

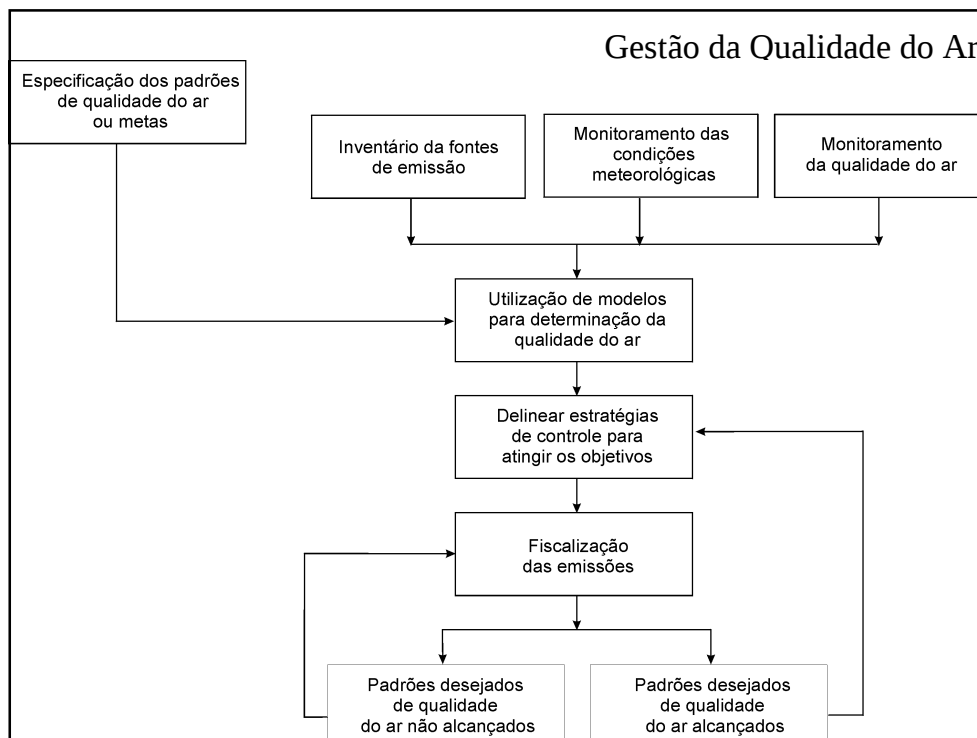
Modelagem Matemática da Dispersão Atmosférica de Contaminantes

Modelagem Matemática da Dispersão Atmosférica de Contaminantes

- Objetivos do uso de modelos de dispersão atmosférica
- Principais abordagens ao estudo de dispersão de poluentes na atmosfera

Objetivos do uso de modelos de dispersão atmosférica

- Avaliação da eficiência de técnicas e estratégias propostas para o controle das emissões
- Estudo dos impactos ambientais (EIA) para um novo empreendimento
- Determinação de responsabilidades frente aos níveis atuais de poluição
- Planejamento da ocupação territorial urbana

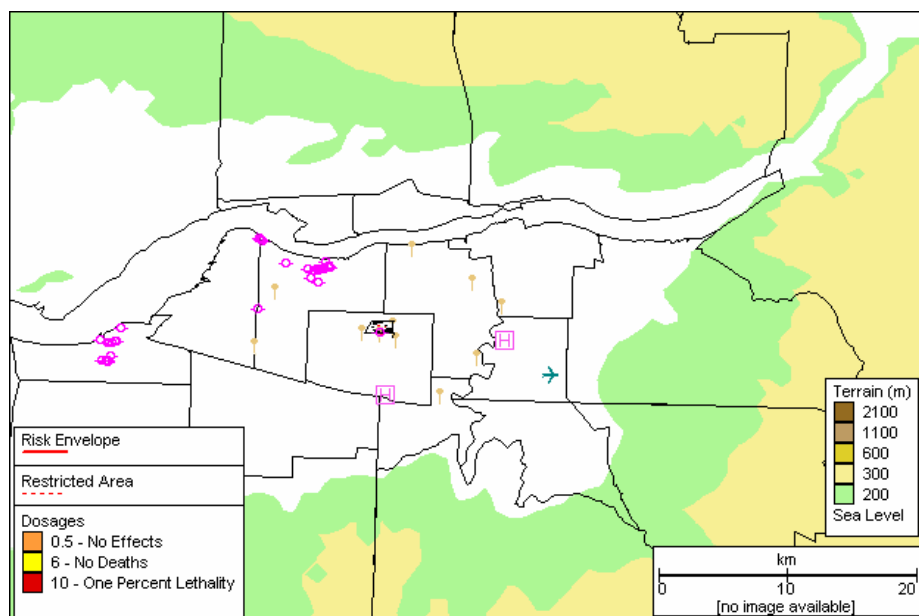


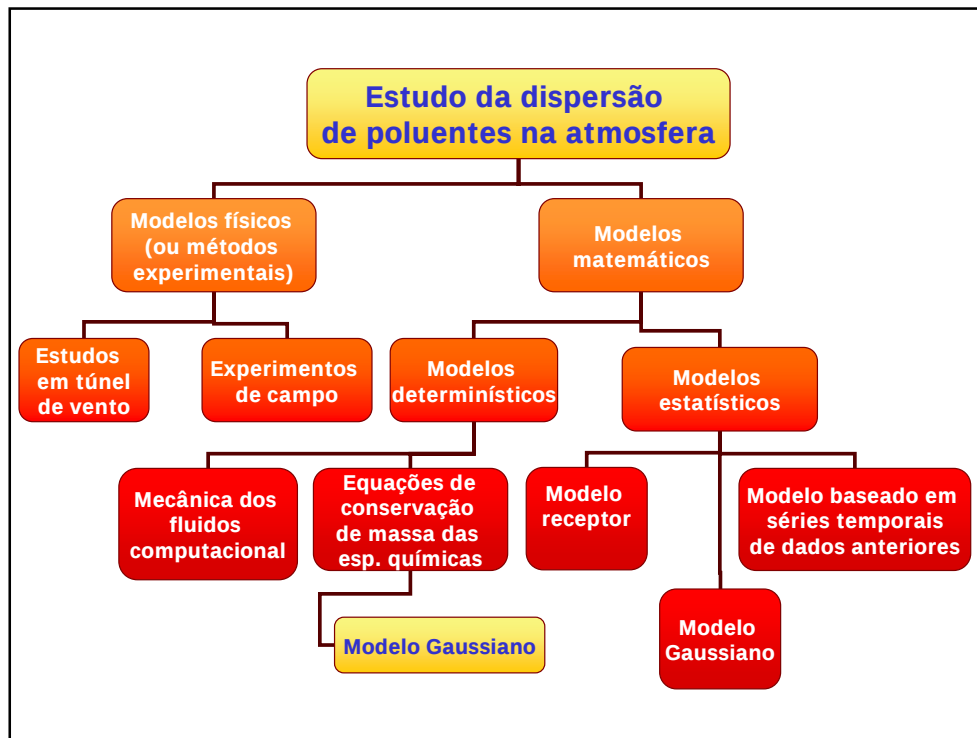
Estudo dos impactos ambientais e Avaliação da Qualidade do Ar

Normalmente está relacionada a 2 etapas:

- Etapa 1: Empregar modelos de avaliação simplificados para se ter uma rápida estimativa se: (1) a fonte de emissão certamente causará um problema de poluição do ar ou (2) a fonte têm o potencial de causar um problema de qualidade do ar.
- Etapa 2: Se os resultados da avaliação simplificada revelarem que existem um potencial problema, métodos mais avançados de avaliação devem ser utilizados (como modelos mais avançados e maior atenção aos dados de entrada).

Exemplo

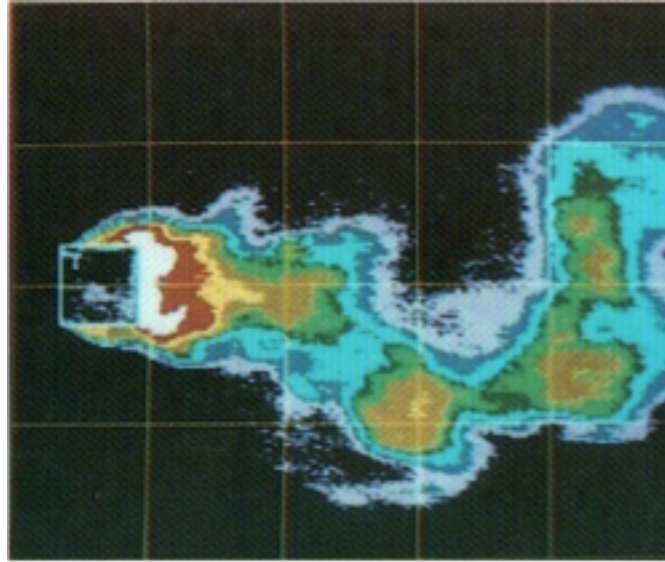




Modelos Gaussianos

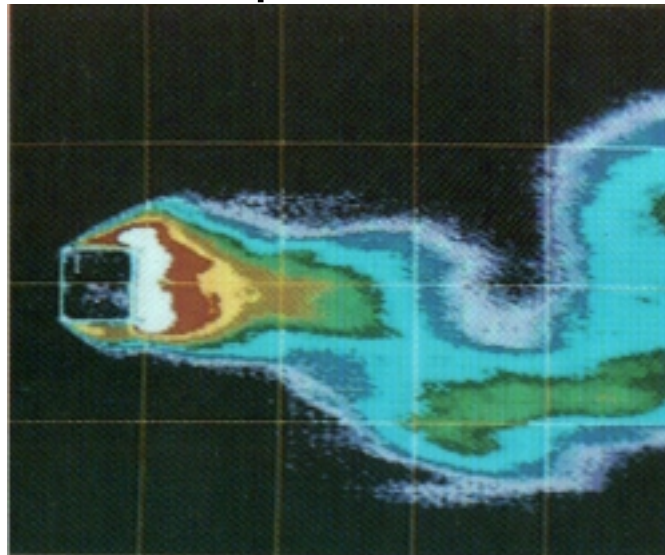
- Popularizaram-se na década de 70.
- Empregados atualmente pela maioria dos órgãos reguladores para estudo de dispersão atmosférica (inclusive a EPA)
- Hipótese de turbulência homogênea e estacionária, fluxo de emissão constante, contaminante quimicamente estável e topografia constante.

Média no tempo



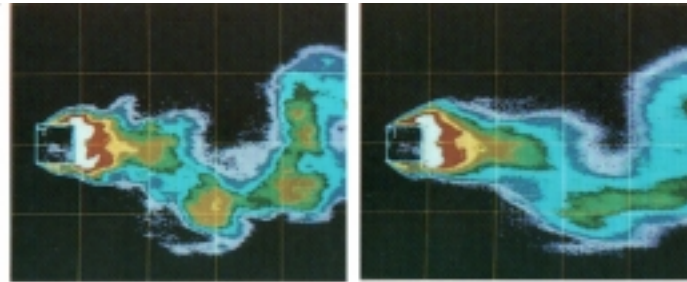
(a) 1 Frames, 0.03 sec.

Média no tempo



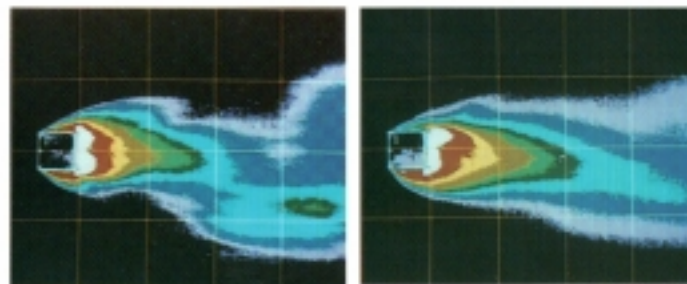
(b) 4 Frames, 0.13 sec.

Média no tempo



(a) 1 Frames, 0.03 sec.

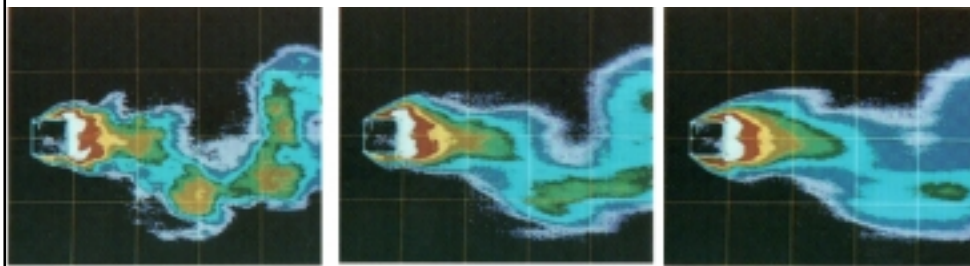
(b) 4 Frames, 0.13 sec.



(c) 8 Frames, 0.27 sec.

(d) 30 Frames, 1.0 sec.

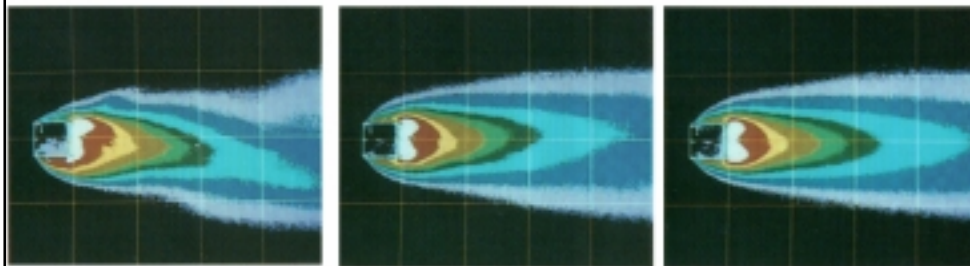
Média no tempo



(a) 1 Frames, 0.03 sec.

(b) 4 Frames, 0.13 sec.

(c) 8 Frames, 0.27 sec.

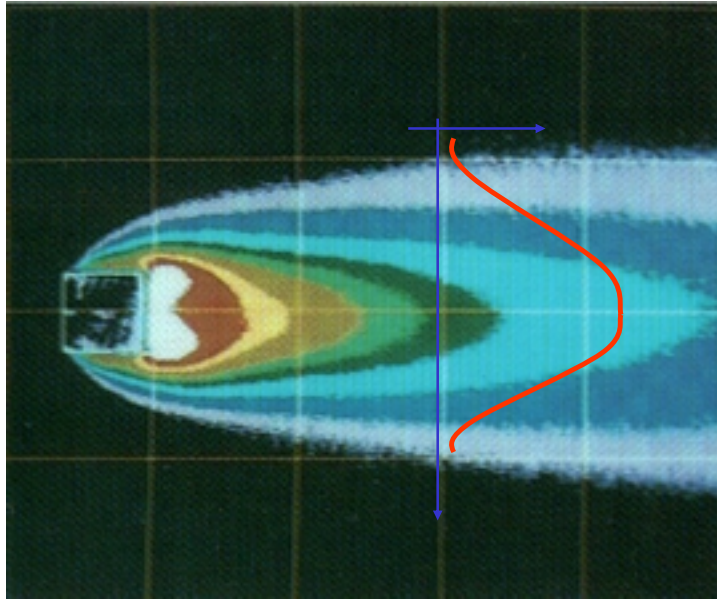


(d) 30 Frames, 1.0 sec.

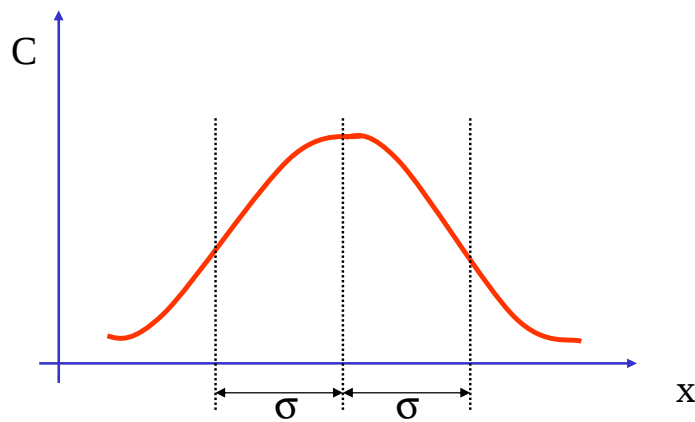
(e) 120 Frames, 4.0 sec.

(f) 450 Frames, 15.0 sec.

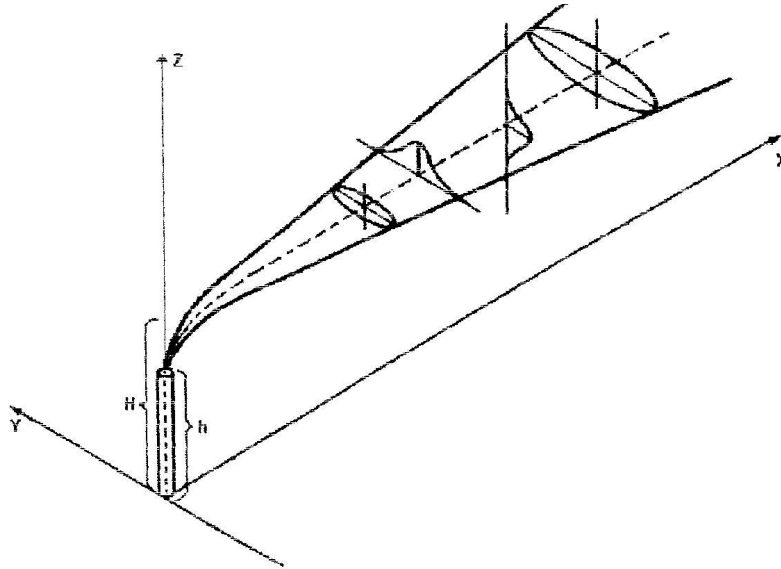
Média no tempo



Distribuição Gaussiana



Modelos Gaussianos



Formulação

$$C(x, y, z) = \frac{Qs}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \cdot \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

x, y, z - são as coordenadas cartesianas ou espaciais do ponto onde se deseja estimar a concentração do contaminante [m]

$C(x,y,z)$ - é a concentração esperada do contaminante na coordenada (x,y,z) [g/m³]

Qs - é a quantidade de contaminante lançada pela fonte de emissão [g/s]

H - é a altura efetiva de lançamento

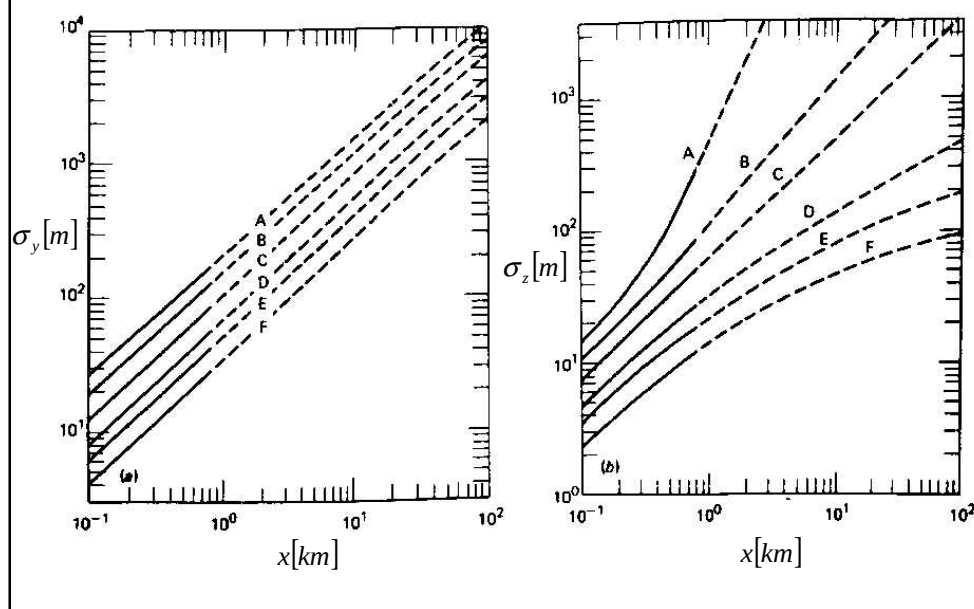
u - é a velocidade média do vento na direção do escoamento (x) e medida no topo da chaminé [m/s]

σ_y e σ_z - são os desvios médios da distribuição de concentração nas direções y e z [m]

Parâmetros para dispersão em ambientes urbanos (distâncias de 100 a 10000 m) Formulação de Briggs		
Classe de Pasquill	$\sigma_y [m]$	$\sigma_z [m]$
A-B	$0.32x (1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.24x (1 + 0.001x)^{0.5}$
C	$0.22x (1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.20x$
D	$0.16x (1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.14x (1 + 0.0003x)^{-0.5}$
E-F	$0.11x (1 + 0.0004x)^{-0.5}$	$0.08x (1 + 0.0015x)^{-0.5}$

Parâmetros para dispersão em ambientes rurais (distâncias de 100 a 10000 m) Formulação de Briggs		
Classe de Pasquill	$\sigma_y [m]$	$\sigma_z [m]$
A	$0.22x (1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.20 x$
B	$0.16x (1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.12 x$
C	$0.11x (1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.08 x (1 + 0.0002x)^{-0.5}$
D	$0.08x (1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.06 x (1 + 0.0015x)^{-0.5}$
E	$0.06x (1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.03 x (1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x (1 + 0.0001x)^{-0.5}$	$0.016 x (1 + 0.0003x)^{-1}$

Variação de σ_y e σ_z com a distância x [km]



Classes de estabilidade de Pasquill

Velocidade do vento a 10 m do solo (m/s)	Radiação solar (I) (W/m ²)			Cobertura noturna de nuvens (cn)	
	I > 700	350 ≤ I ≤ 700	I < 350	cn ≥ 4/8	cn ≤ 3/8
< 2	A	A – B	B	—	—
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D
Onde:	A: extremamente instável		D: neutra		
	B: moderadamente instável		E: fracamente estável		
	C: fracamente instável		F: moderadamente estável		

Velocidade do vento na altura do topo da chaminé

$$u = u_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0} \right)^e$$

h - altura da chaminé [m]

h_0 - altura de medição da velocidade do vento (usualmente 10m) [m]

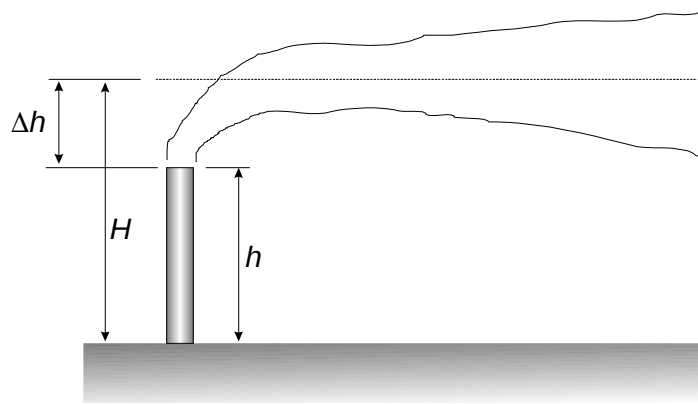
e - expoente empírico cujo valor depende a estabilidade atmosférica (tabela abaixo)

u_0 - velocidade média do vento medida na altura h_0 [m/s]

u - velocidade média do vento no topo da chaminé [m/s]

Classe de Estabilidade	Constante empírica, e
A	0,10
B	0,15
C	0,20
D	0,25
E	0,30
F	0,35

Altura efetiva de lançamento



$$H = h + \Delta h$$

Altura efetiva de lançamento

$$\Delta h = d \cdot \left(\frac{V_s}{\bar{u}} \right)^{1.4} \cdot \left[1 + \left(\frac{T_s - T_{ar}}{T_s} \right) \right]$$

Δh - variação da altura de lançamento, baseada na quantidade de movimento da emissão e do empuxo térmico [m]

d - diâmetro da chaminé [m]

V_s - velocidade de saída dos gases no topo da chaminé [m/s]

$\bar{u}$ - velocidade média do vento na direção do escoamento (x) e medida no topo da chaminé [m/s]

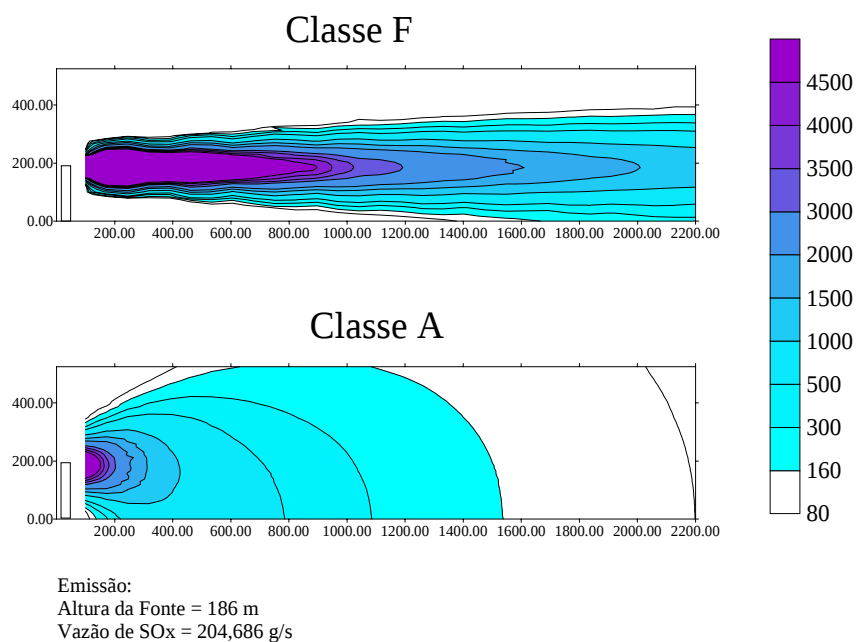
T_s - temperatura dos gases na saída da chaminé [K]

T_{ar} - temperatura do ar atmosférico nas imediações da chaminé [K]

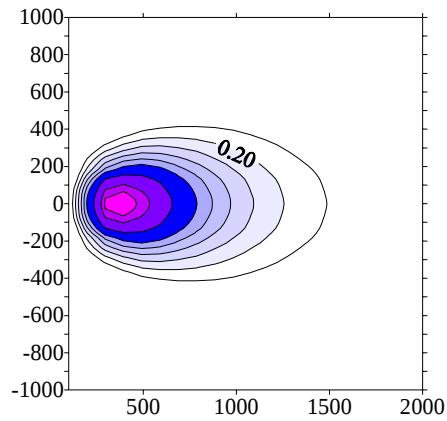
Algoritmo para o uso do modelo Gaussiano

- 1 - Determinar as coordenadas cartesianas do ponto onde se deseja descobrir a concentração do contaminante
- 2 - Verificar qual a classe de estabilidade atmosférica, baseando-se nas condições meteorológicas
- 3 - Calcular a velocidade do vento na altura do topo da chaminé
- 4 - Calcular a altura efetiva de lançamento
- 5 - Determinar o valor dos parâmetros σ_y e σ_z
- 6 - Calcular a concentração de contaminante no ponto de interesse

Comparação entre as classes de estabilidade



Concentração ao nível do solo (Classe de estabilidade A)

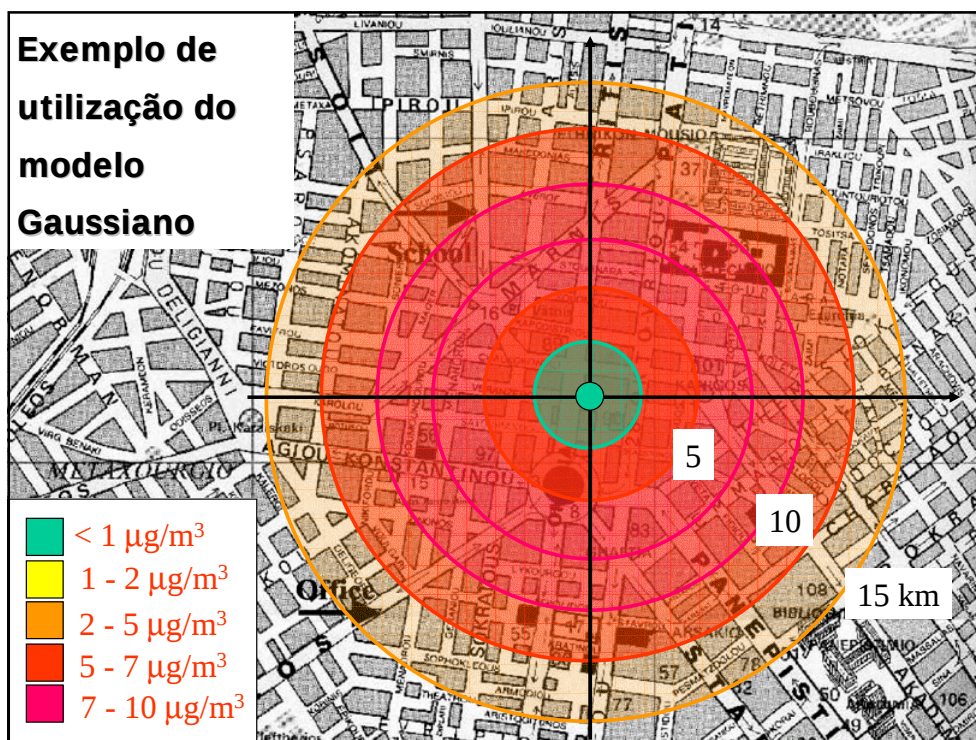
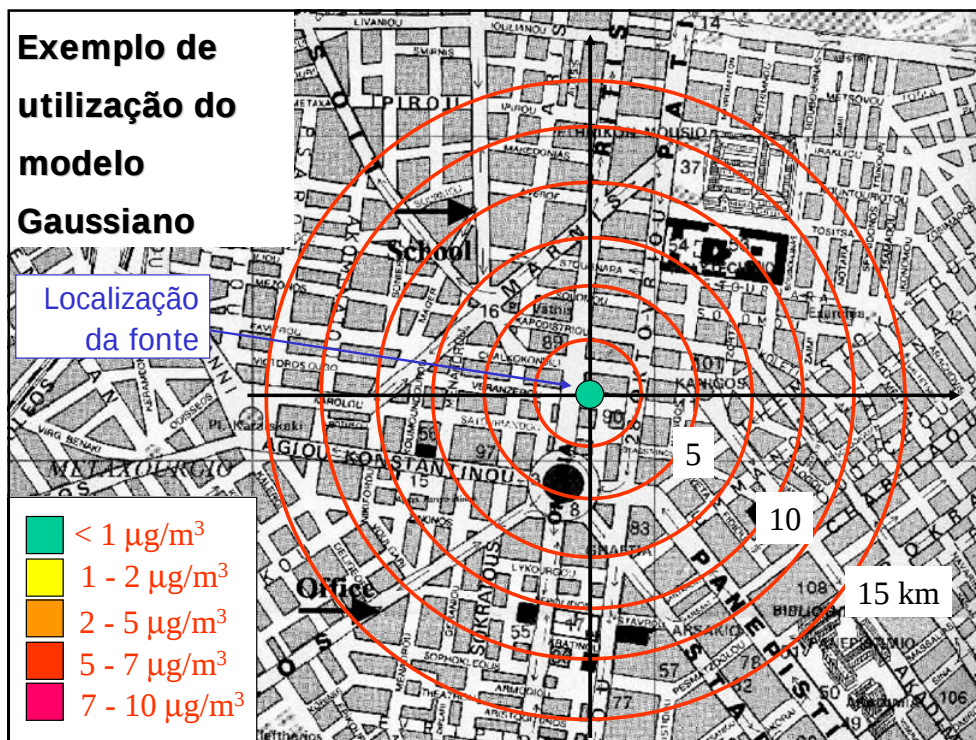


Altura de emissão 186 m
Vazão de SOx = 204,686 g/s

Exemplo de utilização do modelo Gaussiano

- Planilha Excel





Limitações do modelo Gaussiano

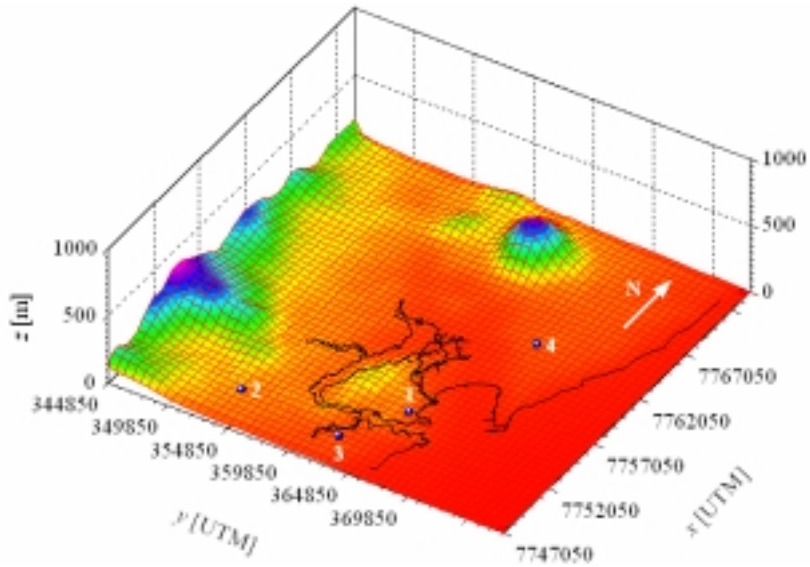
- Não incorpora efeitos da mudança de direção e intensidade do vento
- Baseia-se em parâmetros empíricos que podem variar bastante conforme as características da região (por exemplo: topografia, rugosidade, proximidade do mar, etc)
- Considera a taxa de emissão de contaminante e a direção do vento constantes com o tempo.

Limitações do modelo Gaussiano

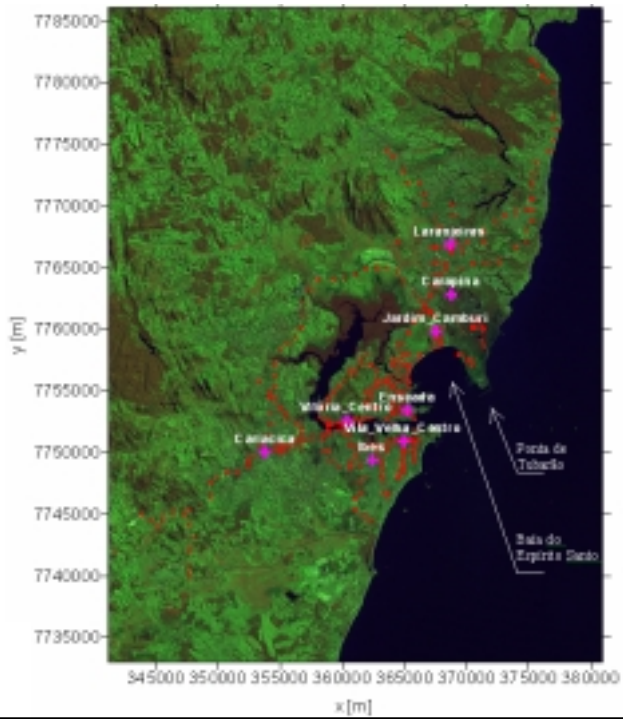
- Não incorpora efeitos da mudança de direção e intensidade do vento
- Baseia-se em parâmetros empíricos que podem variar bastante conforme as características da região (por exemplo: topografia, rugosidade, proximidade do mar, etc)
- Considera a taxa de emissão de contaminante e a direção do vento constantes com o tempo.

Muitos trabalhos científicos têm sido realizados para suprir estas deficiências. Por exemplo, a incorporação do efeito do relevo para estudos em regiões de relevo moderadamente complexo.

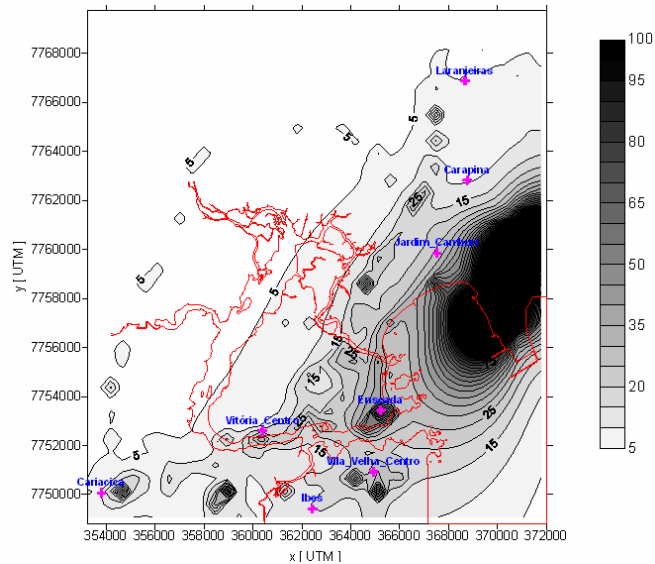
Região da Grande Vitória



Região da
Grande
Vitória

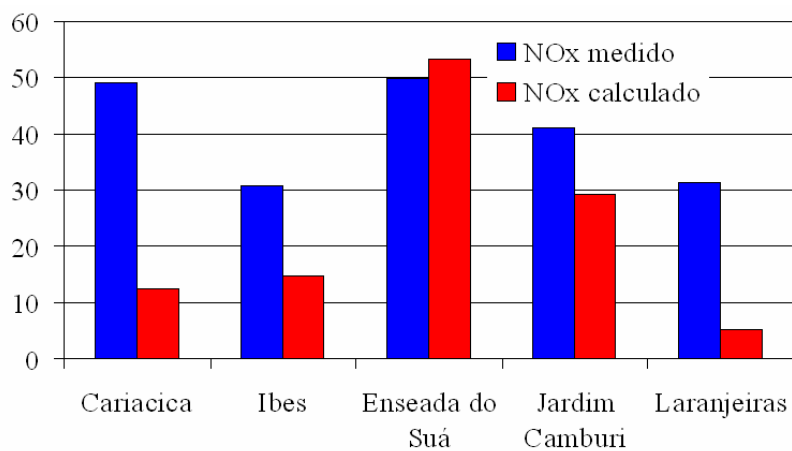


Concentração de NOx obtida pelo modelo Gausseano



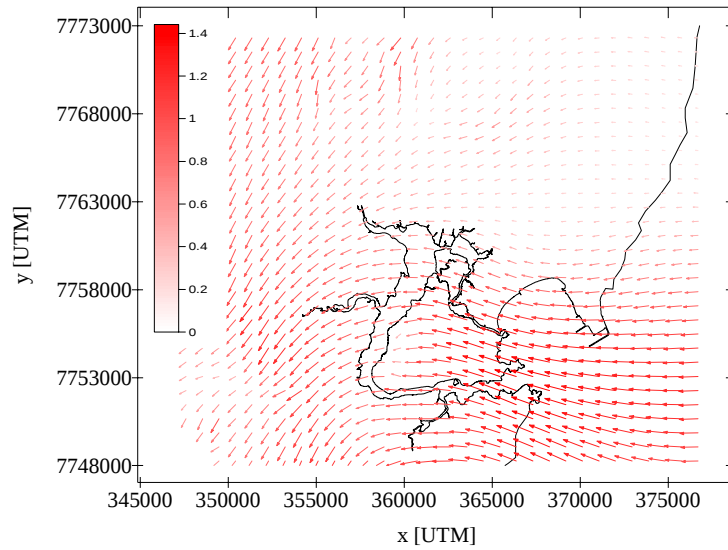
(Entringer et al., 2001)

Concentração de NOx obtida pelo modelo Gausseano

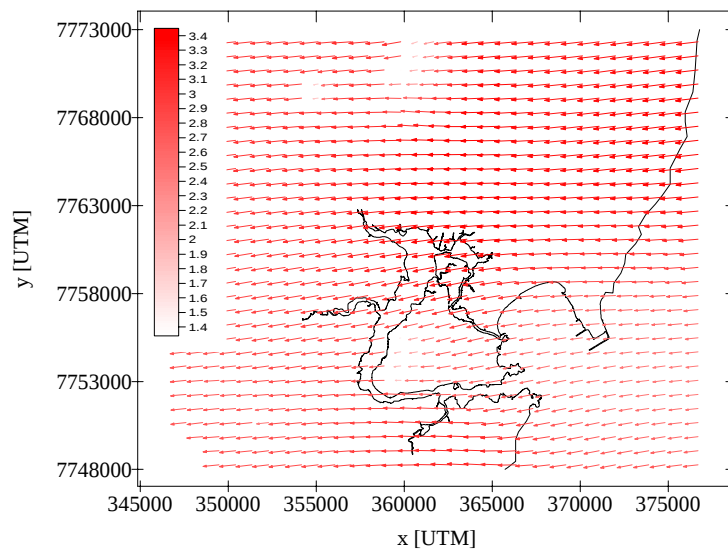


(Entringer et al., 2001)

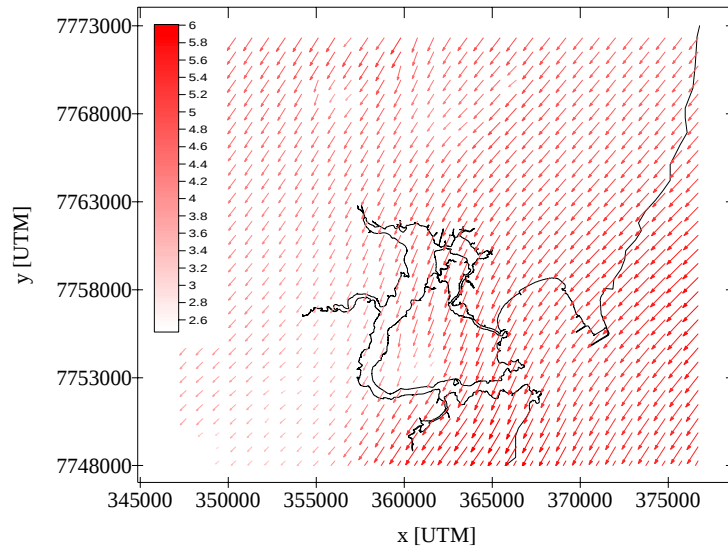
Campo de Ventos sobre a Região da Grande Vitória
em um dia típico de Verão (02:00 hs)



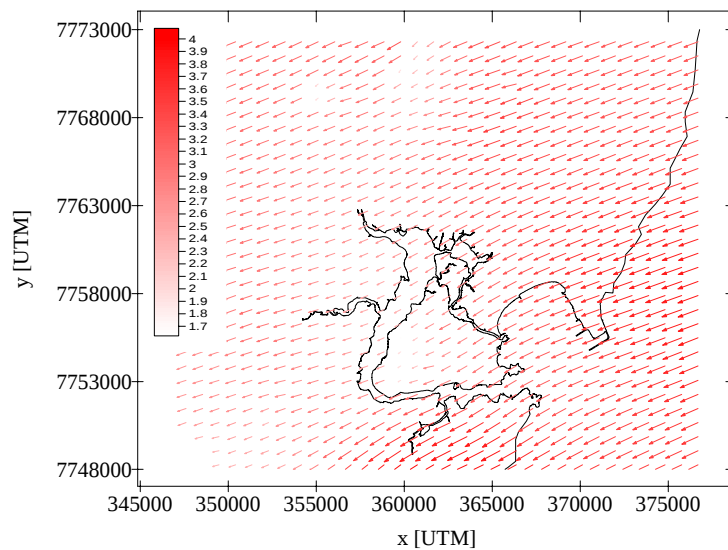
Campo de Ventos sobre a Região da Grande Vitória
em um dia típico de Verão (08:00 hs)



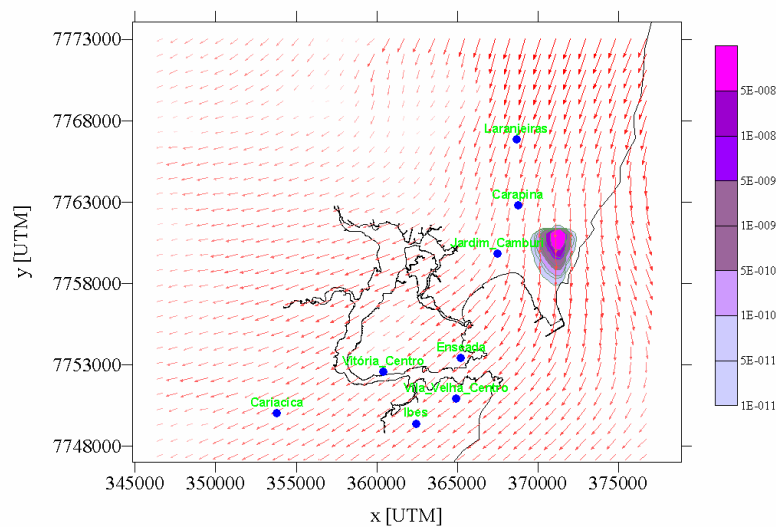
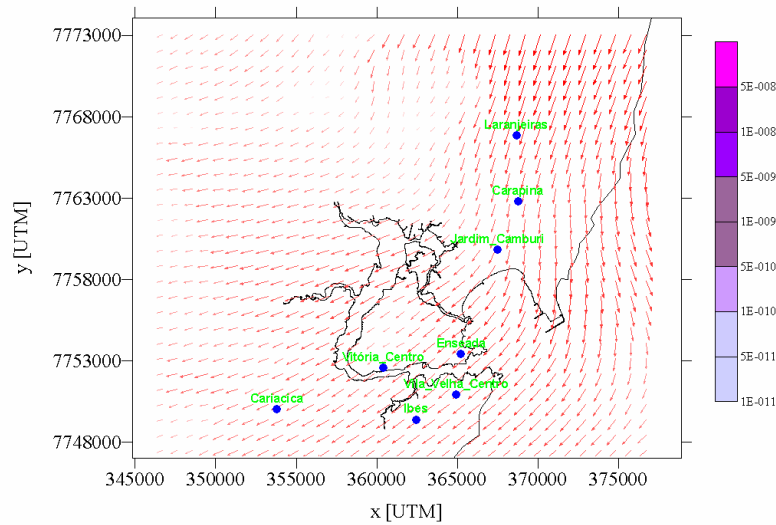
Campo de Ventos sobre a Região da Grande Vitória em um dia típico de Verão (14:00 hs)

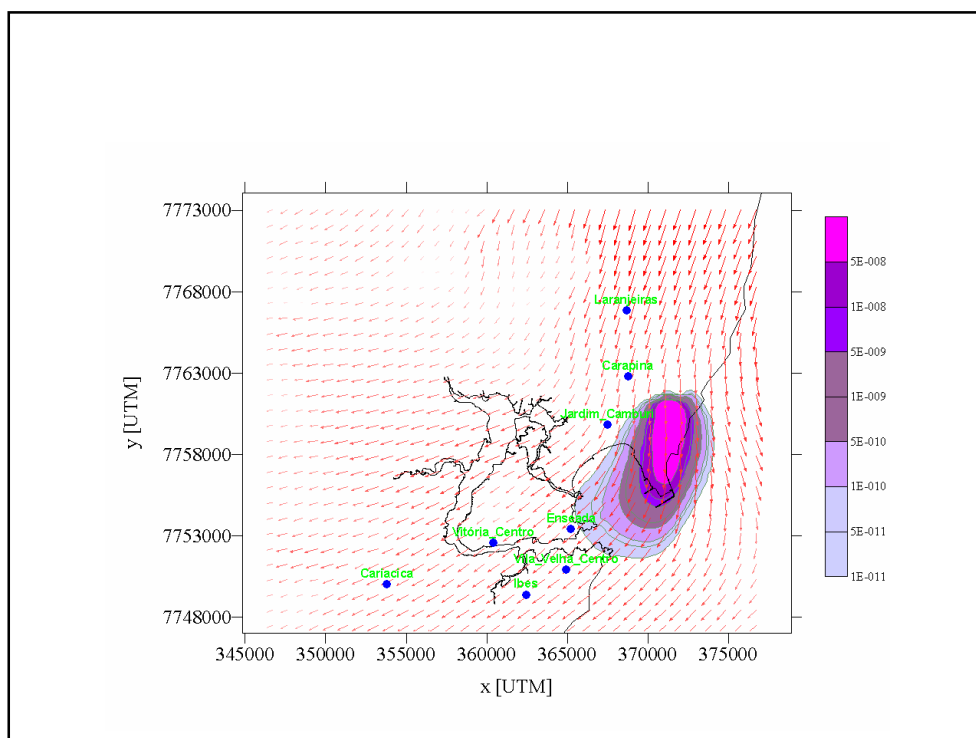
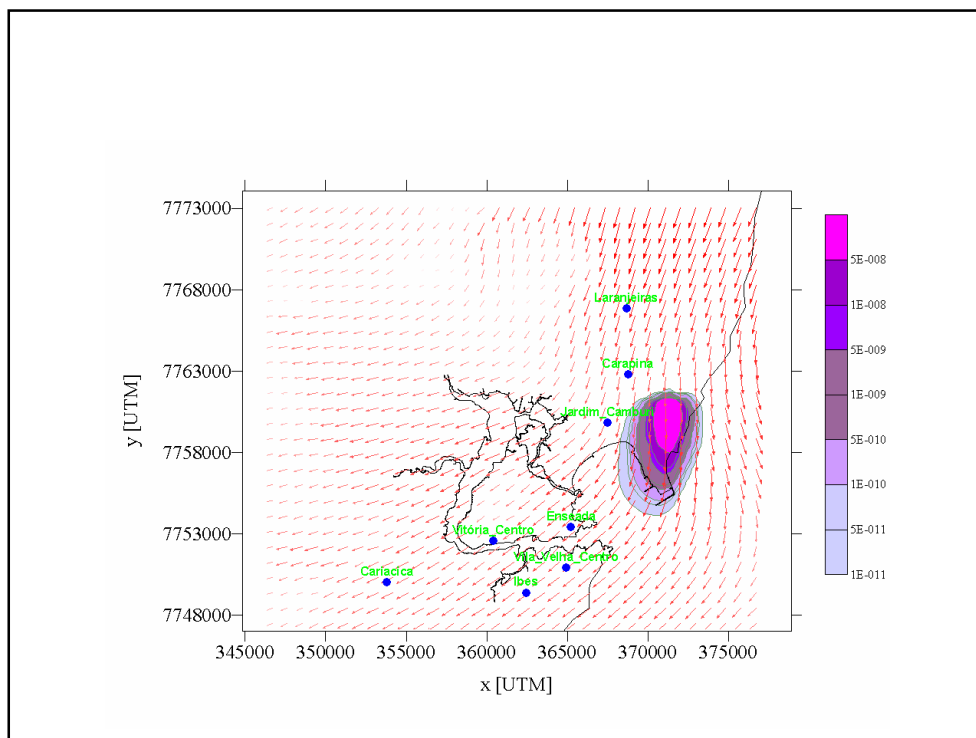


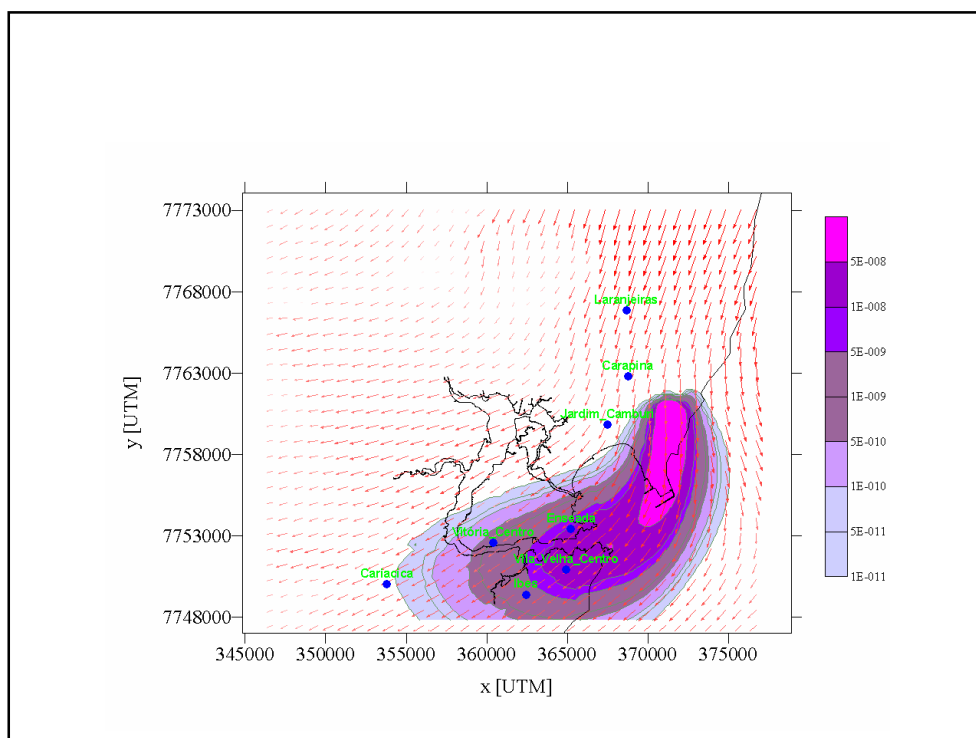
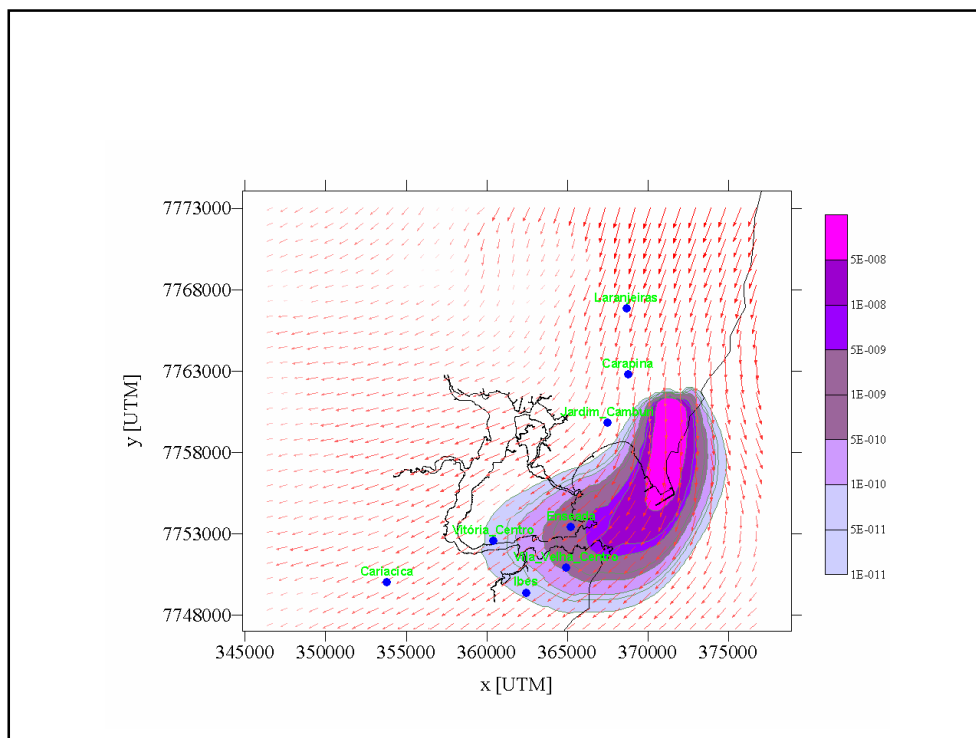
Campo de Ventos sobre a Região da Grande Vitória em um dia típico de Verão (20:00 hs)

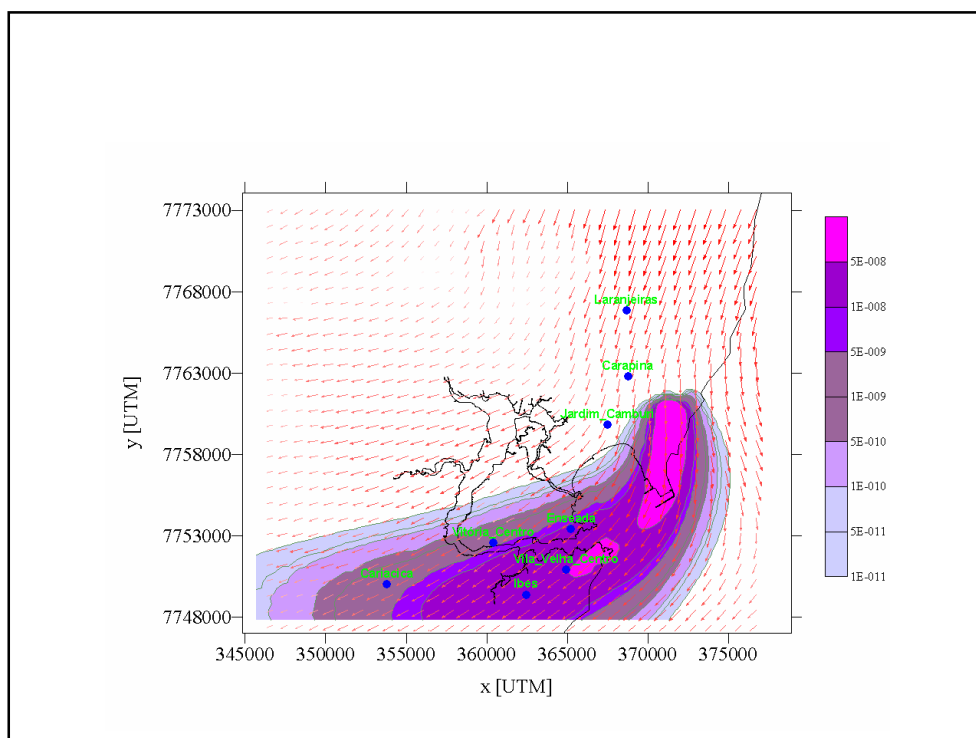
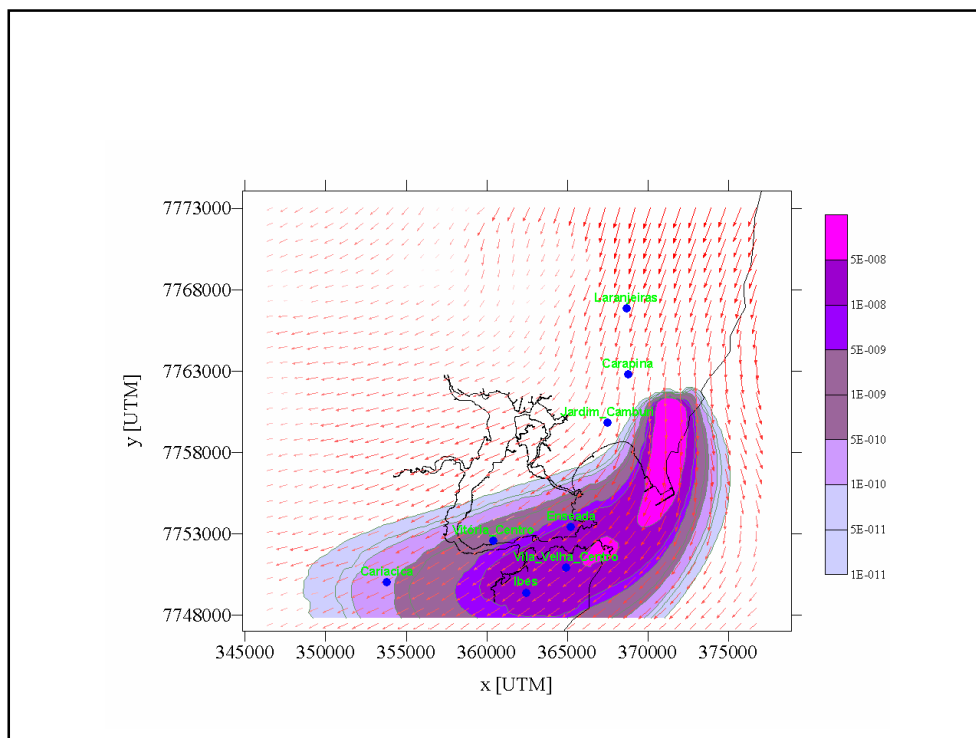


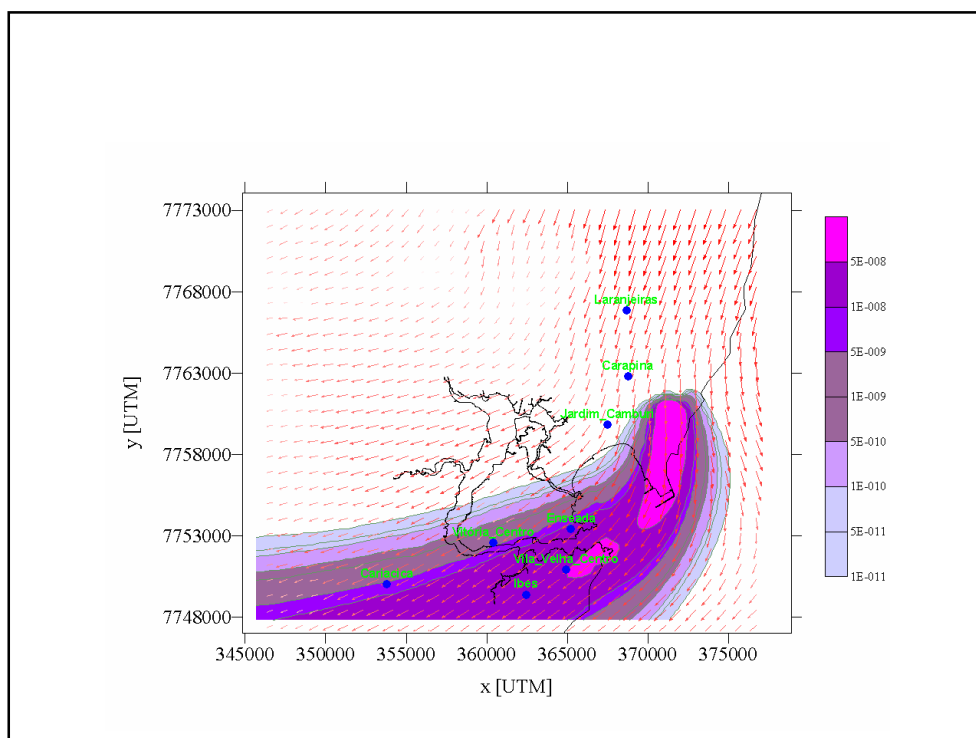
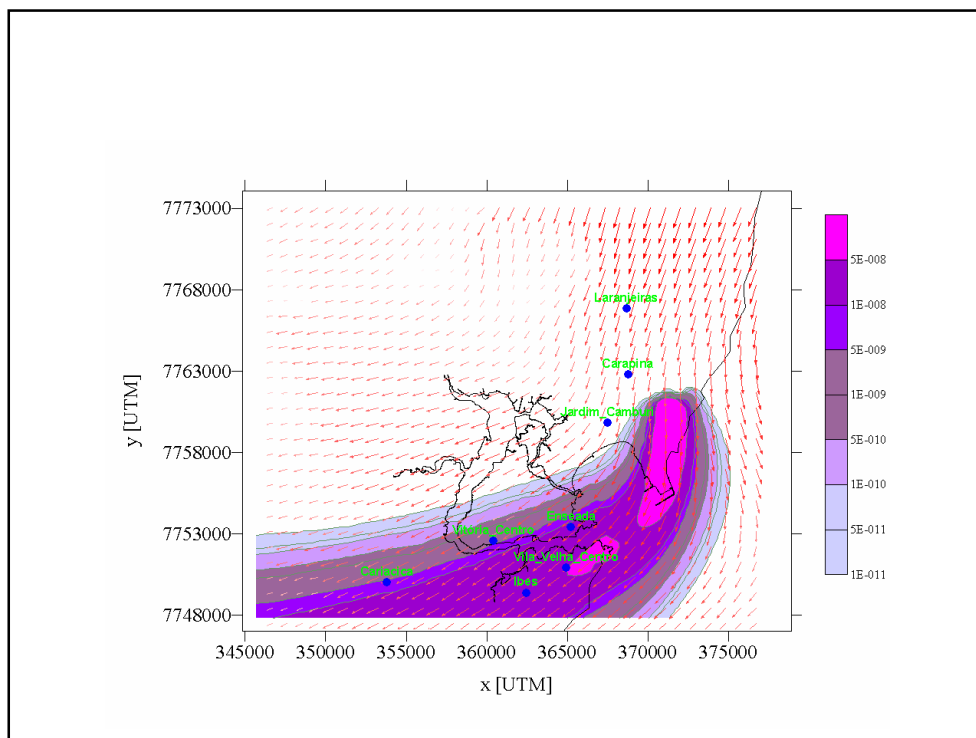
Exemplo de simulação empregando um campo de ventos não uniforme (modelo de difusão)

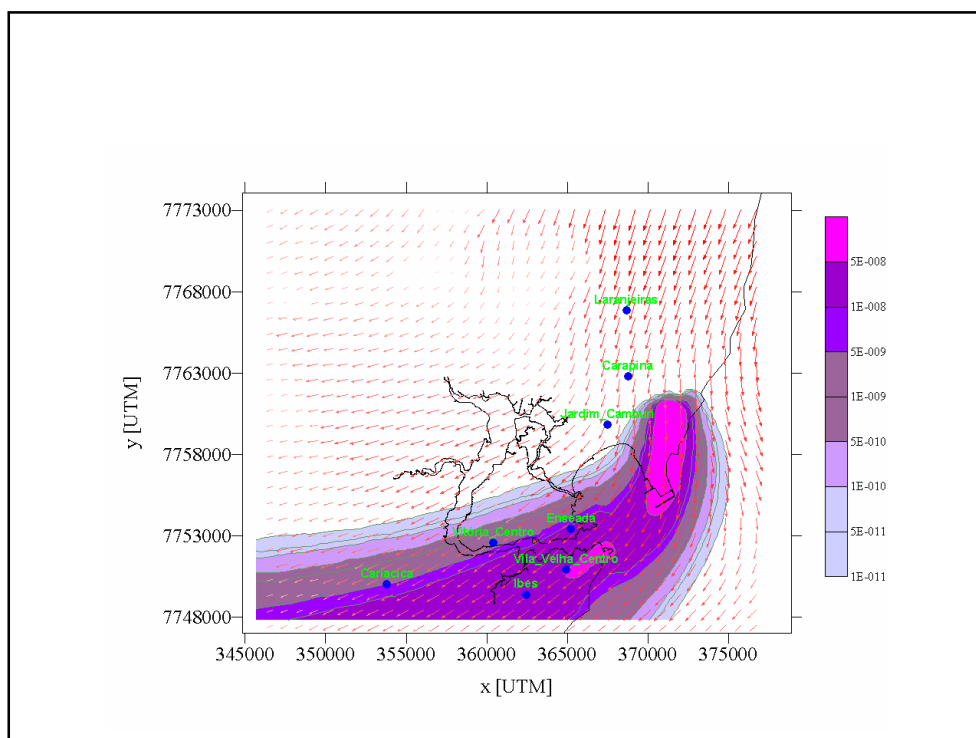
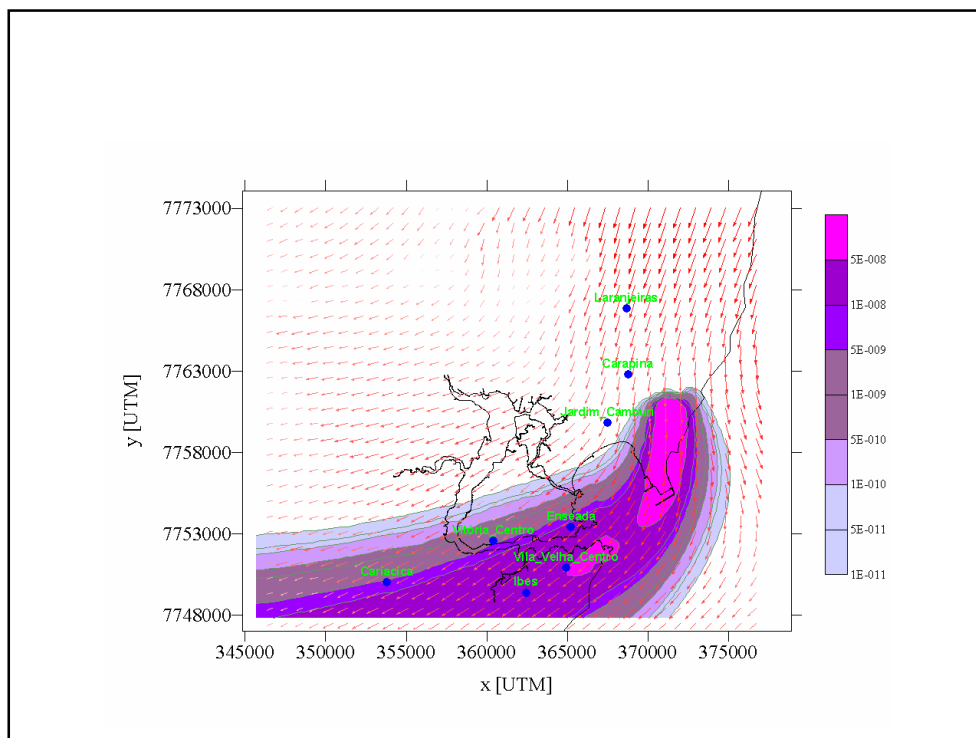


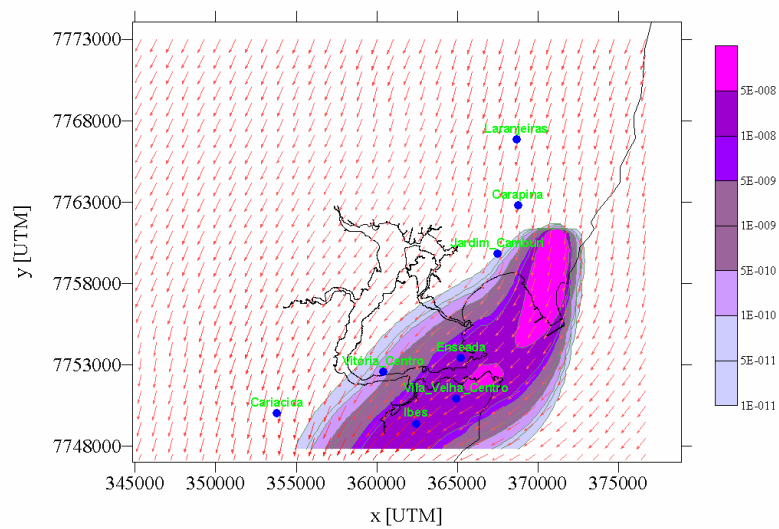
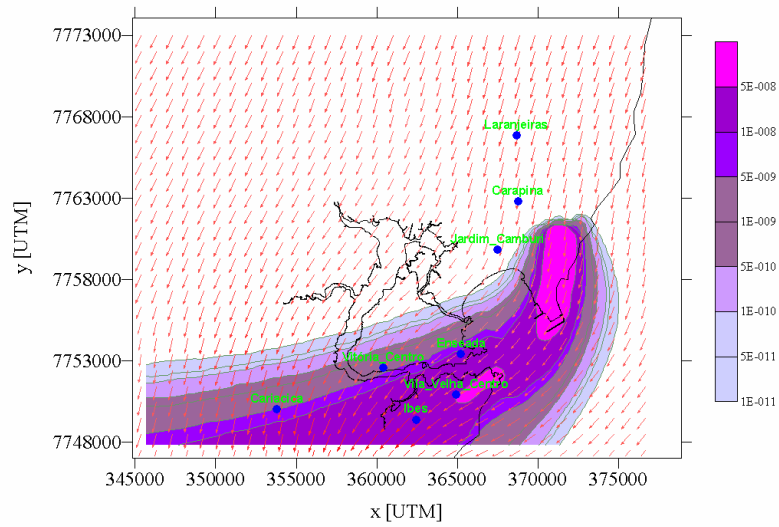


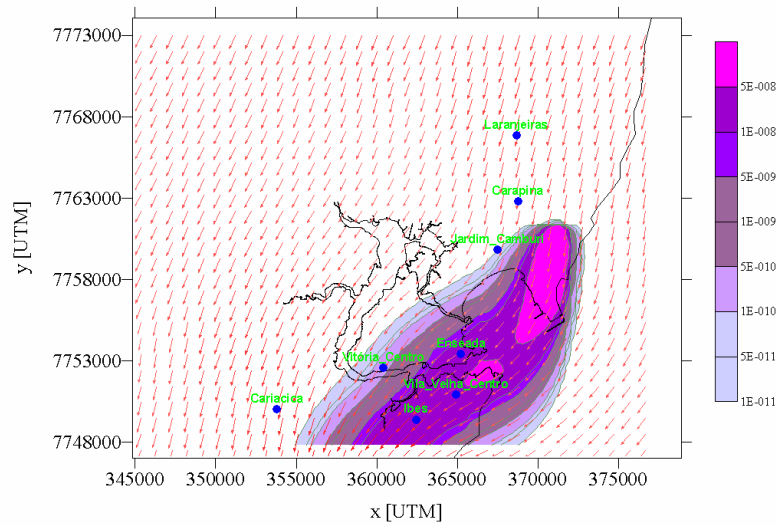










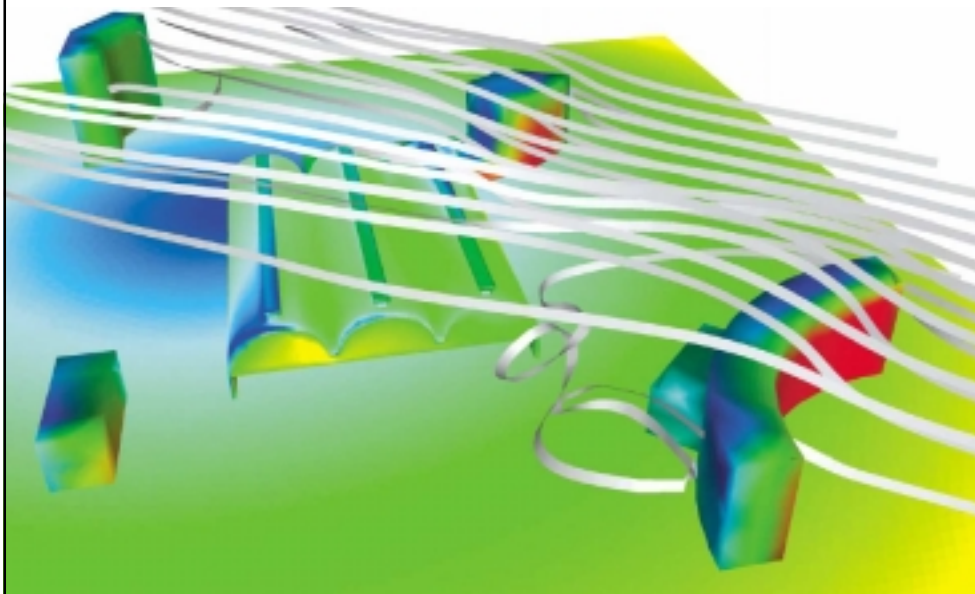


MODELOS DE DIFUSÃO

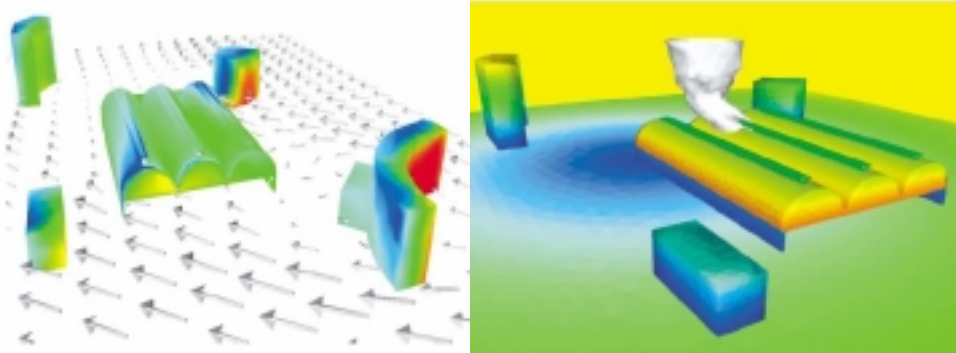
Modelos de Difusão

- Situações de relevo ou geometria complexo
- Variação das condições meteorológicas com o tempo

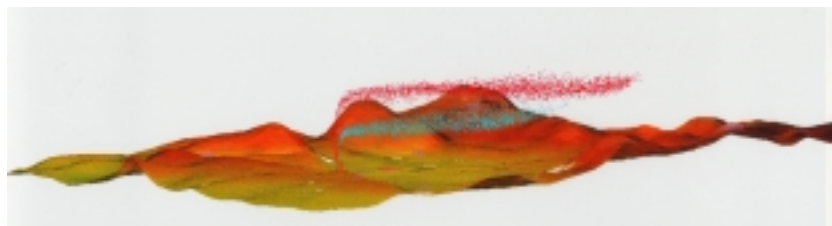
Exemplo 1 – Dispersão ao redor de obstáculos



Exemplo 1 – Dispersão ao redor de obstáculos

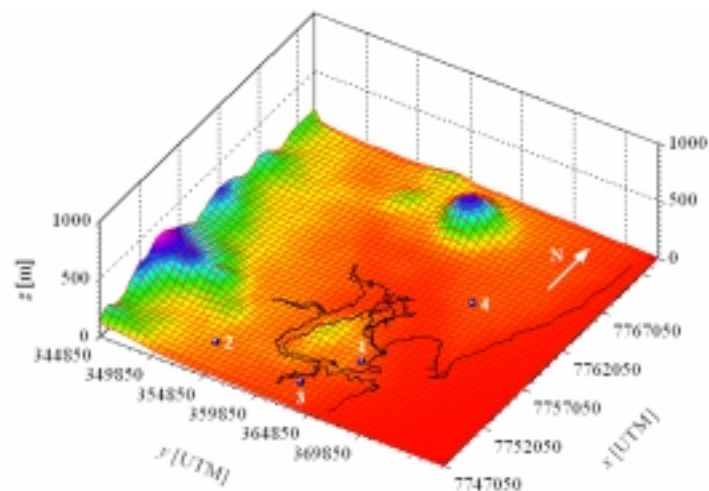


Exemplo 2 Dispersão em regiões de relevo complexo

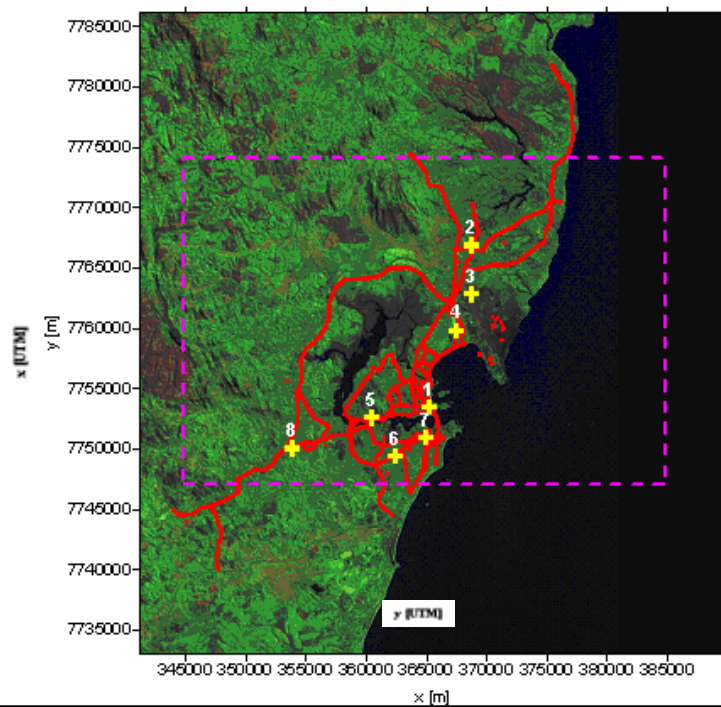


Exemplo 3

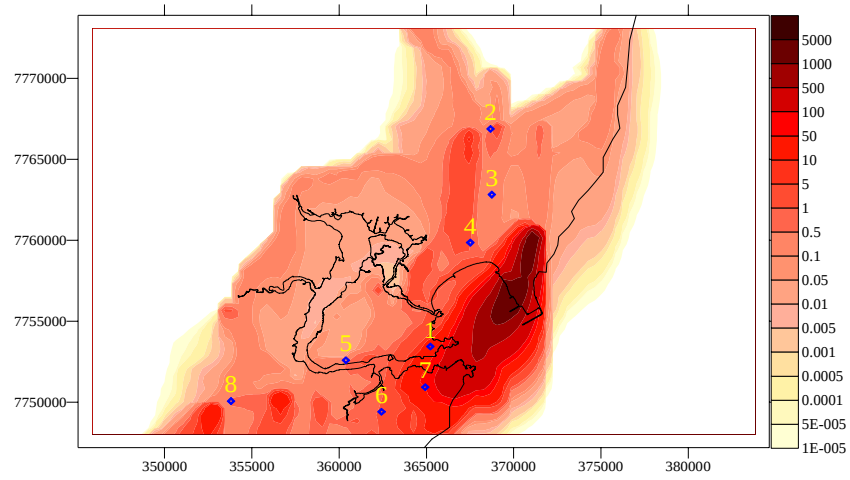
Dispersão em regiões costeiras



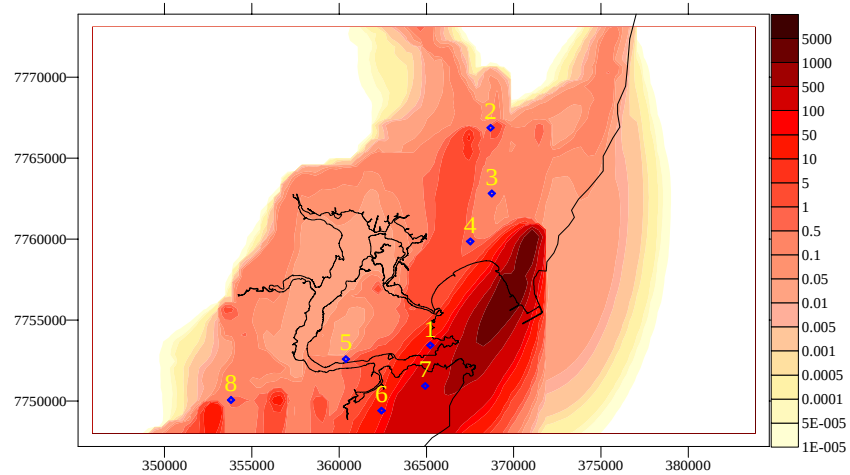
**Simulação
da
dispersão
de NO_x na
Região da
Grande
Vitória**



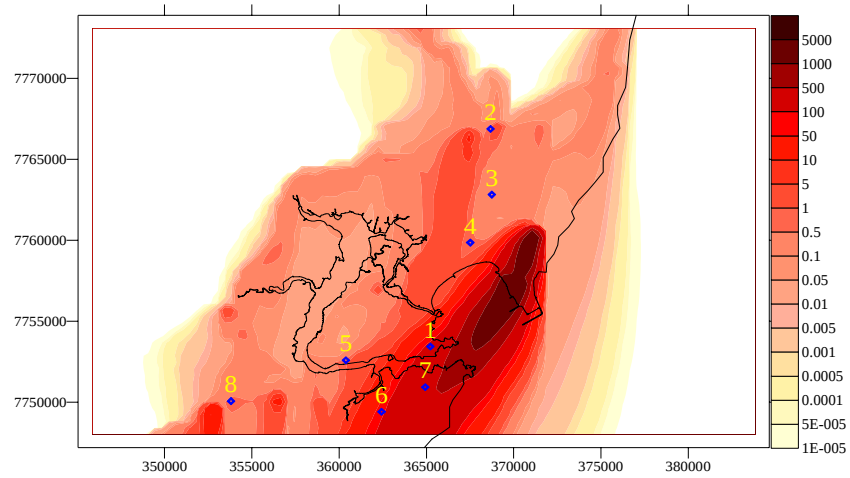
00:30



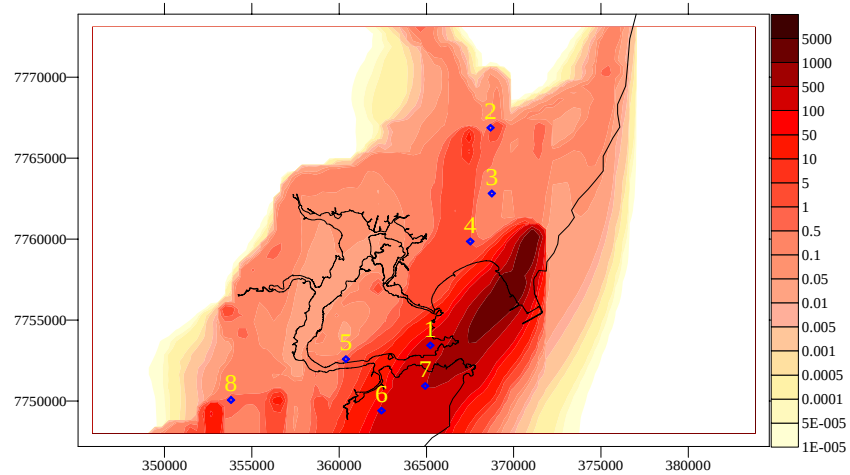
01:30



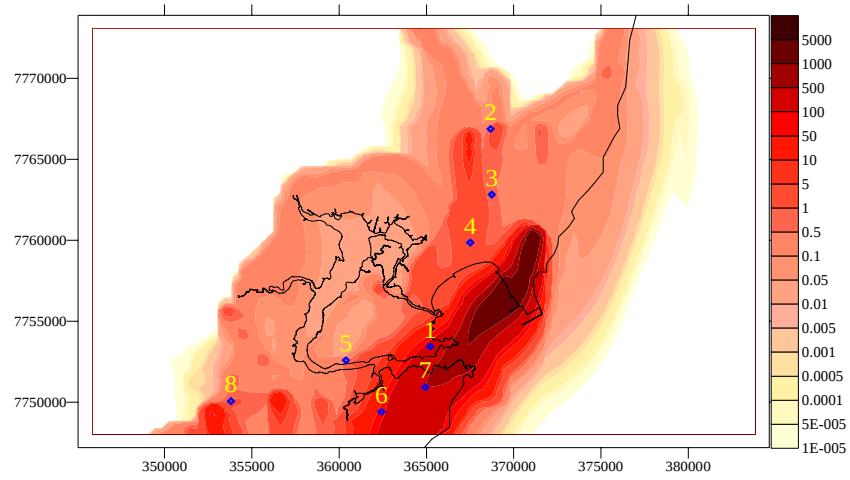
02:30



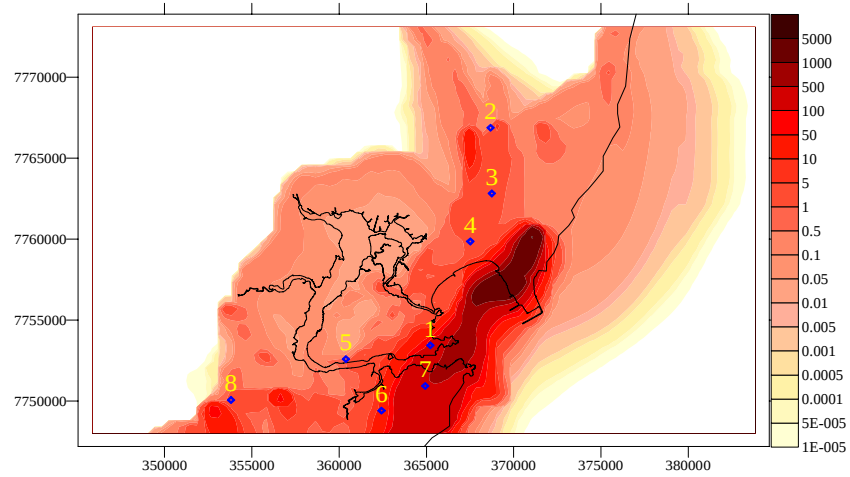
03:30



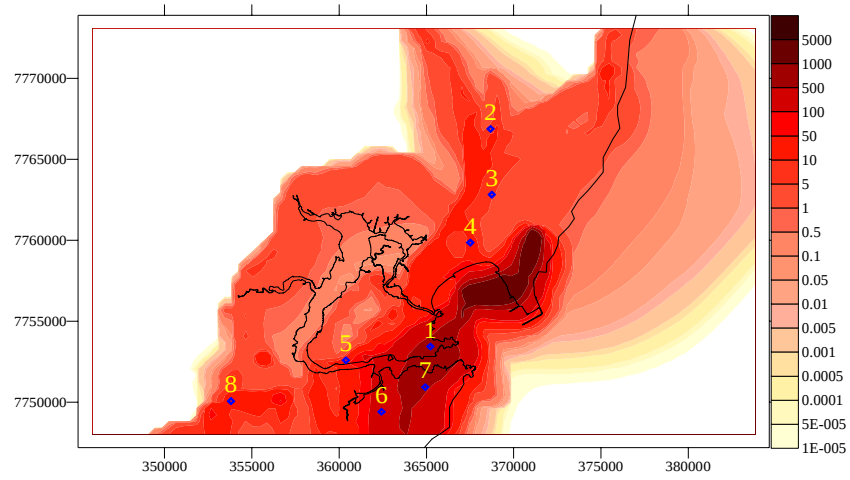
04:30



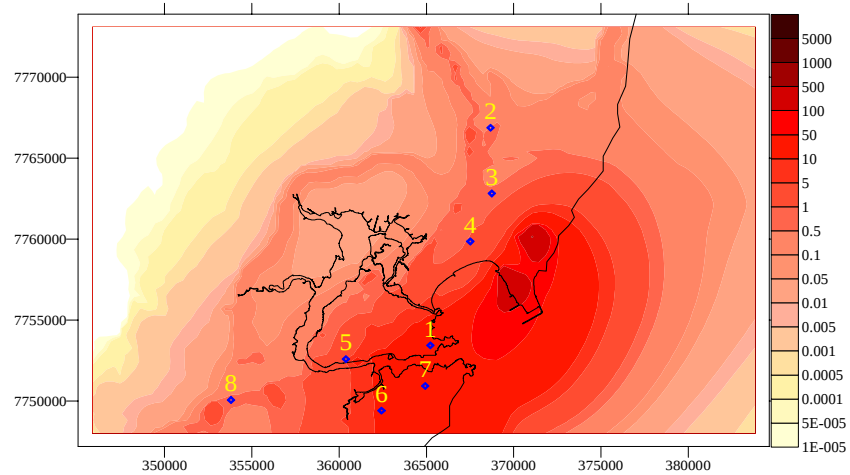
05:30



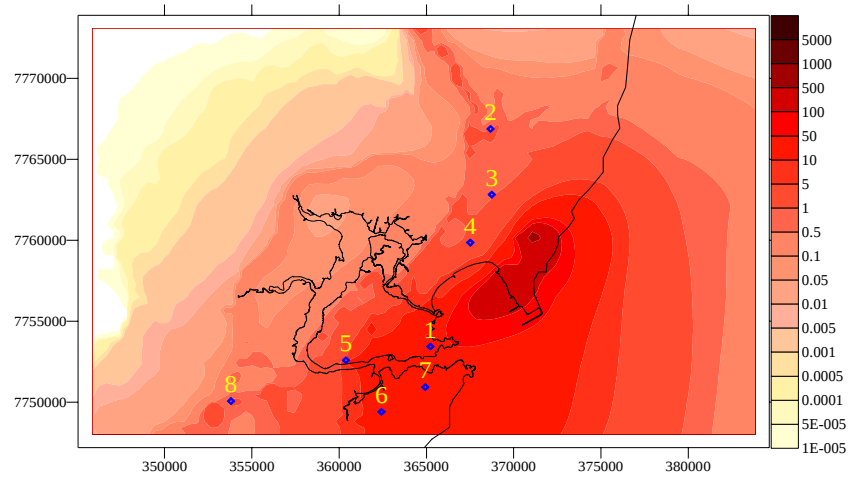
06:30



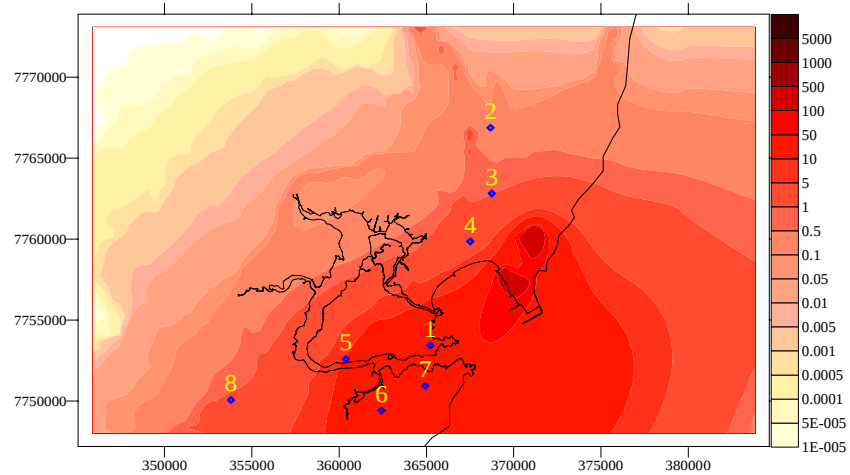
07:30



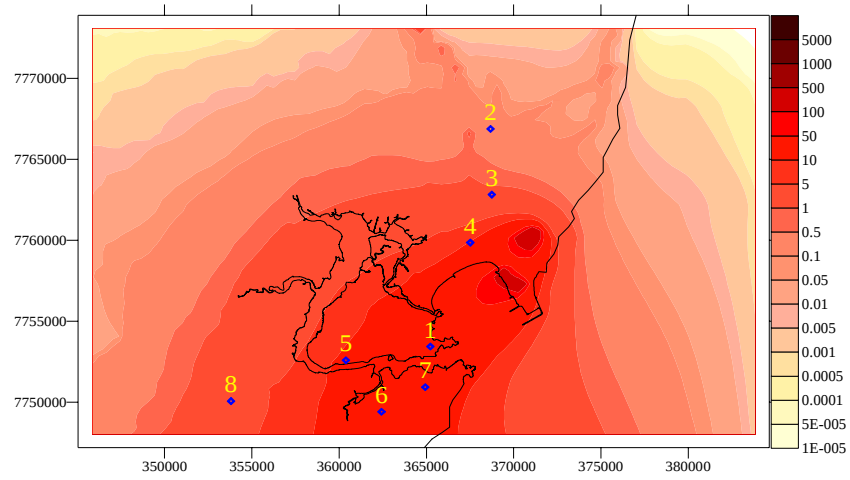
08:30



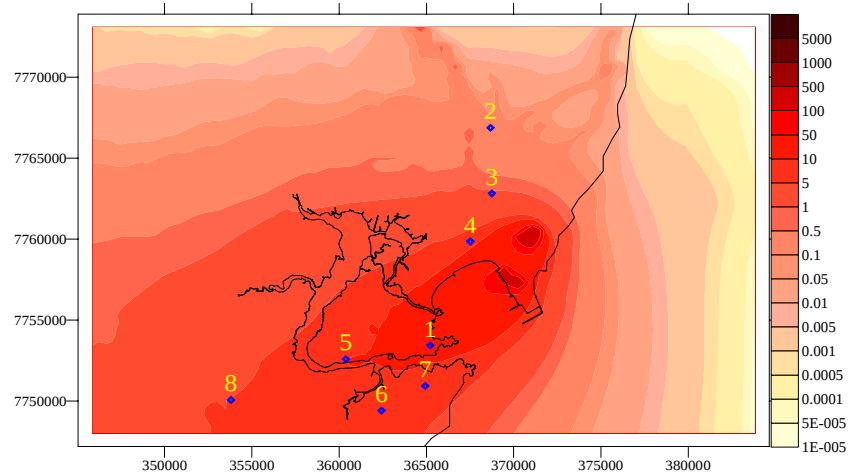
09:30



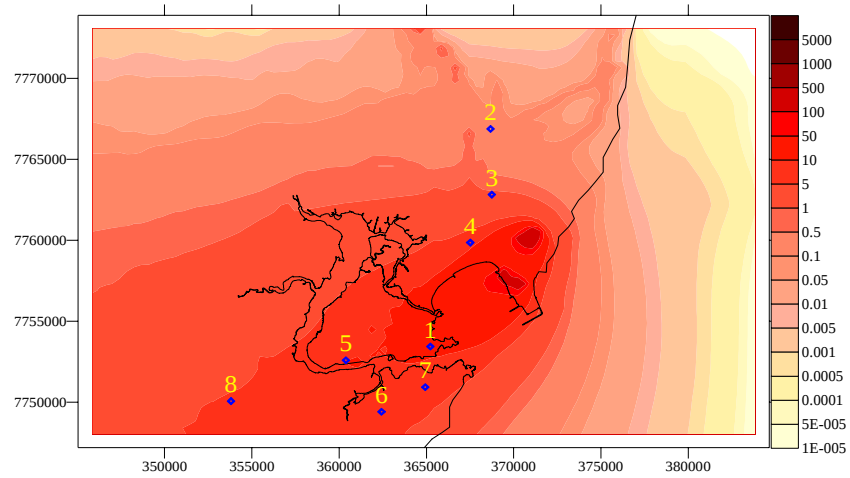
10:30



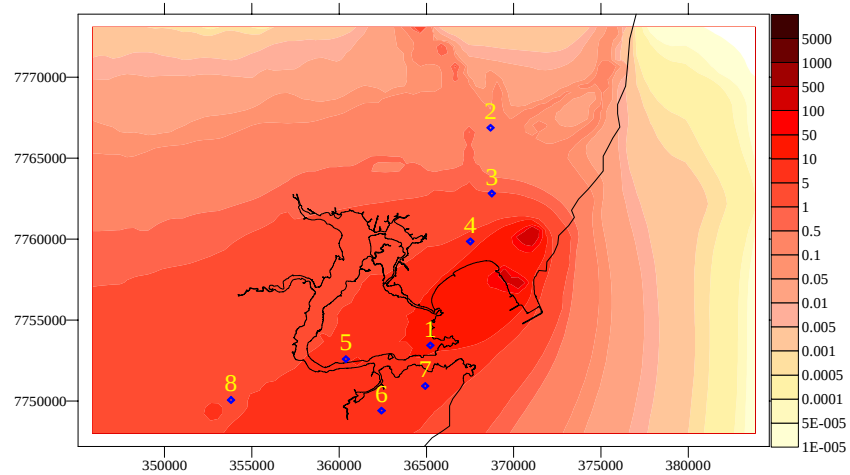
11:30



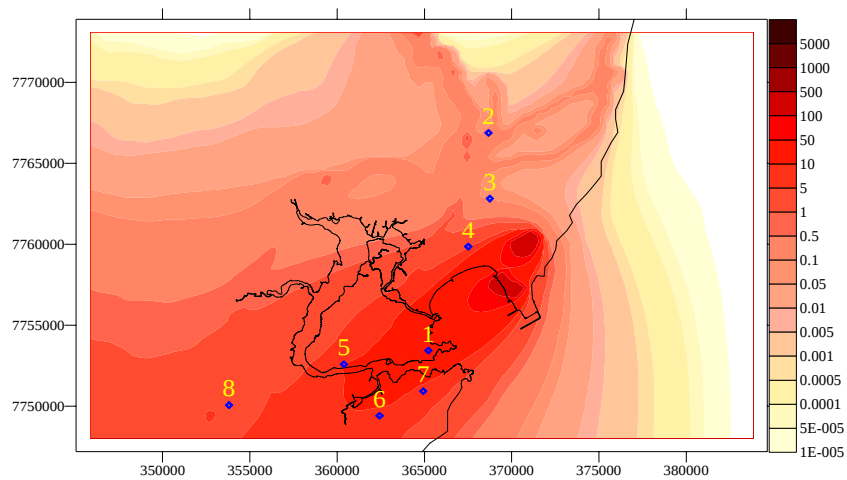
12:30



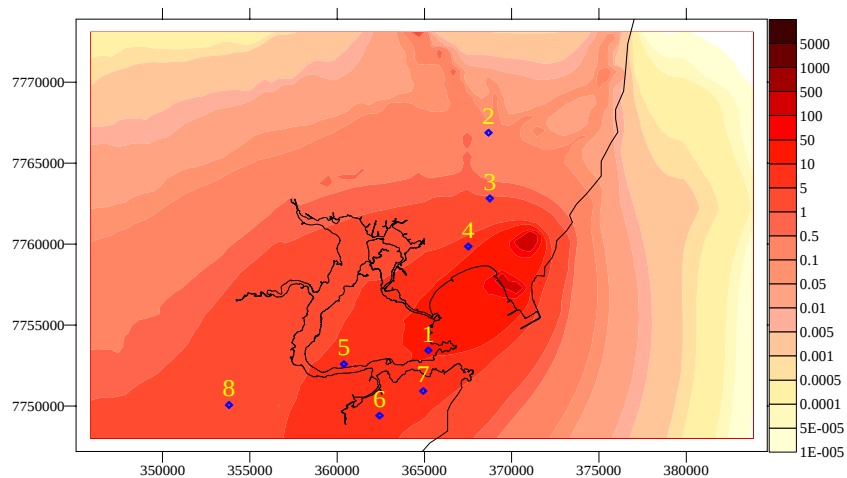
13:30



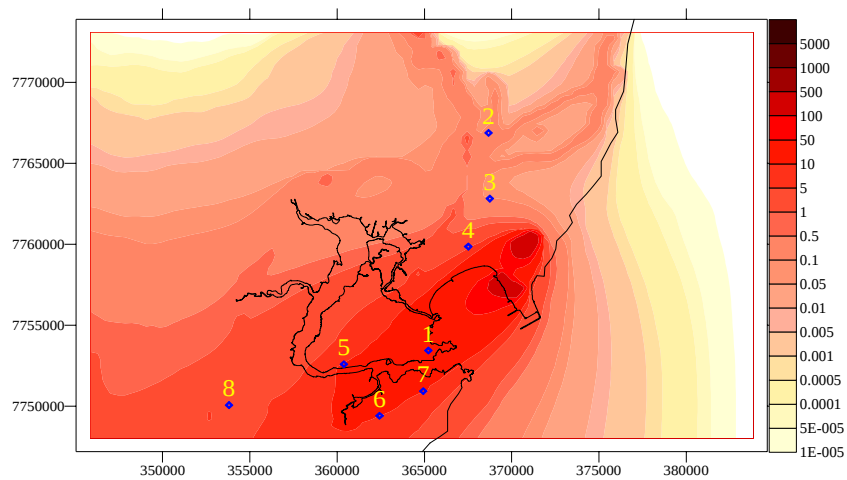
14:30



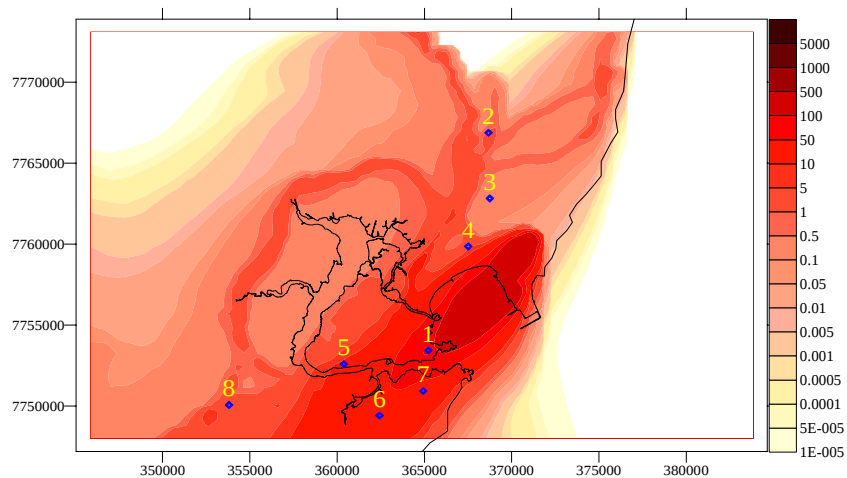
15:30



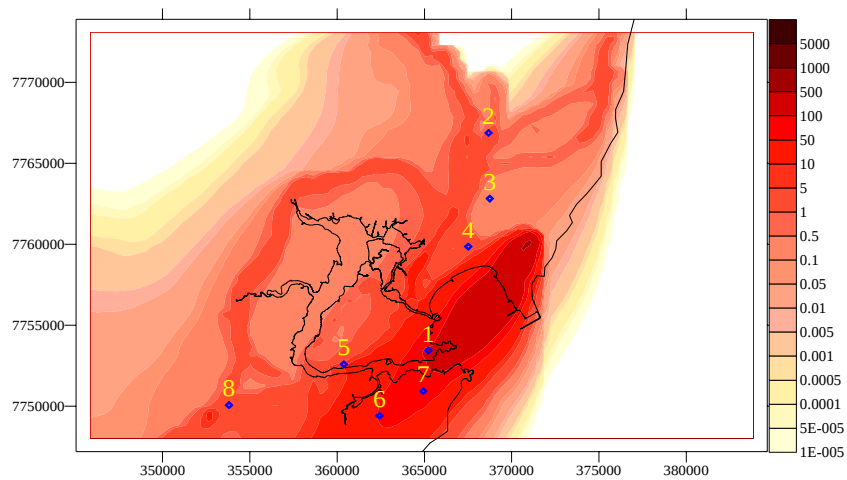
16:30



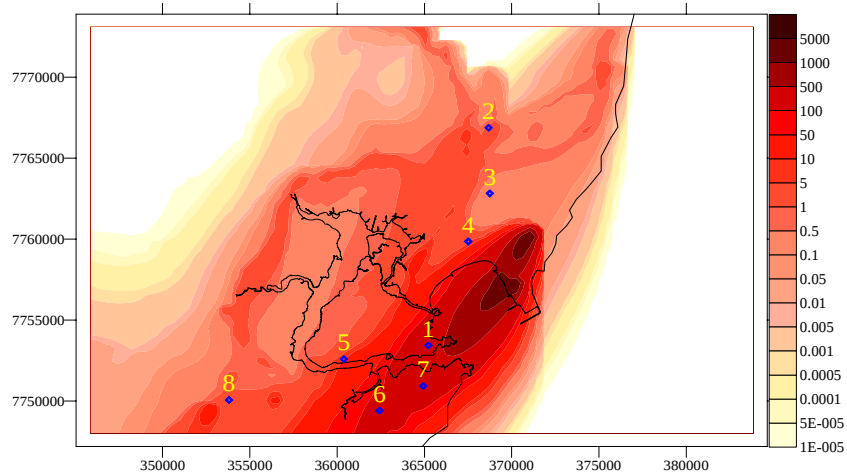
17:30



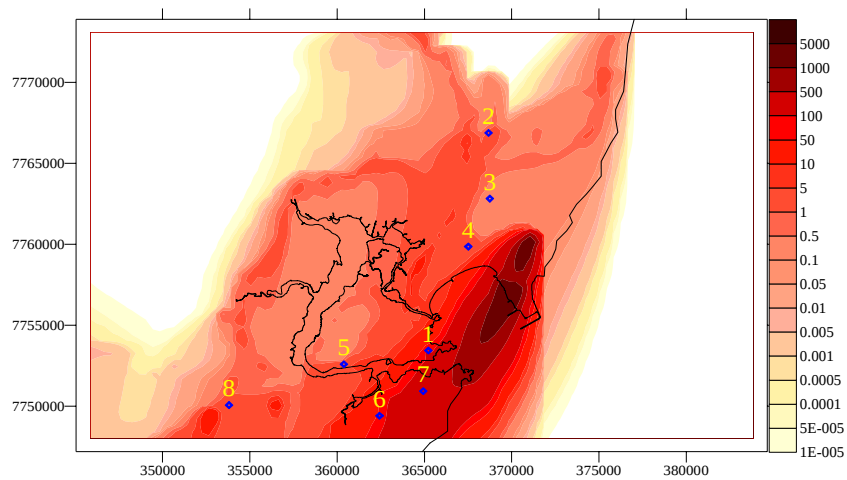
18:30



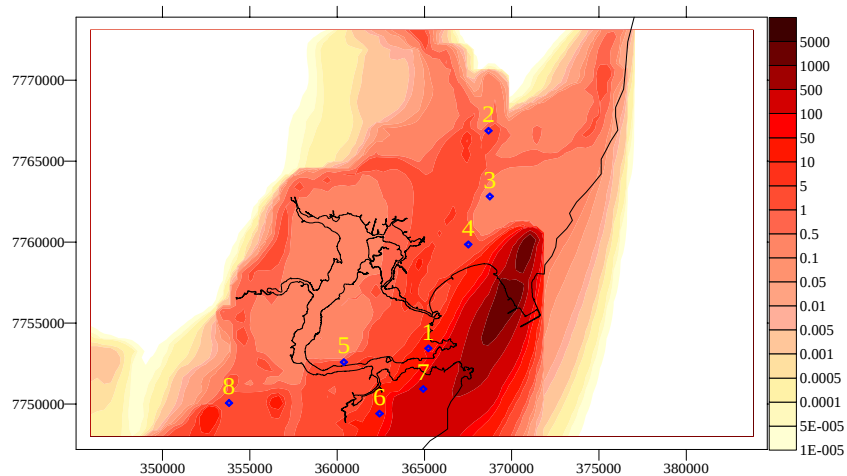
19:30



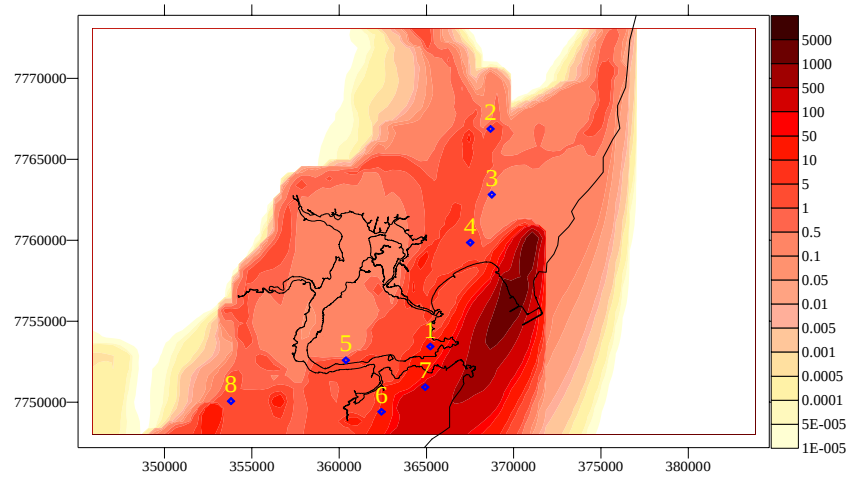
20:30



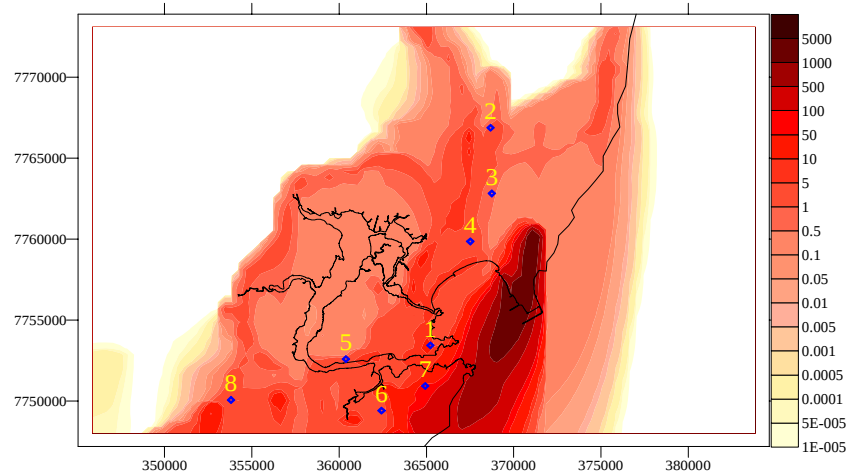
21:30

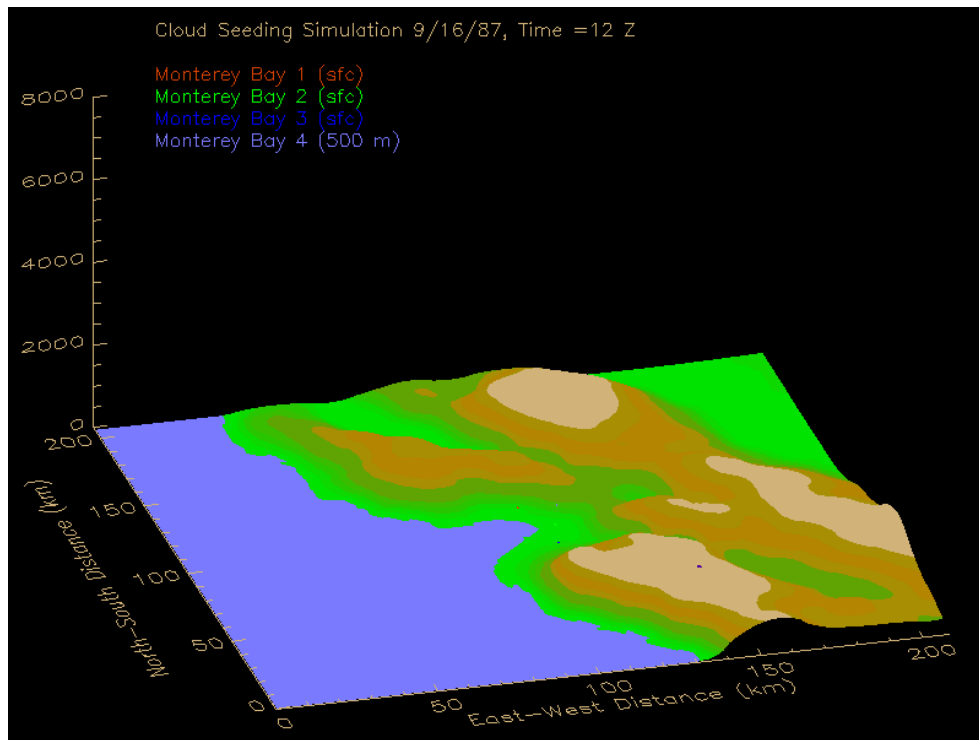


22:30



23:30





MODELO RECEPTOR

MODELO RECEPTOR

Princípio do modelo:

Atacar o problema de identificação da contribuição da fonte em ordem inversa, partindo da concentração do contaminante no receptor e localizando as fontes responsáveis pela emissão.



Não modela a dispersão do contaminante.

MODELO RECEPTOR

Princípio do modelo:

Atacar o problema de identificação da contribuição da fonte em ordem inversa, partindo da concentração do contaminante no receptor e localizando as fontes responsáveis pela emissão.

- Tipo de Modelo Receptor mais utilizado:

- **Balanço de Massa Químico – CMB**

- O que é?

Método que combina as características físicas e químicas dos contaminantes medidas nas fontes e nos receptores...

Objetivo

Quantificar as contribuições das fontes num receptor.

Exemplo:

Em uma região rural as medições de PM10 indicam uma concentração é $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ na atmosfera, sendo que deste total $2.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Si e $3.084 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de Fe.

Espécie	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Si	2.58
Fe	3.084

Existem 2 fontes principais de PM10 na região, uma usina termoeletrica e emissões devido ao solo da região. Uma análise das emissões indica um teor de 20% de Si e 3,2% de Fe na composição do solo, enquanto as emissões da usina termoeletrica possuem um teor de 1% de Si e 15% de Fe.

Se considerarmos que C_S e C_T são as contribuições (em $\mu\text{g}/\text{m}^3$) do solo e da usina termoeletrica, para as concentrações de PM10 na região tem-se:

$$PM10_{TOTAL} = C_S + C_T$$

Assim, desconsiderando as emissões por outras fontes não identificadas tem-se:

$$\begin{aligned} Si_{TOTAL} &= Si_{SOLO} + Si_{TERMOELÉTRICA} \\ Fe_{TOTAL} &= Fe_{SOLO} + Fe_{TERMOELÉTRICA} \end{aligned}$$

Contribuição do solo

Contribuição da termoeletrica

Supondo que não ocorrem reações químicas durante a trajetória dos contaminantes entre a fonte e o receptor, então, as proporções de Si e Fe são constantes e iguais aos valores iniciais quando atingem o receptor. Portanto:

$$Si_{SOLO} = 0,2 \times C_S$$

$$Si_{TERMOELÉTRICA} = 0,01 \times C_T$$

$$Fe_{SOLO} = 0,032 \times C_S$$

$$Fe_{TERMOELÉTRICA} = 0,15 \times C_T$$

Logo, tem-se:

$$\begin{cases} Si_{TOTAL} = 0,2 \times C_S + 0,01 \times C_T \\ Fe_{TOTAL} = 0,032 \times C_S + 0,15 \times C_T \end{cases}$$

$$C_S = 37,5 \% \text{ e } C_T = 56,2 \%$$

ou:

$$C_S = 12 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ e } C_T = 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$$

$$\begin{cases} 2,58 = 0,2 \times C_S + 0,01 \times C_T \\ 3,84 = 0,032 \times C_S + 0,15 \times C_T \end{cases}$$

-O exemplo anterior representa uma situação relativamente simples. Quanto maior o número de fontes de emissão envolvidas maior será a complexidade do modelo.

-A presença de um número maior de espécies “traçadoras” aumentará a precisão do resultado. Todavia, com o aumento do número de espécies o problema não mais se resumirá a solução de sistema de equações lineares de n equações com n incógnitas.

Balanço de Massa Químico – CMB

(Incluindo as incertezas nas medições de concentração)

Miller et al. (1972).

- Modelos de Balanço de Massa em uso atualmente consideram n fontes e m espécies químicas (onde m é sempre um número maior ou igual a n).

-Além de considerar um maior número de espécies químicas os modelos dão mais peso à medidas com menores incertezas.

-A formulação matemática é efetuada utilizando multiplicação de matrizes.

Balanço de Massa Químico – CMB (Exemplo Real)

Receptor

Composição Anual
(1988 a 1989) do
Aerossol em Fresno,
Califórnia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Espécie	PM2,5
NO3	9.43 +- 11.43
SO4	2.75 +- 1.32
NH4	4.04 +- 3.89
EC	6.27 +- 5.68
OC	8.05 +- 5.31
Al	0.15 +- 0.18
Si	0.38 +- 0.46
S	1.12 +- 0.54
K	0.28 +- 0.18
V	0.0034 +- 0.0019

Fonte: resumido de Chow *et al.*, citados por Seinfeld *et al.*, (1998).

Fontes

Perfis das fontes (% da massa emitida) para a Califórnia Central.

	Queimadas	Óleo	Veículo	Calcáreo	(NH4)2SO4	NH4NO3	OC
Espécie		cru					sec.
NO3	0.462	0	0	0	0	77.5	0
SO4	1.423	20.32	3.11	3.06	72.7	0	0
NH4	0.0852	0.0076	0	0	27.3	22.5	0
EC	15.89	0	54.15	0	0	0	0
OC	44.6	0.0894	49.81	0	0	0	100
Al	0.0019	0	0.077	2.11	0	0	0
Si	0	0.011	0.957	6.5	0	0	0
S	0.521	5.45	1.037	1.02	0	0	0
K	3.993	0.044	0.008	0.16	0	0	0
V	0.0005	0.823	0.001	0	0	0	0

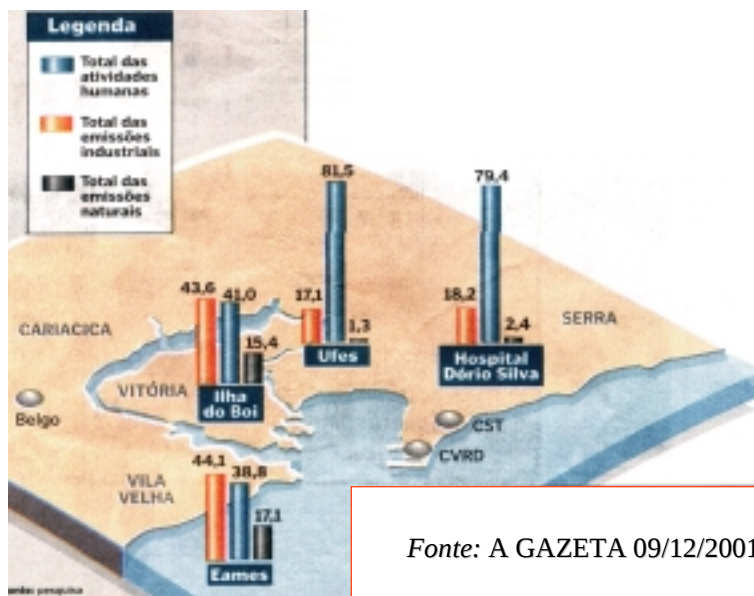
Fonte: resumido de Chow *et al.*, citados por Seinfeld *et al.*, (1998).

Resultado

Contribuições
médias anuais das
fontes ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para
PM_{2,5} em Fresno –
Califórnia.

FONTE	PM _{2,5}
Geológica	-
Veículo	12,32
Queimadas	6,90
Óleo cru	0,40
Sulfato de amônia	2,77
Nitrato de amônia	13,15
Aerossóis marinhos	-
OC	-1,17
Calcáreo	5,99
Massa calculada	41,53
Massa medida	49,30

Estudo realizado por P.A. Souza Jr. em 2001, sobre a poluição do ar na RGV utilizando um “Modelo Receptor Inteligente”.



Contribuições das fontes na RGV.

Foram identificadas 15 fontes poluidoras

Emissões industriais em %

Origem	Ilha do Boi	Eames	Ufes	Hospital Dório Silva
Coque	1,5	3,0	6,3	4,1
Alto-forno e aciaria	3,4	3,2	0,8	1,2
Aciaria elétrica	1,2	3,5	1,6	4,2
Sinterização	6,1	8,7	2,4	4,1
Carvão Mineral	12,6	8,5	1,8	1,7
Pelotas	18,8	17,2	4,3	2,9
Minérios Calcinção Grãos de Soja	Estes três itens apresentaram somente traços de existência			

Atividades humanas em %

Origem	Ilha do Boi	Eames	Ufes	Hospital Dório Silva
Queimadas	5,2	6,3	6,3	12,9
Emissão veicular	2,0	2,8	9,8	6,6
Solos	12,3	9,9	15,1	32,9
Construções Cíveis	8,4	7,4	31,3	14,7
Pedreiras	13,1	12,4	19,0	12,3

Emissões naturais em %

Origem	Ilha do Boi	Eames	Ufes	Hospital Dório Silva
Aerosol Marinho (maresia)	15,4	17,1	1,3	2,4

Fonte: A GAZETA
09/12/2001.

Suposições do CMB:

- As composições das fontes de emissão são constantes.
- As espécies incluídas não são reativas.
- Todas as fontes que contribuem significativamente no receptor devem ser incluídas nos cálculos.
- O número de fontes é menor ou igual ao número de espécies.
- As incertezas das medidas são aleatórias, não relacionadas e normalmente distribuídas.

Suposições do CMB:

- As composições das fontes de emissão são constantes.
- As espécies incluídas não são reativas.
- Todas as fontes que contribuem para a carga no receptor devem ser incluídas.
- O número de fontes é limitado.
- As incertezas das medidas são independentes, não relacionadas e normalmente distribuídas.

**Problemas de
precisão quando
as fontes têm
composição
semelhante**

MODELOS EPA-US

(Environmental Protection Agency-US)

<http://www.epa.gov/scram001/>

EPA - Technology Transfer Network Support Center for Regulatory Air Models

Support Center for Regulatory Air Models (Links)

- [What's New](#)
- [Public Forum](#)
- [Dispersion Models](#) ← Modelos de dispersão de poluentes na atmosfera para diversas situações (executáveis, código fonte, manuais e tutoriais)
- [Receptor Models](#) ← Modelo Receptor CMB 8.0
- [Meteorological Data](#)
- [Guidance / Support](#) ← Manuais da EPA para Estudo de Impacto Ambiental, Avaliação da Qualidade do Ar e Elaboração de Modelos
- [7th Modeling Conference](#)
- [Related Links and Contacts](#)
- [Regional Modeling Center](#)

Modelos de dispersão de poluentes na atmosfera

Preferred / Recommended Models

Modelos de dispersão homologados pela EPA para avaliação da qualidade do ar e estudos de impacto ambiental. Os resultados destes modelos são “acreditados” para fins de licenciamento pela EPA.

Screening Tools

Ferramentas de avaliação de impacto ambiental. Por exemplo, com base nos dados meteorológicos e dados da fonte, são apresentados os valores máximos de concentração no nível do solo. Estas ferramentas são normalmente utilizadas antes de um estudo mais detalhado.

Alternative Models (*Case-by-Case*)

Lista de modelos mais refinados e/ou desenvolvidos para situações específicas.

Considerações Finais

- Modelos matemáticos representam importantes ferramentas para a gestão da qualidade do ar, especialmente para o estudo de impacto ambientais (EIA).
- A análise dos resultados deve sempre levar em consideração a acurácia do modelo e sua aplicabilidade à situação em estudo.

Exercício da Aprendizagem

Determine a concentração de SO_x no receptor causada por cada uma das fontes de emissão descritas na tabela da página seguinte.

- Considere o vento predominante na Região da Grande Vitória igual a 1m/s e de direção NNE.
- As coordenadas do receptor são:
 - $x = 365000$ m [UTM]
 - $y = 7753500$ m [UTM]

Fonte	Coordenada UTM X (m)	Coordenada UTM Y (m)	Altura da fonte h (m)	Vazão de gases na fonte Q (m³/s)	Temperatura do gás na saída da fonte T (K)	Vazão mássica lançada de SO ₂ Qm (g/s)	Diâmetro da fonte na saída do gás D (m)
FON A1	369430	7757930	59	207.4	450	14.086	6.0
FON A2	369475	7757900	65	129.3	350	21.128	3.5
FON A3	369470	7757920	59	230.6	450	31.500	5.7
FON A4	369470	7757930	65	157.8	350	47.250	3.5
FON A5	369460	7757910	59	267.9	460	66.706	5.0
FON A6	369460	7757910	61	130.4	340	100.060	3.5
FON A7	369380	7757780	59	236.5	460	36.606	5.0
FON A8	369355	7757900	60	155.1	350	54.908	3.5
FON A9	370190	7757470	50	339.1	460	136.457	5.7
FON A10	370270	7757340	53	191.8	370	204.686	3.6
FON A11	370260	7757500	50	412.6	440	121.954	5.7
FON A12	370280	7757345	53	203.9	390	182.921	3.6
FON B1	371460	7767104	64	2.1	470	5.133	0.8
FON B2	371400	7767150	42	3.8	470	2.112	1.2
FON C1	371135	7761095	186	75.5	470	156.217	7.2
FON C2	371300	7760980	186	51.5	470	22.553	7.2
FON C3	371185	7760745	106	406.0	430	114.288	6.3
FON C4	370450	7761200	101	195.3	550	33.612	5.5
FON C5	370690	7761410	86	467.8	450	45.046	4.9
FON C6	370397	7763006	56	162.0	870	26.880	2.0
FON C7	370700	7761730	66	37.7	440	1.279	3.0
FON C8	370690	7761715	66	38.6	430	1.516	3.0

