

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE E MODELAGEM
NUMÉRICA PARA O ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES
NAS USINAS TERMOELÉTRICAS DE CHARQUEADAS E SÃO
JERÔNIMO**

CLAUDINÉIA BRAZIL SALDANHA

**Porto Alegre
2005**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE E MODELAGEM
NUMÉRICA PARA O ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES
NAS USINAS TERMOELÉTRICAS DE CHARQUEADAS E SÃO
JERÔNIMO**

Claudinéia Brazil Saldanha

Orientadora: Dr^a. Rita de Cássia Marques Alves

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do grau de Mestre em
Sensoriamento Remoto, área de concentração
em Sensoriamento Remoto Aplicado a Recursos
Naturais e ao Meio Ambiente.

Porto Alegre, RS
Março, de 2005

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Prof^a. Dr.^a Rita de Cássia Marques Alves, pelo incentivo a pesquisa.

Aos meus pais por todo carinho e incentivos que me foram dados, pois com certeza sem eles não teria conquistado mais uma etapa de minha vida.

Aos meus irmãos, sobrinhos e familiares em especial a minha querida avó, que com apenas um gesto ou com algumas palavras me incentivaram em vários momentos.

As minhas amigas Débora Simões, Juliana Dallarosa e Sheila Paz por toda a amizade, companheirismo e principalmente por dividir comigo, tanto os momentos alegres quanto os momentos mais difíceis, durante estes anos de mestrado.

A todos colegas do Centro de Sensoriamento Remoto e em especial ao pessoal do Laboratório de Meteorologia pelo apoio e companheirismo.

Ao pessoal da USP que em todos os momentos que precisei me ajudaram de alguma maneira em especial ao Dr. Edimilson Freitas, que me ajudou numa parte muito importante do meu trabalho e ao Bruno Biazetto que sempre teve a paciência de me tirar qualquer dúvida.

Ao pessoal do GEPRÁ-FURG que me deram todo apoio para o desenvolvimento do meu trabalho, em especial a Prof^a. Dr.^a. Jaci Saraiva, ao Marcelo, ao Gustavo e ao Chico.

Ao Pessoal da Usina termoeétrica de Charqueadas que me forneceram alguns dados e apoio para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento da pesquisa.

A todos que contribuíram de uma maneira ou outra para a realização deste trabalho.

As “gurias” pois sempre me recebiam com carinho independente de como tivesse sido o meu dia.

Em especial ao meu esposo Rogério Saldanha, que sempre me apoiou em todas as decisões, sempre me incentivou a seguir em frente, nos momentos mais difíceis sempre tinha uma palavra amiga ou um gesto de carinho para me confortar. Sendo a ele a quem dedico este trabalho.

UTILIZAÇÃO DE IMAGENS DE SATÉLITE E MODELAGEM NUMÉRICA PARA O ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES NAS USINAS TERMOELÉTRICAS DE CHARQUEADAS E SÃO JERÔNIMO ¹

Autora: Claudinéia Brazil Saldanha

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Marques Alves

SINOPSE

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver estudos relacionados à dispersão de poluentes, considerando a queima de carvão para geração de energia nas Usinas Termoelétricas de Charqueadas e São Jerônimo. O período de estudo foi do dia 17 a 23 de junho de 2003. Neste período houve a passagem de um sistema frontal. Sendo possível avaliar a dispersão dos poluentes em condições pré-frontal, frontal e pós-frontal. Para simular o comportamento dos poluentes neste período, foi utilizada uma subrotina de dispersão acoplada ao modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*). Os resultados mostraram que nos dias classificados como pré-frontal e pós-frontal as concentrações do material particulado, dióxido de enxofre e do óxido de nitrogênio, atingiram seus valores máximos, pelo fato da umidade relativa do ar estar bastante baixa em torno de 60%, pressão atmosférica da ordem de 1021 hPa e a intensidade dos ventos fraca. No dia classificado como frontal, as concentrações estavam praticamente nulas, devido à passagem do sistema frontal que causou a queda na pressão atmosférica, aumento da umidade relativa e também pelo fato da ocorrência de precipitação atmosférica neste dia. As comparações dos resultados simulados, com os dados observados na estação de qualidade do ar mostraram-se satisfatórios. Com exceção do dia 22 de junho, que apresentou uma diferença da ordem de 90%.

1. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Centro estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Curso de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS (96p.) – Março de 2005.

USE OF SATELLITE IMAGES AND NUMERICAL MODELING FOR THE STUDY OF THE DISPERSION OF POLLUTANTS IN THE THERMOELECTRIC POWER PLANTS CHARQUEADAS AND SÃO JERÔNIMO¹

Autora: Claudinéia Brazil Saldanha

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Marques Alves

ABSTRACT

The objective of this work is to develop studies related to the dispersion of pollutants, being considered the burning of coal for generation of energy in the thermoelectric power plants of Charqueadas and São Jerônimo. The period of study was of day 17 the 23 June of 2003. In this period it had the through of a system fronts. To simulate the behavior of the pollutants in this period, a subrotin of dispersion connected to model RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) was used results had shown that in the classified days as daily pay-frontal and after-frontal the concentrations of the particulate, sulphur dioxide and of nitrogen oxide, they had reached its maximum values, for the fact of the relative humidity of air to be sufficiently low around 60%, atmospheric pressure of the 1021 hPa and the intensity of the low winds. In the classified day as frontal, the concentrations were practically null, due to ticket of the system frontal that the fall in the atmospheric pressure caused, increase of the relative humidity and also for the fact of the atmospheric precipitation occurrence on this day. The comparisons of the simulated results, with the data observed in the station of quality of air had revealed satisfactory. With exception of day 22 of June, that presented a difference of the 90% order.

1. Master Science Thesis, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto, Centro estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Graduate Course in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS (96p.) – March de 2005.

SUMÁRIO

SINOPSE	III
ABSTRACT	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
LISTA DE ABREVIATURAS	XIV
CAPITULO I – INTRODUÇÃO.....	1
CAPITULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
CAPITULO III - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	10
3.1. CLIMATOLOGIA	10
3.1.1. Clima do Brasil	10
3.1.2. Clima do Rio Grande do Sul	12
3.1.3. Clima da Região Metropolitana de Porto Alegre	13
3.2. LOCALIZAÇÃO DAS USINAS TERMOELÉTRICAS	14
3.2.1. Usina Termoelétrica de Charqueadas.....	14
3.2.2. Usina Termelétrica de São Jerônimo	15
CAPITULO IV - DESCRIÇÃO DO MODELO RAMS	19
4.1. EQUAÇÕES GERAIS	21
4.1.1. Equações do movimento	21
4.1.2. Equação da termodinâmica	22
4.1.3. Equação da continuidade para razão de mistura.....	22
4.1.4. Equação da continuidade de massa	22
4.2. ESTRUTURA DA GRADE E SISTEMA DE COORDENADAS	23
4.3. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA LATERAL.....	24
4.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA VERTICAL	25
4.5. PARAMETRIZAÇÕES UTILIZADAS PELO MODELO	25
4.5.1. Parametização de Camada Superficial.....	25
4.5.2. Parametização de Solo	27
4.5.3. Parametização de Vegetação.....	28
4.5.4. Parametização de Radiação.....	30
4.5.5. Parametização de Convecção.....	30
4.5.6. Parametização de Turbulência	30

4.5.7. Parametrização de Microfísica de Nuvens	31
CAPITULO V – MATERIAL E MÉTODOS	33
CAPITULO VI – RESULTADOS	40
6.1 DESCRIÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE	40
6.2 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM ATMOSFÉRICA.....	43
6.2.1. Descrição dos campos meteorológicos	47
6.2.2. Descrição do comportamento dos Poluentes com a condição sinótica identificada.....	53
6.2.3. Descrição do comportamento da pluma	59
6.2.4. Descrição das simulações das médias de 24 horas.....	65
CAPITULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	75
7.1. CONCLUSÕES	75
7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1.1.1: Mapa da temperatura média anual –1931 a 1990 – Fonte INMET	11
FIGURA 3.1.2.2: Mapa da temperatura média anual –1931 a 1990 – Fonte INMET	12
FIGURA 3.1.2.3: Mapa da temperatura máxima anual –1931 a 1990 – Fonte INMET	12
FIGURA 3.1.2.4: Mapa da temperatura mínima anual –1931 a 1990 – Fonte INMET.....	13
FIGURA 3.1.2.5: Mapa da precipitação anual –1931 a 1990 – Fonte INMET	13
FIGURA 3.2.2.1: Mapa do Rio Grande do Sul	16
FIGURA 3.2.2.2: Mapa da Região Metropolitana de Porto Alegre	17
FIGURA 3.2.1.3: Mosaico da imagens do sensor ASTER, composição 2, 3N e 1.....	18
FIGURA 3.2.1.4: Recorte da imagem ASTER, para a região de São Jerônimo.	18
FIGURA 3.2.1.5: Recorte da imagem ASTER, para a região de Charqueadas.	18
FIGURA 5. 1: Esquema do cálculo do volume da fonte em Charqueadas.	35
FIGURA 5. 2: Esquema do cálculo do volume da fonte em São Jerônimo.	36
FIGURA 5. 3: Domínio das três grades utilizadas nas simulações.....	38
FIGURA 6.1.1: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 18/06 às 18:00 UTC.....	41
FIGURA 6.1.2: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 19/06 às 00:00 UTC.....	41
FIGURA 6.1.3: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 19/06 às 18:00 UTC.....	42
FIGURA 6.1.4: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 20/06 às 00:00 UTC.....	42
FIGURA 6.1.5: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 21/06 às 00:00 UTC.....	43
FIGURA 6.1.6: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 21/06 às 06:00 UTC.....	43
FIGURA 6.1.7: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 21/06 às 18:00 UTC.....	43
FIGURA 6.1. 8: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 22/06 às 06:00 UTC.....	43

FIGURA 6.2.1: Topografia assimilada pelo modelo – Grade 1.....	45
FIGURA 6.2.2: Topografia assimilada pelo modelo – Grade 2.....	45
FIGURA 6.2. 3: Topografia assimilada pelo modelo – Grade 3.....	46
FIGURA 6.2.4: Corte longitudinal da topografia para a latitude de Charqueadas.....	47
FIGURA 6.2.5: Corte longitudinal da topografia para a latitude de São Jerônimo.	47
FIGURA 6.2.1.1: Variação temporal da altura da Camada Limite Planetária (m).	49
FIGURA 6.2.1.2: Variação temporal da velocidade vertical do vento (m/s).	49
FIGURA 6.2.1.3: Variação temporal da cobertura de nuvens (g/kg).....	50
FIGURA 6.2.1.4: Variação temporal da Energia Cinética Turbulenta (m^2/s^2)	50
FIGURA 6.2.1. 5: Variação temporal da pressão atmosférica (hPa).	51
FIGURA 6.2.1. 6: Variação temporal da temperatura do ar (°C).	51
FIGURA 6.2.1.7: Variação temporal da umidade relativa do ar (%).	52
FIGURA 6.2.1.8: Variação temporal da velocidade do vento (m/s).	52
FIGURA 6.2.2.1: Variação temporal da concentração de material particulado (MP) para Charqueadas.	53
FIGURA 6.2.2.2: Variação temporal da concentração de dióxido de enxofre (SO ₂) para Charqueadas.	54
FIGURA 6.2.2.3: Variação temporal da concentração de oxido de nitrogênio (NO _x) para Charqueadas.	54
FIGURA 6.2.2.4: Variação temporal da concentração de material particulado (MP) para São Jerônimo.	55
FIGURA 6.2.2.5: Variação temporal da concentração de dióxido de enxofre (SO ₂) para São Jerônimo.	56
FIGURA 6.2.2.6: Variação temporal da concentração de oxido de nitrogênio (NO _x) para São Jerônimo.	56
FIGURA 6.2.2.7: Variação temporal da umidade relativa nas coordenadas de Charqueadas e São Jerônimo.	57
FIGURA 6.2.2.8: Variação temporal da pressão atmosférica nas coordenadas de Charqueadas e São Jerônimo.	58
FIGURA 6.2.2.9: Variação temporal da velocidade do vento nas coordenadas de Charqueadas e São Jerônimo.	58

FIGURA 6.2.2.10: Campo de precipitação (kg/kg) – grade 3 – 21/06/2003 as 12:00UTC .	59
FIGURA 6.2.3.1: Variação temporal da concentração de material particulado para o dia 20/06 –Charqueadas e São Jerônimo.....	60
FIGURA 6.2.3.2: Variação temporal da concentração do dióxido de enxofre para o dia 20/06 –Charqueadas e São Jerônimo.....	60
FIGURA 6.2.3.3: Variação temporal da concentração do oxido de nitrogênio para o dia 20/06 –Charqueadas e São Jerônimo.....	61
FIGURA 6.2.3.4: Variação longitudinal do material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC - Charqueadas.....	62
FIGURA 6.2.3.5: Variação longitudinal do dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – Charqueadas.....	62
FIGURA 6.2.3.6: Variação longitudinal do óxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – Charqueadas.....	63
FIGURA 6.2.3.7: Variação longitudinal do material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – São Jerônimo.....	64
FIGURA 6.2.3.8: Variação longitudinal do dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – São Jerônimo.....	64
FIGURA 6.2.3.9: Variação longitudinal do óxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – São Jerônimo.....	65
FIGURA 6.2.4.1: Valores médios de 24 horas para o dia 17/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	67
FIGURA 6.2.4.2: Valores médios de 24 horas para o dia 17/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	67
FIGURA 6.2.4.3: Valores médios de 24 horas para o dia 18/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	68
FIGURA 6.2.4.4: Valores médios de 24 horas para o dia 18/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	68
FIGURA 6.2.4.5: Valores médios de 24 horas para o dia 19/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	69

FIGURA 6.2.4.6: Valores médios de 24 horas para o dia 19/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	69
FIGURA 6.2.4.7: Valores médios de 24 horas para o dia 20/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	70
FIGURA 6.2.4.8: Valores médios de 24 horas para o dia 20/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	70
FIGURA 6.2.4.9: Valores médios de 24 horas para o dia 21/06/2003 –Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	71
FIGURA 6.2.4.10: Valores médios de 24 horas para o dia 21/06/2003 – Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	71
FIGURA 6.2.4.11: Valores médios de 24 horas para o dia 22/06/2003–Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	72
FIGURA 6.2.4.12: Valores médios de 24 horas para o dia 22/06/2001–Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).....	72
FIGURA 6.2.5.1: Localização das Usinas e da estação de qualidade do ar.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.5.2.1: Tipos de solos disponíveis no RAMS	28
Tabela 4.5.2. 2: Tipos de vegetações disponíveis no RAMS	29
Tabela 5. 1. Dados das fontes das Usinas termoelétricas de Charqueadas e São Jerônimo. 37	
Tabela 5. 2: Parametrizações utilizadas na simulação com o RAMS	39
Tabela 6.2.4.1: Médias de concentração de 24 horas, do material particulado e do dióxido de enxofre.	66
Tabela 6.2.5.1: Comparação entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo.	74

LISTA DE SÍMBOLOS

- c \Rightarrow velocidade de fase de onda
- c_p \Rightarrow capacidade calorífica do ar seco à pressão constante
- c_v \Rightarrow calor específico da água líquida
- c_{veg} \Rightarrow calor específico volumétrico da vegetação
- D_η \Rightarrow difusividade de umidade
- f \Rightarrow parâmetro de Coriolis
- g \Rightarrow aceleração da gravidade
- H \Rightarrow altura do topo da grade do modelo
- k \Rightarrow constante de Von Karman
- K_h \Rightarrow coeficiente de viscosidade turbulenta para o calor e a umidade
- K_m \Rightarrow coeficiente de viscosidade turbulenta da quantidade de movimento
- K_η \Rightarrow condutividade hídrica
- R \Rightarrow constante do gás para o ar seco
- rad \Rightarrow subscrito denotando a tendência da parametrização de radiação
- Ri_B \Rightarrow número de Richardson Bulk
- R_l^\downarrow \Rightarrow fluxo radiativo de onda longa na atmosfera
- R_s^\downarrow \Rightarrow fluxo radiativo de onda curta na atmosfera
- r_n \Rightarrow razão de mistura da quantidade total de água, chuva, cristais de gelo e neve
- T_g \Rightarrow temperatura do solo
- T_{veg} \Rightarrow temperatura da vegetação
- u \Rightarrow componente zonal (leste-oeste) do vento
- u_* \Rightarrow velocidade de atrito
- v \Rightarrow componente meridional (norte-sul) do vento
- w \Rightarrow componente vertical do vento
- x \Rightarrow coordenada cartesiana horizontal zonal
- x^* \Rightarrow coordenada cartesiana horizontal zonal transformada
- y \Rightarrow coordenada cartesiana horizontal meridional

y^* \Rightarrow coordenada cartesiana horizontal meridional transformada
 z \Rightarrow coordenada cartesiana vertical
 z^* \Rightarrow coordenada cartesiana vertical transformada
 z_g \Rightarrow altura da superfície local, em função de x e y
 z_0 \Rightarrow parâmetro de rugosidade
 Δz_g \Rightarrow profundidade da camada de solo
 ρ \Rightarrow densidade
 σ \Rightarrow constante de Stefan-Boltzman
 θ_{il} \Rightarrow temperatura potencial da água líquida e do gelo
 θ_* \Rightarrow escala de temperatura
 θ_v \Rightarrow temperatura potencial virtual
 π \Rightarrow função Exner total
 π' \Rightarrow função Exner perturbada
 η \Rightarrow umidade do solo expressa em termos de volume da água por volume do solo
 ψ \Rightarrow potencial de umidade
 τ_{veg} \Rightarrow transmissividade de onda curta através da camada de vegetação
 α_{veg} \Rightarrow albedo da superfície vegetada
 $Q_{[\eta]}$ \Rightarrow termo fonte inserido no modelo
 Q_0 \Rightarrow taxa de emissão
 V \Rightarrow volume
 SO_2 \Rightarrow dióxido de enxofre
 NO_x \Rightarrow óxidos de nitrogênio
 MP \Rightarrow material particulado

LISTA DE ABREVIATURAS

ASTER	⇒	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CEEE	⇒	Companhia Estadual de Energia Elétrica
CGTEE	⇒	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
CLP	⇒	Camada Limite Planetária
CPTEC	⇒	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
FEPAM	⇒	Fundação Estadual de Proteção Ambiental
GOES	⇒	Geostationary Operational Environmental Satellite
GRADS	⇒	Grid Analysis and Display System
INMET	⇒	Instituto Nacional de Meteorologia
NCEP	⇒	National Centers of Environmental Predictions
RMPA	⇒	Região Metropolitana de Porto Alegre
UTC	⇒	Universal Time Coordinate
UTE	⇒	Usina termoelétrica
RAMS	⇒	Regional Atmospheric Modeling System

CAPITULO I – INTRODUÇÃO

As fontes emissoras dos poluentes atmosféricos são numerosas e variáveis, podendo ser antropogênicas ou naturais. Fontes antropogênicas são as que resultam de atividades humanas, podendo causar problemas de altas concentrações de poluentes em grandes centros urbanos devido à emissões de múltiplas fontes, tais como veículos, indústrias, geradores térmicos de energia elétrica, e muitas outras. As fontes naturais englobam fenômenos da natureza tais como emissões provenientes de erupções vulcânicas e queimadas de origens naturais.

O nível de poluição atmosférica é determinado pelas concentrações dos poluentes presentes no ar. Devido a grande variedade destas substâncias, os poluentes podem ser classificados como primários, que são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissões, e secundários que são aqueles formados na atmosfera através das reações químicas entre os poluentes primários e componentes naturais da atmosfera.

Parte da poluição pode ser transportada através dos ventos e depositadas a grandes distâncias, dependendo das condições meteorológicas atuantes na região. A outra parte logo que é emitida pela fonte deposita-se no solo antes de ser absorvida pela umidade do ar, depositando-se em águas, plantas e construções, geralmente ao redor da área onde foi produzida. Algumas condições meteorológicas, tais como, a estabilidade atmosférica, altura da camada limite planetária, umidade relativa do ar, inversão térmica, velocidade e direção do vento, estão diretamente ligadas a dispersão de poluentes.

A meteorologia é um fator decisivo na determinação da qualidade do ar, através de diversos processos atmosféricos que controlam ou influenciam fortemente a evolução das emissões, das espécies químicas, dos aerossóis e do material particulado. Esses processos incluem o transporte horizontal e vertical, a mistura turbulenta, a convecção, a geração induzida pela luz dos óxidos de nitrogênio e as deposições seca e úmida na superfície.

Um outro papel importante das variáveis meteorológicas na qualidade do ar é com relação as reações químicas que ocorrem na atmosfera, pois são afetadas diretamente pela umidade relativa, energia solar, temperatura e pela presença de água líquida nas nuvens.

A condição meteorológica que afeta uma determinada localidade em um determinado instante é resultado de numerosos processos que agem em várias escalas (macroescala, mesoescala e microescala). Os movimentos atmosféricos podem ser separados em duas classes: o vento e a turbulência. O vento é o campo determinístico do movimento em três dimensões, com escalas de tempo que vão desde alguns minutos até vários dias e escalas espaciais desde alguns quilômetros até a escala planetária que comporta dezenas de milhares de quilômetros. A Turbulência pode ser entendida como o movimento de redemoinhos sobrepostos um ao outro, que chamamos de Vórtices ou Turbilhões (*eddies*). A turbulência na camada limite é gerada pelos forçantes da superfície, na qual podemos citar como exemplo, o aquecimento da superfície durante os dias ensolarados, que provoca a formação de Termas de ar quente que sobem formando grandes turbilhões.

Na camada limite planetária as características das plumas são descritas através da intensidade e duração em que as misturas verticais e horizontais, bem como o transporte turbulento, agem sobre as emissões recentes. Os fenômenos que ocorrem na microescala tem dimensões, que vão da ordem de um metro até um quilometro, com duração da ordem de quinze segundos até cerca de uma hora.

A atmosfera está em constante movimento, sendo os ventos gerados por processos em diversas escalas, desde a escala das brisas locais até circulações em escala sinótica, hemisférica e global. Pela maior dependência das características da fisiografia local, os transportes dentro da camada limite são controlados fortemente pelas menores escalas. Isto não impede, contudo, que gases e aerossóis sejam advectados pelos ventos nos baixos níveis até distâncias significativas. A presença de sistemas de altas pressões que produzam

movimentos subsidentes mantém os poluentes em níveis próximos da superfície e as barreiras topográficas passam a ser muito importantes na condução desses poluentes na atmosfera, como, por exemplo, na Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) onde se encontram o Complexo Termelétrico de Charqueadas e São Jerônimo. As correntes ascendentes, características das térmicas produzidas pelo aquecimento diurno nos continentes, bem como as nuvens cúmulos, tanto isoladas quanto associadas a sistemas organizados, como as frentes frias e os sistemas convectivos, são capazes de levar os poluentes desde a sua origem, rompendo a barreira da camada limite e colocando-os rapidamente em níveis elevados dentro da chamada atmosfera livre. Alcançando tais níveis mais altos dentro da troposfera, os poluentes são mais facilmente levados pelos ventos que aí são mais fortes, afastando este material particulado e os gases radioativos para longe da sua origem.

Como ponto de partida para qualquer estudo atmosférico está a climatologia, que vem a ser a descrição pormenorizada do comportamento atmosférico mais persistente ao longo dos anos, embora faça parte da moderna climatologia, não só a construção de padrões de comportamento das variáveis atmosféricas, mas também a determinação das flutuações ou anomalias e até mesmo das características dos eventos considerados extremos, quando comparados aos padrões básicos.

Hoje em dia, com o maior desenvolvimento industrial, principalmente junto as grandes metrópoles, tem-se aumentado as exigências do fornecimento de certos serviços básicos, dentre eles, o fornecimento de energia elétrica de forma segura e contínua. Para atender estas necessidades, tem-se, utilizado diferentes formas de geração de energia elétrica, as quais pode-se citar, a hidráulica, a nuclear, a eólica, a térmica, entre outras.

Em relação a geração através de usinas termelétricas, uma preocupação crescente se dá em relação ao controle da concentração de poluentes emitidos pelas mesmas, uma vez que a maior parte da poluição do ar é produzida devido à queima de combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo. Quando o combustível é queimado ele emite poluentes na atmosfera, tais como, enxofre e nitrogênio, contidos no material orgânico, que convertem rapidamente em dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, os quais são extremamente prejudiciais à saúde e ao meio ambiente se emitidos em grandes quantidades.

Um dos principais problemas causados pela poluição atmosférica está relacionado às doenças respiratórias tais como; asma, bronquite, enfisema pulmonar, desconforto físico, agravamento de doenças cardiorespiratórias, podendo ainda contribuir para o desenvolvimento do câncer pulmonar. Devido a estes problemas é de fundamental importância o estudo da poluição atmosférica para avaliar qualidade de vida da população e do meio ambiente.

Neste sentido, o objetivo geral do trabalho é verificar através da análise das imagens de satélite e da modelagem numérica, as condições favoráveis e desfavoráveis à dispersão de poluentes. Para o desenvolvimento dessa etapa foram realizadas simulações considerando um período de inverno para seis dias consecutivos, compreendidos entre os dias 17 e 23 de junho de 2003. Neste período houve a passagem de um sistema frontal, sendo possível assim, avaliar a dispersão dos poluentes em condições pré-frontal, frontal e pós-frontal.

A avaliação da dispersão de poluentes, foi desenvolvida, considerando as taxas de emissões do dióxido de enxofre, do material particulado e dos óxidos de nitrogênio, devido à queima de carvão nas usinas termoeletricas de Charqueadas e São Jerônimo.

CAPITULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo relacionado à dispersão de diferentes poluentes na atmosfera, utilizando modelos numéricos, é uma das principais maneiras de prever os valores das concentrações ao nível do solo de um determinado poluente emitido por fontes pontuais contínuas. Com esse tipo de ferramenta, torna-se possível verificar qual é o impacto ambiental a ser causado por uma determinada fonte e, assim, verificar a qualidade do ar na área de estudo. A importância deste assunto tornou-se evidente com o aumento das emissões de poluentes, causado pelo crescimento das áreas urbanas e industriais onde, na maioria das vezes, estas indústrias localizam-se em áreas consideradas topograficamente inviáveis para a dispersão de poluentes. É de fundamental importância levar em conta as características meteorológicas do local onde está sendo instalado um complexo industrial, para viabilizar um melhor controle da qualidade do ar.

Yoshikado e Tsuchida (1996) verificaram altos níveis de poluição sobre a planície central de Kanto, Japão. Este fato ocorreu devido à presença de uma massa de ar frio sobre a porção central da planície, que era bloqueada pela área urbana de Tóquio. As condições eram estáveis e de calmaria, por isso provocaram altos níveis de poluição.

Ccoyllo (1998) estudou a interação entre os poluentes atmosféricos e as condições atmosféricas e observou que, para a condição sinótica de frente fria, tanto o material particulado quanto o SO₂ apresentaram concentrações baixas, pois nesta condição existem ventos fortes, precipitação e umidade relativa alta. Nas condições sinóticas de alta

subtropical do Atlântico Sul e alta polar, os poluentes apresentaram valores elevados de concentração, devido à baixa velocidade do vento, baixa umidade relativa e ausência de precipitação.

Liu e Chan (2002) estudaram a influência das brisas marítimas e terrestres na poluição do ar, para os dias 29 e 30 de dezembro de 1999, Quando ocorreu um episódio de poluição extrema em Hong Kong, devido às emissões de NO_x , partículas totais em suspensão e SO_2 . As condições meteorológicas presentes nos dias estudados foram de céu claro e ventos fracos. Estas condições favoreceram o desenvolvimento de circulações locais térmicas e mecanicamente induzidas, as quais foram responsáveis pela distribuição e recirculação dos poluentes do ar na área de estudo.

Uma grande variedade de estudos na área de dispersão de poluentes foram desenvolvidas utilizando diversos modelos numéricos, com o propósito de verificar qual o modelo que mais se adequava as diferentes condições de terreno e as condições meteorológicas.

Yamada et al. (1991) fizeram simulações utilizando um sistema de modelos para os experimentos realizados em Montain Iron (EUA) em 1965 e 1966. O sistema consistia do modelo atmosférico tridimensional *Higher-order Turbulent Model for Atmospheric Circulation* (HOTMAC) e do modelo de *puff* lagrangeano *Random Puff Transport and Diffusion* (RAPTAD). Foram utilizadas observações de vento na superfície, sondagens de ar superior e valores de concentração na superfície de partículas fluorescentes. Os resultados foram comparados ao dos modelos empíricos (gaussianos). Segundo os autores, o sistema de modelos pode ser utilizado com ferramenta muito útil no caso de situações de emergência como, por exemplo, emissões acidentais perigosas.

Park e Cho (1998) Investigaram o transporte de SO_2 e Sulfato entre a Coréia e o Leste da China utilizando o STEM II (Sulfur Transport Eulerian Model II) em um período de 72 horas. Dos resultados obtidos, verificaram um alto nível de concentração de SO_2 e Sulfato ao nível do solo, nas primeiras 36 horas, diminuindo nas últimas horas devido ao efeito da precipitação, que ocorreu nas últimas 36 horas. Através do campo de vento do *Mesoscale Model Version 4*, pode ser verificado que realmente os poluentes eram carregados da Coréia até o Leste da China.

Wang e Jiang (1998) estudaram os poluentes liberados de uma fonte elevada, em condições típicas de formação de brisa. Os resultados comparados com dados de observação, indicaram que as variações temporais e a não uniformidade das circulações e da turbulência afetaram as distribuições de concentrações, principalmente durante os horários de transição entre as brisas marítimas e terrestres. No geral os resultados concordaram bem com as observações realizadas.

Park e Kim (1999) fizeram um estudo de caso na estação de outono, consideraram para este estudo os dias em que ocorreram altas concentrações de SO₂ na região de Kyongin na Coreia. Os autores utilizaram vários métodos para resolver a equação da continuidade e assim, estimar a concentração de poluentes. Os resultados mostraram que o modelo apresentou um bom desempenho na distribuição horizontal de concentração de SO₂.

Alves (2000) estudou a dispersão de poluentes na região de Candiota – RS utilizando três diferentes modelos numéricos (RAMS, KAPPAG e M4PUFF) para a análise do transporte de SO₂. Os resultados dos três modelos foram comparados com dados obtidos nas estações de qualidade do ar instalados na região da usina. Analisando os resultados pode-se observar que as simulações com o modelo RAMS foram as que mais se aproximaram dos dados de concentrações medidos nas estações de qualidade do ar instalados ao redor da usina.

Barna e Gimson (2002) estudaram a dispersão do material particulado na cidade de Christchurch, localizada na Nova Zelândia. As simulações foram feitas utilizando os modelos RAMS, CALMET e CALPUFF, inicializados com um detalhado inventário de emissões de fontes móveis e pontuais. O estudo foi feito para o período de 27 de julho a 1 de agosto de 1995, quando os valores máximos de concentração do material particulado de 1 hora e 24 horas chegaram a 368 µg/m³ e 107 µg/m³, respectivamente. Os resultados mostram que os picos de concentração ocorreram durante a noite, quando aumentava o número de pessoas queimando madeira e carvão em suas casas. Então, os autores retiraram os valores de emissões do particulado provenientes das casas, e puderam observar que o pico de concentração foi reduzido significativamente em 55%.

Cunha (2002) estudou o transporte de poluentes na Região do Pólo Petroquímico em Triunfo no Rio Grande do Sul, utilizando o modelo ISCST 3. Observou que, em geral,

os valores de concentração são subestimados, por este modelo utilizar dados empíricos relacionados aos parâmetros de estabilidade atmosférica para inicialização do modelo.

Borrego et al. (2003) estudaram a poluição do ar na cidade de Lisboa, aplicando um modelo desenvolvido na Universidade de Aveiro, onde foram utilizadas duas ferramentas numéricas: i) TREM que é o modelo de transporte de emissões para fontes tipo linhas, designada para quantificar as emissões em rodovias e o ii) VADIS que é o modelo local de dispersão, designado para simular a poluição urbana. Os resultados das simulações foram comparados com dados medidos, usando critérios da legislação Européia, com isso os autores puderam concluir que as ferramentas numéricas demonstraram uma performance satisfatória.

Elbir (2003) utilizou o modelo meteorológico CALMET e o modelo de dispersão CALPUFF para estimar a dispersão de SO₂ emitidos por fontes na cidade de Izmir, Turquia, para o ano de 2000. O desempenho do modelo quando comparado com as quatro estações de monitoramento foi considerado bom com uma acurácia de 68%.

Jazcilevich et al. (2003) utilizaram um modelo prognóstico de qualidade do ar o MCCM (Multi Scale Climate Chemistry Model), para estudar as concentrações de poluentes na região central do México. No período de 2 a 5 de março de 1997, correspondente à passagem de um sistema de alta pressão, favorecendo as condições de um típico cenário de alta poluição. As simulações mostraram que o desempenho do modelo foi muito bom quando comparado com dados observados.

Martillia et al. (2003) fizeram duas simulações para verificar a qualidade do ar na cidade de Atenas, Grécia. Utilizaram um modelo de mesoescala, onde na primeira simulação foi considerado todo o detalhamento da superfície urbana e, na segunda, foram utilizadas as parametrizações tradicionais do modelo. As saídas do modelo foram acopladas no modelo fotoquímico Euleriano, onde as comparações com os dados medidos mostraram uma melhor performance para o primeiro caso, no qual houve um detalhamento da superfície. As principais diferenças entre as duas simulações foram na velocidade do vento, temperatura do ar, turbulência e o fluxo de calor.

Quanto mais completo for o campo de dados meteorológicos, mais preciso serão os resultados obtidos pelos modelos de dispersão, sendo assim passou-se a acoplar os modelos de dispersão aos modelos de escala regional.

Carvalho (1999) utilizou o modelo lagrangeano estocástico de partículas SPRAY acoplado ao modelo RAMS para simular a dispersão do poluente SF₆, na Europa central, com o objetivo de estudar o transporte e a difusão de poluentes sobre terrenos complexos. Os resultados mostraram que os modelos considerados reproduziram bem o comportamento geral da pluma do poluente, a distribuição temporal e espacial das concentrações e a localização dos valores máximos de concentração, quando comparados aos dados de qualidade do ar medido através das estações de monitoramento localizadas na área de estudo.

Ferreira et al. (2003) utilizaram para simular os mecanismos de transporte na atmosfera o modelo de mesoescala MM5, que gera resultados de campo de vento para serem introduzidos no modelo diagnóstico CALMET, que fornece informações de campo de vento tridimensional, comprimento de Monin Obukhov, altura da camada de mistura e velocidade de atrito. Estes parâmetros são introduzidos no modelo de dispersão de poluentes desenvolvidos através da Técnica da Transformada Integral Generalizada (GITT). Os autores concluíram que o modelo combinado desenvolvido, incluindo modelos meteorológicos prognóstico e diagnóstico e um modelo de qualidade do ar, possibilitou o estudo do transporte de poluentes para curtos períodos de emissão considerando efeitos como as características do terreno e o condicionamento da atmosfera, sobre o mecanismo de dispersão de poluentes atmosféricos.

CAPITULO III - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA), de acordo com dados da METROPLAM (Fundação Estadual de Planejamento Metropolitano e Regional) é composta por 31 municípios e ocupa uma área de 9.825,61 km², representando 3,65% da área total do estado do Rio Grande do Sul. A Região Metropolitana de Porto Alegre localiza-se nas margens do lago Guaíba, estando à parte leste do Estado, ao Norte da Laguna dos Patos.

3.1. CLIMATOLOGIA

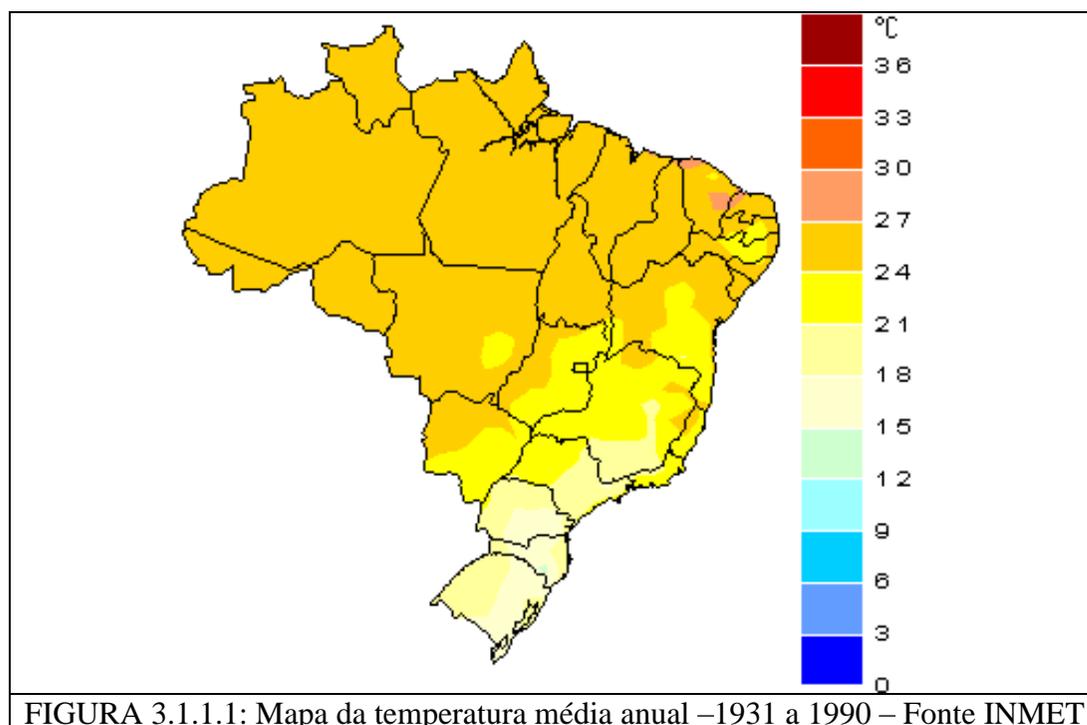
3.1.1. CLIMA DO BRASIL

O Brasil, pelas suas dimensões continentais, possui uma diversificação climática bem ampla, predominando os climas equatoriais, tropicais e subtropicais. A diversificação climática é influenciada pela sua configuração geográfica, sua significativa extensão costeira, seu relevo e a dinâmica das massas de ar sobre seu território. Esse último fator assume grande importância, pois atua diretamente sobre as temperaturas e os índices pluviométricos nas diferentes regiões do país.

No país é verificado desde climas superúmidos quentes, provenientes das massas Equatoriais até climas semi-áridos, próprios do sertão nordestino. O clima de uma dada

região é condicionado por diversos fatores, dentre eles pode-se citar temperatura, chuvas, umidade do ar, ventos e pressão atmosférica, os quais, por sua vez, são condicionados por fatores como altitude, latitude, condições de relevo e vegetação. Ainda hoje, a melhor classificação climática é a de Köppen que leva em as características de temperatura e regime de chuvas nas diversas estações do ano. Na visão global, o Brasil está localizado em duas áreas climáticas. Grande parte do território Brasileiro está localizada acima do trópico de Capricórnio, sendo considerada zona tropical. A região sul e sudeste do Brasil localizam-se na zona temperada

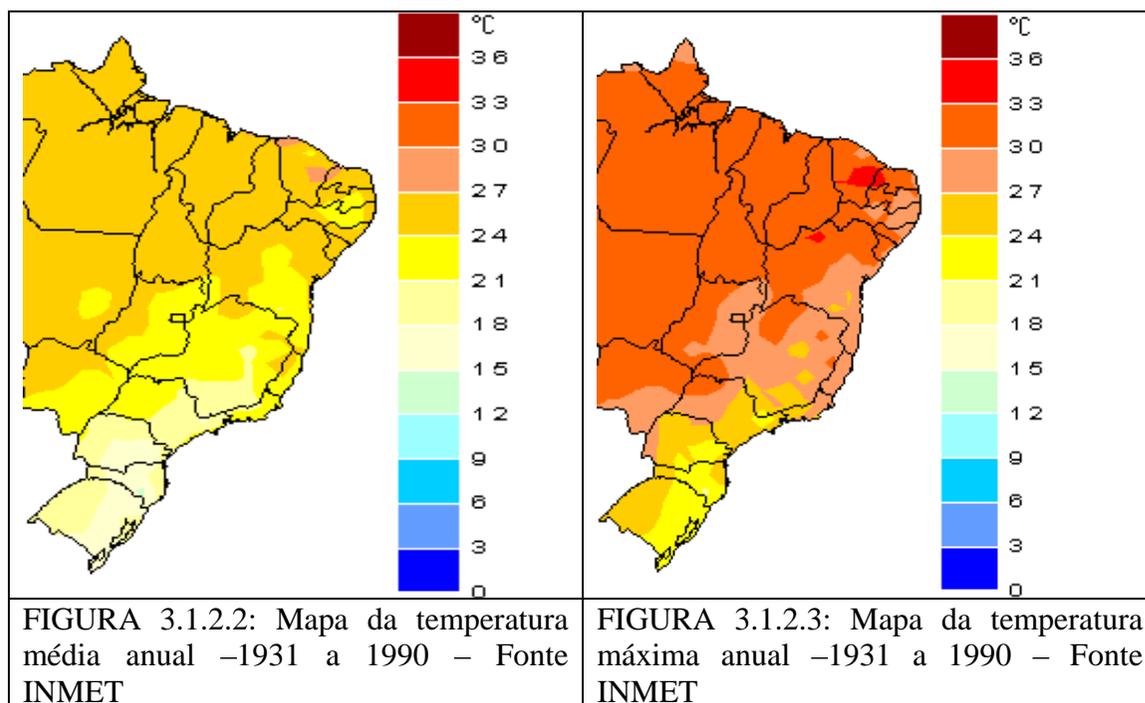
Quanto aos aspectos térmicos, também ocorrem grandes variações. Como pode ser observado no mapa das médias anuais de temperatura a seguir, a Região Norte e parte do interior da Região Nordeste apresentam temperaturas médias anuais superiores à 25°C, enquanto que na Região Sul do país e parte do Sudeste, as temperaturas médias anuais ficam abaixo de 20°C.

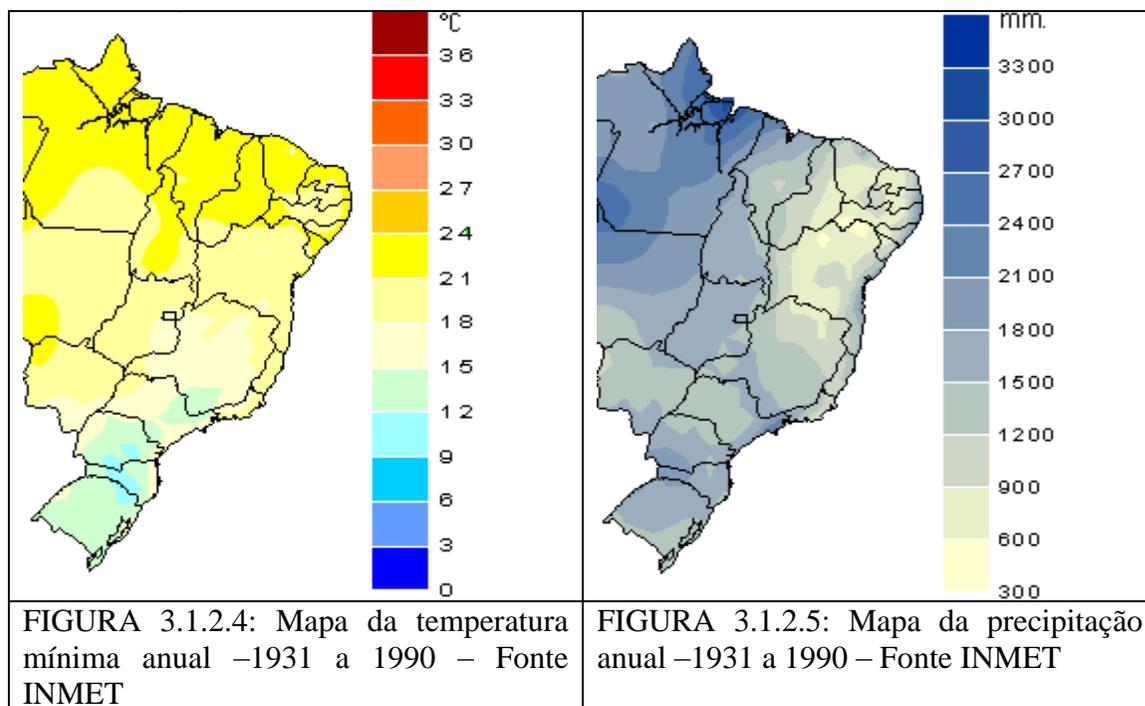


3.1.2. CLIMA DO RIO GRANDE DO SUL

O Rio Grande do Sul situa-se no extremo sul do país, entre as latitudes de 27° e 34° Sul (S) e as longitudes de 50° e 57° Oeste (W). Fenômenos relacionados com a dinâmica da atmosfera (frentes meteorológicas) e fatores geográficos são os determinantes das principais características climáticas do extremo sul do Brasil.

O clima predominante no território gaúcho é o sub-tropical, sendo que na região do Planalto Serrano o clima é sub-tropical de altitude, com temperaturas médias (figura 3.1.2.1.2) inferiores a 21° C e chuvas abundantes, regularmente distribuídas. A pluviosidade média anual (figura 3.1.2.1.5), oscila entre 1.200 e 2.100 mm, sendo mais intensa na metade norte do estado. Conforme a figura 3.1.2.1.3, a temperatura anual máxima mantém-se em torno de 24° a 27°C, onde os maiores valores são observados na metade oeste do Estado.





A temperatura mínima anual (figura 3.1.2.1.4) em geral apresenta valores em torno de 12°C a 15°C, exceto no noroeste do Estado com valores chegando a 21°C e a nordeste do Rio Grande do Sul apresentando temperaturas mínimas inferiores à 12°C.

3.1.3. CLIMA DA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE

A RMPA encontra-se na faixa climática temperada. Segundo a classificação climática de Köppen, esta zona caracteriza-se por um clima subtropical úmido, por apresentar temperaturas médias do mês mais quente superiores a 22° C e chuvas bem distribuídas no decorrer do ano. Em anos sem anomalias extremas a região apresenta quatro estações bem distintas ao longo do ano e marcadas pela constante variação do tempo.

A faixa latitudinal (30° sul), onde se encontra a RMPA, não permite a formação de massas de ar e, desse modo, acaba se tornando uma zona de transição entre as massas quentes (tropicais marítimas, continentais secas), oriundas do quadrante Norte e mais frequentes no verão, e as massas frias (massas de ar polar marítimo secas) vindas do sul,

freqüentes no inverno. A passagem de sistemas frontais também é bem característico no Rio Grande do Sul.

Na região de Charqueadas e São Jerônimo a temperatura média anual é de 19°C, com uma média no verão de 23,4°C e, no inverno 15°C. A precipitação apresenta um valor anual constante durante o ano inteiro em torno de 1400 mm, havendo uma pluviosidade maior durante os meses de junho a setembro. Comportamento semelhante tem a umidade relativa do ar, mantendo-se alta o ano inteiro da ordem de 80% .

3.2. LOCALIZAÇÃO DAS USINAS TERMOELÉTRICAS

As usinas termoeletricas a serem estudadas, de Charqueadas e São Jerônimo, localizam-se na região do Baixo do Jacuí. O interesse em estudar estas termoeletricas se deve principalmente ao grande impacto ambiental causado na região devido, principalmente, à intensa extração de carvão na bacia do Rio Jacuí.

Uma outra característica da região, segundo Borba et al (2003), é o uso intensivo do solo para a pecuária e agricultura. O curso inferior do rio Jacuí passa pelo Pólo Petroquímico de Triunfo, onde destacam-se, as indústrias químicas, de plástico, borracha, siderurgia e produtos alimentares. Os municípios banhados pelo Baixo Jacuí são: Arroio dos Ratos (100% do seu território), Charqueadas (100%), Eldorado do Sul (74%), Montenegro (5%), São Jerônimo (87%) e Triunfo (70%). A seguir encontra-se uma descrição das usinas termoeletricas consideradas neste estudo.

3.2.1. USINA TERMOELÉTRICA DE CHARQUEADAS

A Usina Termoeletrica de Charqueadas (UTE Charqueadas) está localizada no município de Charqueadas, Estado do Rio Grande do Sul, distante 55 Km da cidade de Porto Alegre. A cidade de Charqueadas possui 20 mil habitantes compreendidos numa área total de 215 Km².

A UTE Charqueadas é considerada um importante centro de consumo de energia elétrica, é uma usina movida a carvão mineral, constituída de quatro grupos de geradores,

produz em torno de 14,5 MW de energia por hora, ou seja, aproximadamente 348 MW/dia. Sua localização geográfica é de latitude 29.95° S, longitude 51.60°, e altitude de 30 metros.

3.2.2. USINA TERMELÉTRICA DE SÃO JERÔNIMO

A Usina de São Jerônimo (UTE São Jerônimo) é a termoelétrica a carvão britado mais antiga em operação no Brasil, tendo começado suas atividades em outubro de 1953. Foi ela quem deu início ao Plano Geral de Eletrificação do Rio Grande do Sul.

A UTE São Jerônimo faz parte da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - CGTEE que foi criada a partir da reestruturação societária da Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE. A CGTEE foi constituída em julho de 1997. Em novembro de 1998, seu controle acionário foi transferido para a União. Posteriormente, em 31 de julho de 2000, a CGTEE tornou-se uma empresa do Sistema ELETROBRÁS.

A CGTEE possui os direitos de exploração e produção de energia elétrica através de suas usinas termoelétricas instaladas no Estado do Rio Grande do Sul. São elas: Usina Termelétrica Presidente Médici (Candiota II) - 446 MW; Usina Termelétrica São Jerônimo - 20 MW; e Nova Usina Termelétrica de Porto Alegre - NUTEPA - 24 MW.

A Usina Termelétrica de São Jerônimo é do tipo térmica a vapor, está localizada no município de São Jerônimo - RS, distante 65 km de Porto Alegre. Sua localização geográfica encontra-se nas seguintes coordenadas: latitude 29.98° S, longitude 51.73° W e altitude de 29 metros.

A Usina de São Jerônimo utiliza o carvão mineral como combustível primário. No Primeiro projeto energético do Estado do Rio Grande do Sul, a Central, como era denominada na época, foi projetada em duas etapas, com capacidade final de 20 MW.

As obras foram iniciadas em 1948 com levantamento topográfico e terraplenagem da área. Em 1953 foi inaugurada a primeira etapa, com a entrada em operação do primeiro conjunto de equipamentos, com 10 MW capacidade de energia instalada. Em 1955, com a inauguração da etapa II, a Usina operou com 20 MW de capacidade instalada para atendimento aos requisitos do Sistema Interligado Brasileiro.

A usina encontra-se integrada ao Sistema Elétrico Brasileiro e seu despacho, a exemplo das demais Usinas, está sujeito à conveniência operacional do Operador Nacional do Sistema (ONS).

Toda a área de abrangência da UTE São Jerônimo está sujeita a um controle da emissão de partículas, com monitoramento dos principais indicadores de qualidade do ar. A remoção das cinzas se dá com deslocamento e reposição para as cavas de mineração com posterior reflorestamento das áreas atingidas.

Atualmente a Usina Termelétrica de São Jerônimo produz em torno de 197 MW de energia por dia.

Na figura 3.2.2.1, temos o mapa do Rio Grande do Sul, onde a Região Metropolitana de Porto Alegre encontra-se em cinza, e o contorno em vermelho representa a área de estudo. Na Figura 3.2.2.2, temos as divisões dos territórios da RMPA.

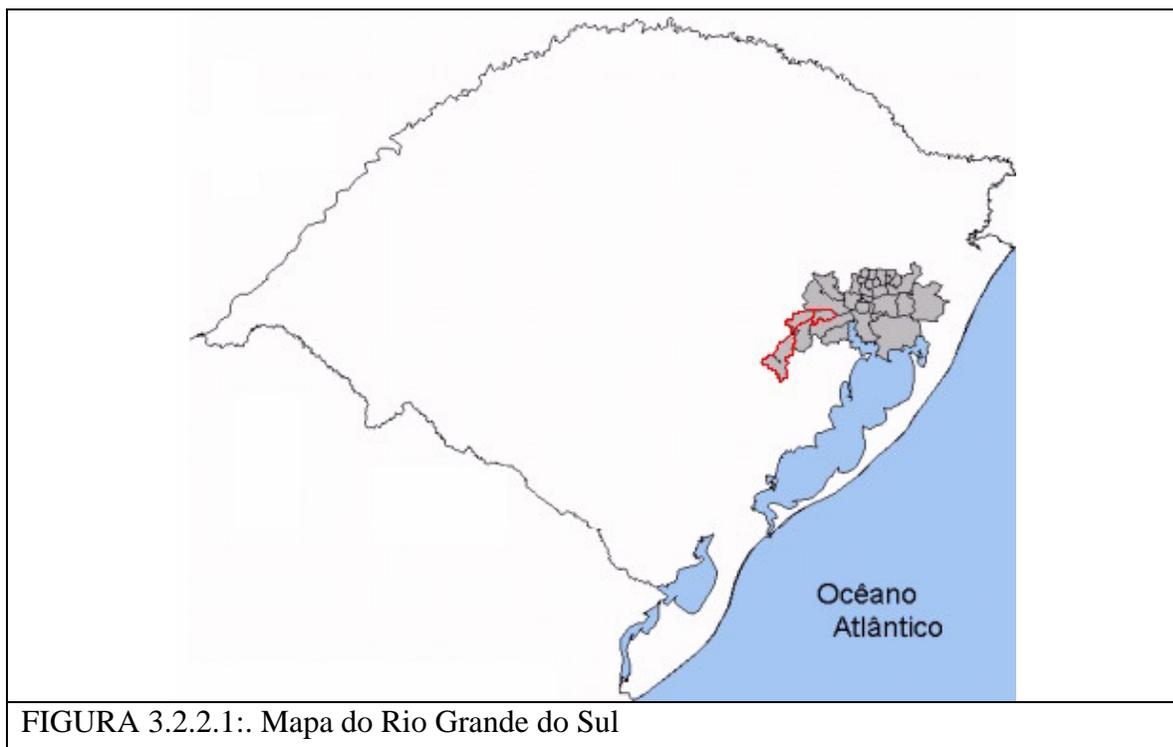


FIGURA 3.2.2.1.: Mapa do Rio Grande do Sul

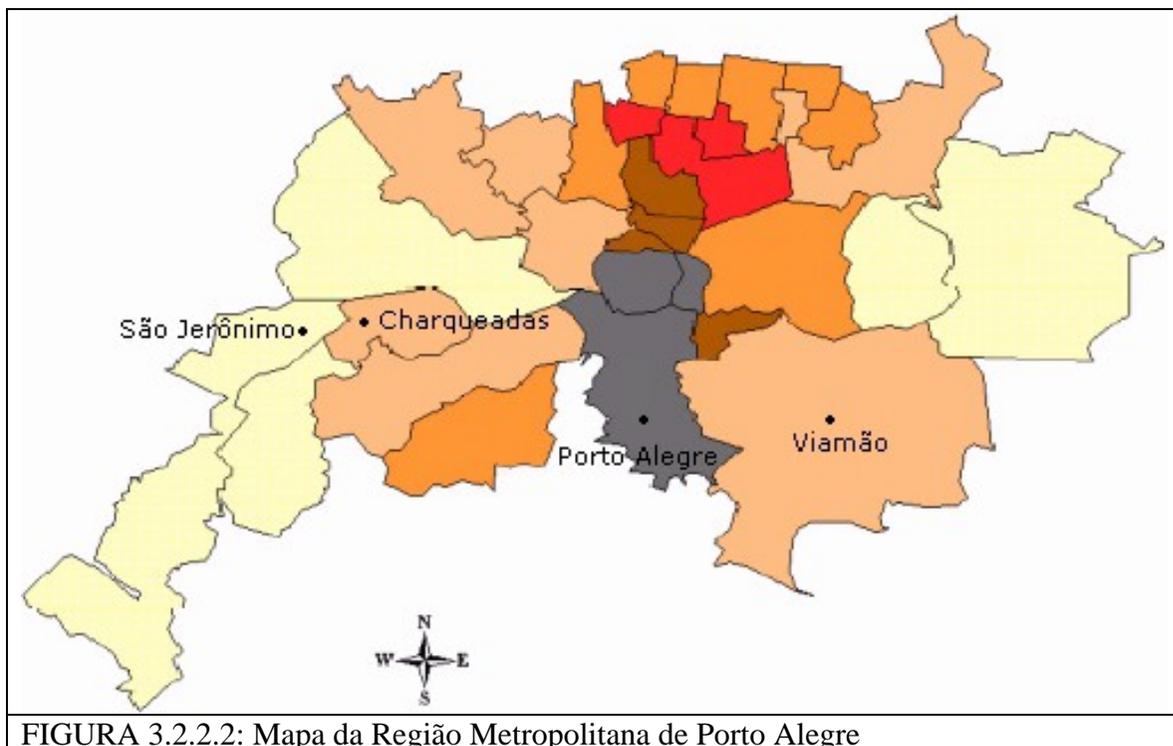


FIGURA 3.2.2.2: Mapa da Região Metropolitana de Porto Alegre

Na figura 3.2.2.3, observamos toda área de estudo, através do mosaico das imagens do sensor ASTER do satélite Terra, com uma composição colorida 2, 3N e 1 (vermelho, infravermelho próximo e o verde).

As imagens ASTER possuem 3 bandas de 15 metros de resolução (0.55 à 0.80 μm), uma banda com também 15 metros de resolução para gerar estereoscopia, 6 bandas no infravermelho próximo (1.65 à 2.4 μm) e 5 bandas no infravermelho termal (8.3 à 11.32 μm). As imagens ASTER podem ser utilizadas eficientemente em mapeamento em escala 1:50000, assim como análises espectrais refinadas se for trabalhada com as bandas do infravermelho próximo e termal.

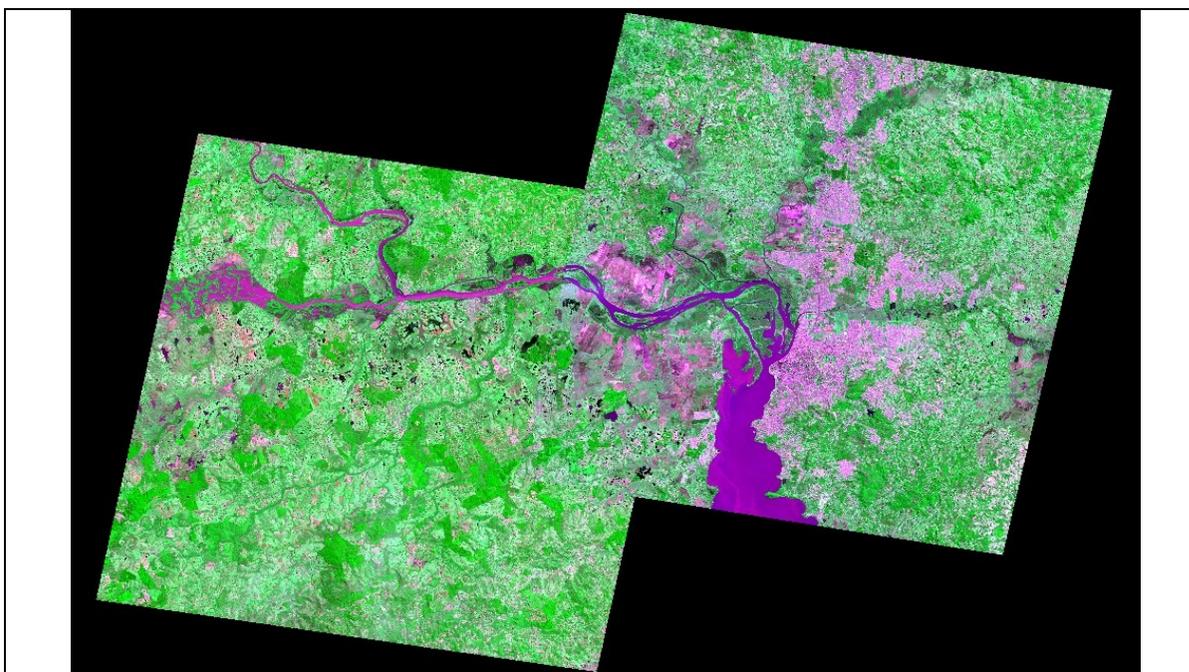


FIGURA 3.2.1.3: . Mosaico da imagens do sensor ASTER, composição 2, 3N e 1.

Nas figuras Figura 3.2.1.4 e 3.2.1.5 podemos observar com mais detalhes a região da cidade de Charqueadas e de São Jerônimo. A cor verde indica a vegetação, o rosa a área urbana e a cor magenta representa a água.



FIGURA 3.2.1.4: . Recorte da imagem ASTER, para a região de São Jerônimo.

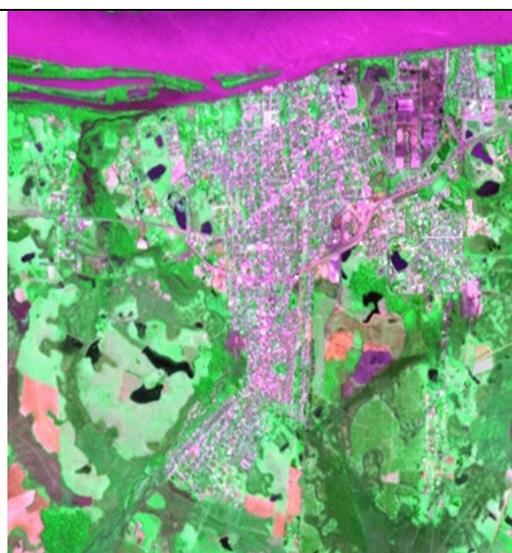


FIGURA 3.2.1.5: Recorte da imagem ASTER, para a região de Charqueadas.

CAPITULO IV - DESCRIÇÃO DO MODELO RAMS

O modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*), desenvolvido por pesquisadores da Universidade do Colorado, Estados Unidos, é um modelo numérico de múltipla finalidade, designado para simular circulações atmosféricas que vão desde a microescala até a grande escala.

O RAMS pode ser aplicado tanto para diagnóstico quanto para prognóstico do tempo, através das simulações de fenômenos atmosféricos de mesoescala.

O modelo atmosférico constitui-se a partir de equações da dinâmica e da termodinâmica que governam os movimentos atmosféricos, suplementados por parametrizações opcionais. Dentre essas parametrizações, cita-se a difusão turbulenta; radiação solar e terrestre, cobertura vegetal e superfície do mar; processos de umidade; calor sensível e latente trocados na atmosfera; cúmulos; precipitação líquida, de neve e granizo, entre outras.

O modelo pode ser inicializado através de variáveis atmosféricas homogêneas, utilizando dados de uma sondagem da atmosfera de um ponto determinado da grade, após os dados são extrapolados para o restante do domínio selecionado, ou através da inicialização de variáveis heterogêneas. Nesta opção, utilizam-se dados provenientes de outros modelos numéricos, tais como o Global ou ETA do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Clima), NCEP (*National Centers of Environmental Predictions* – Estados Unidos), entre outros.

Uma outra facilidade apresentada pelo RAMS é a possibilidade de estudar pequenos distúrbios atmosféricos juntamente com fenômenos de grande escala, como furacões, através do tratamento de grades aninhadas. Esse processo faz com que fenômenos que aparecem na grade de maior resolução possam ser “sentidos” na grade de menor resolução e vice e versa.

O RAMS contém, no seu código, várias opções e parametrizações que podem ser ativadas ou desativadas, conforme o interesse do trabalho a ser desenvolvido. O modelo foi estruturado de tal maneira que o código contém aspectos variando de hidrostático a não hidrostático, resoluções variando entre menos que um metro até centenas de quilômetros, domínios que vão de poucos quilômetros a todo um hemisfério e uma variedade de opções físicas.

As configurações de cada simulação com o RAMS são feitas através de um arquivo do tipo lista de variáveis (*namelist*), chamado RAMSIN, que é dividido em oito partes. A primeira parte (MODEL_GRIDS) está relacionada, principalmente, com a configuração das grades utilizadas em cada simulação. Nesse estágio são definidos o tamanho de cada grade e suas localizações, o número de grades, o número de pontos de grade e o espaçamento horizontal, o número de níveis verticais e de camadas de solo e o espaçamento vertical e tempo de simulação.

Na segunda parte (MODEL_FILE_INFO) são definidos o tipo de inicialização, se homogênea (através do uso de uma sondagem) ou heterogênea (através do uso de análises como as fornecidas pelo CPTEC, NCEP ou AVN), frequência de geração de arquivos de saída, os arquivos de topografia, ocupação do solo e temperatura da superfície do mar.

Na terceira parte (MODEL_INFO) são definidas as opções físicas e numéricas do modelo, tais como o tipo de condição de fronteira lateral, os parâmetros de radiação, convecção, difusão turbulenta, camada superficial e modelo de solo e microfísica.

A quarta parte (MODEL_SOUND) é destinada para a inclusão de sondagens no caso da inicialização homogênea. A quinta parte (MODEL_PRINT) está relacionada com a impressão de resultados para verificação durante a simulação.

Na sexta parte (ISAN_CONTROL) são definidos os arquivos que serão utilizados, se a inicialização for heterogênea. Para esse tipo de inicialização, é possível a inclusão de dados de superfície e sondagens para uma melhor definição da condição inicial. Na sétima

parte (ISAN_ISENTROPIC) são definidos os parâmetros utilizados na análise objetiva realizada para a inicialização do modelo. O método utilizado para essa análise será descrito posteriormente. A última parte (ISAN_GRAPH) está relacionado com a impressão dos resultados para a visualização utilizando-se do pacote gráfico *NCAR-Graphics*.

4.1. EQUAÇÕES GERAIS

O modelo utiliza algumas equações básicas, tais como; equação do movimento, equação da termodinâmica, equação da continuidade para a razão de mistura e a equação da continuidade de massa.

4.1.1. Equações do movimento

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x} - v \frac{\partial u}{\partial y} - w \frac{\partial u}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u \frac{\partial v}{\partial x} - v \frac{\partial v}{\partial y} - w \frac{\partial v}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \theta \frac{\partial \pi'}{\partial z} - \frac{g \theta'_v}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_m \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_m \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_m \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

onde:

u = componente leste-oeste do vento;

v = componente norte-sul do vento;

w = componente vertical do vento;

f = parâmetro de Coriolis;

K_m = coeficiente de viscosidade turbulenta da quantidade de movimento;

θ_v = temperatura potencial virtual;

π' = função Exner da perturbação.

4.1.2. Equação da termodinâmica

$$\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} - v \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} - w \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial \theta_{il}}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial \theta_{il}}{\partial t} \right)_{rad}$$

onde:

θ_{oil} = temperatura potencial da água líquida e do gelo;

K_h = coeficiente de viscosidade turbulenta para o calor e a umidade;

rad = subscrito denotando a tendência devido à parametrização de radiação.

4.1.3. Equação da continuidade para razão de mistura

$$\frac{\partial r_n}{\partial t} = -u \frac{\partial r_n}{\partial x} - v \frac{\partial r_n}{\partial y} - w \frac{\partial r_n}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_h \frac{\partial r_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_h \frac{\partial r_n}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial r_n}{\partial z} \right)$$

onde:

r_n = razão de mistura da quantidade total de água, chuva, cristais de gelo e neve.

4.1.4. Equação da continuidade de massa

$$\frac{\partial \pi'}{\partial t} = -\frac{R\pi_0}{c_v \rho_0 \theta_0} \left(\frac{\partial \rho_0 \theta_0 u}{\partial x} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 v}{\partial y} + \frac{\partial \rho_0 \theta_0 w}{\partial z} \right)$$

onde:

π = função Exner total;

R = constante do gás para o ar seco;
 C_v = calor específico da água líquida;
 ρ = densidade.

4.2. ESTRUTURA DA GRADE E SISTEMA DE COORDENADAS

A grade utilizada pelo RAMS é a grade padrão do tipo C de Arakawa (Messinger e Arakawa, 1976) com variáveis termodinâmicas e de umidade definidas nos mesmos pontos de grade, e as velocidades u , v , w intercaladas em $1/2\Delta X$, $1/2\Delta Y$ e $1/2\Delta Z$, respectivamente.

Na grade horizontal pode-se utilizar um sistema de coordenadas cartesianas, com espaçamento horizontal uniforme utilizado através do domínio, ou um sistema de coordenadas estereográficas polar, onde o pólo de projeção é alternado para uma área próximo ao centro do domínio, o que minimiza a distorção da projeção sobre a área de interesse. Na grade vertical, é utilizado o sistema de coordenadas σ_z (sigma-z), onde o topo do domínio do terreno é completamente plano e o nível mais baixo segue a topografia do terreno (Gal-Chen e Somerville, 1975; Clark, 1977; Tripoli e Cotton, 1982). O sistema de coordenadas é definido como:

$$x^* = x$$

$$y^* = y$$

$$z^* = H \left[\frac{(z - z_g)}{(H - z_g)} \right]$$

onde:

x^* , y^* e z^* representam as coordenadas transformadas;

x , y e z representam as coordenadas cartesianas;

H é a altura do topo da grade;

z_g é a altura da superfície local, em função de x e y .

4.3. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA LATERAL

Um dos fatores importantes ao definir uma condição de fronteira lateral é permitir que ondas de gravidade tenham passagem livre pela fronteira, assim como os fenômenos advectivos, ao mesmo tempo em que não deve ser permitida a reflexão de ondas para dentro do domínio. A forma geral utilizada no RAMS é de uma condição radiativa básica, descrita como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u + c) \frac{\partial u}{\partial x}$$

onde:

u é a componente do vento normal a fronteira;

x é a coordenada normal a fronteira;

c é a velocidade de fase.

Existem diferentes métodos para a determinação da velocidade de fase c . Os mais utilizados são os propostos por Orlanski (1976) e Klemp e Wilhelmson (1978).

Pelo esquema de Orlanski (1976) c é calculado da seguinte forma:

$$c = \frac{\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)},$$

Enquanto que pelo esquema proposto por Klemp e Wilhelmson (1978), c é definido como um valor constante de uma velocidade de fase de uma típica onda de gravidade (entre 10 a 30 m/s).

4.4. CONDIÇÕES DE FRONTEIRA VERTICAL

Para a fronteira inferior, o fluxo na camada mais próxima da superfície fornece a principal troca de informação entre a atmosfera e a superfície. Para o topo da camada há diversas opções, dependendo da preferência e do tipo de simulação. Para uma simulação não hidrostática, há duas opções para definir a componente normal da velocidade no topo do domínio. Uma é simples, assumindo $w=0$. A outra, de Klemp e Durran (1983) aplica a condição de onda de gravidade radiativa.

4.5. PARAMETRIZAÇÕES UTILIZADAS PELO MODELO

O RAMS possibilita a ativação ou desativação de algumas das parametrizações contidas no modelo, entre elas:

- Parametrização de Camada Superficial;
- Parametrização de Solo;
- Parametrização de Vegetação;
- Parametrização de Radiação;
- Parametrização de Convecção;
- Parametrização de Turbulência;
- Parametrização de Microfísica de Nuvens.

4.5.1. Parametrização de Camada Superficial

Os fluxos de calor, momento e vapor d'água na atmosfera foram computados através do esquema desenvolvido por Louis (1979). Este esquema determina os fluxos entre a superfície da terra e a atmosfera e, é usado para superfícies d'água, solo desnudo e superfícies vegetadas.

As equações para estes fluxos podem ser escritas da seguinte forma:

$$u_*^2 = a^2 u^2 F_m \left(\frac{z}{z_0}, Ri_B \right)$$

$$\theta_* = \frac{a^2}{u_* R} u \Delta \theta F_h \left(\frac{z}{z_0}, Ri_B \right)$$

$$q_* = \frac{a^2}{u_* R} u \Delta q F_h \left(\frac{z}{z_0}, Ri_B \right)$$

onde,

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

sendo:

u_* a velocidade de atrito;

θ_* a escala de temperatura;

z é a altura da superfície acima do nível mais baixo do modelo;

z_0 é o parâmetro de rugosidade;

k é a constante de Von Karman;

Ri_B é o número de Richardson Bulk, dado por:

$$Ri_B = \frac{gz\Delta\theta}{\frac{1}{2}(\overline{\theta(z)} + \overline{\theta})u^2}$$

Para uma atmosfera instável, F pode ser escrito como:

$$F = 1 - \frac{b Ri_B}{1 + c \sqrt{Ri_B}}$$

Para uma atmosfera estável, F é representado como:

$$F = \frac{1}{(1 + b' Ri_B)^2}$$

onde b e b' são valores empíricos constantes, correspondendo a 9,4 e 4,7 para F_m e F_h respectivamente.

A constante c é dada por:

$$c = C^* a^2 b \sqrt{\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

com C^* igual a 7,4 para F_m e 5,3 para F_h .

4.5.2. Parametrização de Solo

Para o solo desnudo, o RAMS utiliza um modelo de solo de camadas múltiplas, descrito por Tremback e Kessler (1985). Este modelo envolve equações prognosticas para a temperatura das superfícies do solo e da água, assumindo uma profundidade finita entre a camada de interface solo/atmosfera. A difusividade de umidade, a condutividade hídrica e o potencial de umidade são dados por:

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

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

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

onde:

D_η é a difusividade de umidade;

η é a umidade do solo expressa em termos de volume da água por volume do solo;

K_η é a condutividade hídrica;

ψ é o potencial de umidade;

K_f , ψ_f e η_f são valores para a saturação do solo;

b é uma constante, e depende da textura do solo.

A tabela a seguir apresenta os tipos de solo disponíveis no modelo RAMS.

TABELA 4.5.2.1: Tipos de solos disponíveis no RAMS

01	Areia	07	Franco argiloso siltoso
02	Franco arenoso	08	Franco siltoso
03	Areia franca	09	Argila arenosa
04	Franco siltoso	10	Argila siltosa
05	Franco	11	Argila
06	Franco argiloso arenoso	12	Turfa

4.5.3. Parametrização de Vegetação

A parametrização de vegetação utilizada pelo RAMS é uma parametrização de uma camada volumétrica, descrita por Avissar e Pielke (1989). Uma equação prognostica de temperatura foi desenvolvida para a camada de vegetação que, similar ao modelo de solo, é uma equação básica de troca de energia.

$$C_{veg} \Delta z_{veg} \frac{\partial \theta_{veg}}{\partial t} = (1 - \tau_{veg}) \alpha_{veg} R_s \downarrow + R_l \downarrow + \sigma T_g^4 - 2\sigma T_{veg}^4 + 2\rho_a C_p u_* \theta_* + \rho_a C_p u_* r_*$$

onde:

C_{veg} = calor específico volumétrico da vegetação;

Δz_g = profundidade da camada de solo;

τ_{veg} = transmissividade de onda curta através da camada de vegetação;

α_{veg} = albedo da superfície vegetada;

$R_s \downarrow$ = fluxo radiativo de onda curta na atmosfera;

$R_l \downarrow$ = fluxo radiativo de onda longa na atmosfera;

σ = constante de Stefan-Boltzman;

T_g = temperatura do solo;

T_{veg} = temperatura da vegetação;

$\rho_a c_p u^* \theta^*$ = fluxo de calor sensível na atmosfera;

$\rho_a c_p u^* r^*$ = fluxo de calor latente na atmosfera.

Na tabela abaixo estão listadas as opções de vegetação que o modelo disponibiliza.

TABELA 4.5.2. 2: Tipos de coberturas do solo disponíveis no RAMS

00	Oceano	16	Plantações irrigadas
01	Lagos, rios, riachos (água interna)	17	Pântano ou brejo
02	Superfície de gelo	18	Florestas com folhas estreitas e persistentes
03	Arvores com folhas estreitas e persistentes	19	Florestas com folhas largas e persistentes
04	Arvores com folhas estreitas e temporárias	20	Florestas com folhas estreitas e temporárias
05	Arvores com folhas largas e temporárias	21	Florestas com folhas largas e temporárias
06	Arvores com folhas largas e persistentes	22	Cobertura mista
07	Gramma curta	23	Bosque
08	Gramma alta	24	Gramma em terreno arborizado
09	Deserto	25	Arbustos em terreno fechado
10	Semideserto	26	Arbustos em terreno aberto
11	Tundra	27	Terreno gramado
12	Arbustos persistentes	28	Terreno colheita
13	Arbustos temporários	29	Solo descoberto
14	Bosque misto	30	Área urbana
15	Área de agricultura/colheita		

4.5.4. Parametrização de Radiação

O RAMS possui duas opções de parametrização de radiação, sendo que ambas são válidas tanto para ondas curtas quanto para ondas longas. A primeira opção, proposta por Mahrer e Pielke (1977), é a mais simples e a que exige menor capacidade computacional. Isto se deve ao fato dela ignorar a presença de líquido e gelo na atmosfera, embora leve em conta a presença de vapor d'água. A segunda opção, proposta por Chen e Cotton (1983), considera os efeitos de condensação na atmosfera. Esta parametrização permite o tratamento dos efeitos de espalhamento, absorção molecular do ar, a absorção pelo ozônio e a transmissão e reflexão por camadas de nuvens, que são processos importantes para a transferência de radiação de onda curta.

4.5.5. Parametrização de Convecção

A parametrização de convecção é um dos problemas mais complexos quando se trabalha em mesoescala, escala sinótica ou em escala global. Esta parametrização é utilizada para redistribuir calor e umidade verticalmente em uma coluna de grade quando o modelo gera uma região superadiabática ou convectivamente instável e quando a resolução da grade horizontal é muito grande para que o modelo possa desenvolver sua própria circulação convectiva.

A parametrização de convecção utilizada no RAMS é uma versão modificada da parametrização do tipo Kuo (1974) e Molinari (1985), desenvolvida por Tremback (1990).

4.5.6. Parametrização de Turbulência

O RAMS possui quatro opções de parametrização de turbulência. A primeira é a deformação vertical/horizontal, de Mellor-Yamada, que calcula os coeficientes de difusão horizontal através do produto da taxa de deformação horizontal e o quadrado de uma escala de comprimento, baseada na formulação de Smagorinsky. A parametrização da difusão vertical de acordo com o esquema de Mellor e Yamada, que utiliza um prognóstico de energia cinética turbulenta.

A segunda é a deformação horizontal e vertical diferenciada que utiliza o mesmo esquema de Smagorinsky para a difusão horizontal, enquanto que para a difusão vertical é calculada da forma análoga ao esquema de Smagorinsky para uma dimensão, no qual a deformação vertical é obtida de gradientes verticais do vento horizontal (cisalhamento vertical), e a escala de comprimento é o espaçamento vertical local multiplicado pelo parâmetro CSZ, que é um coeficiente para o cálculo da difusão vertical que depende das dimensões da grade utilizada (geralmente setado em 0,35).

A terceira é a deformação vertical e horizontal isotrópicas, na qual os coeficientes de difusão vertical e horizontal são computados como um produto entre o tensor de cisalhamento em três dimensões e o quadrado da escala de comprimento. A escala de comprimento é o produto do espaçamento vertical e o parâmetro CSZ.

A quarta opção é a parametrização de difusão vertical e horizontal de acordo com o esquema de Deardorff, que utiliza um prognóstico da energia cinética turbulenta para grades pequenas (geralmente menores do que algumas centenas de metros). Tanto no esquema de Deardorff quanto no de Mellor e Yamada, o prognóstico de energia cinética é gerado pelos processos de cisalhamento e empuxo e um termo trabalho-pressão parametrizado. Esta energia é destruída por estes processos, e também por um termo de dissipação. A energia cinética turbulenta é também advectada e difundida. Os resultados destes processos geram um campo de energia cinética turbulenta no qual os coeficientes de difusão são localmente diagnosticados.

4.5.7. Parametrização de Microfísica de Nuvens

A parametrização de microfísica de nuvens é essencialmente aplicada a qualquer forma em que a água possa estar presente tanto na forma líquida como na forma sólida (gelo) e gasosa (vapor). Nesta parametrização também estão inclusos os processos de precipitação. São considerados a água da chuva, neve e granizo. O diâmetro médio dessas espécies é especificado a partir de valores definidos no código de entrada do modelo.

Os termos que explicam os processos microfísicos presentes na atmosfera encontram-se na equação da termodinâmica a seguir.

$$\frac{\partial(\overline{\theta_{il}})}{\partial t} = ADV(\overline{\theta_{il}}) + TURB(\theta_{il}) - \left(\frac{\theta_{il}^2}{\theta}\right) \left\{ \frac{[LlvPRr + Liv(PRI + PRg)]}{CpMAX(T, 253)} \right\} + \frac{Q}{Cp}$$

Da equação acima são prognosticadas a temperatura potencial da água líquida e gelo (θ_{il}) e a razão de mistura do vapor d'água, assim como as diversas espécies de hidrômetros; essas variáveis são conservativas para todas as mudanças de fase da água. O termo PR_r representa a tendência de precipitação e índices r, i e g indicam em qual fase da água esta ocorrendo a transformação. Os termos L_{lv} e L_{iv} representam calor latente de vaporização e de sublimação respectivamente, e c_p é o calor específico a pressão constante. O termo diabático $\frac{Q}{C_p}$ representa a única forçante externa do modelo.

Os termos da equação da termodinâmica explicam as modificações de energia procedentes das mudanças de fase e, portanto, as modificações de massa para os conteúdos de vapor, água líquida e gelo.

CAPITULO V – MATERIAL E MÉTODOS

Para desenvolver este trabalho foi utilizado o modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) com o intuito de estudar a dispersão dos poluentes nas Usinas termoeletricas de Charqueadas e São Jerônimo e descrever as condições meteorológicas atuantes na área de estudo.

Para este trabalho foi acoplada ao modelo uma subrotina de dispersão, que já havia sido desenvolvida por (Alves, 2000; Freitas, 2003) contendo as equações para o cálculo das concentrações dos poluentes, localização e características de cada uma das fontes tais como: altura da chaminé e taxas de emissões dos óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado.

A subrotina do modelo RAMS resolve a seguinte equação para qualquer espécie química C :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \right)_{adv}}_{(a)} + \underbrace{\left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} \right)_{urb}}_{(b)} + \underbrace{Q_{[C]}}_{(c)} \quad (5.1)$$

O termo (a) da equação 5.1 está associado a advecção na grande escala, dada por:

$$\left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}\right)_{adv} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_0 \overline{u_i C}) + \frac{\bar{C}}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_0 \overline{u_i})$$

onde:

ρ_0 = densidade do ar no estado básico

O termo (b) da equação 5.1 está associado ao transporte turbulento na camada limite planetária.

$$\left(\frac{\partial \bar{C}}{\partial t}\right)_{turb} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial (\overline{\rho_0 u_i' C'})}{\partial x_i}$$

onde:

ρ_0 = densidade do ar no estado básico

$\overline{u_i' C'}$ = o fluxo turbulento transportando o escalar C através do momento u_i .

O termo (c) da equação 5.1 indica o termo fonte inserido no modelo. Este termo é dado pela equação (5.2) que é a equação utilizada para o cálculo da concentração de poluentes através do modelo RAMS:

$$Q_{[n]} = \frac{Q_0 * 1e^{-3}}{V \rho_0} \quad (5.2)$$

Onde:

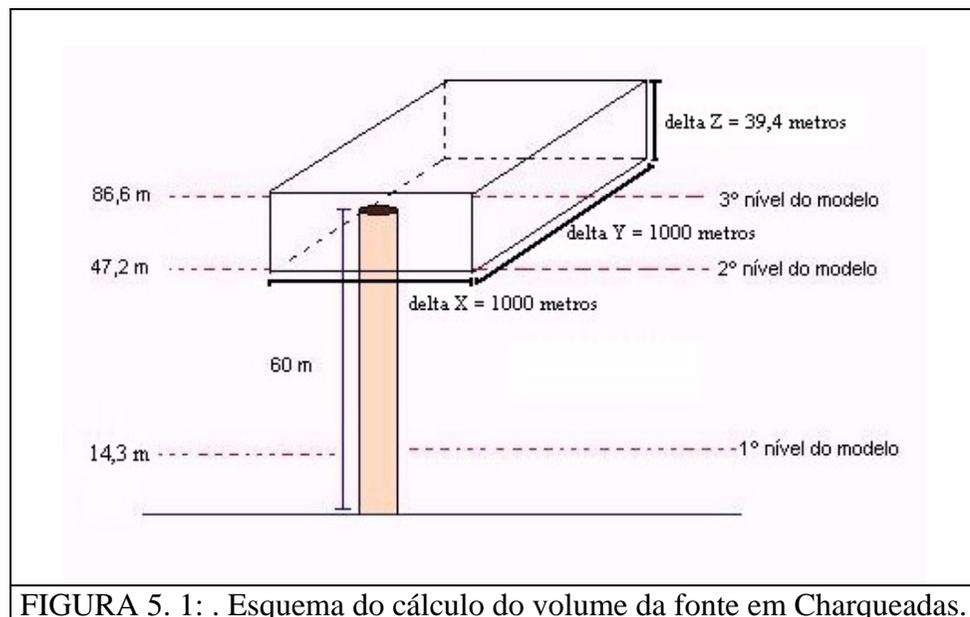
$Q_{[n]}$ = termo fonte inserido no modelo

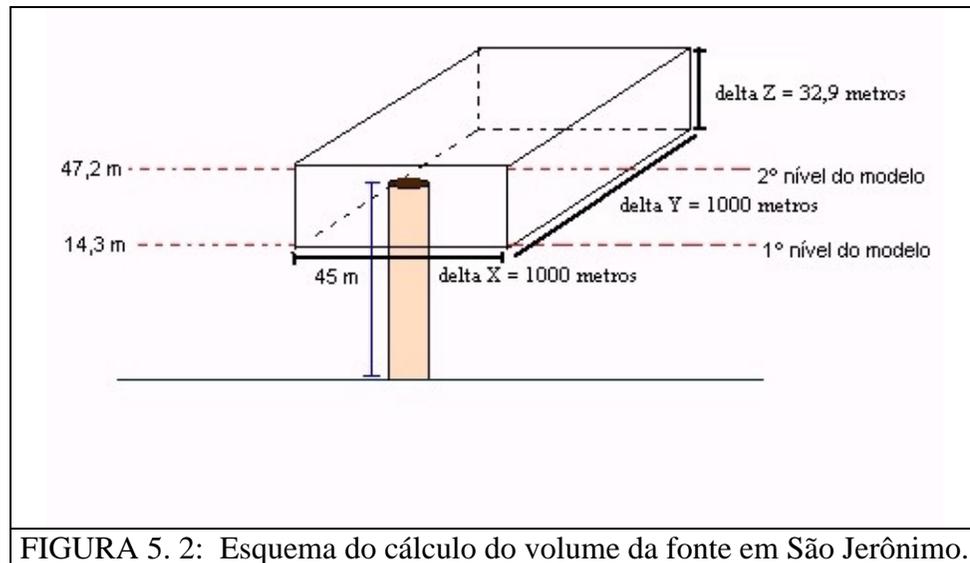
Q_0 = taxa de emissão

V = volume, calculado na altura da fonte onde $V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$.

ρ = densidade

O volume é calculado na altura da fonte, onde $V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ (5.2). Na figura 5.1 e 5.2 temos um esquema de como é calculada a concentração através do modelo para as fontes de Charqueadas e São Jerônimo respectivamente. Na figura 5.1, a linha pontilhada inferior indica o primeiro nível do modelo, este nível está em 14,3 metros, já a altura da chaminé está localizada entre o segundo e o terceiro nível do modelo, na figura 5.2 que representa a chaminé de São Jerônimo, mostra que a fonte se localiza entre o primeiro (14,3 metros) e o segundo nível (47,2 metros) do modelo. A caixa ao redor do topo da chaminé indica como é calculado o volume, para ser aplicado na fórmula (5.2) da concentração dos poluentes, a partir de todas essas informações. O ΔZ é calculado a partir da diferença entre os níveis, no caso de Charqueadas o ΔZ é de 39,4 metros e São Jerônimo é de 32,9 metros. O ΔX e o ΔY é referente a resolução espacial da grade menor para as duas fontes a resolução é de 1000 metros.





A distância entre as duas fontes de emissão é de 11 km. Espera-se obter uma descrição detalhada da dispersão dos poluentes e dos máximos valores das concentrações ao nível do solo, dos diferentes contaminantes em estudo, oriundos das emissões das usinas termoeletricas. Para o desenvolvimento dessa etapa serão realizadas simulações considerando um período de inverno para seis dias consecutivos, compreendidos entre os dias 17 e 23 de junho de 2003, nos quais houve a passagem de um sistema frontal, desta forma a avaliação da dispersão dos poluentes será feita em condições pré-frontal, frontal e pós-frontal.

A rede de monitoramento de qualidade do ar existente consiste de três estações distribuídas ao redor da usina termoeletrica de Charqueadas, mas foram repassados dados de concentração somente de uma das estações, localizada nas coordenadas 29.95° S e 51.63° W. Em relação à usina termoeletrica de São Jerônimo, a mesma não possui monitoramento da qualidade do ar.

Os dados referentes às usinas termoeletricas, inclusive as taxas de emissões de cada uma delas, foram obtidos, a partir dos relatórios de licenciamento da FEPAM. Observou-se que apesar da queima do carvão nas duas usinas termoeletricas serem feitas, de maneiras diferentes, os dados estão muito similares.

Na tabela 5.1, estão descritos os dados referentes às Usinas termoeletricas, tais como; altura da fonte de emissão (m), diâmetro interno da fonte (m), velocidade de saída dos gases (m/s), temperatura de saída dos gases (°K), valores das taxas de emissões (g/s).

Tabela 5. 1. Dados das fontes das Usinas termoeletricas de Charqueadas e São Jerônimo.

	<i>DADOS DA FONTE</i>				<i>TAXA DE EMISSÃO</i>		
	Altura (m)	Diâmetro (m)	Velocidade Saída (m/s)	Temperatura de Saída (K)	SO₂ (g/s)	MP (g/ s)	NO_x (g/s)
<i>Charqueadas</i>	60	1,9	12,8	442,55	269,45	31,86	37,28
<i>São Jerônimo</i>	45	2,8	11,5	495	227,48	55,5	6,86

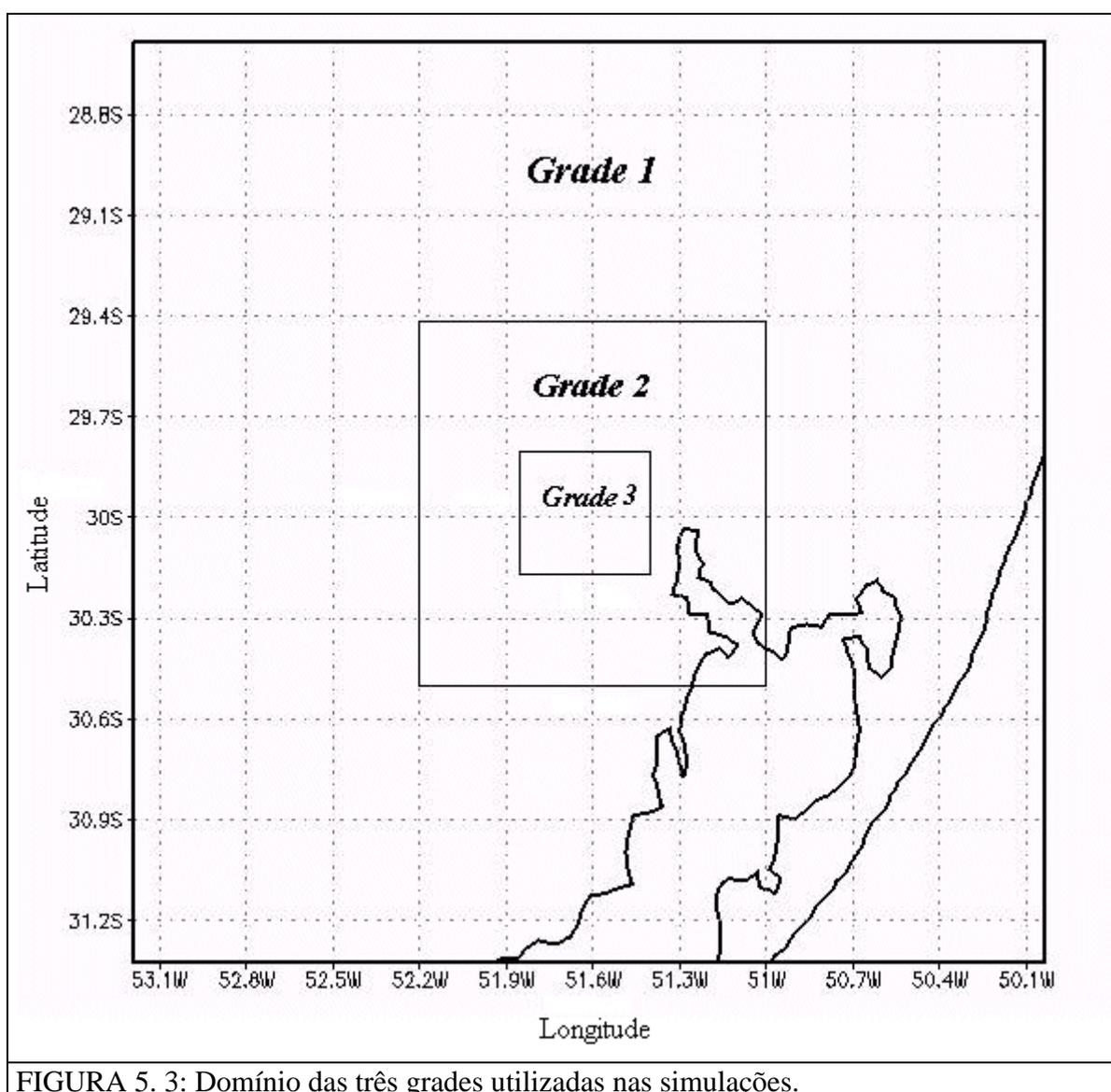
As simulações foram realizadas no cluster do Grupo de Estudos em Previsão Regional Atmosférica (GEPRA) localizado na Fundação Universidade Federal do Rio Grande (FURG). O GEPRA possui 32 nodos com processador Athlon XP de 1.5 Ghz, 512 MB de RAM, Interface de Fast-Ethernet com ROM de boot, uma máquina administradora. Neste cluster, tanto os nodos quanto à administradora rodam Debian GNU Linux e a comunicação se dá através de uma interface MPI (Message Passing Interface) rodando sobre o protocolo TCP/IP.

Para inicializar o modelo RAMS versão 4.3, foram utilizadas as análises do modelo global do Centro de Previsão de Tempo e Clima do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), com resolução de 1,875° na horizontal, em um intervalo de doze horas, para a inicialização heterogênea.

Foram utilizadas três grades aninhadas com um espaçamento de grade horizontal de 16, 4 e 1 km para as grades 1, 2 e 3, respectivamente. O numero de pontos utilizados nas três grades em x e y foi de 20 pontos na primeira grade, 34 pontos na segunda grade e 38 pontos na terceira grade. Os tamanhos da área das grades 1, 2 e 3 são respectivamente de 102.400 Km², 18.496 Km² e 1.444 Km².

O domínio das três grades utilizadas é apresentado na Figura 5.3. Na vertical, foram utilizados 30 níveis em coordenadas sigma, com um espaçamento inicial de 30 m próximo à superfície e uma amplificação por um fator de 1,2 até a altura de 1000 m.

Utilizou-se neste trabalho a temperatura da superfície do mar (TSM) climatológica, topografia do modelo, com resolução de 10 km para a grade 1 e 2, e de 1 Km para a grade 3, solo homogêneo (franco argiloso arenoso) e vegetação do tipo grama curta. Foram utilizadas 7 camadas de solo, com grau de saturação compreendido entre 0,38 a 0,50.



A tabela 5.2 mostra algumas parametrizações utilizadas para a inicialização do modelo RAMS.

Tabela 5. 2: Parametrizações utilizadas na simulação com o RAMS

Tipo de inicialização	Heterogênea
Coordenadas horizontais	Estereográfica polar tangente ao plano
<i>Condições de fronteira</i>	Klemp/Wilhelmson
<i>Parametrização de radiação</i>	Chen
<i>Frequência de atualização na tendência de radiação</i>	1800 segundos
<i>Parametrização de Convecção</i>	Ativada para a grade 3
<i>Parametrização de Turbulência</i>	Vertical/Horizontal de Mellor-Yamada
<i>Parametrização de Microfísica</i>	Diagnostica concentrada

As análises das condições sinóticas foram realizadas a partir das imagens do satélite GOES – 8 no canal Infravermelho, juntamente com os campos de vento e pressão atmosférica ao nível médio do mar, obtidas através do laboratório MASTER/IAG/USP, e através dos campos meteorológicos que foram plotados no GRADS (*Grid Analysis and Display System*) a partir da saída do modelo RAMS tais como: campos de vento, pressão atmosférica ao nível médio do mar, altura da camada limite, temperatura do ar, umidade relativa, energia cinética turbulenta, cobertura de nuvens e precipitação.

CAPITULO VI – RESULTADOS

Neste capítulo encontram-se os resultados obtidos com o desenvolvimento do trabalho, inicialmente está apresentada uma análise sinótica de todo o período estudado, seguido de uma discussão sobre sua relação com a dispersão de poluentes, tal discussão é baseada nos resultados obtidos com a modelagem numérica utilizando a subrotina de dispersão de poluentes do modelo RAMS.

6.1 DESCRIÇÃO DAS IMAGENS DE SATÉLITE

O período de estudo está compreendido entre os dias 17 e 23 de junho de 2003. Este período foi escolhido por representar um período de inverno, e o período de inverno é o período em que os níveis de concentração são mais elevados, devido principalmente à grande influência dos sistemas frontais, que têm como consequência uma camada de inversão com altitude cada vez menor. A inversão térmica é uma condição meteorológica que ocorre quando uma camada de ar quente se sobrepõe a uma camada de ar frio, impedindo o movimento ascendente do ar, uma vez que o ar abaixo dessa camada fica mais frio, portanto, mais pesado, fazendo com que os poluentes se mantenham próximos da superfície. A inversão ocorre durante todo o ano, sendo que no inverno elas são mais baixas, principalmente no período noturno. Em áreas industrializadas, a inversão térmica

pode levar a altas concentrações de poluentes, podendo ocasionar problemas de saúde a população afetada.

A análise da situação sinótica é realizada a partir de imagens do satélite GOES-8 no canal infravermelho, juntamente com os as análises do modelo do CPTEC, cedidas pelo Laboratório MASTER/IAG da USP. Na descrição dos resultados, todos os horários citados serão UTC (Universal Time Coordinate).

Na imagem de satélite do dia 18/06 às 18:00UTC (figura 6.1.1) observa-se uma área de instabilidade sobre o Estado do Rio Grande do Sul, alimentada por um sistema de alta pressão intenso de 1020 hectopascal (hPa), localizado no Oceano Atlântico, o qual contribui para intensificação através do transporte de umidade. Na imagem do dia 19/06 às 00:00UTC (figura 6.2.2) formou-se um sistema de baixa pressão sobre o Estado do Rio Grande do Sul e o sistema de alta pressão localizado sobre o Oceano, continua bastante intenso, com pressões da ordem de 1022 hPa. Na imagem do dia 19/06 às 18:00 UTC (figura 6.1.3), o sistema encontra-se dissipado e no dia 20/06 às 00:00UTC (figura 6.1.4), observamos um centro de alta pressão sobre o Estado do Rio Grande do Sul, causando a subsidência do ar e impedindo a formação de nuvens na região.

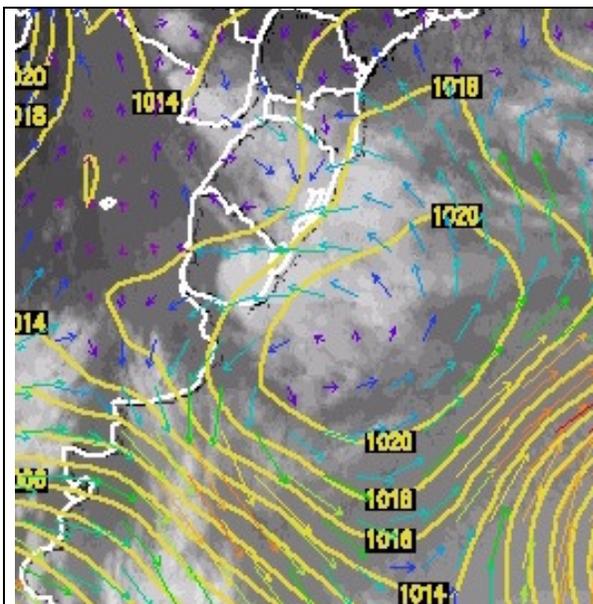


FIGURA 6.1.1: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 18/06 às 18:00 UTC.

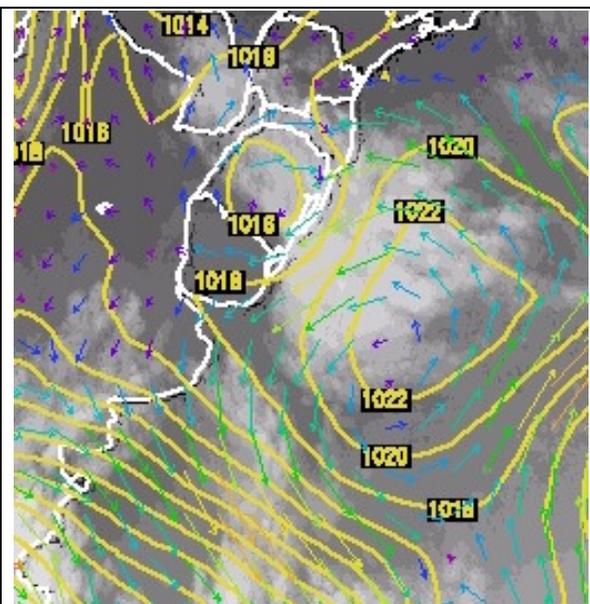
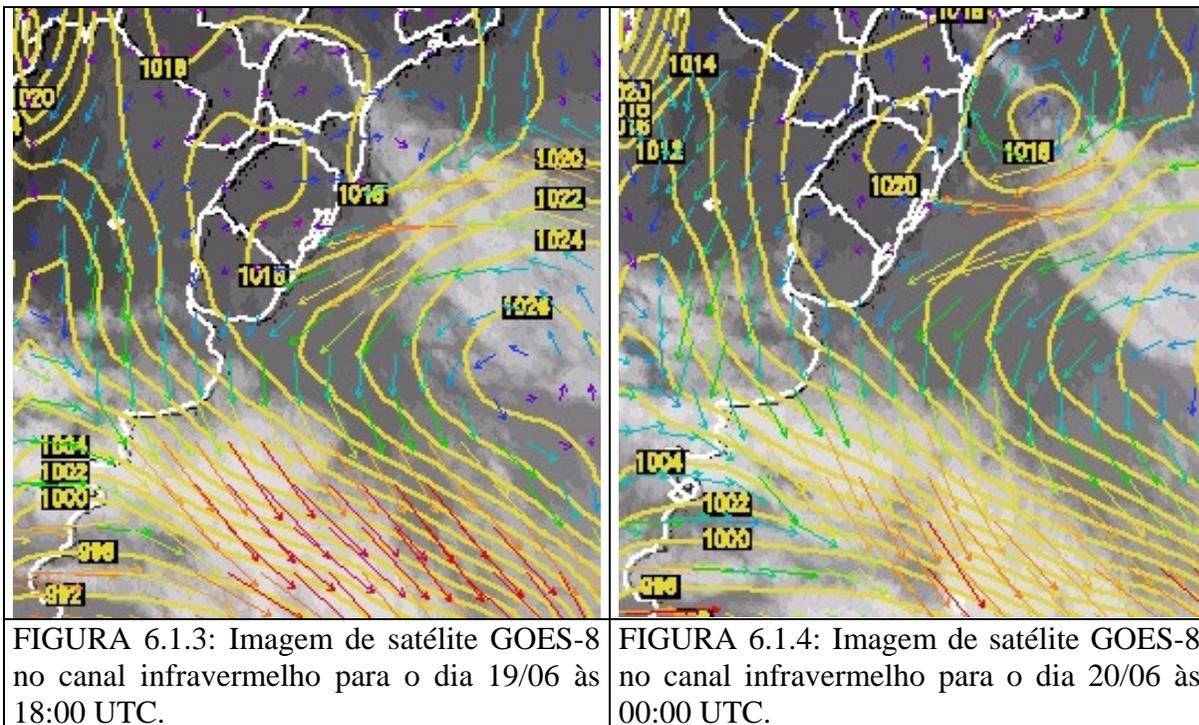


FIGURA 6.1.2: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 19/06 às 00:00 UTC.



Na imagem do dia 21/06 às 00:00UTC (figura 6.1.5) observamos uma frente fria localizada sobre a Argentina e parte do Uruguai, avançando em direção ao Estado do Rio Grande do Sul, no horário das 06:00 UTC (figura 6.1.6) a frente fria atinge parte do Rio Grande do Sul e às 18:00UTC (figura 6.1.7) localiza-se na metade nordeste do Estado, incluindo a Região Metropolitana de Porto Alegre. Na imagem do dia 22/06 às 06:00 (figura 6.1.8) a frente fria já passou pelo Estado do Rio Grande do Sul e o sistema de alta pressão atua em toda a região de estudo.

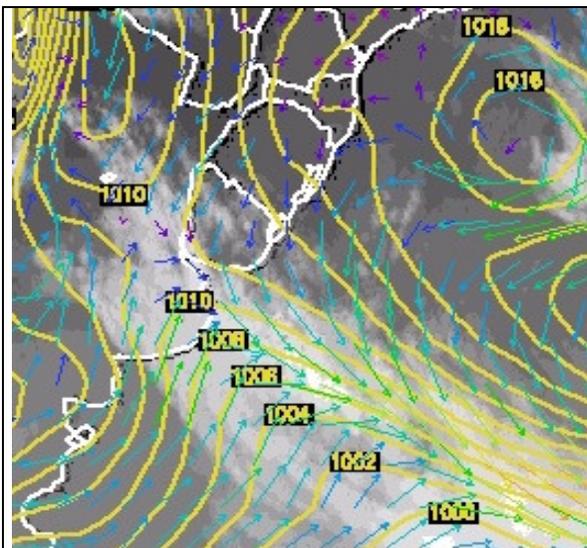


FIGURA 6.1.5: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 21/06 às 00:00 UTC.

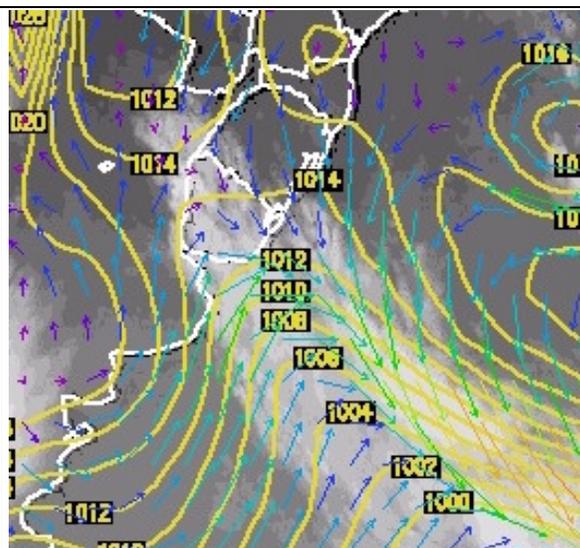


FIGURA 6.1.6: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 21/06 às 06:00 UTC.

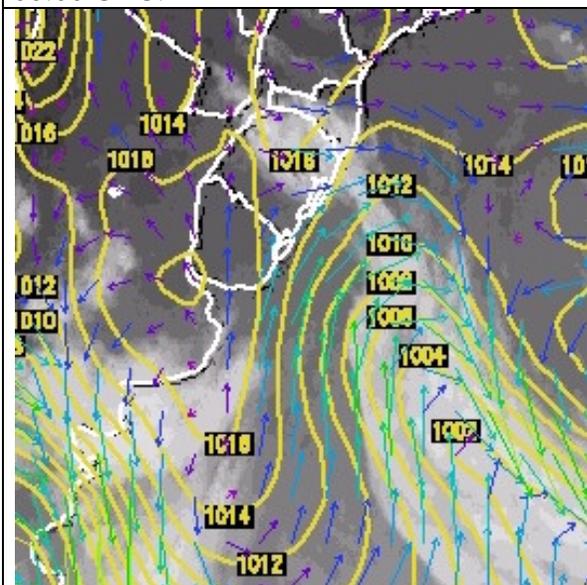


FIGURA 6.1.7: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 21/06 às 18:00 UTC.

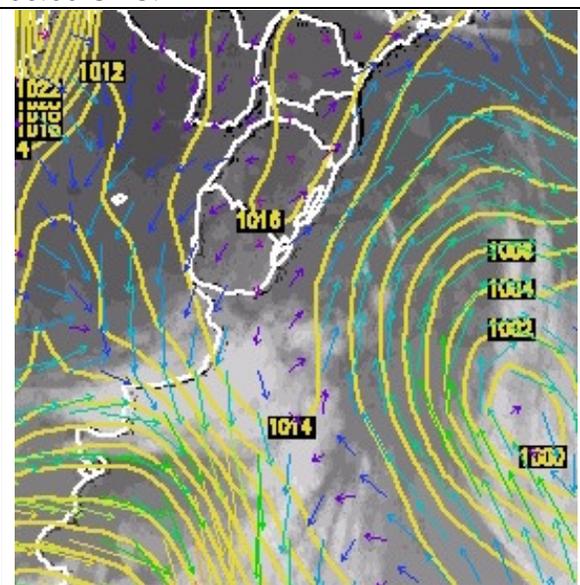


FIGURA 6.1.8: Imagem de satélite GOES-8 no canal infravermelho para o dia 22/06 às 06:00 UTC.

6.2 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM ATMOSFÉRICA

Com o objetivo de avaliar as condições meteorológicas e sua relação com a dispersão de poluentes, foi utilizado o modelo numérico RAMS, com uma subrotina de dispersão acoplada ao mesmo. A subrotina contém informações sobre o dióxido de enxofre,

material particulado e os óxidos de nitrogênio emitidos pelas usinas termoeletricas de Charqueadas e São Jerônimo.

Na simulação numérica foram aninhadas três grades, sendo a primeira grade com resolução de 16 quilômetros, a segunda com a resolução de 4 quilômetros e a terceira com a resolução de 1 quilômetro. A primeira grade com uma área de 102.400 km², foi utilizada para obter a descrição sinótica da área em estudo. A segunda grade com 18.496 km², abrange a região das termoeletricas e áreas adjacentes. Esta foi utilizada, basicamente, para obter a interface entre a primeira e a terceira grade, com o propósito de obter a menor grade com uma resolução de 1km, cobrindo uma área de 1.444 km² a qual foi utilizada para análise da dispersão de poluentes. O procedimento de aninhamento possibilita que os processos ocorridos na grade de maior resolução possam ser sentidos na grade de menor resolução e vice-versa, ou seja, as informações contidas na grade 3 podem ser sentidas nas grades 1 e 2, possibilitando então realizar um estudo do transporte de poluentes a longas distâncias.

As três grades foram centradas nas coordenadas de 29.96S e 51.61W (localização da usina termoeletrica de Charqueadas), o tempo total de simulação foi de 144 horas contínuas com saídas a cada hora. O modelo foi inicializado com os dados do modelo global do CPTEC que contém as seguintes meteorológicas: componentes do vento u e v, altura geopotencial, temperatura do ar, umidade relativa e pressão ao nível médio do mar.

As figuras 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, ilustram a topografia assimilada pelo modelo nas grades 1, 2 e 3 respectivamente. Na figura 6.2.1. o campo de topografia da grade 1 com resolução de 16 quilômetros, permite identificar uma elevação bem acentuada, da ordem de 1100 metros na região da Serra Gaúcha, na Região Metropolitana de Porto Alegre as elevações estão abaixo de 100 metros. No campo de topografia da grade 2 (figura 6.2.2) com resolução de 4 quilômetros é possível verificar um máximo valor de altitude da ordem de 600 metros, próximo a Serra Gaúcha, já no campo de topografia da terceira grade (figura 6.2.3) observa-se uma topografia mais detalhada na região da área de estudo, Charqueadas e São Jerônimo, onde suas elevações são da ordem de 20 e 30 metros respectivamente, nesta área ocorrem valores máximos de elevações de aproximadamente 140 metros nas coordenadas de 30.05S e 51.67W.

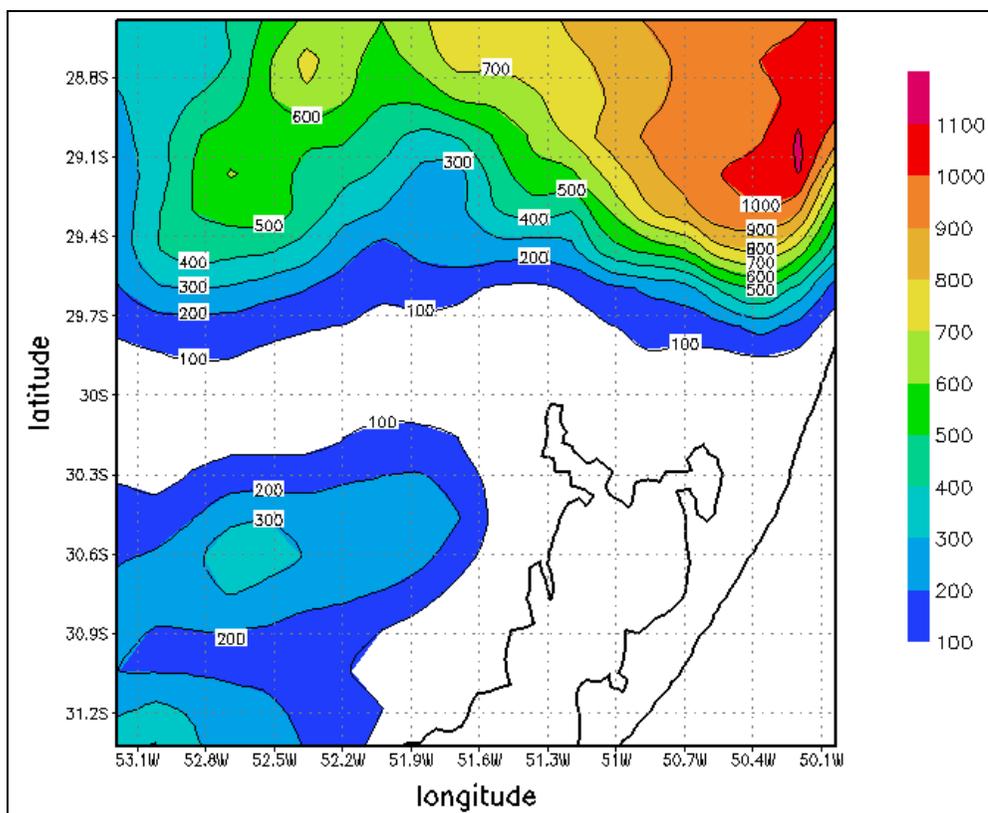


FIGURA 6.2.1: Topografia assimilada pelo modelo – Grade 1

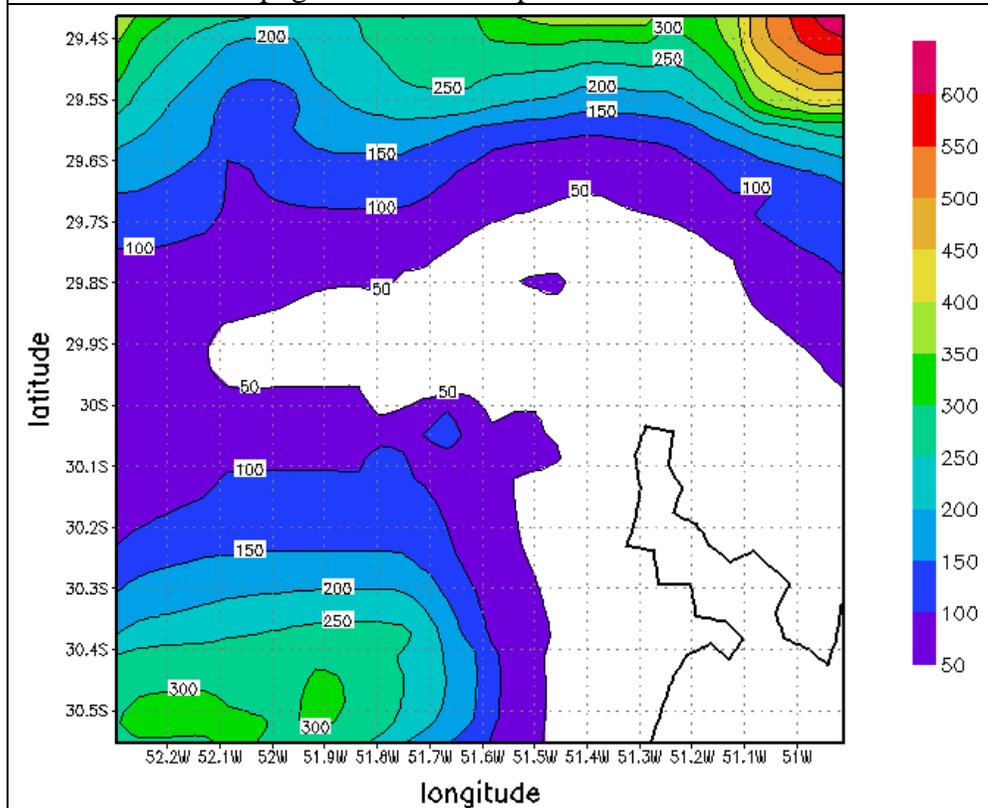


FIGURA 6.2.2: Topografia assimilada pelo modelo – Grade 2

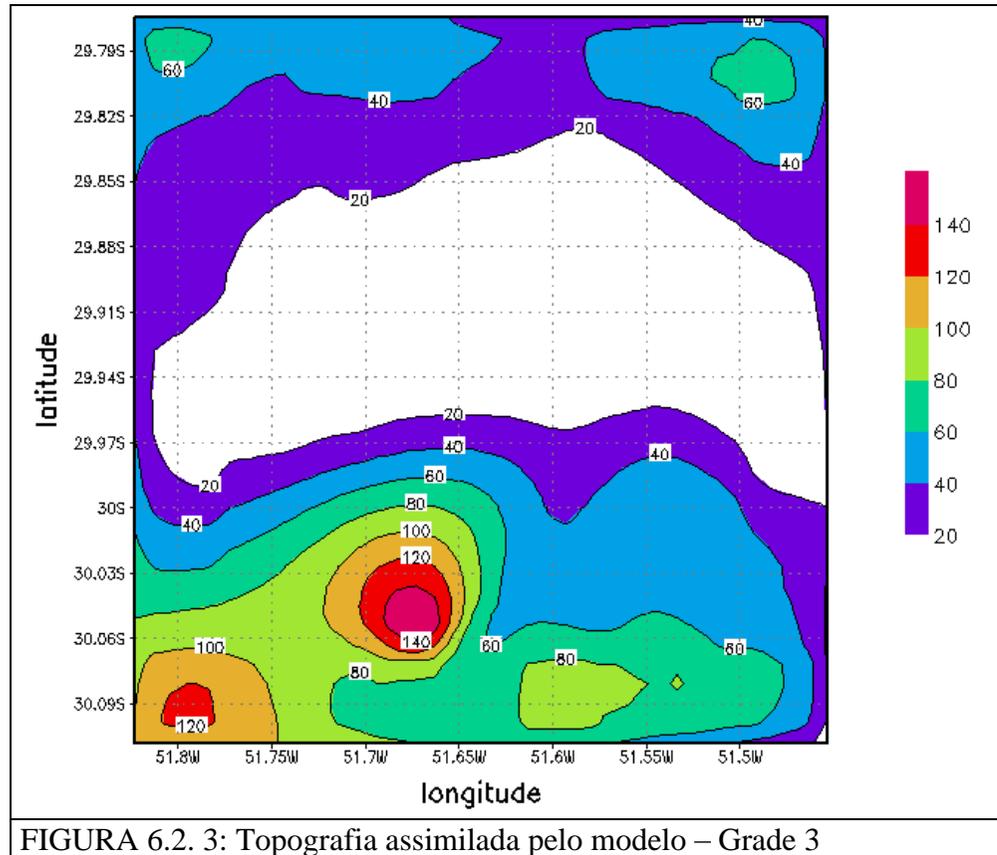


FIGURA 6.2. 3: Topografia assimilada pelo modelo – Grade 3

As figuras 6.2.4 e 6.2.5 apresentam cortes longitudinais da grade 3, onde na primeira figura a latitude está fixa na cidade de Charqueadas e a segunda na cidade de São Jerônimo. Observa-se nas figuras a seguir que Charqueadas localiza-se no ponto onde a elevação esta da ordem de 20 metros e São Jerônimo da ordem de 32 metros, enquanto o pico mais alto na figura 6.2.5 encontra-se em 51.67W com 55 metros e na figura 6.2.4 o ponto mais alto encontra-se 51.85W com 40 metros.

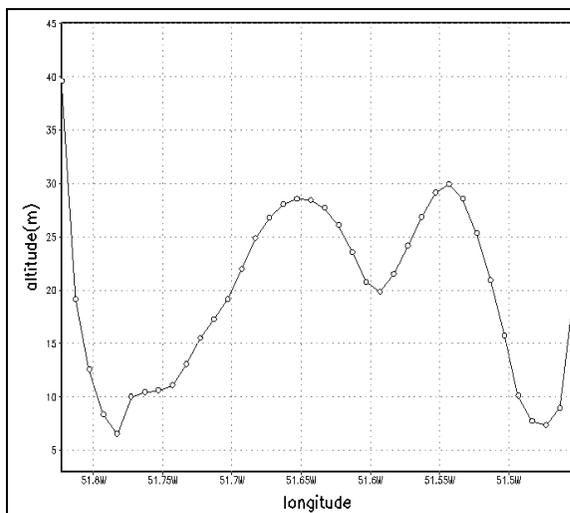


FIGURA 6.2.4: Corte longitudinal da topografia para a latitude de Charqueadas.

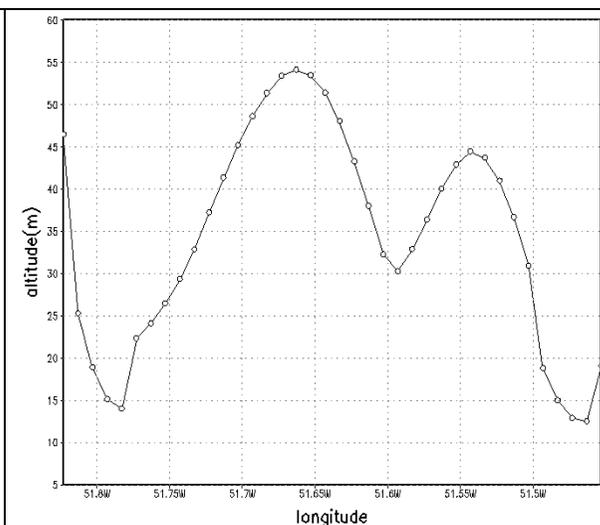


FIGURA 6.2.5: Corte longitudinal da topografia para a latitude de São Jerônimo.

6.2.1. DESCRIÇÃO DOS CAMPOS METEOROLÓGICOS

A camada limite planetária (CLP) é a parte mais baixa da atmosfera. Normalmente, em um período de 24 horas, a CLP pode ser classificada como: camada limite convectiva, camada limite neutra e a camada limite estável.

A evolução da camada limite ao longo do dia é caracterizada para cada cidade em função das condições meteorológicas e orográficas. Esta cinética da camada limite, possui uma variante marcante com relação às estações do ano. No verão pela manhã, com o rápido aquecimento do solo, a evolução da camada limite convectiva ocorre rapidamente e, ao final da tarde, com o esfriamento lento, inicia a evolução da camada limite estável. No inverno, o processo se inverte: a camada evolui lentamente pela manhã, devido ao lento aquecimento da superfície do solo e se dissipa rapidamente a tarde dando lugar à camada limite estável.

Na figura 6.2.1.1 observa-se o comportamento da altura da camada limite durante todo o período de estudo. Em geral, a altura da camada na região de estudo é da ordem de 700 metros, com exceção do dia 19/06 que apresenta um valor da ordem de 1300 metros, resultante do movimento vertical ascendente ser mais intenso entre os horários das 09:00 UTC e 15:00 UTC, conforme pode ser verificado pela figura 6.2.1.2, intensificando o desenvolvimento de nuvens conforme ilustra a figura 6.2.1.3, com uma maior turbulência

entre os níveis de 950 hPa e 850 hPa correspondentes às alturas de 500 e 1600 metros respectivamente (figura 6.2.1.4), o que influenciou diretamente na altura da camada limite mascarando sua evolução durante o período das 06:00 UTC e 15:00 UTC do dia 19/06.

A CLP limita a dispersão dos poluentes lançados na atmosfera e influencia diretamente no comportamento da pluma. Quando a CLP é baixa e persiste por vários dias, resulta em uma estagnação atmosférica, e conseqüentemente, em altas concentrações superficiais. Quando ocorre a estagnação de sistemas de alta pressão, geralmente os ventos fracos e o céu claro contribuem para a formação da inversão de temperatura durante a noite e, apesar do aquecimento durante o dia, a altura da camada é limitada devido aos movimentos subsidentes do sistema de alta pressão.

A figura 6.2.1.5 ilustra a variação temporal da pressão atmosférica ao nível médio do mar para todo o período de estudo. Através da mesma, observamos que no dia 18/06 ocorre uma queda da pressão de 2 hPa em decorrência da presença de uma área de instabilidade. Entretanto, no dia 19/06 a pressão começa a aumentar e chega a 1021 hPa.

No dia 21/06 com a passagem de um sistema frontal sobre a área de interesse, a pressão chega a 1017 hPa, causando uma queda na temperatura (figura 6.2.1.6) de 10°C e um aumento na umidade relativa (figura 6.2.1.7) que chega a 100%. Este foi o dia em que a velocidade do vento (figura 6.2.1.8) apresentou uma maior intensidade durante todo o período de estudo.

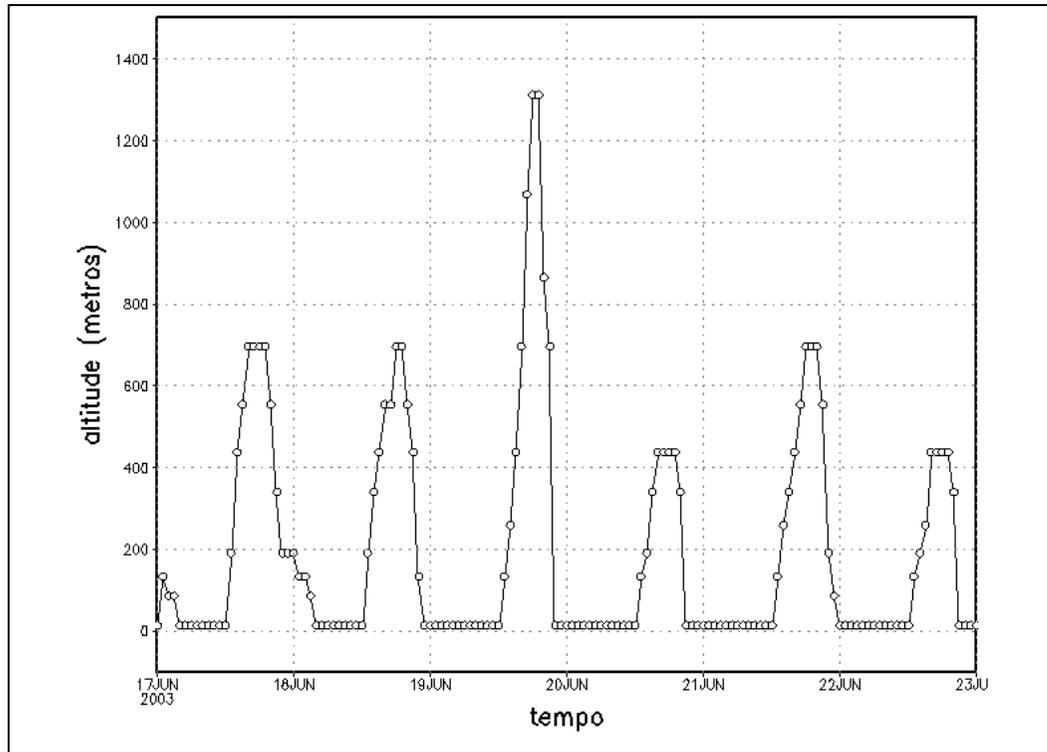


FIGURA 6.2.1.1: Variação temporal da altura da Camada Limite Planetária (m).

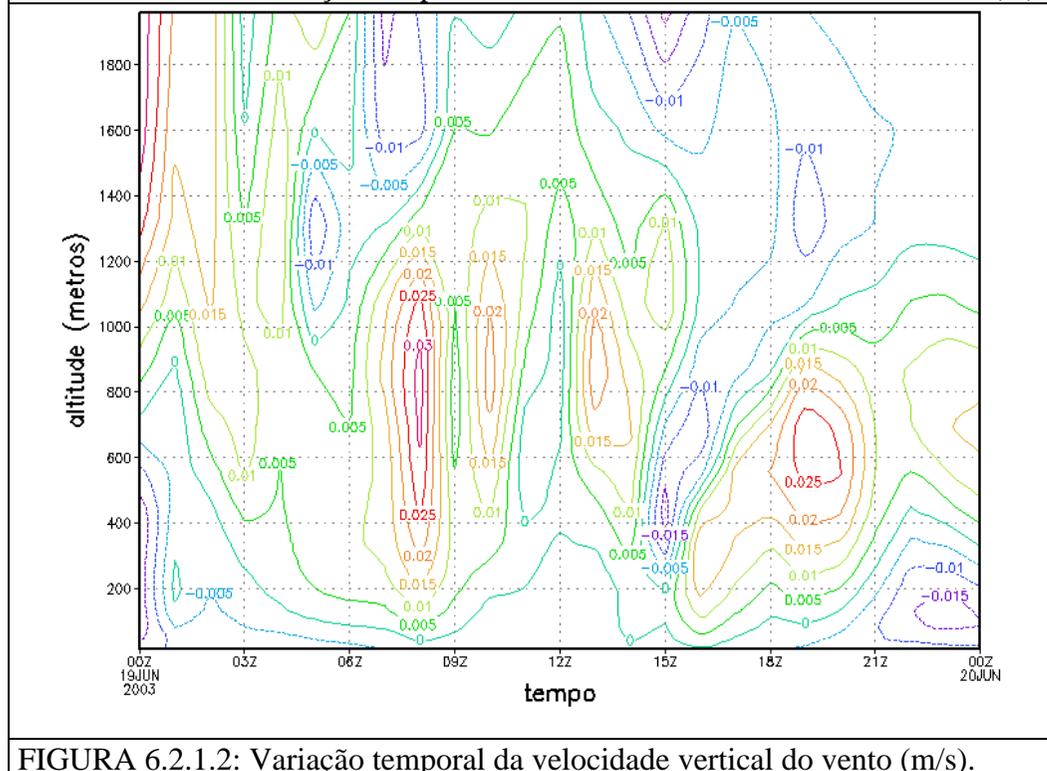


FIGURA 6.2.1.2: Variação temporal da velocidade vertical do vento (m/s).

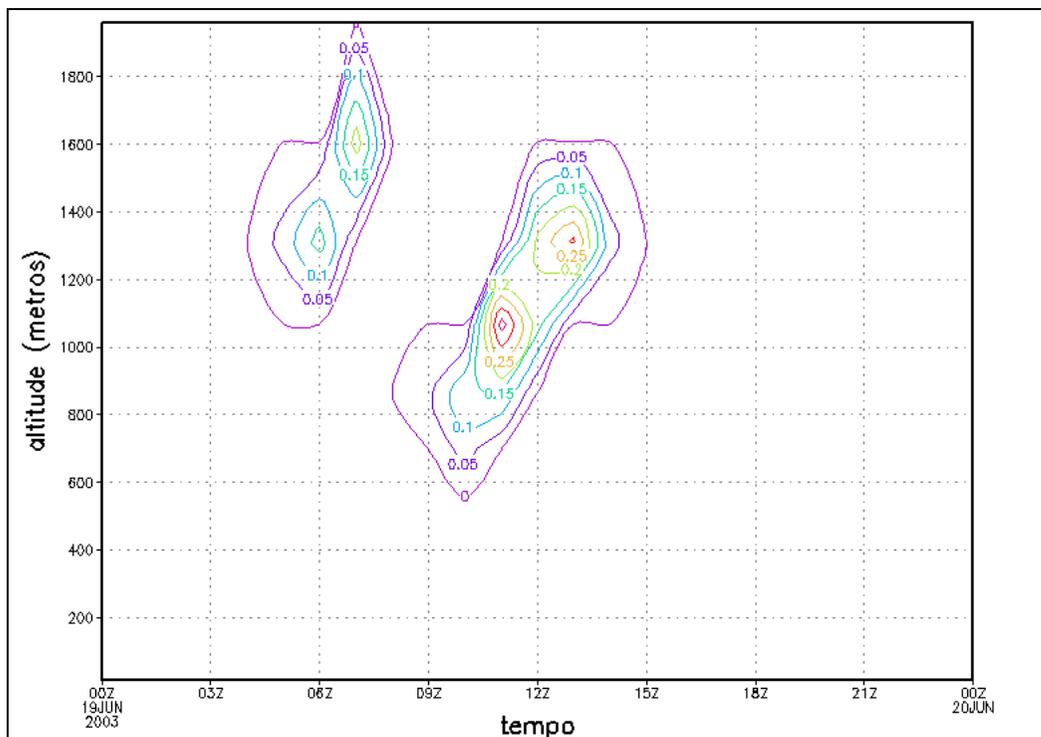


FIGURA 6.2.1.3: Variação temporal da cobertura de nuvens (g/kg).

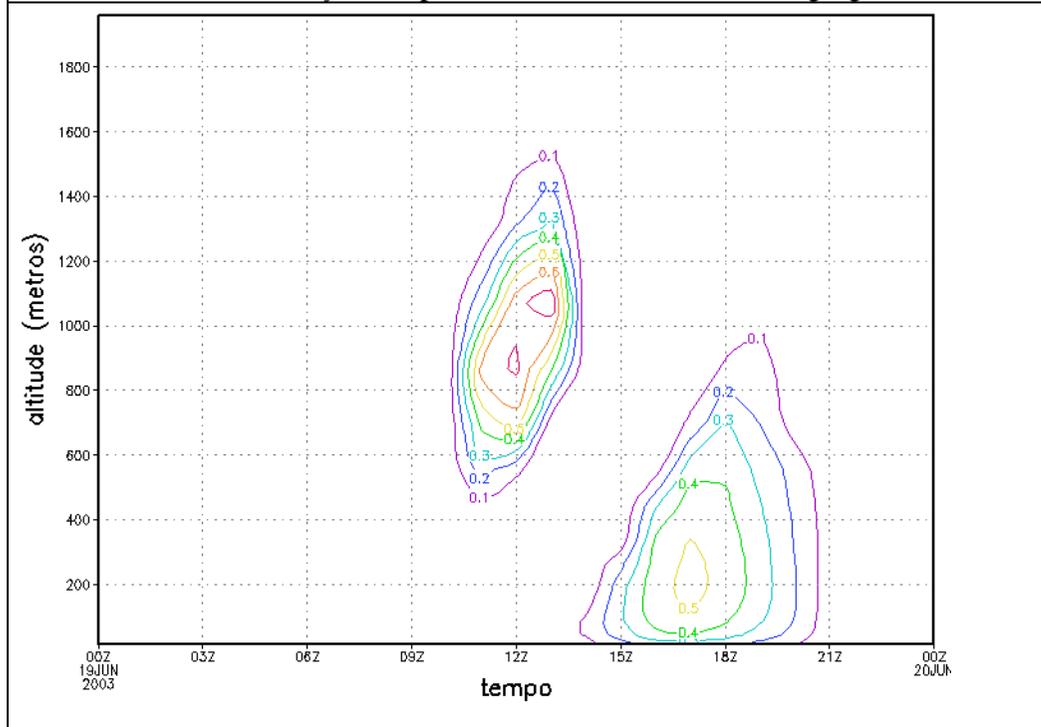


FIGURA 6.2.1.4: Variação temporal da Energia Cinética Turbulenta (m²/s²)

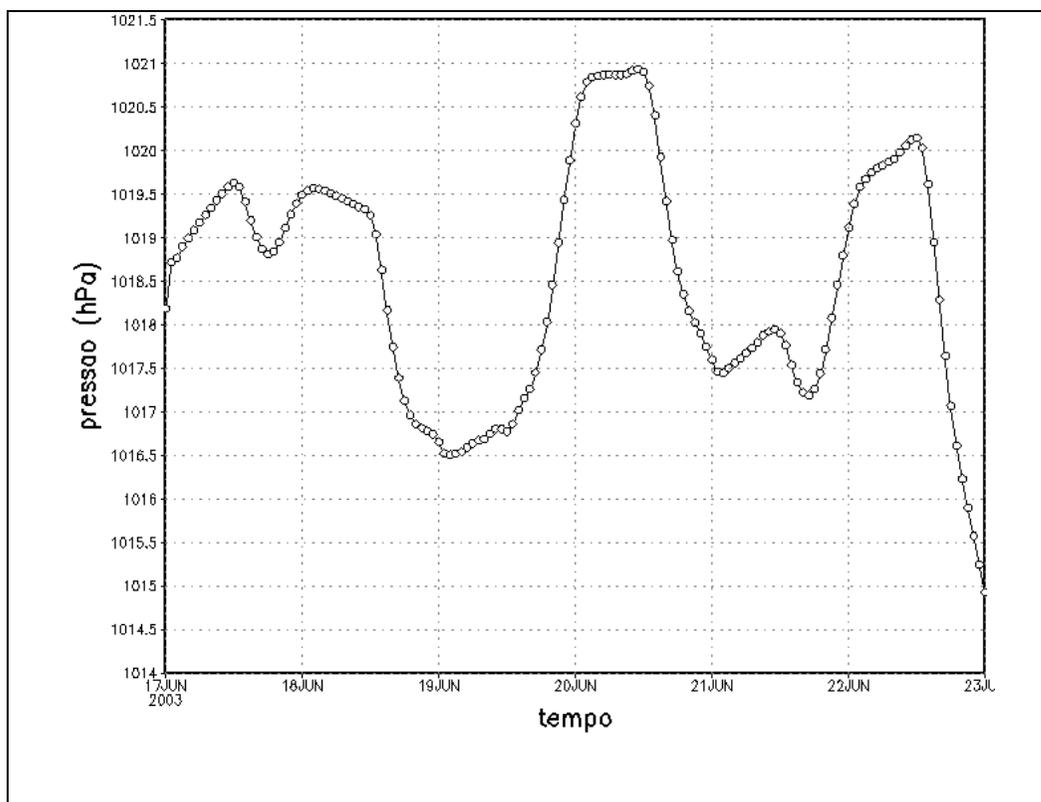


FIGURA 6.2.1. 5: Variação temporal da pressão atmosférica (hPa).

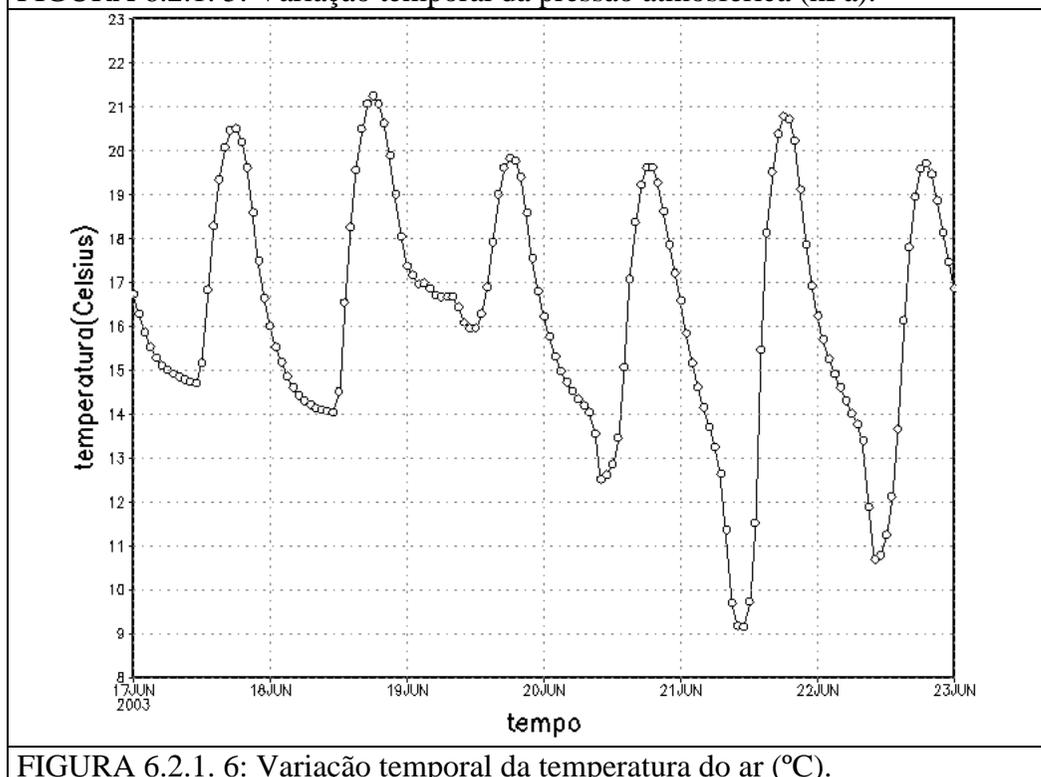


FIGURA 6.2.1. 6: Variação temporal da temperatura do ar (°C).

6.2.2. DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS POLUENTES COM A CONDIÇÃO SINÓTICA IDENTIFICADA

Com base na análise das imagens de satélite e nos campos meteorológicos foram classificados os dias 20, 21 e 22 de junho como dias de condição pré-frontal, frontal e pós-frontal.

As figuras 6.2.2.1, 6.2.2.2 e 6.2.2.3 ilustram as concentrações do material particulado, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, nas coordenadas da Usina termoeletrica de Charqueadas. Através das figuras, é possível observar que em condições pré-frontal, e pós-frontal as concentrações atingem valores máximos da ordem de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o material particulado, $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para os óxidos de nitrogênio e $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o dióxido de enxofre respectivamente, quando consideramos a passagem do sistema frontal, as concentrações encontram-se praticamente nulas.

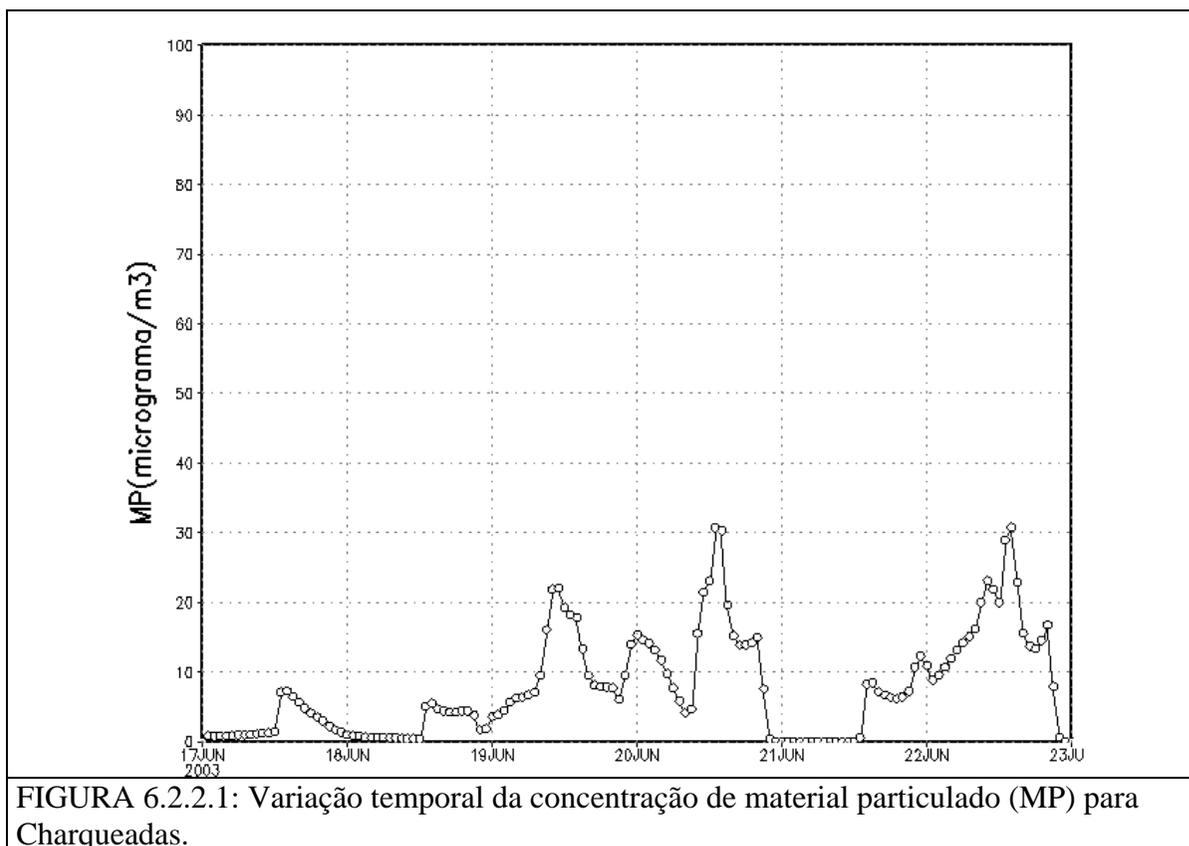


FIGURA 6.2.2.1: Variação temporal da concentração de material particulado (MP) para Charqueadas.

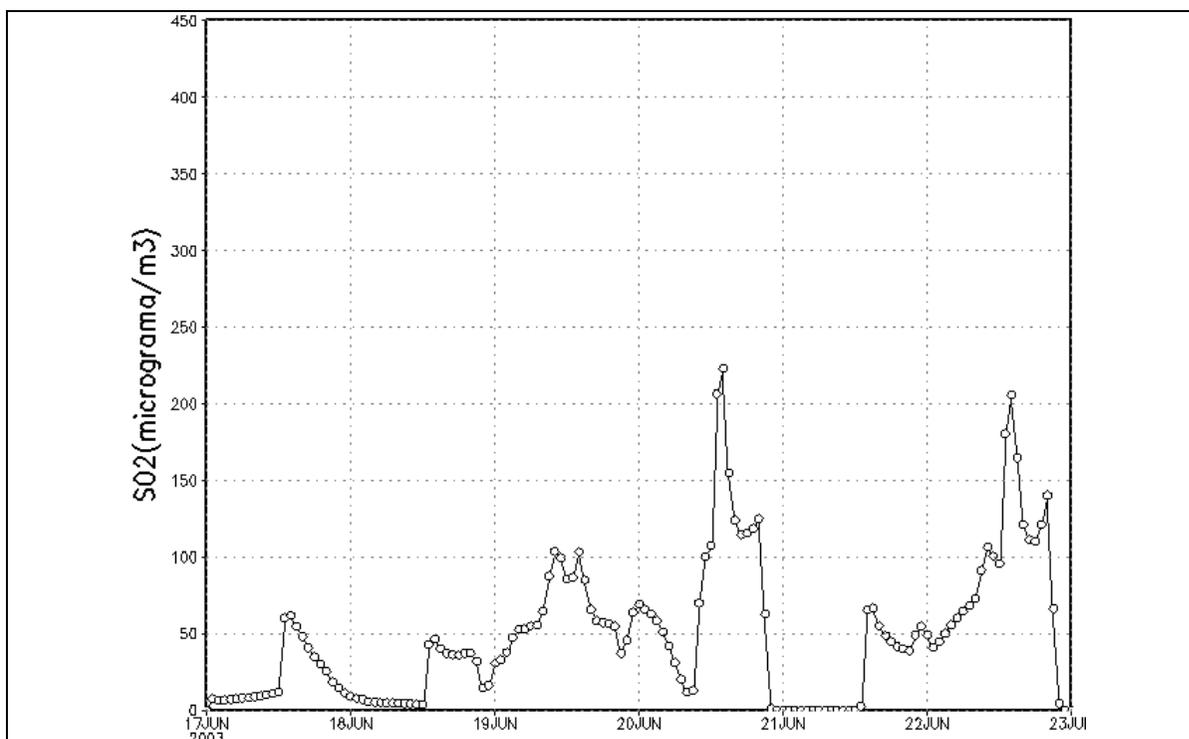


FIGURA 6.2.2.2: Variação temporal da concentração de dióxido de enxofre (SO₂) para Charqueadas.

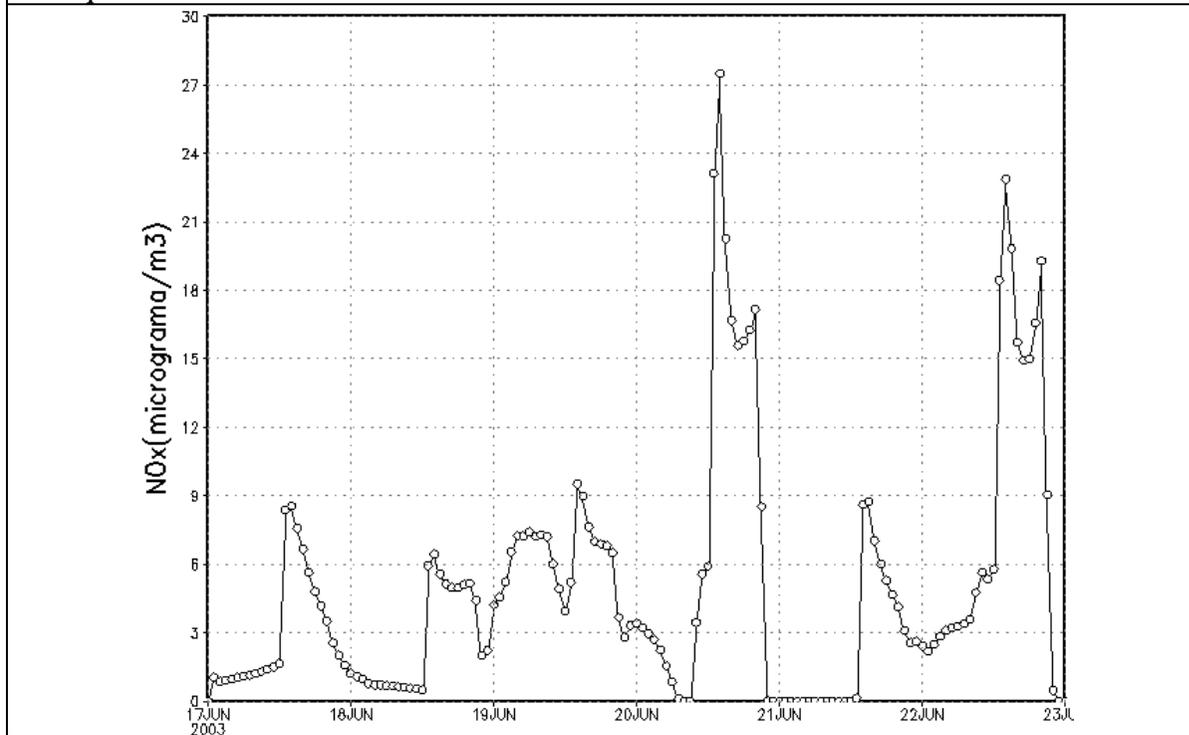


FIGURA 6.2.2.3: Variação temporal da concentração de oxido de nitrogênio (NO_x) para Charqueadas.

As figuras 6.2.2.4, 6.2.2.5 e 6.2.2.6 representam, respectivamente as concentrações de material particulado, dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, nas coordenadas da Usina termoeletrica de São Jerônimo. Observa-se um comportamento semelhante ao de Charqueadas, onde os picos de concentração ocorreram nos dias de condições pré-frontal e pós-frontal, e com a passagem do sistema frontal, às concentrações eram praticamente nulas. Os valores máximos de concentrações superficiais de material particulado e do dióxido de enxofre foram da ordem de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para cada um dos poluentes, respectivamente, valores estes superiores as concentrações obtidas na UTE-Charqueadas. Com relação ao óxido de nitrogênio ele apresentou valores da ordem de $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

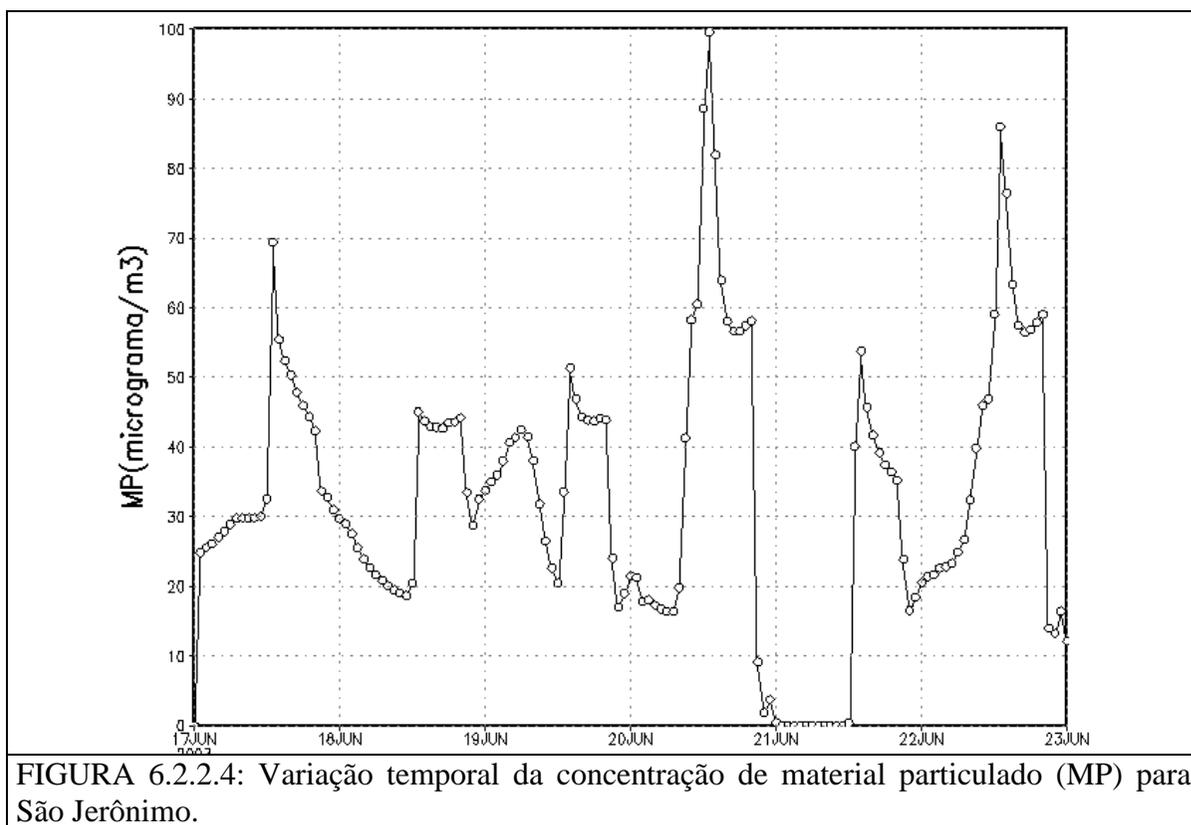


FIGURA 6.2.2.4: Variação temporal da concentração de material particulado (MP) para São Jerônimo.

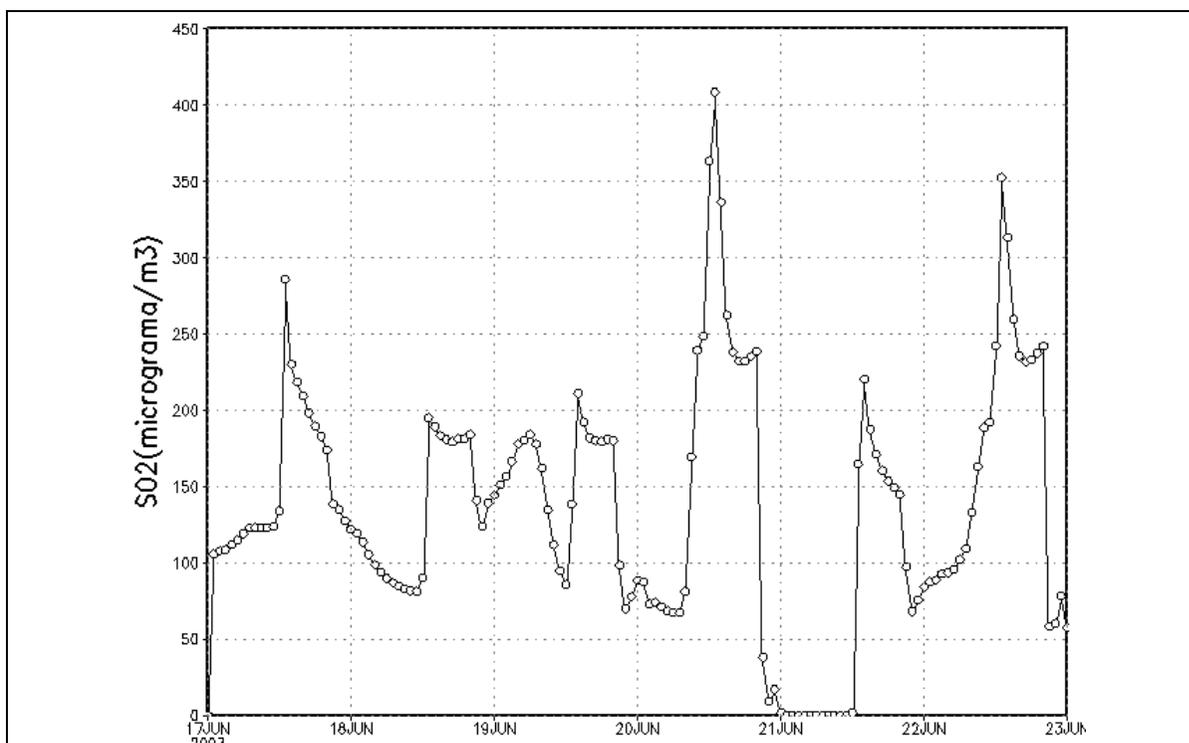


FIGURA 6.2.2.5: Variação temporal da concentração de dióxido de enxofre (SO₂) para São Jerônimo.

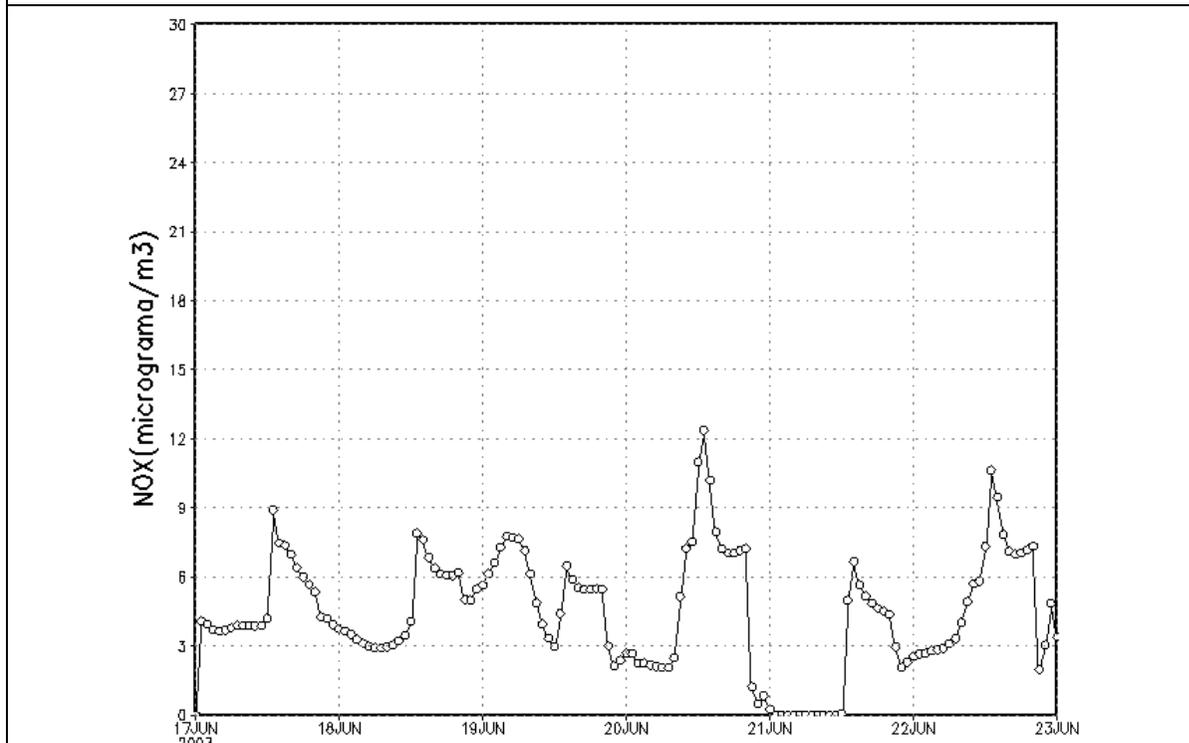
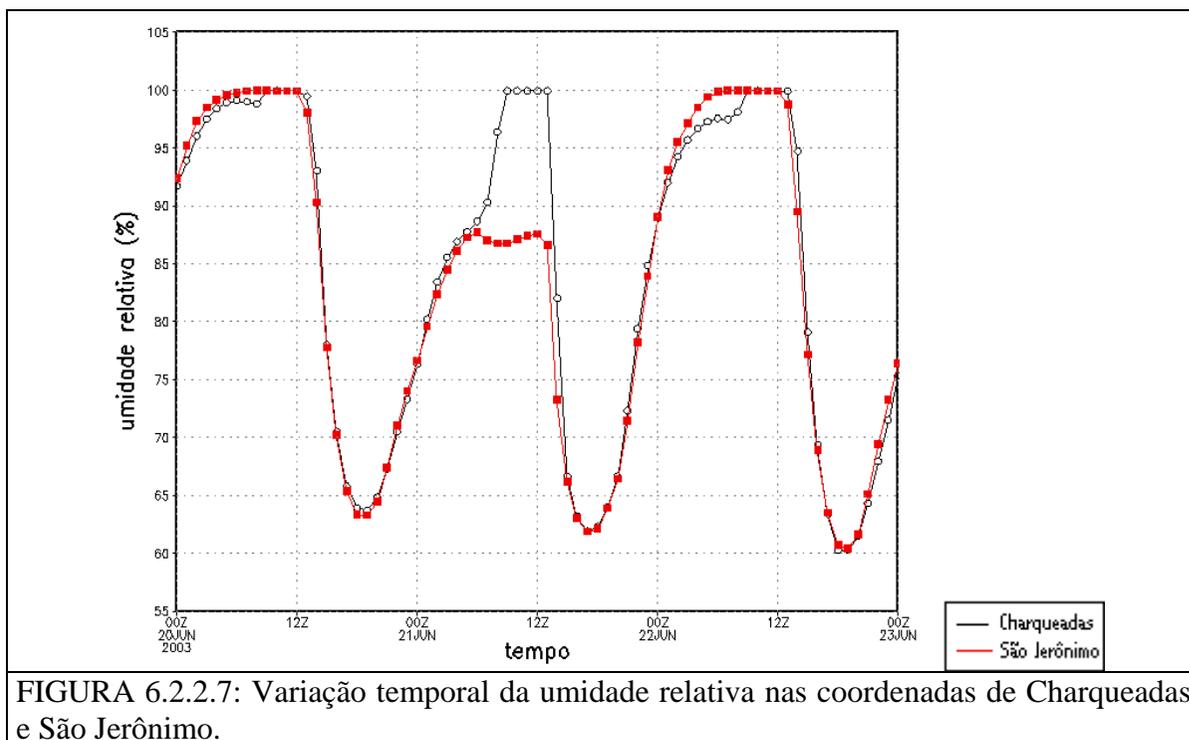


FIGURA 6.2.2.6: Variação temporal da concentração de oxido de nitrogênio (NO_x) para São Jerônimo.

O fato das concentrações de poluentes ao nível do solo apresentarem valores críticos em condições pré-frontal e pós-frontal, é explicado por alguns fatores meteorológicos citados em Setzer et al. 1980, tais como: a umidade relativa (figura 6.2.2.7) ser inferior ou igual a 60%, a pressão atmosférica (figura 6.2.2.8) com valores próximos a 1021 hPa e a velocidade do vento (figura 6.2.2.9), com obter valores inferiores a 2 m/s, tanto para Charqueadas quanto para São Jerônimo

Os baixos valores de concentração de poluentes estão relacionados com a passagem do sistema frontal que tem, como consequência, o decréscimo da pressão atmosférica, o aumento da umidade relativa que chega a atingir valores da ordem de 100% em Charqueadas e 88 % em São Jerônimo, e a ocorrência de precipitação atmosférica neste dia, a qual não só remove o material particulado como também ajuda na dissolução de gases como o SO_2 e o NO_x , como pode ser observado na figura 6.1.2.10.



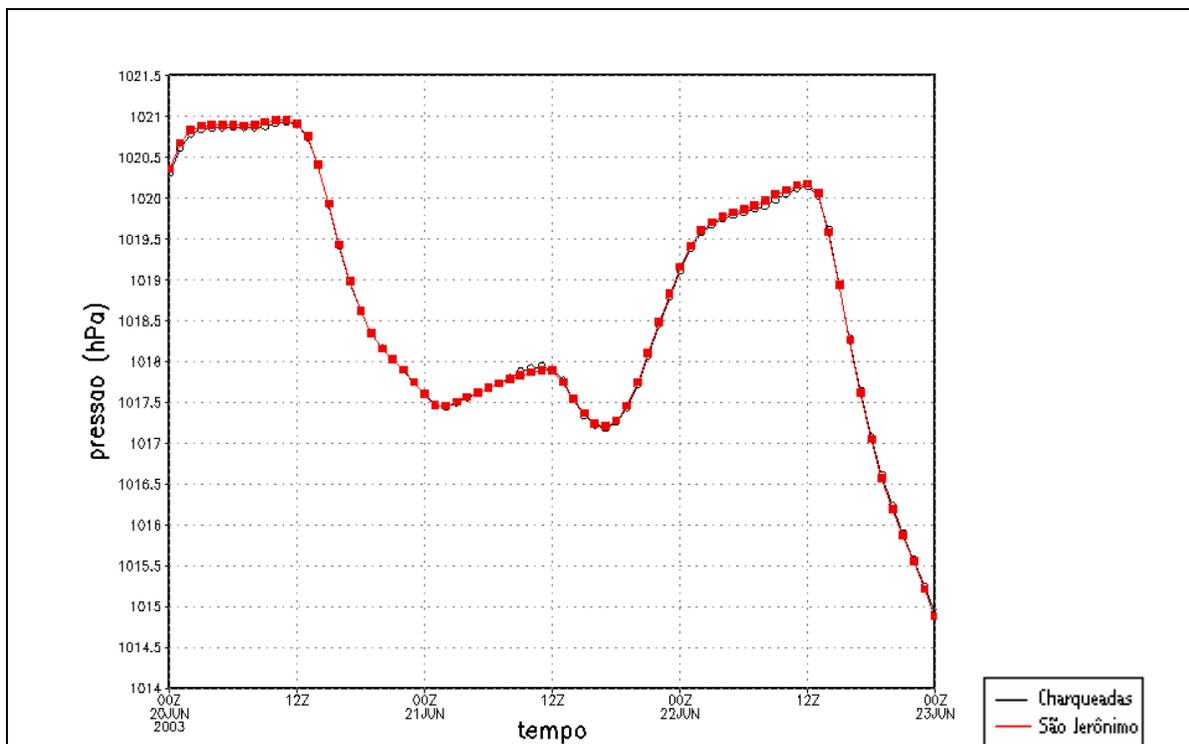


FIGURA 6.2.2.8: Variação temporal da pressão atmosférica nas coordenadas de Charqueadas e São Jerônimo.

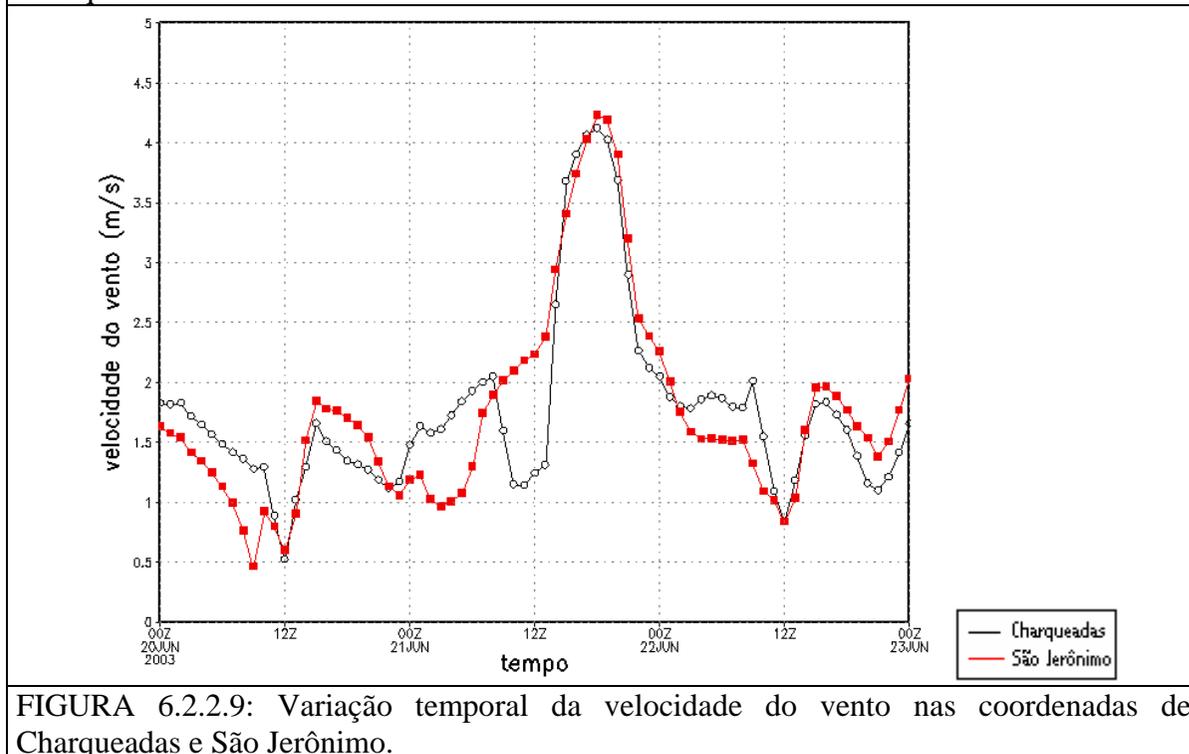


FIGURA 6.2.2.9: Variação temporal da velocidade do vento nas coordenadas de Charqueadas e São Jerônimo.

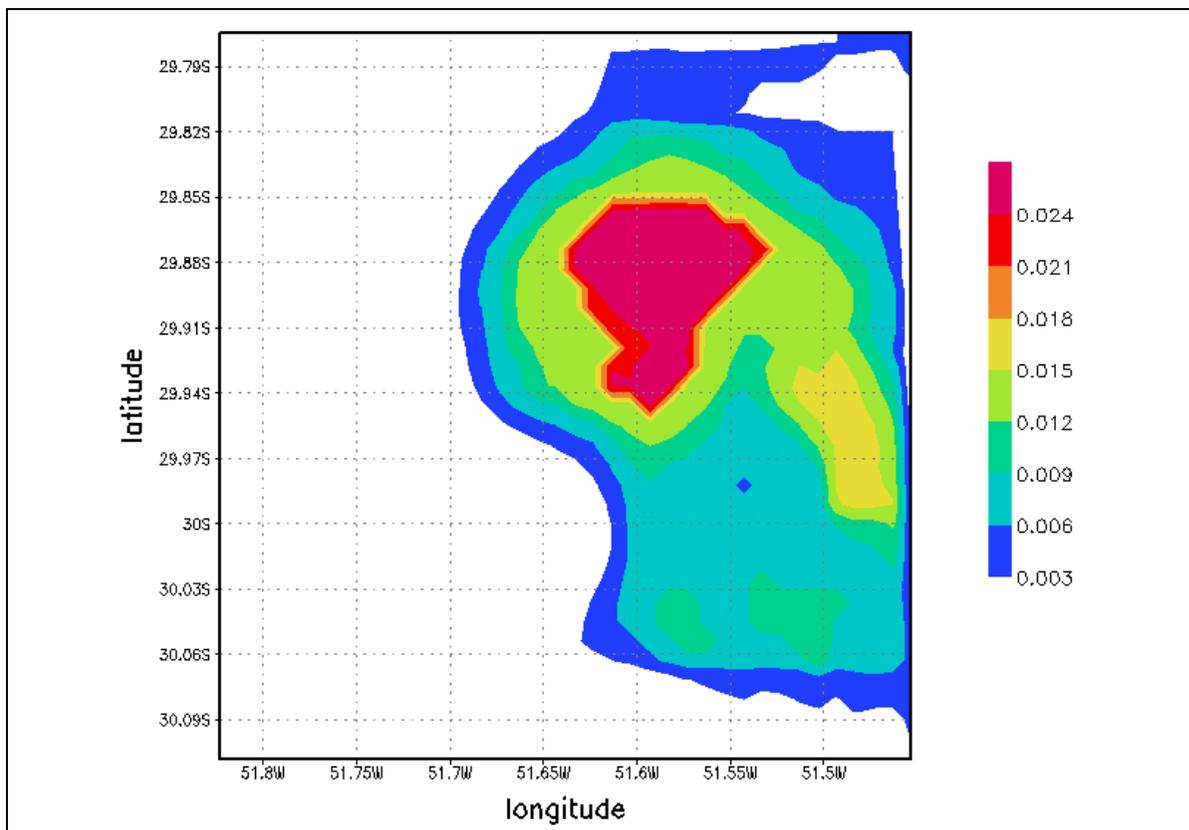


FIGURA 6.2.2.10: Campo de precipitação (kg/kg) – grade 3 – 21/06/2003 as 12:00UTC

6.2.3. DESCRIÇÃO DO COMPORTAMENTO DA PLUMA

Muitas vezes podemos estimar a estabilidade do ar observando uma pluma que surge de uma chaminé. Se a fumaça entra em uma camada de ar instável, a pluma fica ondulada, indicando que os poluentes estão sendo misturados, ou seja, diluídos. Por outro lado, se a pluma de fumaça fica suspensa e vagarosamente sobe, significa que as condições atmosféricas são estáveis.

Como mostrados anteriormente, os valores mais altos das concentrações de poluentes ocorreram no período classificado como pré-frontal, no dia 20 de junho. As figuras 6.2.3.1, 6.2.3.2 e 6.2.3.3 ilustram o comportamento dos poluentes durante o dia em questão, podendo verificar que o horário em que ocorreu o pico de concentração foi por volta das 14:00UTC, para todos os poluentes.

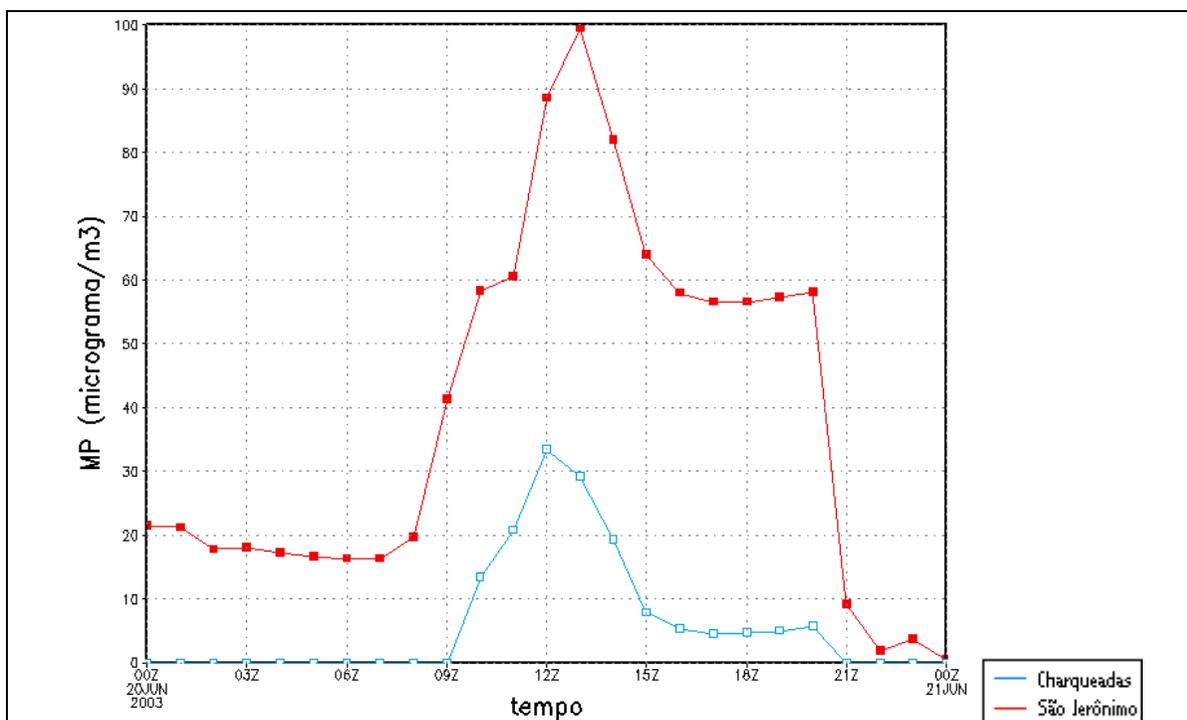


FIGURA 6.2.3.1: Variação temporal da concentração de material particulado para o dia 20/06 –Charqueadas e São Jerônimo.

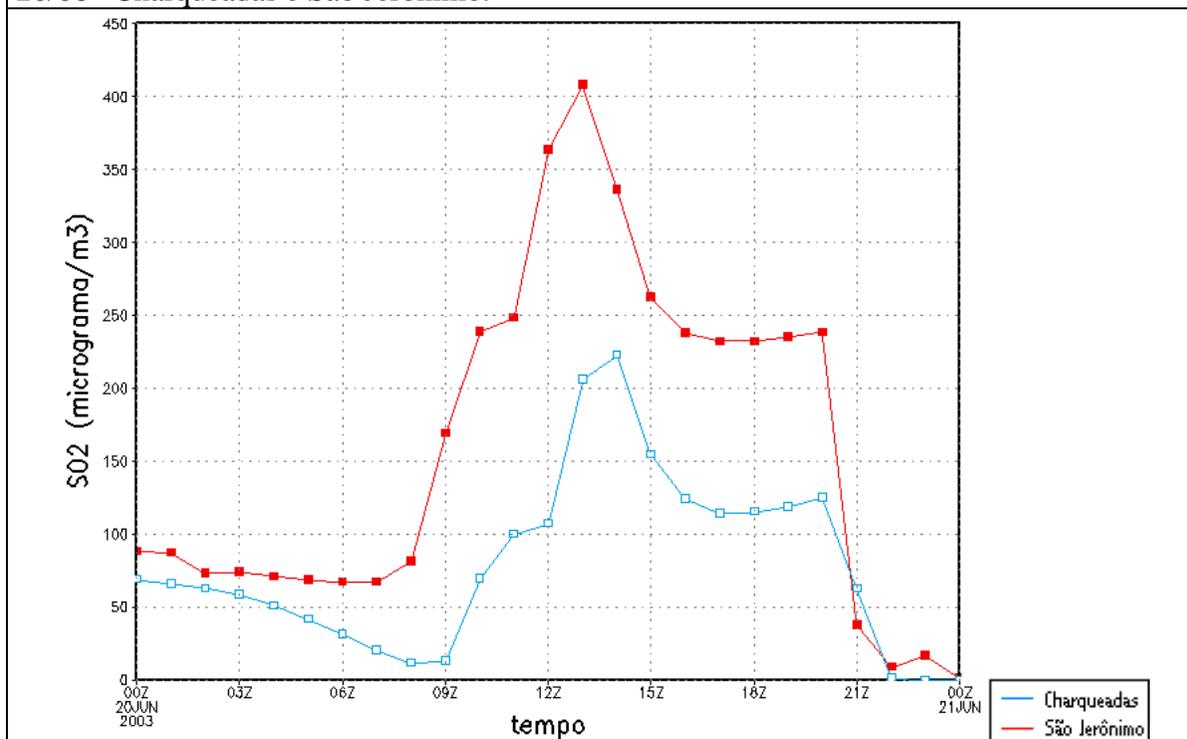


FIGURA 6.2.3.2: Variação temporal da concentração do dióxido de enxofre para o dia 20/06 –Charqueadas e São Jerônimo.

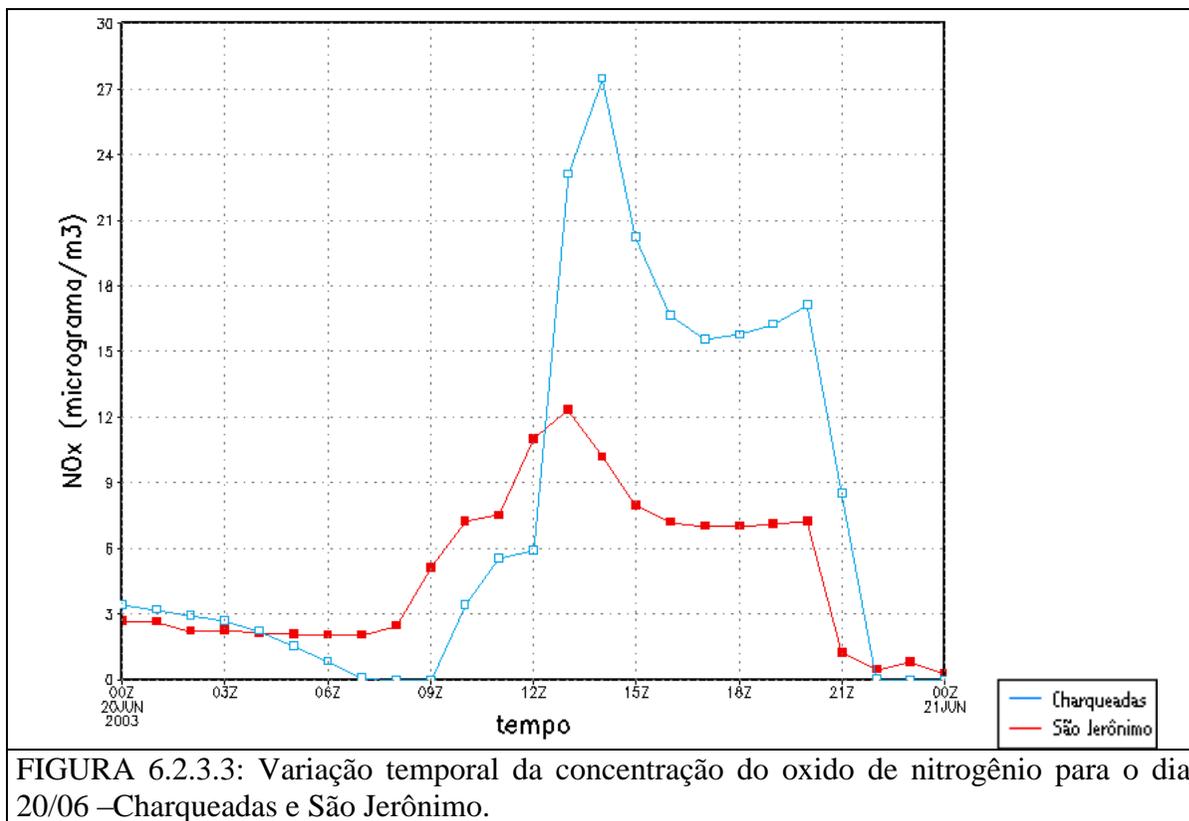


FIGURA 6.2.3.3: Variação temporal da concentração do óxido de nitrogênio para o dia 20/06 –Charqueadas e São Jerônimo.

Para obter uma análise mais detalhada foram plotados gráficos da distribuição espacial com a latitude fixa em Charqueadas e em São Jerônimo, em função da longitude e a altitude. Na figura 6.2.3.4 observa-se que os maiores valores de concentração de material particulado estão próximos da altura da fonte entre o segundo (47,2 metros) e o terceiro (86,6 metros) nível do modelo com valores de concentrações da ordem de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, observa-se também uma subsidência do ar neste horário, devido a presença de um sistema de alta pressão. Para as figuras 6.2.3.5 observa-se valores ao redor da fonte da ordem de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a concentração se espalha até 180 metros aproximadamente, como a altura da camada nesta região é da ordem 700 metros a tendência é que os poluentes depositem-se próximo a fonte. Na figura 6.2.3.6 encontra-se a variação longitudinal dos óxidos de nitrogênio apresentando um comportamento semelhante aos dois casos anteriores, onde os maiores valores de concentração localizam-se próximos à fonte com máximos da ordem de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e as concentrações também chegaram a aproximadamente 180 metros de altura.

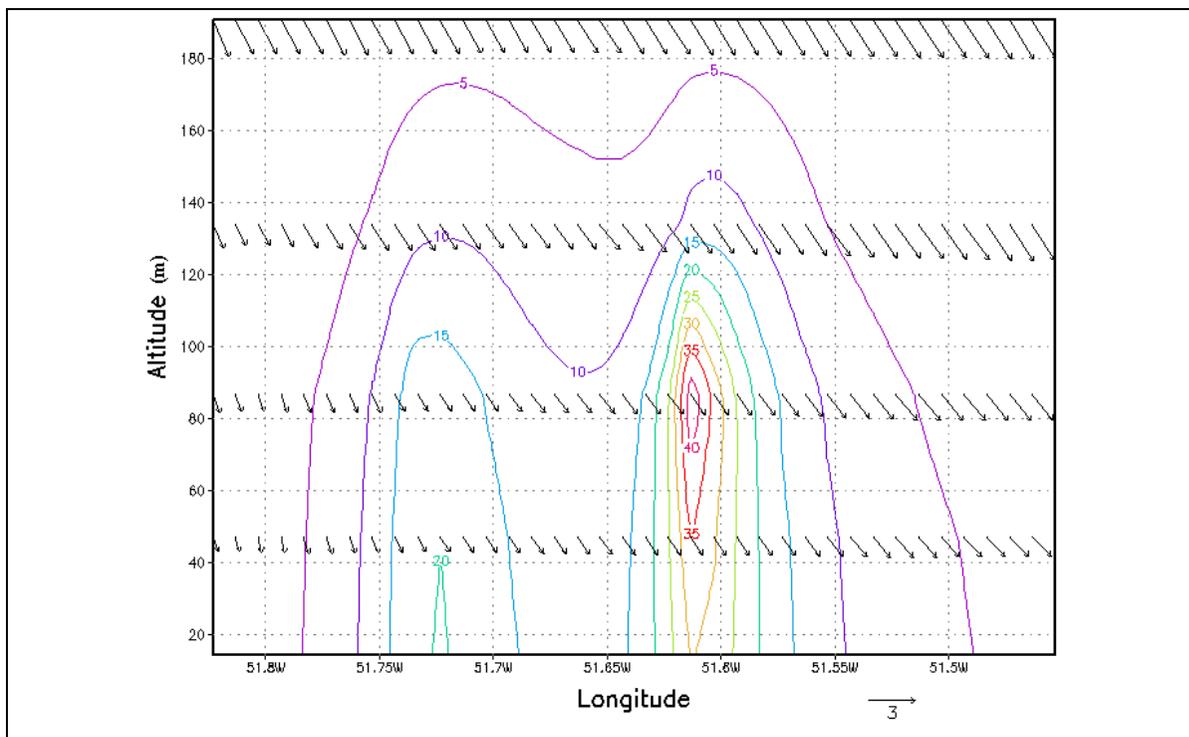


FIGURA 6.2.3.4: Variação longitudinal do material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC - Charqueadas

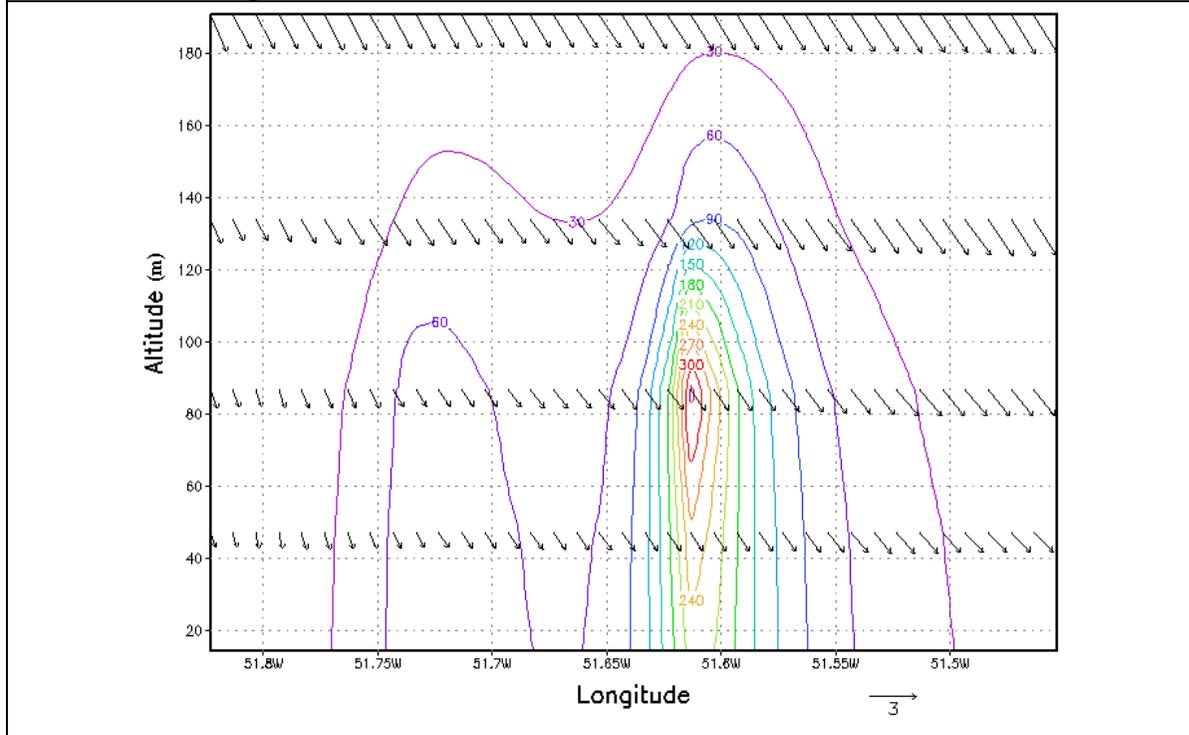
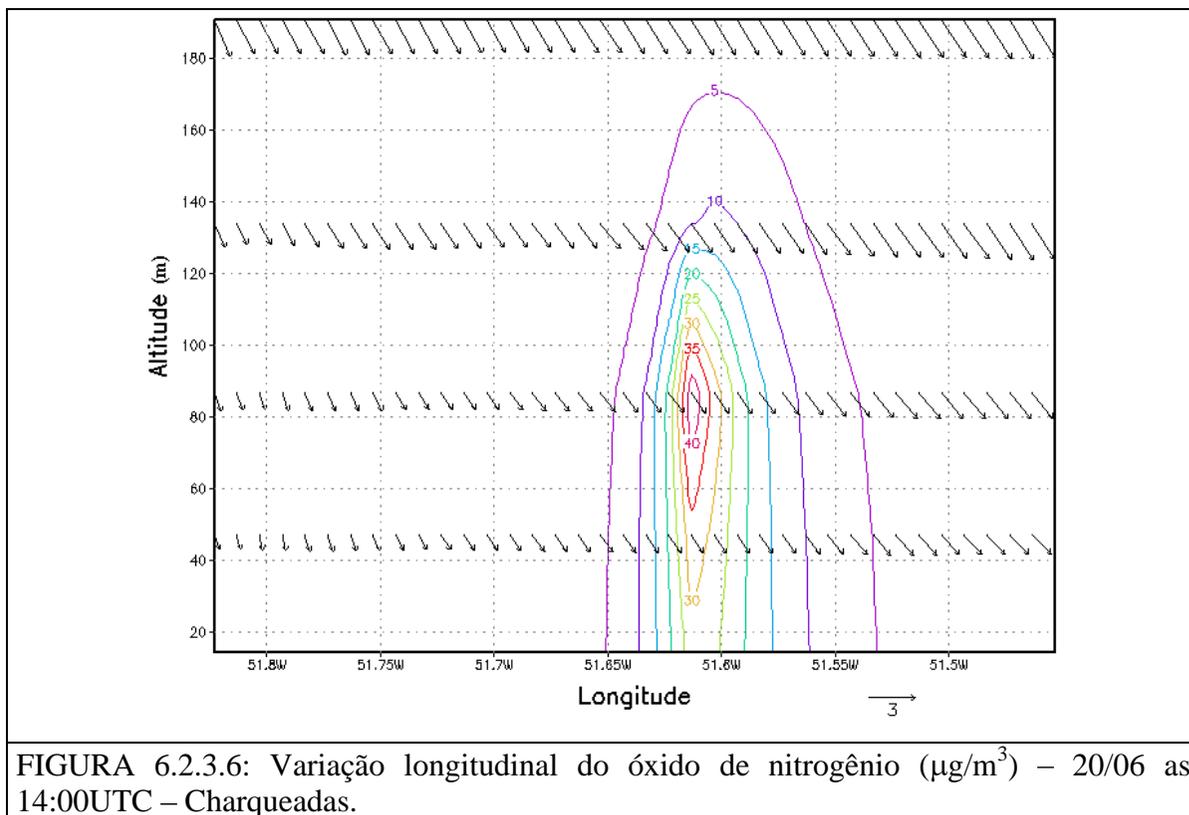


FIGURA 6.2.3.5: Variação longitudinal do dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – Charqueadas.



Para a variação longitudinal com a latitude fixa na Usina Termelétrica de São Jerônimo, onde a altura da fonte é de 45 metros, localizada entre o primeiro (14,3 metros) e o segundo nível (47,2 metros) do modelo, as concentrações ficaram retidas mais próximo ao solo, com valores máximos de material particulado (figura 6.2.3.7) da ordem de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Na figura 6.2.3.8, que representa o dióxido de enxofre, verificam-se valores da ordem de $550 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na saída da chaminé enquanto que, bem próximo ao solo, foram estimados valores da ordem de $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Os óxidos (figura 6.2.3.9) apresentaram valores da ordem de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na saída da chaminé e de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ próximo ao solo.

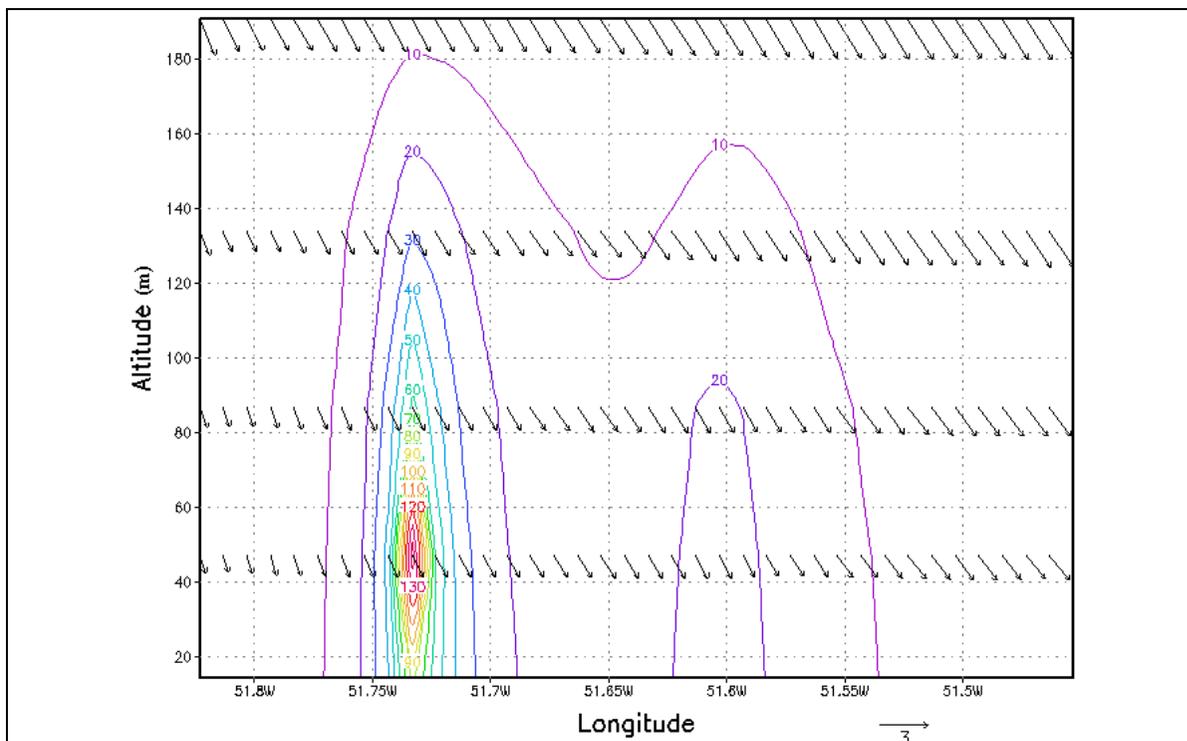


FIGURA 6.2.3.7: Variação longitudinal do material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – São Jerônimo.

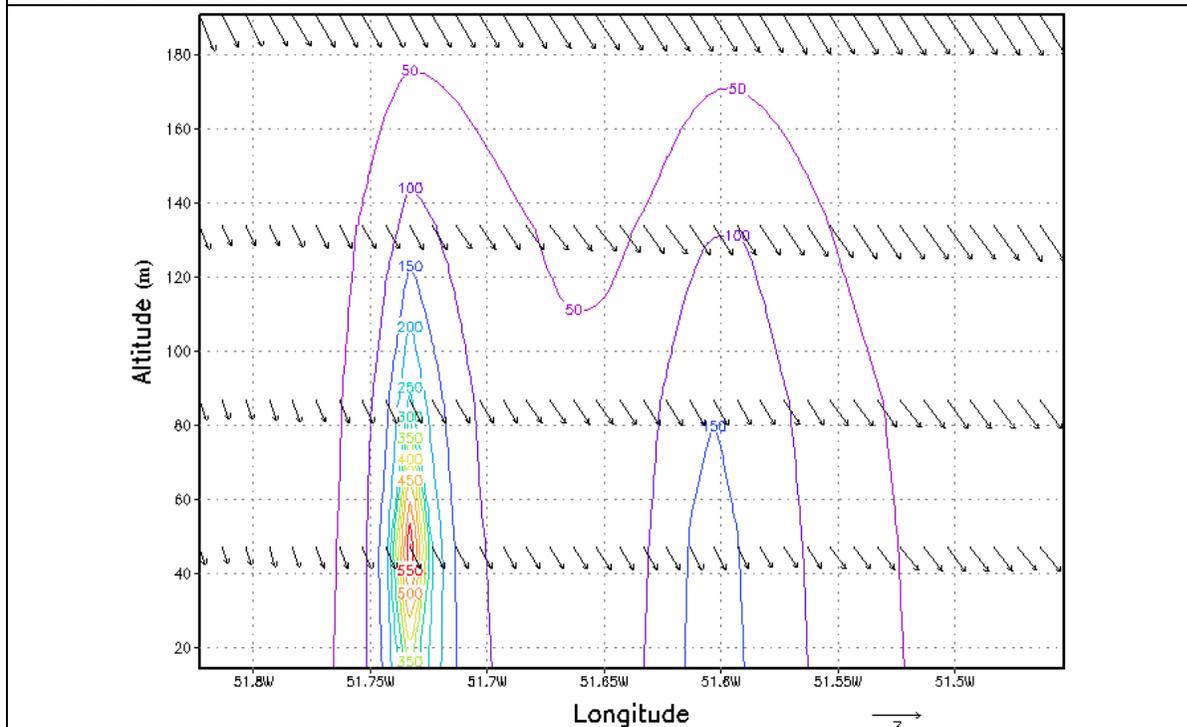
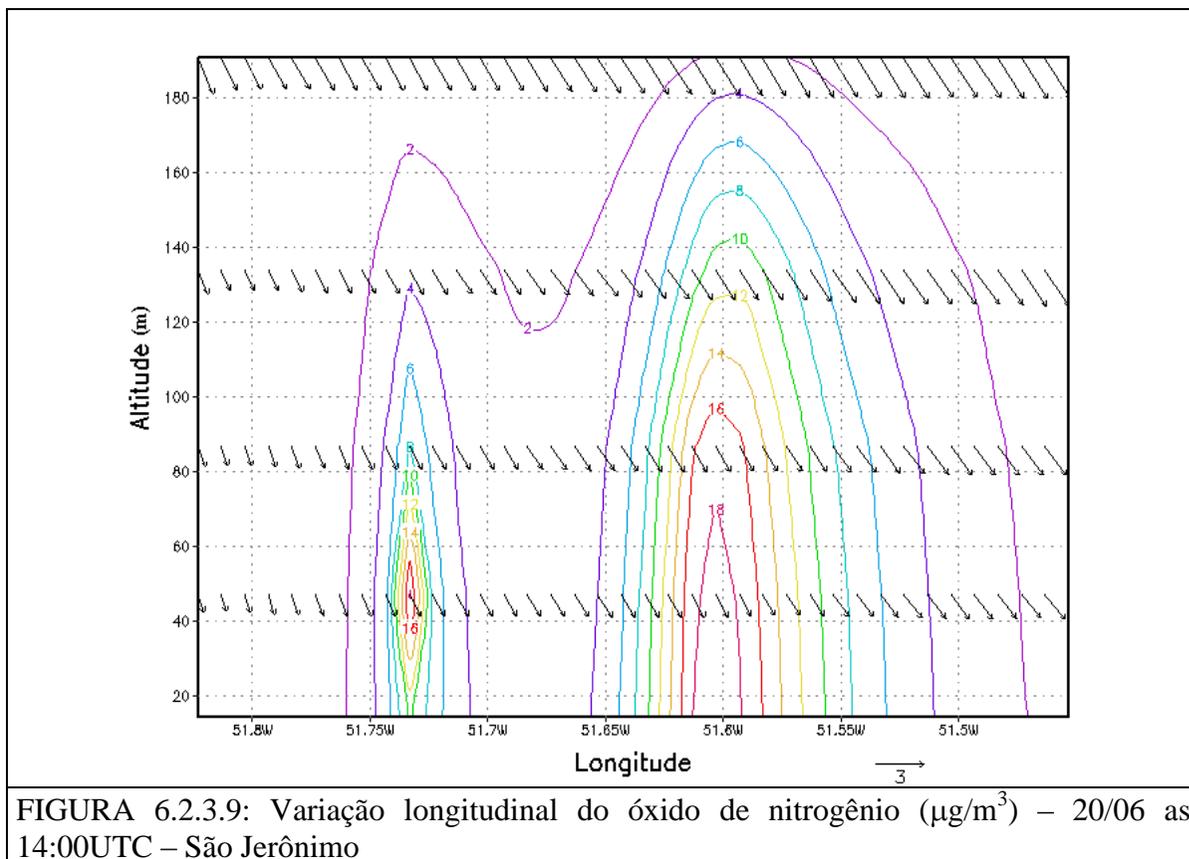


FIGURA 6.2.3.8: Variação longitudinal do dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – 20/06 as 14:00UTC – São Jerônimo



6.2.4. DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES DAS MÉDIAS DE 24 HORAS

Os resultados obtidos pelo modelo RAMS aqui descritos, são as médias de 24 horas do material particulado e o dióxido de enxofre, para a grade 3 (38 km x 38 km) com o espaçamento horizontal de 1 km, para todo o período de estudo.

No dia 17/06/2003 o máximo de concentração simulado para o material particulado (figura 6.2.4.1) foi da ordem de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e para o dióxido de enxofre (figura 6.2.4.2) da ordem de $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para os dias 18 e 19 de junho as concentrações máximas simuladas foram respectivamente da ordem de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 6.2.4.3) e $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 6.2.4.4) para o material particulado e de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 6.2.4.5) e $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 6.2.4.6) para o dióxido de enxofre.

Para o dia 20/06/2003, na condição pré-frontal, observa-se na figura 6.2.4.7 que o máximo de concentração simulado em relação ao material particulado é da ordem de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, já o dióxido de enxofre (figura 6.2.4.8) apresenta valores da ordem de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No dia 21/06/2003 com a passagem do sistema frontal, as simulações do material particulado (figura 6.2.4.9) ilustram valores da ordem de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o dióxido de enxofre (figura 6.2.4.10) da ordem de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

No dia referente à condição pós-frontal o material particulado (figura 6.2.4.11) teve máximos da ordem de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o dióxido de enxofre (figura 6.2.4.12) da ordem de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Em todos os casos, os valores máximos das concentrações dos poluentes localizam-se próximos à usina termoeletrica de São Jerônimo.

Tabela 6.2.4.1: Médias de concentração de 24 horas, do material particulado e do dióxido de enxofre.

	17/06	18/06	19/06	20/06	21/06	22/06
MP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	35	30	40	45	24	40
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	130	120	160	200	100	180

A tabela 6.2.4.1 mostra os resultados das concentrações do material particulado e do dióxido de enxofre, simuladas pelo modelo RAMS, para todo período de estudo. Como pode ser observado, os maiores valores de concentrações ocorreram antes e depois da passagem do sistema frontal. No dia 21 de junho (dia da passagem do sistema frontal), as concentrações médias de 24 horas foram as menores simuladas, o material particulado foi de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o dióxido de enxofre $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

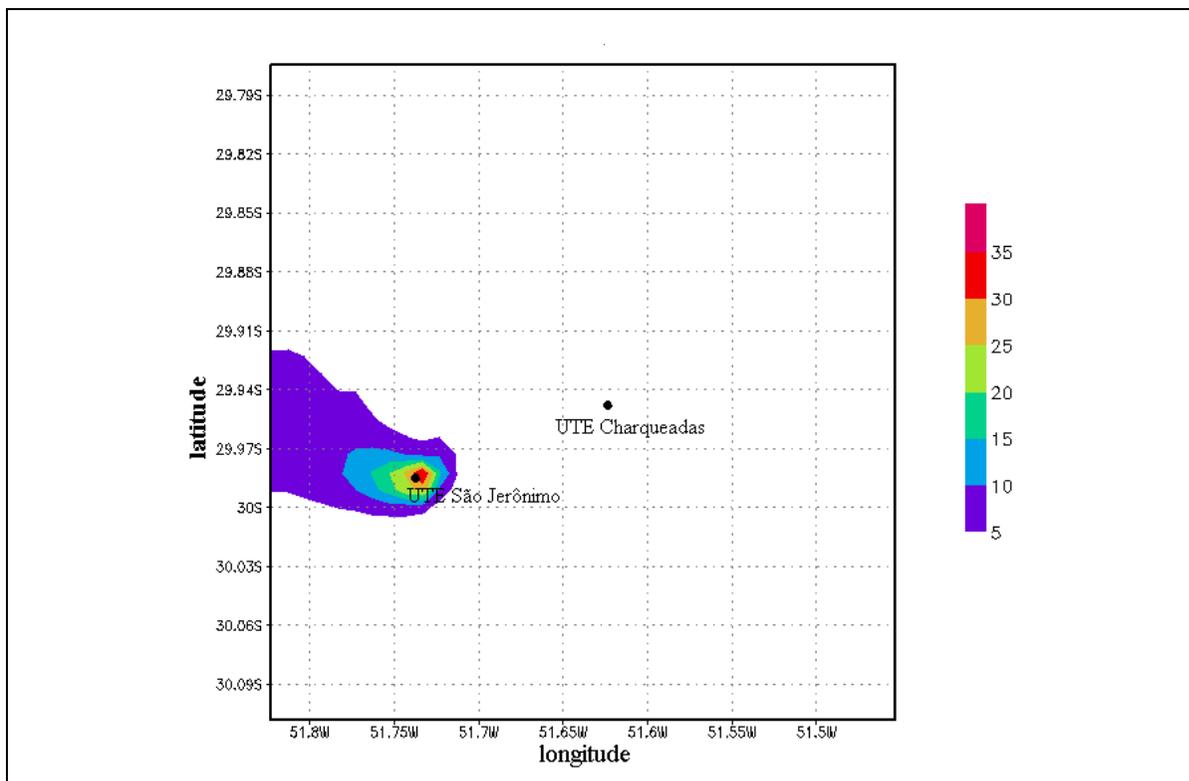


FIGURA 6.2.4.1: Valores médios de 24 horas para o dia 17/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

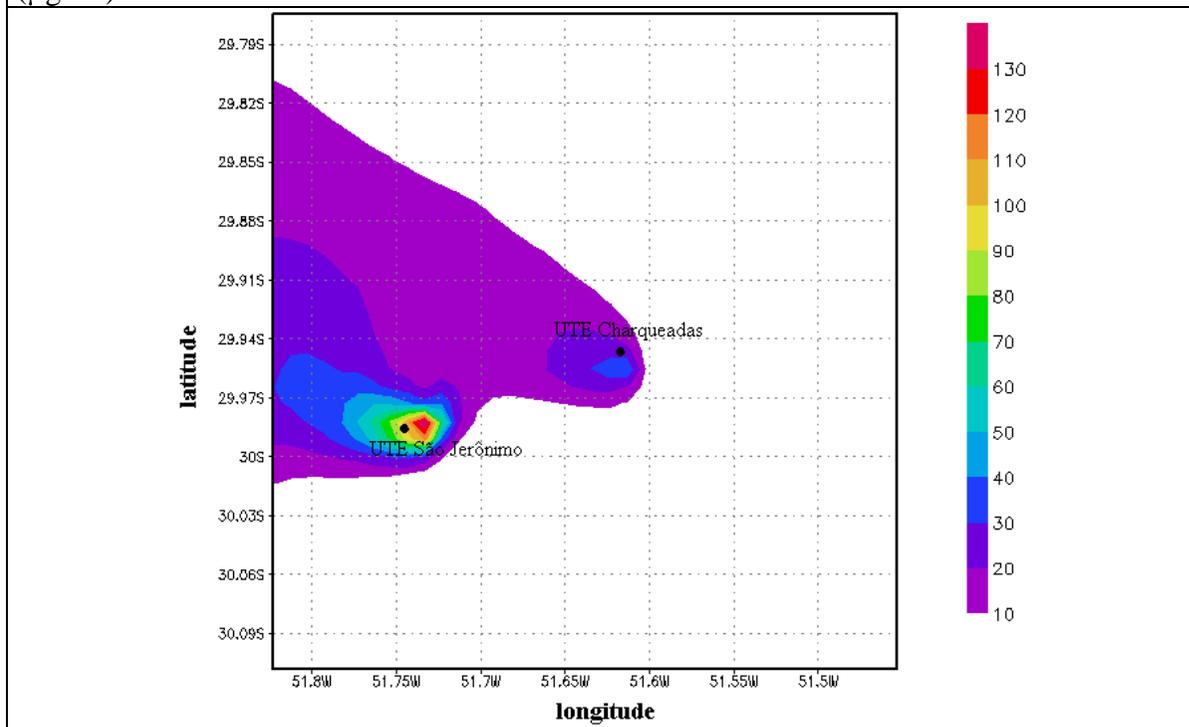


FIGURA 6.2.4.2: Valores médios de 24 horas para o dia 17/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

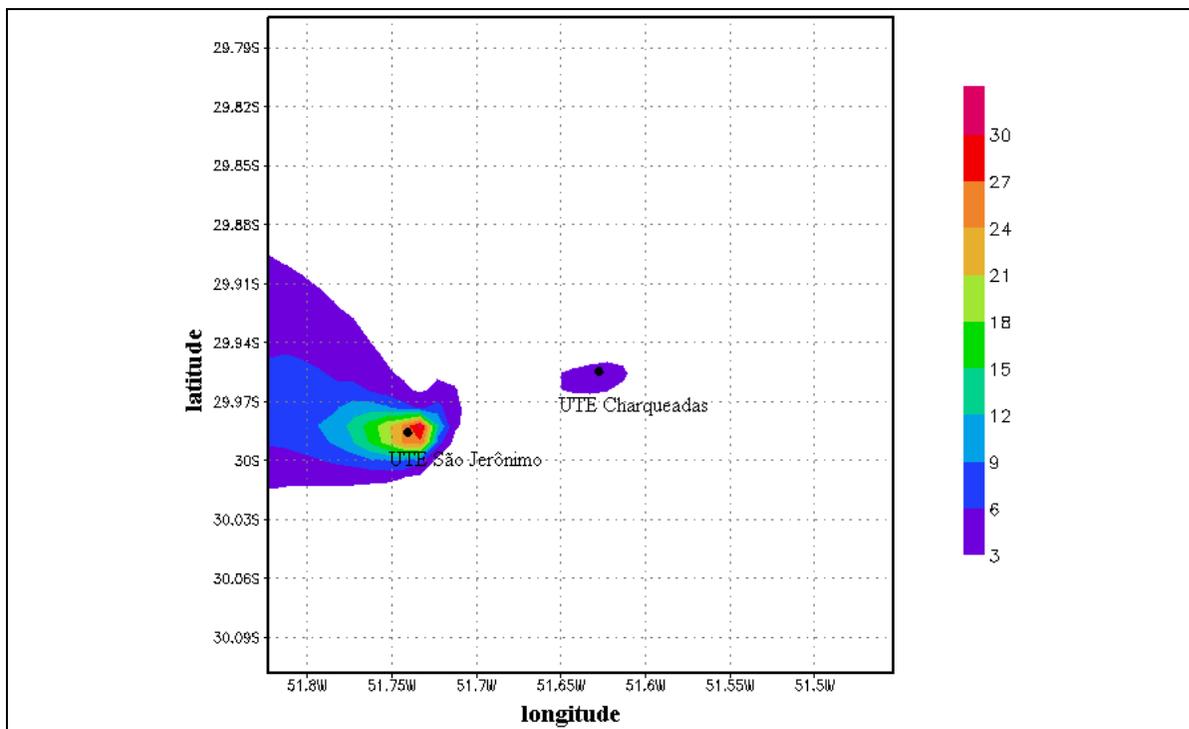


FIGURA 6.2.4.3: Valores médios de 24 horas para o dia 18/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

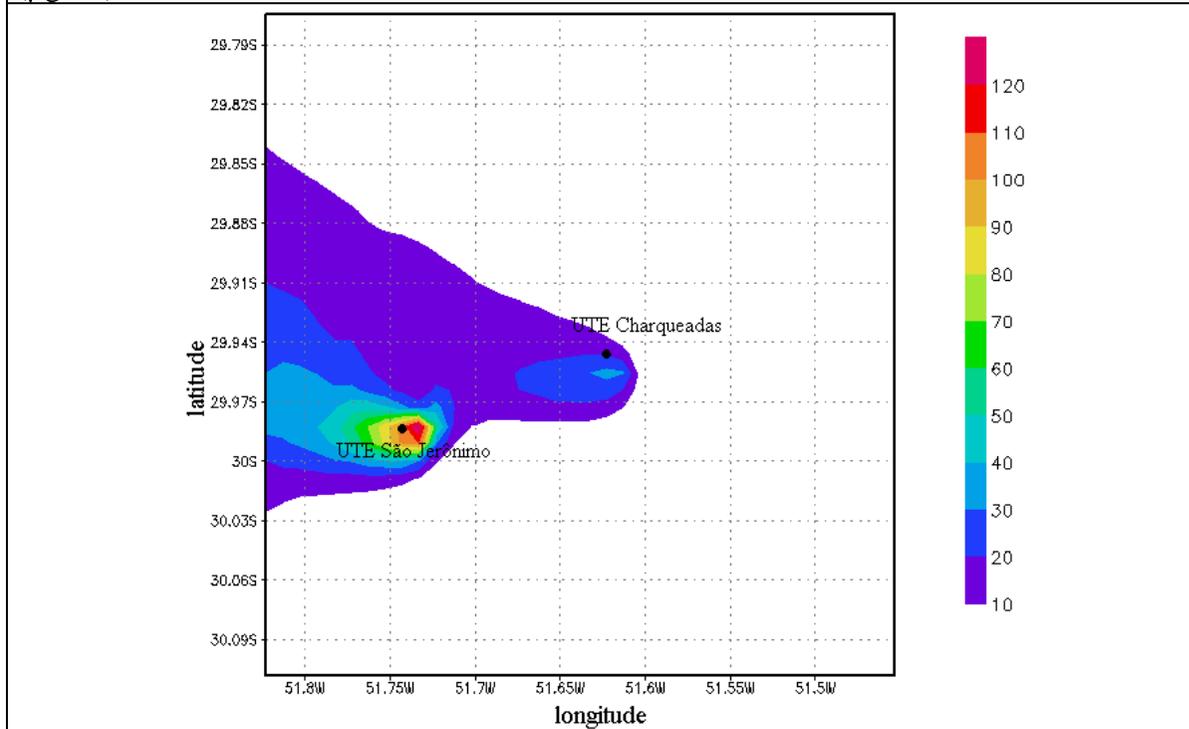


FIGURA 6.2.4.4: Valores médios de 24 horas para o dia 18/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

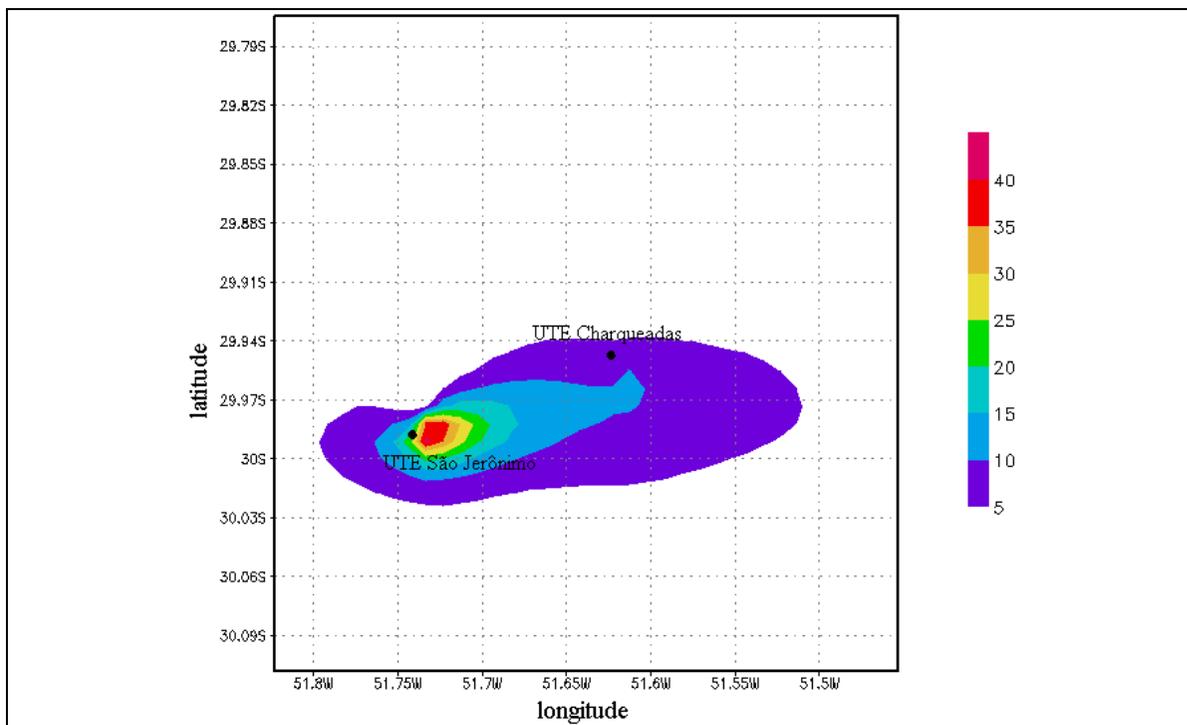


FIGURA 6.2.4.5: Valores médios de 24 horas para o dia 19/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

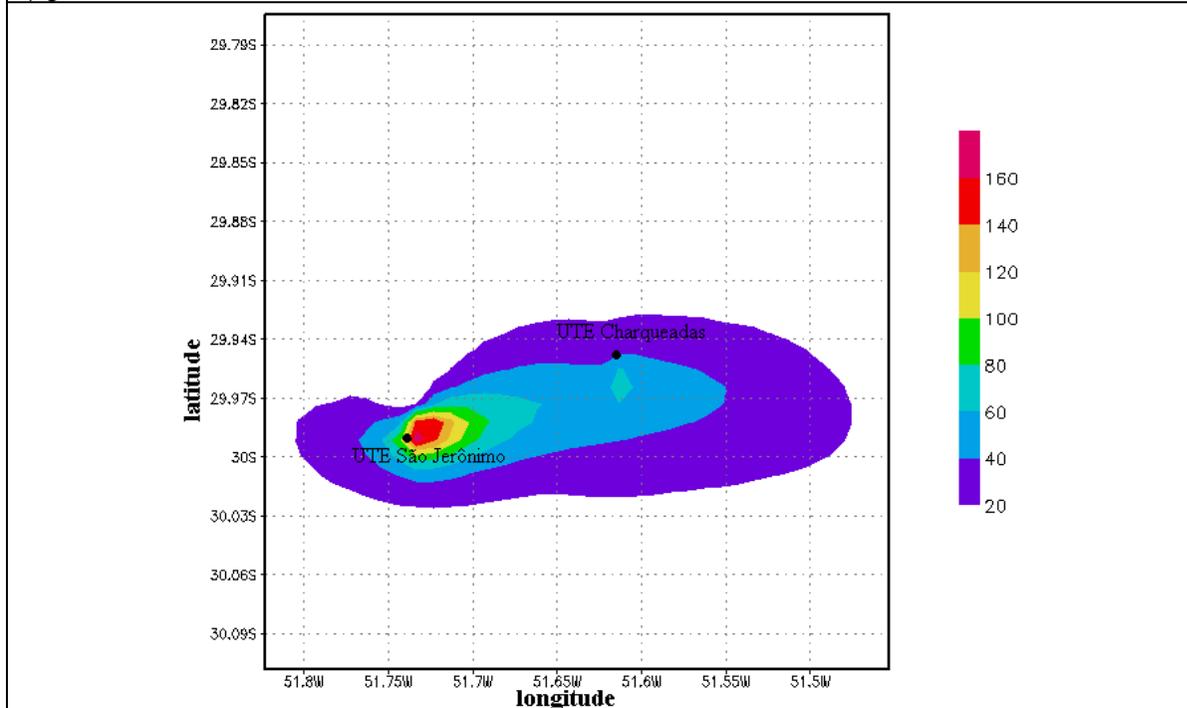


FIGURA 6.2.4.6: Valores médios de 24 horas para o dia 19/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

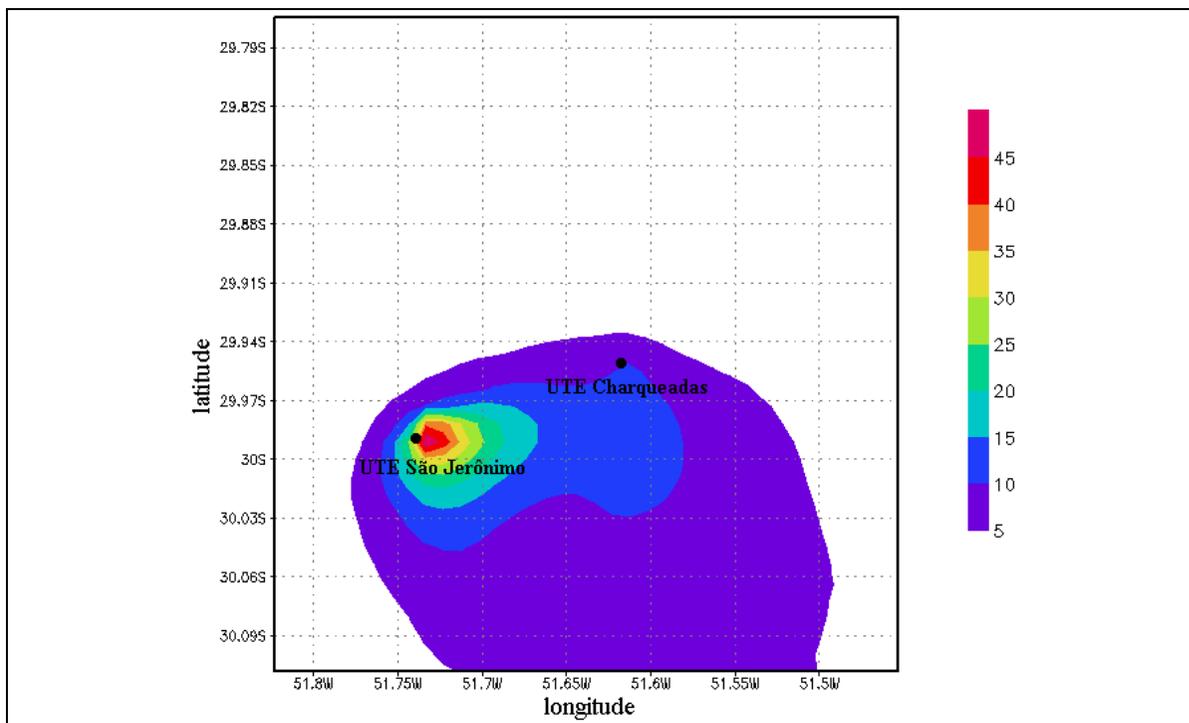


FIGURA 6.2.4.7: Valores médios de 24 horas para o dia 20/06/2003 – Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

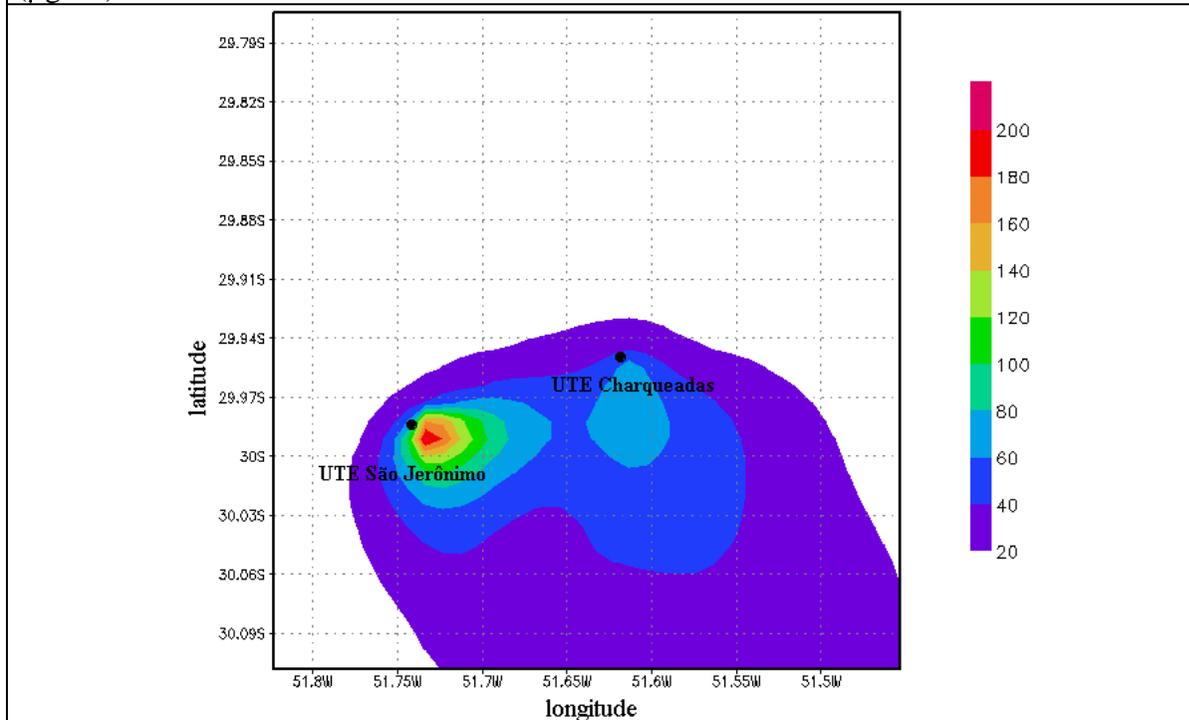


FIGURA 6.2.4.8: Valores médios de 24 horas para o dia 20/06/2003 – Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

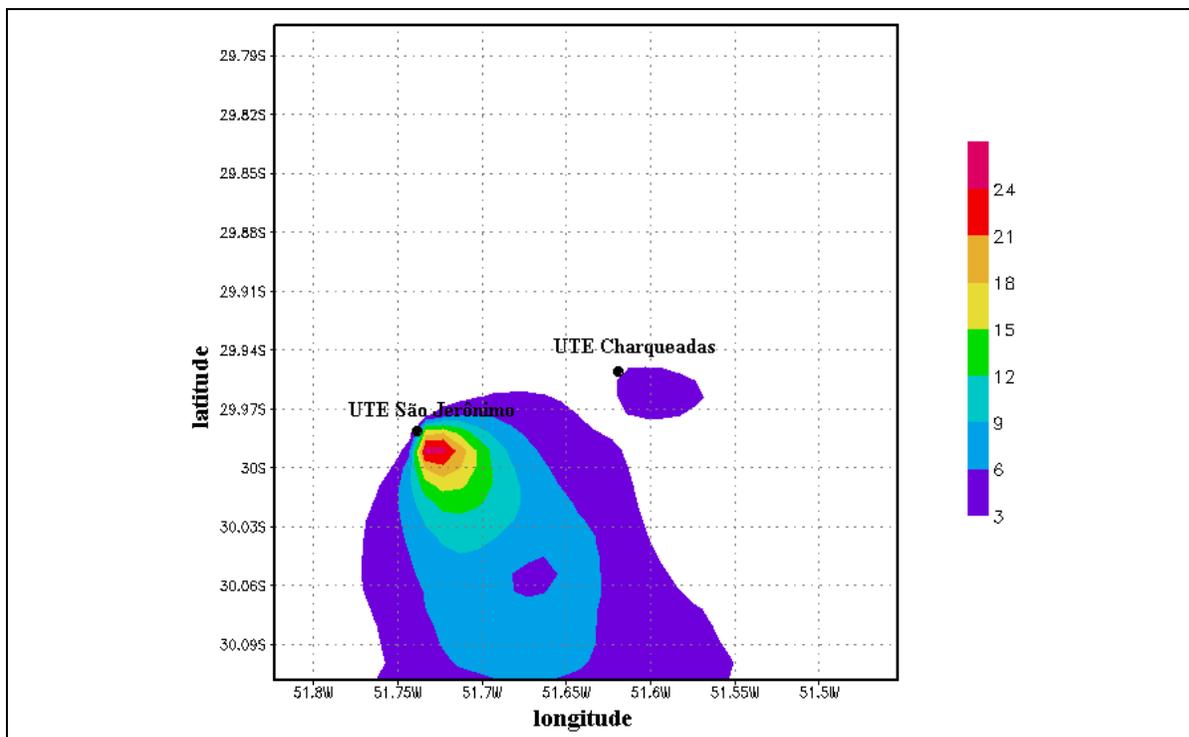


FIGURA 6.2.4.9: Valores médios de 24 horas para o dia 21/06/2003 –Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

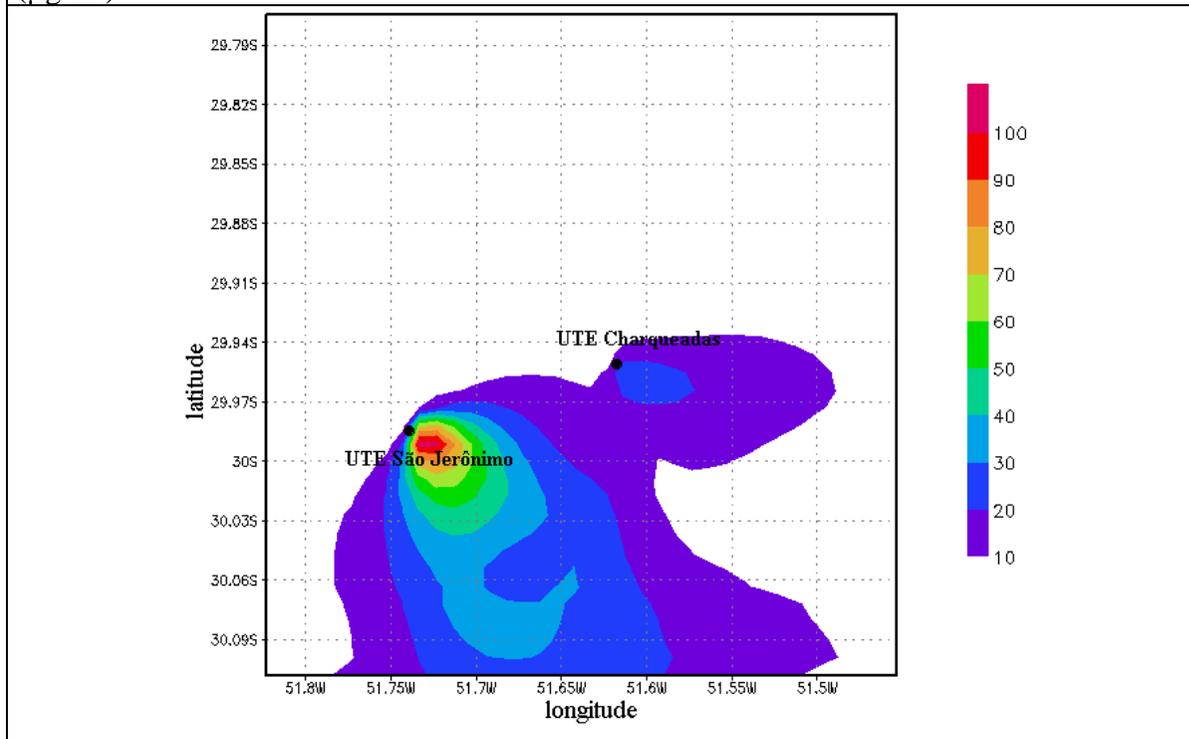


FIGURA 6.2.4.10: Valores médios de 24 horas para o dia 21/06/2003 – Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

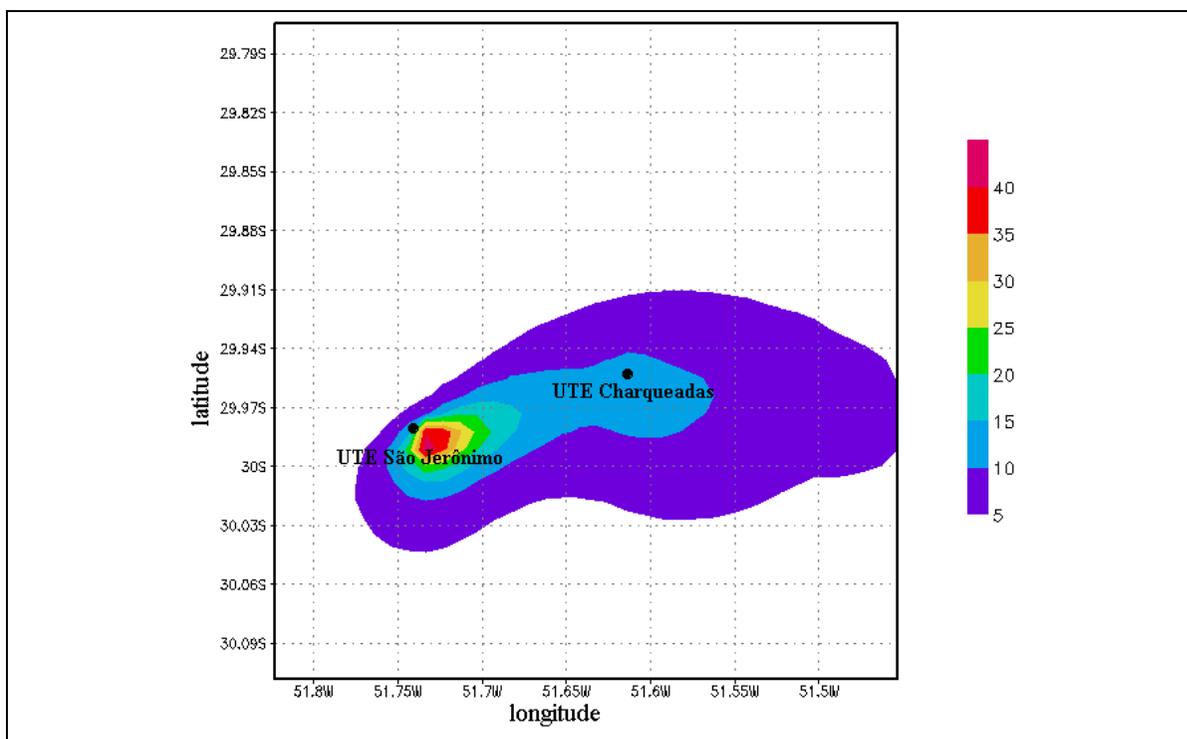


FIGURA 6.2.4.11: Valores médios de 24 horas para o dia 22/06/2003–Material Particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

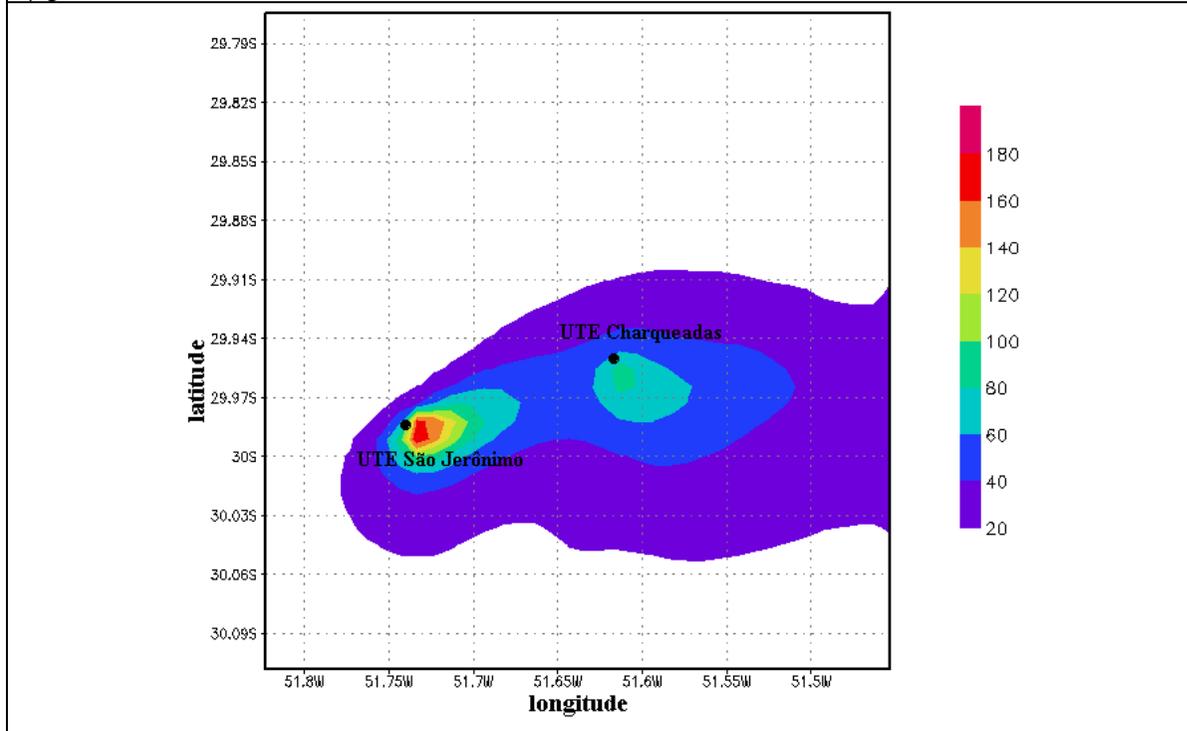
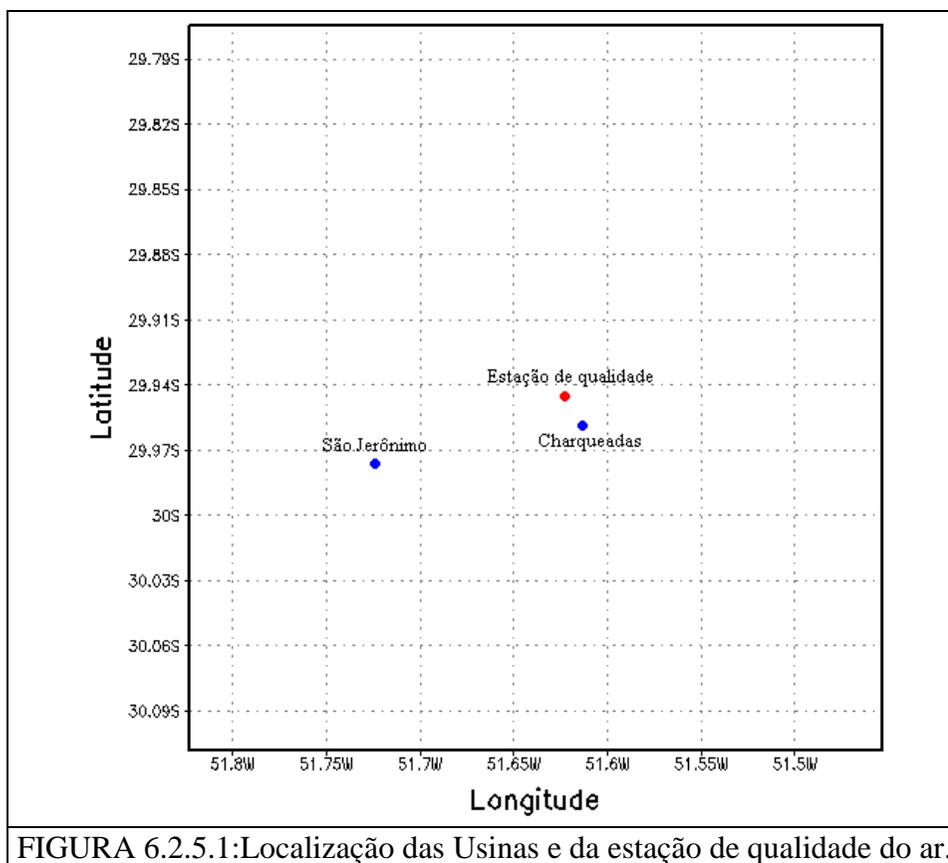


FIGURA 6.2.4.12: Valores médios de 24 horas para o dia 22/06/2001–Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Os resultados a seguir mostram, a comparação das concentrações do material particulado e do dióxido de enxofre, observados na estação de qualidade do ar, localizada na cidade de Charqueadas. Com as concentrações obtidas através da simulação do modelo RAMS.

A figura 6.2.5.1 mostra a localização de cada uma das fontes e da estação de qualidade do ar, localizada próxima à Usina Termelétrica de Charqueadas.



A tabela 6.2.5.1 apresenta as médias diárias das concentrações do material particulado e do dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), para os dias 18 e 22 de junho de 2003, os quais tinham dados da estação de monitoramento de qualidade do ar.

Tabela 6.2.5.1: Comparação entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo.

	Material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado
18/06/2003	29.0	3.52	28.36	29.77
22/06/2003	34.0	11.15	26.83	52.65

Comparando os dados observados com os dados simulados através da modelagem, podemos observar na tabela 6.2.5.1, que os resultados das concentrações do material particulado simulados pelo modelo apresentaram-se abaixo do observado. Esta diferença deve-se ao fato do material particulado, ao redor da estação de qualidade do ar, não ser originado somente pelas emissões das usinas, enquanto que o modelo considera somente o que é emitido pela mesma.

No dia 18 de junho, o dióxido de enxofre apresentou um resultado bastante satisfatório com uma diferença de 4,97 % entre o simulado e o observado. Neste dia os ventos predominaram de sudeste fazendo com que a pluma se deslocasse para leste-nordeste (figuras 6.2.4.3 e 6.2.4.4). A pressão atmosférica variou entre 1019 e 1016 hPa e a umidade relativa variou entre 70 e 95 %.

Para o dia 22 de junho observou-se uma diferença maior, da ordem de 96 % entre o observado e o simulado. Mas não foi possível fazer uma análise mais detalhada do que ocorreu devido à ausência de dados meteorológicos no local, a falha poderia estar tanto no modelo quanto na coleta dos dados. Este dia era de condição Pré –frontal. Conforme as saídas do modelo RAMS, no início da manhã a umidade relativa (figura 6.2.2.7) estava em torno de 100 %, e no decorrer do dia a umidade caiu a 60 %. A pressão atmosférica (figura 6.2.2.8) estava em torno de 1018 hPa e a intensidade do vento (figura 6.2.2.9) era fraca da ordem de 2 m/s.

CAPITULO VII – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1.CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado o estudo da dispersão de poluentes nas usinas termelétricas de Charqueadas e São Jerônimo. Analisando as condições meteorológicas favoráveis e desfavoráveis a dispersão de poluentes. O período de estudo foi do dia 17 de junho de 2003 a 22 de junho de 2003. Neste período houve a passagem de um sistema frontal, sendo possível assim, avaliar a dispersão dos poluentes em condições pré-frontal, frontal e pós-frontal.

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o modelo RAMS para simular as condições meteorológicas e também as concentrações de poluentes emitidas pelas termelétricas através de uma subrotina de dispersão que foi acoplada ao modelo, contendo as equações para o cálculo das concentrações dos poluentes, localização e características de cada uma das fontes tais como: altura das fontes e taxas de emissões do óxido de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e material particulado.

Com base na análise das condições sinóticas, foi estudado cada um dos dias detalhadamente para identificar o comportamento dos poluentes para cada um deles.

Nos dias classificados como pré-frontal e pós-frontal as concentrações do material particulado, dióxido de enxofre e do óxido de nitrogênio, atingiram seus valores máximos da ordem de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $220 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, pelo fato da umidade

relativa do ar estar bastante baixa em torno de 60%, pressão atmosférica da ordem de 1021 hPa e ventos fracos.

No dia classificado como frontal, as concentrações estavam praticamente nulas, devido à passagem do sistema frontal que causou a queda na pressão atmosférica, aumento da umidade relativa (que chegou a 100% em Charqueadas e da ordem de 88 % em São Jerônimo) e também pelo fato da ocorrência de precipitação atmosférica neste dia. A precipitação não só remove o material particulado como ajuda na dissolução de gases como o SO₂ e o NO_x.

O pico de concentração ocorreu no dia 20 de junho, por volta das 14:00 UTC. Para este horário, foi verificado o comportamento da pluma de poluentes. Na usina termoeétrica de Charqueadas, os maiores valores de concentração ocorreram na altura da fonte, entre o 2º (47,2 metros) e o 3º (86,6) níveis do modelo, e as concentrações se espalharam aproximadamente até 180 metros de altura. Em São Jerônimo, como a altura da fonte é menor (45 metros), as concentrações ficaram retidas mais próximas ao solo.

Ao comparar os resultados simulados pelo modelo com os dados coletados na estação de qualidade do ar, observou-se que os resultados obtidos pelo modelo apresentaram valores abaixo do observado. Isso ocorreu porque o modelo leva em conta somente às emissões da usina e não o material particulado ao redor da estação como, por exemplo, a poeira presente no ar.

Com relação ao dióxido de enxofre, no dia 18 de junho, o modelo apresentou um bom resultado, com uma diferença de 4,97% entre o simulado e o observado. A diferença maior ocorreu no dia 22 de junho, da ordem de 96 % entre o observado e o simulado. Mas não foi possível fazer um estudo mais profundo devido à ausência de dados meteorológicos no local. Para saber se realmente a falha estava na simulação dos resultados ou na coleta dos dados.

7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos por este estudo, ficam as seguintes sugestões para trabalhos futuros.

- Fazer uma campanha de amostragem por um determinado período, para fins de comparação e assim obter melhores resultados.
- Estudar as diferentes termoelétricas no Estado, para obter o impacto das usinas de acordo com o tipo de combustível utilizado para a geração de energia elétrica.
- Fazer um estudo da análise da trajetória dos poluentes para verificar onde os poluentes emitidos pelas usinas se depositam e qual o caminho que eles percorrem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, R. C. M., 2000. Estudo da dispersão de SO₂ emitido pela Usina Termelétrica de Candiota-RS, Brasil. Tese de Doutorado. USP-IAG. São Paulo.
- AVISSAR, R., PIELKE, R.A., 1989. A Parameterization of Heterogeneous Land Surfaces for Atmospheric Numerical Models and its Impact on Regional Meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2113-2136.
- BARNA, M. G GIMSON, N. R., 2002. Dispersion modelling of a wintertime particulate pollution episode in Christchurch, New Zealand. *Atmospheric Environment* 36. 3531–3544.
- BORBA, S. V., ALFONSIN, B., GONZÁLES, S., CUNHA, D., ROCHA, R., 2003. Região Metropolitana de Porto Alegre caracterização sócio espacial. Projeto FINEP/HABITARE – Edital 04, 3-48.
- BORREGO, C., TCHEPEL, O., COSTA, A. M., AMORIN, J. H., MIRANDA, A. J., 2003. Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale. *Atmospheric Environmental*, 37, 5197-5205.

- CARVALHO, J.C., 1999: 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.
- CCOYLLO, O. R. S. 1998: Interação entre poluentes atmosféricos e a circulação local na cidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado. USP-IAG. São Paulo.
- CHEN, C., COTTON, W.R., 1983. A One-Dimensional Simulation of the Stratocumulus-Capped Mixed Layer. *Boundary-Layer Meteorol.*, 25, 289-321.
- CLARK, T.L., 1977. A Small Scale Dynamic Model using a Terrain Following Coordinate Transformation. *J. Comput Phys.*, 24, 186-216.
- CUNHA, R. M. P., 2002. Estudo do transporte de poluentes na região do Pólo Petroquímico, localizado em Triunfo –RS. Dissertação de Mestrado CEPSRM-UFRGS.
- ELBIR, T., 2003. Comparison of model predictions with data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environmental*, 37, 2149-2157.
- FERREIRA, M.S, BARBARIOLI, A.B, VELOSSO, M.F., CATALDI, M., PIMENTEL, L.C.G., 2003. Desenvolvimento de um sistema combinado de modelos meteorológicos e de qualidade do ar. X Congresso Latinoamericano e Ibérico de Meteorologia e II Congresso Cubano de Meteorologia.
- FREITAS, E. D., 2003. Circulações locais em São Paulo e sua influência com a dispersão de poluentes. Tese de Doutorado. USP-IAG. São Paulo.
- GAL-CHEN, SOMERVILLE, R.C.J., 1975. Numerical Solution of the Navier Stokes equations with Topography. *J. Comput. Phys.*, 17, 276-310.
- JAZCILEVICH, A. D., GARCÍA, A. R., RUÍZ-SUÁREZ, L. G. A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. *Atmospheric Environment* 37 (2003) 183–193
- KLEMP, J.B., DURRAN, D.R., 1983. An Upper Boundary Condition Permitting Internal Gravity Wave Radiation in Numerical Mesoscale Models. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 430-444.
- KLEMP, J. B., WILHELMSON, R. B., 1978 The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1070-1096.
- KUO, H.L., 1974. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. *J. Atmos. Sci.* , 31, 1232-1240.

- LIU, H. CHAN, J. C. L. 2002. An investigation of air-pollutant patterns under sea-land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 36, 591-601.
- LOUIS, J.F., 1979. A Parametric Model of Vertical Eddy Fluxes in the Atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol.*, 17, 187-202.
- MAHRER, Y, PIELKE, R.A., 1977. A Numerical Study of the Airflow over Irregular Terrain. *Beitrage zur Physik der Atmosphäre*, 50, 98-113.
- MARTILLIA, A., ROULETA, Y. A., JUNIERA, M., KIRCHNERA, F., ROTACHB, M. W., CLAPPIERA, A. (2003) On the impact of urban surface exchange parameterizations on air quality simulations: the Athens case. *Atmospheric Environment*, 37, 4217-4231
- MESINGER, F., ARAKAWA, A., 1976. Numerical Methods used in Atmospheric Models. GARP Publications Series, n° 14, WMO/ICSU Joint Organizing Committee, 64 pp.
- MOLINARI, J., 1985. A general form of Kuo's cumulus parameterization. *Mon. Wea. Ver.*, 113, 1411-1416.
- ORLANSKI, I., 1976. A Simple Boundary Condition for Unbounded Hyperbolic Flows. *J. Comput Phys.*, 21, 251-269.
- PARK, J., CHO, S.Y. 1998: A long range transport of SO₂ and sulfate between Korea and east china. *Atmospheric Environment* 32, 2745 – 2756.
- PARK, S.U., KIM, C.H. 1999: A numerical model for the simulation of SO₂ concentrations in the Kyongin Region, Koorea. *Atmospheric Environmental* 33, 3119 -3132.
- SETZER, A., I.F.A. CAVALCANTI, B.C. MARCELINO. 1980. Influências meteorológicas na poluição atmosférica em São Paulo. São José dos Campos. INPE – 1669-RPE/107. pp. 36.
- TREMBACK, C.J., KESSLER, R., 1985. A Surface Temperature and Moisture Parameterization for use in Mesoscale Numerical Models. Preprints, 7th Conference on Numerical Weather Prediction, Montreal, Canada, AMS.
- TREMBACK, C.J, 1990. Numerical Simulation of a Mesoscale Convective Complex: Model Development and Numerical Results. Ph.D. Dissertation, Atmos. Sci. Paper N° 465, Colorado State University, Dept. of Atmospheric Science, Fort Collins.
- TRIPOLI, G.J., COTTON, W.R., 1982. The Colorado State University three-dimensional Cloud Meso-scale Model – 1982. Part I: General Theoretical Framework and Sensitivity Experiments. *J. de Rech. Atmos.*, 16, 185-220.

- WANG, W. AND JIANG, W. 1998. 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.
- YAMADA, T., BUNKER, S., MOSS, M. 1991. Numerical simulations of atmospheric transport and diffusion over coastal complex terrain. *Journal of Applied Meteorology*, 31, 565-578.
- YOSHIKADO, H. & TSUCHIDA, M. 1996. High levels of winter air pollution under the influence of the urban heat island along the shore of Tokyo Bay. *J. Appl. Meteor.*, 35, 1804-1813.