

Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional

Estudo e análise da Dispersão de Poluentes: um estudo de caso para a cidade de Rio Grande - RS

Gerson Alberto Leiria Nunes

Rio Grande, 17 de Janeiro de 2013

Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional

Estudo e análise da Dispersão de Poluentes: um estudo de caso para a cidade de Rio Grande - RS

Gerson Alberto Leiria Nunes

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Programa de Pós-
Graduação em Modelagem Computacional,
como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Modelagem Computacional.

Orientador(a): Prof. Dra. Diana Francisca Adamatti

Rio Grande, 17 de Janeiro de 2013

Este trabalho foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional e aprovado em sua forma final pelo orientador.

Prof. Dra. Diana Francisca Adamatti

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Diana Francisca Adamatti

Centro de Ciências Computacionais – FURG (Orientadora)

Prof. Dr. Antônio Carlos da Rocha Costa

Centro de Ciências Computacionais – FURG

Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Escola de Engenharia - FURG

Prof. Dra. Aline Brum Loreto

Centro de Desenvolvimento Tecnológico – UFPEL

Prof. Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn

Departamento de Engenharia Agrícola e Solos – UFAM

Dedico este trabalho a minha família que sempre me apoiou
nos momentos mais difíceis da minha vida.

Agradecimentos

Agradeço a minha orientadora Diana Francisca Adamatti, pela infraestrutura de pesquisa, pela organização, pela confiança, pelos conselhos, por ter me apoiado, por ser uma pessoa aberta a discussões, positiva e divertida.

Agradeço a minha família por ter me ensinado os mais importantes valores e pelo apoio nessa batalha.

Agradeço aos meus colegas do laboratório: Alexander Gularte, Camila Thomasi, Márcio Jugueiro, André Rosa, Iverton Santos, Thiago Rodrigues, Alexandre Hubner, Míriam Born e Flávia dos Santos que sempre estão dispostos a discutir, cooperar e trabalhar em prol das metas de trabalho, das publicações e também pela amizade.

Agradeço ao amigo meteorologista Gustavo Guterres Ribeiro pelo auxílio em algumas das figuras desse trabalho.

Agradeço aos professores: Prof. Dr. Mário Rocha Retamoso e Prof. Dr. Antônio Carlos da Rocha Costa pelas excelentes e empolgantes aulas. Agradeço a Prof. Dra. Nisia Krusche e o Prof. Dr. Jonas Carvalho pelo auxílio e esclarecimento de dúvidas quanto aos aspectos meteorológicos.

Agradeço também a todos os colegas de curso que estudaram comigo: Martiela Freitas, Thiago Asmus, Carlos Madsen, Anderson Spolavori e Eduardo Kirinus. Obrigado pelo auxílio na compreensão dos estudos.

Um forte abraço!

You never hesitate to tackle the most difficult problems.

Phrase from fortune linux shell command.

Resumo

O trabalho proposto estuda o fenômeno de dispersão de poluentes na atmosfera, o qual pode influenciar a qualidade do ar, a saúde da população e o meio ambiente como um todo. Estudou-se alguns modelos computacionais de simulação desse fenômeno. Implementou-se um modelo hipotético de evolução dos impactos e testou-se dois modelos já existentes: ISC (Industrial Source Complex) e o CALPUFF (Californian Puffs). Desenvolveu-se um conjunto de interfaces amigáveis e rotinas de pós-processamento dos dados de saída dos modelos. Facilitando assim o uso e a análise dos resultados obtidos através de simulações computacionais. Realizou-se um estudo de caso para a cidade de Rio Grande - RS, onde diversos cenários foram testados, variando tanto os períodos do ano quanto a quantidades de fontes poluidoras. Os resultados obtidos, mesmo preliminares, demonstram que durante os períodos simulados ocorrem situações de alerta, onde os níveis de poluição definidos pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) são ultrapassados.

Palavras-chaves: modelos de simulação; dispersão de poluentes na atmosfera; Rio Grande - RS.

Abstract

The proposed work studies the atmospheric pollutants' dispersion phenomenon, which can influence air quality, population health and the environment as a whole. We studied some computer simulation models for this phenomenon. Implemented a hypothetical impacts evolution model and tested two existing models: ISC (Industrial Source Complex) and CALPUFF (Californian Puffs). Developed a set of friendly interfaces and post-processing routines to the models' output data. Thus facilitating the use and analysis of the results obtained through computer simulations. We conducted a case study for the city of Rio Grande - RS, where different scenarios were tested, varying both periods of the year as the amounts of pollutant sources. The results, even preliminary, demonstrate that occur during periods simulated alert situations where pollution levels established by CONAMA (National Environment Council) are exceeded.

Keywords: simulation models; atmospheric pollutants dispersion; Rio Grande - RS.

Lista de Figuras

2.1	<i>Variação anual do ângulo zenital para Rio Grande - RS para o ano de 2010 [CASIO, 2012].</i>	10
2.2	<i>Variação diária do ângulo zenital para Rio Grande - RS.</i>	11
2.3	<i>Campo de pressão atmosférica brasileira.</i>	14
2.4	<i>Campo de pressão atmosférica sobre o estado do Rio Grande do Sul.</i>	14
2.5	<i>Variação de temperatura atmosférica de acordo com a altura [Liou, 2002].</i>	15
2.6	<i>Divisões da Camadas Limite Planetária adaptado de [da Costa, 2004].</i>	17
2.7	<i>Modelo de pluma Gaussiana [de Moraes, 2004].</i>	20
2.8	<i>Decaimento das variáveis no tempo.</i>	27
2.9	<i>Gráfico da Função U variando no tempo.</i>	28
2.10	<i>Malha de diferenças finitas (esq.) e malha de elementos finitos (dir.) [Kirinus et al., 2010]</i>	29
3.1	<i>Diagrama de Fluxo de Dados da versão hipotética [Nunes et al., 2010].</i>	37
3.2	<i>Mapa com 14 municípios do estado de São Paulo. Os números representam o índice de cada região na matriz de adjacência [Nunes et al., 2010].</i>	38
3.3	<i>Matriz de adjacência gerada pelo mapa [Nunes et al., 2010].</i>	38
3.4	<i>Grafo gerado a partir da matriz de adjacência [Nunes et al., 2010].</i>	39
3.5	<i>Objeto que representa uma indústria [Nunes et al., 2010].</i>	40
3.6	<i>Mapa do estado de São Paulo com algumas indústrias inseridas [Nunes et al., 2010].</i>	41
3.7	<i>Cenário após 10 gerações [Nunes et al., 2010].</i>	42
3.8	<i>Cenário após 18 gerações [Nunes et al., 2010].</i>	42
3.9	<i>Diagrama de Fluxo de Dados do modelo ISC [Thomasi et al., 2011].</i>	45

LISTA DE FIGURAS

3.10	<i>Mapa com a localização da fonte emissora.</i>	45
3.11	<i>Pontos receptores e seus respectivos valores [Thomasi et al., 2011].</i>	47
3.12	<i>Concentração de Partículas Totais em Suspensão na atmosfera [Thomasi et al., 2011].</i>	47
3.13	<i>Mapa mostrando a distância crítica da fonte emissora [Thomasi et al., 2011].</i>	48
3.14	<i>Diagrama de Fluxo de Dados completo do modelo não-estacionário CALPUFF [Thomasi et al., 2012].</i>	50
3.15	<i>Diagrama de Fluxo de Dados do modelo CALPUFF no Matlab, [Thomasi et al., 2012].</i>	52
3.16	<i>Resultados apresentados pelo módulo de manipulação dos mapas.</i>	53
3.17	<i>Resultados em 3D apresentados pelo módulo de manipulação dos mapas.</i>	53
3.18	<i>Interface inicial onde o usuário deve escolher o modelo que deseja executar [Nunes et al., 2012].</i>	54
3.19	<i>O usuário precisa definir o nome da simulação [Nunes et al., 2012].</i>	54
3.20	<i>Interface gráfica do modelo hipotético [Nunes et al., 2012].</i>	55
3.21	<i>Interface gráfica do modelo ISC [Nunes et al., 2012].</i>	56
3.22	<i>Interface do modelo Calpuff - configuração do pré-processador TERREL [Nunes et al., 2012].</i>	56
3.23	<i>Interface para informar arquivos de entrada: meteorológico e de configuração do modelo CALPUFF [Nunes et al., 2012].</i>	57
3.24	<i>Interface Gráfica para informar arquivos para o pós-processador CAL-POST [Nunes et al., 2012].</i>	58
3.25	<i>Interface Gráfica para informar a posição da indústria [Nunes et al., 2012].</i>	58
3.26	<i>Interface Gráfica para informar o arquivo(shape) da região de interesse [Nunes et al., 2012].</i>	59
4.1	<i>Dados interpolados de cobertura de nuvens.</i>	63
4.2	<i>Localização das empresas.</i>	69
4.3	<i>Concentração média de CO durante Janeiro/2010.</i>	70

LISTA DE FIGURAS

4.4	<i>Concentração média de SO₂ durante Janeiro/2010.</i>	71
4.5	<i>Concentração média de NO₂ durante Janeiro/2010.</i>	71
4.6	<i>Concentração média de H₂S durante Janeiro/2010.</i>	72
4.7	<i>Concentração média de PM₁₀ durante Janeiro/2010.</i>	72
4.8	<i>Concentração máxima de CO durante Janeiro/2010.</i>	73
4.9	<i>Concentração máxima de SO₂ durante Janeiro/2010.</i>	74
4.10	<i>Concentração máxima de NO₂ durante Janeiro/2010.</i>	74
4.11	<i>Concentração máxima de H₂S durante Janeiro/2010.</i>	75
4.12	<i>Concentração máxima de PM₁₀ durante Janeiro/2010.</i>	75
4.13	<i>Concentração de NO₂ durante 11/Janeiro/2010.</i>	77
4.14	<i>Concentração média de CO durante Julho/2010.</i>	78
4.15	<i>Concentração média de SO₂ durante Julho/2010.</i>	78
4.16	<i>Concentração média de NO₂ durante Julho/2010.</i>	79
4.17	<i>Concentração média de H₂S durante Julho/2010.</i>	79
4.18	<i>Concentração média de PM₁₀ durante Julho/2010.</i>	80
4.19	<i>Concentração máxima de CO durante Julho/2010.</i>	80
4.20	<i>Concentração máxima de SO₂ durante Julho/2010.</i>	81
4.21	<i>Concentração máxima de NO₂ durante Julho/2010.</i>	81
4.22	<i>Concentração máxima de H₂S durante Julho/2010.</i>	82
4.23	<i>Concentração máxima de PM₁₀ durante Julho/2010.</i>	82
4.24	<i>Concentração de NO₂ durante 15/Julho/2010.</i>	84

Lista de Tabelas

2.1	<i>Padrões de poluição do ar pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) [CONAMA, 1990].</i>	30
4.1	<i>Cobertura de nuvens e fator de redução de radiação na presença de nuvens adaptado de [Schnelle e Dey, 1999].</i>	62
4.2	<i>Comprimento da rugosidade da superfície adaptado de [Rohatgi e Nelson, 1994].</i>	63
4.3	<i>Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford-Turner adaptado de [Schnelle e Dey, 1999].</i>	67
4.4	<i>Vazões de emissão dos compostos químicos em g/s.</i>	68
4.5	<i>Características e localização das fontes poluidoras.</i>	68

Lista de Siglas

CI (*Camada Inercial*)

CLE (*Camada Limite Estável*)

CLP (*Camada Limite Planetária*)

CLS (*Camada Limite Superficial*)

CM (*Camada de Mistura*)

CT (*Camada de Transição*)

CONAMA (*Conselho Nacional do Meio Ambiente*)

DFD (*Diagrama de Fluxo de Dados*)

EDP (*Equação Diferencial Parcial*)

EPA (*Environmental Protection Agency*)

FEPAM (*Fundação Estadual de Proteção Ambiental*)

FURG (*Universidade Federal de Rio Grande*)

GIS (*Geographic Information System*)

GPS (*Global Positioning System*)

ISC (*Industrial Source Complex*)

PPGMC (*Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional*)

RSSOC (*Rede Social de Simulação Social*)

LISTA DE TABELAS

SAD (*Sistema de Apoio à Decisão*)

SEMA (*Secretaria Estadual do Meio Ambiente*)

SIPAM (*Sistema de Proteção da Amazônia*)

SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)

TI (*Tecnologia da Informação*)

UTM (*Universal Transference Mercator*)

WMS (*Web Map Service*)

Conteúdo

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Siglas

1	Introdução	1
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização	3
2	Revisão bibliográfica	4
2.1	Gerenciamento de Recursos Naturais	4
2.1.1	Problemas computacionais no Gerenciamento de Recursos Naturais	5
2.1.2	<i>Geographic Information System</i> (GIS)	6
2.1.3	Sistemas de Alto Desempenho	7
2.2	Princípios meteorológicos básicos	8
2.2.1	A Radiação Solar	8
2.2.2	Os Ventos	10
2.2.3	A temperatura do ar	12
2.2.4	A Pressão Atmosférica	13
2.2.5	Camada Limite Planetária	16

2.3	Dispersão de Poluentes	17
2.3.1	Modelo Euleriano	18
2.3.2	Modelo Gaussiano	20
2.3.3	Resolução Analítica da Equação da Advecção e Difusão	21
2.3.4	Simulação Computacional em Matlab	24
2.3.5	Método das Diferenças Finitas	26
2.3.6	Método de Elementos Finitos	27
2.4	Aspectos ambientais e sociais	29
3	Modelos de simulação	32
3.1	Tecnologias utilizadas	32
3.1.1	Matlab	32
3.1.2	ArcGIS	33
3.1.3	SVN	34
3.2	Modelos desenvolvidos	35
3.2.1	Modelo Hipotético	36
3.2.2	Modelo ISC	42
3.2.3	Modelo CALPUFF	48
3.2.4	Interfaces Gráficas Desenvolvidas	54
4	Testes de simulação e resultados obtidos	60
4.1	Dados de entrada e algoritmos	60
4.1.1	Cálculo da altura da camada de mistura	61
4.1.2	Cálculo da classe de estabilidade	66
4.2	Cenários de simulação	66
4.3	Análise e discussão dos resultados obtidos	69
4.3.1	Resultados para Janeiro de 2010	69
4.3.2	Resultados para Julho de 2010	76
4.3.3	Considerações sobre as simulações realizadas	83
5	Conclusão	86
5.1	Artigos publicados	88

<i>CONTEÚDO</i>	iii
5.2 Trabalhos Futuros	89
Bibliografia	96
A Anexos	97
A.1 Anexo I - Simulação da equação de advecção e difusão	97
A.2 Anexo II - Cálculo da altura da camada de mistura e as classes de estabilidade	98

Capítulo 1

Introdução

Segundo [Fuller et al., 2007], a gerência dos recursos naturais consiste em administrar o uso de plantas, terras e animais provendo qualidade de vida à população sem comprometer as gerações futuras. Isso requer que governo, cidadãos e outros atores interajam entre si. Neste contexto, a simulação computacional surge como um mecanismo que reproduz sistemas próximos da realidade, além de apoiar na previsão de consequências futuras e auxiliar na tomada de decisão [Filho, 2008]. A vantagem dessas ferramentas consiste em avaliar os riscos que serão causados sem a necessidade de causar perturbação na região que está sendo avaliada.

Devido ao crescente aumento populacional e às novas tecnologias, surge a necessidade de criar meios para a preservação dos recursos naturais existentes. Outro problema encontrado relaciona-se ao rápido crescimento industrial e tecnológico que causa uma excessiva emissão de poluentes na atmosfera, provocando sérios danos ambientais e à saúde da população. Mesmo que as substâncias emitidas na atmosfera pelas indústrias e veículos sejam consideradas poluentes somente quando suas concentrações atingem níveis elevados o suficiente para provocar efeitos nocivos.

Esse trabalho propõe o estudo da dispersão de poluentes atmosféricos através da aplicação de modelos computacionais. O sistema a ser desenvolvido pretende identificar os locais atingidos pela emissão de poluentes, bem como o potencial de contaminação dos ambientes naturais adjacentes. Através dos dados obtidos pelos modelos pode-se auxiliar as comunidades e órgãos envolvidos para a correta tomada de decisão, contribuindo para o aprendizado e análise de políticas públicas relacionadas ao meio ambiente.

Parte da iniciativa desse trabalho é proveniente do projeto PRONEX da FAPERGS - CNPq que tem como tema central sistemas sociais. A ideia é apoiar os setores público e privado através do desenvolvimento de ferramentas para simulação e teste de políticas e ações ligadas à área da computação social. Este projeto divide-se em quatro eixos: mobilidade urbana, gerenciamento de situações de emergência, transversal e meio ambiente.

O trabalho enquadra-se no eixo do meio ambiente e busca a utilização de métodos computacionais para estudar, modelar e avaliar resultados provenientes da simulação e dos testes de modelos de dispersão atmosféricos na região de Rio Grande - RS e usar esses modelos em um SAD (Sistema de Apoio à Decisão), como ferramenta para educação ambiental. Historicamente, a cidade possui problemas com a poluição e qualidade do ar e atualmente existem poucos trabalhos que exploram esses cenários. Esta também é cidade na qual vivemos, que atualmente destaca-se pelo crescimento da indústria naval, e acredita-se que o desenvolvimento e uso de ferramentas computacionais possam auxiliar no entendimento e avaliação dos problemas ambientais que por aqui ocorrem.

1.1 Motivação

A motivação deste trabalho está relacionada com os aspectos humanos e ambientais envolvidos no processo de dispersão de poluentes das fontes emissoras de uma determinada região de interesse. Os motivos principais deste trabalho são:

- Avaliar quais são as regiões mais impactadas quanto à dispersão de poluentes produzida pelas fontes emissoras da região;
- Auxiliar as comunidades e os demais órgãos envolvidos para a correta tomada de decisão quanto à implantação de novas fontes poluidoras.
- Educar e alertar as comunidades sobre os problemas causados pela dispersão de poluentes na atmosfera;
- Auxiliar os setores públicos e privados na avaliação e escolha dos possíveis locais da inserção de novas indústrias através do uso de um Sistema de Apoio a Decisão (SAD).

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um simulador para modelar e avaliar a dispersão de poluentes na atmosfera, bem como alertar a população da região sobre os impactos e riscos ambientais, problemas sociais e de saúde que podem ocorrer nas proximidades de fontes poluidoras.

Os objetivos específicos são:

- Estudar modelos de dispersão de poluentes;
- Estudar as ferramentas computacionais para simulação de poluentes;
- Desenvolver uma interface gráfica do usuário, facilitando a utilização do mesmo;
- Desenvolver um simulador de dispersão de poluentes, utilizando modelos já desenvolvidos;
- Documentar o código e as respectivas funções;
- Avaliar os resultados obtidos pelo modelo;
- Publicar em eventos a evolução deste trabalho.

1.3 Organização

Este texto está organizado em cinco capítulos. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica realizada sobre os assuntos relacionados ao trabalho: gerenciamento de recursos naturais, princípios meteorológicos básicos, dispersão de poluentes e os aspectos ambientais e sociais. No capítulo 3 são apresentados as tecnologias utilizadas e os modelos estudados, testados e analisados. No capítulo 4 são apresentados os cenários de teste, os experimentos e a análise dos respectivos resultados. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões, os trabalhos futuros e as contribuições deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Nesse capítulo serão apresentados alguns assuntos que foram estudados como base para este trabalho. Serão apresentados assuntos relacionados ao gerenciamento de recursos naturais, princípios meteorológicos básicos, dispersão de poluentes e aspectos ambientais e sociais.

2.1 Gerenciamento de Recursos Naturais

Segundo [Fuller et al., 2007], os processos ecológicos e ambientais que regem os ecossistemas são de difícil gerenciamento, pois envolvem vários componentes que operam em escalas desiguais temporais e espaciais. Para gerenciar reservas naturais, os biólogos utilizam algumas estratégias que agregam tecnologias emergentes de dados, como controle em tempo real, sensores e GPS (*Global Positioning System*).

Esses avanços melhoram a resolução das informações espaciais e temporais. Entretanto, geram um grande volume de dados. Grandes fluxos de dados demandam: análise, armazenamento e comunicação [Fuller et al., 2007]. Além disso, diferentes tecnologias e plataformas dificultam o compartilhamento e integração dos dados provenientes de diferentes fontes.

Para solucionar esses desafios, os gestores de recursos naturais buscam na computação soluções. O rápido avanço de *softwares* e arquiteturas projetados para explorar melhorias em redes, interoperabilidade e gestão de dados tem revolucionado o gerenciamento de recursos naturais. Estes programas têm crescido rapidamente em tamanho, complexidade

e poder computacional.

O gerenciamento de recursos está cada vez mais dependente de suportes computacionais como GIS (*Geographic Information Systems*), sistemas de alto desempenho para a modelagem de sistema integrado e geograficamente distribuídos e tecnologias de computação em nuvem.

Segundo [Williams et al., 2006], a *ecoinformatica* é o uso de métodos computacionais para gerenciar e estudar dados ecológicos. Isso cria oportunidades para que os profissionais de TI busquem abordagens para armazenamento de dados e para que construam *softwares* e protocolos necessários ao gerenciamento de dados.

2.1.1 Problemas computacionais no Gerenciamento de Recursos Naturais

Os problemas computacionais relacionados à gestão de recursos naturais podem ser classificados em três grandes áreas [Fuller et al., 2007]:

- Gerenciamento e comunicação de dados;
- Análise de dados;
- Otimização e controle.

Cada uma dessas áreas contém uma diversidade de problemas com importância econômica, social e política. Porém, um problema pode envolver as três áreas, por exemplo, o controle de espécies exóticas que depende da coleta de informações sobre os organismos (gerenciamento e comunicação de dados), compreensão dos padrões temporais e espaciais (análise de dados) e as estratégias para controlar a população dessas espécies exóticas (otimização e controle) [Adamatti, 2010].

Os avanços tecnológicos e a informatização criaram a necessidade de um gerenciamento de dados mais eficaz. Imagens de satélite, GPS, sensoriamento remoto e GIS geram grandes quantidades de informações ambientais. O volume de dados digitais cria desafios para organização, armazenamento e recuperação.

2.1.2 *Geographic Information System* (GIS)

A maioria dos problemas de recursos naturais envolve distribuição do uso de terra em bacias hidrográficas, proximidade de populações humanas em uma reserva, ou o grau de fragmentação de um *habitat* em um ecossistema. Os gestores de recursos naturais utilizam a tecnologia GIS para visualização, análise e modelagem de dados naturais para gestão e resolução de problemas. No entanto, o formato dos dados específicos e as ferramentas usadas para dados georreferenciados dificultam a integração do GIS com modelos dinâmicos, [Bonham-Carter, 1995].

O GIS foi desenvolvido para acelerar o processamento de objetos espaciais em um mapa digital. Seus desenvolvedores criaram formatos compostos de dados para armazenar informações geográficas para rápida indexação, georeferência e visualização.

Os GIS são *softwares* capazes de tratar, visualizar e manipular computacionalmente dados geográficos. Eles permitem que cada conjunto de dados seja apresentado em diferentes camadas. Essas camadas são compostas por um conjunto de características que são delimitadas por objetos geográficos, que possuem uma infinita variedade de formas, podendo ser representadas basicamente por três diferentes formas geométricas:

- Polígonos: representam algo que possua limites, tais como: países, estados, municípios, lagoas, lagos e outros;
- Linhas: representam objetos muito estreitos para serem consideradas polígonos, tais como: ruas, estradas, rios, ferrovias e outros;
- Pontos: são usados para representar objetos pequenos para serem considerados linhas ou polígonos, tais como: monumentos, hidrantes, postes e etc.

A união desses polígonos, linhas e pontos formam os dados vetoriais. A falta de formato dos dados e ajuste de desempenho é outro obstáculo para a incorporação do GIS em modelos dinâmicos. Uma abordagem viável é criar um formato de dados personalizado para extrair e armazenar informações específicas. Portanto, os GIS são utilizados como importantes ferramentas que podem revelar padrões, relações e tendências que nem sempre são óbvias nas bases de dados.

2.1.3 Sistemas de Alto Desempenho

Para melhor entender os sistemas naturais, os biólogos usam modelos para simular os processos que controlam os sistemas ecológicos em diferentes escalas espaciais e temporais. Os computadores modernos já possuem um *hardware* que explora a performance associada ao paralelismo [Armstrong et al., 2005]. Os *softwares* utilizados também possuem estruturas paralelas de dados.

O controle espacial é um campo da matemática que se preocupa com o comportamento de sistemas espacialmente explícitos, que demandam uma computação de alto desempenho. O gerenciamento de recursos utiliza técnicas de controle espacial com o objetivo de desenvolver estratégias de gerenciamento e controle de problemas.

De acordo com [Berman et al., 2003], o *grid computing* permite aos pesquisadores um acesso geográfico distribuído a computadores de alta performance e a pacotes de *softwares* científicos. *Grid computing* é focado na acessibilidade de aplicativos baseados em rede. A infraestrutura de gerenciamento de recursos naturais deve focar sobre o desenvolvimento personalizado de serviços para apoiar todo o ciclo de descoberta científica. Essa descoberta vai desde a coleta de dados em tempo real, a transmissão e o armazenamento de dados, bem como modelos usados como ferramentas de suporte a decisão para que haja uma gestão adaptativa.

As recentes colaborações entre cientistas da computação e gerentes de recursos naturais levaram a um progresso para superação de obstáculos. Ainda tem-se como desafios [Rezende, 2003]:

- Modelagem multiescala ou híbrida;
- Grande volume de dados devido a avanços tecnológicos de sensores;
- Desenvolvimento de respostas rápidas em tempo real para questões de emergência;
- Fornecimento de resultados úteis utilizando sistemas de alto desempenho;
- Padronizações para o desenvolvimento eficiente de programas de monitoramento.

2.2 Princípios meteorológicos básicos

De acordo com [Schnelle e Dey, 1999], a estrutura global de ventos ou a circulação geral determinam os movimentos de larga escala da atmosfera. No entanto algumas características físicas podem variar de acordo com a estação do ano, mas elas são em sua maioria parte relativamente constantes. Algumas características como latitude, longitude, as características do solo, elevação e inclinação do terreno e outras características geográficas determinam a evolução das condições micro-meteorológicas as quais o local está exposto [Tubelis, 1980] e [Wallace et al., 2006].

Finalmente, o resultado das ações descritas anteriormente são para determinar a temperatura e a pressão com a altitude. Além disso, a estrutura da temperatura da atmosfera é a base para distinguir as suas camadas e em última análise, para determinar as características de mistura da atmosfera.

A seguir serão descritos alguns princípios e características básicas da atmosfera que podem influenciar de forma positiva ou negativa na dispersão de poluentes. Este conjunto de princípios e características define as condições de turbulência, as quais resultam nas condições locais de dispersão.

2.2.1 A Radiação Solar

A radiação solar é definida como a energia eletromagnética radiante emitida pelo sol. Ela é a fonte primária de energia que o planeta dispõe, sendo que, a sua distribuição variável é a geratriz de todos processos atmosféricos. A atmosfera terrestre ajuda a enfraquecer os raios solares que chegam a superfície pelos fenômenos físicos conhecidos por: difusão, absorção e reflexão [Schnelle e Dey, 1999].

A difusão está relacionada ao espalhamento espectral da luz ocasionado ao atravessar as partículas da atmosfera, tais como: moléculas dos gases, cristais, vapor d'água e demais partículas que constituem o ar atmosférico. O céu parece ser azul pois há mais espalhamento de luz azul que das outras cores que ficam em maiores comprimentos de onda do espectro visível.

A absorção é feita por certos constituintes atmosféricos em determinados comprimentos de onda. Oxigênio, ozônio, gás carbônico e o vapor d'água é o principal absorvedor. A

radiação ultravioleta é praticamente absorvida pelo ozônio O_3 e oxigênio O_2 nas camadas mais superiores da atmosfera. Desta forma, evita-se os efeitos prejudiciais que essa radiação causaria sobre a fauna e flora terrestre. Já o vapor d'água e o gás carbônico atuam na absorção em diversas faixas dentro do espectro da radiação infravermelha. Deve-se considerar também que a presença de nuvens na atmosfera pode colaborar para o aumento dessa absorção. A reflexão ocorre principalmente devido as nuvens, que nesse caso, podem ter um grande efeito na diminuição da energia solar. A reflexão pelas nuvens depende principalmente da sua espessura, estrutura e constituição, podendo chegar até aproximadamente 90% da energia.

Devido a estes fenômenos de absorção, difusão e reflexão, somente uma parte da energia do sol atinge a Terra. A quantidade de tal energia depende da estação do ano, da hora do dia, latitude, topografia e as condições climáticas. Ao atingir a atmosfera parte da energia é absorvida pelo solo, água e ar, ou refletida de volta. A energia absorvida pode ser convertida em calor pelo aumento da temperatura da superfície, evaporação da água, e ainda pode ser convertida em energia mecânica, elétrica ou química. Parte da energia é armazenada por longos períodos de tempo, bem como, a energia dentro da massa de combustíveis fósseis. O resto pode criar movimento convectivo dentro da atmosfera. Além disso, a superfície terrestre irradia de volta uma parcela dessa energia, a qual é absorvida pelos constituintes atmosféricos causando o efeito estufa [Vianello, 1991].

A radiação solar em um determinado local depende da inclinação dos raios solares, da duração do dia, da transmissividade da atmosfera e da cobertura do céu. A variação diária do ângulo de elevação solar (ângulo zenital) ocorre devido ao movimento de rotação da Terra. A Figura 2.2 apresenta essa variação ao longo de dois dias bem distintos do ano. O curso anual da radiação solar no sul do país evidencia que os maiores valores de radiação solar ocorrem de novembro a fevereiro (verão), e os menores ocorrem em junho e julho (inverno). A Figura 2.1 mostra a inclinação variável dos raios solares ao longo do ano. A equação (2.1), a lei de Lambert do iluminamento, descreve o curso da radiação anual.

$$I = I_o * \cos(\theta) \quad (2.1)$$

Onde: I é a intensidade da radiação que atinge uma superfície, formando um ângulo θ

com a sua normal e I_o é a intensidade da radiação que atinge uma superfície sob incidência normal.

Considerando que a intensidade da radiação que atinge uma superfície sob incidência normal I_o é constante, a intensidade da radiação solar I em um determinado local da superfície terrestre depende basicamente da variação do cosseno do ângulo de elevação solar θ ao longo do ano.

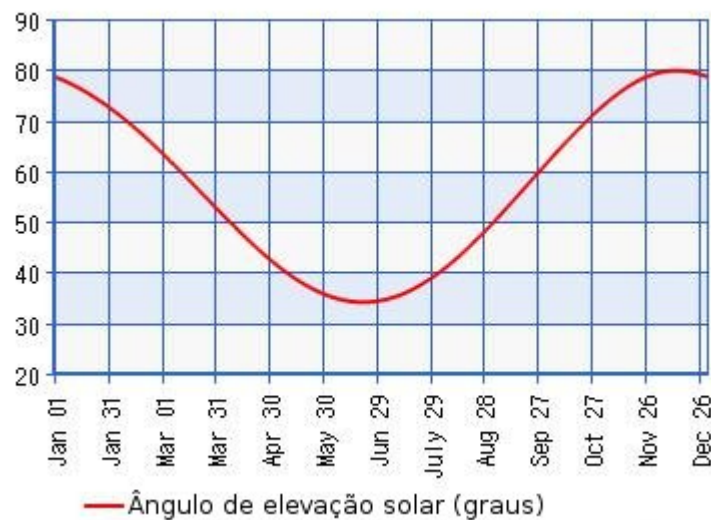


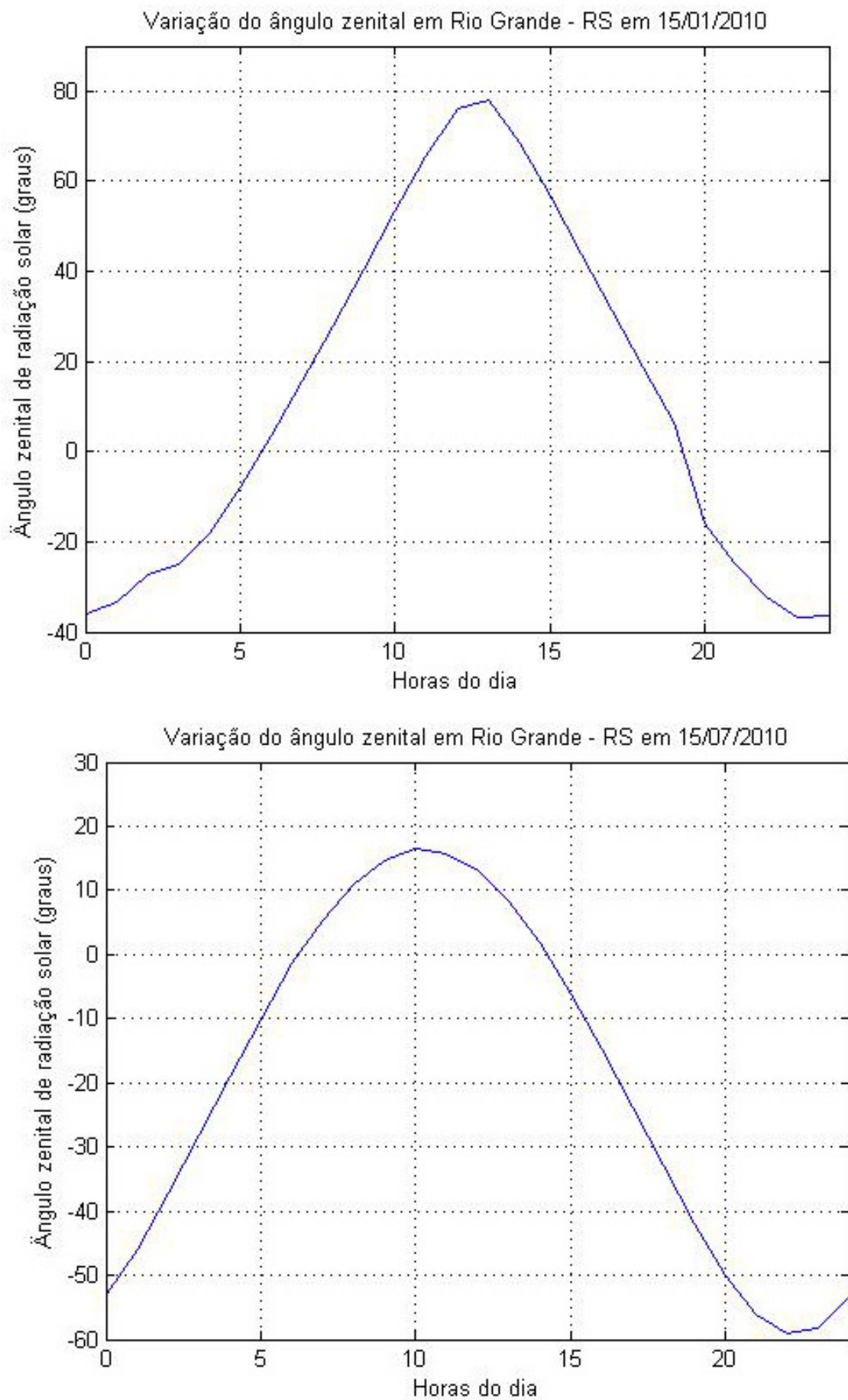
Figura 2.1: *Variação anual do ângulo zenital para Rio Grande - RS para o ano de 2010 [CASIO, 2012].*

2.2.2 Os Ventos

O Vento é definido por [Schnelle e Dey, 1999] como o deslocamento horizontal do ar, que migra de regiões de mais alta pressão atmosférica para regiões onde ela é menor. Os ventos são classificados por sua escala no espaço, sua velocidade, os tipos de forças que os causam, as regiões onde ocorrem e seus efeitos.

De acordo com [Saucier, 1969], os ventos geralmente são expressos de acordo com a sua força e direção. Os ventos com grandes variações de velocidade em um curto espaço de tempo são chamados de rajadas, que também pode se referir aos curtos momentos em que a sua velocidade é a máxima. Os ventos de longa duração possuem vários nomes associados a sua intensidade média, tais como: brisa, tempestade, furacão e tufão.

Os principais efeitos de larga escala de circulação atmosférica são: o aquecimento

Figura 2.2: *Variação diária do ângulo zenital para Rio Grande - RS.*

diferencial entre a linha do equador e os pólos, e a rotação do planeta (efeito Coriolis). Nos trópicos, as baixas circulações térmicas sobre o terreno e os altos planaltos podem dirigir as circulações atmosféricas. Nas regiões costeiras, os ciclos de brisa terrestre e marítima ajudam a definir os ventos locais; já nas áreas onde tem-se maiores variações do terreno, as brisas de vale e de montanha podem dominar os ventos locais [Vianello, 1991].

Segundo [Tubelis, 1980], as diferenças de temperatura podem gerar diferenças de pressão, dando origem aos ventos locais. Nas costas oceânicas ocorrem as brisas. Durante o período do dia, o maior aquecimento dos continentes faz com que o ar se eleve na atmosfera, criando uma região de descompressão junto ao solo. Devido isso, o ar menos aquecido, situado sobre o oceano é deslocado em direção ao continente, causando o que denomina-se brisa marítima. Durante a noite, esse ciclo se inverte, o continente resfria-se mais rapidamente que o oceano, e a massa de ar mais densa do continente movimenta-se em direção ao oceano, criando a brisa terrestre.

Nas regiões de orografia acentuada, os vales e encostas sofrem intensas diferenças de aquecimento. As massas de ar mais quentes se elevam lentamente sobre as encostas, originando as brisas de vale. A intensidade das brisas dependem da conformação dos vales. Nos vales litorâneos pode-se encontrar ventos moderados, devido a associação entre as brisas de vale e a brisa marítima.

2.2.3 A temperatura do ar

Segundo [Vianello, 1991], a variação diária da temperatura está diretamente ligada a chegada da energia solar e o aquecimento do solo. Existe uma certa diferença entre a temperatura do solo e a do ar, e essa diferença aumenta conforme nos afastamos da superfície, isto é, as temperaturas máximas do ar atmosférico ocorrem na camada de ar que está em contato com o solo. A medida que se afasta da superfície, o instante de ocorrência da máxima temperatura do ar vai sendo retardado em relação ao instante de ocorrência da temperatura máxima no solo. Naturalmente, essa diferença não é constante, pois ela depende da eficiência dos processos de transferência de calor na atmosfera [Saucier, 1969].

Onde há condições de calma atmosférica, com o predomínio dos efeitos moleculares, a diferença de temperatura tende a aumentar, já quando a turbulência atmosférica é bastante ativa, o transporte de calor torna-se mais eficiente e a diferença de temperatura

tende a diminuir. Durante a noite, os processos radiativos provocam um contínuo resfriamento do solo, chegando a inversão dos fluxos, ou seja, a atmosfera mais quente passa a transferir calor para o solo.

Em geral, as áreas continentais e desérticas apresentam amplitudes e extremos térmicos mais elevados, contrastando com as regiões marítimas e vegetadas, onde as temperaturas oscilam menos. Outro fator importante na variação da temperatura é a latitude. De um modo geral, a amplitude térmica cresce conforme nos aproximamos dos polos. Além de outros fatores, a altitude merece destaque. Em geral com o aumento da altitude, ocorre uma diminuição na temperatura média do ar.

De acordo com [Vianello, 1991], a variação anual da temperatura do ar é basicamente determinada movimento de translação e da variação da inclinação do seu eixo em relação ao plano de sua órbita. Devido a estes movimentos terrestres, o curso da radiação global varia de acordo com o ângulo de elevação solar.

2.2.4 A Pressão Atmosférica

A pressão atmosférica é definida como o peso da atmosfera posicionada verticalmente acima do local por unidade de área horizontal. A pressão atmosférica está sujeita a influências de inúmeros fatores, por isso, apresenta variações verticais, horizontais, diárias e anuais. As Figuras¹ 2.3 e 2.4 apresentam as isolinhas de pressão atmosférica sobre o Brasil e o estado do Rio Grande do Sul, respectivamente, onde pode-se observar os gradientes de pressão.

De acordo com [Tubelis, 1980], a pressão atmosférica diminui com a altitude, devido a diminuição da densidade do ar, da aceleração da gravidade, e da temperatura do ar. Para se expressar a taxa média de diminuição da pressão com a altitude é necessário considerar a atmosfera padrão, definida pelas seguintes características:

- O ar é seco e a sua composição química é constante em todas altitudes;
- A aceleração da gravidade é uniforme e igual a $9,8062m/s^2$;

¹Imagens fornecidas pelo meteorologista Gustavo Guterres Ribeiro - SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia).

MODELO GFS (NCEP)
 Previsão inicializada em 09/10/2012 as 00UTC
 Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (hPa)
 Valida para 11/10/2012 as 12UTC (Qui)

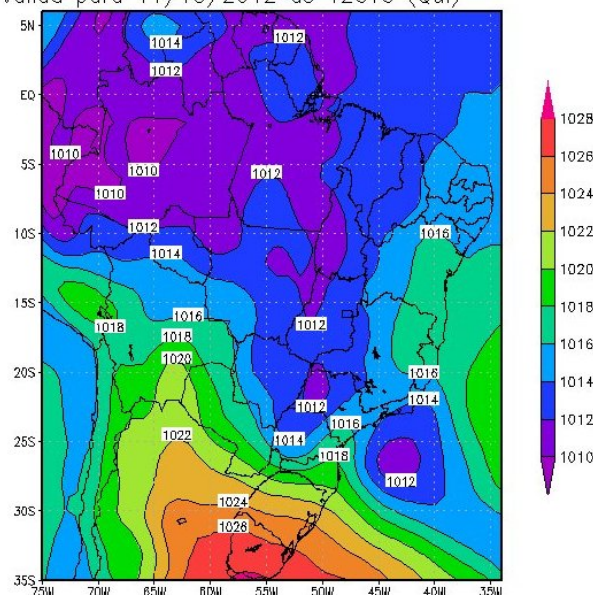


Figura 2.3: *Campo de pressão atmosférica brasileira.*

MODELO GFS (NCEP)
 Previsão inicializada em 09/10/2012 as 00UTC
 Pressão Reduzida ao Nível Médio do Mar (hPa)
 Valida para 11/10/2012 as 12UTC (Qui)

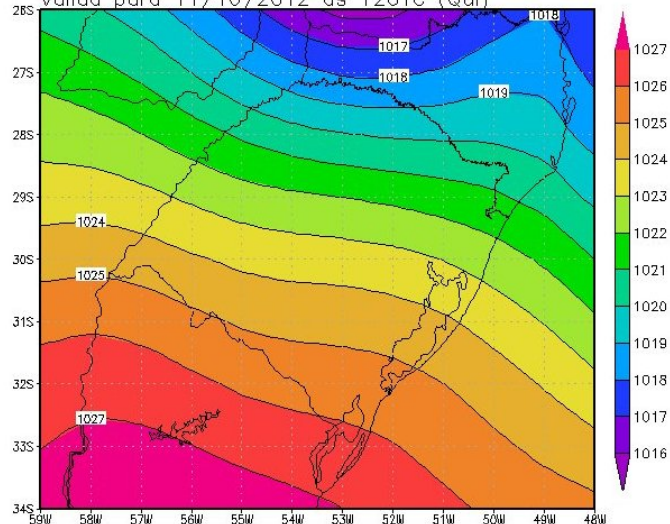


Figura 2.4: *Campo de pressão atmosférica sobre o estado do Rio Grande do Sul.*

- O valor da pressão e temperatura no nível do mar são respectivamente $760mmHg$ e $15^{\circ}C$;
- O gradiente de temperatura do ar é de $6,5^{\circ}C/km$ na troposfera até $11000m$ de altitude;

A Figura 2.5 apresenta o perfil de variação de temperatura atmosférica de acordo com a altura.

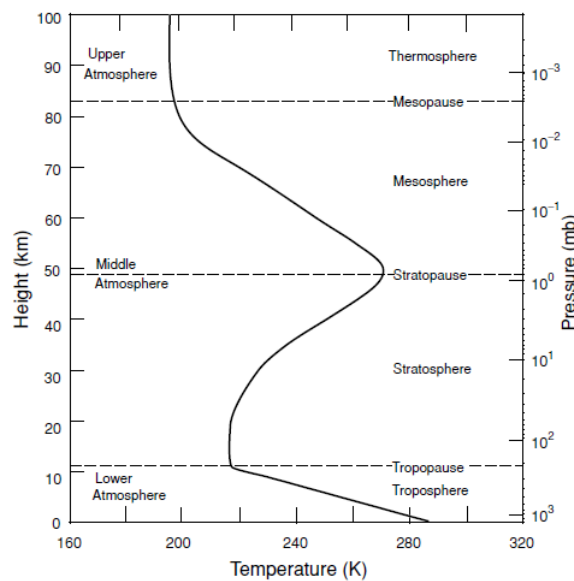


Figura 2.5: *Variação de temperatura atmosférica de acordo com a altura [Liou, 2002].*

Quanto as variações diárias de pressão, tem-se que distinguir duas situações: uma onde a variação é puramente local, sem influências externas, como se a região estivesse sob o domínio de uma massa de ar estacionária. Nesse caso, durante o dia ocorrem duas ondas na marcha da pressão, com dois picos, às 10 e as 22 horas, e duas cavas às 4 e 16 horas. Esta configuração é chamada de "maré barométrica", cuja origem ainda não é suficientemente conhecida. Já a outra está relacionada as variações e mudanças do tempo meteorológico local, geralmente em virtude de causas externas, assim como a chegada massas de ar de outras regiões [Saucier, 1969].

A variação anual da pressão atmosférica mostra um curso inverso ao da temperatura do ar, isto é, devido as massas de ar de menor temperatura apresentarem uma densidade maior, e vice-versa. Pelo fato do ar se aquecer mais no verão e se resfriar mais no inverno,

tem-se maiores pressões durante o inverno e menores durante o verão. Outra situação ocorre devido a amplitude térmica aumentar com a proximidade dos polos. Isso faz com que ocorra um aumento da amplitude da pressão atmosférica do norte para o sul do país.

2.2.5 Camada Limite Planetária

Segundo [Schnelle e Dey, 1999] e [Oke, 2002], a Camada Limite Planetária (CLP) é a camada inferior da troposfera que está em contato direto com a superfície terrestre. Ela é caracterizada pelos movimentos turbulentos gerados por forçantes mecânicas e térmicas. Durante o dia, há a predominância de turbulência de térmica (convecção térmica), formando a Camada Limite Convectiva ou diurna, a qual pode chegar a amplitudes de $100m$ até $3km$. Durante o ciclo noturno, onde a turbulência é predominantemente mecânica pelo cisalhamento do vento na vertical, essa altura varia de $10m$ até $300m$, formando a CLE (Camada Limite Estável) ou noturna.

De acordo com [de Moraes, 2004], a camada limite planetária se divide nas seguintes camadas:

- Camada Inercial(CI): onde há o predomínio de difusão molecular (viscosidade do ar), possui apenas alguns milímetros de espessura sobre as superfícies.
- Camada Limite Superficial(CLS): nessa camada as forças inerciais predominam sobre as viscosas, ela possui dezenas de metros de espessura, onde ocorrem os gradientes verticais intensos das variáveis atmosféricas tais como: temperatura, vapor d'água, umidade específica do ar, razão de mistura, velocidade do vento.
- Camada de Mistura(CM): nessa camada grandes misturas ocorrem devido a difusão turbulenta, que durante o período convectivo da CLP estende-se do topo da CLS até a Camada de Transição (CT), onde os gradientes verticais das variáveis atmosféricas apresentam-se menores. Essa grande mistura turbulenta na Camada Limite Convectiva acontece por causa do efeito da convecção térmica diurna, período onde a CLP é aquecida pela radiação solar.
- Camada de Transição(CT): também é conhecida como zona de entranhamento. É a região do ar estaticamente estável no topo da camada de mistura, onde há o

entranhamento de ar da atmosfera livre e também a penetração convectiva das plumas térmicas. Ela é caracterizada pelo fluxo de calor negativo. Acima desta camada tem-se a atmosfera livre.

Essas subdivisões podem ser vistas na Figura 2.6.

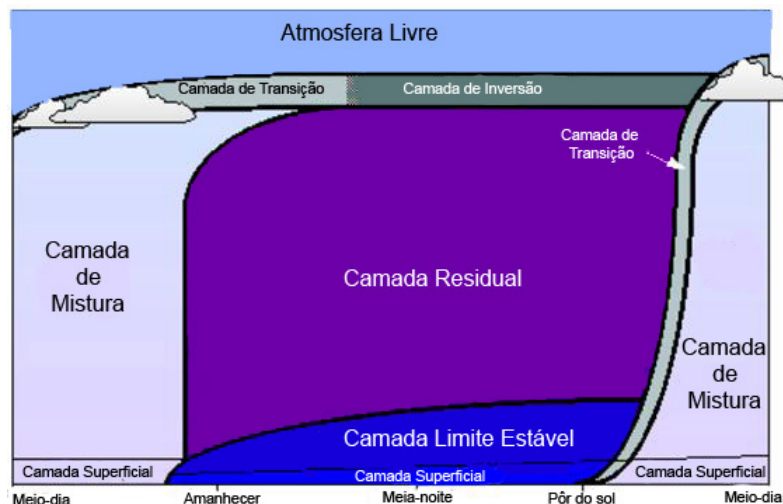


Figura 2.6: *Divisões da Camadas Limite Planetária adaptado de [da Costa, 2004].*

2.3 Dispersão de Poluentes

Atualmente, o estudo da dispersão de poluentes na atmosfera e nos oceanos tem estado em foco, devido ao grande aumento de emissões advindas do crescimento das áreas urbanas e industriais. Na maioria dos casos, estes centros se localizam em regiões bastante heterogêneas em termos de relevo, tipos de solo e ocupação. Estas características tornam a previsão de dispersão de poluentes um tarefa complexa [Armstrong et al., 2005].

De acordo com [Schnelle e Dey, 1999], a emissão de poluentes é definida como a descarga de poluentes presentes sob a forma de gases, aerossóis ou partículas. A emissão dessas substâncias no ar ambiente, faz com que um processo de mistura de gases ocorra. A mistura, transporte, propagação e espalhamento desses gases é conhecida como dispersão atmosférica, a qual é avaliada por modelos computacionais que através de resolução de equações diferenciais, soluções numéricas e algoritmos simulam seu comportamento.

Os modelos de dispersão permitem estimar ou prever o comportamento de poluentes atmosféricos emitidos por uma determinada fonte industrial ou pelos veículos automotores.

Os modelos atuais permitem não só prever a direção, sentido e velocidade da dispersão, mas também as reações químicas que podem ocorrer. Esses modelos tornam-se úteis não só na identificação dos emissores, mas também na gestão da qualidade do ar.

Sendo assim, é necessário uma maior compreensão destes processos, para que haja um melhor controle e gerenciamento da qualidade do ar e da água, proporcionando uma melhor qualidade de vida às pessoas que habitam essas áreas.

Um exemplo disso é que, até pouco tempo, não eram levadas em consideração as características meteorológicas e de afluentes de um local, quando da decisão de se instalar algum tipo de indústria. Todavia, atualmente sabe-se que certos locais podem ser totalmente inadequados para a implantação de uma fonte poluidora [de Moraes, 2004].

Como resultado das pesquisas para solucionar este problema, houve a proposição de vários modelos, que são classificados fundamentalmente em dois grandes grupos, os *Lagrangianos* e os *Eulerianos*. Os modelos do tipo Lagrangeanos simulam trajetórias de partículas de poluentes em um sistema de referência que acompanha o movimento dessas trajetórias, tendo como seu principal expoente o modelo Gaussiano. Já os modelos Eulerianos utilizam soluções da equação de advecção e difusão, em um sistema de referência fixo em relação à terra [Riley et al., 2006].

2.3.1 Modelo Euleriano

A propagação de poluentes é regida por duas importantes fases no transporte de massa. Primeiramente, tem-se a advecção, que é o movimento das partículas devido ao fluxo do fluido, onde as partículas são carregadas pelo próprio movimento do escoamento, e em segundo lugar, a difusão, que é o movimento de partículas devido à diferença do gradiente de concentração molecular. A junção dessas fases é governada pela Equação da Advecção e Difusão [Meireles et al., 2003].

Em vista disso, neste tipo de modelo a dispersão é estudada utilizando-se uma equação diferencial parcial para a conservação da massa do poluente, resolvida em uma malha fixa no espaço, fornecendo valores médios de concentração em um ponto no espaço. A partir das equações de conservação é possível obter um modelo matemático da dispersão de uma fonte, dadas as apropriadas condições iniciais e de contorno [Boyce et al., 2002].

A equação de advecção e difusão para o transporte de um poluente é definida por

[Schnelle e Dey, 1999], que nada mais é do que a equação de conservação da massa deste componente, e dada por (2.2):

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = -\frac{\partial c'_i u'_i}{\partial x_i} + S \quad (2.2)$$

onde c é a concentração média de um dado poluente, u_i o vetor velocidade média do vento nas direções do x , y e z , S os termos fontes e sumidouros, $u'_i c'_i$ os fluxos turbulentos de concentração, t tempo e x_i as direções x , y e z .

Na maior parte dos modelos Eulerianos atmosféricos, os fluxos turbulentos de massa do componente são modelados através da hipótese da viscosidade turbulenta (*eddy viscosity*), definida em [Schnelle e Dey, 1999] e dada por (2.3):

$$c'_i u'_i = -K \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (2.3)$$

onde $K = K_i$ são os coeficientes de difusão turbulenta nas direções do x , y e z . Nessa hipótese admite-se que o transporte turbulento causado pelas flutuações da velocidade possa ser interpretado como uma difusão turbulenta, dando origem à equação (2.3). As outras componentes (cruzadas) do tensor de difusividade turbulenta K são geralmente desprezadas. Como a turbulência é um fenômeno sempre dominante em relação ao transporte laminar, a contribuição da difusão molecular pode ser desprezada na equação (2.2) [de Moraes, 2004].

Neste trabalho, é considerado o transporte bidimensional. Assim sendo, a equação da advecção e difusão, é definida por [Boyce et al., 2002], da seguinte forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} = Kx \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + Ky \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \quad (2.4)$$

Onde: $\mathbf{u}$ é a velocidade do fluido longitudinal, v a velocidade do fluido meridional, K_x

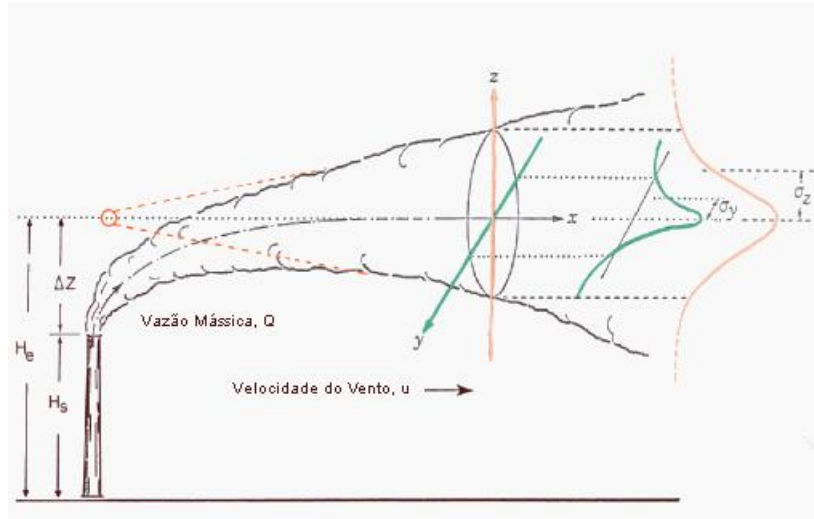


Figura 2.7: *Modelo de pluma Gaussiana* [de Moraes, 2004].

o coeficiente de difusão em x e K_y o coeficiente de difusão em y .

2.3.2 Modelo Gaussiano

A classe de modelos de dispersão de poluentes mais comum é chamada modelos de pluma Gaussiana. Esses modelos são uma simplificação da equação de advecção e difusão para situações idealizadas. De acordo com [Schnelle e Dey, 1999] as concentrações podem ser calculadas a partir da seguinte equação (2.5):

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \cdot e^{\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \cdot \left[e^{\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} + \alpha \cdot e^{\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \right] \quad (2.5)$$

onde C é a concentração do poluente, x a distância longitudinal, y a distância latitudinal, z altura do solo, Q vazão de lançamento dos poluentes, u velocidade média do vento, H altura da chaminé, α o coeficiente de reflexão, σ_y o coeficiente de dispersão lateral e σ_z o coeficiente de dispersão vertical.

A Figura 2.7 ilustra o modelo de pluma Gaussiana. O modelo Gaussiano é baseado em uma fórmula simplificada que descreve um campo de concentrações tridimensional gerado por uma fonte pontual elevada sob condições meteorológicas e de emissões constantes.

2.3.3 Resolução Analítica da Equação da Advecção e Difusão

Abaixo é apresentada a resolução analítica da equação da advecção e difusão definida por [Boyce et al., 2002], proposta por um grupo de alunos², como trabalho avaliado da disciplina do PPGMC (Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional) denominada Elementos da Matemática.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + u \frac{\partial U}{\partial x} + v \frac{\partial U}{\partial y} + w \frac{\partial U}{\partial z} = Kx \frac{\partial U^2}{\partial x^2} + Ky \frac{\partial U^2}{\partial y^2} + Kz \frac{\partial U^2}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

A equação (2.6) é tridimensional e variante no tempo, porém, simplifica-se o eixo z para um único plano mais próximo da superfície. Assim a equação (2.4) bidimensional variante no tempo pode ser utilizada. Portanto, a forma simplificada define-se na forma de produto, obtendo a função U como:

$$U(x, y, t) = T(t).X(x).Y(y) \quad (2.7)$$

Aplicando (2.7) em (2.4):

$$\frac{\partial(x.y.t)}{\partial t} + u \frac{\partial(x.y.t)}{\partial x} + v \frac{\partial(x.y.t)}{\partial y} = Kx \frac{\partial(x.y.t)^2}{\partial x^2} + Ky \frac{\partial(x.y.t)^2}{\partial y^2} \quad (2.8)$$

Retirando as constantes das derivadas:

$$x.y \frac{\partial T(t)}{\partial t} + u.y.t \frac{\partial X(x)}{\partial x} + v.x.t \frac{\partial Y(y)}{\partial y} = Kx.y.t \frac{\partial X(x)^2}{\partial x^2} + Ky.x.t \frac{\partial Y(y)^2}{\partial y^2} \quad (2.9)$$

Dividindo (2.9) por (2.7):

$$\frac{1}{t} \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \frac{u}{x} \cdot \frac{\partial X(x)}{\partial x} + \frac{v}{y} \cdot \frac{\partial Y(y)}{\partial y} = \frac{Kx}{x} \cdot \frac{\partial X(x)^2}{\partial x^2} + \frac{Ky}{y} \cdot \frac{\partial Y(y)^2}{\partial y^2} \quad (2.10)$$

Utilizando o método de soluções gerais e particulares de equações diferenciais parciais [Riley et al., 2006] chega-se a seguinte igualdade:

$$\frac{1}{t} \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial t} = -l^2 \quad (2.11)$$

²Os alunos do grupo eram: Carlos A. B. C. W. Madsen, Gerson A. L. Nunes e Eduardo P. Kirinus

$$\frac{K_x}{x} \cdot \frac{\partial X(x)^2}{\partial x^2} - \frac{u}{x} \cdot \frac{\partial X(x)}{\partial x} = -m^2 \quad (2.12)$$

$$\frac{K_y}{y} \cdot \frac{\partial Y(y)^2}{\partial y^2} - \frac{v}{y} \cdot \frac{\partial Y(y)}{\partial y} = -n^2 \quad (2.13)$$

Rearranjando a equação diferencial de primeira ordem (2.11):

$$\frac{1}{t} \cdot \frac{\partial T(t)}{\partial t} = -l^2$$

$$\frac{\partial T(t)}{\partial t} + t.l^2 = 0 \quad (2.14)$$

A partir de (2.14) obtém-se a seguinte equação característica:

$$S_t + l^2 = 0$$

$$S_t = -l^2$$

Dado que a raiz é real, temos a seguinte solução geral para (2.14):

$$T(t) = A.e^{(-l^2 t)} \quad (2.15)$$

Rearranjando a equação diferencial de segunda ordem (2.12):

$$\frac{K_x}{x} \cdot \frac{\partial X(x)^2}{\partial x^2} - \frac{u}{x} \cdot \frac{\partial X(x)}{\partial x} = -m^2$$

$$K_x \cdot \frac{\partial X(x)^2}{\partial x^2} - u \cdot \frac{\partial X(x)}{\partial x} + x.m^2 = 0 \quad (2.16)$$

A partir de (2.16) obtém-se a seguinte equação característica:

$$K_x.S_x^2 + u.S_x + m^2 = 0$$

$$\frac{K_x.S_x^2 + u.S_x + m^2}{K_x} = \frac{0}{K_x}$$

$$S_x^2 + \frac{u}{K_x} \cdot S_x + \frac{m^2}{K_x} = 0 \quad (2.17)$$

Resolvendo a equação (2.17) tem-se as seguintes raízes:

$$S'_x = \frac{u - m \cdot \sqrt{K_x}}{K_x}$$

$$S''_x = \frac{m \cdot \sqrt{K_x}}{K_x}$$

Dado que as duas raízes são reais e distintas, obtém-se a seguinte solução geral para (2.16):

$$X(x) = B \cdot e^{\left(\frac{u - m \cdot \sqrt{K_x}}{K_x}\right)x} + C \cdot e^{\left(\frac{m \cdot \sqrt{K_x}}{K_x}\right)x} \quad (2.18)$$

Rearranjando a equação diferencial de segunda ordem (2.13):

$$\frac{K_y}{y} \cdot \frac{\partial Y(y)^2}{\partial y^2} - \frac{v}{y} \cdot \frac{\partial Y(y)}{\partial y} = -n^2$$

$$K_y \cdot \frac{\partial Y(y)^2}{\partial y^2} - v \cdot \frac{\partial Y(y)}{\partial y} + y \cdot n^2 = 0 \quad (2.19)$$

A partir de (2.19) obtém-se a seguinte equação característica:

$$K_y \cdot S_y^2 + v \cdot S_y + n^2 = 0$$

$$\frac{K_y \cdot S_y^2 + v \cdot S_y + n^2}{K_y} = \frac{0}{K_y}$$

$$S_y^2 + \frac{v}{K_y} \cdot S_y + \frac{n^2}{K_y} = 0$$

Que tem as seguintes raízes:

$$S'_y = \frac{v - n \cdot \sqrt{K_y}}{K_y}$$

$$S''_y = \frac{n \cdot \sqrt{K_y}}{K_y}$$

Dado que as duas raízes são reais e distintas, obtém-se a seguinte solução geral para (2.19):

$$Y(y) = D \cdot e^{\left(\frac{v - n \cdot \sqrt{K_y}}{K_y}\right)y} + E \cdot e^{\left(\frac{n \cdot \sqrt{K_y}}{K_y}\right)y} \quad (2.20)$$

Finalmente substituindo as equações (2.15), (2.18) e (2.20) em (2.7) chega-se a solução geral:

$$U(x, y, t) = \left((A \cdot e^{(-t^2)t}) \cdot \left(B \cdot e^{\left(\frac{u - m \cdot \sqrt{K_x}}{K_x}\right)x} + C \cdot e^{\left(\frac{m \cdot \sqrt{K_x}}{K_x}\right)x} \right) \cdot \left(D \cdot e^{\left(\frac{v - n \cdot \sqrt{K_y}}{K_y}\right)y} + E \cdot e^{\left(\frac{n \cdot \sqrt{K_y}}{K_y}\right)y} \right) \right) \quad (2.21)$$

2.3.4 Simulação Computacional em Matlab

Após a resolução analítica da equação (2.4), foi desenvolvido um código de simulação utilizando Matlab (em anexo na seção A.1). O intuito desse código foi avaliar as constantes da solução geral do fenômeno físico de dispersão caracterizado pela equação de advecção e difusão.

Desta forma, foi realizada uma avaliação qualitativa das constantes sem que houvesse a necessidade de resolver as equações através de condições de contorno. A Figura 2.8 demonstra como ficaram as curvas finais de decaimento das equações (2.15), (2.18) e (2.20) e a solução geral do decaimento da função U .

Na simulação foram consideradas as constantes abaixo.

Constantes da Simulação:

1. Grade Espacial:

- Tamanho em $X = 500m$;
- Tamanho em $Y = 500m$.

2. Variação Temporal:

- Tempo de simulação de 300 segundos

3. Constantes proporcionais das equações:

- $A = 1$;
- $B = 1$;
- $C = 0$; (zerando a parte da equação que não tem u)
- $D = 1$;
- $E = 0$. (zerando a parte da equação que não tem v)

4. Constantes das exponenciais das equações:

- $m = 1$;
- $n = 1$;
- $l = -0.005$.

5. Constantes de dispersão:

- $Ky = 1.025$;
- $Kx = 1.02$.

6. Velocidade dos fluidos em m/s:

- $u = 1$;
- $v = 1$.

A grade espacial foi definida com tamanho de $500/500m$ para diminuir o tempo computacional. O período de simulação foi determinado em $300s$, com a intenção de demonstrar o principal efeito da dispersão.

As constantes proporcionais C e E foram consideradas zero, para que houvesse um decaimento estável ao longo da distância e que as soluções não tendam para o infinito. Enquanto as outras constantes foram consideradas com valor 1, pois representam a amplitude da concentração.

As constantes exponenciais foram definidas através de testes da resposta da equação frente à variação de parâmetros, demonstrando que o valor de m e n deve ser maior ou igual a 1, enquanto que l deve ser um valor muito pequeno.

As constantes de dispersão Kx e Ky foram definidas um pouco acima do valor 1 devido as baixas velocidades de fluido também considerados $1m/s$. Estas constantes de dispersão foram utilizadas com o intuito de manter o valor da solução, equação (2.21), sempre com o expoente indicando decaimento, pois este estudo é sobre a dispersão de um poluente. Para manter essa hipótese, Kx e Ky devem ser aproximadamente $(u/m)^2$ e $(v/n)^2$ respectivamente. Dessa forma, a exponencial se torna decrescente, não tendendo ao infinito.

Baseado nessas constantes e aproximações, e ainda que a concentração de poluentes é medida em percentual e está entre 0 e 1, pode-se encontrar resultados para a função U , representados na figura 2.9.

2.3.5 Método das Diferenças Finitas

Este método consiste basicamente na discretização da EDP (Equação Diferencial Parcial), a partir da substituição das derivadas por relações de diferenças. Trata-se de um método bastante empregado, tanto para solução de EDP de 1ª quanto de 2ª ordem [Gomes, 1999]. Esse método baseia-se em calcular a variação do parâmetro em um determinado espaço sempre através de uma solução numérica. Um dos exemplos mais estudados é a equação da difusão:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + = K \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Onde a difusão pode se espalhar tanto no tempo quanto no espaço baseado na alteração

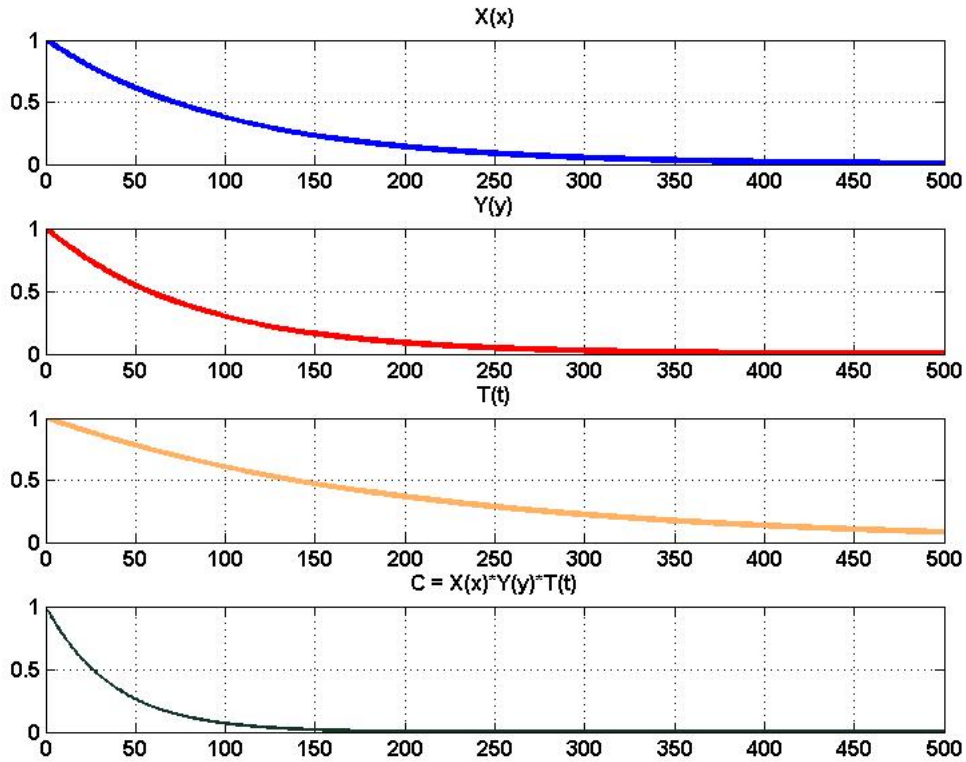


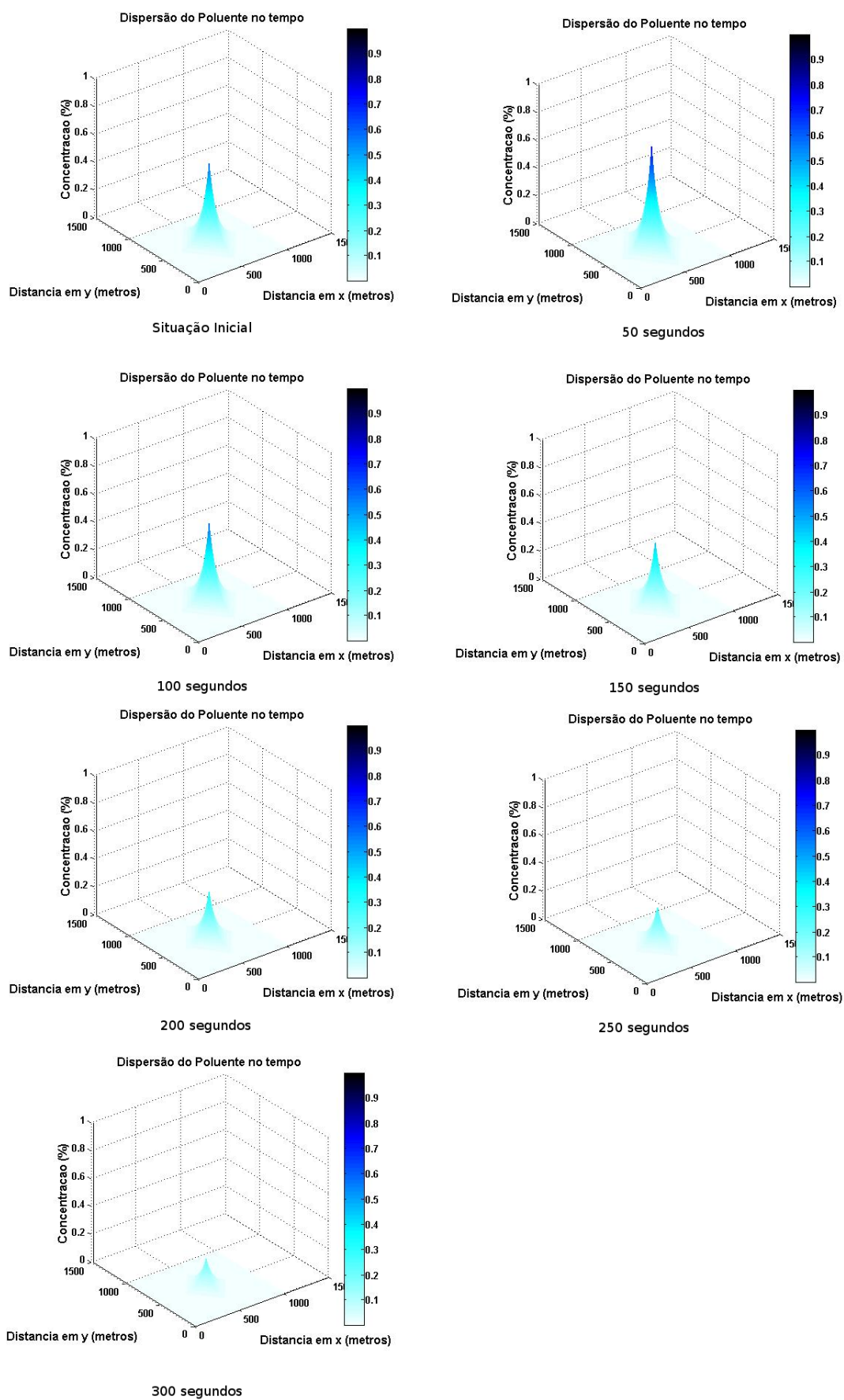
Figura 2.8: *Decaimento das variáveis no tempo.*

dos coeficientes da equação. Para a resolução deste método, existem várias metodologias que podem ser aplicadas dependendo do intuito da modelagem, todas elas passando por uma expansão da função em série de Taylor com um truncamento de segunda ordem.

2.3.6 Método de Elementos Finitos

No método de elementos finitos, a ideia básica consta nas variáveis a serem dadas apenas em valores discretos [Whitham, 2011]. Em malhas bidimensionais, isso significa geralmente que os valores serão dados na intersecção da malha ao redor do domínio. Essas variáveis são calculadas nos vértices de triângulos ou quadrados de acordo com o modelo utilizado (Figura 2.10). Este método primeiramente calcula o parâmetro em cada ponto, e depois expande o resultado para o triângulo mais próximo [Dyke, 2007].

A principal diferenciação entre os métodos é que o método de elementos finitos exige maior tempo computacional, uma vez que seus cálculos são feitos pontuais, por outro lado,

Figura 2.9: Gráfico da Função U variando no tempo.

o método de diferenças finitas consegue cobrir uma área muito maior ou simular grandes estruturas, pois exige menor tempo computacional [Miller, 2007], conforme apresentado na figura 2.10.

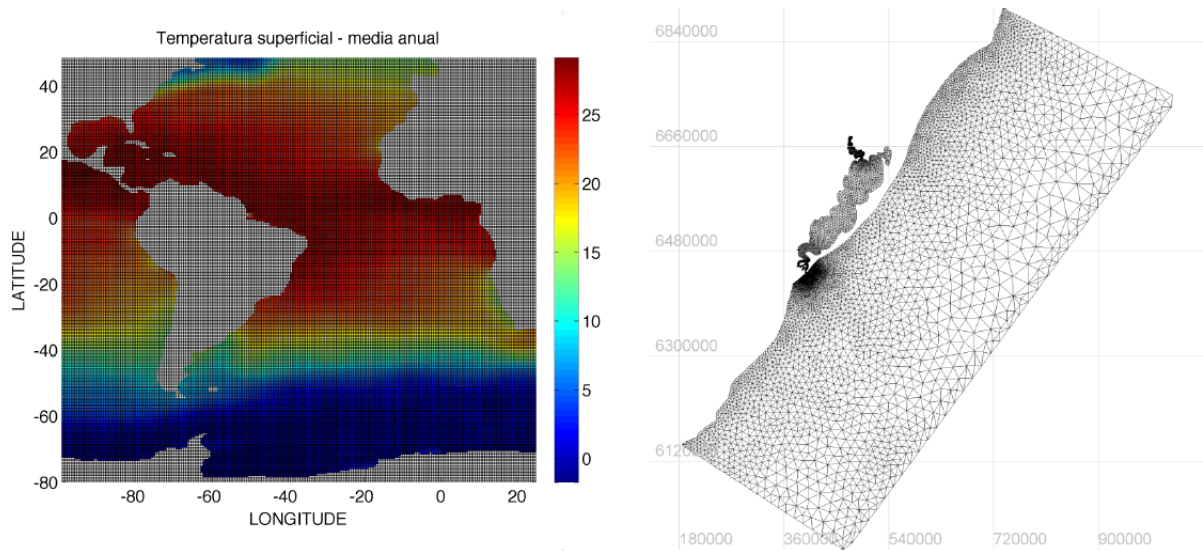


Figura 2.10: *Malha de diferenças finitas (esq.) e malha de elementos finitos (dir.)* [Kirinus et al., 2010]

2.4 Aspectos ambientais e sociais

A poluição do ar é definida como a presença de contaminantes em quantidades que podem comprometer a qualidade deste recurso, tornando-o impróprio, nocivo à fauna e flora, ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público e prejudicial as atividades normais da população. Com o crescimento das inovações tecnológicas, da industrialização, da urbanização desordenada e a explosão demográfica nas cidades, as taxas de poluentes tóxicos na atmosfera aumentam devido a atividade humana, trazendo assim consequências nocivas à saúde [Schnelle e Dey, 1999].

Segundo [Scire et al., 2000], o grupo de poluentes responsável pelo controle da qualidade do ar, devido sua maior frequência no ambiente, é composto por:

- Dióxido de enxofre (SO_2);

Compostos	Níveis de poluição		
	Atenção	Alerta	Emergência
Dióxido de Enxofre SO_2 em $\mu g/m^3$ - 24 horas	≥ 800	≥ 1.600	≥ 2.100
Monóxido de Carbono CO em $\mu g/m^3$ - 8 horas	≥ 17.000	≥ 34.000	≥ 46.000
Dióxido de Nitrogênio NO_2 em $\mu g/m^3$ - 1 hora	≥ 1.130	≥ 2.260	≥ 3.000

Tabela 2.1: *Padrões de poluição do ar pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) [CONAMA, 1990].*

- Material particulado;
- Monóxido de carbono (CO),
- Ozônio (O_3)
- Dióxido de nitrogênio (NO_2).

A exposição excessiva a poluentes causa efeitos adversos, portando a grande importância em se controlar as emissões reside no fato de assegurar uma qualidade de vida às pessoas e também a preservação do meio ambiente [Nóbrega e Krusche, 2011]. Assim, de acordo com a resolução do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) [CONAMA, 1990], existem determinados níveis de emissões que são permitidos, variando do nível mais baixo, definido como "atenção"; o nível intermediário, definido como "alerta"; e o nível mais crítico, definido como "emergência", conforme apresentado na Tabela 2.1.

Segundo [Hürtner e Moreira, 2000], os climas excessivamente úmidos predispõem o organismo humano a desconforto e a algumas doenças específicas, tais como: bronquite, asma, sinusite, rinite e outras doenças pulmonares. Também a abundância de fungos de tais ambientes podem nos conduzir ao desenvolvimento de processos alérgicos.

De acordo com [Nóbrega e Krusche, 2011], o grupo populacional mais suscetível aos efeitos da poluição são as crianças, por consumirem mais ar do que os adultos e por terem o sistema imunológico menos desenvolvido. O material particulado costuma ser considerado fator de influência nas internações e mortes por doenças cardiovasculares e respiratórias [Braga, 1998].

Segundo [Nóbrega e Krusche, 2011], a realidade brasileira mostra uma enorme dificuldade na implantação de políticas de gestão do meio ambiente de uma forma mais

democrática e participativa, onde o poder público deveria estar envolvido. Devido a essa centralização, percebe-se que as políticas preocupam-se basicamente com a redução da concentração de poluentes, e não levam em consideração as diferentes condições e características meteorológicas das localidades brasileiras.

Políticas preventivas de poluição do ar deveriam ter uma prioridade social, dado que estariam tentando resolver a causa-efeito da poluição atmosférica e a incidência de doenças na sociedade. No âmbito municipal, não existem políticas que tratem sobre o assunto, fazendo com que a população ignore a situação local. Desta forma, é importante que ferramentas venham a auxiliar na tomada de decisões quanto ao risco que a população está disposta a suportar, tais como: infecções respiratórias, gastos com tratamentos médicos, redução da produtividade e até mesmo podendo levar, um percentual da sociedade, à morte prematura.

Capítulo 3

Modelos de simulação

Quando os poluentes são lançados de forma contínua por uma fonte, eles se dispersam na atmosfera, resultando na formação de uma pluma. Estudar o comportamento da pluma significa estudar como o meio transporta e dispersa os poluentes [de Moraes, 2004].

Os poluentes podem ser lançados de forma não contínua, ou seja, quando tem-se emissões instantâneas que variam ao longo do tempo. Esses compostos se dispersam na atmosfera, resultando na formação de *puffs*. A concentração de poluentes em cada *puff* é matematicamente representada por uma distribuição Gaussiana que evolui no tempo e espaço [Scire et al., 2000].

3.1 Tecnologias utilizadas

Nesse trabalho foram utilizadas algumas ferramentas de *software* que permitam o desenvolvimento do projeto proposto. A seguir são apresentadas essas tecnologias, para o melhor entendimento do trabalho desenvolvido.

3.1.1 Matlab

O Matlab [Higham e Higham, 2005] é uma linguagem de programação com uma infinidade de bibliotecas que permitem realizar uma série de cálculos científicos, estatísticos, solução de equações diferenciais lineares, cálculos de engenharia e outros.

Este *software* disponibiliza uma série de bibliotecas com funções predefinidas que possibilitam uma programação mais rápida e eficiente, além da possibilidade de integrar o

código Matlab com outras linguagens de programação [Moler, 2004].

Em virtude das bibliotecas específicas, o trabalho fica facilitado para: redes neurais, filtragem, bioinformática, telecomunicações, aquisição de imagens, processamento digital de sinais, automação, geoprocessamento e outros.

O Matlab está sendo utilizado para automatizar processos de manipulação de arquivos, importação de dados, criação, manipulação e apresentação dos mapas e seus respectivos *layers*. Para auxílio dessas tarefas foi utilizada uma biblioteca de geoprocessamento, o *mapping toolbox*, que também é importante para realização do pós-processamento dos resultados gerados pelos modelos de dispersão de poluentes que serão descritos nas próximas subseções.

Mapping toolbox

O *mapping toolbox* [Higham e Higham, 2005] é uma biblioteca de funções específicas que permitem analisar dados geográficos, criar e manipular mapas. Ele permite importar tanto dados vetoriais quanto imagens rasterizadas. Há suporte aos formatos conhecidos de arquivos tais como: shapefile, GeoTIFF, DEM SDTS e outros. Além disso, existe a possibilidade de importar dados dos servidores WMS (*Web Map Service*). Assim é possível personalizá-los por subseção, recorte, interseção e outros métodos.

As funcionalidades desse *toolbox* permitem desenvolver soluções personalizadas para diversos problemas geográficos. Alguns desses recursos permitiram que os dados de diferentes camadas fossem facilmente manipulados e apresentados em um mesmo mapa.

Outras funcionalidades que também merecem destaque são as que permitem converter diferentes tipos de coordenadas, facilitando a utilização de dados de diferentes fontes e as que permitem salvar todas as criações e manipulações em arquivos que podem posteriormente ser analisados pelos utilizadores dos *softwares* de GIS.

3.1.2 ArcGIS

O ArcGIS é um *software* que liga informação geográfica com informação descritiva, isto é, onde as coisas estão com o que elas são. Ao contrário de um mapa de papel, onde o que se vê é o que você recebe de informações, o ArcGIS pode apresentar diferentes camadas (*layers*), as quais possuem diferentes tipos de informação [McCoy, 2004].

Um mapa baseado em SIG não é muito mais difícil de usar do que um mapa de papel. Como no mapa de papel, existem pontos que representam funções no mapa como cidades, linhas que representam características, tais como: estradas, ferrovias e pequenas áreas que representam características, como lagoas e lagos.

Cada camada pode representar um determinado tema ou característica do mapa. Um tema pode, por exemplo, representar todas as estradas em uma área, outro tema poderia representar todos os lagos dessa mesma área e ainda poderia existir um tema para representar todas as cidades.

De acordo com [Ormsby et al., 2010], o ArcGIS ajuda a responder perguntas, combinando dados de múltiplas fontes tais como: órgãos do governo, satélites, bancos de dados de instituições e outras fontes. Esse tipo de aproximações geográficas beneficiam as organizações e empresas de quase todos os setores, os benefícios trazidos pelo *software* basicamente se enquadram nas seguintes categorias:

- Economias de custos;
- Melhor tomada de decisão;
- Melhorias de comunicação;
- Melhor armazenamento das informações geográficas;
- Gestão de recursos naturais.

O sensoriamento remoto proporciona grandes volumes de dados sobre o nosso planeta. O ArcGIS possui ferramentas de exibição, manipulação e análise de dados capazes de fazer avaliação cruzada desses diferentes conjuntos de dados, utilizando para isso, funções multi-criteriais.

3.1.3 SVN

Apache Subversion, também conhecido por SVN, é um sistema de controle de versão livre e de código aberto. Ele é capaz de gerenciar arquivos e diretórios, e as mudanças feitas, ao longo do tempo. Isso permite a recuperação das versões antigas dos dados ou que examine a história de como os dados foram alterados [Pilato et al., 2008].

O *Subversion* pode funcionar em rede, o que permite que ele seja usado por pessoas em diferentes computadores. Essa capacidade de permitir que várias pessoas modifiquem e gerenciem o mesmo conjunto de dados de seus respectivos locais fomenta a colaboração.

O progresso pode ocorrer mais rapidamente, sem um canal único através do qual todas as modificações devem ocorrer. Todo o projeto será versionado, então é necessário preocupar-se em perder parte do trabalho, afinal se alguma mudança incorreta é feita nos dados, basta apenas desfazer a alteração.

De modo geral, o SVN pode ser utilizado para gerenciar qualquer conjunto de arquivos. No contexto do projeto, essa ferramenta foi utilizada para organizar os arquivos de gerência do projeto, desenvolvimento e pesquisa, tais como:

- Desenvolvimento: arquivos de código fonte, arquivos de dados de entrada, respectivos resultados, resumos, artigos e demais publicações;
- Pesquisa: arquivos de revisão bibliográfica, artigos, *papers*, resumos, documentos e tutoriais;
- Gerência de projetos: arquivos de descrição do projeto, metas, objetivos, planos de trabalho, atas de reunião, relatórios dos bolsistas, planejamento das tarefas e etc.

Esta ferramenta se mostrou muito importante e positiva, pois ela permite que as pessoas trabalhem em paralelo. Dessa forma, aumentando o desempenho, velocidade e eficiência da execução das tarefas dentro do grupo de trabalho.

3.2 Modelos desenvolvidos

Esta seção tem por finalidade apresentar os modelos desenvolvidos ao longo do trabalho. Inicialmente fez-se um panorama de como as técnicas de programação poderiam ser empregadas em gerenciamento de recursos naturais [Gularte et al., 2010b], e criou-se uma versão hipotética de propagação de impactos, conforme apresentado na Seção 3.2.1. Em seguida, ocorreu a necessidade de integrar um modelo Gaussiano de dispersão de poluentes (ISC), descrito na Seção 3.2.2. Por fim, adaptou-se um modelo não-estacionário de dispersão de poluentes (*CALPUFF*), apresentado na Seção 3.2.4.

3.2.1 Modelo Hipotético

Como primeira atividade pensou-se no desenvolvimento de um modelo hipotético que teria o propósito de testar a utilização dos sistemas de informação geográfica (SIG), estruturas de dados e algoritmos que pudessem interagir com o SIG, e a propagação de impactos causados por uma construção em uma região e nas suas vizinhanças. Esta versão do simulador foi subdividido em quatro módulos:

- Manipulação de mapas: este módulo tem como objetivo ler, escrever, manipular e apresentar arquivos vetoriais;
- Geração do grafo: este módulo visa identificar as intersecções entre regiões vizinhas. Quando é identificada uma intersecção, então entre eles é criada uma aresta de conexão;
- Criação de novos objetos: este módulo permite escolher a posição geográfica onde as fontes poluidoras serão inseridas, bem como definir os índices e parâmetros iniciais de emissão de poluentes;
- Propagação de impactos ao longo de gerações futuras: este módulo tem o objetivo de utilizar algoritmos baseados em grafos, os quais são responsáveis por propagar os impactos de cada fonte poluidora.

O funcionamento básico dessa versão é representado pelo Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) que pode ser visto na Figura 3.1

A simulação precisa inicialmente de duas entradas básicas: o arquivo de mapa (*shape*) da região de interesse e o número de gerações que serão processadas.

No primeiro processo, os mapas serão lidos, manipulados e apresentados. Após isso, começa a criação dos grafos avaliando as fronteiras entre os polígonos. No processo seguinte, de inserção de objetos, o usuário deve escolher que tipo de objeto e os respectivos parâmetros que deseja simular.

Nas gerações futuras, os impactos ambientais causados pelas fontes poluidoras inseridas na simulação propagar-se-ão para a vizinhança com o passar das gerações. A finalidade é mostrar para o usuário quais são os possíveis problemas que ocorrerão num futuro próximo.

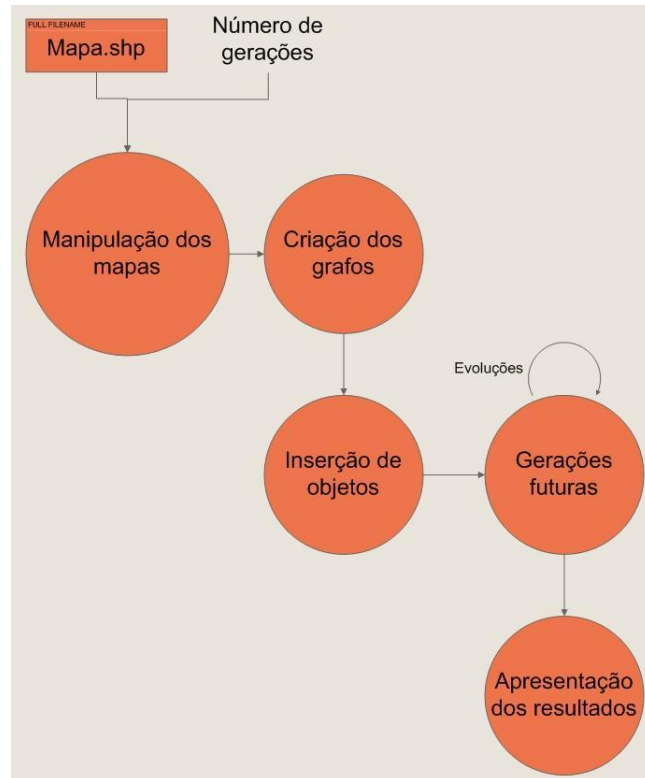


Figura 3.1: *Diagrama de Fluxo de Dados da versão hipotética [Nunes et al., 2010].*

Por fim, os gráficos de saída da simulação são salvos no formato *shape* e o usuário fica livre para avaliá-los.

No início da simulação duas matrizes precisam ser construídas: a matriz de adjacência e a matriz de comprimento de fronteira. Essas matrizes servem de suporte para a evolução das gerações, uma vez que as fronteiras do mapa seguem inalteradas ao longo da simulação. Desta forma, essas matrizes podem ser criadas uma única vez e usadas ao longo de toda simulação.

Conforme [Nunes et al., 2010], a matriz de adjacência é uma das formas de representar um grafo. No simulador, ela é utilizada para verificar as conexões existentes entre as regiões fronteiriças. Essa informação é necessária para saber quais regiões receberão a propagação do impacto ambiental. Além disso, o grafo do mapa permite uma visualização mais abstrata do problema.

Para exemplificar, a Figura 3.2, mostra a divisão de 14 municípios do estado de São Paulo. Os demais municípios não são apresentados para facilitar o entendimento do processo e tornar possível a visualização da matriz de adjacência. A Figura 3.3 apresenta

a matriz de adjacência gerada pelo mapa e na Figura 3.4 pode-se ver a representação gráfica do grafo.

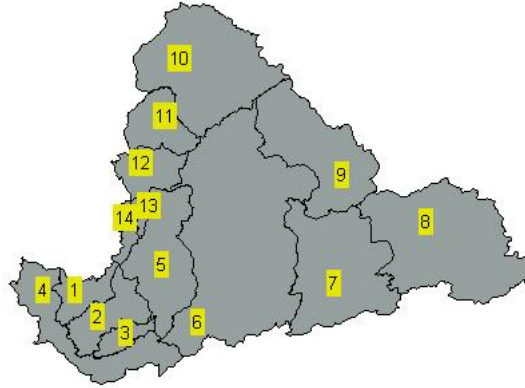


Figura 3.2: Mapa com 14 municípios do estado de São Paulo. Os números representam o índice de cada região na matriz de adjacência [Nunes et al., 2010].

X	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0
7	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
12	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
14	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Figura 3.3: Matriz de adjacência gerada pelo mapa [Nunes et al., 2010].

Para a criação da matriz de adjacência, as regiões precisam ser testadas aos pares quanto à existência de fronteira. Assim, a matriz pode ser preenchida com 1, caso exista fronteira, ou 0 se não existir. O teste para verificar se uma região é vizinha de outra é feito a partir da extração dos polígonos das regiões. Com o conjunto de pontos de cada polígono é possível verificar a existência de intersecção e por conseqüência se existe fronteira.

A outra matriz utilizada para processar a simulação é a matriz de comprimento de fronteiras. Nessa matriz são armazenados os comprimentos de todas as fronteiras do mapa. Essa informação será utilizada para propagar uma quantidade do impacto ambiental ao

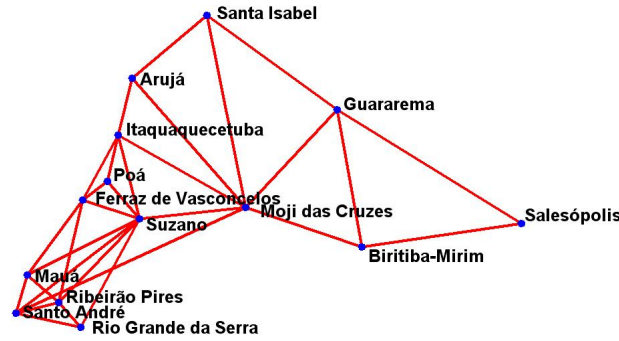


Figura 3.4: Grafo gerado a partir da matriz de adjacência [Nunes et al., 2010].

tamanho da fronteira entre as regiões.

A formação da matriz de fronteira segue a mesma ideia da matriz de adjacência, um elemento localizado na posição i, j terá o valor do comprimento da fronteira entre i e j . Caso as regiões i e j não tenham uma fronteira em comum o valor do elemento será zero.

Para a criação da matriz de comprimento de fronteira é necessário consultar a matriz de adjacência, de tal forma que se duas regiões i e j forem vizinhas, será feito o processo para determinar o comprimento de sua fronteira.

O procedimento para medir o comprimento da fronteira entre duas regiões do mapa utiliza uma função de intersecção de polígonos. Primeiramente é feita a extração dos polígonos das duas regiões que possuem a fronteira e então passados para a função de intersecção. Em seguida, essa função retornará o polígono gerado a partir da intersecção das regiões, o qual nada mais é que uma linha de fronteira. Para determinar o comprimento dessa linha é medida a distância euclidiana entre todos os pares de pontos que a formam.

Inserindo indústrias

Além da camada com polígonos e dados do mapa também é criada outra camada com os objetos (indústrias) que se deseja simular. Nesse *layer* podem ser inseridos diversos objetos com diferentes parâmetros de geração do impacto ambiental. Cada indústria na simulação é definida por polígonos e dados referentes à simulação. A estrutura de um objeto pode ser definida como:

- *Geometry*: definida por um conjunto de caracteres (*Point*, *Line*, *Polygon*);

- *BoundingBox*: definição dos pontos extremos (X_1, Y_1) e (X_2, Y_2) ;
- $X[1..N]$: Conjunto de N coordenadas X do objeto;
- $Y[1..N]$: Conjunto de N coordenadas Y do objeto;
- Poluição: Coeficiente de poluição gerado pela indústria;
- Local X: Coordenada X da posição da indústria;
- Local Y: Coordenada Y da posição da indústria.

A Figura 3.5 mostra como é representada uma indústria. Já a Figura 3.6 apresenta sua inserção em diversas regiões no mapa do estado de São Paulo.

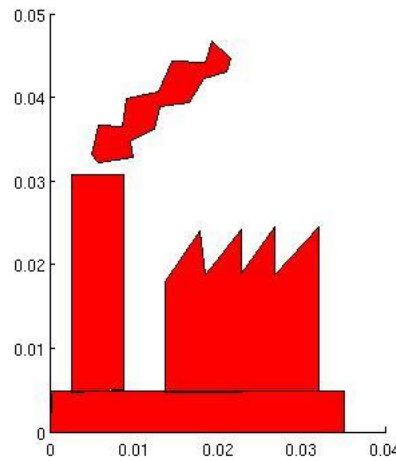


Figura 3.5: *Objeto que representa uma indústria [Nunes et al., 2010].*

Algoritmos de propagação dos impactos

Os algoritmos e fórmulas criadas pelo grupo são hipotéticos e servem para provar que é possível propagar os impactos ambientais causados pelas construções na região e em seus respectivos vizinhos. A propagação da poluição gerada por indústrias foi escolhida para a realização das simulações e testes iniciais. As regras básicas de propagação da poluição são representadas pela Equação (3.1).

$$Pol_x = Pol_{index} * \sum \frac{B_i}{P_x} * Pol_i \quad (3.1)$$

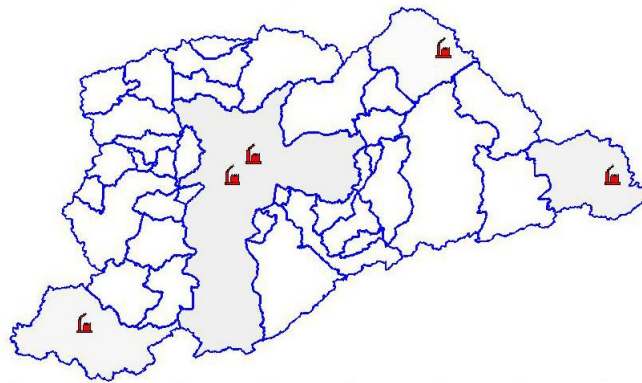


Figura 3.6: Mapa do estado de São Paulo com algumas indústrias inseridas [Nunes et al., 2010].

Onde: Pol_x representa a poluição que se deseja calcular, Pol_{index} é uma constante que representa o índice máximo de propagação da poluição dos vizinhos, B_i é o comprimento da fronteira entre as regiões, P_x é o perímetro total da região em questão e Pol_i é a poluição já existente no vizinho.

O cálculo é basicamente descrito como o somatório das poluições vizinhas ponderadas pela razão entre as fronteiras vizinhas e o perímetro da região. O resultado desse somatório é multiplicado pelo índice máximo de poluição que é propagado pelos vizinhos.

As gerações são criadas a partir de um estado inicial como o da Figura 3.6. As indústrias que foram incluídas têm um índice de poluição associado. A seguir, são criadas as novas gerações onde a poluição gerada pela indústria será propagada para a região e seus vizinhos de acordo com o grafo criado anteriormente.

Foram inseridas cinco indústrias, conforme apresentado na Figura 3.6. São duas indústrias na cidade de São Paulo (centro), uma na cidade de Juquitiba (sudoeste), uma em Santa Isabel (nordeste) e outra em Salesópolis (leste). Os respectivos índices iniciais de poluição de cada indústria inserida foram: 0,02 e 0,04 em São Paulo, 0,035 em Juquitiba, 0,015 em Santa Isabel e 0,05 em Salesópolis. A poluição é aqui representada por valores entre $[0, 1]$, onde os valores mais altos representam uma maior poluição.

O impacto ambiental propaga-se para os municípios vizinhos e no final de N gerações o cenário tende a ficar totalmente poluído, pois os impactos são considerados cumulativos e são propagados com o passar das gerações. A Figura 3.7 mostra a evolução da poluição propagada após 10 gerações e na Figura 3.8 após 18 gerações, sendo perceptível o aumento

do índice de poluição.

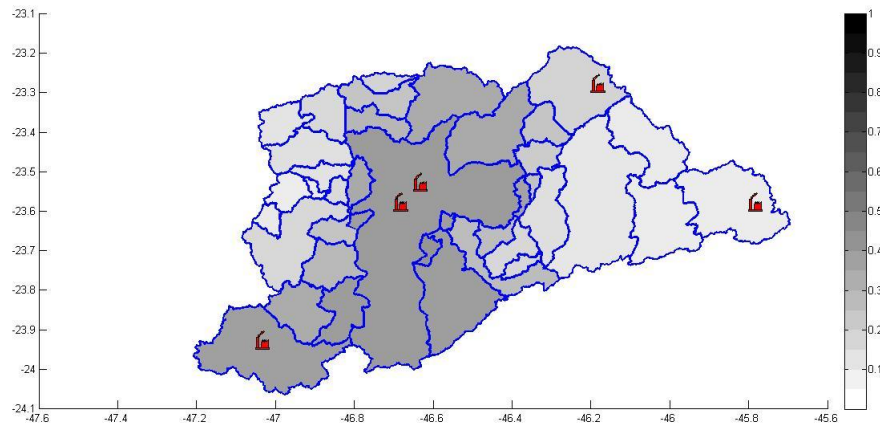


Figura 3.7: *Cenário após 10 gerações [Nunes et al., 2010].*

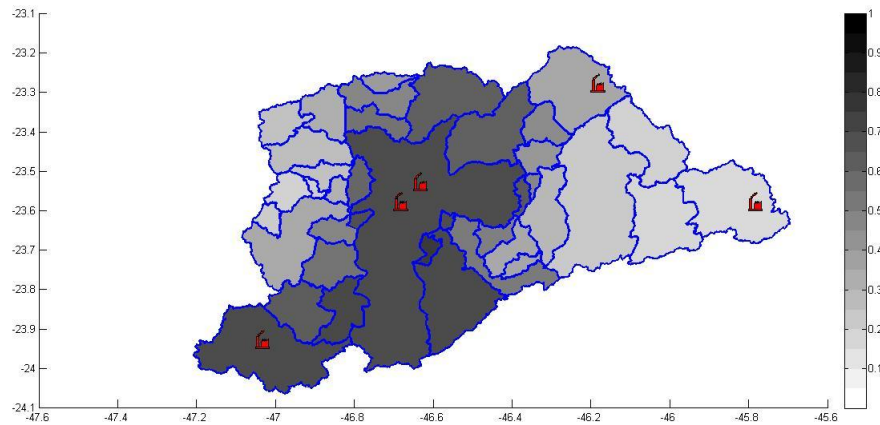


Figura 3.8: *Cenário após 18 gerações [Nunes et al., 2010].*

3.2.2 Modelo ISC

O modelo ISC (*Industrial Source Complex*) provê opções para modelar emissões e estimar a concentração de poluentes a partir de uma ampla gama de fontes presentes em um complexo industrial típico [Kumar et al., 1999]. A base do modelo é a equação linear e estacionária de pluma Gaussiana conforme equação (2.5) que, com algumas modificações, é utilizada para modelar emissões de fontes simples (chaminés). Os prédios vizinhos, as

saídas isoladas, as pilhas de armazenamento, as correias transportadoras, etc, contribuem para que as emissões sofram o efeito de fluir de forma aerodinâmica para baixo.

A equação da pluma Gaussiana estacionária em linha reta é a base do modelo, usada com algumas modificações para que torne-se possível modelar a dispersão de poluentes de fontes simples ou múltiplas, as quais sofrem influências meteorológicas, de relevo e das construções próximas. O modelo utiliza uma equação estacionária de pluma Gaussiana de fonte contínua para cada fonte emissora. O modelo permite considerar na modelagem as emissões de fontes pontuais, de área, volumétrica e abertas. As opções de fonte área e volumétrica podem ser utilizadas na modelagem das emissões automotivas.

Este modelo aceita registros de dados, as condições de ascensão da pluma, transporte, difusão e deposição [Wang et al., 2006]. Ele estima a concentração ou o valor de deposição para a combinação de fonte e receptor para uma hora de propagação de poluentes. São considerados para os cálculos: a temperatura, a taxa de emissão da fonte, a altura da chaminé, a direção e a velocidade média do vento. Esses parâmetros de entrada devem ser configurados pelo usuário.

Segundo [Brode e Atkinson, 1995], o modelo ISC permite especificar uma grade de receptores através de coordenadas cartesianas (x, y) . Os valores de concentração de poluentes serão calculados em todos esses pontos receptores. A origem do sistema de coordenadas está localizada na superfície do solo, na base da chaminé. O eixo x é positivo na direção do vento, o eixo y representa o vento cruzado (normal à x) e o eixo z é a elevação perpendicular aos eixos x e y . O ISC pode estimar a deposição de substâncias secas, a deposição de substâncias úmidas bem como a deposição de substâncias totais. Esta última compreende a soma das duas anteriores em uma localização receptora específica.

As localizações fixas dos pontos do *grid* são convertidas para cada sistema de coordenadas da fonte com a intenção de fazer o cálculo da concentração de uma hora. As concentrações horárias calculadas para cada fonte em cada receptor são somadas para obter a concentração total produzida em cada receptor através da emissão combinada das fontes.

Esse modelo de dispersão de poluentes foi escolhido dentre outros por apresentar um baixo custo computacional. Ele possui uma série de simplificações climatológicas, tais como: perfil de vento, temperatura e pressão constantes ao longo do tempo. Mesmo

assim, pode-se ter uma ideia de como serão afetadas as regiões próximas a fonte emissora.

A equação (3.2) mostra como é calculada a concentração de poluentes em fontes pontuais.

$$X = \frac{QKVD}{2\pi U_s \sigma_y \sigma_z} * \exp \left[-0.5 \left(\frac{Y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Onde a concentração X depende dos seguintes fatores:

- Q : taxa de emissão de poluentes em gramas por segundo;
- K : o coeficiente de expansão utilizado para converter as concentrações calculadas para unidades desejadas;
- V : o termo vertical que representa a dispersão vertical devido à reflexão, podendo ser ou não habilitado;
- D : o termo de decaimento;
- σ_y e σ_z : são os desvios padrões da distribuição das concentrações lateral e vertical em metros;
- U_s : a velocidade do vento na altura da chaminé;
- Y : a distância do vento cruzado.

As entradas necessárias para execução desse modelo são:

- Arquivo do mapa (*shape*) da região de interesse;
- Parâmetros característicos da indústria a ser inserida;
- Nome de um arquivo (*shape*) de saída;
- Direção do vento em graus.

O funcionamento básico dessa versão é representado pelo Diagrama de Fluxo de Dados (DFD) que pode ser visto na Figura 3.9.

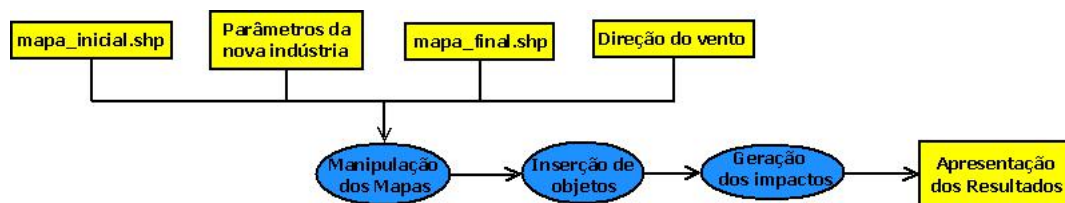


Figura 3.9: Diagrama de Fluxo de Dados do modelo ISC [Thomasi et al., 2011].



Figura 3.10: Mapa com a localização da fonte emissora.

A fonte emissora pode ser inserida em qualquer localização. Porém, durante a realização dos testes, escolheu-se o local onde se concentra o complexo industrial da cidade de Rio Grande, conforme o mapa apresentado na Figura 3.10.

A fator de exemplo, o cenário de testes apresenta as seguintes características:

- Vazão de emissão de $275g/s$;
- Velocidade do vento de $3m/s$;
- Temperatura atmosférica de $18^{\circ}C$;
- Altura da chaminé é $30m$;
- Pressão é $1010Pa$.

Esse teste considera que o tipo de terreno é urbano, que não há deposição no solo, que os intervalos de terreno variam em $X = [0, 5Km]$ e $Y = [-550m, 550m]$ e os ventos concentram-se nas direções nordeste e sudoeste, que segundo, [Nóbrega e Krusche, 2011], são predominantes na região de Rio Grande.

Após a execução, o modelo gera uma matriz tridimensional georreferenciada com latitude, longitude e a concentração de poluentes em cada ponto receptor. Os valores de concentração de poluentes são calculados e exportados para um arquivo *shape* de pontos. Este arquivo de saída pode ser carregado em um GIS, o qual possibilita a visualização dos valores da concentração de poluentes em cada receptor, como pode ser visto na Figura 3.11.

O GIS gerou uma superfície, a qual foi convertida em um arquivo rasterizado, cujos valores de pixel correspondem aos valores de concentração de poluentes, que podem ser vistos na Figura 3.12. Deste arquivo, foram extraídas as isolinhas de concentração correspondentes aos valores de 60, 80, 150 e $240\mu g/m^3$ de acordo com os valores-limite de material particulado total estipulados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente [CONAMA, 1990].

Através do cálculo da distância em metros da fonte emissora até a isolinha de $150\mu g/m^3$, pode-se estimar a distância crítica em que o ambiente no entorno está sendo

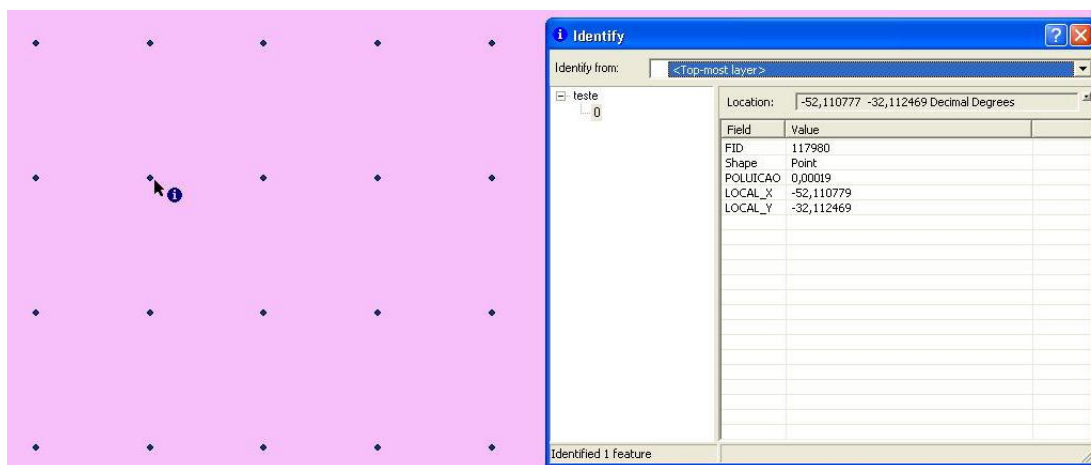


Figura 3.11: Pontos receptores e seus respectivos valores [Thomasi et al., 2011].

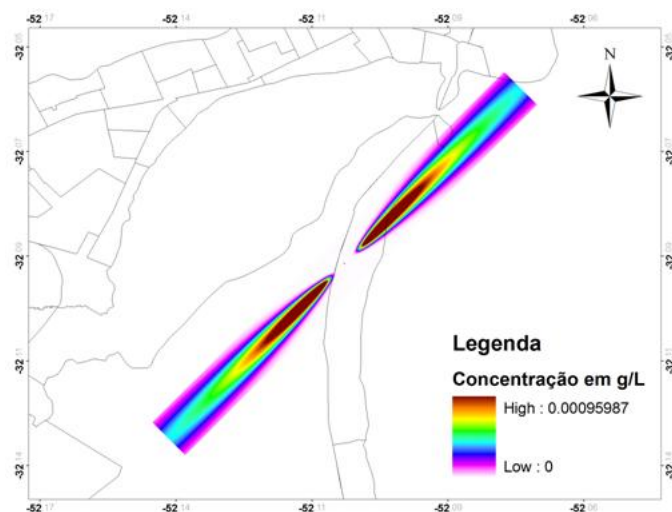


Figura 3.12: Concentração de Partículas Totais em Suspensão na atmosfera [Thomasi et al., 2011].

afetado nesse cenário de simulação, cujo valor corresponde a aproximadamente 5400 metros, conforme apresentado na Figura 3.13. A partir do ponto de emissão, foi gerando um *buffer* múltiplo com quatro classes de distância crítica da indústria.

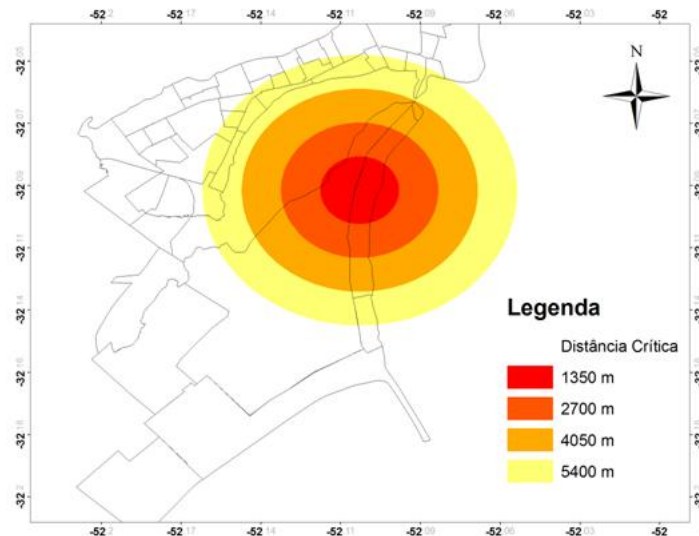


Figura 3.13: Mapa mostrando a distância crítica da fonte emissora [Thomasi et al., 2011].

De acordo com [Thomasi et al., 2011], os testes do modelo ISC mostraram-se capazes de identificar as zonas mais atingidas de acordo com a proximidade da fonte emissora, considerando condições meteorológicas e as características propícias ao acúmulo de poluentes.

3.2.3 Modelo CALPUFF

Nesta seção é apresentado o modelo gaussiano não-estacionário *CALPUFF*. Este modelo possibilita a previsão dos riscos causados por uma ou mais indústrias em um determinado período, com condições meteorológicas variando no espaço e no tempo [Tolga e Elbir, 2003].

O *CALPUFF* é um modelo gaussiano não estacionário utilizado para simular *puffs* de poluentes emitidos de uma fonte para os pontos receptores de acordo com o fluxo de vento ambiente [Levy et al., 2002]. Este modelo pode ser utilizado para uma grande variedade de aplicações, tais como: estudos de modelagem de qualidade do ar, estudos de impacto ambiental, etc. Este modelo também possui baixo custo computacional, porém quando

comparado ao ISC, possui custo computacional mais elevado devido a sua maior robustez quanto as rotinas de pré-processamento e capacidade de simular maiores intervalos de tempo.

A pluma, nestes modelos, é representada por uma série de *puffs* discretos de material poluente e a massa dos *puffs* é dispersada de acordo com uma distribuição gaussiana. O transporte é feito de acordo com a trajetória do seu centro de massa determinado pelo vetor velocidade do vento local [Wang et al., 2006].

Como o vento muda a cada hora, o caminho dos *puffs* também varia de acordo com a direção do fluxo de vento. A medida que o *puff* é transportado no ar, a concentração de seu material poluente vai diminuindo e quando um ponto receptor é encontrado, o material poluente é atribuído a ele. A equação (3.3), definida em [Scire et al., 2000], é a equação básica responsável por fornecer a contribuição de um *puff* em um ponto receptor. Já a equação (3.4) define o termo vertical. Para saber a concentração total em um receptor deve-se efetuar a soma da concentração de cada *puff* na sua vizinhança.

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot g \cdot e^{\left(\frac{-d_a^2}{2\sigma_x^2}\right)} \cdot \left[e^{\left(\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right)} \right] \quad (3.3)$$

$$g = \frac{2}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{\left(\frac{-(H_e + 2nh)^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (3.4)$$

Onde: C é a concentração em (g/m^3), Q é a massa do poluente em (g), σ_x é o desvio padrão da distribuição gaussiana na direção do vento em (m), σ_y é o desvio padrão da distribuição gaussiana do vento cruzado em (m), σ_z é o desvio padrão da distribuição gaussiana na direção vertical em (m), d_a é a distância do *puff* até o receptor na direção do vento em (m), d_c é a distância do *puff* até o receptor na direção do vento cruzado em (m), g é o termo vertical da equação gaussiana em (m), H_e é a altura efetiva do solo até o centro do *puff* e h é a altura da camada de mistura.

O objetivo do uso desse modelo é prever quais serão os riscos causados, em uma determinada região, pela emissão de poluentes provenientes de uma ou mais indústrias.

Esta simulação é responsável por calcular a concentração de poluentes resultantes de uma ou mais emissões, fornecendo como saída um *layer* com diversos pontos georreferenciados com a concentração de determinado composto.

No simulador desenvolvido para o cálculo da concentração de poluentes na atmosfera são utilizados diversos módulos que formam o sistema *TERREL-CALMET-CALPUFF-CALPOST*. Para cada um dos módulos é necessário configurar, de acordo com as características da região de interesse a ser simulada, alguns arquivos de entrada para iniciar a simulação. O diagrama completo de execução do modelo é apresentado na Figura 3.14.

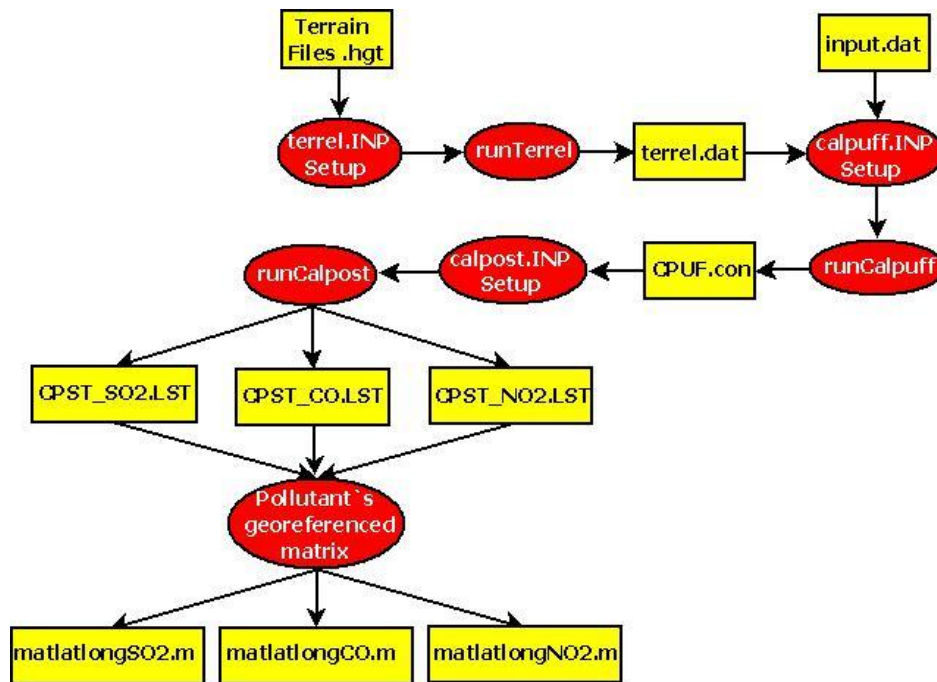


Figura 3.14: Diagrama de Fluxo de Dados completo do modelo não-estacionário CALPUFF [Thomasi et al., 2012].

Cada módulo do sistema gera um ou mais arquivos de saída. Como estão interligados formando um sistema, alguns arquivos de saída de determinado módulo servem como arquivos de entrada para o módulo seguinte, e é importante salientar que todos os arquivos de controle devem ser configurados de acordo com as características da região de interesse para que seja possível efetuar a simulação.

Inicialmente, são efetuadas as configurações de terreno para posterior execução do arquivo de controle do *CALPUFF*. Sendo assim, é necessário primeiramente gerar um arquivo que contenha a coordenada x e y do terreno e sua elevação. Para obter esses

dados é necessário executar o *TERREL*.

O *TERREL* é um pré-processador, que é responsável por processar dados de elevação do terreno a partir de várias bases de dados digitalizadas em uma grade especificada pelo usuário [Scire et al., 2000]. Este pré-processador possui um arquivo de controle onde são atribuídos os arquivos digitalizados. Primeiramente, é necessário obter a grade do terreno e sua topografia, utilizando os arquivos disponíveis em: <http://www.webgis.com/srtm3.html> [Thé et al., 2012].

O próximo passo é configurar esses arquivos como entrada. Feito isso, é possível executar o *TERREL*. Este pré-processador fornece como saída um arquivo formatado contendo as coordenadas em UTM (*Universal Transverse Mercator*) de x , y e z (elevação do terreno).

O *CALMET* é um modelo meteorológico de diagnóstico tridimensional, que é usado, neste caso, pelo simulador de maneira desacoplada, ou seja, ao invés de executar este módulo para gerar o arquivo meteorológico da região de interesse, utiliza-se um arquivo *input.dat* como entrada dos dados meteorológicos adquiridos da estação meteorológica.

Após obter as características do terreno, o próximo módulo é o responsável pelas configurações do arquivo de controle do modelo *CALPUFF*. Neste módulo, dois arquivos são necessários como entrada: o arquivo de terreno (*terrel.dat*) e o arquivo de configurações meteorológicas da região (*input.dat*). O arquivo de terreno é aquele proveniente do pré-processador *TERREL*. Já o arquivo meteorológico é um arquivo formatado contendo: dia, mês e ano dos dados, hora da observação (0-23 horas), direção do vento em graus, temperatura do ar (em °C), classe de estabilidade de Pasquill [Scire et al., 2000] e altura da camada de mistura em metros. Com essas entradas e o arquivo de controle *calpuff.inp* configurado é possível passar à execução do modelo *CALPUFF*, o qual gera como uma de suas saídas o arquivo binário *conc.dat*, que contém as concentrações médias, em um *grid*, dos compostos emitidos que são simulados para um determinado período de tempo.

Para que o cálculo das concentrações possa ser utilizado, é necessário que este arquivo passe por um pós-processador *CALPOST* [Scire et al., 2000]. Sua configuração é feita através do arquivo *calpost.inp* especificando então os arquivos necessários provenientes da execução do *CALPUFF*. Assim, o pós-processamento pode executado para os poluentes emitidos, como: SO_2 , CO , H_2S , PM_{10} e NO_2 . Como saída são fornecidos cinco arquivos

correspondendo a cada poluente, que dentre outras informações, fornecem o valor da concentração destes em cada ponto do *grid*.

Essa versão do simulador é basicamente dividida em duas partes: A execução do *CALPUFF* e a manipulação dos mapas. A Figura 3.15 apresenta um diagrama de fluxo de dados de execução do modelo no *Matlab*. As entradas básicas para execução do modelo são: o arquivo *shape* da região de interesse e o nome do arquivo de saída.

Após a execução do *CALPUFF*, o módulo de manipulação dos mapas recebe como saída um arquivo com matrizes georreferenciadas contendo latitude, longitude e concentração de poluentes nos pontos. Essas matrizes são salvas de forma que qualquer GIS poderá executar funções de leitura, escrita, manipulação e apresentação dos dados.

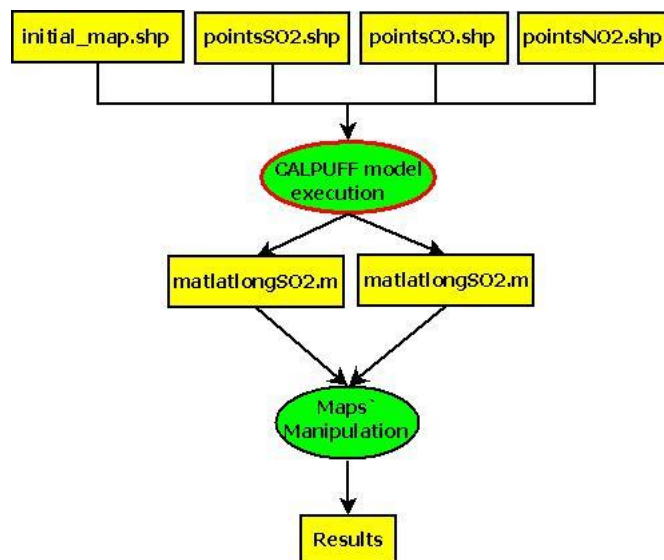


Figura 3.15: Diagrama de Fluxo de Dados do modelo CALPUFF no Matlab, [Thomasi et al., 2012].

Como parte final da execução, os resultados são apresentados no mapa utilizando as curvas de contorno conforme a Figura 3.16, onde o arquivo *shape* dos compostos é sobreposto ao arquivo *shape* do mapa da região de interesse, fornecendo ao usuário uma melhor interface para análise dos resultados. A cor das curvas está relacionada com a concentração de poluentes calculado pelo modelo em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. O *mapping toolbox* também permite que esses dados sejam apresentados em 3D (três dimensões), conforme Figura 3.17.

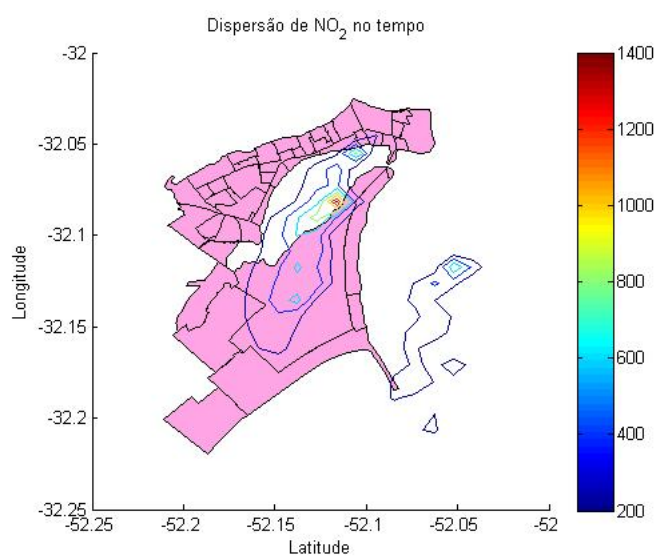


Figura 3.16: Resultados apresentados pelo módulo de manipulação dos mapas.

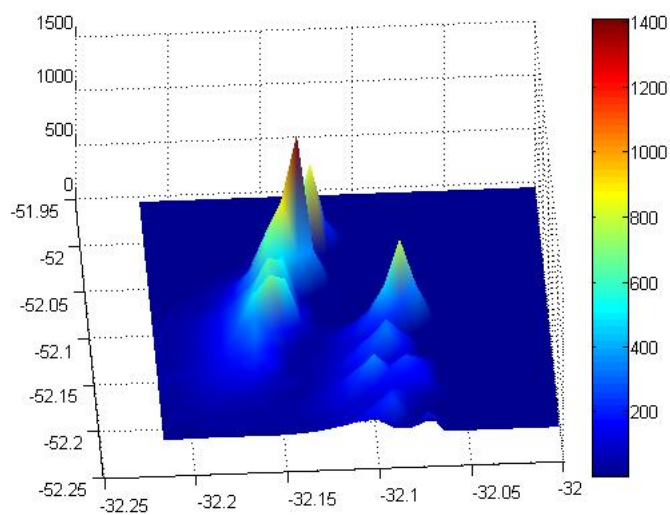


Figura 3.17: Resultados em 3D apresentados pelo módulo de manipulação dos mapas.

3.2.4 Interfaces Gráficas Desenvolvidas

Após a utilização dos modelos (*ISC* e *CALPUFF*) apresentados anteriormente, percebeu-se a necessidade de deixar mais simples para os usuários a utilização de tais ferramentas. Devido isso, houve a necessidade de criação de interfaces gráficas amigáveis, que auxiliam a organizar e a agrupar todos os modelos desenvolvidos.

Quando o *software* é inicializado, o usuário deve escolher o modelo (hipotético, *ISC* ou *CALPUFF*), conforme apresentado na Figura 3.18. Em seguida, o usuário deve definir o nome da simulação (Figura 3.19).

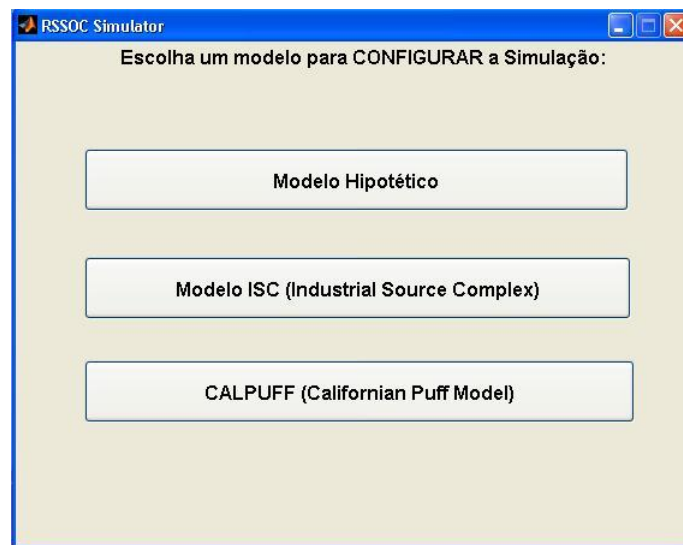


Figura 3.18: Interface inicial onde o usuário deve escolher o modelo que deseja executar [Nunes et al., 2012].

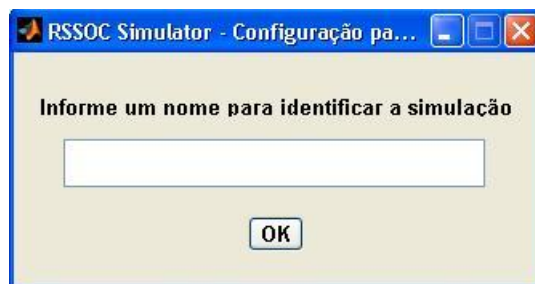


Figura 3.19: O usuário precisa definir o nome da simulação [Nunes et al., 2012].

Caso o usuário escolha executar o modelo hipotético, então, o utilizador informa o arquivo de entrada (*shape*) e todas as localizações das indústrias (latitude e longitude), bem como o índice percentual de poluição de cada indústria. A Figura 3.20 apresenta a

interface gráfica com este modelo.

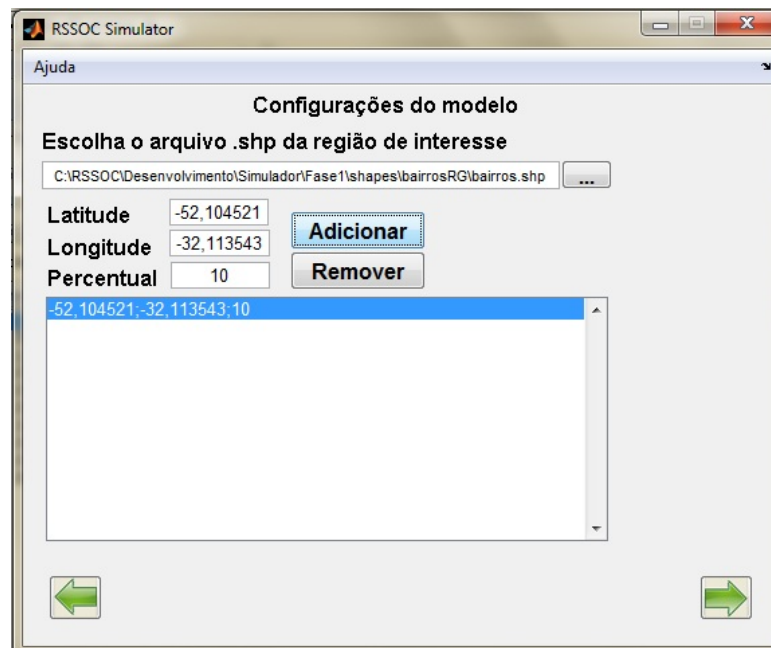


Figura 3.20: Interface gráfica do modelo hipotético [Nunes et al., 2012].

Caso o usuário escolha executar o modelo *ISC*, então, o utilizador deve informar a localização da indústria (latitude e longitude), a vazão em g/s , a altura da chaminé em metros, a direção do vento em graus, a classe de estabilidade (A - F), temperatura do ar em $^{\circ}C$, o diâmetro da chaminé em metros, a pressão em milibares e a velocidade do vento em m/s , conforme a Figura 3.21, que apresenta a interface gráfica com este modelo.

Por fim, caso o usuário escolha executar o modelo *CALPUFF*, este, devido a sua complexidade, necessitou de uma combinação de interfaces gráficas para a configuração de todas as etapas, conforme descrito na Seção 3.2.3. Essas interfaces tem o objetivo de facilitar a utilização do modelo para os usuários menos experientes.

A interface apresentada na Figura 3.22 necessita que usuário insira o arquivo de controle do pré-processador *TERREL* chamado (*terrel.inp*) e também os arquivos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) que descrevem o terreno da região.

A interface apresentada na Figura 3.23 necessita que o usuário insira o arquivo (*input.dat*) com os dados meteorológicos de entrada do modelo *CALMET* e também o arquivo *calpuff.inp* de configuração e controle do modelo *CALPUFF*.

A interface apresentada na Figura 3.24 necessita que o usuário selecione quais compostos químicos deseja pós-processar. Devido a isso, ele deve inserir o arquivo de configuração

RSSOC Simulator

Digite os dados da fonte poluente

Latitude: Classe de estabilidade:

Longitude: Temperatura:

Vazão: Diâmetro da chaminé:

Altura da chaminé: Pressão:

Ângulo do vento: Velocidade do vento:

 **EXECUTAR**

Figura 3.21: Interface gráfica do modelo ISC [Nunes et al., 2012].

RSSOC Simulator - Configuração Estática modelo CALPUFF

Ajuda

TERREL

Carregar o arquivo (*.INP) de controle do TERREL

...

Carregar o(s) arquivo(s) (*.hgt) de elevação do terreno

Caminho: ...

* Selecione todos os arquivos necessários do diretório.

Arquivo(s):

Figura 3.22: Interface do modelo Calpuff - configuração do pré-processador TERREL [Nunes et al., 2012].

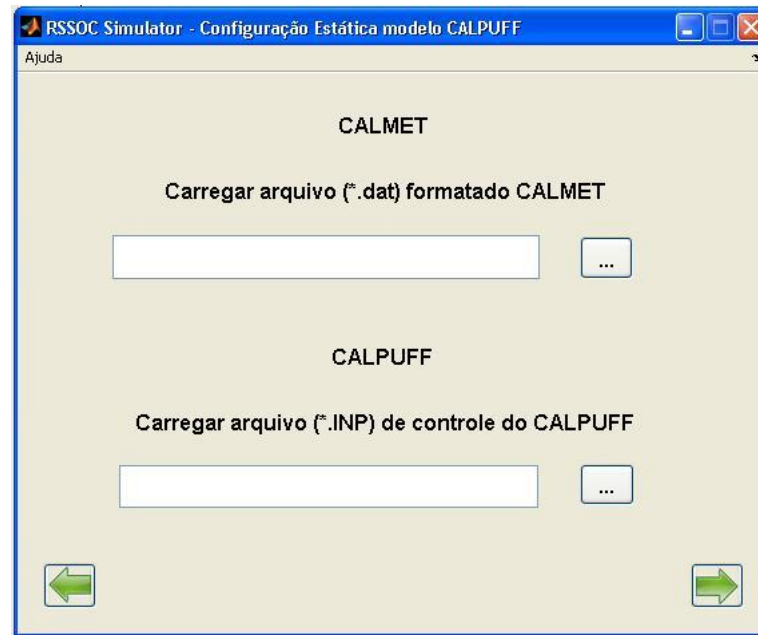


Figura 3.23: Interface para informar arquivos de entrada: meteorológico e de configuração do modelo CALPUFF [Nunes et al., 2012].

e controle do pós-processador *CALPOST* para cada um desses compostos selecionados.

A interface apresentada na Figura 3.25 necessita que o usuário insira as coordenadas UTM da fonte poluidora.

A Figura 3.26 apresenta a interface final onde o usuário deve escolher o arquivo *shape* da região de interesse, o qual será utilizado na etapa de manipulação e apresentação dos resultados da simulação.

Após todas essas etapas terem sido devidamente preenchidas, o usuário deve finalmente pressionar o botão (*Simular*) para que todas etapas do modelo sejam executadas. Os arquivos de saída então são pós-processados e os resultados são apresentados no mapa conforme apresentado pela Figura 3.16.

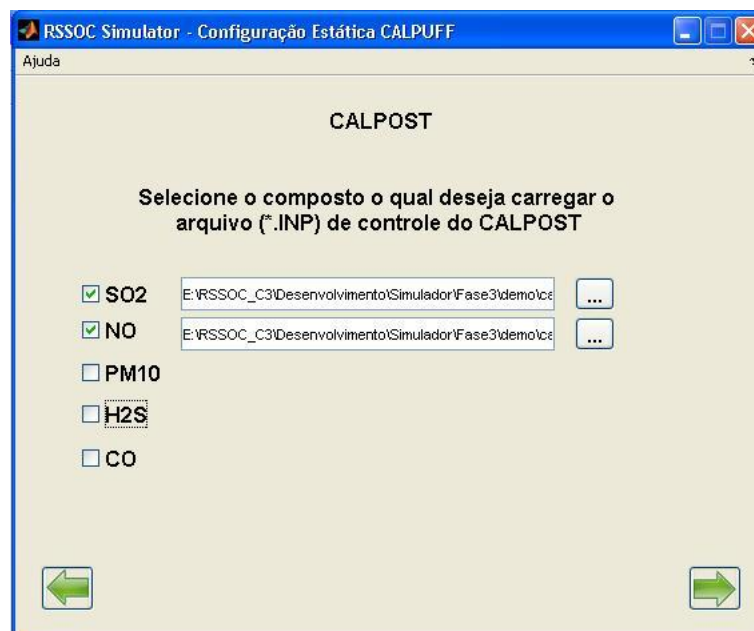


Figura 3.24: Interface Gráfica para informar arquivos para o pós-processador CALPOST [Nunes et al., 2012].

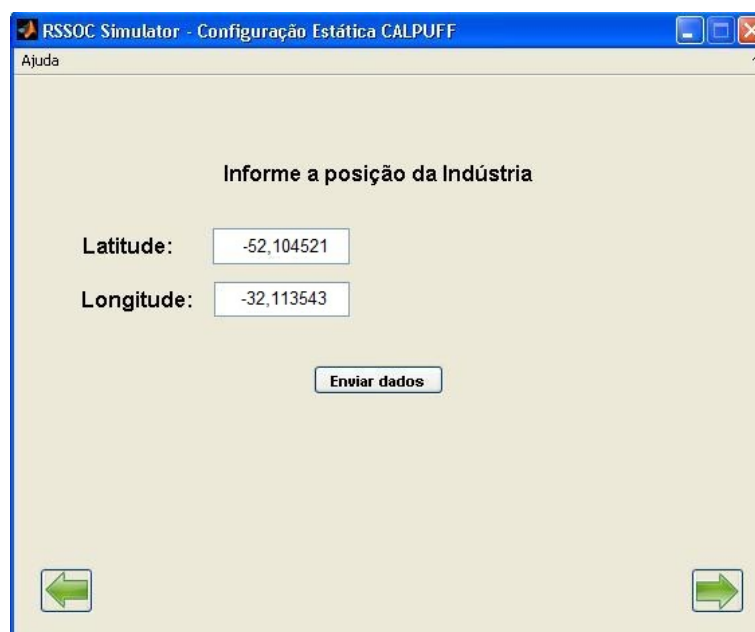


Figura 3.25: Interface Gráfica para informar a posição da indústria [Nunes et al., 2012].



Figura 3.26: Interface Gráfica para informar o arquivo(shape) da região de interesse [Nunes et al., 2012].

Capítulo 4

Testes de simulação e resultados obtidos

Nesse capítulo serão apresentados os algoritmos de manipulação e cálculo dos dados de entrada, bem como, o cenário de simulação, a cidade de Rio Grande - RS, devido ao seu histórico de problemas com poluentes atmosféricos e também pelo recente crescimento do pólo industrial. Para tais simulações utilizou-se o modelo não-estacionário de dispersão de poluentes *CALPUFF*, devido a sua robustez, ao baixo custo computacional, a opção de adicionar múltiplas fontes poluidoras e capacidade de simular a propagação de longos períodos de tempo (meses) de forma rápida e eficiente. Por fim, também são apresentados a análise dos resultados obtidos através das simulações.

4.1 Dados de entrada e algoritmos

O modelo não-estacionário *CALPUFF* é capaz de simular períodos longos de propagação de poluentes, porém, faz-se necessário que o usuário insira todos os dados de entrada do período. Estes dados podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Dados de terreno da região de simulação;
- Dados meteorológicos de todo o período a ser simulado.

Os dados de topografia do terreno da região de interesse podem ser considerados estáticos (não variam ao longo do período de simulação) e portanto, não são considerados problemáticos. Entretanto, de acordo com o modelo *CALPUFF*, os dados meteorológicos

variam de hora em hora, e alguns deles precisam ser convertidos e/ou calculados. O arquivo de entrada do modelo *CALPUFF* possui os seguintes campos:

- Data e hora;
- Direção do vento de $[0, 360^\circ]$;
- Velocidade do vento em m/s ;
- Temperatura atmosférica em $^\circ K$;
- Classe de estabilidade de A à F;
- Altura da camada de mistura.

A maior parte dos dados utilizados nas simulações são diariamente coletados pela estação meteorológica da FURG (Universidade Federal de Rio Grande), porém, a altura da camada de mistura e a classe de estabilidade necessitam ser calculadas. A temperatura atmosférica precisa ser convertida de $^\circ C$ para $^\circ K$. Para que esses dados fossem calculados, fez-se necessário a criação de algumas rotinas de conversão, cálculo e manipulação de arquivos (disponíveis no Anexo A.2).

4.1.1 Cálculo da altura da camada de mistura

Segundo [Schnelle e Dey, 1999], o cálculo da altura da camada de mistura é dividido em três partes. Tem-se uma equação para o período diurno (instável), onde, devido a radiação solar, o fluxo de calor sensível é positivo; outra equação para o período noturno (estável), onde o fluxo de calor sensível é negativo; durante os curtos períodos neutros de transição entre noite e dia e vice-versa, onde pode-se considerar que não há fluxo de calor sensível.

Segundo [Maul, 1980], a velocidade de atrito superficial, u_* , pode ser computada através de dados meteorológicos, desde que se conheça as características de rugosidade da superfície do solo. Primeiramente, o fluxo de calor sensível Q_h é calculado durante as horas do dia pelas seguintes Equações (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) e (4.5):

$$Q_h = \alpha R + H_0 \quad (4.1)$$

Cobertura de Nuvens	Fator de redução de radiação (β)
0	1,00
1	0,91
2	0,84
3	0,79
4	0,75
5	0,72
6	0,68
7	0,62
8	0,53
9	0,41
10	0,23

Tabela 4.1: Cobertura de nuvens e fator de redução de radiação na presença de nuvens adaptado de [Schnelle e Dey, 1999].

$$R = 950\beta \sin(V) \quad (4.2)$$

$$H_0 = 2,4C - 25,5 \quad (4.3)$$

$$Q_0 = Q_h/(\rho C_p) \quad (4.4)$$

$$Z_m = Z_{ms} - 4Z_0 \quad (4.5)$$

Onde: Q_h é o fluxo de calor sensível, H_0 é o fluxo de calor na ausência de radiação solar incidente, α é a constante de uso do solo aproximadamente, R é a radiação solar, β é o fator de redução de radiação na presença de nuvens (definido na Tabela 4.1), V é o ângulo de elevação solar, C é a cobertura de nuvens em décimos, Z_0 é a rugosidade da superfície (apresentado na Tabela 4.2) e Z_{ms} é a altura das medições realizadas.

Os dados de cobertura de nuvens em décimos não foram capturados pela estação automática da FURG. Devido a isso, fez-se necessário utilizar os dados da estação convencional. Os dados dessa estação não são medidos de hora em hora, conforme as entradas do modelo *CALPUFF*, então, para que fosse possível efetuar os cálculos de fluxo de calor sensível fez-se necessário interpolar os dados de cobertura de nuvens. A Figura 4.1 mostra, com o marcador, os dados coletados e também a curva interpolada.

Assim u_* é determinado pelas seguintes variáveis: velocidade do vento, rugosidade da superfície e o fluxo de calor. Durante condições estáveis, u_* é determinado pelas seguintes Equações (4.6), (4.7), (4.8), (4.9). Durante condições instáveis, pode ser calculado pelas

Descrição do Terreno	comprimento da rugosidade da superfície Z_0 (m)
Gelo ou lama	0,000001
Mar aberto e calmo	0,00002
Mar agitado	0,00005
Superfície de neve	0,003
Gramado	0,008
Pastagem áspera	0,01
Descampado	0,03
Plantação	0,05
Poucas árvores	0,1
Várias árvores e poucos prédios	0,25
Floresta e mata	0,5
Subúrbios	1,5
Cidades com prédios altos	3,0

Tabela 4.2: Comprimento da rugosidade da superfície adaptado de [Rohatgi e Nelson, 1994].

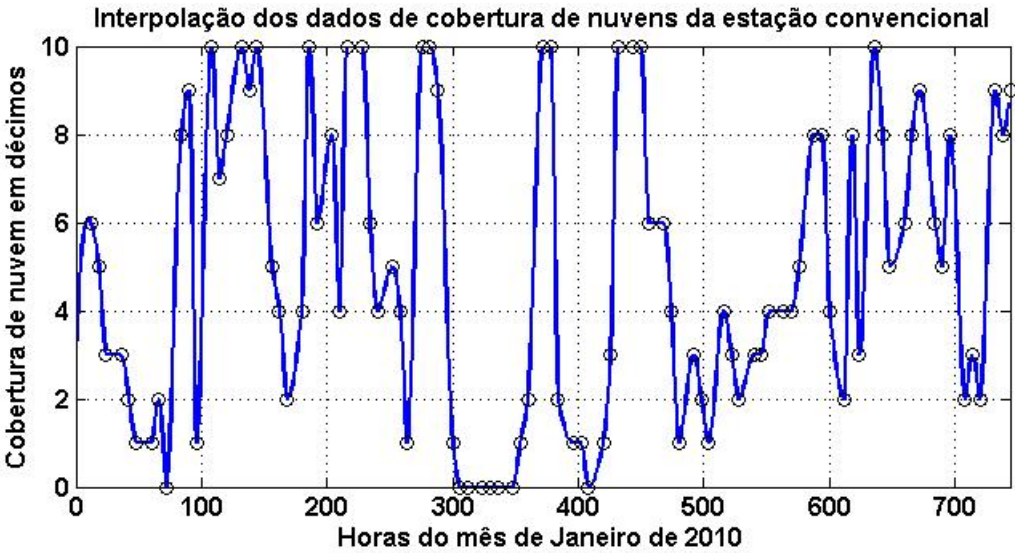


Figura 4.1: Dados interpolados de cobertura de nuvens.

Equações (4.10), (4.11) e (4.12). Já nas condições neutras, u_* é calculado pela Equação (4.13).

$$u_* = \frac{C_{DN}u_m}{2}[1 + \sqrt{C}] \quad (4.6)$$

$$C_{DN} = \frac{0,4}{\ln\left(\frac{Z_m}{Z_0}\right)} \quad (4.7)$$

$$C = 1 - \frac{4u_0^2}{C_{DN}u_m^2}, C \geq 0 \quad (4.8)$$

$$u_0^2 = \frac{4,7Z_m}{440} \quad (4.9)$$

$$u_* = \frac{ku_m}{\ln\left(\frac{Z_m}{Z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{Z_m}{L}\right) + \Psi_m\left(\frac{Z_0}{L}\right)} \quad (4.10)$$

$$\Psi_m\left(\frac{Z_m}{L}\right) = \begin{cases} 0, & \text{se } \frac{Z_m}{L} = 0 \\ \frac{-5Z_m}{L}, & \text{se } \frac{Z_m}{L} > 0 \\ 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2\tan^{-1}(x) + \frac{\pi}{2}, & \text{se } \frac{Z_m}{L} < 0 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$x = \left(1 - 16\frac{Z_m}{L}\right)^{1/4} \quad (4.12)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (4.13)$$

onde: u_m é a velocidade do vento medida na altura Z_{ms} , ρ é a densidade do ar, Ψ_m é a função de correção para o perfil logarítmico do vento, C_{DN} é o coeficiente de arrasto neutro e τ_0 é a tensão superficial, ambos definidos em [Pielke, 2001].

As forças mecânicas e convectivas determinam a turbulência. Então, Monin e Obukhov [Schnelle e Dey, 1999] propuseram uma teoria da similaridade, que introduziu

dois parâmetros, a velocidade de fricção u_* e o comprimento L , que durante o período instável, L pode ser calculado pela Equação (4.14) usando os valores de u_* e Q_0 calculados anteriormente. Durante o período estável e o período neutro, L é definido pela Equação (4.15).

$$L = -\frac{u_*^3 T_0}{0,4gQ_0} \quad (4.14)$$

$$L = 1100u_*^2 \quad (4.15)$$

onde: T_0 é a temperatura observada e g é a aceleração da gravidade.

Durante as horas do dia, a radiação solar, ao atingir o solo, produz um fluxo de calor sensível positivo, o que causa o crescimento da camada de mistura. Segundo [Maul, 1980], durante esse período instável, a variação da altura da camada de mistura pode ser estimada pelas Equações (4.16) e (4.17).

$$h_{t+1} = \sqrt{h_t^2 + \frac{2,3Q_h\Delta t}{\Psi_1\rho C_p} - \frac{2(\Delta\Theta)_t h_t}{\Psi_1}} + \frac{(\Delta\Theta)_{t+1}}{\Psi_1} \quad (4.16)$$

$$(\Delta\Theta)_{t+1} = \sqrt{\frac{0,3\Psi_1 Q_h \Delta t}{\rho C_p}} \quad (4.17)$$

Onde: Ψ_1 é a temperatura potencial ($6,5^\circ\text{K}/\text{km}$), Δt é o passo de tempo (3600s), ρ é a densidade do ar em kg/m^3 , C_p é o calor específico do ar sob pressão constante ($0,996\text{J}/\text{g}^\circ\text{K}$) e $\Delta\Theta$ é a descontinuidade da temperatura na parte superior da camada de mistura.

Durante o período neutro, o cálculo da camada de mistura é determinado pelas Equações (4.18) e (4.19). Já no período estável, o cálculo da camada de mistura é determinado pelo menor resultado obtido entre as Equações (4.20) e (4.21).

$$h = \frac{u_*}{4f} \quad (4.18)$$

$$f = 2\Omega \sin(\phi) \quad (4.19)$$

$$h = 2400\sqrt{u_*^3} \quad (4.20)$$

$$h = 0,4\sqrt{\frac{u_*L}{f}} \quad (4.21)$$

Onde: f é o parâmetro de Coriolis, ϕ é a latitude e Ω é a taxa de rotação da terra ($7,29.10^{-5}/s$).

4.1.2 Cálculo da classe de estabilidade

De acordo com [Schnelle e Dey, 1999], como uma medida simplificada de estabilidade, Gifford modificou um sistema de classificação de estabilidade baseado nas sugestões de Pasquill. Nesta classificação presume-se que a estabilidade das camadas próximas do solo dependem da radiação líquida para a indicação de turbilhões convectivos e da velocidade do vento como uma indicação de vórtices mecânicos.

A radiação, conforme descrito na Seção 2.2.1, depende do ângulo de elevação solar (ângulo zenital), que é uma função da latitude, do dia do ano e da hora do dia. Também é importante deixar claro que quando o céu está coberto de nuvens, há uma redução da radiação, de acordo com o fator de redução (β) definido na Tabela 4.1. Durante a noite, para classificar a estabilidade atmosférica julga-se apenas a cobertura de nuvens.

Então Turner, baseado no trabalho de Pasquill [Pasquill, 1976] e Gifford [Gifford, 1962], criou uma classificação de estabilidade atmosférica que baseia-se nas observações feitas pelas estações meteorológicas, tornando seu cálculo mais objetivo e claro. A Tabela 4.3 apresenta as sete classes de estabilidade atmosféricas e a forma de classificá-las.

4.2 Cenários de simulação

Os cenários escolhidos são da cidade de Rio Grande, região sul do estado do Rio Grande do Sul, que de acordo com [IBGE, 2010] está localizada na latitude $-32,03^\circ$ e longitude $-52,09^\circ$, possui área de aproximadamente $2710km^2$ e cerca de 197 mil habitantes. Cidade onde está ocorrendo um grande crescimento industrial devido a criação do polo naval.

Classes de estabilidade durante o dia					
	Velocidade do vento u (m/s)				
Radiação	$u < 2$	$2 < u < 3$	$3 < u < 5$	$5 < u < 6$	$u > 6$
Forte	A	B	B	C	C
Moderada	B	B	C	C	D
Fraca	B	C	C	D	D
Classes de estabilidade durante a noite					
	Velocidade do vento u (m/s)				
Cobertura de nuvens	$u < 2$	$2 < u < 3$	$3 < u < 5$	$5 < u < 6$	$u > 6$
$C \geq 5$	F	E	D	D	D
$C < 5$	F	F	E	D	D

Tabela 4.3: *Classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford-Turner adaptado de [Schnelle e Dey, 1999].*

Pretende-se avaliar o cenário atual da cidade, que já possui um histórico de problemas oriundos da propagação de poluentes atmosféricos.

A cidade possui diversas empresas instaladas no pólo industrial. A maioria dessas empresas são do setor secundário, que envolvem-se no processamento de matéria-prima vindas das indústrias extrativistas do setor primário, tais como: alimentícias, metalúrgicas, siderúrgicas, petroquímicas, refinarias, produtoras de adubo e outras. Muitas dessas fábricas possuem fontes emissoras de poluentes atmosféricos. Portanto, esse trabalho pretende simular e avaliar o que vem ocorrendo recentemente na cidade de Rio Grande, no que diz respeito a propagação de poluentes atmosféricos.

Escolheu-se dois diferentes períodos do ano para realização dos testes de propagação de poluentes. Um período escolhido é durante o verão, mais precisamente o mês de Janeiro de 2010, devido as seguintes características: temperaturas altas, ventos fracos e forte radiação solar. Já o segundo período escolhido é durante o inverno, o mês de Julho de 2010, justamente por possuir características opostas ao período anterior.

Dentro desses dois períodos criou-se diferentes cenários de simulação, onde variou-se o número de fontes emissoras de poluentes. As simulações começam com apenas uma única fonte poluidora, e depois passam a ter múltiplas fontes. Simulou-se os mesmos períodos para duas, três, cinco e dez fontes poluidoras. Os compostos químicos considerados na dispersão de poluentes foram: CO , NO_2 , SO_2 , PM_{10} e H_2S .

As simulações são mais complexas devido ao período de um mês e por possuírem múltiplas fontes poluidoras. Todas as variáveis meteorológicas de entrada variam de

Número da fonte	Vazão de SO_2	Vazão de NO_2	Vazão de PM_{10}	Vazão de H_2S	Vazão de CO
1	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
2	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
3	7,20	88,78	11,10	1,48	44,39
4	43,33	129,9	43,33	3,29	108,33
5	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
6	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
7	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
8	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
9	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39
10	7,40	88,78	11,10	1,48	44,39

Tabela 4.4: Vazões de emissão dos compostos químicos em g/s.

Número da fonte	Altura (m)	Diâmetro (m)	Latitude (graus decimais)	Longitude (graus decimais)
1	50	1,6	-52.10452	-32.11354
2	25	1,5	-52.09105	-32.04325
3	35	2,0	-52.11396	-32.11577
4	40	2,0	-52.10224	-32.07274
5	50	1,6	-52.10291	-32.07091
6	25	1,75	-52.09789	-32.07714
7	25	1,75	-52.11182	-32.10231
8	25	1,75	-52.09111	-32.04496
9	25	1,75	-52.10048	-32.07073
10	25	1,75	-52.08796	-32.04377

Tabela 4.5: Características e localização das fontes poluidoras.

hora em hora. A localização de cada uma das fontes poluidoras pode ser visualizada na Tabela 4.5. A Figura 4.2 mostra no mapa a localização geográfica das empresas, porém algumas delas possuem mais de uma fonte poluente, as quais possuem suas características apresentadas pelas Tabelas 4.4 e 4.5.

As fontes listadas nas Tabelas 4.4 e 4.5 que têm o número de 1 à 3 e de 5 à 10 representam um perfil de fonte poluidora mais comum da região (fornos e caldeiras), as quais utilizam óleo combustível residual (BPF). Esse perfil de fonte é um dos que é apresentado como exemplo nos arquivos de configuração do *CALPUFF*. Os valores de emissão apresentados na Tabela 4.4 dizem respeito a emissoras de pequeno porte. Já a fonte de número 4 representa um perfil de fonte poluidora do grupo dos turbo-geradores que também utilizam óleo BPF como combustível. Os valores de emissão de poluentes dessa fonte representam uma emissora de grande porte.

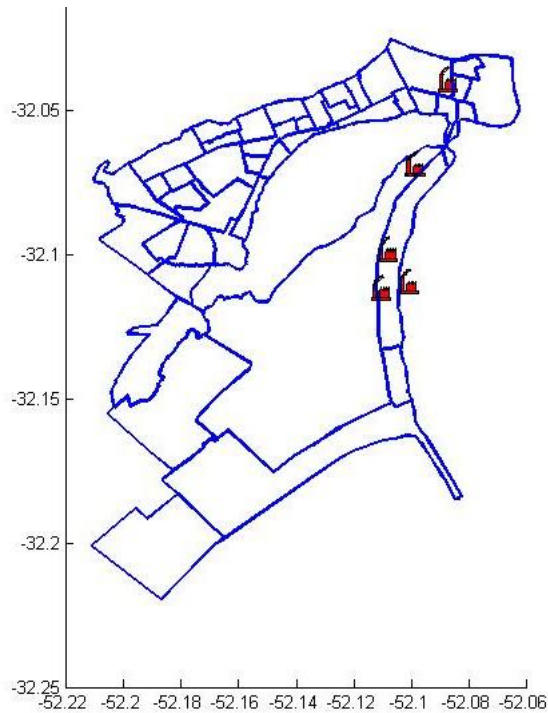


Figura 4.2: *Localização das empresas.*

4.3 Análise e discussão dos resultados obtidos

Nessa seção serão apresentados os resultados obtidos para os cenários anteriormente apresentados. Os dados então serão discutidos e analisados perante a legislação ambiental vigente.

4.3.1 Resultados para Janeiro de 2010

Nessa subseção serão apresentados os gráficos com os valores médios e máximos de concentração de poluentes em ($\mu g/m^3$) do mês de Janeiro de 2010 dos seguintes compostos:

- Monóxido de carbono (CO);
- Dióxido de enxofre (SO_2);
- Dióxido de nitrogênio (NO_2);
- Sulfeto de hidrogênio (H_2S);
- Material particulado menor que $10\mu g$ (PM_{10}).

As Figuras 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam a concentração média de monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e material particulado menor que $10\mu g$, respectivamente para o mês de Janeiro de 2010. Percebe-se que os valores de concentração de poluentes não são muito representativos perante a legislação vigente [CONAMA, 1990], pois nesses resultados médios nenhum dos níveis estabelecidos na Tabela 2.1 apresentada na Seção 2.4 foram alcançados. No dia 20 de Janeiro os valores médios de concentração de poluentes tiveram seu máximo valor registrado, atingindo, $58,3\mu g/m^3$ para CO , $12,04\mu g/m^3$ para SO_2 , $108,54\mu g/m^3$ para NO_2 , $1,91\mu g/m^3$ para H_2S e $16,08\mu g/m^3$ para PM_{10} .

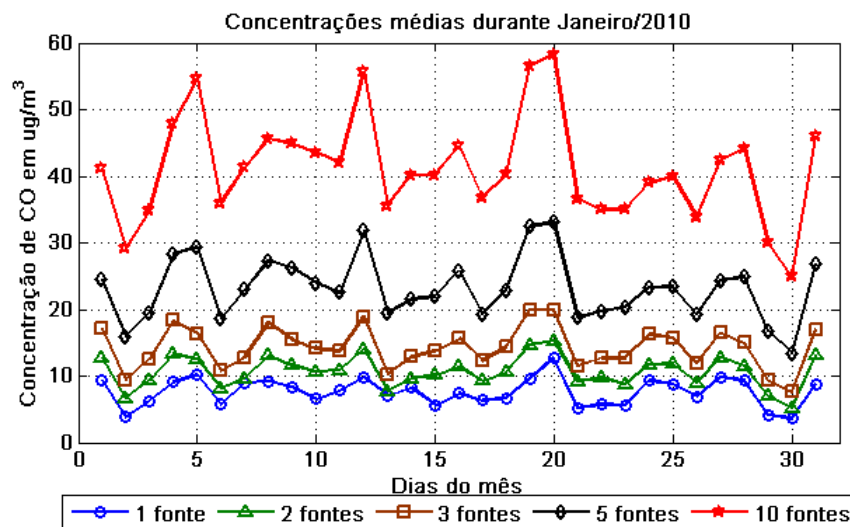
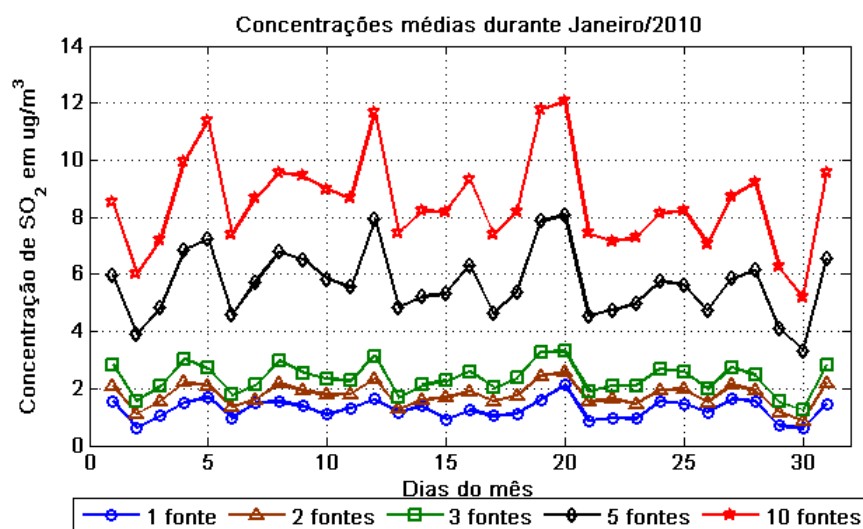
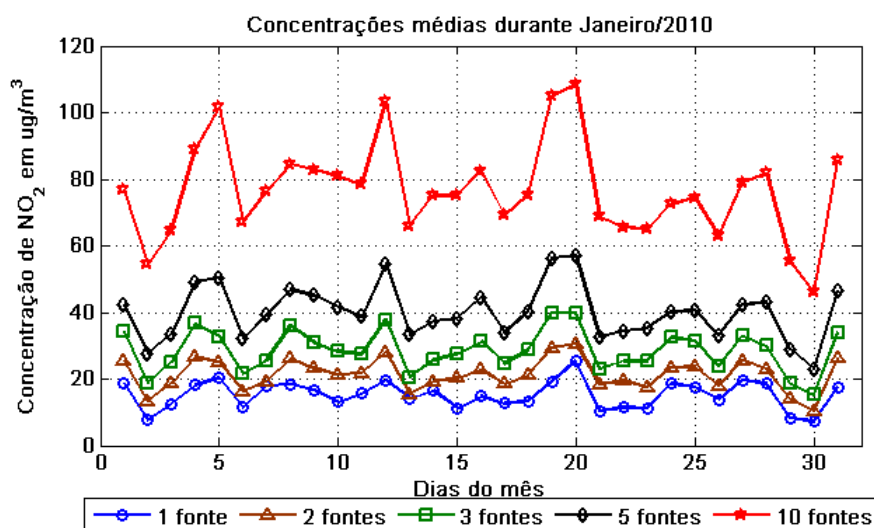


Figura 4.3: Concentração média de CO durante Janeiro/2010.

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam a concentração máxima de monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, sulfeto de nitrogênio e material particulado menor que $10\mu g$, respectivamente para o mês de Janeiro de 2010. Os resultados máximos com duas e três fontes poluidoras foram sucumbidos, pois se confundem com os resultados de uma fonte poluidora e muitas vezes acabaram ficando sobrepostos entre si.

Percebe-se que os valores de concentração de poluentes alcançados nas simulações com dez fontes poluidoras são preocupantes perante a legislação vigente [CONAMA, 1990]. Nesses resultados máximos, o poluente NO_2 ultrapassa mais de uma vez ao longo do mês os $1130\mu g/m^3$ que definem o nível de atenção estabelecidos na Tabela 2.1. Isso pode ser

Figura 4.4: Concentração média de SO_2 durante Janeiro/2010.Figura 4.5: Concentração média de NO_2 durante Janeiro/2010.

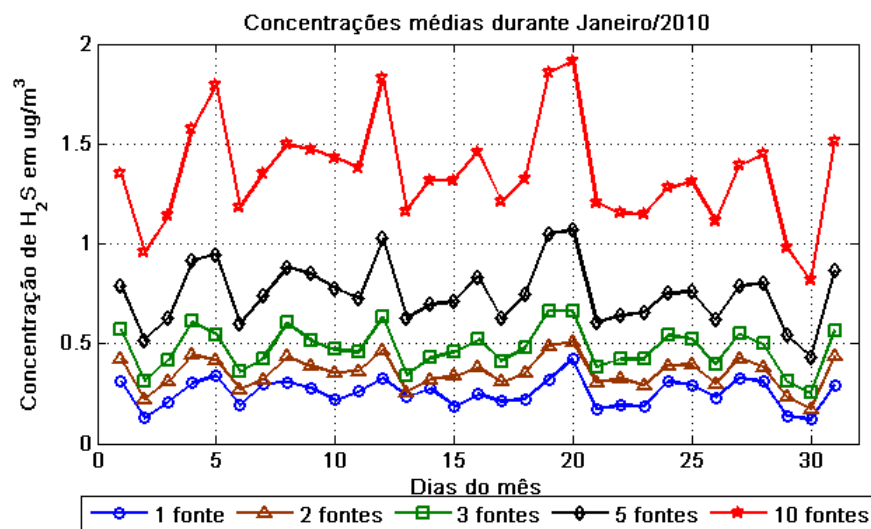


Figura 4.6: Concentração média de H_2S durante Janeiro/2010.

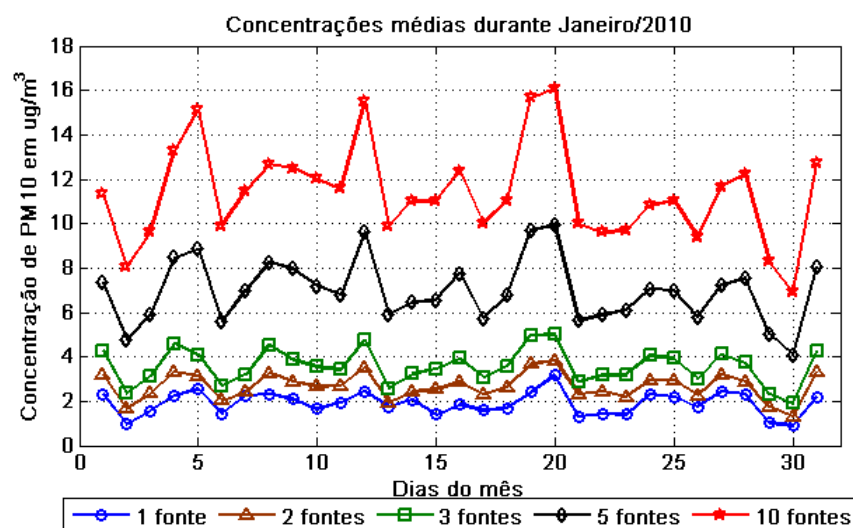


Figura 4.7: Concentração média de PM_{10} durante Janeiro/2010.

percebido nos dias, 2, 6, 11, 14, 15, 16, 17, 21, 25, 27, 29 e 30 onde as concentrações para esse poluente são: $1212,8\mu g/m^3$, $1407,2\mu g/m^3$, $1662,6\mu g/m^3$, $1339\mu g/m^3$, $1142,2\mu g/m^3$, $1141,6\mu g/m^3$, $1401,1\mu g/m^3$, $1543,2\mu g/m^3$, $1234,4\mu g/m^3$, $1130,7\mu g/m^3$, $1539,6\mu g/m^3$ e $1216,8\mu g/m^3$, respectivamente. Percebe-se que esse nível é ultrapassado em 12 dias do mês, o que de fato é preocupante, pois isso ocorre em aproximadamente 38% dos dias do mês de Janeiro.

No dia 6 os poluentes SO_2 e PM_{10} alcançaram suas concentrações máximas de $211,23\mu g/m^3$ e $254,23\mu g/m^3$, respectivamente. No dia 11 o poluente H_2S alcançou sua concentração máxima de $27,7\mu g/m^3$ e no dia 29 o poluente CO teve sua concentração máxima atingida de $833,07\mu g/m^3$, os quais não são resultados preocupantes perante os índices estabelecidos na Tabela 2.1.

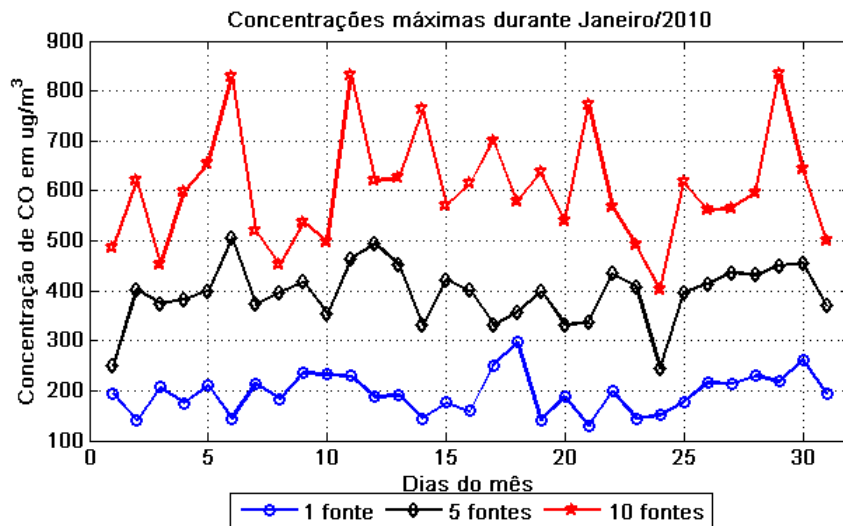
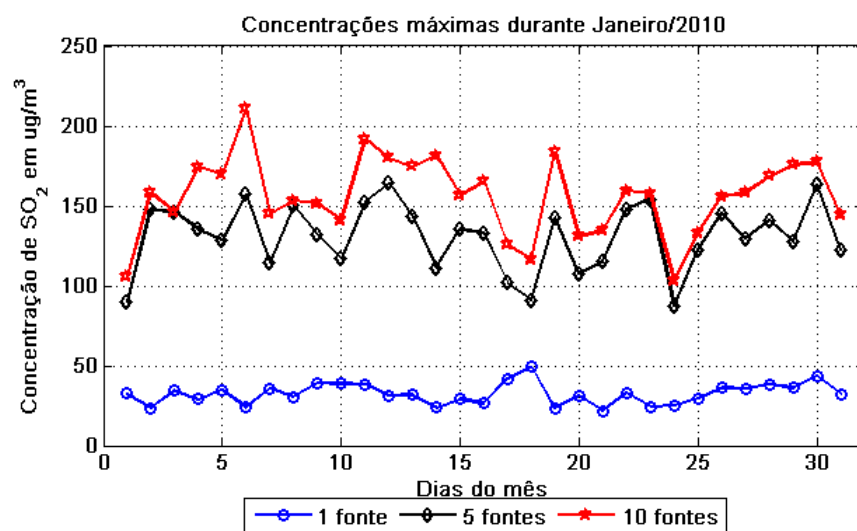
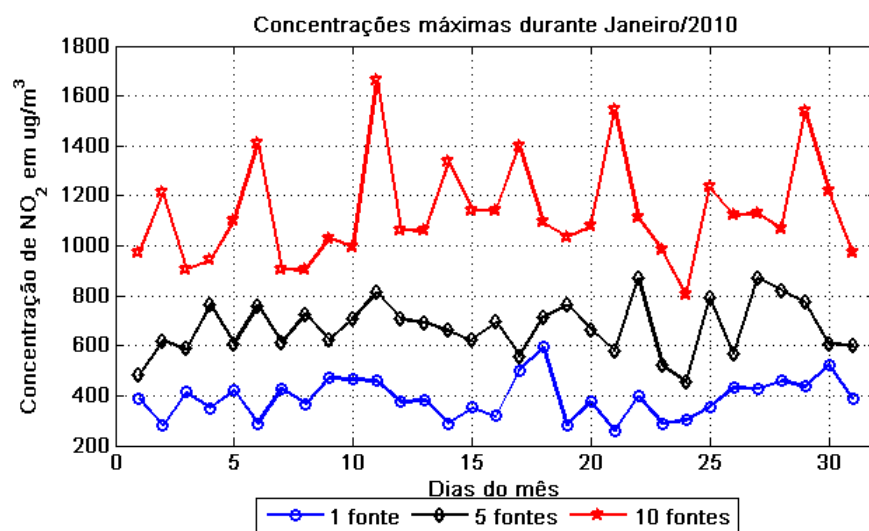


Figura 4.8: Concentração máxima de CO durante Janeiro/2010.

A Figura 4.13 apresenta os resultados de simulação para o dia 11 de Janeiro de 2010, onde ocorreu a máxima concentração de dióxido de nitrogênio, ultrapassando o nível de atenção. As características meteorológicas do dia são:

- Ventos fracos entre 1,3 e 5,7m/s;
- Direção do vento variando entre: 76° e 270° ;
- Média do vento de 3,05m/s;

Figura 4.9: Concentração máxima de SO_2 durante Janeiro/2010.Figura 4.10: Concentração máxima de NO_2 durante Janeiro/2010.

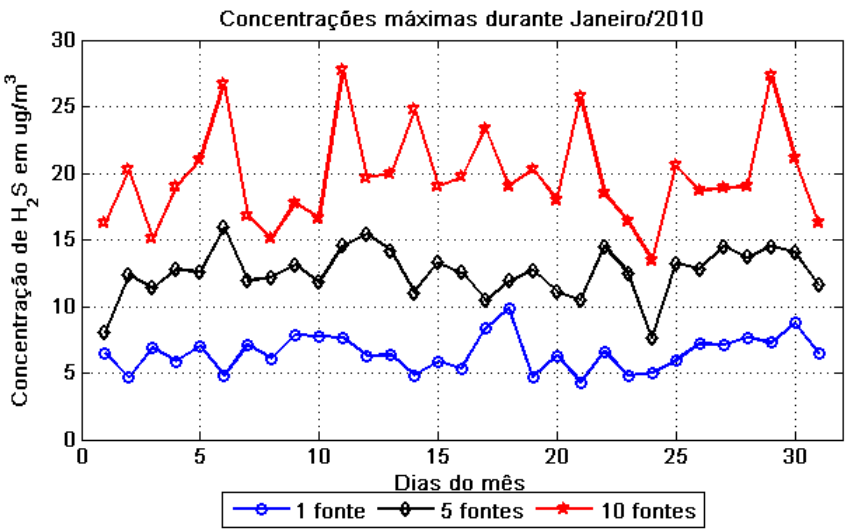


Figura 4.11: Concentração máxima de H_2S durante Janeiro/2010.

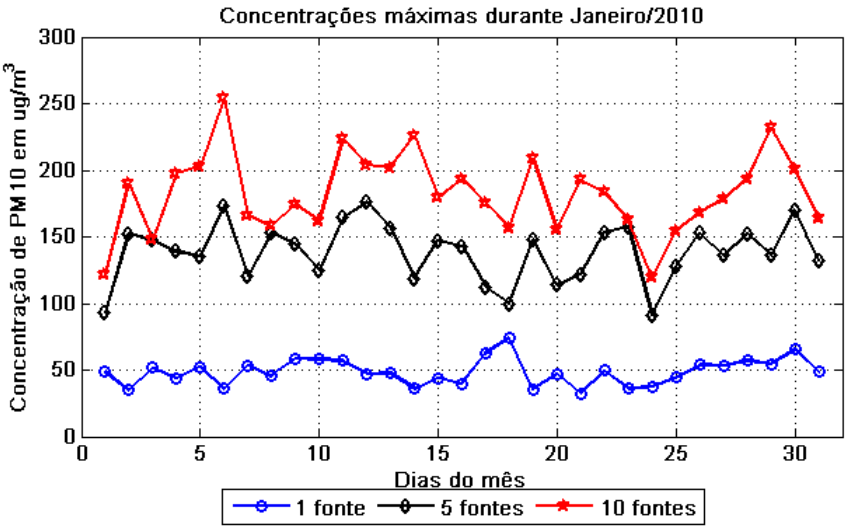


Figura 4.12: Concentração máxima de PM10 durante Janeiro/2010.

- Temperatura entre 20, 75°C e 27, 15°C;
- Média de temperatura de 24, 03°C.

O valor máximo de concentração de NO_2 ocorreu às 7:00 da manhã. Nesse horário, a temperatura registrada era de 20, 85°C, o vento tinha velocidade de 1, 5m/s e sua direção era 237° nordeste.

4.3.2 Resultados para Julho de 2010

Nessa subseção serão apresentados os gráficos com os valores médios e máximos de concentração de poluentes em ($\mu g/m^3$) do mês de Julho de 2010.

As Figuras 4.14, 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 apresentam a concentração média de monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e material particulado menor que 10 μg , respectivamente para o mês de Julho de 2010. Percebe-se que os valores de concentração de poluentes não são muito representativos perante a legislação vigente [CONAMA, 1990], pois nesses resultados médios nenhum dos níveis estabelecidos na Tabela 2.1 foram alcançados. No dia 1° de Julho os valores médios de concentração de poluentes tiveram seu máximo valor registrado, atingindo 72, 07 $\mu g/m^3$ para CO , 14, 87 $\mu g/m^3$ para SO_2 , 134, 26 $\mu g/m^3$ para NO_2 , 2, 37 $\mu g/m^3$ para H_2S e 19, 87 $\mu g/m^3$ para PM_{10} , sendo todas concentrações superiores as médias do mês de Janeiro.

As Figuras 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23 apresentam a concentração máxima de monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, sulfeto de nitrogênio e material particulado menor que 10 μg , respectivamente para o mês de Julho de 2010. Os resultados máximos com duas e três fontes poluidoras também foram suprimidos pelo mesmo motivo anteriormente citado.

Percebe-se que os valores de concentração de poluentes alcançados nas simulações com dez fontes poluidoras são preocupantes perante a legislação vigente [CONAMA, 1990]. Nesses resultados máximos, o poluente NO_2 ultrapassa mais de uma vez ao longo do mês os 1130 $\mu g/m^3$ que definem o nível de atenção estabelecidos na Tabela 2.1. Isso pode ser percebido nos dias, 1, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 14, 15, 16, 24, 27, 28 e 30 onde as concentrações para esse poluente são: 1250, 7 $\mu g/m^3$, 1354, 2 $\mu g/m^3$, 1305 $\mu g/m^3$, 1544, 8 $\mu g/m^3$, 1228, 8 $\mu g/m^3$, 1531, 1 $\mu g/m^3$, 1133, 6 $\mu g/m^3$, 1475, 5 $\mu g/m^3$, 1643 $\mu g/m^3$, 1256, 3 $\mu g/m^3$, 1215, 6 $\mu g/m^3$,

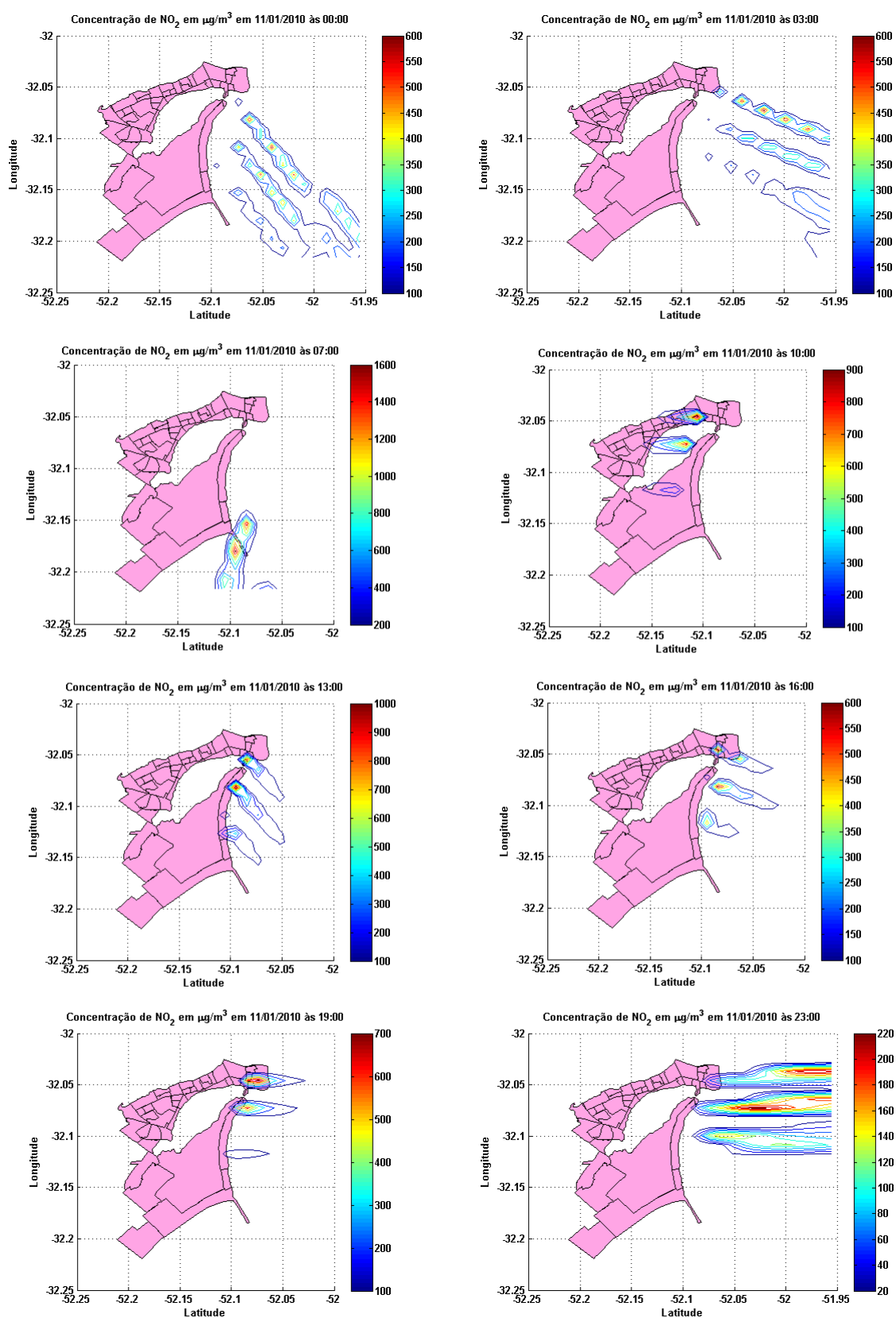


Figura 4.13: *Concentração de NO_2 durante 11/Janeiro/2010.*

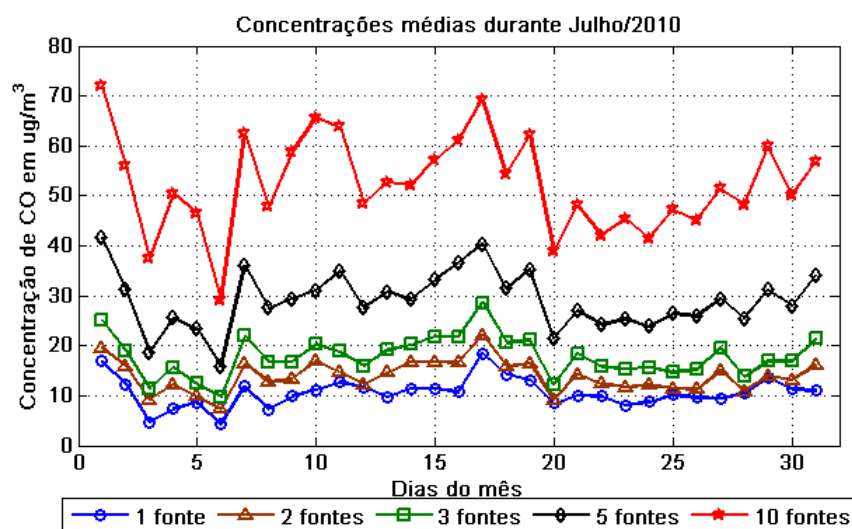
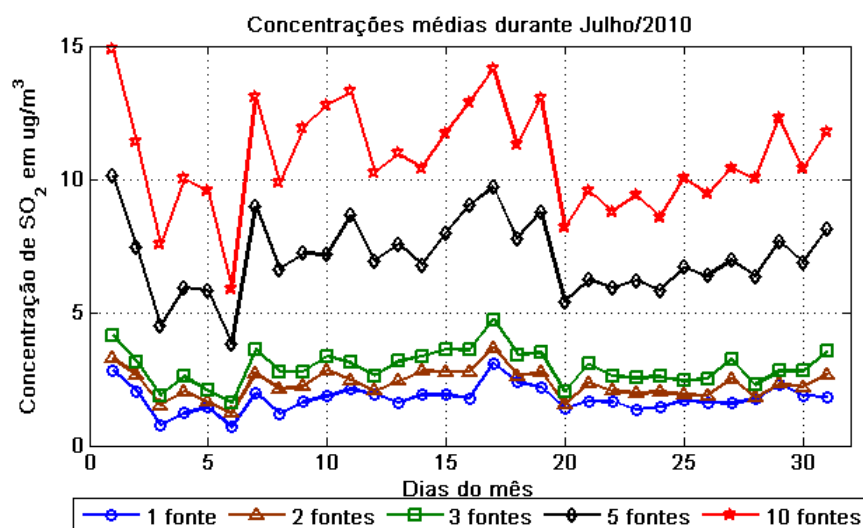
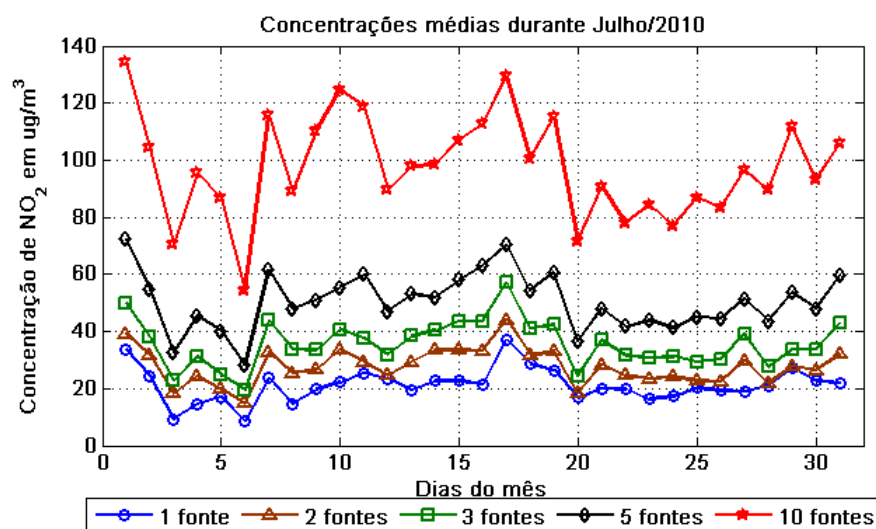
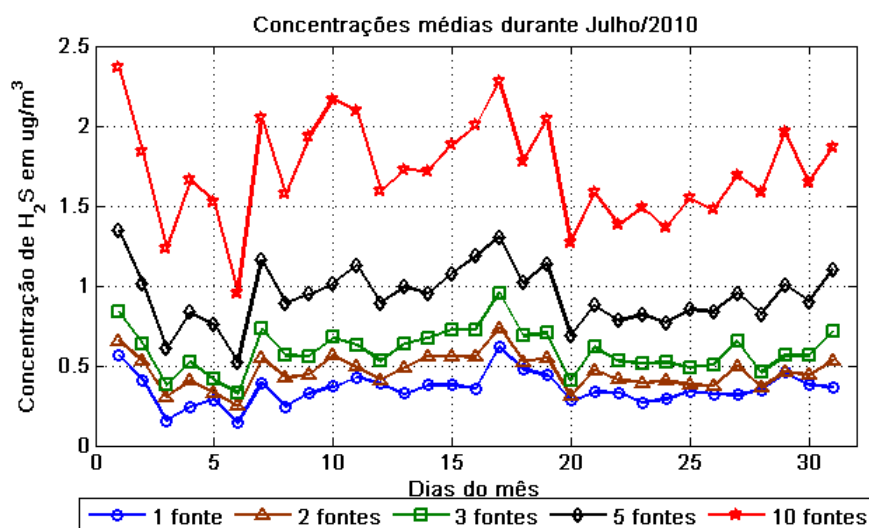


Figura 4.14: Concentração média de CO durante Julho/2010.

Figura 4.15: Concentração média de SO_2 durante Julho/2010.

Figura 4.16: Concentração média de NO_2 durante Julho/2010.Figura 4.17: Concentração média de H_2S durante Julho/2010.

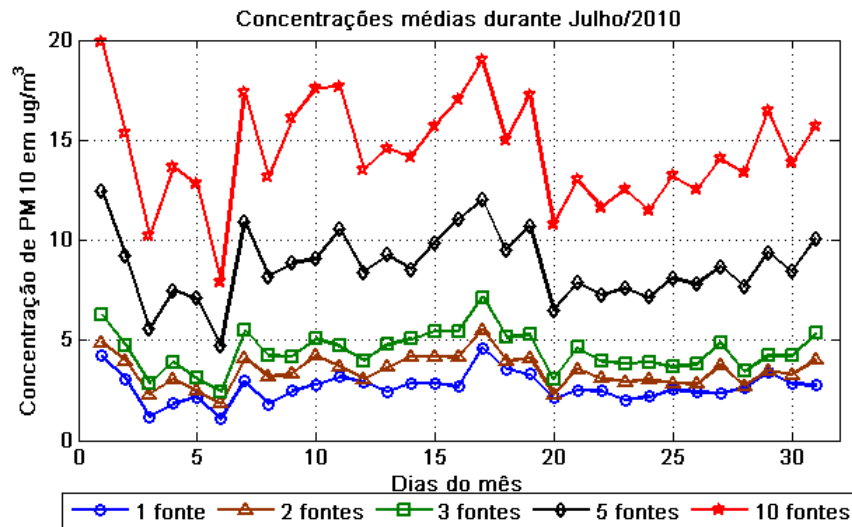


Figura 4.18: Concentração média de PM10 durante Julho/2010.

1206,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1148 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 1179 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Percebe-se que esse nível é ultrapassado em 14 dias do mês, ocorrendo mais vezes do que no período de Janeiro, chegando a representar 45% dos dias do mês de Julho.

No dia 6 os poluentes CO , SO_2 , H_2S e PM_{10} alcançaram suas concentrações máximas de 946,05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 258.87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 30,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 301,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Tais resultados não são preocupantes perante os índices estabelecidos na Tabela 2.1, porém percebe-se que esses poluentes tiveram valores máximos superiores ao mês de Janeiro.

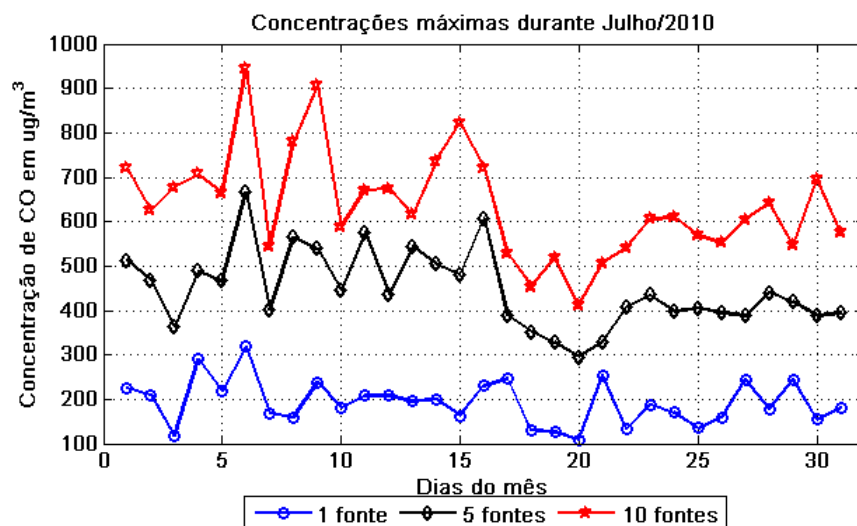
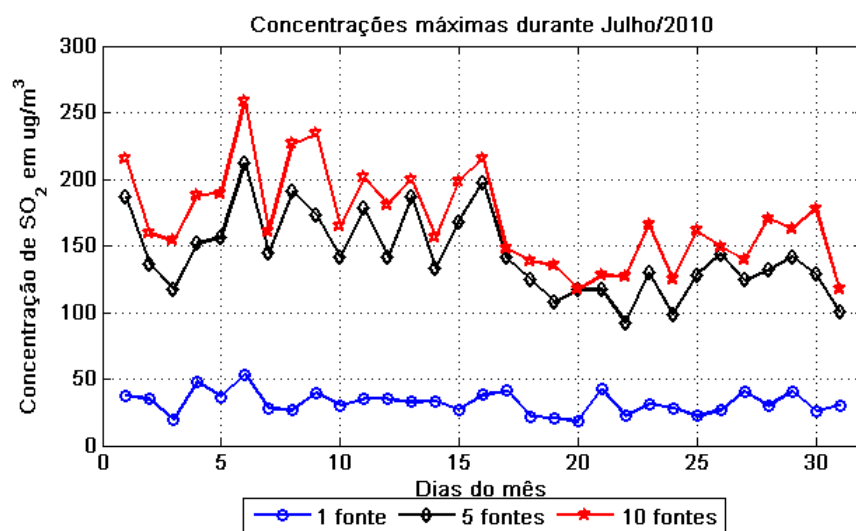
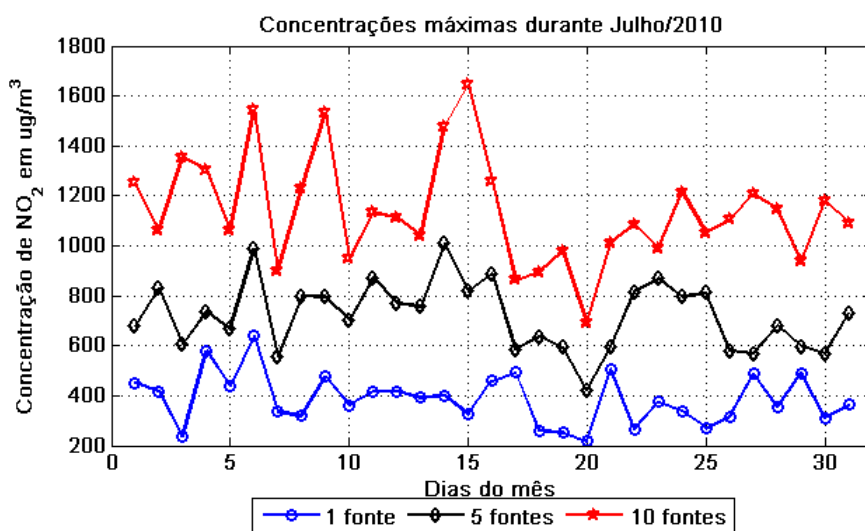
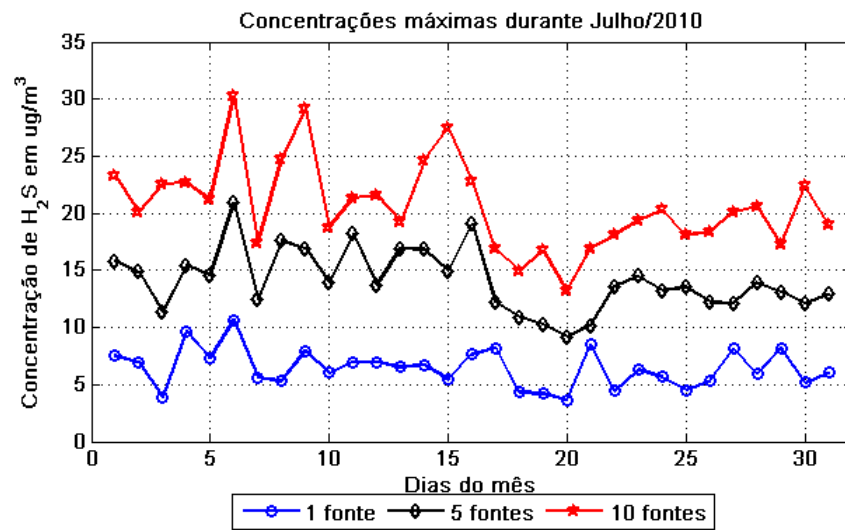
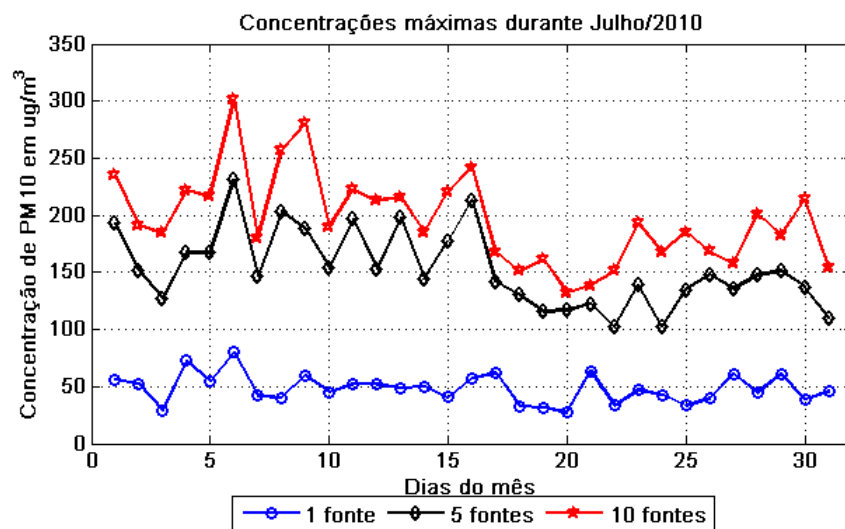


Figura 4.19: Concentração máxima de CO durante Julho/2010.

Figura 4.20: Concentração máxima de SO_2 durante Julho/2010.Figura 4.21: Concentração máxima de NO_2 durante Julho/2010.

Figura 4.22: Concentração máxima de H_2S durante Julho/2010.Figura 4.23: Concentração máxima de PM_{10} durante Julho/2010.

A Figura 4.24 apresenta os resultados de simulação para o dia 15 de Julho de 2010, onde ocorreu a máxima concentração de dióxido de nitrogênio, ultrapassando o nível de atenção. As características meteorológicas do dia são:

- Ventos fracos entre 1,1 e 6,7m/s;
- Direção do vento predominantemente oeste entre: 78° e 108°;
- Média do vento de 3,13m/s;
- Temperatura entre 2,65°C e 10,55°C;
- Média de temperatura de 6,14°C.

O valor máximo de concentração de NO_2 ocorreu às 7:00 da manhã. Nesse horário, a temperatura registrada era de 3,65°C, o vento tinha velocidade de 1,7m/s e sua direção era 100° noroeste.

4.3.3 Considerações sobre as simulações realizadas

Escolheu-se dois meses do ano com características bastante distintas quanto as variáveis meteorológicas, a fim de investigar como a dispersão de poluentes se comporta nesses diferentes períodos.

Conforme apresentado na Seção 4.2, nos cenários simulados variou-se o número de fontes poluidoras, chegando a 10 fontes. Contudo, essa é uma quantidade subestimada para a cidade de Rio Grande - RS, pois sabe-se que na realidade existe um número maior. Sendo esses dados de simulação preliminares, atingiu-se níveis de alerta em diversos dias dos meses simulados. De fato, o percentual de ocorrências (Janeiro - 38% e Julho - 45%) que ultrapassam o nível de alerta do CONAMA é bastante elevado, mostrando que algumas situações não favorecem a dispersão dos poluentes.

Os principais fatores que não auxiliam na dispersão dos poluentes são os ventos fracos e a camada de mistura baixa. Pode-se observar que ambos os picos apresentados em Janeiro e em Julho ocorreram principalmente quando os movimentos atmosféricos são predominantemente turbulentos, onde a altura da camada de mistura é menor e principalmente influenciada pelos ventos. Dessa forma, as piores condições ocorreram quando

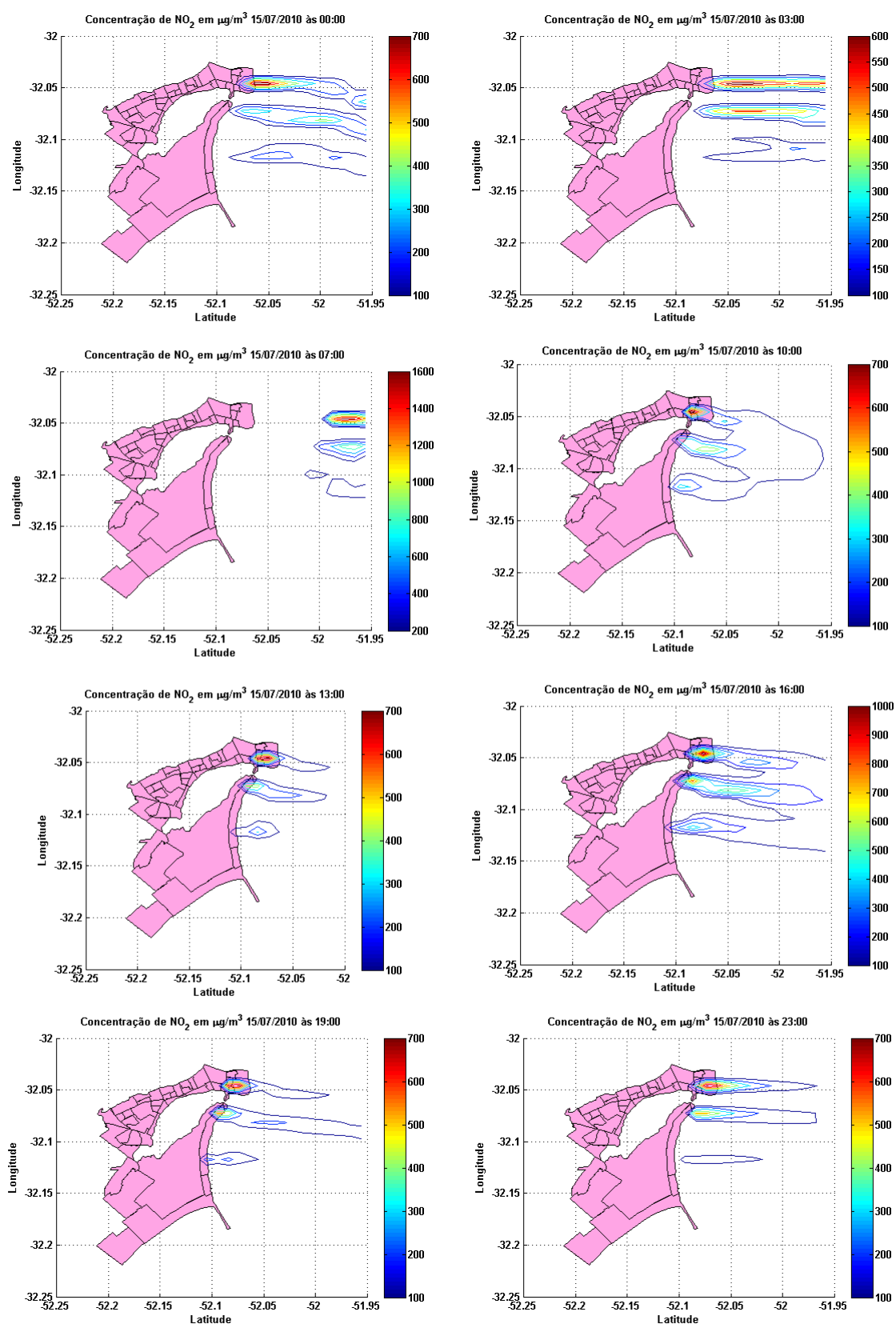


Figura 4.24: Concentração de NO_2 durante 15/Julho/2010.

os ventos são fracos, o que observa-se nas Figuras 4.13 e 4.24. Outro fator que influencia na dispersão de poluentes, porém de forma a auxiliar esse fenômeno, é a temperatura ambiente, visto que no mês de Janeiro as concentrações médias são menores e também ocorreram menos casos de alerta do que em Julho.

Capítulo 5

Conclusão

Esse trabalho faz parte do eixo ambiental do projeto RSSOC (Rede Estadual de Simulação Social) financiado pelo edital PRONEX - FAPERGS/CNPq, o qual ainda está em desenvolvimento. Desenvolveu-se um simulador com 3 modelos acoplados: o modelo hipotético que foi desenvolvido, o modelo ISC (Industrial Source Complex) que pode ser utilizado para simulações mais curtas, e o modelo CALPUFF, o qual pode simular períodos mais longos para que seja feita uma melhor avaliação dos impactos que ocorrem na região.

O estudo da dispersão de poluentes é muito importante dentro do gerenciamento de recursos naturais pois influencia diretamente na qualidade de vida das pessoas. Essa é uma das justificativas para a escolha do tema dessa dissertação, pois envolve aspectos de modelagem computacional, meteorologia, meio ambiente e alguns aspectos sociais, fazendo com que o trabalho tenha um cunho fortemente interdisciplinar.

Diante da quantidade de variáveis meteorológicas e equações que regem o fenômeno de dispersão de poluentes, destaca-se como contribuição a criação de diversas rotinas de manipulação dos dados de entrada e saída dos modelos, a fim de auxiliar a visualização e análise dos resultados do fenômeno em si. Também ressalta-se a criação de um simulador e das rotinas de pré-processamento que também são uma contribuição, pois elas auxiliam e agilizam o processo de criação de novas simulações. Os usuários anteriormente parametrizavam as simulações diretamente nos arquivos de configuração e entrada de dados. Com a criação do simulador, basta configurar as variáveis meteorológicas e parâmetros nas próprias interfaces.

Embora existam outros trabalhos que apresentam as consequências da dis-

persão de poluentes na cidade de Rio Grande - RS [Nóbrega e Krusche, 2011], [Saraiva e Krusche, 2001] e [Hürtner e Moreira, 2000]. Esse é um dos poucos trabalhos existentes que apresentam de fato resultados de simulações desse fenômeno para a cidade de Rio Grande - RS, tentando, dessa forma, alertar a sociedade sobre a importância dos problemas sociais que podem ocorrer devido a contaminação do ar e do meio ambiente na região.

Como foi apresentado na Seção 4.3.3, os níveis de atenção são ultrapassados mesmo subestimando-se o número de fontes poluidoras, o que indica que a realidade é bastante preocupante, mostrando os problemas ambientais e sociais causados pela emissão e propagação de poluentes devem ser levados em conta pelo poder público e privado. A sociedade deve exigir que os órgãos competentes façam uma fiscalização mais intensa e eficiente para a cidade de Rio Grande - RS.

Foram encontradas dificuldades de validação das simulações propostas nesse trabalho, pois os dados coletados pelos órgãos responsáveis pela fiscalização estadual tais como: SEMA (Secretaria Estadual do Meio Ambiente) e FEPAM (Fundação Estadual de Proteção Ambiental) não foram disponibilizados, pois tentou-se obter esses dados por diversas vezes e não foi possível.

Devido à isso, não foi possível realizar a comparação entre os dados que tem-se de simulações com os dados reais medidos e coletados pelas estações de monitoramento atualmente existentes. O modelo escolhido para as simulações foi o CALPUFF, porém ambos modelos, CALPUFF e ISC, foram comparados pela agência reguladora dos Estados Unidos da América, EPA (*Environmental Protection Agency*) e segundo [Wang et al., 2006], o CALPUFF mostrou-se mais eficaz que o ISC.

Percebe-se que, por falta de recursos humanos e financeiros, os órgãos competentes efetuam uma fiscalização precária. A própria FEPAM, durante um evento intitulado: "A Poluição do Ar em Rio Grande: Presente, Passado e Futuro", que ocorreu na FURG (Universidade Federal de Rio Grande) em Agosto de 2011, apresentou alguns dados de monitoramento da cidade Rio Grande, a qual possuía somente 4 estações de monitoramento. No ano de 2010 uma delas foi furtada, e segundo o próprio órgão fiscalizador, até o presente momento essa estação de monitoramento não foi repostada devido a problemas financeiros.

Mesmo assim, esse ainda é um número muito pequeno de estações de monitoramento para uma cidade de 2710km^2 e cerca de 197 mil habitantes. A população riograndina deve exigir um plano de monitoramento e um posicionamento mais eficaz para tais estações de monitoramento. Esses dados coletados deveriam ser automaticamente inseridos em um banco de dados pertencente a infraestrutura do órgão fiscalizador, fazendo com que a concentração de determinados poluentes pudessem ser acompanhados *online* através de sistemas *web* atualizados periodicamente. Dessa forma, provavelmente as empresas emissoras de poluentes que ultrapassassem os níveis definidos pelo CONAMA seriam identificadas, punidas e precisariam se adequar a legislação vigente.

5.1 Artigos publicados

Durante o desenvolvimento dessa dissertação foram publicados os seguintes resumos e artigos:

- *Simulation Tools to Analyze the Impact of Industries Installation* [Nunes et al., 2012].

Artigo submetido para: *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*.

- *Using GIS for Impact Analysis from Industries Installation* [Thomasi et al., 2012].

Artigo publicado em: *The Fourth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services* (GEOProcessing 2012, Valência, Espanha).

- Um simulador para previsão de impactos gerados pela instalação de indústrias [Jugueiro et al., 2011].

Resumo publicado em: Mostra de Produção Universitária, (MPU 2011, Rio Grande / RS).

- Um sistema para previsão de impactos gerados pela instalação de indústrias e sua influência sobre ecossistemas costeiros no extremo sul do Brasil [Thomasi et al., 2011].

Artigo publicado em: III Workshop de Computação Aplicada ao Meio Ambiente e ao Recursos Naturais (WCAMA 2011, Natal / RN).

- Um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para simulação de impactos gerados pela instalação de indústrias [Nunes et al., 2011].

Artigo publicado em: Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações (WESAAC 2011, Curitiba / PR).

- Um Overview sobre a Utilização de Técnicas de Inteligência Artificial em Gerenciamento de Recursos Naturais [Gularte et al., 2010b].

Resumo expandido publicado em: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, (CRICTE 2010, Rio Grande / RS).

- Uma ferramenta de simulação para impactos ambientais [Nunes et al., 2010].

Artigo publicado em: Simpósio de Modelagem Computacional do Sul, (MCSul 2010, Rio Grande / RS).

- Sistemas Inteligentes no Gerenciamento de Recursos Naturais [Gularte et al., 2010a].

Resumo publicado em: Mostra de Produção Universitária, (MPU 2010, Rio Grande / RS).

5.2 Trabalhos Futuros

Após o desenvolvimento desse trabalho, pode-se perceber que a sociedade deve conscientizar-se de todos os problemas que podem ser causados pela emissão e propagação de poluentes. Então, como o projeto RSSOC (Rede Estadual de Simulação Social) ainda está em desenvolvimento, acredita-se que os trabalhos futuros envolvam:

- A criação de um SAD (Sistema de Apoio à Decisão) conforme sugerido em [Nunes et al., 2011] que utiliza sistemas multiagentes, a fim de simular o comportamento e as decisões que são tomadas no mundo real, auxiliando assim, os respectivos órgãos responsáveis a fazer a escolha mais adequada para a instalação de uma nova indústria;

- Desenvolver novas interfaces gráficas que façam a adequação dos dados coletados pelas estações meteorológicas de monitoramento ao modelo CALPUFF, fazendo com que o usuário do simulador não precise executar as rotinas fornecidas na Seção A.2, mas simplesmente escolha onde estão os arquivos com os dados meteorológicos de entrada para a simulação criada;
- O desenvolvimento e disponibilização de um sistema *web* para a sociedade e órgãos fiscalizadores, onde seja possível configurar, criar e analisar simulações para o fenômeno de dispersão de poluentes na atmosfera em qualquer região de interesse.

Bibliografia

- [Adamatti, 2010] Adamatti, D. F.; Aguiar, M. S. (2010). *Desafios e Avanços em Computação: O Estado da Arte*, chapter A Inteligência Artificial e o Gerenciamento de Recursos Naturais, pages 67–86. Editora da UFPEL (Universidade Federal de Pelotas).
- [Armstrong et al., 2005] Armstrong, M. P., Kathryn Cowles, M., and Wang, S. (2005). Using a computational grid for geographic information analysis: A reconnaissance. *The Professional Geographer*, 57(3):365–375.
- [Berman et al., 2003] Berman, F., Fox, G., and Hey, A. (2003). *Grid Computing: Making the Global Infrastructure a Reality*. Wiley series on parallel and distributed computing. John Wiley & Sons. p. 1060.
- [Bonham-Carter, 1995] Bonham-Carter, G. F. (1995). *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS*. Computer Methods in the Geosciences Series. Elsevier Science. p. 398.
- [Boyce et al., 2002] Boyce, W., DiPrima, R., and de Magalhães Iório, V. (2002). *Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno*. Livros Técnicos e Científicos. p. 416.
- [Braga, 1998] Braga, A. L. F. (1998). Quantificação dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde da população pediátrica na cidade de são paulo e proposta de monitorização. Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- [Brode e Atkinson, 1995] Brode, R. W. and Atkinson, D. (1995). User’s Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models: Volume II - Description of Model Algorithms. p. 16.

- [CASIO, 2012] CASIO (2012). Keisan - high accuracy calculation - solar elevation angle (for a year). Disponível em <http://keisan.casio.com/> acessado em Setembro de 2012.
- [CONAMA, 1990] CONAMA (1990). Resolução nº 003, 28/jun/1990. Conselho Nacional do Meio Ambiente.
- [da Costa, 2004] da Costa, C. P. (2004). Influência de efeitos não-locais na dispersão de poluentes na camada limite planetária. Master's thesis, UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [de Moraes, 2004] de Moraes, M. R. (2004). Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica. Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.
- [Dyke, 2007] Dyke, P. (2007). *Modeling Coastal And Offshore Processes*. Imperial College Press. p. 400.
- [Filho, 2008] Filho, P. J. F. (2008). *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações Arena*. Visual Books. p. 372.
- [Fuller et al., 2007] Fuller, M. M., Wang, D., Gross, L. J., and Berry, M. W. (2007). Computational science for natural resource management. *Computing in Science and Engg.*, 9:40–48.
- [Gifford, 1962] Gifford, F. (1962). Diffusion in the diabatic surface layer. *J. Geophys. Research*, 67(8):3207.
- [Gomes, 1999] Gomes, S. C. P. (1999). *Métodos Numéricos: teoria e programação*. Editora da FURG. p. 190.
- [Gularte et al., 2010a] Gularte, A. R., Thomasi, C. D., Nunes, G. A. L., and Adamatti, D. F. (2010a). Sistemas inteligentes no gerenciamento de recursos naturais. MPU (Mostra de produção Universitária) - FURG, Rio Grande - RS.
- [Gularte et al., 2010b] Gularte, A. R., Thomasi, C. D., Nunes, G. A. L., and Adamatti, D. F. (2010b). Um overview sobre a utilização de técnicas de inteligência artificial

- em gerenciamento de recursos naturais. *Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia - CRICTE 2010*.
- [Higham e Higham, 2005] Higham, D. J. and Higham, N. J. (2005). *MATLAB Guide*. SIAM: Society for Industrial and Applied Mathematics. p. 382.
- [Hürtner e Moreira, 2000] Hürtner, M. D. and Moreira, J. S. (2000). Avaliação ambiental e epidemiológica do trabalhador da indústria de fertilizantes em Rio Grande, RS. *Jornal da pneumologia*, 26(5):245–253.
- [IBGE, 2010] IBGE (2010). IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - CENSO 2010. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=431560> acessado em Setembro de 2012.
- [Jugueiro et al., 2011] Jugueiro, M. M., Thomasi, C. D., Nunes, G. A. L., and Adamatti, D. F. (2011). Um simulador para previsão de impactos gerados pela instalação de indústrias. MPU (Mostra de produção Universitária) - FURG, Rio Grande - RS.
- [Kirinus et al., 2010] Kirinus, E. P., Marques, W., Silva, P. D., Fernandes, E., and Bizzuti, R. (2010). Interação Onda-Corrente na Coroa da Dona Mariana - Lagoa dos Patos - RS. *Congresso Brasileiro de Oceanografia - CBO 2010*.
- [Kumar et al., 1999] Kumar, A., Bellam, N. K., and Sud, A. (1999). Performance of an industrial source complex model: Predicting long-term concentrations in an urban area. *Environmental Progress*, 18(2):93–100.
- [Levy et al., 2002] Levy, J. I., Spengler, J. D., Hlinka, D., Sullivan, D., and Moon, D. (2002). Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications. *Atmospheric Environment*, 36(6):1063 – 1075.
- [Liou, 2002] Liou, K. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation, 2e: (Volume 84, International Geophysics)*. International Geophysics Series. Academic Press. p. 599.
- [Maul, 1980] Maul, P. (1980). Atmospheric transport of sulfur compound pollutants. Central Electricity Generating Bureau MID/SSD/80/0026/R. Nottingham, England.

- [McCoy, 2004] McCoy, J. (2004). *ArcGIS 9: Using ArcGIS spatial analyst*. ESRI - Environmental Systems Research Institute. p. 233.
- [Meireles et al., 2003] Meireles, A. C. M., Barreto, F. M. S., Sousa, I. V. A., and Lima, C. H. R. (2003). Estudo da solução da equação difusiva-advectiva, para rios naturais, utilizando o método das diferenças finitas. Disponível em http://artigocientifico.uol.com.br/uploads/artc_1202626875_60.pdf acessado em Setembro de 2012.
- [Miller, 2007] Miller, R. (2007). *Numerical Modeling of Ocean Circulation*. Cambridge University Press. p. 252.
- [Moler, 2004] Moler, C. B. (2004). *Numerical Computing with Matlab*. Society for Industrial and Applied Mathematics. 99–102.
- [Nunes et al., 2012] Nunes, G., Thomasi, C., Jugueiro, M., Gularte, A., and Adamatti, D. (2012). Simulation tools to analyze the impact of industries installation. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*. Submitted.
- [Nunes et al., 2010] Nunes, G. A. L., Thomasi, C. D., Gularte, A. R., and Adamatti, D. F. (2010). Uma ferramenta de simulação para impactos ambientais. *Simpósio de Modelagem Computacional do Sul - MCSul 2010*.
- [Nunes et al., 2011] Nunes, G. L., Thomasi, C. D., Jugueiro, M. M., and Adamatti, D. F. (2011). Um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para simulação de impactos gerados pela instalação de indústrias. *WESAAC - Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações*, pages 95–97.
- [Nóbrega e Krusche, 2011] Nóbrega, M. R. and Krusche, N. (2011). Diagnóstico qualitativo da poluição atmosférica em Rio Grande-RS, 2000 a 2002. *Revista Geosul*, 25(50):129–150.
- [Oke, 2002] Oke, T. (2002). *Boundary Layer Climates*. Taylor & Francis. p. 464.
- [Ormsby et al., 2010] Ormsby, T., Napoleon, E., Burke, R., Groessl, C., and Bowden, L. (2010). *Getting to Know ArcGIS Desktop*. Getting to Know. ESRI Press. p. 584.

- [Pasquill, 1976] Pasquill, F. (1976). Atmospheric dispersion parameters in gaussian plume modeling. Part 2: Possible requirements for change in the Turner workbook values. Report EPA-600/4-76036, p. 53.
- [Pielke, 2001] Pielke, R. A. (2001). *Mesoscale Meteorological Modeling*. International Geophysics Series. Elsevier Science. p. 676.
- [Pilato et al., 2008] Pilato, C. M., Collins-Sussman, B., and Fitzpatrick, B. W. (2008). *Version Control with Subversion*. O'Reilly Media, 2 edition. p. 430.
- [Rezende, 2003] Rezende, S. (2003). *Sistemas Inteligentes - Fundamentos e Aplicações*. Manole. p. 525.
- [Riley et al., 2006] Riley, K., Hobson, P., and Bence, S. (2006). *Mathematical Methods for Physics and Engineering: A Comprehensive Guide*. Cambridge University Press. p. 1362.
- [Rohatgi e Nelson, 1994] Rohatgi, J. and Nelson, V. (1994). *Wind Characteristics: An Analysis for the Generation of Wind Power*. Alternative Energy Institute, West Texas A&M University. p. 239.
- [Saraiva e Krusche, 2001] Saraiva, L. B. and Krusche, N. (2001). Condições atmosféricas favoráveis à concentração de poluentes em Rio Grande, RS. *II Congresso em física da camada limite planetaria e modelagem de processos de dispersão*, 1:14.
- [Saucier, 1969] Saucier, W. J. (1969). *Princípios de análise meteorológica*. Sedegra. p. 462.
- [Schnelle e Dey, 1999] Schnelle, K. and Dey, P. (1999). *Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide*. McGraw-Hill Professional Engineering. McGraw-Hill. p. 483.
- [Scire et al., 2000] Scire, J. S., G., S. D., and Yamartino, R. J. (2000). A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Technical report.
- [Thomasi et al., 2012] Thomasi, C., Nunes, G., Jugueiro, M., and Adamatti, D. (2012). Using gis for impact analysis from industries installation. In *GEOProcessing 2012*,

- The Fourth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services*, pages 164–170.
- [Thomasi et al., 2011] Thomasi, C. D., Nunes, G. A. L., Toledo, R. G. A., Teixeira, P. S., Jugueiro, M. M., Adamatti, D. F., and Tagliani, C. R. A. (2011). Um sistema para previsão de impactos gerados pela instalação de indústrias e sua influência sobre ecossistemas costeiros no extremo sul do brasil. *III Workshop de Computação Aplicada ao Meio Ambiente e ao Recursos Naturais - WCAMA 2011*.
- [Thé et al., 2012] Thé, J. L., Thé, C. L., Johnson, M. A., Raskin, I., Shatalov, O., Smotrikov, V., and Matamala, F. (2012). Terrain data srtm3 - global coverage (90m). Disponível em <http://www.webgis.com/srtm3.html> acessado em Setembro de 2012.
- [Tolga e Elbir, 2003] Tolga and Elbir (2003). Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in izmir, turkey. *Atmospheric Environment*, 37(15):2149 – 2157.
- [Tubelis, 1980] Tubelis, A. e Nascimento, F. J. L. (1980). *Meteorologia descritiva fundamentos e aplicações brasileiras*. Editora Planeta Barcelona. p. 374.
- [Vianello, 1991] Vianello, R. L. e Alves, A. R. (1991). *Meteorologia básica e aplicações*. Imprensa Universitária - Universidade Federal de Viçosa. p. 448.
- [Wallace et al., 2006] Wallace, J., Wallace, J., and Hobbs, P. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Atmospheric Science, International Geophysics Series. Elsevier Science. p. 504.
- [Wang et al., 2006] Wang, L., Parker, D. B., Parnell, C. B., Lacey, R. E., and Shaw, B. W. (2006). Comparison of CALPUFF and ISCST3 models for predicting downwind odor and source emission rates. *Atmospheric Environment*, 40(25):4663 – 4669.
- [Whitham, 2011] Whitham, G. B. (2011). *Linear and nonlinear waves*. Cambridge University Press. p. 660.
- [Williams et al., 2006] Williams, R. J., Martinez, N. D., and Golbeck, J. (2006). Ontologies for ecoinformatics. *Web Semant.*, 4:237–242.

Apêndice A

Anexos

A.1 Anexo I - Simulação da equação de advecção e difusão

```
clear all
close all
clc

% Equações básicas
% concentracao(x,y,t) = X(x)*Y(y)*T(t)
% Eq1. X(x) = B*exp( ((u - m*sqrt(Kx))*xx)/Kx ) + C*exp( (m*sqrt(Kx)*xx)/Kx );
% Eq2. Y(y) = D*exp( ((v - n*sqrt(Ky))*yy)/Ky ) + E*exp( (n*sqrt(Ky)*yy)/Ky );
% Eq3. T(t) = A*exp(l*tt);
%

MAX_X = 500; % 600 metros
MAX_Y = 500; % 600 metros
MAX_T = 300; % 600 segundos = 10 minutos

% Constantes proporcionais das equações
A=1;
B=1;
C=0; % zerando a parte da equação que não tem u
D=1;
E=0; % zerando a parte da equação que não tem v

% Constantes das exponenciais das equações
m = 1;
n = 1;
l = -0.005;
Kx=1.02;
Ky=1.025;

% Velocidade dos fluidos em m/s
u = 1;
v = 1;

% matriz de concentrações
conc = zeros(MAX_X,MAX_Y,MAX_T);

for tt=1:MAX_T
    for xx=-MAX_X:MAX_X
        for yy=-MAX_Y:MAX_Y
            if (xx < 0)
                aux_xx = -xx;
                X(xx+MAX_X+1) = B*exp( ((u - m*sqrt(Kx))*aux_xx)/Kx ) + C*exp( (m*sqrt(Kx)*aux_xx)/Kx );
            else
                X(xx+MAX_X+1) = B*exp( ((u - m*sqrt(Kx))*xx)/Kx ) + C*exp( (m*sqrt(Kx)*xx)/Kx );
            end
            if (yy < 0)
                aux_yy = -yy;
                Y(yy+MAX_Y+1) = D*exp( ((v - n*sqrt(Ky))*aux_yy)/Ky ) + E*exp( (n*sqrt(Ky)*aux_yy)/Ky );
            else
                Y(yy+MAX_Y+1) = D*exp( ((v - n*sqrt(Ky))*yy)/Ky ) + E*exp( (n*sqrt(Ky)*yy)/Ky );
            end
            conc(xx+MAX_X+1,yy+MAX_Y+1,tt) = X(xx+MAX_X+1)*Y(yy+MAX_Y+1)*T(tt);
        end
    end
end
```

```

        Y(yy+MAX_Y+1) = D*exp( ((v - n*sqrt(Ky))*yy)/Ky ) + E*exp( (n*sqrt(Ky))*yy)/Ky );
    end
    T(tt) = A*exp(l*tt);
    conc(xx+MAX_X+1,yy+MAX_Y+1,tt) = X(xx+MAX_X+1)*Y(yy+MAX_Y+1)*T(tt);
end
end
end
% removendo os NaNs
X(isnan(X)) = 0;
Y(isnan(Y)) = 0;
T(isnan(T)) = 0;
conc(isnan(conc)) = 0;

%
% subplot(1,3,1); mesh(conc(:, :, 1)); % grafico de concentração no tempo 1
% subplot(1,3,2); mesh(conc(:, :, 100)); % grafico de concentração no tempo 300
% subplot(1,3,3); mesh(conc(:, :, 200)); % grafico de concentração no tempo 600

%% Estudo qualitativo - analisando sem resolver
%% tentei fazer todas as partes das equações separadas por variáveis
%% tornarem-se uma exponencial decrescente (sistema estável)

Concentration = zeros(MAX_X);
r1 = (u - m*sqrt(Kx))/Kx; % verificando a constante da exponencial em x
r2 = (v - n*sqrt(Ky))/Ky; % verificando a constante da exponencial em y

for xx=1:MAX_X
    X1(xx) = B*exp( ((u - m*sqrt(Kx))*xx)/Kx ) + C*exp( (m*sqrt(Kx))*xx)/Kx );
    Y1(xx) = D*exp( ((v - n*sqrt(Ky))*xx)/Ky ) + E*exp( (n*sqrt(Ky))*xx)/Ky );
    T1(xx) = A*exp(l*xx);
end
% removendo NaNs
X1(isnan(X1)) = 0;
Y1(isnan(Y1)) = 0;
T1(isnan(T1)) = 0;
concentration = X1.*Y1.*T1;

% nova figura
figure;
subplot(4,1,1); plot(X1)
title('X(x)')
subplot(4,1,2); plot(Y1)
title('Y(y)')
subplot(4,1,3); plot(T1)
title('T(t)')
subplot(4,1,4); plot(concentration)
title('C=X(x)*Y(y)*T(t)')

minimo=min(min(min(conc)));
maximo=max(max(max(conc)));
% tentativa de filme da concentração diminuindo ao longo do tempo
close all
clear videoFrame;
figure;
cont=1;

for tt=1:20:MAX_T
    if (max(max(conc(:, :, tt)))) < 0.005
        break;
    end
    surf(conc(:, :, tt));
    caxis([minimo maximo]);
    zlim([0 1]);
    shading interp
    colormap (1 - hot);
    colorbar;
    videoFrame(cont) = getframe;
    cont=cont+1;
end
title('Dispersão do Poluente no tempo')
xlabel('Distancia em x (metros)')
ylabel('Distancia em y (metros)')

figure
movie(videoFrame,1,30);

```

A.2 Anexo II - Cálculo da altura da camada de mistura e as classes de estabilidade

```

% Programa para calcular a altura de mistura segundo manual do CALMET
%
%
% Registro das revisões:
% Data          Programador          Descrição das alterações
% =====
% 15/05/2012    Gerson Alberto Leiria Nunes    Código inicial

```

```

% 19/06/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Inserindo INPUT.DAT
% 20/06/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Gravando no INPUT.DAT
% 25/06/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Adicionando os dados de cobertura de nuvem
% 25/06/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Interpolando os dados que não temos medições
% 26/06/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Calculando as classes de estabilidade de PGT
% 07/07/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Inserindo os calculos para dia(eq. diferencial) e noite
% 17/07/2012  Gerson Alberto Leiria Nunes  Corrigindo os calculos de altura da camada de mistura

clear all; % limpa todas variaveis do workspace

% Leitura de dados do arquivo de INPUT.DAT
mat = [];
flag = 0;

fid = fopen('INPUT.DAT');
tline = fgetl(fid);

while ischar(tline)
    if (strcmp(tline, '70487048'))
        tline = fgetl(fid);
        flag = 1;
    end
    if (flag == 1)
        mat = [mat; tline];
    end
    tline = fgetl(fid);
end
fclose(fid);

% lendo os dados de cobertura de nuvens da estacao convencional

mat_nuvem = [];
fnuvem = fopen('01_01_2010_cober_nuvem.txt');
tline = fgetl(fnuvem);
while ischar(tline)
    mat_nuvem = [mat_nuvem; tline];
    tline = fgetl(fnuvem);
end
fclose(fnuvem);

dataNuvem = zeros(length(mat_nuvem), 3);
vetNuvem = [];
vetTime = [];
for contador = 1:length(mat_nuvem)
    dataNuvem(contador, 1) = str2double(mat_nuvem(contador,12:13)); % cobertura as 12 hrs
    dataNuvem(contador, 2) = str2double(mat_nuvem(contador,15:16)); % cobertura as 18 hrs
    dataNuvem(contador, 3) = str2double(mat_nuvem(contador,18:19)); % cobertura as 24 hrs
    vetNuvem = [vetNuvem dataNuvem(contador, 1)/10 dataNuvem(contador, 2)/10
    dataNuvem(contador, 3)/10];
    vetTime = [ vetTime 24*(contador-1)+12 24*(contador-1)+18 24*(contador-1)+24 ];
end

% Interpolacao cubica dos dados nao existentes de cobertura de nuvens

xi = 0:743; % 0 hr até 31 dias * 24 hrs ( todo janeiro )
CobNuvem = interp1(vetTime, vetNuvem, xi, 'cubic');

% Plotando os pontos existentes e as curvas geradas pela interpolacao
figure;
plot(xi, CobNuvem, 'blue');
hold on;
scatter (vetTime, vetNuvem, 'black');
grid on;

mat_rad = [];
frad = fopen('angulos_elevacao_solar_janeiro_2010.txt');
tline = fgetl(frad);
while ischar(tline)
    mat_rad = [mat_rad; tline];
    tline = fgetl(frad);
end
fclose(frad);

dataRad = zeros(length(mat_rad), 1);
for contador = 1:length(mat_rad)
    dataRad(contador, 1) = str2double(mat_rad(contador,7:14)); % Angulo de elevação solar V
end
AnguloRadiacao = [];
for contador = 1:length(CobNuvem)
    AnguloRadiacao(contador) = dataRad(mod(contador,24)+1);
end

% constantes necessarias para efetuar os calculos
alpha = 0.3; % constante de uso do solo
f = 10^-4; % parametro de coriolis
B2 = 2400; % sugerida no manual
cg = 0.25; % areas urbanas (sugerido no manual de 0.25 até 0.3)
k = 0.4; % Constante de von Karman
lambda = 4.7; % sugerida no manual
g = 9.8; % gravidade em m/s^2
cp = 0.996; % calor especifico do ar J/(gK)
A = 900;
flag = 0;

```

```

% FORMATO DA LINHA DE ENTRADA DO CALPUFF QUE DEVE SER MONTADA.
% COLUNAS      | Dados a serem preenchidos
% 9 até 17     | (real) direção de vento em graus
% 18 até 26    | (real) velocidade do vento em m/s
% 27 até 32    | (real) temperatura em °K
% 33 até 34    | (inteiro) de 1 a 6 classe de estabilidade PGT.
% 35 até 41    | (real) Altura de mistura rural
% 42 até 48    | (real) Altura de mistura urbana
%
% Exemplo de uma linha válida
% 10 1 1 0 108.0000 3.6000 293.3 6 46.5 46.5

dataArq = zeros(length(mat), 3);
% Lendo o arquivo de caracteres e convertendo os valores para double
for contador = 1:length(mat)
    dataArq(contador, 1) = str2double(mat(contador,9:17)); % direção do vento
    dataArq(contador, 2) = str2double(mat(contador,18:26)); % vel. do vento
    dataArq(contador, 3) = str2double(mat(contador,27:32)); % temp. em °K

% entradas
tempC = convtemp(dataArq(contador,3),'K','C'); % temperatura em °C
vento = dataArq(contador, 2); % vento em m/s
Zms = 10; % altura das medições
N = CobNuvem(contador); % fração de cobert. de nuvem ( 0 - 1 )
angulo = AnguloRadiacao(contador);

% fator de redução da radiação solar
RedFactor = [1, 0.91, 0.84, 0.79, 0.75, 0.72, 0.68, 0.62, 0.53, 0.41, 0.23 ];

CC = round(N*10);

beta = RedFactor(CC+1);

H0 = 2.4*CC -25.5;
R = 950*beta*sind(angulo);
Qh = alpha * R + H0;
% tabela temperatura / densidade ar em kg/m^3 de 5 em 5 graus
tab = [-10 1.342; -5 1.316; 0 1.293; 5 1.269; 10 1.247; 15 1.225; 20 1.204; 25 1.184; 30 1.165];
tmp = length( tab((tab(:,1) < tempC)));
% pega o valor mais próximo da densidade
ro = tab(tmp, 2); % densidade do ar em kg/m^3 ( varia um pouco com a temperatura)

T = convtemp(tempC,'C','K'); % convertendo a temperatura para °K

Q0 = Qh / ro * cp;
% Valores típicos dos comprimentos
% característico de rugosidade de superfícies ,
% adaptado de (Rohatgi, 1994)

% Descrição do Terreno z0 (m)
% Muito liso: gelo ou lama 10^-6
% Mar aberto e calmo 2*10^-5
% Mar agitado 5*10^-5
% Superfície de neve 0.003
% Gramado 0.008
% Pastagem áspera 0.01
% Descampado 0.03
% Plantação 0.05
% Poucas árvores 0.1
% Várias árvores, cercas e poucos prédios 0.25
% Floresta e mata 0.5
% FOI ESCOLHIDO UM VALOR ENTRE FLORESTA E MATA E SUBURBIOS = 0,7
% Subúrbios 1.5
% Centros de cidades com prédios altos 3

Zo = 0.7; % comprimento de rugosidade da superfície
Zm= Zms -4*Zo;

% Calculadas
CDN = k/log(Zm/Zo); % coeficiente de arrasto neutro CND

% A escala de temperatura, Theta*, é computada como o minimo de duas
% estimativas, a Theta* estimada é baseada em: Holtslag and van Ulden (1982)

thetal= 0.09*(1-0.5*N^2);

theta2 = (T*CDN*vento^2)/(4*lambda*Zm*g);

theta = min(thetal, theta2);

if (Q0 < 0)
    % calculando u (1ª forma)
    % durante condições estáveis(durante a noite), Weil and Brower (1983)
    % computam u* com o método baseado em Venkatram (1980a)

    U02 = lambda*Zm/k*A;

    C = 1 - ((4* U02)/(CDN*vento^2));

    if C < 0
        C = 0;
    end
end

```

```

end

u = (CDN * vento/2) * (1 + sqrt(C));
Qhnoite = - ro * cp * u * theta;

% calculando L = comprimento de Monin-Obukhov
L = A * u^2;

% Venkatram (1980a) define a seguinte relação empírica para estimar a
% camada de mistura:
h1(contador) = B2 * sqrt(u^3); % condições estáveis (noite)

% A altura da camada limite estável foi estimada por Zilitinkevich (1972) como:
h2(contador) = 0.4 * sqrt((u*L)/f); % condições estáveis (noite)

% A altura da CLP em condições neutras é sugerida por Deardorff (1974)
h(contador) = 0.25*u/f;

% calmet calcula 2 alturas e escolhe a menor entre elas
mixing_height_calmet(contador) = min( h1(contador), h2(contador) );
flag = 0;
media(contador) = (abs(h1(contador)) + abs(h2(contador)))/2;

else
% calculando durante o dia
% (unstable conditions)
% preenche os vetores noturnos com zeros
h(contador) = 0;
h1(contador) = 0;
h2(contador) = 0;
u = k*vento/(log(Zm/Zo));
L = - ((T * u^3)/(k * g * Q0));

for cont=1:25
    if (Zm/L < 0)
        x = (1 - 16*Zm/L)^0.25;
        x0 = (1 - 16*Zo/L)^0.25;
        psi_Zm = 2*log((1+x)/2) + log((1+x^2)/2) - 2*atan(x) + pi/2;
        psi_Zo = 2*log((1+x0)/2) + log((1+x0^2)/2) - 2*atan(x0) + pi/2;
    else
        psi_Zm = -5*(Zm/L);
        psi_Zo = -5*(Zo/L);
    end
    u = k*vento/(log(Zm/Zo) - psi_Zm + psi_Zo);
    % calculando L = comprimento de Monin-Obukhov
    L = - ((T * u^3)/(k * g * Q0));
end

% Calcular altura da camada de mistura baseado na eq. diferencial
delta_t = 3600; % 3600s = 1 hr
E = 0.15; % constante E
alp = 0.2; % constante alpha = 0.2
bet = 2.5; % constante beta = 2.5
gama = 6.5; % constante PTLR = 6.5K/km
if flag == 0
    alt0 = h(contador-1); % altura da camada neutra
    flag = 1; % o dia está iniciando
else
    alt0 = mixing_height_calmet(contador-1); % depois disso podemos pegar a altura anterior
end
if calor_sensivel(contador-1) > 0
    theta_t = sqrt((2*gama*E*calor_sensivel(contador-1)*delta_t)/(ro*cp));
else
    theta_t = 0;
end
theta_t1 = sqrt((2*gama*E*Qh*delta_t)/(ro*cp));

alt1 = sqrt(alt0^2 + ((2*Qh*(1+E)*delta_t)/(gama*ro*cp)) - (2*((theta_t)*alt0)/gama)) + (theta_t1/gama);
mixing_height_calmet(contador) = alt1;
media(contador) = alt1;

end

vetU(contador) = u;
vetL(contador) = L;

calor_sensivel(contador) = Qh;
% if mixing_height_calmet(contador) < 20
%     mixing_height_calmet(contador) = h(contador);
% end
% mixing_height_calmet(contador) = abs(mixing_height_calmet(contador));

% calculando a classe de estabilidade
if (( mod(contador,24) >= 7) && ( mod(contador,24) <= 19 )) % é dia
    if (N < 0.33) % Poucas nuvens
        if (vento < 2)
            estabilidade(contador) = 1;
        end
        if (vento >= 2)&&(vento < 3)
            estabilidade(contador) = 2;
        end
        if (vento >= 3)&&(vento < 5)
            estabilidade(contador) = 2;
        end
        if (vento >= 5)&&(vento < 6)
            estabilidade(contador) = 3;
        end
    end
end

```

```

        end
        if (vento >= 6)
            estabilidade(contador) = 3;
        end
    end
    if ((N > 0.33) && (N < 0.67)) % médio
        if (vento < 2)
            estabilidade(contador) = 2;
        end
        if (vento >= 2)&&(vento < 3)
            estabilidade(contador) = 2;
        end
        if (vento >= 3)&&(vento < 5)
            estabilidade(contador) = 3;
        end
        if (vento >= 5)&&(vento < 6)
            estabilidade(contador) = 3;
        end
        if (vento >= 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
    end
    if (N > 0.67) % muitas nuvens
        if (vento < 2)
            estabilidade(contador) = 2;
        end
        if (vento >= 2)&&(vento < 3)
            estabilidade(contador) = 3;
        end
        if (vento >= 3)&&(vento < 5)
            estabilidade(contador) = 3;
        end
        if (vento >= 5)&&(vento < 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
        if (vento >= 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
    end
else % caso contrário é noite
    if (N < 0.5) % Poucas nuvens
        if (vento < 2)
            estabilidade(contador) = 6;
        end
        if (vento >= 2)&&(vento < 3)
            estabilidade(contador) = 6;
        end
        if (vento >= 3)&&(vento < 5)
            estabilidade(contador) = 5;
        end
        if (vento >= 5)&&(vento < 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
        if (vento >= 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
    end
    if (N >= 0.5) % muitas nuvens
        if (vento < 2)
            estabilidade(contador) = 6;
        end
        if (vento >= 2)&&(vento < 3)
            estabilidade(contador) = 5;
        end
        if (vento >= 3)&&(vento < 5)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
        if (vento >= 5)&&(vento < 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
        if (vento >= 6)
            estabilidade(contador) = 4;
        end
    end
end

end

end

fileid = fopen('INPUT.DAT','r+');
tlin = fgetl(fileid);

% FORMATO DA LINHA QUE DEVE SER MONTADA.
%      10  1 114   75.0000   6.5000 297.7 6   46.5   46.5

while ischar(tlin)
    if (strcmp(tlin, '_7040000008000704000008'))
        position = ftell(fileid); % salva a posição da linha
        c = fread(fileid,inf,'uchar'); % salva em c o restante do arquivo.
        fseek(fileid, position, 'bof'); % posiciona na linha onde devem ser inseridos os pontos do terrel
        % Salva no arquivo os N pontos.
        for cnt = 1:size(mat, 1)
            if mixing_height_calmet(cnt) > 1000
                line = horzcat(mat(cnt,1:33),num2str(estabilidade(cnt), '%1d'),' ','...
                    num2str(mixing_height_calmet(cnt),'%4.1f'),' ','...num2str(mixing_height_calmet(cnt),'%4.1f'));
            end
        end
    end
end

```

```

    if (mixing_height_calmet(cnt) >= 100) && (mixing_height_calmet(cnt) < 1000)
        line = horzcat(mat(cnt,1:33),num2str(estabilidade(cnt), '%1d'),' ',' ',' ...
        num2str(mixing_height_calmet(cnt), '%4.1f' ),' ',' ', num2str(mixing_height_calmet(cnt), '%4.1f'));
    end
    if (mixing_height_calmet(cnt) >= 10) && (mixing_height_calmet(cnt) < 100)
        line = horzcat(mat(cnt,1:33),num2str(estabilidade(cnt), '%1d'),' ',' ',' ...
        num2str(mixing_height_calmet(cnt), '%4.1f' ),' ',' ', num2str(mixing_height_calmet(cnt), '%4.1f'));
    end
    if (mixing_height_calmet(cnt) < 10)
        line = horzcat(mat(cnt,1:33),num2str(estabilidade(cnt), '%1d'),' ',' ',' ...
        num2str(mixing_height_calmet(cnt), '%4.1f' ),' ',' ', num2str(mixing_height_calmet(cnt), '%4.1f'));
    end
    % categorizar a classe de estabilidade e escrever no arquivo num2str(estabilidade(cnt), '%1d'),' '
    fprintf(fileid, '%s', line);
    if cnt < size(mat, 1)
        fprintf(fileid, '\n');
    end
end
fclose(fileid);
break;
end
tlin = fgetl(fileid);
end

figure;
plot(mixing_height_calmet, 'black');
grid on;
%
```