figura 5.40 (18 UTC) o comportamento das trajetórias apresenta algumas flutuações em decorrência da topografia ser bastante íngreme na região. A Figura 5.41 (21 UTC) apresenta o deslocamento para o setor nordeste do Estado de São Paulo. Posteriormente se desloca quase que paralelamente ao deslocamento inicial, retornando em direção ao litoral. Na Figura 5.42 referente a 01 de novembro de 2003 à 0 UTC, a trajetória desloca-se paralelamente ao litoral em direção ao Estado de São Paulo. Ao analisar as seqüências das Figuras 5.22 - 5.27, constata-se a existência de uma enorme variação no sentido das trajetórias, onde a topografia apresentou uma enorme importância, como também as interações do oceano e atmosfera, associados às variações do ciclo diurno. Logo, estes são elementos fundamentais para um prognóstico preciso do comportamento das trajetórias, em caso de um vazamento de radionuclídeos na CNAAA. Nestas análises evidenciam-se nitidamente os efeitos dos sistemas atmosféricos, principalmente as brisas locais.

# CAPÍTULO VI

---

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Na presente tese foi proposta uma metodologia para estudos de transporte de radionuclídeos para ser utilizada em usinas nucleares, como fator de interface entre as usinas e a atmosfera. Foi desenvolvida uma fundamentação teórica e numérica, para que os dois modelos apresentados de forma acoplada pudessem ser utilizados operacionalmente nas usinas eletrônicas. Sendo assim, o objetivo foi apresentar uma ferramenta numérica de baixo custo monetário e de rápida utilização para serem aplicadas na avaliação das seguintes questões:

- a) impactos ambientais causados pelas liberações de partículas radioativas na atmosfera no caso em que essas ultrapassem a mesoescala;
- b) gerenciamento ambiental da movimentação de emissões de partículas radioativas na atmosfera, oriundas do CNAEA, a metodologia apresentada, possa ser aplicada em operações normais de rotina, e os resultados gerados sejam utilizados operacionalmente nas escalas micro, meso ou sinótica;
- c) proposição para utilização da modelagem numérica como ferramenta que permita uma melhor compreensão desses diagnósticos e prognósticos.

Nesta pesquisa, no primeiro momento, procurou-se diagnosticar o comportamento dos ventos e do movimento vertical na região de Angra dos Reis, usando a modelagem atmosférica com o modelo RAMS.

Mostrou-se também que existe uma forte dependência do horário, da época e dos sistemas sinóticos no caso em que venha a ocorrer um vazamento de radionuclídeos para a atmosfera, na determinação das trajetórias que esses poluentes seguirão.

Dentro dessa ótica, os modelos que utilizam o comportamento do vento como uma constante, ou seja, em uma só direção, podem gerar resultados não muito confiáveis. Assim, as variações da camada limite e do ar acima dela, fatores que controlam a dispersão local ou em maior escala também são elementos importantes a serem considerados. Os modelos dinâmicos são capazes de levar em consideração as diversas variações sofridas pela atmosfera.

Destacamos a importância de se considerar os fenômenos de mesoescala. Esta tese simulou-se situações atmosféricas do tipo brisa, ZCAS e sistemas frontais, no intuito de agregar informação essencial ao sistema de tomada de decisões para controle e monitoração da CNAAA.

Também ficou evidenciado, nesta pesquisa, que o conhecimento da direção e da velocidade do vento, tanto do ponto de vista climatológico, diagnóstico e no prognóstico em tempo real, são de extrema importância para a segurança de usinas nucleares, pois as diversas condições meteorológicas é que determinarão os processos de dispersão local, bem como o transporte de radionuclídeos para grandes distâncias.

Para uma boa compreensão das condições locais da atmosfera, é importante considerar as características topográficas da região. No entorno da CNAAA a topografia é bastante acidentada próxima do mar, permitindo o surgimento de ondas de gravidade que afetam as condições de diluição regional, surgindo sistemas e perturbações específicas na região, fato também constatado por MARTANO (1992) e por FRANCO *et al.*, (2002 a). Logo, através do conhecimento meteorológico, na micro escala é possível detectar possíveis cenários que possam interferir no processo de dispersão de poluentes em locais de fisiografia complexa.

A presença de nuvens cúmulos associada à ZCAS constituiu-se em um fator determinante na definição das trajetórias, e outros fatores termodinâmicos também tenham influenciado. Foi mostrado que, caso houvesse um vazamento de radionuclídeos na micro escala, esses seriam transportados para o setor sudeste do estado de Minas Gerais. Por isso, é importante que os setores governamentais possam tomar medidas mitigadoras através do

conhecimento meteorológico detalhado, como foi proposto nesta pesquisa, identificando possíveis cenários e suas respectivas trajetórias. É importante, assim, a realização de prognósticos das regiões que possam ser afetadas e dos possíveis impactos sobre as populações, caso venha a ocorrer um vazamento acidental de radionuclídeos para a atmosfera.

Os resultados evidenciam que o monitoramento constante dos campos dos ventos, associado aos estudos das massas de ar, é importante. Ficou caracterizado que, caso haja um vazamento, a modelagem acoplada de modelos atmosféricos e modelos de trajetória podem ser considerados como uma ferramenta importante para o setor nuclear.

Como foi apresentado nesta pesquisa, ficou evidenciada a importância que os países mais desenvolvidos, localizados no hemisfério norte, passaram a realizar observações e do monitoramento do comportamento das trajetórias oriundas das usinas nucleares. Nesse caso, ficou clara a importância da circulação atmosférica nas escalas sinótica e planetária sobre a advecção de radionuclídeos para locais remotos (FRANCO *et al.*, 2002a; FRANCO *et al.*, 2004).

Finalizando, este trabalho procurou demonstrar a importância de estudos dos sistemas meteorológicos na região de Angra dos Reis, associando as observações meteorológicas sistemáticas dos ventos com a modelagem numérica usando os dados das análises e reanálises do NCEP/NCAR. Por isso, é importante que os setores governamentais, ao programar as medidas mitigadoras para os eventuais acidentes, possam utilizar o conhecimento meteorológico detalhado e identificando os possíveis cenários atmosféricos relevantes e diagnosticando as suas respectivas trajetórias.

A partir dos resultados obtidos, sugere-se para trabalhos futuros:

- monitorar sistematicamente os sistemas meteorológicos, procurando detectar as possíveis áreas que possam vir a ser impactadas;
- utilizar a metodologia apresentada, acoplando-a a um sistema de informações geográficas;
- realizar um estudo das condições estatísticas, das possíveis trajetórias, para que estas possam ser caracterizadas por áreas setoriais, ou seja, separadas por quadrantes;

- realizar estudos semelhantes para outros cenários atmosféricos que possam afetar as trajetórias originadas na região de Angra dos Reis;
- dar condições para que os órgãos públicos possam assimilar esta metodologia.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES, C. B.; KIRCHHOFF, V. W. J. H.; *Transporte de monóxido de carbono gerado em queimadas para regiões onde não se queima*. Revista Brasileira de Geofísica, vol 19 (1), 2001.
- ALAM, M. K.; SEINFELD, J. H.; *Solution of the Steady State, Three-Dimensional Atmospheric Diffusion Equation for the Sulfur Dioxide and Sulfate Dispersion from Point Sources*. Atmospheric Environment, v. 15, n. 7, p. 1221-1225, 1981.
- ANDRÉN, A.; *A Combined First-Order Closure / Gaussian Dispersion Model*. Atmospheric Environment, v. 21, p. 1045-1058, 1987.
- ANDRETTA, M.; BIANCONI, R.; FLOSPERGHER, W.; TAMPONI, M.; *The MRBT Model: An Analytical Dispersion Model in a Finite Mixing Layer. Sensitivity Analysis and Validation Against Tracer Measurements*. Atmospheric Environment, v. 27A, n. 11, p. 1665-1672, 1993.
- ANTHES, R. A.; *A Cumulus Parameterization Scheme Utilizing a One – Dimensional Cloud Model*. Mon. Wea. Rev. 105, 270 – 286, 1977.
- AMANN, M.; *Emission inventories, emission control options and control strategies: an overview of recent developments*. Water, Air and Soil Pollution. Dordrecht: Kluwer, v.130 p. 43-50, 2001.
- ARAI, N.; *Modelo Numérico Tridimensional para Estimativa de Concentração de Poluentes*. Tese de mestrado INPE – 2193-TDL/060, São José dos Campos, SP, 1980.
- ARAKAWA, A.; *Adjustment Mechanisms in Atmospheric Models*. Journal of the Meteorological Society of Japan, v – 75, n° 1b, 155 – 179, 1997.
- ASSUNÇÃO, J. V. *Tecnologias e seleção de sistemas de controle da poluição do ar: material particulado, gases, vapores e odores*. CETESB. São Paulo, 2002.
- BAIRD, C.; *Química Ambiental*. Bookman, 2° ed, 2002.

- BAKLANOV, A.; *Modelling of Episodes of Atmospheric Transport and Deposition Hypothetical Nuclear Accidents in North-West Russia*. Danish Meteorological Institut, 2003.
- BAKLANOV, A.; BURMAN, J.; NÄSLUND, E.; *Numerical modelling of three-dimensional flow and pollution transport over complex terrain during stable stratification*. Scientific report, foa, Umeå, Sweden (FOA-R-96-00376-4.5-SE) 40 p., 1996.
- BAKLANOV, A.; MAHURA, A. *Atmospheric Transport Parthways, Vulnerability and Possible Accidental Consequences from Nuclear Risk Sites: Methodology for Probalistic Atmospheric Studies*. Danish Meteorological Institute, Scienfic Report, 2001.
- BAKLANOV, A.; MAHURA, A.; MOROZOV, S.; *The Simulation of Radiactive Pollution of the Environment after an Hypothetical Accident at the Kola Nuclear Power Plant*. Journal of Environmental Radioactivity, v 25, (2), p 65 – 84, 1994.
- BAKLANOV, A.; MAHURA, A.; JAFFE, D.; THANING, L.; BERGMAN, R.; ANDRES, R.; *Atmospheric transport patterns and possible consequences for the European North after a nuclear accident*. Journal Environmental Radioactivity, 60, 23 – 48, 2002.
- BAKLANOV, A.; SORENSEN, J. H.; *Parameterisation of radionuclide deposition in atmospheric long – range transport modeling*. Physics Chemistry Earth, vol. 26, n°. 10, pp. 787 – 799, 2001.
- BANCO MUNDIAL; *Brasil: gestão dos problemas da poluição. A agenda ambiental marrom, volume 1: relatório de política*. Relatório n. 16635-BR. Diretoria Sub-regional Brasil. [S.l.; s. n.], p. 4- 49, 1998.
- BARNES, S. L.; *Mesoscale Objective Map Analysis using Weighted Time Series Observation*. NOAA Tech. Memo. ERL NSSL-62, 60pp, 1973.
- BARON, T.; GERHARD, E. R.; JOHNSTONE, H. F.; *Dissemination of Aerosol Particles Dispersed from Stacks*. Ind. & Eng. Chem., v. 41, p. 2403, 1949.
- BELLASIO, R.; BIANCONI, R.; GRAZIANI, G.; MOSCA, S.; *RTMOD: an Internet based system to analyse the predictions of long-range atmospheric dispersion models*. Computers & Geosciences, 25, 819 –833, 1999.
- BENOIT, R.; *On the Integral of the Surface Layer Profile-Gradient Functions*. J. of Applied Meteorology, v. 16, p. 859-860, 1997.

- BENOIT, R.; DESGAGNE, M.; PELLERIN, P.; PELLERIN, S.; CHARTIER, Y. DESJARDINS, S.; *The Canadian MC2: a semi-lagrangian, semi-implicit wideband atmospheric model suited for finescale process studies and simulation*. Monthly Weather Review, 125, 2382-2415, 1997.
- BENSON, P. E.; *CALINE3 A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets. Interim report, report number FWFA/CA/TL-79/23*. Federal Highway Administration, Washington DC (NTIS PB80-220841), 1979.
- BOÇON, F. T.; *Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica*. Tese de Doutorado da Universidade Federal de Santa Catarina, 308p, 1998.
- BORRELLI, R. A.; *Characterization of radioactivity in the environment*. Thesis of Master Science. Worcester Polytechnic Institute. Massachusetts, 1999.
- BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; EIGER, S.; *Introdução à Engenharia Ambiental*. Prentice Hall, São Paulo, 2002.
- BRASSEUR, G. P.; ORLANDO, J. J.; TYNDALL G. S.; *Modeling in atmospheric chemistry and global change*. Oxford University Press, Oxford, 2003.
- BRIGGS G. A.; *Plume dispersion in the convective boundary layer. PartII: Analyses of CONDORS field experiment data*. J. Applied Meterol., 32:1388-1425, 1993.
- BRIGGS, G. A.; *Plume rise*. US Atomic Energy Commission. 1969.
- BRIGGS, G. A.; *Some Recent Analyses of Plume Rise Observations*. Proc. of the 2<sup>nd</sup> International Clean Air Congress, Academic Press, New York, p. 1029-1032, 1971.
- BRIGGS, G. A.; *Diffusion Estimation for Small Emissions. Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory 1973*. Annual Report, USAEC Rep ATDL-106 Natl. Oceanic Admin., Washington, D.C., 1974.
- BUCMANN, J. H.; *O Uso da Monitoração Ambiental como Técnica de Identificação de Atividades de Enriquecimento Isotópico*. Tese de doutorado do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo, 2000.
- CARVALHO, J.C.; *Estudo dos processos de transporte e difusão na camada limite planetária utilizando os modelos RAMS e SPRAY: Aplicação ao caso do experimento TRACT*. Tese de doutorado, IAG-USP, 1999.

- CARRUTHERS, D. J.; HOLROYD, R. J.; HUNT, J. C. R.; WENG, W. S.; ROBINS, A. G.; APSLEY, D. D.; THOMSON, D. J.; SMITH, F. B.; *UK-ADMS - a new approach to modelling dispersion in the Earth's atmospheric boundary layer*. United Kingdom, 1992.
- CHARLSON, R. J.; HEINTZENBERG, J.; *Introduction, in Aerosol Forcing of Climate*. John Wiley & Sons, Chichester, Inglaterra, 1-10, 1995.
- CHIARAMONTE, E.; LEAL, A. C.; *Um Modelo Aproximado de Avaliação da Dispersão de Gases Pesados a Partir da Combinação de "PUFFS"*. III Congresso Interamericano de Qualidade do Ar, AIDIS-Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Anais Eletrônicos, Canoas, RS, 2003.
- CLARK, T. L.; FARLEY, R. D.; *Severe Downslope Windstorm Calculations in Two and Three Spatial Dimensions Using Anelastic Interactive Grid Nesting: A Possible Mechanism for Gushiness*. J. Atmos. Sci. 41, 329 – 350, 1984.
- CNEN.; *Rejeitos Radioativos*. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2001.
- COSEMANS, G.; KRETZSCHMAR, J.; MAES, G.; *The Belgian Immission Frequency Distribution Model IFDM*. In: Proceedings of the DCAR Workshop on objectives for next generation of practical short-range atmospheric dispersion models: 149-150. Edited by H. Olesen and T. Mikkelsen, RisOnmark, May 6-8, 1992.
- CRAM, J. M.; PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; *Numerical simulation and analysis of a prefrontal squall line. Part I: Observations and basic simulation results*. J. Atmos. Sci., 49 (3): 189-208, 1992a.
- CRAM, J. M.; PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; *Numerical simulation and analysis of a prefrontal squall line. Part II: Propagation of the squall line as an internal gravity wave*. J. Atmos. Sci., 49 (3): 209-225, 1992b.
- DAWSON, P. J.; *A Numerical Model to Simulate the Atmospheric Transport and Diffusion of Pollutants over Complex Terrain*. Ph. D. Thesis. Washington State University, 1987.
- DEGRAZIA, G. A.; MORAES, O. L. L.; *Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes em Camadas Limites Planetárias Convectiva e Estável*. Revista Brasileira de Meteorologia, v 4, n1, 1989.
- De SOUZA, J. A. M.; *A situação da Energia Nucleoelétrica no Mundo*. ABEN, 97 p, 2000.

- DiCRISTOFARO, D. C.; HANNA, S. R.; OCD *The Offshore and Coastal Dispersion Model, Volume I: User's Guide*, Minerals Management Service Contract No. 14-120001-30396, Herndon, Virginia, 1989.
- EERENS, H. C.; SLIGGERS, C. J.; VAN DEN HOUT, K. D.; *The CAR model: the Dutch method to determine city street air quality*. *Atm. Env.* 27B, 389-399, 1993.
- ELETRÓBRÁS/NUCLEN. *Avanços Tecnológicos na Área de Geração Nucleoelétrica*. Outubro de 1992.
- ERMAK, D. L.; CHAN, S. T.; *User's Manual for Slab: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-than-Air Releases*. UCRL-MA-105607, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA. 1990.
- ERMAK, D. L.; NASSTROM, J. S.; TAYLOR, A.G.; *Implementation of a Random Displacement Method (RDM) in the ADPIC Model Framework*. Lawrence Livermore National Laboratory UCRL-ID-121742, 1995.
- FRANCO, N. J. N.; SANTOS, I. A.; LANDAU, L.; *Simulação Numérica dos Ventos para a Região de Angra do Reis*. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Paraná. Anais Eletrônicos, Foz do Iguaçu, 1778-1782, 2002.
- FRANCO, N. J. N.; SANTOS, I. A.; LANDAU, L.; ALVES, J. L. D.; *Análise Climatológica dos Ventos da Região de Angra dos Reis Utilizando Modelagem Numérica*. V SBCG – V Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Curitiba, Paraná, 2002.
- FRANCO, N. J. N.; SANTOS, I. A.; LANDAU, L.; ALVES, J. L. D.; *A Influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no Transporte de Radionuclídeos na Região de Angra dos Reis, Usando Modelagem Numérica*. III Congresso Interamericano de Qualidade do Ar, AIDIS-Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Anais Eletrônicos, Canoas, RS, 2003.
- FRANCO, N. J. N.; SANTOS, I. A.; LANDAU, L.; ALVES, J. L. D.; *Coupled Modeling to Estimate Cinematic Trajectories in Case of Hypothetical Leaking of Radionuclides Into the Atmosphere*. XXIX Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental San Juan – AIDIS, Anais Eletrônicos, Puerto Rico, 2004.
- FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; SILVA DIAS, M. A. F.; P. L.; ARTAXO, P.; *Numerical Modeling of Air Mass Trajectories from the Burning Areas of the Amazon Basin*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 68, suppl. 1, 1993 – 206, 1996.

- FREITAS, S. R.; *Modelagem Numérica do Transporte e das Emissões de Gases Traços e Aerossóis de Queimadas no Cerrado e Floresta Tropical da América do Sul*. Tese de Doutorado do Instituto de Física da Universidade de São Paulo - USP, 1999.
- FREITAS, S. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA DIAS, P. L.; LONGO, K. M.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M. O.; FISHER, H.; *A Convective Kinematic Trajectory Technique for Low – Resolution Atmospheric Models*. Journal of Geophysical Research, Vol. 105, n<sup>o</sup>. D19, 24.375 – 24.386, 2000.
- FRENKIEL, F. N.; Application of the Statistical Theory of Turbulent Diffusion to Micrometeorology. J. of Meteorology, v. 9, p. 252, 1952.
- FRITSCH, J. M.; CHAPPEL, C. F.; *Numerical Prediction of Convectively Driven Mesoscale Pressure Systems. Part I: Convective Parameterization*. J. Atms. Sci., 37, 1722-1733, 1980.
- GALLARDO, L.; *Trazas atmosféricas y su modelación*. CENMA. Santiago, 2003.
- GIFFORD, F. A.; *Use of Routine Meteorological Observations for Estimating Atmospheric Dispersion*. Nuclear Safety, 2, p. 47-51, 1961.
- GOODY, R. M.; YUNG, Y. L.; *Atmospheric Radiation, Theoretical Basis*, OUP, 1989.
- GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R.; *A description of the fifth generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5)*. NCAR Technical Note NCAR/TN - 398 + STR, 138 pp., 1994.
- HANNA, S. R.; PAINE, R. J.; *Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) development and evaluation*. J Appl. Met; 28:206-224, 1989.
- HANSEN, A. D. A.; KAPUSTIN, V. N.; KOPEIKIN, V. M.; GILLETTE, D. A.; BODHAINE, B. A.; *Optical Absorption by Aerosol Black Carbon and Dust in a Desert Region of Central*. Atmos. Environ. 27A, 2527-2531, 1993.
- HAVENS, J. A.; SPICER, T. O.; *Development of na Atmospheric Dispersion Model for Heavier-Than-Air Gas Mixtures (Volume 1)*. Report No CG-D-22-85 for the U. S. Coast Guard by the Chem. Eng. Dept. of University of Arkansas, Fayetteville, USA, 1985.
- HEWSON, E. W.; *The Meteorological Control of Atmospheric Pollution by Heavy Industry*. Quart. J. Royal Meteorological Society, v. 71, p. 266, 1945.
- HOLTON, J. R.; *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 3ed, Academic Press, San Diego, 1992.

- HOLLAND, J. Z.; *A Meteorological Survey of the Oak Ridge Area*. U.S. Weather Bureau, U.S. Atomic Energy Commission, Nov., 534 pp. 1953.
- HOKE, J. E.; ANTHES, R. A.; *The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique*. Mon. Wea. Rev., 104: 1551-1556, 1976.
- HINDS, W. C.; *Aerosol Technology Properties, Behavior Particles*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- IAEA.; *The International Nuclear Event Scale (INES) User's Manual*. International Atomic Energy Agency. Vienna, 102p, 2001.
- JACOBSON, M. Z.; *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press, 2000.
- JENNE, R.; *Global Observations for Reanalysis, 1948*. 2nd International Reanalysis Conference National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA, 21p, 1999.
- KALNAY E.; LORD, S.; McPHERSON, R.; Maturity of operational numerical weather prediction: the medium range. Bull. Amer. Meteor. Soc. 79, 2753-2769, 1998.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GADIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K. C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, REYNOLDS, R.; JENNE, R.; JOSEPH, D.; *The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project*. Bull. Amer. Meteor. Soc. 77, 437-471, 1996.
- KAUFMAN, Y. J.; SETER, A.; WARD, D.; TANRE, D.; HOLBEN, B. N.; MENZEL, P.; PEREIRA, M. C.; RASMUSSEN, R.; *Smoke, Clouds and Radiation – Brazil (SCAR – B) Experiment*. J. Geophys. Res., 103, D24, 31783 – 31808, 1998.
- KEMP, D. D.; *Global Environment Issues - A Climatological Approach*. 2 ed. USA, Routledge, 1994.
- KISTLER, R.; KALNAY, E.; COLLINS, W.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; KANAMITSU, M.; KOUSKY, V.; DOOL, H. V.; JENNE, R.; FIORINO, M.; *The NCEP – NCAR 50 – Year Reanalysis Monthly Means CD – ROM and Documentation*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 82, n°. 2, 2001.

- KLEINE, C. M.; *Modellen voor de Berekening van de Verspreiding van Luchtverontreiniging, inclusief aanbevelingen voor de waarden van parameters in het Lange Termijnmodel*. Staatsuitgeverij, Gravenhage, Nederland, 1976.
- KRONEMBERGER, D. M. P., CARVALHO, C. N. *Water Erosion Assessment in the Hydrographic Basin of Jurumirim River (Angra dos Reis, RJ, Brazil)*. International Symposium of Environmental Geochemistry in Tropical Countries. 1999.
- KLUG, W. A.; *Method for Determining Diffusion Conditions from Synoptic Observations*. Staub- Reinhalt. Luft, v. 29, p. 14-20, 1969.
- LAGNER, J.; ROBERTSON, L.; PERSSON, C; ULLERSTIG, A.; *Validation of the operational emergency response model at the Swedish meteorological and hydrological institute using data from ETEX and Chernobyl accident*. Atmospheric Environment, vol. 32, pp 4325 – 4333, 1998.
- LANGE, R.; *Transferability of a Three-Dimensional Air Quality Model between Two Different Sites in Complex Terrain*. Journal of Applied Meteorology, Volume 28, pp. 665--679. 1989.
- LEMES, M. A. M; MOURA, A. D.; *Fundamentos de Dinâmica Aplicados à Meteorologia e Oceanografia*. INPE/UNIVAP, 1998.
- LEE, H. N.; *Three-Dimensional Analytical Models Suitable for Gaseous and Particulate Pollutant Transport, Diffusion, Transformation and Removal*. Atmospheric Environment, v. 19, n. 11, p. 1951-1957, 1985.
- LLEWELLYN, R. P.; *An Analytical Model for the Transport, Dispersion and Elimination of Air Pollutants Emitted from a Point Source*. Atmospheric Environment, v. 17, n. 2, p. 249-256, 1983.
- LØFSTRØM, P.; OLESEN, H. R.; *User's Guide for OML-Multi. An air pollution model for multiple point and area sources*. MST LUFT-A 126. National Environmental Research Institute, DK-4000 Roskilde, Denmark, 4 edition 1994.
- LONGO, K. M.; *Estudos de Partículas de Aerossóis e Gases Traços na Atmosfera da Bacia Amazônica: Influências das Circulações Regionais e de Larga Escala*. Tese de Doutorado do Instituto de Física da Universidade de São Paulo - USP, 231p, 1999.
- LONGO, K. M.; THOMPSON, A. M.; KIRCHHOFF, W. J. H.; REMER, L. A.; FREITAS, SAULO R.; SILVA DIAS, M. A. F.; ARTAXO, P.; HART, W.; SPINHIRNE J. D.; YAMASOES, M. A.; *Correlation between smoke and*

- tropospheric ozone concentration in Cuiabá during Smoke, Clouds and Radiation – Brazil (SCAR - B)*. Journal of Geophysical Research, vol 104, NO.D10, 12113 – 12129, 1999.
- LOUIS, J. F.; *A Parametric Model of Vertical Eddy in the Atmosphere*. Boundary – Layer Meteorolo., 17, 187 – 202, 1979.
- LUCON, O. S.; *Modelo Horus Inventário de Emissões de Poluentes Atmosféricos pela Queima de Combustíveis em Indústrias no Estado de São Paulo*. Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo, São Paulo, 244p, 2003.
- McCUMBER, M. C.; PIELKE, R. A.; *Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model - Part 1: Soil layer*. J. Geophys. Res., 86, 9929-9938, 1981.
- MAHURA, A.; ANDRES, R.; JAFFE, D.; *Atmospheric Transport Patterns from the Kola Nuclear Reactores*. Northern Studies Working Paper, n° 24, 2001.
- MAHURA, A.; BAKLANOV, A.; *Probabilistic Indicators of Atmospheric Transport for Regional Monitoring and Emergency Preparedness Systems*. Environment International, v 29, (8), p 1063 – 1069, 2004.
- MARTANO, P.; *Dinâmica de fluxo turbulento sobre o relevo e aplicação a difusão em pequena escala na camada limite atmosférica*. Tese de Doutorado do Instituto de Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC – RJ, 1992.
- MARTINS, J. A.; *Transporte, Uso do Solo e Auto- Sustentabilidade*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.
- McMURRY, P.; *A review of atmospheric aerosol measurements*. Atmospheric Environment, vol. 34, pp 1959 – 1999, 2000.
- MAHRER, Y.; PIELKE, R. A.; *Numerical study of the airflow over irregular terrain*. Beitr. Phys. Atm., v. 50, pp. 98-113, 1977.
- MATTOS, L.C.M.; *Considerações sobre as Limitações Pedológicas e Aptidão das Terras na Produção de um Espaço Regional - um Subsídio ao Planejamento de Ocupação das Terras de Angra dos Reis/RJ*. Mestrado em Ciência do Solo - UFRRJ. 181 p. 1993.
- MELLOR, G. L.; YAMADA, T.; *Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems*. Rev. Geophys. Space Phys., v. 20, pp. 851-875, 1982.
- MERRIL, J. T.; BLECK, R.; BOUDRA, D.; *Techniques of Lagrangian Trajectory Analysis in Isentropic Coordinates*. Mon. Wea. Rev. 114, 571 –581, 1986.

- MOREIRA, D.; TIRABASSI, T.; *Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: Um Instrumento Técnico para A Gestão Ambiental*. Ambiente & Sociedade – Vol. VII nº. 2 jul./dez. 2004.
- NEGRI, J. C.; *Modelo Preditivo aa Emissão e Dispersão do NOx Gerado em Usinas Termoelétricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar*. Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo - USP, 234p, 2002.
- NIELSEN, Y. S.; DEME, S.; MIKKELSEN, T.; *RIMPUFF, Atmospheric Dispersion Model*. RIMDOS8, Users Guide. Department of Wind Energy and Atmospheric Physics, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, June, 1998.
- USEPA.; *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models – Vol I - User Instructions*. Research Triangle Park, 1995.
- USEPA.; *SCREEN3 – Model User's Guide*. EPA-454/B-95-004. Research Triangle Park, 1995.
- US-NRC.; *Standard Review Plans for Evironmental Reviews for Nuclear Power Plants*. NUREG – 1555, Office of Nuclear Reactor Regulation. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 1999.
- ORLANSKI, I.; *A Rational Subdivision of scales for atmospheric Process*. Bull. Am. Met. Soc., 56, 527 – 530, 1975
- PAIVA, C. M.; ALVES, G. S.; XAVIER, M. C. A.; *Classificação e Indício de Mudança Climática em Angra dos Reis – RJ*. X Congresso Brasileiro de Meteorologia & VIII Congresso da Federação Latino – Americana e Ibérica de Sociedades de Meteorologia. Anais eletrônicos, Brasília – DF, 1998.
- PANOFSKY, H. A.; DUTTON, J. A.; *Atmospheric Turbulence - Models and Methods for Engineering Applications*. John Wiley & Sons, New York, 1984.
- PASQUILL. F.; *The Estimation of the Dispersion of Windborne Material*. Meteorological Magazine, v. 90, p. 33-49, 1961.
- PASQUILL, F.; *Atmospheric Diffusion*. D. Van Nostrand Company Ltd. Princeton, New Jersey, 1962.
- PELLEGRINI, C. C.; *Uma Lei Logarítmica Modificada para a Camada Limite Atmosférica Sobre Colinas Vegetadas em Atmosfera Não-Neutra*. Defesa de Tese de Doutorado, COPPE – UFRJ, RJ, 2001.

- PERRY, S.G., BURNS D. J., CIMORELLI, A. J.; User's guide to CTDMPPLUS: Volume 1. Model description and user instruction. EPA Publication N° EPA-600/8-89-041. Office of Research & Development, Research Triangle Park, NC. 1989.
- PERRY, S.G., BURNS D. J., CIMORELLI, A.J.; *User's guide to CTDMPPLUS: Volume 2. The screening mode (CTSCREEN)*. EPA Publication N° EPA-600/8-90-087. Office of Research & Development, Research Triangle Park, NC. 1990
- PETTERSSSEN, S.; *Weather Analysis and Forecasting*, vol. 1, p 448, McGraw – Hill, New York, 1956.
- PETERSEN, W. B.; LAVDAS, L. G.; *INPUFF 2.0 - A Multiple Source Gaussian Puff Dispersion Algorithm*. User's Guide. Research Triangle Park, NC., U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/8-86-024, 1986.
- PETERSEN, R. A.; UCCELLINI, L. W.; *The Computation of Isentropic Atmospheric Trajectories Using a "Discrete Model" Formulation*. Mon. Wea. Rev. 107, 556 574, 1979.
- PETERSEN, W. B.; CATALANO, J. A.; CHICO, T.; YUEN, T. S.; *INPUFF - A single Source Gaussian Puff Dispersion Algorithm*. EPA - 600/8-84-027, U.S.Environmental Protection Agency,Research Triangle Park,NC.,110pp. 1984.
- PICKERING, K. E.; THOMPSON, A. M.; McNAMARA, D. P.; SCHOEBERL, M. R.; FUELBERG, H. E.; LORING, R. O.; WATSON, M. V. FAKHRUZZAMAN, K.; BACHMEIER, A. S.; *TRACE A Trajectory Intercomparison, 1. Effects of Different Input Analyses*. J. Geophys. Res. 101, 23909 – 23925, 1996.
- PIELKE, R. A.; MCNIDER, R. T.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLWY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H.; *A comprehensive meteorological modeling system. – RAMS*. Meteo. Atmos. Phys., 49, 69-91, 1992.
- PIRES, D. O.; *Inventário de Emissões Atmosféricas de Fontes Estacionárias e sua Contribuição para a Poluição do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Tese de mestrado do Planejamento Energético - COPPE/UFR, 188 p., 2005.
- PITTS, F. J. B.; PITTS, J. N. J.; *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications*. Academic Press, San Diego, California, USA, 2000.

- PÖLLÄNEN, R.; VALKAMA, I.; TOIVONEN, H.; *Transport of radioactive particles from the Chernobyl accident*. Atmospheric Environment, vol. 31, n°. 21, 3575 – 3590, 1997.
- PUTTOCK, J. S.; *Comparison of Thorney Island data with predictions of HEGABOX / HEGADAS*. J. of Hazardous Material, 16, 439 – 455, 1987.
- PUTTRÉ, M.; Environmental modeling helps clear the air. Mechanical Engineering, January, 44-51, 1994.
- RAY, P.; *Mesoscale Meteorology and Forecasting*. Amer. Meteor. Soc, Boston, MA, 1986.
- RICHARDSON, L. F.; PROCTOR, D.; *Diffusion Over Distances Ranging from 3 km to 86 km*. Memoirs of the Royal Meteorological Society, v. 1, n. 1, 1925.
- RICHARDSON, L. F.; *Atmospheric Diffusion Shown on a Distance-Neighbor Graph*, Proc. of Royal Society, A, v. 110, p.709, 1926.
- RIGINA, O.; BAKLANOV, A.; *Regional radiation risk and vulnerability assessment by integration of mathematical modeling and GIS analysis*. Environment International, 27, 557 – 540, 2002.
- ROSA, L. P. *O Apagão – Por que veio? Como sai dele?* Editora Revan, RJ, 2001.
- ROSA, L. P.; TOLMASQUIM, M. T.; PIRES, J. C. L.; *A reforma do Setor Elétrico no Brasil e no Mundo uma Visão Crítica*. Ed. Relume Dumará, 1998.
- ROSSBY, C. G.; *A Generalization of the Theory of the Mixing Length With Applications to Atmospheric and Oceanic Turbulence*. Massachusetts Institute of Technology Meteorological Papers, v. 1, n. 4, 1932.
- RUSSEL, A.; DENNIS, R.; *NARSTO Critical Review of Photochemical models and Modeling*. Atmospheric Environment, Pergamon, 34, 2283 – 2324, 2000.
- SALAS, C. B.; *Aplicación de Modelos de Dispersión Atmosférica en la Evaluación de Impacto Ambiental: Análisis del Proceso*. Tese de Mestrado. Universidade do Chile, 86p 2004.
- SALTBONES, J.; FOSS, A.; BARTNICKI, J.; *Threat to Norway from potential accidents at the Kola nuclear power plant. Climatological trajectory analysis and episode studies*. Atmospheric Environment, vol. 34, 407 – 418, 2000.
- SCHÖNFELD, W.; *Numerical simulation of the dispersion of artificial radionuclides in the English Channel and the North Sea*. Journal of Marine Systems, 6, 529 – 544, 1995.

- SCHULMAN, L. L.; SCIRE, J.S.; *Buoyant Line and Point Source (BLP) Dispersion User's Guide, P-7304B*. Environmental Research and Technology, Inc., Concord, MA, 1980.
- SCIRE, J. S.; STRIMAITIS, D. G.; YAMARTINO, R. J.; *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5)*. EarthTech Inc., Concord, Massachusetts, 2000.
- SCOFANO A. M.; *Estudo Comparativo entre Perfis de Vento na Camada Limite Planetária*. Tese de Mestrado da COPPE - UFRJ, 1991.
- SEAMAN, N. L. *Meteorological Modeling for Air – Quality Assessments*. Atmospheric Environment. Pergamon, 34, 2231 – 2259, 2000.
- SEIBERT, P.; BEYRICH, F.; GRYNING, S. E.; JOFFRE, S.; RASMUSSEN, A.; TERCIER, P.; *Review and Intercomparison of Operational Methods for the Determination of the Mixing Height*. Atmospheric Environment, Pergamon, 34, 1001 – 1027, 2000.
- SEIGNEUR, C.; *Understand the Basics of Air-Quality Modelling*. Chemical Engineering Progress, v. 88, n. 3, p. 68-74, mar. 1992.
- SEIGNEUR, C.; KARAMCHANDANI, P.; ZHANG, Y.; PUN, B.; VIJAYARAGHAVAN, K.; WU, S.Y.; *Development of New Science in Models-3/CMAQ*. EPA Models-3 Workshop, Arlington, VA, June 12-14, 2002.
- SEINFELD, J. H.; *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution*. John Wiley & Sons. New York, USA, 1986.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N.; *Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution to Climate Chang*. John Wiley & Sons. New York, USA, 1998.
- SIMPSON, J.; WIGGERT, V.; *Models of Precipitating cumulus Towers*. Mon. Wea. Rev., 97, 471 – 489, 1969.
- SLAWSON, P. R.; CSANADY, G. T.; *On the Mean Path of Buoyant, Bent-over Chimney Plumes*. Journal of Fluid Mechanics, 28, 311-322, 1967.
- SMAGORINGSKY, J.; *General circulation experiments with the primitive equations. Part I: The basic experiment*. Mon. Wea. Rev., v. 91, pp. 99-164, 1963.
- STOHL, A.; *Computation, Accuracy and Application of Trajectories – A Review and Bibliography*. Atmospheric Environment, vol 32, n 6, 947 – 966. 1998.
- STAUFFER, D. R.; SEAMAN, N. L.; *Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model Part I: Experiments with synoptic-scale data*. Mon. Wea. Rev., 118 (6): 1250-1277, 1990.

- STERN, A. C.; BOUBEL, R. W.; TURNER, D. B.; FOX, D. L.; *Fundamentals of air pollution*. 2<sup>nd</sup> Ed. Orlando: Academic Press, p. 35-45, 1984.
- STEPHENS, G. L.; TSAY, S. C.; *On the cloud absorption anomaly*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 116, 671 – 704, 1990.
- STULL, R.B.; *Review of Non – Local Mixing Turbulent Atmospheres. Transilient Turbulence Theory*. Boundary – Layer Meteorology. 62, 21 –96, 1993.
- STULL, R.B.; *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- SUTTON, O. G. A.; *Theory of Eddy Diffusion in the Atmosphere*. Proc. of Royal Society, A, v. 135, p. 143, 1932.
- SUTTON, O. G.; *The Theoretical Distribution of Airborne Pollution from Factory Chimneys*. Quart. J. Royal Meteorological Society, v. 73, p. 426, 1947.
- SUTTON, O. G.; *The Dispersion of Hot Gases in the Atmosphere*. J. of Meteorology, v. 7, p. 307, 1950.
- TREMBACK, C. J.; KESSLER, R.; *A Surface Temperature and Moisture Parameterization for use in Mesoscale Numerical Models*. 7<sup>th</sup> Conference on Numerical Weather Prediction, Montreal, Canada, AMS, 1985.
- TREMBACK, C. J.; POWELL, J.; COTTON, W. R.; PIELKE, R. A.; *The Forward in Time Upstream Advection Scheme: Extension to higher orders*. Mon. Wea. Rev., 115, 540 – 555, 1987.
- TREMBACK, C. J.; *Numerical simulation of a mesoscale convective complex: model development and numerical results*. Fort Collins, CO., Colorado State University, (Department of Atmospheric Science, paper no. 465). 247 p., 1990.
- TRIPOLI, G. J.; COTTON, W. R.; *The Colorado State University three-dimensional cloud/mesoscale model - 1982. Part I: General theoretical framework and sensitivity experiments*. J. de Rech. Atmos., 16: 185-220, 1982.
- USEPA.; *User's guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion model*. Volume II, Description of model algorithms, EPA-454/B5-003b, 1995.
- VENKATRAM, A.; *An examination of the Pasquill – Gifford – Turner Dispersion Scheme*. Atmospheric Environment, vol 30, n° 8, 1283 – 1290, 1996.
- XUE, M.; DROEGEMEIER, K. K.; WONG, V.; *The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification*. Meteor. Atmos. Physics., 75, 161-193, 2000.

- WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y.; *New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: the single-moment scheme.* Atmospheric Research, 38: 29-62, 1995.
- WANG, W.; JIANG, W.; *A 3-Dimensional nonhydrostatic dispersion modeling system for modeling of atmospheric transport and diffusion over coastal complex terrain in the Hongkong-Shenzhen area.* Meteorological Atmospheric Physics, 68, 23-33, 1998.
- WARLAND, S. J.; *Applications and Theory of Micrometeorological Flux Measurement.* Thesis of Doctor of Philosophy presented to The Faculty of Graduate Studies of The University of Guelph, Ontario, Canada, 1999.
- WEICKMANN, K. M.; LUSSKY, G. R.; KUTZBACH, J. E.; *Intraseasonal (30-60 day) fluctuations of outgoing longwave radiation and 250 mb streamfunction during northern winter.* Mon. Weather Rev., 113, 941-961, 1985.
- YAMADA, T.; *Numerical Simulation of Airflows and SO<sub>2</sub> Concentration Distributions in an Arid South-Western Valley.* Atmospheric Environment, v. 26A, n. 9, p. 1771-1781, 1992.
- YAMARTINO, R. J.; SCIRE, J. S.; HANNA, S. R.; CARMICHAEL, G. R.; CHANG, Y. S.; *The CALGRID mesoscale photochemical grid model.* Volume I: Model formulation document. Sigma Research Corp., Concord, MA., 1992.
- YAMASOE, M. A.; *Estudo de Propriedades Ópticas de Partículas de Aerossóis a Partir de uma Rede de Radiômetros.* Tese de Doutorado do Instituto de Física da Universidade de São Paulo - USP, 273p, São Paulo, 1999.
- ZANNETTI, P.; *An improved puff algorithm for plume dispersion simulation.* J. Applied Meteor., vol. 20(10), pp. 1203-1211. 1981.
- ZANNETTI, P.; *Air Pollution Modeling.* Van Nostrand, Reinhold, 1990.

# ANEXO A

## **Escala Internacional de Eventos Nucleares - INES**

A Escala Internacional de Eventos Nucleares - INES é um instrumento de comunicação entre a comunidade científica nuclear e a população em geral, que fornece os graus das diferentes faixas dos possíveis acidentes nucleares. Esta escala foi projetada e desenvolvida por vários pesquisadores de diferentes países, em conjunto com a Agência Internacional de Energia Nuclear (IAEA). Seu objetivo maior é promover a conscientização de que os acidentes nucleares, em sua maioria, são de importância secundária e que, portanto, não oferecem riscos à saúde humana. Aproximadamente trinta países utilizaram-na, experimentalmente, com o propósito de classificar os diferentes tipos de eventos. Atualmente, é utilizada operacionalmente em todas as instalações nucleares (IAEA, 2001).

Os eventos nucleares são, basicamente, classificados em sete níveis (Figura A1). Para cada nível, são descritos os acontecimentos que ocorreram no passado nas usinas nucleares. Os níveis mais baixos estão na faixa de 1-3, são denominados de incidentes, os que estão na faixa de 4-7, correspondem aos acidentes. Os possíveis acontecimentos que não apresentarem qualquer risco, e que não estejam ligados diretamente às questões de segurança, são registrados como zero e denominados desvios (IAEA, 2001).

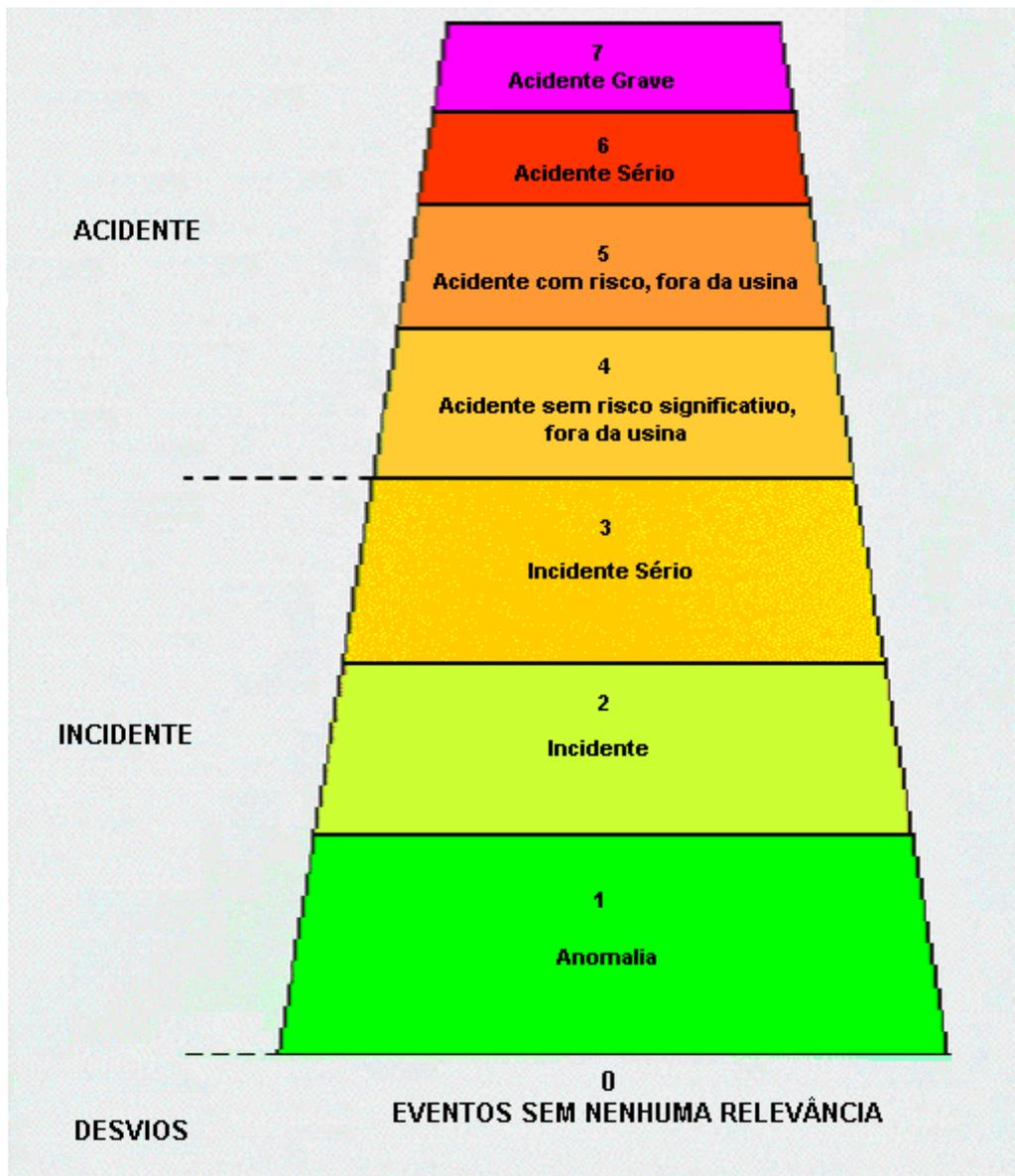


Figura A1: Classificação INES (IAEA, 2001).

Observando-se a Figura A1, pode-se identificar as palavras principais, onde os eventos são registrados e são atribuídos critérios de segurança de impacto fora da área e dentro da usina, discriminados em sete níveis.

O primeiro estágio denominado de desvios, chamado de zero, está abaixo da escala. O seu significado representa que não tem importância com relação à segurança (eventos sem nenhuma relevância).

Primeiro Nível – anomalia: indica ocorrência de um incidente por falha no equipamento ou por erro humano, ou ainda ocasionado por procedimentos inadequados. São situações tipicamente consideradas abaixo da escala;

Segundo Nível - incidente dois: uma importante falha nos dispositivos de segurança está ocorrendo e, portanto, procedimentos para interrupção em possíveis falhas do sistema terão que ser tomadas. Neste nível, são consideradas exposições à radioatividade em quantidades acima do limite da dose anual estabelecida, ou considera-se ainda a presença de quantidades significativas de radioatividade nas proximidades das instalações da usina;

Terceiro Nível - incidente sério três: liberação externa, acima dos limites estabelecidos de emissões radioativas (dosagem externa de décimos de milisieverts); o indivíduo exposto deverá ser totalmente afastado; considera-se ainda a ocorrência de eventos na área de instalação, por exemplo, liberação de alguns milhares de terabequeréis na atividade de contenção secundária, na qual o material poderá ser retornado a uma área de armazenamento com segurança; ainda no Terceiro Nível, considera-se que os trabalhadores possam receber dosagens suficientes para causar danos à saúde ou até mesmo graves contaminações;

Quarto Nível - acidente sem risco importante e fora da área de instalação da usina: em caso de liberação externa de radioatividade, em dosagens de alguns milisieverts, considera-se pouco provável a necessidade de aplicações de medidas de proteção fora da área de instalação da usina, medida que não se aplica em casos de controle de alimentos nas áreas de abrangência; acidentes desse tipo poderiam causar danos à central nuclear, por exemplo, fusão parcial do núcleo de um reator de potência ou ainda problemas nas instalações que não estejam diretamente ligadas aos reatores; a irradiação poderá resultar em uma possível superexposição com alta probabilidade de morte precoce;

Quinto Nível - acidente com risco fora da área de instalação: liberação, externa de materiais radioativos, podendo resultar na aplicação parcial de medidas previstas em procedimentos emergenciais para redução da probabilidade de danos à saúde; estão inclusos problemas graves em grande parte do núcleo do reator de potência em explosão, liberando grande quantidade de material radioativo dentro da instalação;

Sexto Nível - acidente sério: liberação externa de uma fração importante de material radioativo (mistura de produtos de fissão radioativos com tempo de vida pequeno ou longo) de uma instalação grande; esse tipo de emissão pode causar efeitos agudos e tardios na população em vasta área de abrangência; supostamente vários países seriam atingidos; danos ambientais de longo prazo são também considerados;

Sétimo Nível - acidente grave: liberação externa de uma fração importante de material radioativo de uma instalação grande seria constituída tipicamente de uma mistura de produtos de fissão radioativos com tempo de meia vida pequeno ou longo; essa liberação poderia ocasionar efeitos agudos e tardios na saúde da população de uma vasta região que englobasse possivelmente mais de um país, e com conseqüências em longo prazo de impactos para o meio ambiente.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)