

# Climatologia e Modelos de Dispersão de Poluentes no Vale do Rio Paraíba

Patrícia Moreno Simões Veiga<sup>1</sup>, Haroldo Fraga de Campos Velho<sup>2</sup>, Saulo Ribeiro de Freitas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos – SP, Brasil.

<sup>2</sup>Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. São José dos Campos – SP, Brasil.

<sup>3</sup>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Cachoeira Paulista – SP, Brasil.

{patricia.veiga,haroldo}@lac.inpe.br, saulo.freitas@cptec.inpe.br

**Abstract.** *In the present study we analyze the pollutant dispersion on Paraíba River Valley. This region is placed between two biggest cities in Brazil: São Paulo and Rio de Janeiro. The Valley is also between two mountains ridge: Serra da Mantiqueira (Mantiqueira ridge) and Serra do Mar (Sea ridge). In the Valley, important cities are located with high population (for example São José dos Campos and Taubaté cities with more than 800.000 people), with important industrial area. There are many pollutant sources in this region: industries and a high-way with the heaviest traffic in the country. Our interest here is not to simulate one specific event, but to have a scenario of the pollutant diffusion from typical meteorological situations. The intention is to simulate an average condition to understand the evolution of the pollutant dispersion under different weather conditions, over a complex terrain. The mesoscale meteorological model BRAMS is employed to simulate the wind field, and other parameters such as boundary layer height, wind velocity scale, and so on. The pollutant dispersion is simulate by using the CALPUFF – EPA/USA model. The goal here is to use a simple dispersion model, with low computational cost. The motivation of this research is to help the cities administration to have good information on the impact of pollutant on the population looking at a better urban planning.*

**Resumo.** *No presente estudo foi analisado a dispersão de poluentes no Vale do Rio Paraíba. Essa região fica localizada entre as duas maiores cidades do Brasil fazendo parte de um grande pólo industrial: São Paulo e Rio de Janeiro. O Vale está localizado também entre duas serras montanhosas: Serra da Mantiqueira e Serra do Mar. Dentro do Vale do Paraíba, essas cidades possuem uma população elevada (por exemplo, as cidades de São José dos Campos e Taubaté com mais de 800.000 pessoas) e são importantes áreas industriais. Há muitas fontes de poluição nessa região: indústrias e um forte tráfego de automóveis entre as cidades. O propósito é simular uma condição média para verificar a evolução da dispersão de poluentes sob diferentes condições sazonais, sobre um terreno complexo. O modelo meteorológico de mesoescala BRAMS é utilizado para simular a condição inicial da atmosfera. Para simular a dispersão de poluentes foi utilizado o modelo de dispersão CALPUFF – EPA/USA. A motivação desse trabalho é para ajudar a administração das prefeituras da região e minimizar o impacto de poluição na população.*

## 1. Introdução

Modelagem de poluição atmosférica é um tema difícil, visto que a turbulência é um fenômeno permanentemente presente, onde a atmosfera experimenta diferentes tipos de condições de estabilidade (estável, instável e neutra), mudando sua condição termodinâmica constantemente. Entretanto, nos últimos anos o monitoramento da qualidade do ar tornou-se atividade muito importante, tendo em vista a sociedade industrial em que vivemos.

A importância do assunto tornou-se evidente com o aumento das emissões de poluentes causadas pelo crescimento das áreas urbanas e industriais. Uma ferramenta que vem sendo utilizada para o monitoramento da poluição são os modelos numéricos de dispersão de poluentes. O

CALPUFF (*CALifornian PUFF Model*) é um modelo de dispersão de puff Gaussiano Lagrangeano não-estacionário, que permite validar um campo de concentração, simulando o transporte, a transformação e a remoção dos poluentes na atmosfera a partir de condições meteorológicas variáveis no espaço e no tempo. Matematicamente, a concentração de poluentes em cada puff é representada por uma distribuição Gaussiana evoluindo no tempo e no espaço. O movimento de cada puff é calculado em cada intervalo de tempo, movendo-se o seu centro de massa de acordo com o vento presente naquele ponto e naquele instante. O campo de concentração a cada passo de tempo é calculado somando a contribuição de cada puff (Scire et al., 2005). O modelo CALPUFF é totalmente público, incluindo seus manuais, podendo ser obtido no endereço internet [www.src.com](http://www.src.com).

O Vale do Rio Paraíba é uma região industrial, sendo cortada por uma auto-estrada de tráfego intenso denominada Rodovia Presidente Dutra. Assim sendo, esta rodovia representa uma fonte de linha onde os veículos automotores que circulam nela emitem poluentes. Há também fontes pontuais que representam as fábricas e outros pontos de poluição. As cidades estão circundadas num vale entre a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira. Esta topografia irá ocasionar situações interessantes do ponto de vista meteorológico, tais como circulações catabáticas e anabáticas (regimes de vento forçados pela presença da topografia), bem como efeitos de canalização do vento (Moraes, 1995). Devido a proximidade da costa, efeitos de brisa do mar se superpõem ao efeito sinótico (brisa + frentes), gerando um microclima da região. Toda esta complexidade do escoamento atmosférico pode em princípio ser modelada a partir de modelos meteorológicos de área limitada como o modelo BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*), sendo o CPTEC/INPE o responsável pelo seu desenvolvimento (Barros, 1998; Mendes e Panetta, 1999).

Para avaliação de planejamento urbano na tomada de decisão, como por exemplo a demarcação de zonas industriais, é fundamental estabelecer critérios que minimizem o impacto da poluição à população. Modelos de dispersão de poluentes são ferramentas importantes nesta análise. Todavia, para estratégia de planejamento urbano e regional baseado na minimização dos efeitos da poluição atmosférica, é essencial realizar-se um estudo da climatologia da região.

O objetivo do trabalho é avaliar um cenário de dispersão de poluente atmosférico na região do Vale do Rio Paraíba através de uma abordagem essencialmente numérica utilizando o modelo CALPUFF. Pretende-se modelar a dispersão de poluentes através da estimativa de duas fontes poluidoras, o monóxido de carbono (CO) e o material particulado (MP<sub>10</sub>) que são emitidos pelos veículos automotores que trafegam pela Rodovia Presidente Dutra no eixo São Paulo e Rio de Janeiro em 200 km, que passa pelas cidades do Vale sendo estimada nas cidades de Jacareí, São José dos Campos, Taubaté e Pindamonhangaba. A seção 2 deste trabalho apresenta a metodologia utilizada nesta análise, bem como as configurações dos modelos. A seção 3 apresenta os resultados e, finalmente, na seção 4 são apresentadas às conclusões.

## **2. Dados e Metodologia**

A modelagem numérica empregada neste trabalho consiste em monitorar a dispersão de poluentes dentro do Vale do Rio Paraíba através da estimativa da concentração de poluentes dentro deste domínio. Para tanto, foi necessário definir um período de estudo sendo determinado a partir de uma sistemática observação, caso a caso, das saídas das reanálises do modelo ETA de 40 km, onde buscou-se um escoamento do ar característico perpendicular a topografia do domínio escolhido. Este escoamento característico foi encontrado durante os dias 01/01/2004 – 00Z até 06/01/2004 – 00Z, denominado período de verão e os dias 11/07/2004 – 00Z até 16/07/2004 – 00Z, denominado período de inverno. Após a escolha dos períodos para a simulação da dispersão de poluentes foi utilizado com condição inicial do modelo CALPUFF as análises do modelo regional BRAMS que foi inicializado pelo modelo Global do CPTEC.

As fontes de poluição consideradas para inicializar o CALPUFF são: (a) 200 Km da Rodovia Presidente Dutra que corta o Vale do Rio Paraíba no eixo São Paulo – Rio de Janeiro e (b) as cidades de Jacareí, São José dos Campos, Taubaté e Pindamonhangaba. A qualidade do ar é

avaliada através de dois traçadores, sendo a concentração de CO e o material particulado (MP<sub>10</sub>). As emissões veiculares da rodovia, foram estimadas através do estudo do “Health Effect Institute”, enquanto que a emissão para a cidade de São José dos Campos foi estabelecida a partir do relatório anual da CETESB de 2005 e estimada para as demais cidades.

A Figura 1 representa um esquema dos passos utilizados para obter os resultados desejados. Na primeira etapa da modelagem numérica utilizou-se as análises do BRAMS com uma resolução de 5 km, assim como, dados geofísicos da região de estudo. O modelo meteorológico CALMET é responsável pela interpolação de grade entre o BRAMS e o CALPUFF, obtendo-se uma saída com resolução de 1 km. Essas informações iniciais são utilizadas para alimentar o CALPUFF na segunda etapa, que junto com os valores dos traçadores de concentrações CO e MP<sub>10</sub> irá resultar no valor de concentração desejada durante o período de estudo. A simulação do CALPUFF foi realizada em um período de 36h sendo dois períodos distintos, um representando a estação de verão 03/01/2004 - 00Z e o outro a estação de inverno 12/07/2004 - 00Z. Na terceira etapa, realizou-se o pós-processamento gerando as saídas gráficas pelo software de visualização SURFER.

O modelo CALPUFF foi desenvolvido na plataforma Windows. A presente versão do pacote, foi desenvolvida no LAC/INPE e adaptada para o ambiente Linux (Degrazia et al., 2007) e o código CALMET foi adaptado para ler dados de saída do BRAMS.

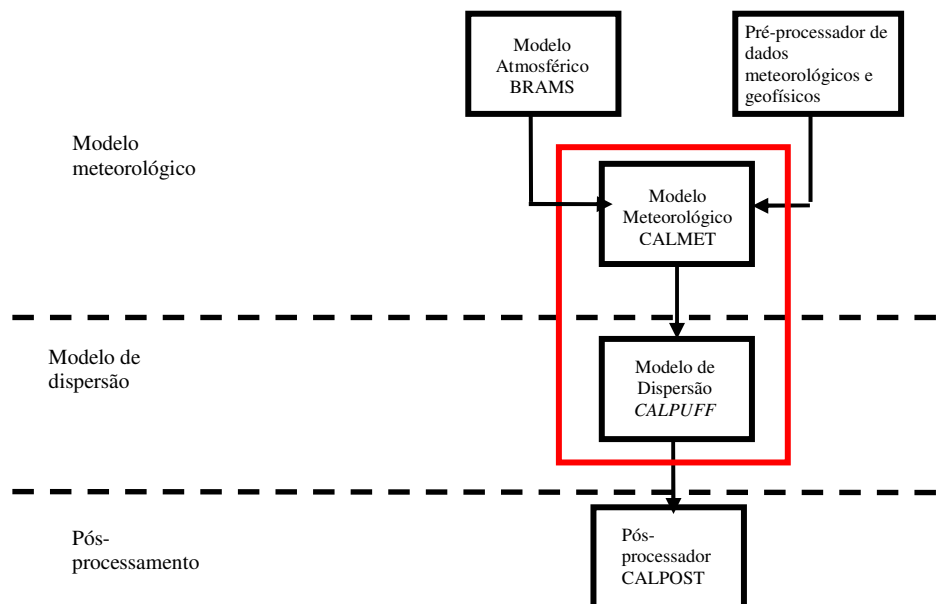


Figura 1: Esquema da modelagem numérica.

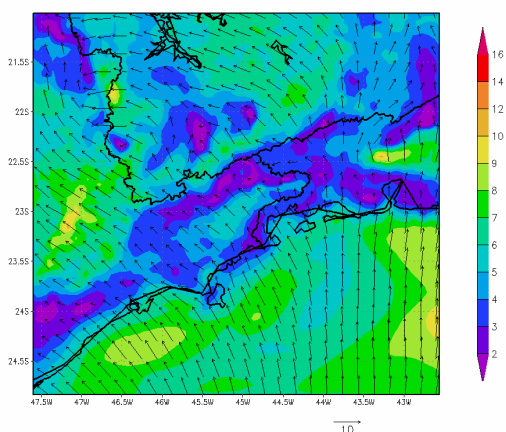
### 3. Resultados

O modelo BRAMS foi executado para reproduzir uma condição meteorológica interessante: o vento principal tem uma direção que é aproximadamente transversal ao Vale, tanto para o inverno como para a situação de verão. A Figura 2 mostra o resultado da simulação no dia 12 de julho de 2004 às 00Z (período de inverno) e a Figura 3 mostra a simulação para o dia 03 de janeiro de 2004 às 00Z (período de verão). Nestas figuras, o campo de vento é visualizado no nível da superfície, sendo a intensidade do vento representada pelo gráfico de cores e a direção do vento pelas setas. Nota-se claramente que o ar flui perpendicularmente ao Vale na direção Sul-Norte. Esta condição vai gerar um escoamento no interior do Vale no sentido da oeste-leste (ou seja, direção São Paulo - Rio de Janeiro). Na simulação realizada nota-se que no período de verão a intensidade do vento foi mais forte do que no período de inverno.

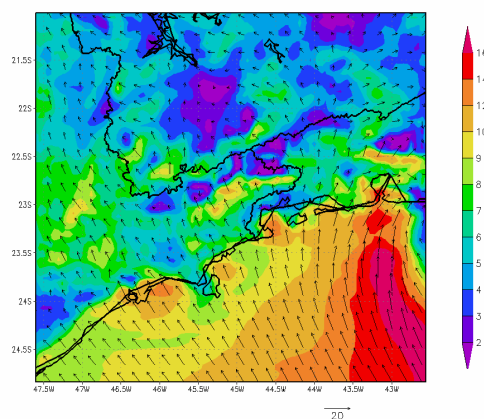
Os campos gerados pelo modelo BRAMS são lidos pelo código CALMET, onde alguns parâmetros são calculados (altura de camada limite, escala de velocidade, etc) e os campos são ajustados para a resolução e projeção cartográfica do modelo CALPUFF. Conforme mencionado, dois traçadores foram configurados para o CALPUFF: CO e PM<sub>10</sub>, aqui será visualizado somente o gás CO. A Figura 4 mostra uma saída do modelo de dispersão de poluentes para o traçador de CO com resolução de 1 km para o dia 12 de julho de 2004 para horário diurno às 12 h (Figura 4a) e noturno às 24 h (Figura 4b), em ambas as figuras é mostrada a concentração para o nível de superfície.

A Figura 5 mostra uma saída do modelo de dispersão de poluentes CALPUFF de concentração de CO com resolução espacial de 1 km para o dia 03 de janeiro de 2004 para horário diurno às 12 h (Figura 5a) e noturno às 24 h (Figura 5b), ambas para o nível de superfície.

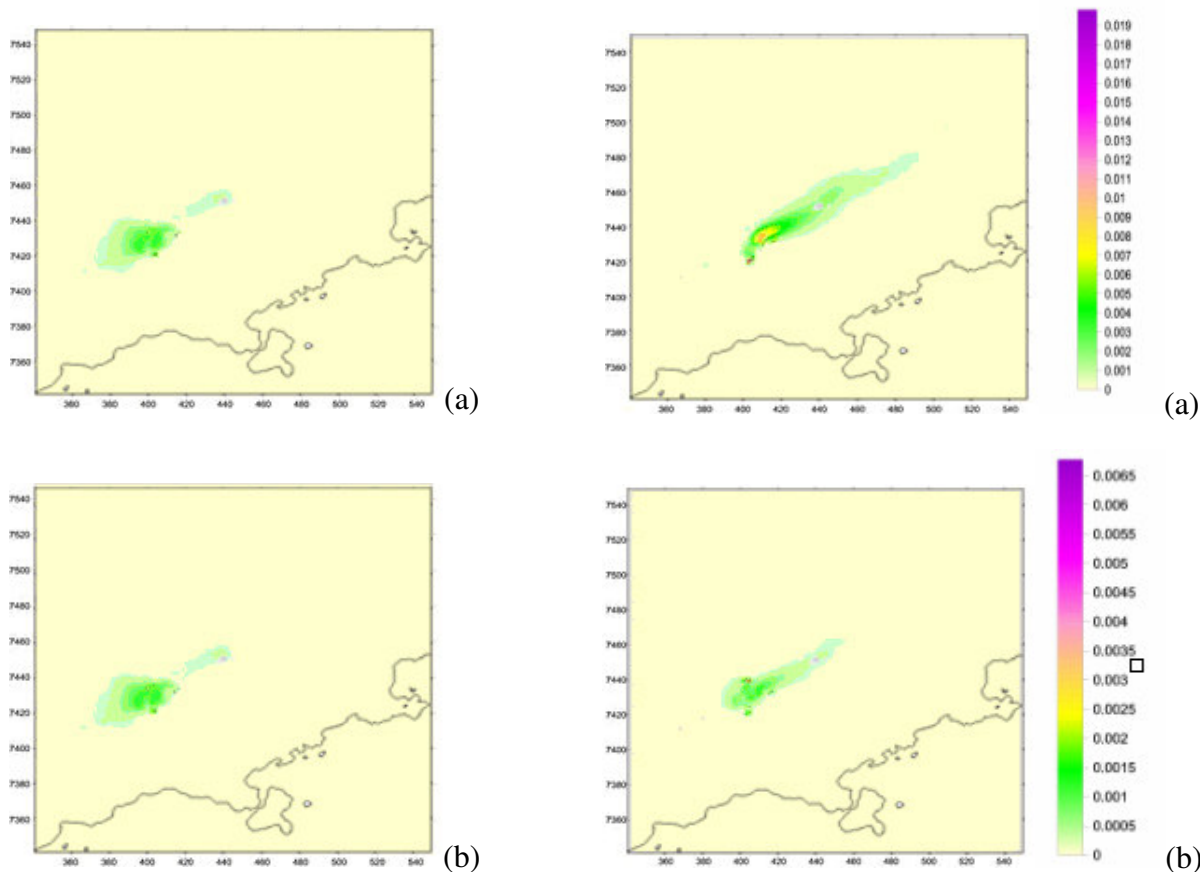
As simulações com o modelo CALPUFF mostram a influência da intensidade do vento na dispersão de poluentes dentro do Vale. Na simulação para um dia de inverno, há um deslocamento na direção no escoamento na direção São Paulo - Rio de Janeiro, mas fica claro também que o efeito de difusão (transporte de massa) do poluente por efeito de gradiente de concentração é claramente notado (Figura 4a e 4b). Para um regime de vento mais intenso, como mostrado na Figura 5a e 5b, o poluente é arrastado pelo vento e a poluição produzida na região do Vale mais próxima a cidade de São Paulo é arrastada para a região mais no fundo do Vale (mais próxima a cidade do Rio de Janeiro).



**Figura 2: Inverno: Saída da simulação numérica do BRAMS da direção e intensidade do vento com resolução espacial de 5 km para o dia 12 de julho de 2004 às 00Z.**



**Figura 3: Verão: Saída da simulação numérica do BRAMS da direção e intensidade do vento em 850 hPa, com resolução espacial de 5 km para o dia 03 de janeiro de 2004 às 00Z.**



**Figura 4: Inverno: Saída do modelo de dispersão de poluentes CALPUFF de concentração de CO com resolução espacial de 1 km para o dia 12 de julho de 2004 às 12 h (a) e 24 h (b).**

**Figura 5: Verão: Saída do modelo de dispersão de poluentes CALPUFF de concentração de CO com resolução espacial de 1 km para o dia 03 de janeiro de 2004 às 12 h (a) e 24 h (b).**

#### 4. Conclusões

O objetivo do trabalho é mostrar que um modelo relativamente simples (modelos gaussianos são comparativamente mais simples e de menor demanda computacional do que modelos Eulerianos e Lagrangianos, estes últimos computacionalmente mais caros) pode ser aplicados a um problema de terreno complexo, sujeito a condições meteorológicas interessantes (acoplamento de condições sinóticas, com efeitos de brisa do mar e o escoamento devido à orografia). O desenvolvimento para o sistema Linux, torna o modelo CALPUFF um sistema que pode ser completamente executado em ambiente de software livre e não requer nenhum equipamento de hardware de grande poder computacional. Nesta configuração, o sistema está pronto para ser usado por qualquer usuário, como pequenas prefeituras e ministério público, como uma ferramenta de análise preliminar para riscos ambientais e para planejamento urbano.

O caso simulado aqui é somente um resultado preliminar que irá constituir um conjunto de cenários para uma avaliação do comportamento da dispersão da poluição no interior do Vale do Rio Paraíba. A simulação mostra o caso "efeito de tunelamento", isto é, o escoamento induzido dentro de um vale induzido por uma condição de vento principal que é perpendicular ao Vale. No caso simulado, a direção do vento dentro do Vale do Paraíba ocorreu na direção oeste-leste. De fato, num estudo climatológico prévio, este comportamento do vento foi registrado (Veiga et al., 2007).

## 5. Referências Bibliográficas

BARROS, S. R. M. Towards the RAMS-FINEP parallel model: load balancing aspect, Towards Teracomputing: Proceedings of the 8 th ECMWF – Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology, Reading (UK), 1998.

Calpuff: site: <http://www.src.com> acessado em 14/04/2008.

DEGRAZIA, F. C., Campos Velho, H. F., Cintra, R.S.C., Barbosa, J. P. S., Moraes, M. R. Sistema de Previsão da Qualidade do Ar para o Vale do Paraíba. Ciência e Natura, v. 111, p. 293-296, Brasil, 2007.

MENDES, C. L. e Panetta, J. Selecting directions for Parallel RAMS performance optimization, Proceedings of the 11 th Symposium on Computer Architecture and High Performance Computing (SBAC-PAD), Natal (RN), Brazil, 85-92, 1999.

MORAES, R. M. Estudo numérico da canalização em vales em termos de parâmetros de similaridade. Tese de mestrado em sensoriamento remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 1995.

SCRIRE, J. S., Francoise, R. R., Mark, E. F., Yamartino, R. J. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5), Earth Tech, Inc, 2000.

VEIGA, P. M. S., Campos Velho, H. F., Freitas, S. R. Estudo Observacional da Climatologia no Vale do Paraíba: Resultados Preliminares – Workshop em Computação Aplicada – CAP/INPE, São José dos Campos, Brasil, 2007.