

## RECONSTRUÇÃO DO CAMPO DE VENTOS TRIDIMENSIONAL SOBRE REGIÕES DE TOPOGRAFIA

### **Neyval C. Reis Jr.**

Departamento de Informática, Centro Tecnológico – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES  
[neyval@inf.ufes.br](mailto:neyval@inf.ufes.br)

### **Alexsander Barros Silveira**

Departamento de Informática, Centro Tecnológico – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES  
[alexandersil@bol.com.br](mailto:alexandersil@bol.com.br)

### **Jane Méri Santos**

Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Tecnológico – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES  
[janemeri@npd.ufes.br](mailto:janemeri@npd.ufes.br)

### **Julio T. A. Chacaltana**

Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Tecnológico – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES  
[juliotac@npd.ufes.br](mailto:juliotac@npd.ufes.br)

**Resumo.** *Estimativas da forma dos campos de vento em uma região podem ser efetuadas através da interpolação de dados provenientes de estações meteorológicas. Todavia, a topografia pode aumentar significativamente a complexidade do campo de ventos, restringindo a aplicabilidade e a acurácia do usos de funções convencionais de extrapolação (ou interpolação). Este trabalho apresenta uma implementação de um algoritmo para a determinação do campo de ventos sobre uma região urbana de relevo moderadamente complexo, baseado no princípio de conservação de massa, incluindo informações sobre a topografia e reconstruindo o campo de ventos em sua estrutura tridimensional. O algoritmo é baseado na técnica de volumes finitos. O modelo é testado em um problema de escala real, na Região da Grande Vitória - ES (Brasil), onde o campo de ventos e sua variação durante o ciclo diário são analisados.*

**Palavras chave:** *campo de ventos, relevo complexo, método de volumes finitos*

### **1. Introdução**

A determinação do campo de ventos de uma região é extremamente importante para um grande número de aplicações, variando deste a análise de dispersão de poluentes na atmosfera ao levantamento dos recursos eólicos de uma região. Dados sobre o campo de ventos são obtidos por estações meteorológicas, que monitoram direção e velocidade do ventos. Todavia estes dados representam informações em pontos isolados, que necessitam ser extrapoladas para se obter o campo de ventos em toda a região. O uso de funções convencionais de extrapolação (ou interpolação) pode levar a grandes erros visto que estas não incorporam as características de topografia.

Os modelos utilizados para determinar o campo de vento em regiões de topografia complexa podem ser divididos em 2 grupos principais: os modelos de prognóstico (ou predição) e os modelos de diagnóstico. Modelos de prognóstico baseiam-se na solução das equações de momentum e energia, que governam o escoamento de fluidos, para determinar o campo de ventos sobre a região. Esta classe de modelos requer considerável esforço computacional devido a natureza tridimensional e transiente das equações envolvidas. Além disso, alguns autores apontam que a complexidade dos dados de entrada requeridos por tais modelos, muita vezes, restringe sua aplicabilidade (Ratto, 1996a). Isto tem motivado o surgimento de vários modelos para descrever o escoamento de ar sobre topografias complexas, variando em diferentes graus de complexidade, entre outros Hunt et al. (1988a, b) e Carruthers et al. (1991). Entretanto, recente comparação entre os modelos mais utilizados e dados experimentais obtidos em experimentos de campo (Dunkerley, 1998) indica que ainda existem grandes limitações nos resultados obtidos por estes modelos.

Por outro lado, simplicidade dos modelos de diagnóstico os torna extremamente atraentes para aplicações práticas. Estes modelos baseiam-se na utilização de dados medidos para determinar o campo de ventos sobre toda a região, satisfazendo à física do problema. Os modelos mais utilizados dentro desta classe de ferramentas são os modelos baseados na conservação de massa. A hipótese principal deste tipo de modelos é de que existem dados meteorológicos suficientes para caracterizar o escoamento na região e, além disso, a principal influência sobre o escoamento são as mudanças de direção impostas pela conservação de massa através das variações de relevo, negligenciando a importância dos efeitos de inércia e viscosos. Esta hipótese faz com que modelos de diagnóstico não sejam capazes de incluir efeitos térmicos (plumas ascendentes e/ou descendentes), descolamento de camada limite, ilhas de calor, brisas marinhas e outros efeitos ligados à conservação de energia e momentum na atmosfera, a não ser que estes fenômenos sejam capturados pelas dados meteorológicos medidos pelas estações. Entretanto, esta abordagem tem se mostrado relativamente satisfatória para a determinação de campo de vento em regiões de topografia complexa, e um grande número de trabalhos científicos têm sido publicados utilizando esta técnica, entre outros: Pennel (1983), Montero et al. (1998) e Montero e Sanin (2001). Em alguns casos, modelos de diagnóstico baseados na conservação de massa têm apresentado resultados melhores que modelos de prognóstico utilizando a solução completa das equações governantes (Ratto, 1996a).

Este trabalho apresenta uma implementação de um algoritmo para a determinação do campo de ventos sobre uma região urbana de relevo moderadamente complexo, baseado no princípio de conservação de massa, incluindo informações sobre a topografia e reconstruindo o campo de ventos em sua estrutura tridimensional. O algoritmo é baseado na técnica de volumes finitos. O modelo é testado em um problema de escala real, na Região da Grande Vitória-ES (Brasil), onde o campo de ventos e sua variação durante o ciclo diário são analisados.

## 2. Modelo Matemático

O primeiro passo para a determinação do campo de ventos em uma determinada região é conhecer a intensidade e direção do vento em alguns pontos de monitoramento, i.e., estações meteorológicas. Assim, é possível definir uma região de estudo  $\Omega$ , onde o vetor de ventos (intensidade e direção do vento) é conhecido em  $N$  pontos  $(\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \dots, \vec{V}_N)$ . O objetivo desta técnica é construir o campo de ventos tridimensional nesta região com base nos valores conhecidos e ao mesmo tempo satisfazendo a equação da continuidade. Assim, para obter-se o campo de ventos, são necessárias duas etapas:

i) Etapa de inicialização **A** que transforma, através de interpolação/extrapolação, os  $N$  vetores de ventos em um campo de ventos para a região  $\Omega$ .

$$(\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3, \dots, \vec{V}_N) \xrightarrow{A} \vec{V}^0(x, y, z)$$

onde o campo  $\vec{V}^0(x, y, z)$  é normalmente chamado de “campo inicial” ou “campo observado” e normalmente não satisfaz o princípio da conservação de massa.

ii) Etapa de ajuste **B** que visa transformar o campo  $\vec{V}^0(x, y, z)$  em um “campo final” ou “reconstruído”, que satisfaça o princípio da conservação de massa.

$$\vec{V}^0(x, y, z) \xrightarrow{B} \vec{V}(x, y, z)$$

É importante notar que o número de soluções possíveis é infinito, assim, o campo resultante  $\vec{V}(x, y, z)$  depende dos procedimentos adotados nas etapas **A** e **B**.

### 2.1. Etapa de inicialização

Usualmente os dados disponíveis para a reconstrução do campo de ventos são direção e velocidade do vento medidos em diversas estações meteorológicas espalhadas pelo domínio de estudo. Estes dados são tipicamente colhidos próximos ao solo (usualmente 10 m). Raramente são medidas as componentes verticais do vento, assim, os componentes verticais de velocidade do vento são inicializados como nulos para todos os pontos no domínio de estudo. Para reconstruir o perfil vertical de velocidades nos pontos de cada estação, utiliza-se o perfil de velocidade da lei da potência (Sherman, 1978):

$$V^0(z) = V_{ref} \left( \frac{z}{h_{ref}} \right)^p \quad (1)$$

onde  $V_{ref}$  é a velocidade do vento medida em uma altura de referência  $h_{ref}$ ,  $z$  é a coordenada vertical e o expoente  $p$  é determinado em função da classe de estabilidade da atmosfera (Stern et al., 1984), conforme Tab (1).

Tabela 1. Valores do expoente  $p$  em função da classe de estabilidade da atmosfera (Stern et al., 1984),.

Condição da atmosfera	$p$
Instável	0.15
Moderadamente Instável	0.20
Neutra	0.52
Estável	0.30
Muito Estável	0.35

Estes perfis verticais de velocidade obtidos na posição das estações meteorológicas são, então, interpolados/extrapolados horizontalmente utilizando a técnica  $1/r^2$ , através da qual as componentes do vetor de velocidade do vento são obtidas a partir da interpolação dos dados das estações meteorológica utilizando como fator peso o inverso do quadrado das distâncias entre as estações meteorológicas e cada ponto do domínio. Esta é uma das técnicas mais comumente utilizadas para interpolação/extrapolação de campo de ventos a partir de dados de estações meteorológicas (Jiang et al, 2001).

$$\vec{V}^0(x, y, z) = \frac{\sum_{n=1}^N \vec{V}_n / r_n^2}{\sum_{n=1}^N 1/r_n^2} \quad (2)$$

onde  $r_n$  representa a distância entre cada estação  $n$  e o ponto  $(x, y, z)$  do domínio de estudo.

## 2.2. Conservação de massa

O campo de ventos final deve atender a equação da continuidade. Assumindo um escoamento “incompressível”, esta pode ser escrita como:

$$\nabla \vec{V} = 0 \quad (3)$$

Assim, objetiva-se construir um novo campo de ventos  $\vec{V}(x, y, z)$  a partir de  $\vec{V}^0(x, y, z)$ , que atenda a equação (3). O procedimento utilizado aqui baseia-se na técnica variacional descrita originalmente por Sasaki (1958) e (1970), e ainda utilizada por um grande número de pesquisadores, entre outros Sherman (1978), Pennel (1983), Ratto (1996b) e Montero e Sanin (2001). Este procedimento será apenas brevemente descrito aqui, o leitor mais interessado em uma descrição completa da técnica deve consultar uma das referências acima. Com base no procedimento de Sasaki, deseja-se encontrar um campo de velocidades  $\vec{V}(x, y, z)$ , cujos componentes são  $u, v$  e  $w$ , que atenda a eq.3, mas que se aproxime ao campo original  $\vec{V}^0(x, y, z)$ , cujos componentes são  $u^0, v^0$  e  $w^0$ . Assim, é possível escrever o problema de ajuste como um problema de mínimos quadrados na forma:

$$E(u, v, w) = \int_{\Omega} \left[ \alpha_1^2 (u - u^0)^2 + \alpha_1^2 (v - v^0)^2 + \alpha_2^2 (w - w^0)^2 \right] dV \quad (4)$$

sujeito a condição imposta pela continuidade eq. (3), onde os valores de  $\alpha_i$  são os módulos de precisão de Gauss, que representam constantes do modelo (o cálculo destes valores serão descritos **a posteriori**). A técnica de multiplicadores de Lagrange é utilizada para minimizar a expressão acima sujeita a equação (3). O valor mínimo de  $E(x, y, z)$  é obtido para:

$$u = u^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (5)$$

$$v = v^0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial I}{\partial y} \quad (6)$$

$$w = w^0 + \frac{1}{2a_2^2} \frac{\partial I}{\partial z} \quad (7)$$

onde  $\lambda = \lambda(x, y, z)$  é o multiplicador de Lagrange, que pode ser interpretado fisicamente como uma perturbação do velocidade. Se os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são considerados constantes ao longo de todo domínio, pode-se rescrever a equação (3) utilizando eqs. (4), (5) e (6), como:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2} + \frac{a_1^2}{a_2^2} \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} = -2a_1^2 \left( \frac{\partial u^0}{\partial x} + \frac{\partial v^0}{\partial y} + \frac{\partial w^0}{\partial z} \right) \quad (8)$$

que representa uma equação diferencial parcial elíptica para  $\lambda$ . Assim, para determinar o valor ajustado das componentes de velocidade ( $u, v, w$ ), é necessário resolver a equação (8) com base nos valores de  $(u^0, v^0, w^0)$ , e subsequentemente calcular  $(u, v, w)$  através das eqs. (5), (6) e (7). Todavia para resolver (8) é necessário estabelecer condições de contorno. Com base no procedimento variacional adotado acima, Sherman (1978) afirma que somente duas condições de contorno são admissíveis para a equação acima:

$$I = 0 \text{ na fronteira} \quad (9)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x_n} = 0 \quad (10)$$

onde  $x_n$  representa a coordenada na direção normal à fronteira. A especificação de ambos viola a condição de solução única. Assim, quando  $\lambda = 0$ , as derivadas normais são em geral não nulas. Assim, existe um ajuste de  $(u, v, w)$  em relação a  $(u^0, v^0, w^0)$ , com base nas eqs. (5), (6) e (7). Este ajuste não nulo implica em uma variação da quantidade de massa fluindo através de uma fronteira do domínio, alterando a quantidade de massa “entrando” ou “saindo” do domínio. Portanto a condição de contorno de  $\lambda = 0$  é apropriada para fronteiras abertas ou permeáveis do domínio. O valor constante de  $\lambda$  ao longo da fronteira também implica em um ajuste nulo para as velocidades tangenciais no contorno, visto que as derivadas tangenciais de  $\lambda$  serão nulas.

Por outro lado, se  $\partial I / \partial x_n = 0$  a correção de  $(u, v, w)$  em relação a  $(u^0, v^0, w^0)$  é nula. Se as velocidades normais observadas em uma fronteira são nulas, as velocidades ajustadas também serão nulas. Portanto esta condição é ideal para regiões de fronteiras fechadas ou impermeáveis. Assim, considerando-se um domínio de estudo tridimensional (figura 1), onde as fronteiras laterais são abertas, a fronteira inferior representa o solo e a fronteira superior representa o topo da camada limite atmosférica (ou camada de inversão), através da qual assume-se um fluxo de massa nulo, é possível sumarizar as condições de contorno como;

$$I = 0 \text{ nas fronteiras laterais do domínio} \quad (11)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x_n} = 0 \text{ no solo e na fronteira superior do domínio} \quad (12)$$

Fisicamente, pode-se interpretar a equação de  $\lambda$  (eq. 8) como uma equação para perturbação (ou correção) dos componentes de velocidade. Se o campo de velocidades inicial atende o princípio de conservação de massa, tem-se que o lado direito da equação é zero e o campo de  $\lambda$  é uniforme, resultado em correções nulas de  $(u, v, w)$  em relação a  $(u^0, v^0, w^0)$ . Por outro lado, se o campo de velocidades inicial não atende o princípio de conservação em alguma região do domínio, o lado direito da eq. 8 será diferente de zero, implicando em valores de  $\lambda$ , que levam a correções não nulas de  $(u, v, w)$  em relação a  $(u^0, v^0, w^0)$ , com base nas eqs. 11 e 12. De fato o lado direito da eq. 8 pode ser interpretado como um termo de “fonte” ou “sumidouro” de  $\lambda$ , caso este seja diferente surgirão valores de  $\lambda$  diferentes de zero no interior do domínio, acarretando correções de  $(u, v, w)$  em relação a  $(u^0, v^0, w^0)$  no sentido de impor a conservação de massa.

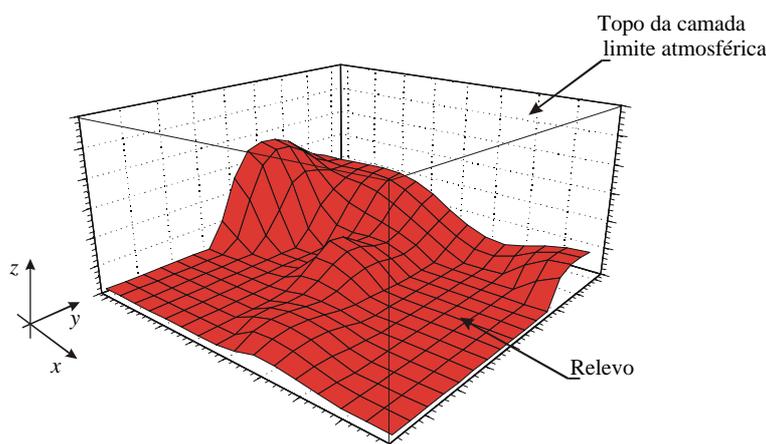


Figura 1. Representação esquemática do domínio computacional.

## 2.2. Estabilidade atmosférica

Na equações 4-8 aparecem os valores de  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , que são os módulos de precisão de Gauss. É importante notar que de acordo com a eq. 4, estes valores representam os fatores de peso dos desvios entre cada componente de velocidade inicial e corrigida. Assim, se estes valores são iguais, as correções das componentes velocidades em cada direção terão influência semelhante na minimização do funcional  $E(u, v, w)$ , e todas as correções efetuadas sobre o campo de ventos inicial terão ordem de grandeza semelhante. Desta forma o vento incidente sobre uma região de topografia complexa, atenderá a conservação de massa através de correções das componentes de velocidade horizontais e verticais, criando velocidades verticais ascendentes ou descendentes na região em questão.

Todavia as condições meteorológicas da atmosfera (radiação solar, deslocamento de massas de ar quente/frio, etc.), geram diferentes condições de estratificação de densidade na atmosfera, que tendem a facilitar ou suprimir o deslocamento vertical das massas ar (Stern et al., 1984). Deste modo, a atmosfera é considerada estável quando suas condições de estratificação suprimem os movimentos verticais, instável quando suas condições de estratificação facilitam os movimentos verticais ou neutra quando não há uma influência significativa da estratificação nos deslocamentos verticais das massas de ar. Portanto, visto que tais condições de estabilidade afetam os deslocamentos verticais das massa de ar na atmosfera, os valores utilizados para os módulos de precisão de Gauss devem refletir as variações de estabilidade atmosférica.

Em condições estáveis os valores da correção dos componentes verticais de velocidade devem ser menores, devido a supressão dos movimentos verticais<sup>1</sup>, requerendo valores de  $\alpha_2 > \alpha_1$ . Maiores valores de  $\alpha_2$  aumentam o peso do desvio relativo ao componente vertical de velocidade na eq. 4, levando a menores valores de correção para as velocidades verticais. Por outro lado, em condições instáveis os valores da correção dos componentes verticais de velocidade devem ser maiores, devido a instabilidade causada pela estratificação, requerendo valores de  $\alpha_1 > \alpha_2$ . Todavia a avaliação quantitativa dos valores destes parâmetros é extremamente difícil, devido ao elevado número de fenômenos envolvidos, levando a utilização de valores determinados empiricamente. Neste trabalho, serão utilizados os valores sugeridos por Ratto (1996b), onde  $\alpha_1$  é tomado como igual a 1.0 e a razão  $\alpha_1/\alpha_2$  varia conforme apresentado na Tab. (2).

Tabela 2. Valores da razão  $\alpha_1/\alpha_2$  em função da condição de estabilidade da atmosfera (Ratto, 1996b).

Condição da atmosfera	$\alpha_1/\alpha_2$
Instável	1.4
Neutra	1.0
Estável	0.3
Muito Estável	0.1

Portanto, as condições de estabilidade atmosféricas são consideradas no modelo de duas formas: (i) através o expoente  $p$  utilizado para determinar o perfil vertical de velocidades na construção inicial do campo de velocidades, e

<sup>1</sup> É importante lembrar que os componentes verticais de velocidade do campo inicial são nulos. Assim uma correção pequena resulta em valores de velocidade vertical baixos.

(ii) através dos valores da razão  $\alpha_1/\alpha_2$ , que indicam a importância dos movimentos verticais nas correções de velocidade.

### 3. Método Numérico

A equação diferencial elíptica para  $\lambda$ , descrita na seção anterior, é resolvida através da técnica de volumes finitos (Patankar, 1980). O esquema de diferenças centradas é utilizado para discretizar as derivadas nas faces dos volumes de controle, em uma malha ortogonal uniforme nas direções  $x$  e  $y$ , e não uniforme na direção  $z$  (concentrando volumes de controle próximos à superfície sólida). Os valores de  $\lambda$  são armazenados nos centros dos volumes de controle, enquanto as velocidades são armazenadas nas faces dos volumes de controle. A fig. 2 apresenta uma representação esquemática de um volume de controle típico para as situações analisadas, onde os pontos nodais são representados por letras “P”, “E”, “W”, “N”, “S”, “C” e “B”, correspondentes ao ponto principal (centro do volume de controle, ou  $i,j,k$ ) e seus vizinhos a leste ( $i+1,j,k$ ), a oeste ( $i-1,j,k$ ), a norte ( $i,j+1,k$ ), a sul ( $i,j-1,k$ ), acima ( $i,j,k+1$ ) e abaixo ( $i,j,k-1$ ), respectivamente.

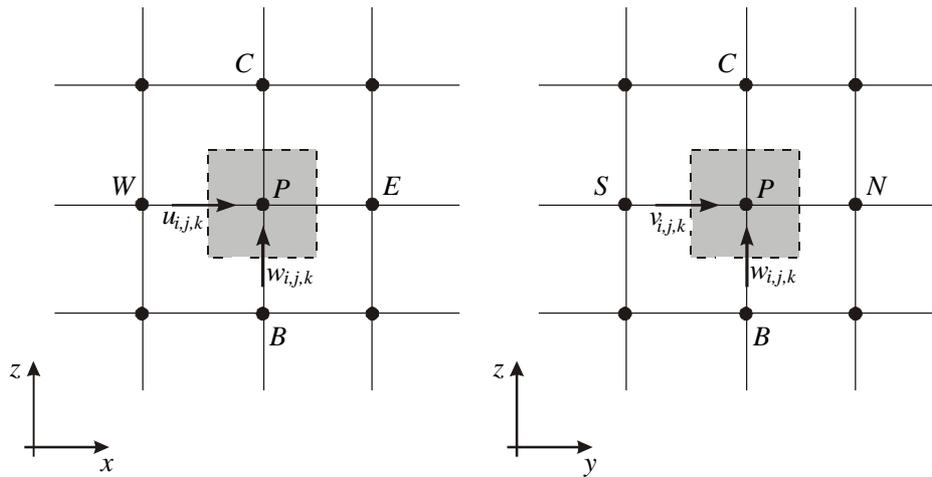


Figura 2. Representação esquemática de um volume de controle típico utilizado na discretização.

Devido a utilização de uma malha ortogonal na discretização, o relevo foi tratado através da utilização de regiões bloqueadas (Patankar, 1980), conforme indicado na fig. 3. A forma final das equações discretizadas para cada ponto pode ser escrita como:

$$a_P \mathbf{I}_P = a_E \mathbf{I}_E + a_W \mathbf{I}_W + a_N \mathbf{I}_N + a_S \mathbf{I}_S + a_C \mathbf{I}_C + a_B \mathbf{I}_B + b \quad (13)$$

onde  $a_P$ ,  $a_E$ ,  $a_W$ ,  $a_N$ ,  $a_S$ ,  $a_C$ ,  $a_B$ ,  $b$  são os coeficientes das equações lineares geradas, dados como:

$$\begin{aligned} a_E &= \frac{\Delta y \Delta z}{\mathbf{d}x_E} \\ a_W &= \frac{\Delta y \Delta z}{\mathbf{d}y_W} \\ a_N &= \frac{\Delta x \Delta z}{\mathbf{d}y_N} \\ a_S &= \frac{\Delta x \Delta z}{\mathbf{d}x_S} \\ a_C &= \left( \frac{\mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_2} \right)^2 \frac{\Delta x \Delta y}{\mathbf{d}x_C} \\ a_B &= \left( \frac{\mathbf{a}_1}{\mathbf{a}_2} \right)^2 \frac{\Delta x \Delta y}{\mathbf{d}x_B} \\ b &= 2\mathbf{a}_1^2 \left( \frac{u_{i+1,j,k}^0 - u_{i,j,k}^0}{\Delta x} + \frac{v_{i,j+1,k}^0 - v_{i,j,k}^0}{\Delta y} + \frac{w_{i,j,k+1}^0 - w_{i,j,k}^0}{\Delta z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (14)$$

onde  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  e  $\Delta z$  representam as dimensões do volume de controle nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.  $\delta x_E$ ,  $\delta x_W$ ,  $\delta x_N$ ,  $\delta x_S$ ,  $\delta x_C$  e  $\delta x_B$  representam as distâncias entre os pontos “P” e “E”, “P” e “W”, “P” e “N”, “P” e “S”, “P” e “C”, “P” e “B”, respectivamente.

O sistema linear de equações resultantes é resolvido utilizando o método SOR.

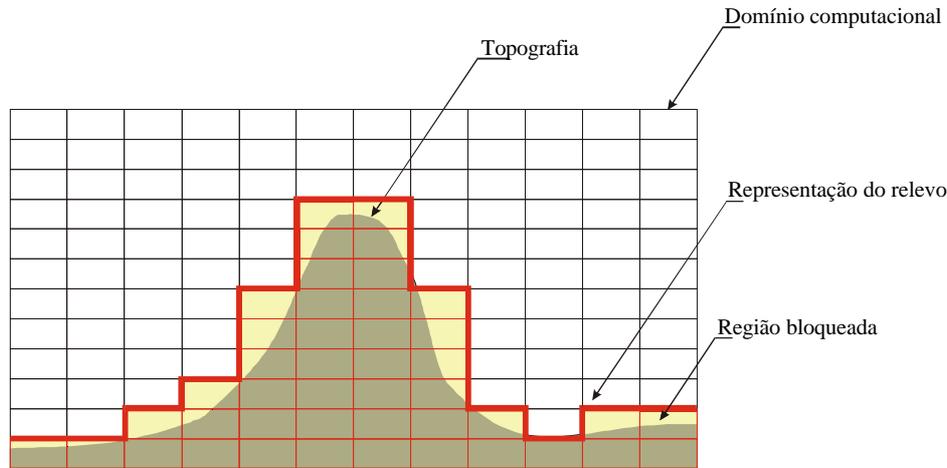


Figura 3. Representação do relevo utilizando a malha ortogonal.

#### 4. Resultados e análise da acurácia do método

Um dos maiores desafios para a utilização de modelos de diagnóstico de campo de ventos, baseados na conservação de massa, é a validação do modelo. Nesta seção pretende-se analisar a acurácia do modelo com base simulação de um problema de escala real e comparação dos dados obtidos com valores medidos. Assim, esta seção está dividida em 3 partes. A primeira parte descreve a região a ser estudada e os dados experimentais disponíveis a partir das estações meteorológicas. Na segunda parte utiliza-se os dados experimentais de relevo e meteorologia para simular o campo de ventos sobre a região. Finalmente, na terceira parte a capacidade de predição do modelo é avaliada

##### 4.1. Região da Grande Vitória

A Região da Grande Vitória – ES (RGV) é uma região metropolitana localizada aproximadamente na 20° S e 40° O, compreendendo as maiores 5 cidades do estado do Espírito Santo (Vitória, Vila Velha, Serra, Cariacica e Viana). A fig. 4 mostra o relevo da região simulada, utilizando coordenadas UTM [m], onde a mais alta elevação corresponde a aproximadamente 500 m. Outra característica importante da região é a proximidade com o mar, introduzindo maior complexidade ao problema (devido a presença de brisas marinhas). A região em estudo corresponde a uma área de 891 km<sup>2</sup> (27km × 33km). Existem 3 significativas elevações de relevo na região: (i) uma na região NO do domínio de estudo, que corresponde à região mais elevada e íngreme da topografia, (ii) outra região na fronteira O do domínio de estudo, (iii) e a região de menor elevação diretamente no centro da ilha de Vitória.

Os pontos azuis na fig.3 indicam o posicionamento das 4 estações meteorológicas da região. Estas funcionam continuamente, fornecendo médias horárias de módulo e direção dos ventos, desvio padrão da direção do vento, temperatura e insolação, que permitem caracterizar as condições de estabilidade atmosférica da região.

A determinação da malha utilizada para simular um problema é normalmente uma relação de compromisso entre tempo de execução e precisão do método numérico. Os modelos de diagnóstico de campo de ventos sobre regiões de relevo complexo normalmente são utilizados em regiões de grandes dimensões, porém as características de relevo normalmente necessitam malhas finas para representar adequadamente o relevo da região, requerendo um enorme esforço computacional para o processamento de múltiplos cenários. O número de pontos da malha utilizada neste trabalho foi determinado com base nas diretrizes dadas por Ratto (1996b). Assim, as simulações foram efetuadas com dimensões do domínio computacional utilizado de 27000 m × 33000 m × 1500 m ( $x \times y \times z$ ) e utilizando uma malha de 100 × 100 × 50.

##### 4.2. Campos de ventos obtidos

Com base nos dados horários de direção e intensidade de ventos foi simulado campo de ventos sobre a região e sua variação com o tempo. O processamento de cada campo de ventos para o período de 1 (uma) hora requer aproximadamente 20 minutos de CPU de um Pentium-III 800 MHz e ocupando cerca de 64 Mb de memória RAM.

As figs 5 e 6 apresentam os campos de ventos em 4 diferentes períodos do dia 08/08/2000, que representa um dia típico do ano (data selecionada aleatoriamente). Ambas as figuras apresentam os campos de ventos em planos

horizontais, uma a 40 m (fig. 5) e outra a 100 m acima do nível do mar (fig. 6). A escala de cores representa o módulo do vetor velocidade, e as regiões que não exibem vetores velocidades representam regiões no interior do relevo.

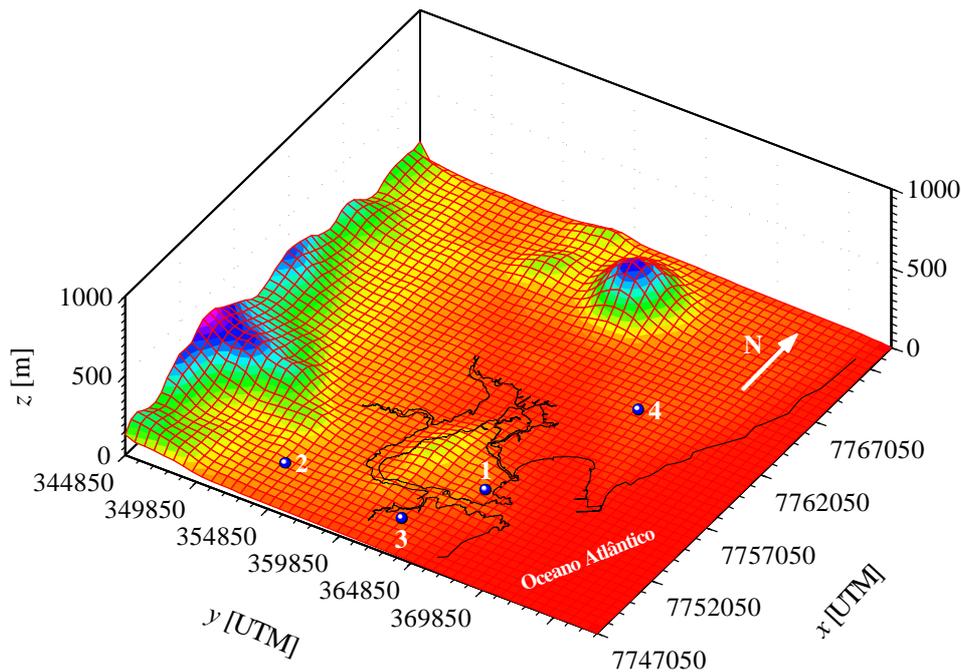


Figura 4. Relevo da Região da Grande Vitória (RGV). A eixo vertical esta representado em escala maior para acentuar as características de relevo.

É possível notar que o campo de ventos obtido para o período de 02:00 – 03:00 claramente mostra uma brisa marinha, que pode ser observada tanto fig. 5 ou fig. 6. Neste horário é possível notar que as estações medições indicando diferentes direções do vento, caracterizando um padrão de escoamento bastante complexo na região. Com o passar do tempo o vento predominante muda gradualmente de direção, tornando um vento NNE (predominante na região). O campo de ventos obtido para o período de 08:00 – 09:00 ainda exibe um padrão bastante complexo, devido as diferentes direções do vento observadas pelas estações, porém o escoamento já exibe uma notada direção predominante. Ocorre também uma significativa variação nos níveis de velocidade do vento. Os cenários obtidos para os períodos de 14:00 – 15:00 e 20:00 – 21:00 exibem velocidades significativamente mais elevadas. É importante observar que nas regiões a jusante das elevações de relevo apresentam velocidades do vento significativamente mais baixa

#### 4.3. Análise da acurácia do modelo

Análises de acurácia de modelos de diagnostico de campo de ventos são normalmente efetuadas excluindo-se dados de algumas estações meteorológicas dos dados de entrada para o modelo e verificando se o campo de vento resultante consegue reproduzir de maneira adequada o escoamento na região. Assim, esta avaliação será efetuada desconsiderando os dados de uma estação como entrada para o modelo. Então, os cenários apresentados na seção anterior serão novamente simulados e novos campos de vento serão obtidos. A acurácia do modelo será avaliada com base na diferença entre o valor de velocidade obtido pelo modelo e o valor de velocidade observado no ponto da estação omitida.

A fig. 7 mostra os resultados obtidos por este procedimento para todas as estações. A fig. 7a apresenta os resultados para direção do vento no ponto da estação omitida, enquanto a fig. 7b apresenta os resultado para o módulo da velocidade do vento no ponto da estação obtida. A abcissa dos gráficos apresentados nas figs. 7a e 7b apresenta os valores obtidos pelo modelo e a ordenada apresenta os valores observados pelas estações. Idealmente, os valores deveriam ser semelhantes, todavia, a inacurácia na representação do modelo causa desvios. Valores entre as duas linhas verdes no gráfico 7a apresentam um erro menor que 25°. É possível notar que a maioria dos valores obtidos encontra-se nesta faixa, porém alguns dados apresentam desvio superior a 25°. Estes dados estão relacionados à simulação do período de 02:00 – 03:00, onde as estações exibem direções significativamente diferentes. Assim, a exclusão de uma estação reduz consideravelmente a capacidade do modelo de reproduzir o complexo padrão de escoamento obtido neste período. É importante notar que a omissão da estação 1 não implica em considerável perda de acurácia. isto se deve à posição central desta estação em relação às outras. Os maiores desvios são observados para a estação 2, provavelmente devido a seu posicionamento nas proximidades de uma elevação, que a torna importante para caracterizar o escoamento nesta região.

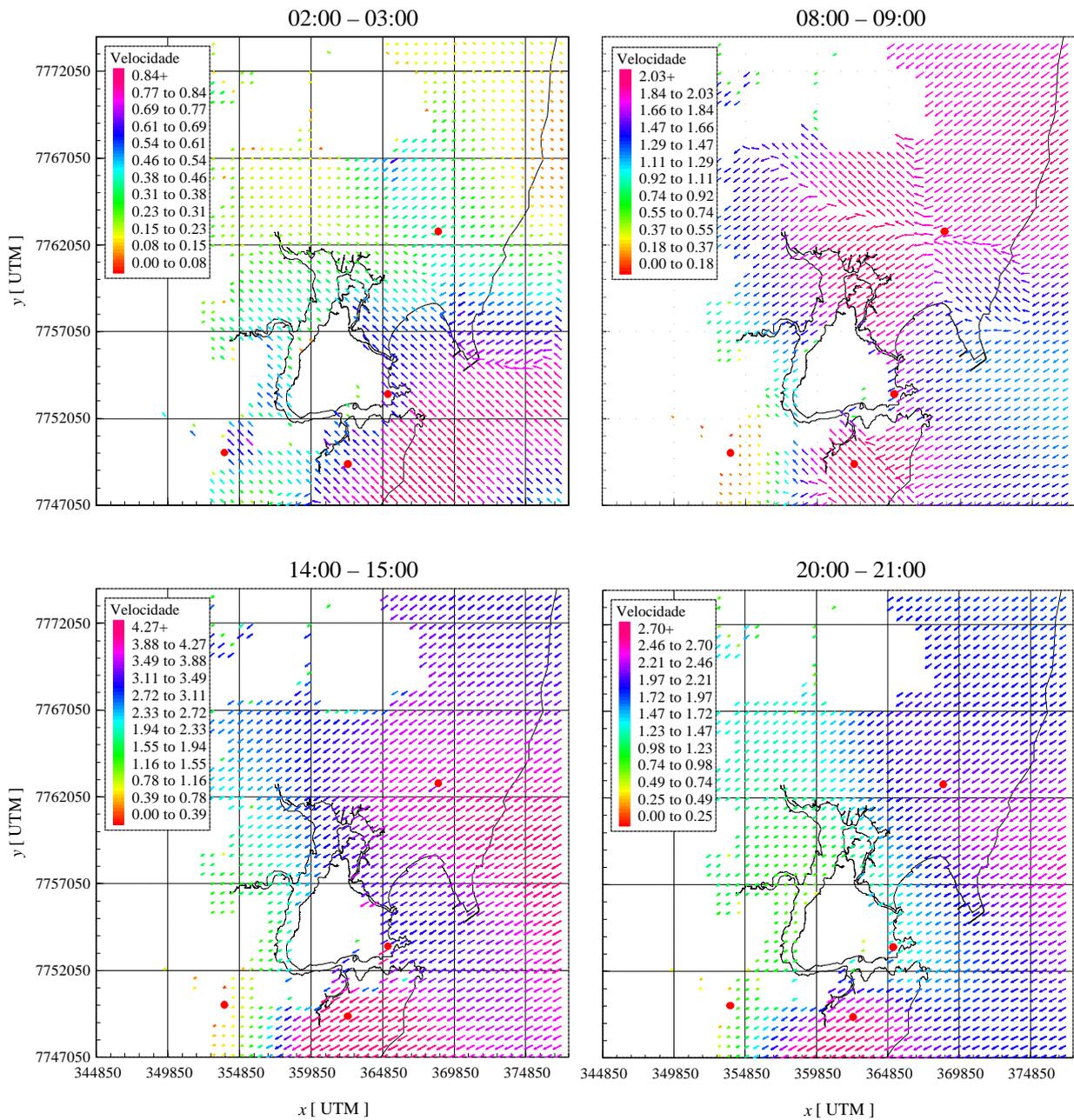


Figura 5. Campos de ventos em um plano horizontal a 40 m acima do nível do mar, em 4 diferentes períodos do dia 08/08/2000.

Uma tendência semelhante pode ser observada na fig. 7b, onde os maiores desvios são observados na posição da estação 2. Nesta figura as linhas verdes representam um afastamento de 1m/s em relação ao valor observado. De uma maneira geral, os dados de direção de vento apresentam desvio médio de 26° em relação aos valores observados, enquanto os valores de velocidade apresentam um desvio médio de 0.84 m/s em relação aos valores observados. Estes valores são relativamente baixos quando comparados a velocidades do vento da ordem de 2 a 5 m/s, todavia, para valores de velocidade na faixa de 0 a 1 m/s estes desvios representam valores consideráveis de erro percentual. Estudos de acurácia citados por Ratto (1996a) mostram que os desvios médios obtidos com o uso de modelos de diagnóstico baseados na conservação de massa estão entre 2 e 4 m/s. O modelo apresentado aqui apresenta valores bem inferiores a estes.

Apesar dos resultados relativamente satisfatórios obtidos pelo modelo, é importante enfatizar que a redução do número de estações utilizadas reduz consideravelmente a capacidade de predição do modelo. Especialmente em regiões próximas ao mar como a região em estudo. Devido às hipóteses básicas utilizadas na elaboração do modelo, os fenômenos térmicos e aqueles relacionados à transferência de quantidade de movimento não são representados. Assim, os dados das estações meteorológicas são bastante importantes para incluir tais informações.

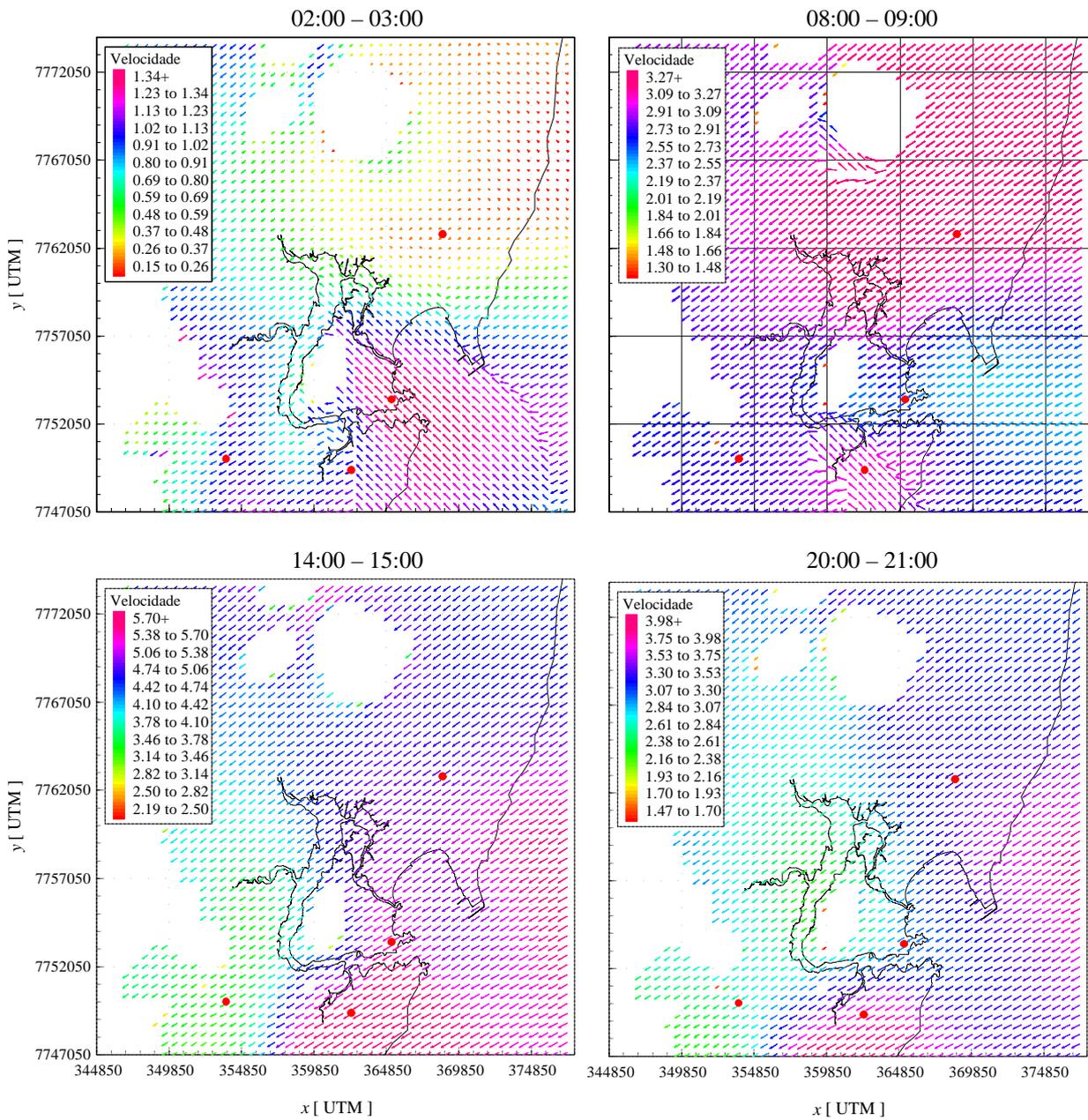


Figura 6. Campos de ventos em um plano horizontal a 100 m acima do nível do mar, em 4 diferentes períodos do dia 08/08/2000.

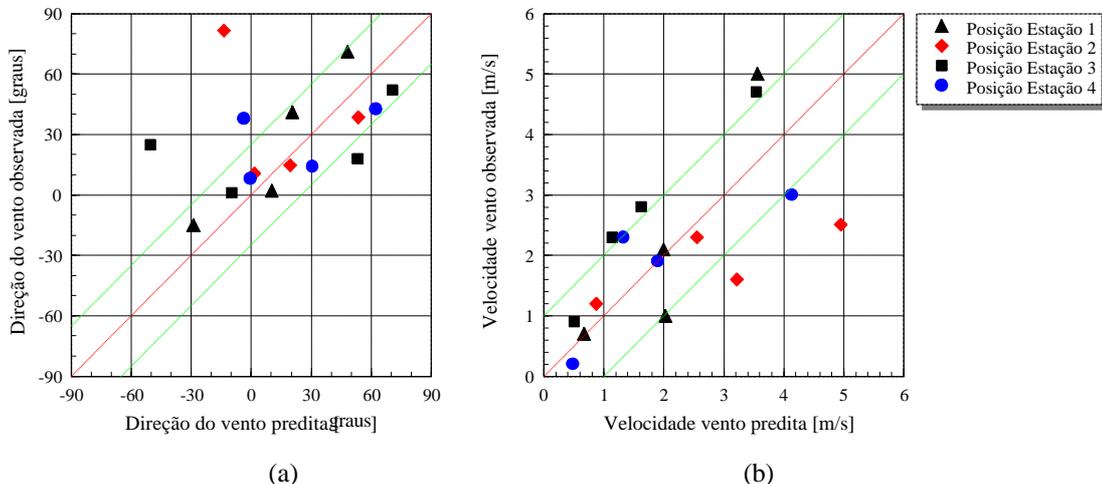


Figura 7. Resultados do teste de acurácia do modelo, para (a) direção do vento e (b) velocidade do vento.

## 5. Conclusões

Um estudo do campo de ventos sobre uma região de topografia complexa foi apresentado. A modelagem matemática baseia-se no princípio de conservação de massa. A avaliação da qualidade das previsões efetuadas pelo modelo revelou bons resultados. Todavia mostrou que a redução do número de estações utilizadas como entrada pelo modelo restringe de maneira significativa a capacidade de simular escoamentos com padrões mais complexos. Especificamente para a RGV, é aconselhável incluir um maior número de estações meteorológicas no estudo, principalmente devido às interações com a brisa marinha. Sob o ponto de vista do desenvolvimento do algoritmo de simulação é aconselhável o estudo de técnicas avançadas de determinação do campo de ventos inicial, como a técnica proposta por Jiang et al. (2001), visto que este influencia fortemente o resultados final obtido. É também desejável a utilização de técnicas de processamento paralelo devido ao elevado esforço computacional requerido para simular múltiplos cenários. Trabalhos futuros podem incluir a utilização de malhas não-estruturadas para tornar a aumentar a precisão da representação do relevo nas simulações.

## 6. Agradecimentos

Os autores gentilmente agradecem a ECOSOFT por fornecer os dados de relevo da Região da Grande Vitória e a SEAMA (secretária Estadual de Meio Ambiente – ES) por fornecerem os dados meteorológicos para realização deste trabalho.

## 7. Referências

- Carruthers, D. J., Hunt, J. C. R., Britter, R. E., Perkins, R. J., Linden, P. F., Dalziel, S., 'Fast models on small computers of turbulent flows in the environment for non-expert users', em: *Computer Modelling in Environmental Sciences*, Clarendon Press, 1991.
- Dunkerley, F., 'Wind flow over complex terrain', PhD. Thesis, University of Manchester Institute of Science and Technology, 1998.
- Hunt, J. C. R., Leibovich, S., 'Turbulent shear flow over low hills', *Q. J. Royal Meteor. Society*, 114, pp. 1435-1470, 1988a.
- Hunt, J. C. R., Richards, K. J., Brighton, P. W. M., 'Stably stratified shear flow over low hills', *Q. J. Royal Meteor. Society*, 114, pp. 859-886, 1988b.
- Ratto, C.F., 1996b, "An overview of mass-consistent models", In "Modelling Atmospheric Flow Fields", Ed. by C.F. Ratto & D.P. Lalas, World Scientific Publishing, pp. 379-401.
- Ratto, C.F., 1996, "The AIOLOS e WINDS codes", In "Modelling Atmospheric Flow Fields", Ed. by C.F. Ratto & D. P. Lalas, World Scientific Publishing, pp. 421-433.
- Pennel, W.T., 1883, "An evaluation of the role of numerical wind field models in turbine siting", Technical Report, Battelle Memorial Institute, Pacific Northwest Lab., Washington, USA.
- Patankar, V. S., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- Montero, G., Montenegro, R., Escobar, J. M., 1998, "A 3-D diagnostic model for wind field adjustment", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, pp. 249-261.
- Montero, G., Sanín, N., 2001, "3-D modelling of wind field adjustment using finite differences in a terrain conformal coordinate system", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89, pp.471-488.
- Jiang, D., Liu, H., Wang, W., 2001, "Test a modified surface wind interpolation scheme for complex terrain in a stable atmosphere", *Atmospheric Environment*, 35, pp. 4877-4885.
- Sherman, C.A., 1978, "A mass-consistent model for wind fields over complex terrain", *J. Appl. Meteorol.*, 17, pp. 312-319.
- Stern, A.C., Boudel, R.W. Turner, D.B., Fox, D.L., 1984, "Fundamentals of Air Pollution", Academic Press, 2a. Ed..
- Sasaki, Y., 1958, "An objective analysis based on variational method", *J. Meteorol. Soc. Japan*, 36, pp. 77-88.
- Sasaki, Y., 1970, "Some basic formalism in numerical variational analysis", *Mon. Weather Rev.*, 98, pp. 77-88.

## TRIDIMENSIONAL WIND FIELD RECONSTRUCTION ON REGIONS WITH COMPLEX TOPOGRAPHY

Neyval C. Reis Jr.

**Departamento de Informática, CT – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES**  
[neyval@inf.ufes.br](mailto:neyval@inf.ufes.br)

Alexsander Barros Silveira

**Departamento de Informática, CT – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES**  
[alexandersil@bol.com.br](mailto:alexandersil@bol.com.br)

Jane Meri Santos

**Departamento de Hidráulica e Saneamento, CT – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES**  
[janemeri@npd.ufes.br](mailto:janemeri@npd.ufes.br)

Julio T. A. Chacaltana

**Departamento de Hidráulica e Saneamento, CT – UFES, Av. Fernando Ferrari, s/n, 29.060-970 – Vitória – ES**  
[juliotac@npd.ufes.br](mailto:juliotac@npd.ufes.br)

**Abstract.** *Wind field estimates over a region can be performed by using numerical interpolation of measured data from meteorological stations. However, the topography can increase considerably the complexity of the wind flow in a region, creating major difficulties for the use of conventional interpolation techniques. This work presents a implementation of an algorithm to determine the wind field over urban regions with moderately complex terrain, based on the mass conservation principle. The algorithm is developed using the finite volume technique. The model is tested on a full-scale problem, The Region of Great Vitória - ES (Brazil), where the wind field and its hourly variation are analysed.*

*Keywords: wind field, complex terrain, finite volume technique.*