



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Nº de ordem: MET – UFAL – MS/037

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO DOS POLUENTES H_2S e NH_3
PROVENIENTES DO LIXÃO DE MACEIÓ-AL NAS ÉPOCAS SECA E CHUVOSA:
ESTUDO DE CASOS

GLAUBER LOPES MARIANO

Maceió - Alagoas

Fevereiro de 2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

Nº de ordem: MET – UFAL – MS/037

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO DOS POLUENTES H_2S e NH_3
PROVENIENTES DO LIXÃO DE MACEIÓ-AL NAS ÉPOCAS SECA E CHUVOSA:
ESTUDO DE CASOS

Glauber Lopes Mariano

Dissertação apresentada ao Departamento de
Meteorologia/CCEN/UFAL, para obtenção do
título de Mestre em Meteorologia – Área de
concentração em processos de Superfície
Terrestre

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Lima Moura

Maceió - Alagoas

Fevereiro de 2006

A minha “Tia” Zuleide, ao meu
irmão Djani Kleber e a toda
minha família e amigos,
OFEREÇO.

Aos meus pais, pelo apoio
durante toda a minha vida,
carinho e compreensão,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, que sempre traçou meu caminho e ao qual sempre tenho plena confiança na sua vontade.

A Ericka Voss Chagas: pelo companheirismo, carinho, ajuda e compreensão (sobretudo nos momentos de recebimento das correções) dedicados a mim.

Ao professor Silvio Chagas pela paciência e tempo investido para a realização deste trabalho; sua colaboração foi de grande importância na parte computacional do mesmo.

Aos colegas Carlos Alexandre, Marcos Paulo e Thiago Veloso pela ajuda nas instalações realizadas no local do estudo.

Ao colega Paulo Ricardo pelas ajudas no software Grads.

Aos professores Manoel Ferreira do Nascimento e Luiz Cláudio Gomes Pimentel pela colaboração para a conclusão deste trabalho.

A alguns dos professores do Departamento de Meteorologia da UFAL que me apoiaram (e apóiam os alunos) durante esses anos.

Ao professor Marcos Moura com o qual tive a oportunidade de trabalhar e aprender, tanto nos projetos quanto na realização deste trabalho.

PENSAMENTOS

Água mole em pedra dura, tanto bate até que fura. (**Provérbio Popular**)

Se A é o sucesso, então é igual a X mais Y mais Z. O trabalho é X; Y é o lazer; e Z é manter a boca fechada. (**Albert Einstein**)

A adversidade é um trampolim para a maturidade. (**C.C. Colton**)

Já que você tem que pensar de qualquer forma, pense grande. (**Donald Trump**)

O único homem que não erra é aquele que nunca faz nada. (**Franklin Roosevelt**)

Se seus sonhos estiverem nas nuvens, não se preocupe, pois eles estão no lugar certo; agora construa os alicerces. (**Provérbio Popular**)

An eye for an eye, will make us all blind. (**Mahatma Ghandi**)

A sabedoria dos homens é proporcional não à experiência, mas à sua capacidade de adquirir experiência. (**George Bernard Shaw**)

O obstáculo é quase superado quando rimos dele. (**Bonjour**)

No fim, tudo é uma piada. (**Charles Chaplin**)

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
PENSAMENTOS	iii
SUMÁRIO	iv
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
RELAÇÃO DE ABREVIATURAS	xiv
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi

	Páginas
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Lixo Urbano	5
2.2. Poluição provocada pelos lixões	7
2.2.1. Poluição do ar	8
2.2.2. Problemas ambientais provocados pelos gases provenientes do lixo	12
2.2.3. Dispersão dos poluentes	14
2.3. Características de algumas variáveis meteorológicas na influencia nos gases de lixões	16
2.4. Combustão Espontânea	18
2.5. Modelos numéricos de transportes de poluentes	19
2.5.1. Modelo HYSPLIT	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Área de Estudo	25
3.2. Período de estudo	27

3.3. Parâmetros Medidos	27
3.4. Perfil vertical da atmosfera e determinação da camada limite atmosférica	31
3.5. Modelo HYSPLIT_4 de dispersão de poluentes	35
3.5.1. Sub-seções	36
3.5.1.1. Informações sobre a fonte	36
3.5.1.2. Informações sobre concentração	39
3.5.1.3. Informações sobre deposição	40
3.5.1.4. Informações sobre a saída	41
3.5.2. Exemplo de simulação da concentração gerada no HYSPLIT_4	43
3.6. Modelo gaussiano de dispersão de poluentes	45
3.6.1. Quantidade de poluentes emitida (Q)	47
3.6.2. Fator de desaparecimento de poluentes (D)	47
3.6.3. Desvio padrão da dispersão Horizontal (σ_y) e Vertical (σ_z)	49
3.6.4. Velocidade média do vento (U)	52
3.6.5. Coordenadas da quadrícula receptora (X, Y)	53
3.6.6. Altura onde se deseja obter as concentrações (Z)	53
3.7. Visão Geral do modelo gaussiano	54
3.7.1. Exemplo de simulação da concentração gerada pelo modelo gaussiano	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1. Definição dos períodos seco e chuvoso e direção predominante do vento	61
4.2. Variáveis Meteorológicas	63
4.2.1. Direção e velocidade do vento	63
4.2.2. Período Seco	66
4.2.3. Período Chuvoso	72

4.3. Simulações numéricas de dispersão dos poluentes durante o período seco	77
4.3.1. Evento do dia 08/12/2004	77
4.3.2. Evento do dia 11/12/2004	82
4.3.3. Evento do dia 17/02/2005	89
4.4. Simulações numéricas de dispersão dos poluentes durante o período chuvoso	93
4.4.1. Evento do dia 23/06/2005	93
4.4.2. Evento do dia 28/06/2005	97
4.4.3. Evento do dia 03/07/2005	102
5. CONCLUSÕES	107
6. RECOMENDAÇÕES	110
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
8. ANEXOS	123
Anexo 1 – Programa Principal	124
Anexo 2 – Rotina para o cálculo do nascer do Sol	129
Anexo 3 – Rotina para o cálculo do por do Sol	130
Anexo 4 – Rotina para o cálculo do ângulo Solar	131
Anexo 5 – Rotina para o cálculo do grau de estabilidade atmosférica	132
Anexo 6 – Rotina para cálculo da concentração de poluente na quadrícula onde está localizada a fonte emissora	136
Anexo 7 – Rotina para cálculo da distância entre a fonte emissora e as quadriculas receptoras, na direção do vento e perpendicular a ela	145
Anexo 8 – Rotina para o cálculo da altura efetiva da chaminé	146
Anexo 9 – Rotina para cálculo da quantidade de poluente que chega a uma quadrícula	147
Anexo 10 – Rotina para cálculo do desvio padrão das dispersões (horizontal e vertical)	148
Anexo 11 – Rotina para cálculo dos máximos e mínimos valores calculados na simulação	150

LISTA DE FIGURAS

Figuras		Páginas
1	Distribuição média da composição do lixo no Brasil .	06
2	Produção dos constituintes do biogás de lixo conforme o tempo .	12
3	Localização do Lixão de Maceió. No detalhe, localização do município de Maceió no mapa de Alagoas e vista aérea do Lixão de Maceió com a indicação do local da Estação Meteorológica Automática (EMA) .	25
4	Lixão de Maceió/AL .	26
5	Vista da Estação Meteorológica Automática (EMA) instalada no lixão de Maceió-AL .	28
6	Rosa dos ventos .	30
7	Levantamento das distâncias (km) de alguns pontos no entorno do Lixão. .	30
8	Mapa geral do município de Maceió com a divisão dos bairros, regiões administrativas, população e área .	31
9	Modelo de Camada Limite Atmosférica durante o dia (a) e durante a noite (b). .	33
10	Perfil da atmosfera absolutamente estável (a) e absolutamente instável (b). .	34
11	Sub-seção “Informações sobre a fonte” do modelo HYSPLIT_4 .	38
12	Sub-seção “Informações sobre a concentração” do modelo HYSPLIT_4. .	40
13	Sub-seção “Informações sobre a Deposição” do modelo HYSPLIT_4. .	41

Figuras	Paginas
14 Sub-seção “Informações de Saída“ do modelo HYSPLIT_4 .	43
15 Simulação da dispersão / concentração às 10h pelo . HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão de Maceió em 18 de maio de 2005.	44
16 Exemplo do aspecto da dispersão bi-dimensional de uma . pluma de um poluente.	46
17 Rotação e translação dos eixos coordenados .	51
18 Tela inicial do modelo gaussiano desenvolvido .	55
19 Exemplo de simulação da dispersão/concentração da . amônia liberada pelo lixão de Maceió em 18 de maio de 2005 (dia juliano 138) às 10h(hora local).	59
20 Exemplo de simulação da dispersão/concentração da . amônia liberada pelo lixão de Maceió em 18 de maio de 2005 (dia juliano 138) as 10h(hora local).	60
21 Comparação entre a normal climatológica da precipitação . (mm) para cidade de Maceió-AL (1961-2001) e dados coletados no lixão de Maceió no período de agosto de 2004 a julho de 2005.	61
22 Distribuição da freqüência da direção do vento (%) para os . 3 períodos de estudo na área do Lixão de Maceió-AL	64
23 Distribuição da velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) de acordo com . a direção para os 3 períodos de estudo na área do Lixão de Maceió-AL	66
24 Radiação solar global (R_g) diária ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) durante a . 1ªtemporada de medições na área do estudo	68
25 Temperatura do Solo ($^{\circ}\text{C}$) nos níveis de 5, 25, 50 e 100cm . durante a 1ªtemporada de medições na área do Lixão de Maceió.	69
26 Radiação solar global (R_g) diária ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) durante a . 2ªtemporada de medições na área do estudo.	70

Figuras	Paginas
27 Temperatura do Solo ($^{\circ}\text{C}$) nos níveis de 5, 25, 50 e 100cm durante a 2 ^a temporada de medições na área do Lixão de Maceió..	71
28 Precipitação diária (mm) durante a 3 ^a temporada na área do Lixão de Maceió-AL.	73
29 Radiação solar global (R_g) diária ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) durante a 3 ^a temporada de medições na área do estudo.	74
30 Temperatura do Solo ($^{\circ}\text{C}$) nos níveis de 5, 25, 50 e 100cm durante a 3 ^a temporada de medições na área do Lixão de Maceió	75
31 Simulação da dispersão / concentração às 04h pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 08/12/2004.	78
32 Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 08 de dezembro de 2004 na área do Lixão de Maceió	79
33 Simulação da dispersão / concentração ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) às 04h pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 08/12/2004.	80
34 Perfil vertical da atmosfera gerado pelo GrADS para o dia 08/12/2004 às 03h, hora local na região do lixão de Maceió	81
35 Simulação da dispersão / concentração às 03h(a) e 14h(b) pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 11/12/2004.	83
36 Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 11 de dezembro de 2004 na área do Lixão de Maceió.	84
37 Perfil vertical da atmosfera gerado pelo GrADS para o dia 11/12/2004 às 03h(a) e 15h(b) – hora local na região do lixão de Maceió.	85
38 Simulação da dispersão / concentração ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) às 03h(a) e 14h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 11/12/2004	88

Figuras	Paginas
39 Simulação da dispersão / concentração às 5h(a) e 10h(b) pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia (g.m^{-3}) liberada pelo lixão Maceió em 17/02/2005	90
40 Velocidade escalar (m.s^{-1}) e direção do vento (graus) no dia 17 de fevereiro de 2005 na área do Lixão de Maceió	91
41 Simulação da dispersão / concentração (g.m^{-3}) às 05h(a) e 10h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 17/02/2005.	92
42 Simulação da dispersão / concentração às 10h(a) e 15h(b) pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia (g.m^{-3}) liberada pelo lixão Maceió em 23/06/2005.	94
43 Velocidade escalar (m.s^{-1}) e direção do vento (graus) no dia 23 de junho de 2005 na área do Lixão de Maceió	95
44 Simulação da dispersão / concentração (g.m^{-3}) às 10h(a) e 15h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 23/06/2005.	96
45 Velocidade escalar (m.s^{-1}) e direção do vento (graus) no dia 28 de junho de 2005 na área do Lixão de Maceió.	98
46 Simulação da dispersão / concentração às 9h pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia (g.m^{-3}) liberada pelo lixão Maceió em 28/06/2005.	99
47 Simulação da dispersão / concentração (g.m^{-3}) às 9h pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 28/06/2005.	101
48 Perfil vertical da atmosfera gerado pelo GrADS para o dia 28/06/2005 às 9h – hora local na região do lixão de Maceió.	101
49 Velocidade escalar (m.s^{-1}) e direção do vento (graus) no dia 03 de julho de 2005 na área do Lixão de Maceió	103
50 Linhas de corrente e magnitude do vento (m.s^{-1}) para as 15h (hora local) do dia 03/07/2005	104

Figuras		Paginas
51	Simulação da dispersão / concentração às 13h e 18h pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia (g.m^{-3}) liberada pelo lixão Maceió em 03/07/2005.	105
52	Simulação da dispersão / concentração (g.m^{-3}) às 13h(a) e 18h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 03/07/2005.	106

LISTA DE TABELAS

Tabelas		Páginas
1	Típica composição de gás de lixão	. 09
2	Principais impactos ambientais produzidos pelos gases do lixo	. 13
3	Caracterização dos modelos de dispersão	. 21
4	Relação entre Ângulo Solar e cobertura de nuvens com a Radiação Solar.	. 51
5	Categorias de estabilidade atmosférica em relação a velocidade do vento e radiação solar	. 52

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

- Z_i** - Altura da Camada Limite Atmosférica
- θ** - Temperatura Potencial
- C** - Concentração do poluente
- Q** - Quantidade do poluente emitida
- D** - Fator de Desaparecimento do poluente
- π** - Número Pi
- σ_y** - Desvio Padrão da dispersão horizontal
- σ_z** - Desvio Padrão da dispersão Vertical
- u** - Velocidade média do vento
- Z** - Altura onde se deseja obter as concentrações
- H** - Altura da fonte emissora
- t** - Tempo que o poluente leva para percorrer a distancia entre a fonte emissora e a quadrícula receptora
- T** - Meia vida do poluente
- λ** - Constante de desintegração do poluente
- C_o** - Concentração Inicial do poluente
- N** - Duração do dia
- Φ** - Ângulo Solar
- ε** - Declinação Solar

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CETESB	Companhia de Tecnologia do Saneamento Ambiental
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLN	Camada Limite Noturna
CPTEC	Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
DRH/AL	Diretoria de Recursos Hídricos do Estado de Alagoas
EMA	Estação Meteorológica Automática
ENEB	Leste do Nordeste do Brasil
FNL	Final Meteorological database
GDL	Gás do Lixo
GPS	Global Positioning System
GrADS	Grid Analysis and Display System
HYSPLIT	HYSPLIT MODELING SYSTEM – Hybrid Single – Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LDG	Landifill Gás
MDAP	Modelagem da difusão atmosférica de poluentes
NCEP	National Center for Environmental Prediction
NEB	Nordeste do Brasil
POA	Perturbações Ondulatória dos Alísios
SERHI	Secretaria de Estado de Recursos Hídricos e Irrigação
TMG	Tempo do Meridiano de Greenwich
VCAN	Vórtice Ciclônico em Altos Níveis
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
ZCAS	Zona de Convergência da América do Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISPERSÃO DOS POLUENTES H₂S e NH₃
PROVENIENTES DO LIXÃO DE MACEIÓ-AL NAS ÉPOCAS SECA E CHUVOSA:
ESTUDO DE CASOS

MARIANO, Glauber Lopes. Simulação numérica da dispersão dos poluentes H₂S e NH₃ provenientes do lixão de Maceió-AL nas épocas seca e chuvosa: estudo de casos. Orientador: Dr. Marcos Antônio Lima Moura. Maceió-AL, 2006. 150p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia).

RESUMO

A cidade de Maceió, devido à quase não existência de indústrias poluidoras, possui o seu Lixão, localizado no bairro de Cruz das Almas (LAT 09°33' S; LON 35°46' W) como uma das principais fontes de emissão de poluentes atmosféricos. São dois os principais motivos de reclamação por parte dos moradores do seu entorno: as cinzas resultantes da combustão espontânea do lixo, principalmente durante o período seco da região (outubro, novembro, dezembro e janeiro), e a emissão de gases produzidos pela atividade bacteriana no lixo, que ocorre essencialmente durante o ano todo, sendo mais percebido pela população circunvizinha no período chuvoso (abril, maio, junho e julho). Os poluentes emitidos que mais se destacam são a Amônia (NH₃) e o Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) devido ao seu poder odorífero. O objetivo principal deste trabalho é simular a dispersão dos poluentes citados através de dois modelos: HYSPLIT_4 (HYSPLIT_4 MODELING SYSTEM – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) – instalado no Air Research Laboratory / NOAA, disponível on-line, e um modelo gaussiano adaptado para as condições do lixão. Para servir de dados de entrada do segundo modelo foram realizadas 3 experiências de campo para medição de diversas variáveis meteorológicas, sendo duas dentro do período seco e uma no período chuvoso da região, além de medições da temperatura para cinco níveis do solo, objetivando estimar o nível de maior emissão de gases do lixo com instalação de uma Estação Meteorológica Automática (EMA). Constatou-se também a importância da estabilidade atmosférica, velocidade do vento, temperatura do ar e do solo para a dispersão dos poluentes. O raio da máxima concentração nas simulações do HYSPLIT_4 foi entre 2 e 11km enquanto as simulações através do modelo gaussiano mostraram uma maior concentração até 3km, na direção do vento, da fonte poluidora. Devido à direção predominante do vento os bairros mais afetados pelos poluentes são: Cruz das Almas, São Jorge, Serraria, Barro Duro e Feitosa no período seco, além de Jacarecica no período chuvoso, direção predominante do vento Leste e Sul respectivamente.

Palavras Chaves: Meteorologia, Poluentes, Lixão e Dispersão.

NUMERIC SIMULATION OF THE DISPERSION OF THE POLLUTANTS H₂S e NH₃
RELEASED BY THE MACEIÓ-AL LANDFILL IN THE DRY AND WET PERIODS:
CASE STUDIES.

MARIANO, Glauber Lopes. Numeric simulation of the dispersion of the pollutants H₂S e NH₃ released by the Maceió-AL landfill in the dry and wet periods: Case studies. Adviser: Dr. Marcos Antônio Lima Moura. Maceió-AL, 2006. 150p. Dissertation (Master in Meteorology).

ABSTRACT

The city of Maceió, due to the almost non-existence of pollutant industries, has its landfill, located at Cruz das Almas (LAT 09°33' S; LON 35°46' W), as one of the main sources of atmospheric pollutants emission. There are two main reasons of complaint by the inhabitants of its surroundings: the ashes resultant from the spontaneous combustion of the garbage, mainly during the dry period of the region (October, November, December and January), and the emission of gases produced by the bacterial activity, which occurs essentially throughout the whole year, being most noticed by the inhabitants in the wet period (April, May, June and July). The main pollutants emitted are Ammonium (NH₃) and Hydrogen Sulfide (H₂S), due to their smell. The main objective of this work is to simulate the dispersion of the pollutants mentioned, through two models: HYSPLIT_4 (HYSPLIT_4 MODELING SYSTEM – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) – installed at the Air Research Laboratory / NOAA, available on-line, and a gaussian model adapted for the landfill's condition. For an input of the second model, 3 seasons of measurements were made, with two being in the dry period and one being in the wet period, for several meteorological variables; also, 5 levels of soil temperature were measured, to estimate the level of highest gas emission from the garbage, with the installation of an Automatic Meteorological Station. It was also noticed the importance of atmospheric stability, wind velocity, air and soil temperature for the pollutants dispersion. The ratio of maximum concentration in the HYSPLIT_4 simulations were between 2-11km, while the simulations through the Gaussian model showed a higher concentration up to 3km, in the wind direction, of the pollutant source. Due to the predominant wind direction the most affected districts are: Cruz das Almas, São Jorge, Serraria, Barro Duro e Feitosa in the dry period, and Jacarecica in the wet period, predominant wind direction East and South, respectively.

Key Words: Meteorology, Pollutants, Landfill and Dispersion.

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos maiores desafios para a gestão das cidades, devido aos diversos fatores de ordem natural, social e econômica envolvidos. A mesma, nas regiões urbanas, tem aumentado devido à crescente atividade industrial e ao aumento do número de veículos motorizados em circulação. A qualidade do ar urbano tem causado sérios problemas às condições de vida das pessoas, das plantas e dos animais que vivem nas cidades e arredores.

Entende-se como poluição do ar a mudança em sua composição ou em suas propriedades, decorrentes das emissões de poluentes, tornando-o impróprio, nocivo ou inconveniente à saúde, ao bem-estar público, à vida animal e vegetal e até mesmo ao estado de conservação de determinados materiais.

Ayoade (1998) alerta que a poluição do ar afeta o clima das áreas urbanas de diversas formas. O próprio balanço energético das cidades sofre interferência, pois os poluentes refletem, dispersam e absorvem radiação solar. Muitos poluentes também servem de núcleos de condensação, sendo, portanto, abundantes no ar das cidades, cuja umidade já é substancialmente abastecida através da evaporação, dos processos industriais e dos automóveis, que emitem grandes quantidades de vapor d'água. Conseqüentemente, a tendência da precipitação é aumentar sobre as áreas urbanas. Contudo, os efeitos mais alarmantes da poluição atmosférica ocorrem na saúde da população urbana.

A poluição do ar é um problema complexo, devido não somente às dificuldades de identificar os reais efeitos dos contaminantes na saúde da

população, mas ao enorme número de fatores envolvidos. A quantidade de poluentes na atmosfera é considerada atualmente um dos mais importantes indicadores ambientais para determinar as condições de saúde pública, devido à responsabilidade que tais contaminantes têm em muitas patologias respiratórias (Galvão *et al.*, 1998).

Sabe-se que as concentrações dos poluentes presentes na atmosfera variam conforme tempo e espaço, em função das reações químicas, das condições meteorológicas (como vento, turbulência, estabilidade atmosférica, etc.) e da topografia da região. A atmosfera é um dos principais transportadores de contaminantes químicos. Entretanto, não se tem uma idéia clara da gravidade da poluição atmosférica dos grandes centros urbanos brasileiros devido à limitação de informações a tal respeito.

Após sua emissão por uma fonte qualquer, os poluentes percorrem diversos caminhos, em sua difusão no ambiente, até chegarem ao solo, ar e/ou água. O nível de concentração em cada ponto do percurso dependerá de diversos fatores, como a taxa de emissão, características de sua dispersão (em razão das propriedades do poluente e do meio) e a taxa de remoção do ambiente por agentes físicos, químicos e biológicos ao longo de todo o percurso. A interação entre um poluente e o meio receptor resulta em um efeito cuja natureza, escala e importância, bem como sua variação ao longo do tempo, é objeto central dos estudos de avaliação de impacto e risco (Brilhante, 1999).

Vale salientar que o transporte dos contaminantes atmosféricos ocorre simultaneamente aos processos de mistura e diluição, através de reações químicas. Por meio disso, as concentrações dos poluentes decrescem com o

aumento da distância das fontes emissoras e o nível das concentrações ambientais se reduz.

Dependendo das condições meteorológicas e topográficas, esses poluentes podem ser dispersos rapidamente ou podem ser concentrados em determinados locais, causando diversos transtornos à população circunvizinha às fontes. Além da velocidade do vento, outro fenômeno que ajuda na eliminação dos poluentes é a chuva. Elas “lavam” a atmosfera decantando não só os materiais particulados, mas também ajudam na dissolução de gases como o SO_2 e os NO_x .

A cidade de Maceió tem como uma grande fonte de poluentes e de conseqüentes reclamações dos moradores circunvizinhos o lixão da cidade. Lixões são aterros sanitários do tipo comum, onde o lixo é apenas descartado no solo a céu aberto sem qualquer tratamento (Lima, 1995), que é uma forma muito comum nos municípios brasileiros. Os problemas principais de um lixão localizado em área urbana são o odor característico de material decomposto na época chuvosa, provocado por uma maior atividade bacteriológica emitindo principalmente gás sulfídrico e a fumaça ocasionada de combustões espontâneas no período seco. Os odores são produzidos pela decomposição do material por bactérias aeróbicas e anaeróbicas, que se alimentam desse material, produzindo gases como o Metano (CH_4), Dióxidos de Carbono (CO_2), Sulfetos de Hidrogênio (H_2S) e Amônia (NH_3) (Villarrubia e Villarrubia, 2003). Já a combustão ocorre devido ao gás metano (espontânea) ou pode ser provocada também pelos catadores.

Apesar de existirem vários modelos computacionais que podem ser usados no estudo da dispersão de poluentes atmosféricos, no presente estudo utilizamos o HYSPLIT_4 tipo híbrido, pois o cálculo da advecção e difusão é baseado no método Lagrangeano, enquanto o cálculo da concentração dos poluentes é feito a partir do método Euleriano, também outro modelo tipo Gaussiano desenvolvido por Lapa & Silva (1993) e adaptado para as características do lixão de Maceió-AL. A maior parte dos modelos operacionais para a estimativa da dispersão de gás e partículas é baseada na aproximação Gaussiana (Moreira & Tirabassi, 2004).

O objetivo principal desse trabalho consiste em ampliar os conhecimentos da dispersão da amônia (NH_3) e do Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) emitido pelo lixão de Maceió, utilizando, para tal, simulações numéricas feitas através do modelo HYSPLIT_4 (HYSPLIT MODELING SYSTEM – Hybrid Single – Particle Lagrangian Integrated Trajectory) e por um modelo gaussiano adaptado para as condições locais. Além de estudar a frequência da distribuição de ventos do local, bem como o comportamento de algumas variáveis meteorológicas (entre elas radiação solar, temperatura, precipitação) e como afetam a produção de odor/fumaça na região do lixão.

2. REVISÃO LITERÁRIA

2.1 Lixo Urbano

O lixo urbano é todo e qualquer resíduo que resulte da atividade diária do homem em sociedade e os fatores principais que regem sua origem e produção são, basicamente, dois: o aumento populacional e a intensidade da industrialização (Lima, 1995). Nos últimos 30 anos a população nos grandes centros urbanos triplicou ou quadruplicou, desse modo a quantidade de lixo produzida nesses grandes centros tornou-se um dos grandes problemas dos administradores urbanos em relação ao seu gerenciamento (Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, 1991). "Estimativas feitas por Yen & Scanlon (1975) indicam que uma cidade de 1 milhão de habitantes pode gerar um volume anual de rejeitos capaz de cobrir uma área de 80ha com profundidade média de 5 m". (Feitosa & Filho, 1997).

Jardim *et al.* (1995) citam que as características dos resíduos sólidos urbanos são influenciadas por vários fatores como: número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população; condições climáticas e sazonais; as mudanças na política econômica de um país também são causas que influenciam na composição dos resíduos sólidos de uma comunidade.

A quantidade e a composição do lixo são inerentes aos locais onde são produzidos, mas de acordo com estimativa do Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios (Barros *et al.*, 1991), no Brasil cada pessoa produz, em média, de 400 a 700 g (esse valor varia para até 1200 g, dependendo da região do

país) de resíduos por dia, e mais da metade desse valor corresponde a resíduos orgânicos, cujo percentual é mostrado na figura 1.

No Brasil, de acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2000), coleta-se cerca de 228.413 toneladas de resíduos sólidos diariamente, sendo 125.258 toneladas referentes aos resíduos domiciliares. Conforme Jucá (2002), atualmente, cerca de 1.100 toneladas de resíduos sólidos chegam diariamente ao lixão de Maceió, onde são espalhados, sem nenhum material de cobertura.

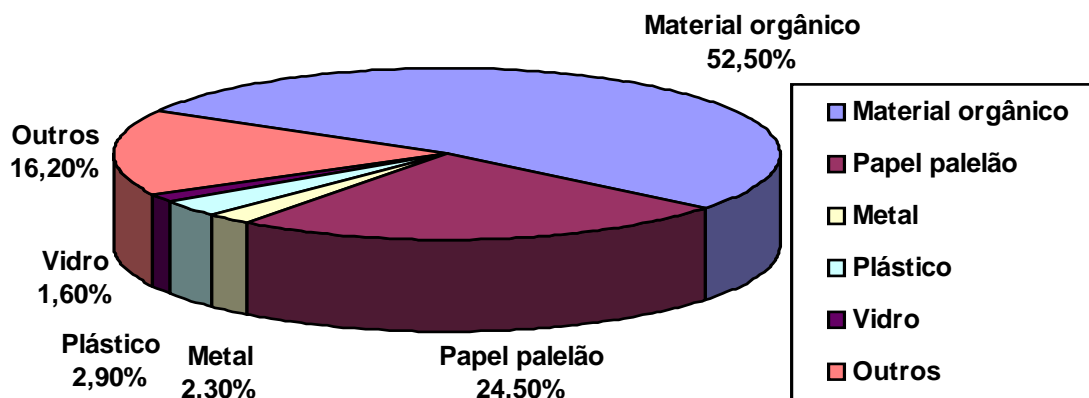


Figura 1 – Distribuição média da composição do lixo no Brasil.

Fonte: (IPT, 2000)

Uma comparação feita entre diversos países do mundo por Rodrigues & Cavinato (1998), indica que o lixo domiciliar brasileiro possui uma das taxas mais elevadas de detritos orgânicos em sua composição, sendo caracterizado, portanto como um lixo de baixo poder calorífico e de grande volume de produção de chorume (líquido escuro produzido pela decomposição anaeróbica).

Conforme a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB – 1989), realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (1991), a disposição final do lixo nos municípios brasileiros em média fica 76% para os lixões, 13% é levado para aterros controlados, 10% para aterros sanitários e apenas 1% de todo lixo dos municípios brasileiros passam por algum tipo de tratamento, seja ele compostagem, reciclagem e incineração. De acordo com a NBR 10.703 da ABNT (1989), “O lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública”.

Quando o lixo é disposto inadequadamente, vários problemas são causados, como a poluição do solo, do ar e da água; aumento na incidência de doenças provocadas pela presença de vetores como insetos e roedores; há risco de fogo, de deslizamentos e de explosões locais, além do prejuízo estético ocasionado na área. A parcela da população mais afetada é a mais carente, que não podendo morar em lugares mais nobres, muitas vezes convive próximo ao local dos despejos e por falta de oportunidades passam à condição de "catadores", expondo-se diretamente aos problemas apontados. (Guimarães, 2000).

2.2 Poluição Ocasionalada por Lixões

De acordo com Guimarães (2000), o resíduo urbano é muito rico em matéria orgânica, que em contato com o ar, começa a sofrer o processo de oxidação, iniciando a degradação progressiva do material. A decomposição dos resíduos

resulta na produção de gases como o metano (CH_4), o dióxido de carbono (CO_2), o nitrogênio (N_2), etc, juntamente com o resíduo mineralizado, além de um líquido (chorume) que em regiões com alto índice pluviométrico, tem sua quantidade muito aumentada pela infiltração da chuva.

2.2.1. Poluição do Ar

A decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários sejam eles controlados ou não (lixões), se inicia primeiramente por via aeróbica e posteriormente, quando todo o oxigênio tenha sido consumido, por via anaeróbica. Este processo conduz a formação de um biogás conhecido por gás do lixo (GDL), gas de vertedero (GDV) ou “landifill gás” (LFG). A diferença entre o que ocorre em uma fermentação aeróbica, em que as bactérias que participam do processo dispõem de oxigênio suficiente e liberam dióxido de carbono, e no processo anaeróbico é que se divide em duas fases: na primeira, as bactérias transformam os resíduos orgânicos em álcool, aldeídos e ácidos para que na segunda fase esses compostos sejam transformados em dióxido de carbono e metano (Villarrubia & Villarrubia, 2003).

De acordo com Rodrigues & Cavinato (1998) os produtos resultantes pela decomposição aeróbica são o gás carbônico, o vapor d'água e os sais minerais, porém na decomposição anaeróbica, ocorrido quando o lixo está muito amassado ou enterrado, gera entre outros produtos, alguns gases como o metano e o gás sulfídrico. É estimado que lixo sólido é 75% orgânico, podendo gerar até $0,1867\text{m}^3$

(6,6 pés³) de gás por 453,5924g (1 libra de peso) (Hickman, 1999). Os maiores componentes dos gases do lixo são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Típica composição de gás de lixão

Componente	Volume
Metano (CH ₄)	45% a 58%
Dóxido de Carbono (CO ₂)	32% a 45%
Compostos Orgânicos Não-Metano	0% a 0.25%
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	0 – 200 ppm
Amônia	0 – 0,2 ppm
Compostos Orgânicos Voláteis (VOC)	0% a 0.1%
Monóxido de Carbono (CO)	0% a 0.2%
Hidrogênio (H ₂)	Traços até 1%
Nitrogênio (N ₂)	0% a 3%

Fonte: Soltani-Ahmadi, 2000

Entre todos os componentes, o metano é o componente mais problemático devido ao fato de sua concentração, nas áreas de disposição de resíduos sólidos, ser em torno de 3×10^5 vezes maior que a encontrada na atmosfera, exigindo técnicas apropriadas de controle (UNICEF, 2002). Trata-se de um hidrocarboneto pouco tóxico, mas que serve de base para a formação de poluentes secundários, por reações atmosféricas (Branco & Murgel, 1995). As emissões de metano por aterros sanitários são estimadas entre 0,0002 até $4000 \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, dependendo do tamanho do aterro, a fase em que se encontra o lixo e o tipo de lixo presente (Bogner *et al.*, 1997). Amstel (1998) estimou que a produção de metano por lixões é de cerca de 30 Ton/ano, sendo uma das principais fontes de metano nas regiões tropicais.

A emissão do metano na camada mais alta do lixo depende da temperatura e da umidade do solo que por sua vez é relativamente maior no período do verão. Como resultado disso, as emissões de metano mostram uma variação sazonal com diminuição da quantidade de metano emitido se comparado o verão com o inverno (Boeckx *et al.*, 1996).

Conforme Villarrubia & Villarrubia (2003), o processo de formação do gás do lixo compreende as seguintes fases:

Fase I – se inicia imediatamente depois da deposição do lixo. Ocorre uma fermentação aeróbica com uma fabricação de CO₂. Esta fase tem uma duração de aproximadamente 15 dias e os componentes majoritários do gás formado são o nitrogênio e o dióxido de carbono.

Fase II – consumido o oxigênio, se inicia a decomposição anaeróbica aumentando a concentração de CO₂ e de H₂, diminuindo a de N₂ presente. Esta fase dura aproximadamente dois meses.

Fase III – quando a decomposição anaeróbica é finalizada, começa a aumentar a concentração de metano (CH₄), enquanto diminuem as de CO₂ e H₂, durante aproximadamente dois anos.

Calcula-se que em teoria, 1 kg (2.2 lb.) de lixo irá gera aproximadamente 0.74 m³ (0.97 yd.³) de gás, além disso observou-se através de experimentos que

dependendo da composição do lixo, existe uma certa velocidade de decomposição, velocidade essa que influencia a emissão de gases (MSW Management, 2000), essa teoria é também defendida por Faassen (2003).

Peer *et al.* (2003) comentam em seu trabalho que os gases emitidos pelos lixões possuem alta variabilidade espacial e que as emissões freqüentemente possuem alguns canais preferenciais de escape. Além disso, emissões oriundas de dois locais, distantes poucos metros de distância, podem diferir até em três ordens de magnitude. A migração de gases em sentido horizontal é comum e que o chorume dos lixões é conhecido por ter maior emissão relativa se comparado com a emissão da superfície. No que diz respeito à variação no tempo, eles complementam afirmando que as emissões são resultantes de diferença da pressão interna e do ambiente, e que o aumento da pressão ambiente reduz as emissões temporariamente. Quando a produção de gás nos lixões é baixa, o aumento da pressão pode causar o fluxo interno de ar dentro dos montes de lixos.

Villarrubia & Villarrubia (2003) consideram que a produção global de biogás esteja entre 200 e 300 m³ por Tonelada de resíduo durante todo o processo de decomposição e emissão de gases (aproximadamente 30 anos), sendo que 125 a 200 m³ são produzidos nos primeiros 10 anos, e que teoricamente a quantidade de biogás que pode obter a partir de uma tonelada de resíduos sólidos é de aproximadamente 400 m³.

A figura 2 mostra o comportamento da produção de biogás conforme o tempo, em termos dos constituintes do biogás. O tempo de vida de um aterro é geralmente entre 15 e 20 anos, indicando que o O₂ e o N₂ começam a decair a partir da

deposição do lixo no aterro, enquanto que o CO_2 e o CH_4 só começam a emitir significativamente para a atmosfera após 1 ou 2 anos de deposição (Kuwahara *et al.*, 1999).

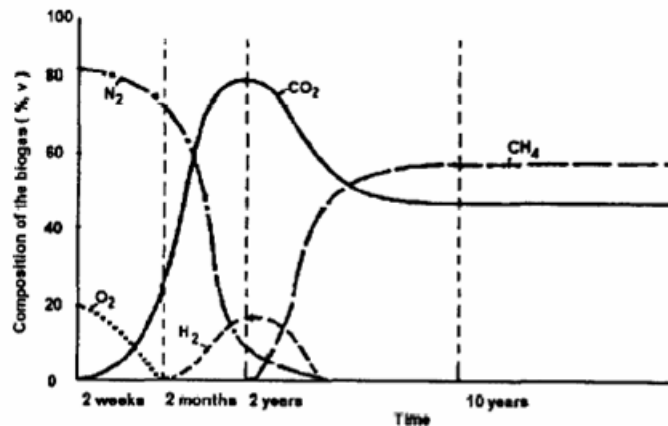


Figura 2 - Produção dos constituintes do biogás de lixo conforme o tempo (Lima, 1985).

2.2.2. Problemas Ambientais Provocados pelos Gases Provenientes do Lixo

Existem muitos problemas ambientais referentes à disposição do lixo. Eles podem ser definidos como: poluição das águas por chorume, problemas com o odor do lixo, risco de explosões e combustões, risco de sufocamento, dano a vegetação e emissões de gases de efeito estufa. Todos os problemas mencionados são problemas locais, exceto as emissões de gases de efeito estufa (Department of the environment – UK, 1991).

O ar encontra-se contaminado pelo mau cheiro provocado pela emanção dos gases provenientes da biodegradação da matéria orgânica, além da fumaça

resultante da combustão provocada ou espontânea. Em ambos os casos, a combustão de um material tão heterogêneo produz densa e irritante fumaça, muito desagradável para a vizinhança, e que normalmente contém moléculas orgânicas tóxicas como a dioxina, um agente cancerígeno (Leite, 1973).

Na tabela abaixo Villarrubia & Villarrubia (2003) citam os principais impactos ambientais produzidos pelos gases presentes no lixo:

Tabela 2 - Principais impactos ambientais produzidos pelos gases do lixo.

Meio Sistema	Efeito do impacto	Agentes principais
Atmosfera	Efeito estufa	CH ₄ , CO ₂
	Destruição da camada de ozônio estratosférico	CFC's e CH ₄
	Formação de ozônio estratosférico e <i>smog</i> (mistura de fumaça e neblina)	CH ₄
Águas	Aumento da acidez	CO ₂ e outros
	Contaminação química e bacteriológica	
Flora	Morte por asfixia e por toxicidade absorvida pelas raízes	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, NH ₃
Saúde	Gases odoríferos e tóxicos	H ₂ S, NH ₃

Fonte: Villarrubia & Villarrubia, 2003

Conforme Rodrigues & Cavinato (1998) o homem pode ser contaminado com germes patogênicos (germes que podem provocar doenças) se viver em contato direto e freqüente com o lixo, pois fica permanentemente exposto aos germes,

aumentando suas chances de contrair doenças, tanto quanto vivendo distante dos resíduos, pois o solo e principalmente a água servem como veículo de disseminação dos micróbios, alguns exemplos deste transporte: se o lixo permanecer descoberto, a chuva poderá levar os mesmos para córregos e rios ou o chorume formado nos montes de resíduos arrasta os germes para o subsolo, contaminando as águas de poços domésticos, através do lençol subterrâneo.

2.2.3. Dispersão dos Poluentes

Assunção (1998) afirma que os poluentes lançados na atmosfera sofrem o efeito de processos complexos, sujeitos a diversos fatores que determinam a concentração do poluente no tempo e no espaço. Assim, a mesma emissão, sob as mesmas condições de lançamento no ar, podem produzir concentrações diferentes num mesmo local, dependendo das condições meteorológicas presentes.

A pressão e composição dos gases variam durante a vida ativa de um aterro sanitário. A geração do dióxido de carbono e do metano conduz para o aumento da pressão. Estas mudanças criam os gradientes de pressão que conduz para a advecção e, conseqüentemente, difusão dos gases. A geração do calor influencia também a migração dos gases por causa do seu efeito nas propriedades termodinâmica dos líquidos. Depois de percorrer o trajeto de menos resistência, o gás migrará verticalmente à atmosfera ou lateralmente além dos limites do aterro (Nastev *et al.*, 2001).

Estudos desenvolvidos pela CETESB (1998), relacionados a programas de monitoramento da qualidade do ar, abordaram parâmetros meteorológicos como dispersão, sistemas frontais, índice pluviométrico, inversões térmicas, calmarias e velocidade do vento, como causa de dispersão de poluentes.

Almeida (1999) lista os principais fenômenos meteorológicos que influenciam na dispersão dos poluentes atmosféricos em escala local:

- Vento – A dispersão dos poluentes ocorre preferencialmente na direção dos ventos. O vento tem um efeito de diluição sobre as concentrações de poluentes, proporcional a sua velocidade horizontal. Assim como a velocidade do vento aumenta, o volume de ar em movimento lançado por uma fonte em um determinado período de tempo também aumenta. Se a taxa de emissão é relativamente constante, ao dobrar-se a velocidade do vento diminuir-se-á pela metade a concentração dos poluentes, pois a taxa de concentração é inversamente proporcional à velocidade do vento;
- Turbulência – A turbulência da atmosfera exerce um papel importante no transporte e difusão e, conseqüentemente, dispersão da poluição atmosférica. De modo geral, a turbulência da atmosfera é determinada pela velocidade dos ventos e pelo perfil vertical de temperatura. A movimentação na direção vertical pode ser atribuída à turbulência térmica resultante de parcelas de ar aquecido que ascende da superfície terrestre, sendo substituídas pelo ar frio em sentido descendente. A movimentação dos poluentes na direção horizontal é determinada pela turbulência

mecânica provocada pelo vento na sua instabilidade direcional e de velocidade, associada às características topográficas da região;

- Inversão Térmica – Os movimentos verticais do ar dependem, fundamentalmente, do perfil vertical de temperatura do ar, ou seja, da variação da temperatura do ar com altitude. A inversão térmica atua como uma barreira limitando assim a dispersão dos poluentes;
- Classe de estabilidade – A estabilidade atmosférica ocorre na ausência de radiação solar, ausência de nuvens e ventos leves. Céu nublado e ventos fortes caracterizam a condição neutra da atmosfera. Quanto mais estável a atmosfera, menor será a diluição e o transporte dos poluentes, contribuindo para a poluição do ar;
- Índices pluviométricos – As chuvas influenciam na qualidade do ar de maneira acentuada, sendo um importante agente de autodepuração da atmosfera, principalmente em relação às partículas presentes na atmosfera, e aos gases solúveis ou reativos com a água.

2.3. Características de Algumas Variáveis Meteorológicas na Influência nos Gases de Lixões

De Walle *et al.* (1978) afirmaram que o lixo descarregado em um lixão está sujeito a processos de degradação aeróbica até o oxigênio ser totalmente consumido. Por essa razão, a temperatura do lixo decresce repentinamente, porém,

decrece para um valor estático que corresponde ao consumo total de oxigênio. As camadas de lixo que foram compactadas e cobertas novamente por lixo ou terra tornando impossível a penetração do oxigênio. Então uma subsequente fase anaeróbica se inicia e determina um aquecimento da temperatura do lixo.

Assim que o lixo é depositado a sua temperatura aumenta pela existência de reações aeróbicas nas camadas superiores da célula de lixo, devido a presença do oxigênio. Esta fase dura cerca de duas a três semanas, até que o oxigênio gradualmente vai decrescendo à medida que outras camadas de lixo são depositadas acima. Cerca de um ano depois sem a presença de reações, iniciam-se reações anaeróbicas que estão diretamente relacionadas com a produção do biogás. Essas reações são exotérmicas e a temperatura do lixo aumenta. A produção de biogás depende estritamente da temperatura do lixo, assim como os processos biológicos dependem da variação da temperatura (Andreottola & Cossu, 1988).

Park & Shin (2001) estudaram os efeitos das variações entre dia e noite para a emissão de gás do lixo. Quando a temperatura do ar foi mínima durante o dia o fluxo de gás também se encontrou no seu mínimo, enquanto que o fluxo alcançou o seu pico máximo quando a temperatura do ar foi máxima durante o dia. Eles também observam mudanças do fluxo de gás oriundo do lixo conforme as estações. A taxa de emissão do fluxo decresceu comparando-se verão e inverno.

2.4. Combustão Espontânea

A combustão espontânea é um processo exotérmico que para ocorrer precisa de material para servir de combustível, temperatura elevada e oxigênio (Gärdenäs & Thömqvist, 1984). A combustão espontânea em aterros sanitários podem ocorrer em pilhas recentes de lixo municipal, industrial, sobras de construções e de demolições após curtos períodos, tipicamente variando de alguns dias a diversos meses. Aproximadamente 50% dos fogos ocorrem no lixo armazenado a menos de 2 semanas (Hogland *et al.*, 1996).

A sobra de material orgânico é sensível à oxidação pela biodegradação e apresenta um risco mais elevado de combustão espontânea do que o lixo que tem sido exposto aos mesmos processos durante um longo período. A presença do monóxido de carbono (CO) nos gases desenvolvidos é uma boa indicação da iminência da combustão espontânea (Tamaddon *et al.*, 1995).

Os materiais que aumentam o risco da combustão espontânea em depósitos de lixo são: alimentos, gorduras, carvão, plásticos, lâmpadas de sódio, e lixos resultantes da manipulação do petróleo, como pano e latas que contém solventes (Thörnqvist, 1987). Porém, conforme Saito *et al.* (2001) o lixo oriundo de cozinhas domésticas não é um bom material para que ocorra combustão espontânea em aterros, pois possui maior quantidade de água comparado a outros lixos municipais como: madeira, papel e plástico.

O calor é produzido no material orgânico quando o mesmo é armazenado em grandes quantidades, onde ocorrem diversos processos. Processos físicos, como a

adsorção da água para superfícies secas, ou condensação do vapor de água na superfície fria, podem conduzir a um aquecimento (Thörnqvist, 1987), mas estes processos físicos são mais significativos em temperaturas baixas, exemplo: 20°C ou menos. A atividade microbiológica pode também contribuir para o aumento da temperatura entre 0°C-75°C, mas essa atividade é maior e, portanto, de maior importância entre temperaturas de 20°C a 60°C (Hogland & Marques, 2003).

Hogland *et al.* (1996) afirmam que a atividade dos processos que geram calor dentro da pilha de lixo é geralmente maior pela presença da ventilação. A temperatura pode aumentar ao ponto onde ocorre combustão espontânea. Panos usados em pintura a óleo, placas de fibra, sobras de algodão, latas com solventes, cocos secos etc.. aumentam o risco da sua ocorrência. Os autores ainda comentam que o lixo é armazenado sobre condições aeróbicas e anaeróbicas. Inicialmente, as circunstâncias aeróbicas dominam e as bactérias aeróbicas usam o oxigênio molecular para decompor o lixo orgânico em dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O) e produzir calor.

2.5. Modelos Numéricos de Transportes de Poluentes

Existem dois modos para se descrever os fenômenos de dispersão ou difusão: o método Euleriano e o método Lagrangeano. No método Euleriano, se descreve o comportamento das espécies químicas em relação a um sistema fixo de coordenadas. É usado normalmente no estudo de fenômenos de transferência de calor e massa. No modo Lagrangeano, usado no estudo de fluidos, as mudanças de

concentração das espécies químicas envolvidas são descritas relativamente a um sistema de coordenadas que acompanha o movimento do fluido. Cada uma dessas abordagens resulta em expressões válidas para descrever a difusão turbulenta e a escolha de qual procedimento adotar depende das características da situação a ser analisada (MDAP, 2002).

Os modelos gaussianos, que podem ser considerados como uma subclasse dos dois modelos, euleriano e lagrangiana (Longhetto, 1980), são os mais comuns, mas por sua vez apresentam algumas limitações, como a aplicação no transporte de poluentes sobre superfícies complexas e situação com atmosfera extremamente estável. Eles devem ser utilizados em situações de vento constante e sob condição de turbulência homogênea, que dificilmente são encontradas na Camada Limite Atmosférica (CLA). Modelos gaussianos/lagrangianos do tipo *puff*, que são aperfeiçoamentos destes últimos, já possuem uma aplicabilidade bem maior, com a vantagem de consumir em média 30 vezes menos tempo de processamento dos resultados do que os modelos lagrangianos de partícula. Nesses modelos a pluma é representada por uma série de pacotes (nuvens) de material poluente (Souto *et al.*, 2001).

ZIV *in* FREITAS (1991) divide os modelos de dispersão em quatro grupos. Esta divisão, bem como as características dos modelos e seus campos de aplicação são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização dos modelos de dispersão.

Grupos	Características	Tipos	Campo de aplicação
MODELOS DE REGRESSÃO	O efeito de turbulência é desconsiderado.	proporcional	problemas
	Estabelecem as relações entre os níveis de concentração e as variáveis que irão produzir as concentrações.	Empírico	testes de modelos complexos
MODELOS DE DISPERSÃO SIMPLES	Simplificações da teoria da difusão de poluentes.	“box”	problemas gerais
	Consideram: emissão, velocidade e direção do vento e estabilidade atmosférica	turbulência atmosférica e laboratório de difusão	testes de modelos complexos
MODELOS DA TEORIA GAUSSIANA	Consideram que poluentes têm uma distribuição do tipo gaussiana, com turbulência homogênea. Desconsideram as atividades fotoquímicas dos poluentes	pluma gaussiana	pesquisas
		puff gaussiana	produções detalhadas
MODELOS DA TEORIA DO GRADIENTE DO TRANSPORTE	Admitem que o processo de dispersão de poluentes obedece uma taxa que é proporcional à magnitude do gradiente de concentração	analítico de dispersão	atividade química dos poluentes
		numérico de dispersão	pesquisas

Fonte: FREITAS, 1991.

Ferreira *et al.* (2004) afirma que o cálculo do transporte e dispersão de poluentes leva em consideração diversos fatores, entre eles, condições

meteorológicas, características das fontes poluidoras e dos gases emitidos (SO_2 , O_3 , etc). Dados como temperatura do ar, velocidade e direção do vento, incluído suas flutuações (turbulência), insolação no local de implantação da indústria, grau da condição de estabilidade da atmosfera, relevo, cinética das reações químicas entre outros, são fatores importantes. Ainda são necessárias as informações do comprimento da chaminé (altura e diâmetro), da localização da indústria e da composição química dos gases. A intensidade da propagação dos gases é diferente para cada tipo de fonte. A dispersão, portanto, é um processo extremamente complexo. Isto é devido ao fato que os escoamentos na baixa atmosfera, na CLA, são governados pela turbulência, cuja física ainda permanece longe de ser completamente compreendida. Portanto, os modelos de transporte de poluentes devem ser capazes de simular em detalhes os efeitos da turbulência para obter previsões confiáveis do deslocamento dos contaminantes.

As informações meteorológicas, variando no tempo, necessárias para os modelos de qualidade do ar, incluindo os efeitos da turbulência, podem vir de observações ou de saídas de modelos meteorológicos. Estes podem ser classificados ainda como diagnósticos ou prognósticos. Os modelos diagnósticos utilizam observações meteorológicas ou saídas de outros modelos para produzir os campos de velocidade necessários aos modelos de dispersão (Moraes, 2001).

Uma das dificuldades no uso de alguns modelos de dispersão de poluentes é a estimativa do grau de estabilidade atmosférica, segundo a classificação de Pasquill, cuja determinação depende de parâmetros meteorológicos, tais como a

radiação solar e cobertura de nuvens que nem sempre estão disponíveis e, por isso são utilizadas formas empíricas para a obtenção da mesma (Seinfeld, 1986).

Arigala *et al.* (1995) desenvolveram um modelo tridimensional que é baseado em uma descrição mais realista de biodegradação do lixo. Este modelo descreve o efeito de vários parâmetros na distribuição geral de pressão e dos fluxos de gás nas vizinhanças do lixão. A suposição mais importante do modelo é que os gases do lixo podem ser representados por um único gás, ignorando as diferenças nas propriedades de transporte dos gases constituintes.

2.5.1 Modelo Hysplit

Draxler & Hess (1997) afirmam que o HYSPLYT_4 é um sistema completo que computa trajetórias simples de dispersão complexa e simulação de deposição usando emissão de “puffys” de fumaça ou aglomerados de partículas. O modelo usa dados meteorológicos em pontos de grade, com três projeções de mapas (Polar, Lambert, Mercator) como opção do usuário. A razão de dispersão é calculada do perfil de difusidade vertical, cisalhamento do vento e da deformação horizontal do campo de vento. Concentrações de poluentes são calculadas em uma grade de pontos específica para fumaça e uma célula-média de concentração para partículas.

Segundo Czarnetzki (2003) o modelo HYSPLIT é um modelo híbrido, pois o cálculo da advecção e da difusão é baseado no método Lagrangeano, enquanto o cálculo da concentração dos poluentes é feito a partir do método Euleriano.

O uso de modelos numéricos de bastante complexidade para representar corretamente os processos de sub-grade, em especiais os de camada limite vêm se tornando ferramentas de grande utilidade para simular e prever outros fenômenos além dos meteorológicos. O modelo HYSPLYT_4 é utilizado pelo programa de emergência de acidentes nucleares, erupções vulcânicas e acidentes industriais como o RSMC (Regional Specialized Meteorological Center for Transport and Dispersion Model Products). O modelo também já foi aplicado para estudo da poluição da Ásia sobre o Hawaii, para estudo da “chuva azul” na Argentina e em outros estudos (Rolph, 2003).

Porém Czarnetzki (2003) afirma que o modelo HYSPLIT possui algumas limitações, dentre elas:

- Cuidados de uso próximo à fonte de poluente:
 - É usado uma média do coeficiente de difusividade vertical na camada de mistura;
 - Deve-se inserir no modelo o tempo desejado para que a pluma “puff” se desenvolva;
- As trajetórias são sensíveis ao perfil vertical do vento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Área de Estudo

A região em estudo é a circunvizinhança afetada direta e indiretamente pelo lixão de Maceió (LAT 09°33' S; LON 35°46' W). A cidade de Maceió está situada na região leste do estado de Alagoas (Figura 3) cobrindo cerca de 511 km² e com uma população estimada em aproximadamente 800 mil pessoas (IBGE, 2002). A região apresenta precipitação anual bastante variável e sofre grande influência de sistemas de grande escala, com direção de ventos alísios predominantemente de sudeste.

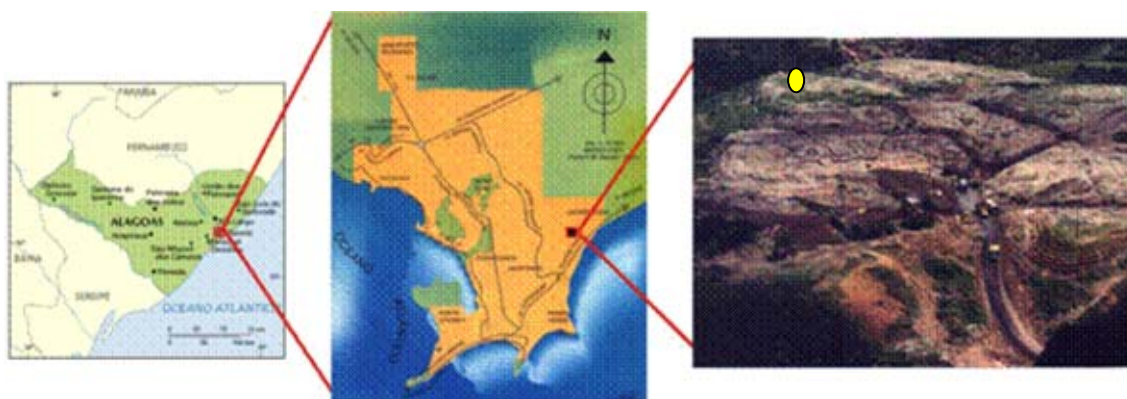


Figura 3 - Localização do Lixão de Maceió. No detalhe, localização do município de Maceió no mapa de Alagoas e vista aérea do Lixão de Maceió com a indicação do local da Estação Meteorológica Automática (EMA).

O Lixão de Maceió é localizado no bairro de Cruz das Almas a poucos metros da costa atlântica, em uma área de 22 hectares. No estado de Alagoas a

maioria das áreas utilizadas como Lixões, são de propriedade particular, geralmente usineiros e plantadores de cana-de-açúcar (Jucá, 2002).

Conforme Jucá (2002), atualmente, cerca de 1.100 toneladas de resíduos sólidos chegam diariamente ao lixão de Maceió, onde são espalhados, sem nenhum material de cobertura (figura 4). Há mais de uma década o lixão trabalha com sua capacidade superada. O lixão é constituído por oito células para receber lixo, mas apenas uma funciona. O mesmo autor complementa afirmando com base em dados de março de 2002 que o atual lixão do município de Maceió, normalmente referido como lixão de Cruz das Almas só suportaria a disposição de resíduos sólidos por no máximo 01 ano, mas até o presente ele continua em funcionamento.



Figura 4 - Vista do Lixão de Maceió/AL

3.2 – Período de Estudo

O período de estudo foi entre dezembro de 2004 e julho de 2005, pois neste intervalo de tempo é possível ter idéia da dispersão dos poluentes tanto na época chuvosa, que é caracterizada para a costa leste do nordeste (ENEB) nos meses de Abril, Maio, Junho e Julho, quanto para o período seco (Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro) de acordo com a Normal Climatológica obtida através da Diretoria de Recursos Hídricos do Estado de Alagoas (DRH/AL, 2003). O período de estudo foi subdividido em 3 campanhas de aproximadamente 15 dias cada.

Os períodos das campanhas de coleta de dados meteorológicos do lixão de Maceió/AL foram:

- 07/12/2004 a 22/12/2004
- 12/02/2005 a 26/02/2005
- 20/06/2005 a 04/07/2005

3.3 – Parâmetros Medidos

Para o estudo foi instalada uma estação meteorológica automática (EMA na área do Lixão, figura 5) que forneceu medidas a cada 10 segundos, mas que foram armazenadas em um sistema de aquisição de dados (Data-logger CR10X,

Campbell Scientific, EUA) a cada 5 minutos. A EMA foi constituída pelos seguintes instrumentos/sensores:



Figura 5 - Vista da Estação Meteorológica Automática (EMA) instalada no lixão de Maceió-AL.

- Anemômetro Horizontal - Modelo 05103 fabricado por R. M. Young, EUA. Anemômetro de alto desempenho feito de material anti-corrossivo e de alta resistência fornecendo dados de direção (graus) e velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Precisão de $\pm 0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e de ± 3 graus para velocidade e direção do vento respectivamente.
- Sensor de Temperatura e umidade do ar – Modelo HMP45C (Campbell Scientific, EUA) fornecendo dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e Umidade Relativa do Ar (%) com uma precisão do sensor de temperatura de: $- 0,3 + 0,005 T$ ($T \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e $0,1 - 0,005 T$ ($T \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e uma precisão do sensor de umidade relativa: $\pm 2 \%$ (U.R. $< 90 \%$) e 3% (U.R. $> 90 \%$);

- Piranômetro – Modelo SP-LITE (Campbell Scientific, USA) para medir radiação solar global ($W \cdot m^{-2}$) em um espectro de banda entre 0,4 e 1,1 μ m instalado a 3m do solo com precisão máxima de $\pm 5\%$.
- Bateria de Termopar – Termopar Tipo “T” (Campbell Scientific, EUA) fornecendo medidas de temperatura do solo em 4 níveis de profundidade: 5cm; 25cm; 50cm e 100cm.

Os dados de precipitação foram coletados entre os meses de Agosto de 2004 a Julho de 2005, enquanto a normal climatológica foi referente aos anos de 1961 a 2001.

Com os dados obtidos a cada 5 minutos foram gerados um grande volume de dados sendo necessário calcular médias. Foram utilizadas médias horárias e diárias dos períodos chuvoso e seco de cada variável. Também foram elaborados gráficos de cada variável anteriormente mencionada.

As direções do vento foram classificadas através de um intervalo de 22,5° em torno de cada ponto cardinal (figura 6). Para cada intervalo de direção, calculou-se freqüências através de um software de planilha eletrônica, e confeccionou-se gráficos polares com as mesmas.

Através da utilização de GPS (Global Positioning System) caseiro foram realizadas medidas das distâncias de alguns pontos conhecidos na região circunvizinha ao lixão e elaborada a Figura 7, onde foram traçados dois raios de 2km e 4km de distância, tendo como ponto central a localização do Lixão.

Através das figuras 7 e 8 foram realizadas análises das direções da dispersão dos poluentes quanto aos bairros atingidos e, conseqüentemente

determinação do distanciamento da propagação dos poluentes. Para estimativa de distância entre cada contorno fornecido nas simulações do modelo utilizou-se cálculos de Raisz (1953) onde cada grau de longitude, na latitude referente a localização do lixão, é de aproximadamente 110km.

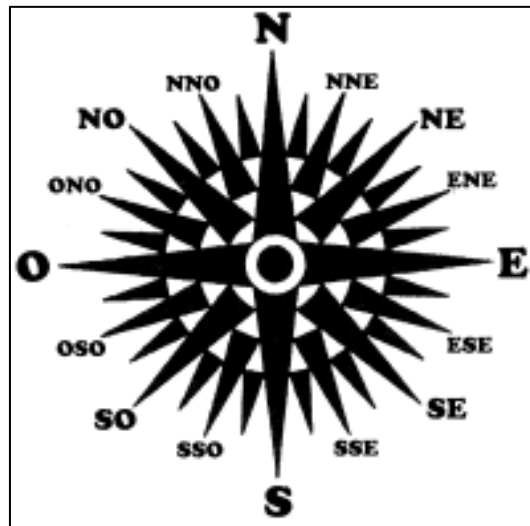


Figura 6 - Rosa dos ventos. Fonte: CNE(2005)

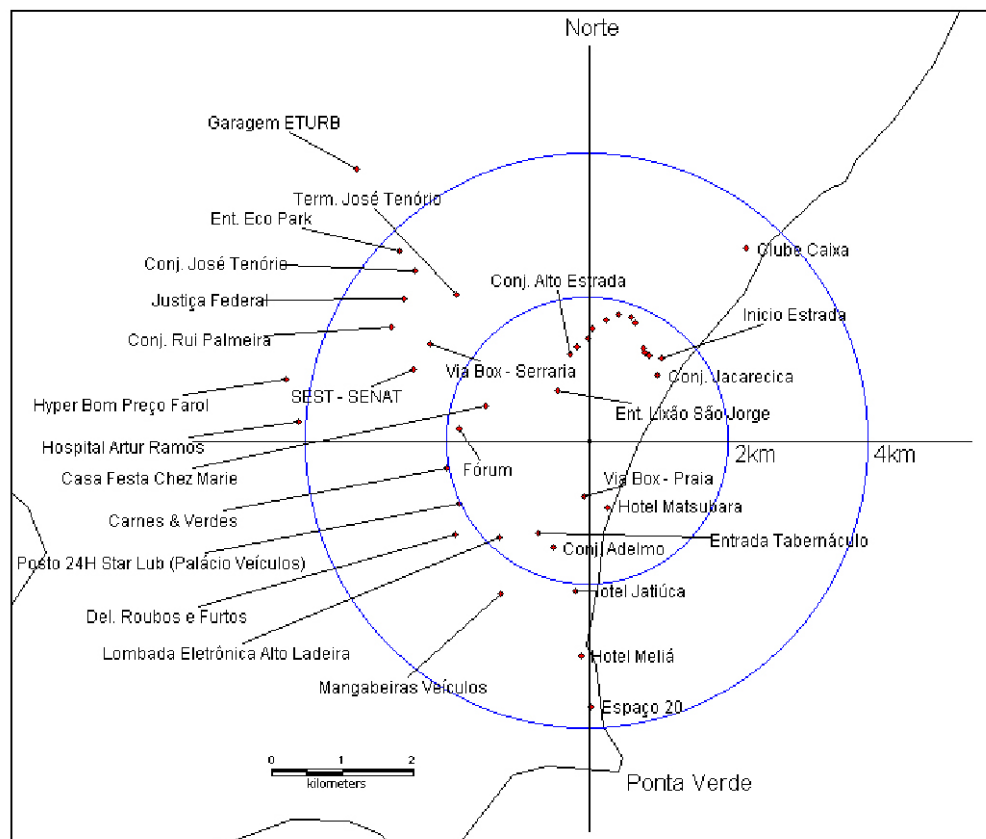


Figura 7 - Levantamento das distâncias (km) de alguns pontos no entorno do Lixão.

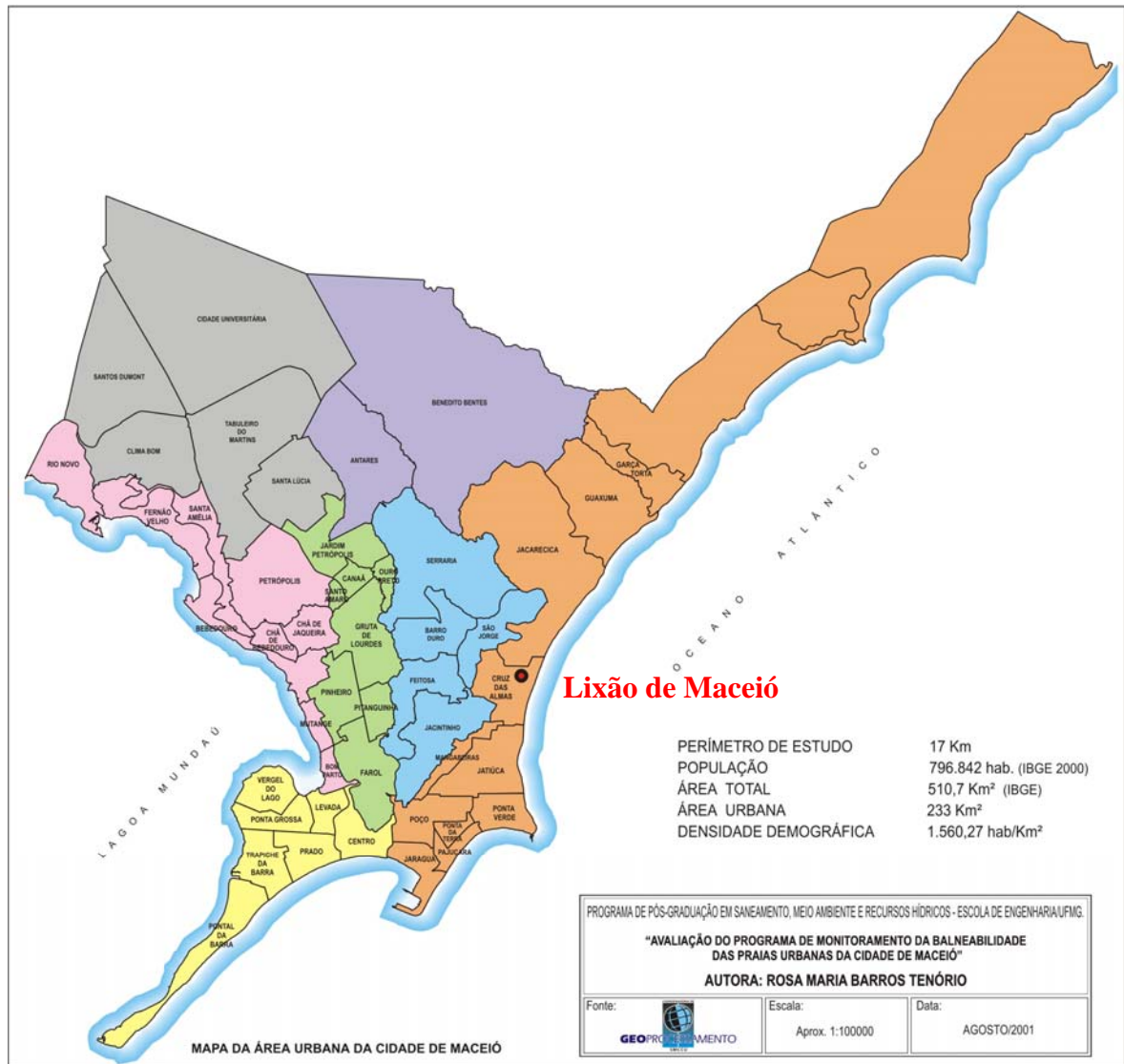


Figura 8 - Mapa geral do município de Maceió com a divisão dos bairros, regiões administrativas, população e área.

3.4 – Perfil Vertical da Atmosfera e Determinação da Camada Limite Atmosférica

Os dados utilizados para visualizar o perfil vertical da atmosfera foram de temperatura do ar (°C), temperatura do ponto de orvalho (°C), campo de vento

(Componente zonal-u e componente meridional-v). Todos estes campos foram obtidos nos horários de 00, 06, 12, 18 UTC (Z), extraídos do NCEP (National Center for Environmental Prediction) do projeto REANALYSIS (Kalnay, 2003).

O formato destes dados consiste numa grade com intervalo de espaçamento de 2.50 x 2.50 de latitude e longitude, dividido em 8 níveis da atmosfera (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300hPa) (Silva dos Santos,2005), porém só foram confeccionados gráfico até o nível de 700mb.

Foi utilizado um script desenvolvido no GrADS (*Grid Analysis and Display System*) para visualização do perfil vertical da atmosfera. A coordenada geográfica utilizada foi a do lixão de Maceió.

De posse dos dados foram plotados os perfis verticais através da utilização do software GrADS. Com o objetivo de ter uma melhor visualização da CLA, foram feitos outros gráficos com a altura limitada até 300mb, pois até essa altura pode-se analisar claramente o perfil vertical da atmosfera. O GrADS também foi utilizado para plotar as linhas de corrente e magnitude do vento nos dias e horários simulados.

Os perfis também permitiram determinar a altura da Camada Limite Atmosférica (CLA) (Z_i) utilizando a definição proposta por Tennekes (1973). Ele idealizou a CLA como sendo uma camada bem misturada separada do restante da atmosfera ,onde uma das propriedades termodinâmicas é constante com a altura, por uma descontinuidade seguida de uma inversão térmica. Este modelo tem sido utilizado em vários estudos (Fisch, 1996). Stull (1988) complementa a proposta de Tennekes (1973) afirmando que a Altura da Camada Limite Convectiva (CLC) se localiza onde o gradiente da temperatura potencial (θ) passa

de um regime de neutralidade ($d\theta_v/dz \approx 0$), para um regime de estabilidade ($d\theta_v/dz > 0$), já a da Camada Limite Noturna (CLN) localiza-se onde o gradiente da temperatura potencial passa de um regime de estabilidade ($d\theta_v/dz > 0$) para um regime de neutralidade ($d\theta_v/dz \approx 0$), no sentido ascendente (ver figura 9). Conforme Varejão (2001) a temperatura potencial é a grandeza que representa a temperatura à qual está submetida uma parcela de ar seco quando, partindo das condições iniciais (p, T) for levada ao nível de pressão de 1000mb, mediante um processo adiabático reversível,

Russo (2005) cita dois fatores que afetam a dispersão desses poluentes: estabilidade atmosférica e inversão térmica. Estes fatores também podem ser analisados através do perfil vertical da atmosfera. Ele afirma que a combinação da estabilidade atmosférica com ausência de chuvas é extremamente desfavorável à dispersão dos poluentes.

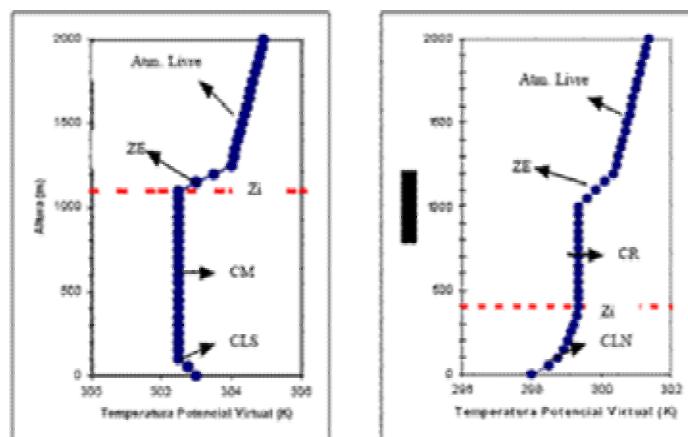


Figura 9 - Modelo de Camada Limite Atmosférica durante o dia (a) e durante a noite (b). Fonte: Leite, 2004.

A estabilidade do ar é determinada pela comparação de uma parcela ascendente com o ambiente em que ela se encontra. Se o ar ascendente é mais

frio do que o ambiente no entorno dele, portanto ele é mais denso, pesado e tende a descer para seu nível original, sendo neste caso estável porque ele resiste deslocando para cima (figura 10a). Se o ar ascendente é mais quente, menos denso e mais leve do que seu redor, ele continuará a ascender até sua temperatura ser a mesma do ambiente circunvizinho, sendo o ar neste caso instável podendo ser observado na figura 10b (Brasgreco Wheeler, 2005).

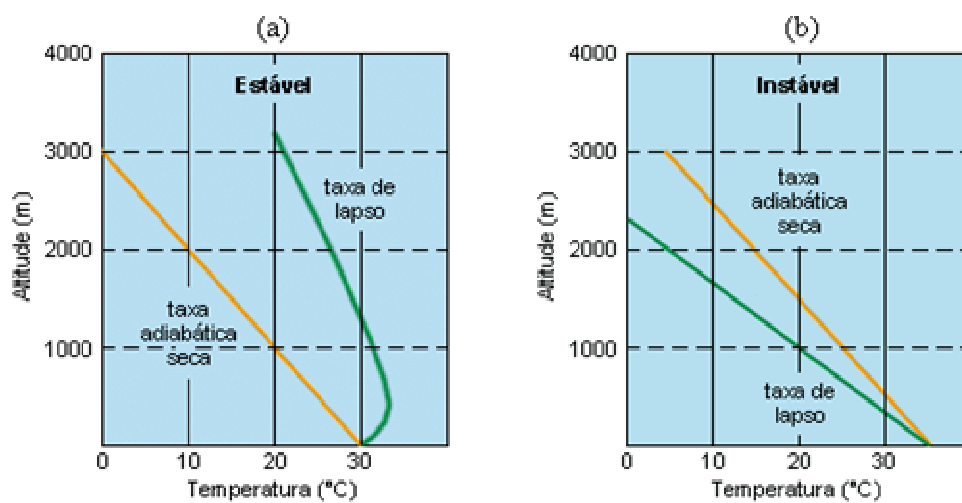


Figura 10 - Perfil da atmosfera absolutamente estável (a) e absolutamente instável (b). Fonte: Brasgreco Wheeler, 2005.

A inversão de temperatura ocorre quando uma camada de ar termicamente estável bloqueia o ar abaixo dessa, impedindo a dispersão vertical de poluentes, confinando-os numa camada que varia em função da altura da inversão. Quanto mais baixa a inversão, mais estreita a camada de dispersão e, conseqüentemente, maiores as concentrações de poluentes no ar. Normalmente devido ao decréscimo de pressão com a altura, as parcelas de ar situadas a altitudes maiores encontram menor pressão, se expandem e, portanto, se resfriam. Esse processo de resfriamento com a ascensão, ou de aquecimento

com a descida, é denominado de adiabática seca, equivalente a aproximadamente 1°C para cada 100 metros. No entanto, a temperatura do ar nas camadas mais próximas à superfície é variável e inversões de temperaturas podem ocorrer (Russo, 2005).

3.5 – Modelo HYSPLIT_4 de Dispersão de poluentes

Para simulação numérica da dispersão dos poluentes do lixão utilizou-se o modelo HYSPLIT_4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory – versão 4.0), disponível em <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. Utilizou-se gráficos de trajetória e dispersão dos poluentes produzidos e visualizados através do próprio modelo.

O método de cálculo do modelo é híbrido entre as aproximações Euleriana e Lagrangiana. Os cálculos da advecção e da difusão são realizados em um sistema Lagrangiano, enquanto os cálculos de concentrações em uma grade fixa (método Euleriano). O transporte e a dispersão dos poluentes é calculado assumindo que uma pluma (puff) simples irá se expandir até seu tamanho exceder a grade de uma célula meteorológica e então irá se dividir entre várias plumas. A aproximação do modelo HYSPLIT_4 combina os métodos “puff” e o de partícula assumindo que ocorre uma distribuição tipo “puff” na horizontal e “partícula” na direção vertical.

Concentrações do ar são calculadas em um ponto da grade específico para as plumas. A grade da concentração é definida por um cruzamento entre latitude-longitude.

Foi simulado pelo modelo HYSPLIT diversos dias e horários compreendidos dentro do período de estudo. Os dias foram escolhidos, tanto no período seco quanto no chuvoso, de se tratar de dias com características adversas variadas. A dispersão para este modelo foi calculada usando o banco de dados meteorológico que o modelo disponibiliza para Internet (tipo FNL – *Final Meteorological database*).

Os dados do FNL são gerados a partir de um modelo global de previsão de médio alcance. Os dados de saída do modelo, tanto da análise como das simulações, além de dados oriundos de satélites, são adicionados ao arquivo. Dessa forma são incluídos os campos disponíveis apenas no período de previsão, e para permitir que os dados de previsão de curto prazo preencham os períodos em falta se os dados de saída do modelo do NCEP não estiverem disponíveis. Estes dados arquivados são conhecidos como arquivos FNL. Estes arquivos contém dados em seqüência de tempo sinótico, sem nenhuma falha desde 1997.

3.5.1 – Sub-Seções

O HYSPLIT_4 possui quatro subseções de informações sobre: a) fonte (Source Term Information); b) concentração (Concentration Information); c) Deposição (Deposition Information) e d) saída (Output Information).

3.5.1.1 – Informações Sobre a Fonte

Nessa seção devem-se fornecer algumas informações sobre a fonte poluente (Figura 11) tais como:

a) *Start time* – Especificar a hora em que estar querendo calcular trajetória e/ou dispersão dos poluentes da fonte. Durante o trabalho utilizou-se diversos dias para estudo, dias estes escolhidos através de presença de situações adversas como precipitação e dias seguintes de não ocorrência de precipitação e de céu limpo.

b) *Total Run time* – Período de duração da simulação. O modelo só permite o máximo de 48 horas, mas para fins do estudo em tela foram realizadas simulações de 1 horas.

c) *Dispersion Calculation* – Direção do cálculo da dispersão. Podendo ser “Forward” (para frente) ou “Backward” (para trás). No presente trabalho foi utilizado “Forward” devido ao fato de querer saber a trajetória e a dispersão dos poluentes do lixão de Maceió.

d) *Source Latitude/Longitude* – Latitude e Longitude da fonte poluente que está sendo estudada especificada em graus decimais (XX.XX) sendo latitudes ao norte/ longitudes ao leste positivas e latitudes ao sul/ longitudes ao oeste negativas. Utilizou-se $-9,55^\circ$ de latitude e $-35,77^\circ$ de longitude.

e) *Source top and bottom height* - Altura máxima e mínima da fonte em metros acima do solo. Foram utilizadas 10m para altura máxima e 5m para mínima, devido à observações na área do estudo.

f) *Emission Rate* - A taxa de emissão é o número de unidade de massa liberada por hora. No modelo as unidades são arbitrárias; a unidade de saída da concentração do ar será a mesma unidade especificada anteriormente. (ex.:

entrada kg/hr -> saída kg/m³, entrada Ci/hr -> saída Ci/m³, sendo Ci – Cubic inch ou polegadas cúbicas). Conforme Gorgati & Lucas Junior (1994), o lixo apresenta bom potencial para produção de biogás, cerca de 0,13 m³ por kg de lixo orgânico. No Brasil, em média, mais da metade (52,5%) de todo o lixo produzido corresponde a resíduos orgânicos (IPT,2000). Como de acordo com Jucá (2002), atualmente cerca de 1.100.000 kg de lixo chegam diariamente ao lixão de Maceió, pode-se estimar que é “jogado” nesse vazadouro algo em torno de 577.500 kg de lixo orgânico por dia que corresponde a 52.5% do total resultando em 75.075 m³ de biogás por dia, equivalente a aproximadamente 3.100 m³ por hora.

Soltani-Ahmadi (2000) afirma que a concentração típica de Amônia e de Sulfeto de Hidrogênio é entre 0-0,2ppm e 0-200ppm respectivamente. Dessa forma, utilizou-se um valor médio de 0,1ppm para Amônia e 100ppm para Sulfeto de Hidrogênio. Portanto nesse item foram inseridos os valores de 0,235g·h⁻¹ e 235,268 g·h⁻¹ para os gases analisados.

g) *Hours of emission* – Número de horas de emissão de poluentes pela fonte. Utilizou-se o valor de 1 horas para fins de estudo.

Source Term Information				
	year	month	day	hour
Start time (UTC):	03	04	01	00
Total run time (hours):	06			
Dispersion calculation:	<input checked="" type="radio"/> Forward	<input type="radio"/> Backward		
Source latitude (degrees):	-9.55			
Source longitude (degrees):	-35.60			
Source top height (meters agl):	100			
Source bottom height (meters agl):	10			
Emission rate (mass units per hour):	1.0			
Hours of emission:	1.0			

Figura 11 – Sub-seção “Informações sobre a fonte” do modelo HYSPLIT_4

3.5.1.2 – Informações Sobre Concentração

Seção referente às informações sobre concentração de poluentes liberadas pela fonte (figura 12), possuindo as seguintes entradas no modelo:

a) *Grid Center Latitude / Longitude* – Posição central da grade de concentração, que possui como padrão a latitude e longitude da fonte.

b) *Units* – Opção oferecida ao usuário para escolher entre unidade de concentração como massa/metro³ (utilizada no estudo) ou unidade de exposição (concentração x tempo média em segundos) como massa*tempo/metros³.

c) *Averaging Period* - Este campo destina-se a entrar com o período em que as concentrações serão medidas durante a simulação do modelo (também comumente chamada de intervalo da amostra). O intervalo é definido em um conjunto (integrado) de horas. Para o estudo foi utilizado um período de 1 horas, para resultar em uma produção pelo modelo de 1 figura/mapa.

d) *Top/Bottom height of averaged layer* – Altura máxima e mínima da camada de poluentes resultante da liberação pela fonte. Para este trabalho foi utilizado 0m e 100m para altura mínima e máxima respectivamente.

Contour multiplier – Valor de contorno. Utilizou-se o valor padrão do modelo de 1.0E+00.

Concentration Information		
Grid center latitude (degrees):	Help	-9.55
Grid center longitude (degrees):	Help	-35.60
Units	Help	<input checked="" type="radio"/> concentration <input type="radio"/> exposure
Averaging period (integer hours):	Help	2
Top height of averaged layer (meters aq1):	Help	500
Bottom height of averaged layer (meters aq1):	Help	0
Contour multiplier:	Help	1.0E+00

Figura 12 – Sub-seção “Informações sobre a concentração” do modelo HYSPLIT_4.

3.5.1.3 – Informações Sobre Deposição

Essa seção destina-se a informações sobre a deposição (decaimento) dos poluentes na superfície (figura 13). O modelo HYSPLIT_4 calcula a deposição de um poluente através de 3 diferentes mecanismos: deposição seca, deposição úmida e decaimento radioativo (Draxler, 1997).

A seção é caracterizada pelos seguintes campos relacionados abaixo:

a) *Dry deposition velocity* - Os cálculos da deposição seca do HYSPLIT são executados em um nível de modelo baixo baseado sob a relação que o fluxo de deposição é igual à velocidade da concentração do ar no nível da superfície. Um valor igual a 0 indica que não irá ocorrer deposição nem seca nem úmida. No presente trabalho assumimos o valor padrão do modelo que é de $0.01\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

b) *Wet deposition* – O modelo HYSPLIT_4 calcula a deposição úmida através de 2 parâmetros: na nuvem e abaixo da nuvem. A remoção na nuvem é definida

como uma porção dos poluentes liberados pela fonte que atuam como partículas higroscópicas e se depositam na superfície através da precipitação. A remoção abaixo da nuvem é definida através de um tempo de remoção constante (pela ação da gravidade).

c) *Sum deposition over total run time* – O modelo oferece ao usuário a opção de poder acumular a deposição antes de cada período, ou ter a deposição somada durante toda a plotagem do modelo (utilizado no trabalho).

d) *Contour multiplier* – Valor de contorno. Utilizou-se o valor padrão do modelo de 1.0E+00.

Deposition Information		
Dry deposition velocity (meters/second):	Help	0.01
Wet deposition?:	Help	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Sum deposition over total run time?:	Help	<input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No
Contour multiplier:	Help	1.0E+00

Figura 13 – Sub-seção “Informações sobre a Deposição” do modelo HYSPLIT_4.

3.5.1.4 – Informações Sobre a Saída

Esta seção é referente à saída ou resultados do modelo (figura 14). Ela está mais relacionada com detalhes técnicos de formato de arquivo, resolução, etc. É composta dos seguintes campos:

a) *Plot Projection* – O modelo permite que o usuário escolha entre 3 tipos de projeções: polar, Lambert ou Mercator, além de possuir a opção default onde o

próprio modelo se encarregará da escolha da projeção conforme a localização da fonte no globo terrestre. A opção utilizada no trabalho foi a Mercator mais utilizada para as latitudes estudadas.

b) Plot Resolution – Resolução das imagens gráficas resultante do cálculo do modelo em pontos por polegadas (em inglês dots-per-inch dpi). Utilizou-se a opção de 120dpi para melhor qualidade do resultado da simulação.

c) Constant Contours – O modelo oferece a opção de determinar automaticamente o máximo e mínimo valor da concentração e da deposição e usar a mesma escala e níveis de contorno para todos os plots. Essa opção foi utilizada no referido trabalho.

d) Zoom factor – O HYSPLIT_4 oferece ao usuário diversos níveis de ampliação das imagens gráficas. O valor de 100 foi o escolhido para este trabalho, por melhorar a visualização.

e) Distance circle overlay – Esta opção irá desenhar círculos automáticos ao redor da fonte em intervalos especificados. A opção Auto irá desenhar 4 círculos em volta da fonte com um intervalo “adequado” estimado pelo próprio modelo.

f) GIS shapefiles of contours – Salva as opções feita pelo usuário como latitude e longitude em um arquivo em formato ASCII. Essa opção não foi empregada no presente trabalho.

g) Postscript File – Antes do modelo HYSPLIT_4 disponibilizar ao usuário uma imagem gráfica em formato gif é produzido um arquivo. Essa opção disponibiliza

ao usuário esse arquivo para download do usuário, porém não foi utilizada no estudo.

Output Information			
Plot projection:	Heb	<input checked="" type="radio"/> Default	<input type="radio"/> Polar <input type="radio"/> Lambert <input type="radio"/> Mercator
Plot resolution (dpi):	Heb	<input type="radio"/> 72	<input checked="" type="radio"/> 96 <input type="radio"/> 120
Constant contours?	Heb	<input checked="" type="radio"/> Yes	<input type="radio"/> No
Zoom factor:	Heb	<input type="radio"/> 0 (least)	<input type="radio"/> 45 <input checked="" type="radio"/> 75 <input type="radio"/> 100 (most)
Distance circle overlay:	Heb	<input checked="" type="radio"/> None	<input type="radio"/> Auto
GIS shapefiles of contours?	Heb	<input type="radio"/> Yes	<input checked="" type="radio"/> No
Postscript file?	Heb	<input type="radio"/> Yes	<input checked="" type="radio"/> No

Figura 14 – Sub-seção “Informações de Saída” do modelo HYSPLIT_4.

3.5.2 – Exemplo de Simulação da Concentração Gerada no Hysplit_4

À medida que uma pluma de poluentes passa acima de uma região, a deposição de poluentes no solo pode ocorrer devido tanto ao assentamento das partículas (deposição seca) quanto através da precipitação (deposição úmida). À medida que o poluente é removido da pluma, a quantidade de poluente que permanece na pluma é diminuída, fazendo com que as concentrações na pluma, na direção em que o vento está soprando, sejam menores do que seriam caso não houvesse deposição.

A figura 15 representa um exemplo de uma simulação de dispersão/concentração realizada no modelo para a localização do lixão. Os dados de entrada do modelo foram os mesmos comentados durante o item 3.5.1.

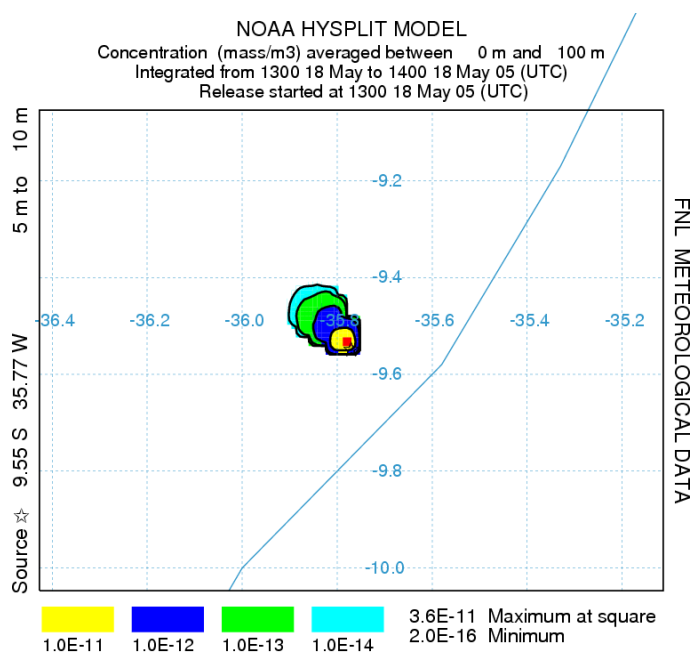


Figura 15 – Simulação da dispersão / concentração às 10h pelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão de Maceió em 18 de maio de 2005.

A simulação mostra as concentrações de ar para a fonte considerada, emitindo $0,235\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ de amônia liberada pelo lixão com uma hora de simulação. O texto no topo indica que foram feitas médias das concentrações (massa/m^3) em uma camada entre 0m e 100m e integradas no período de 10:00 até 11:00 horas do dia 18 de Maio de 2005 (TMG). A localização da fonte emissora de poluentes (Lixão) é mostrada através de uma estrela. Quatro contornos de concentração são mostrados com seus valores definidos na parte abaixo do mapa. Um valor máximo de concentração também é indicado, esse valor se situa próximo a fonte emissora, no quadrado vermelho. As concentrações no mapa, codificadas como áreas em cores entre os contornos, refletem um limite entre os valores de concentração dados abaixo (por exemplo, as concentrações na área do mapa codificada como 1.0E^{-10} vão de 1.0E^{-10} até 9.9E^{-10}). Dessa forma a parte mais

próxima da fonte em cada pluma possui valores maiores do que a parte mais afastada da mesma em relação à fonte.

3.6 – Modelo Gaussiano de Dispersão de Poluentes

Moreira & Tirabassi (2004) afirmam que a maior parte dos modelos operacionais para a estimativa da dispersão de gás e partículas é baseada na aproximação Gaussiana, o mesmo tipo utilizado neste trabalho. O modelo Gaussiano é fundamentado do pressuposto teórico na solução exata, mas não real, da equação de transporte e difusão na atmosfera, no caso em que o vento e o coeficiente de difusão turbulenta são constantes com a altura. A solução é forçada a representar situações reais através de parâmetros empíricos, os chamados "sigmas".

O fundamento básico para o estudo da dispersão de poluentes na atmosfera é a equação de difusão. No modelo proposto neste trabalho foi utilizado uma solução semi-empírica da equação de difusão proposto por Koogler (1967).

Sua expressão é dada por:

$$C(x, y, z) = \frac{Q \cdot D}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

(1)

A equação acima é obtida considerando a hipótese da distribuição normal bi-dimensional de um poluente emitido continuamente por uma fonte e dispersado pelo vento. Esse poluente pode ou não se decompor com o vento. A figura 16 mostra um exemplo da distribuição normal bi-dimensional de uma pluma sobre uma área qualquer nas direções horizontal e vertical.

A notação $C(x,y,z)$, usada na equação exemplificada acima significa a concentração que se obtém em um ponto de coordenadas x,y,z com uma altura H (metros) para a fonte emissora. O parâmetro x está implícito no cálculo do Tempo de desaparecimento do poluente (D) e na determinação dos desvios padrões horizontal (σ_y) e Vertical (σ_z)

Serão apresentados a seguir cada um dos parâmetros da equação utilizada, bem como a maneira pela qual os mesmos são obtidos para efeito da Simulação do Modelo.

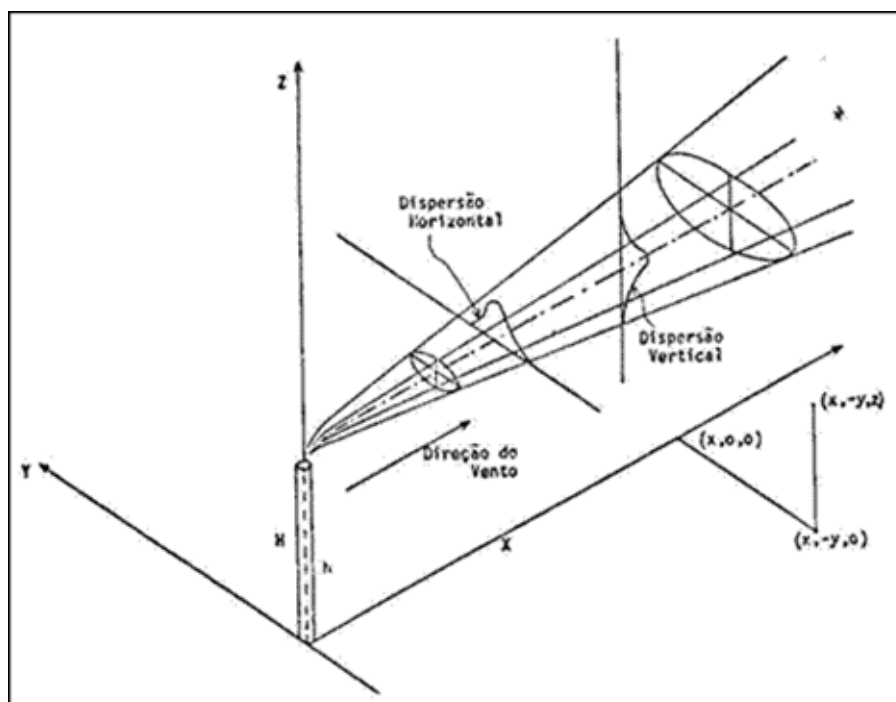


Figura 16 – Exemplo do aspecto da dispersão bi-dimensional de uma pluma de um poluente. Fonte: Lapa & Silva, 1973.

3.6.1 – Quantidade de Poluente Emitida (Q)

No presente trabalho, as emissões são consideradas contínuas durante intervalos de tempo maior ou igual ao tempo que a pluma leva para ir do ponto onde está localizada a fonte emissora ao ponto onde se deseja obter as concentrações. Para as simulações realizadas neste trabalho foram utilizados os valores de $0,235\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ para a amônia e $235,268\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ para o Sulfeto de Hidrogênio conforme descrito no item 3.5.1.1.

A amônia e o sulfeto de hidrogênio emitidos pelos lixões apesar de suas baixas concentrações são os principais responsáveis pelo odor característico do material em decomposição além de serem tóxicos.

Shusterman (1992) afirma que os Sulfetos podem causar odores desagradáveis mesmo em baixas concentrações, porém estas concentrações estão muito abaixo do nível necessário para produzir toxicidade, significando que os odores produzidos pelo lixo representam mais um incômodo público do que um problema de saúde. Porém, um simples cheiro de odor desagradável causa, em algumas pessoas, náuseas, dores de cabeça, etc.

3.6.2 – Fator de Desaparecimento de Poluentes (D)

O fator de desaparecimento do poluente é dado por:

$$D = \exp(-0,693 t/T) \quad (2)$$

Onde:

t – tempo que o poluente leva para percorrer a distância entre a fonte e a quadrícula receptora. Este valor é igual à relação entre a distância (x), da fonte emissora até a quadrícula receptora, na direção do vento, e a velocidade média do vento (u); portanto: $t = x/u$.

T – meia-vida do poluente

Para determinação do fator D , considerou-se a concentração (C) de um poluente num ponto em que se move com a velocidade do vento, em determinado instante de tempo. Supondo-se a taxa de desaparecimento do poluente proporcional à quantidade do poluente presente no instante considerado, tem-se:

$$\frac{dC}{dt} = -\lambda C \quad (3)$$

Onde: λ é a constante de desintegração do poluente.

Integrando-se a equação acima, obtém-se:

$$C = C_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Onde: C_0 – concentração inicial.

T – meia-vida do poluente, que por sua vez é o tempo gasto para reduzir à metade o valor da concentração no ponto considerado (C_0). Portanto para $t=T$ teremos:

$$C_0 = 2 C_0 e^{\lambda T} \quad (5)$$

Então:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T} \quad (6)$$

$$T = \frac{0,693}{\lambda} \quad (7)$$

Logo, têm-se que:

$$C = C_o e^{-0,693t/T} \quad (8)$$

Consequentemente

$$D = e^{-0,693t/T} \quad (9)$$

Neste trabalho foram utilizados dois valores de meia-vida, pois foi estudado a dispersão dos seguintes poluentes: Amônia (NH₃) e Sulfeto de Hidrogênio (H₂S). Conforme Atkinson (1995) a meia-vida do Sulfeto de Hidrogênio é de aproximadamente 2.1 dias, enquanto para a Amônia é de 2.3 dias (Hobbs, 2000).

3.6.3 – Desvio Padrão da Dispersão Horizontal (σ_y) e Vertical (σ_z)

Os valores dos coeficientes σ_y e σ_z representam os desvios padrão (nas direções horizontal e vertical, respectivamente) da pluma em dispersão. Esses valores irão depender da distancia à fonte emissora em que se deseja calcular a concentração do poluente, da direção do vento e também estão relacionados com as condições meteorológicas do local no momento do cálculo (Almeida &

Coutinho-Rodrigues, 2003). Os autores complementam afirmando que é devido a estas duas quantidades que o uso do Modelo Gaussiano mantém certa flexibilidade, podendo usar diferentes métodos para obter esses dois valores sem alterar o sistema de cálculo.

Um dos métodos existente e utilizado neste trabalho é o de Pasquill-Gifford, cujo método os valores de σ_y e σ_z são obtidos a partir de gráfico e tabelas, sendo que suas estimativas foram desenvolvidas por Pasquill (1961) e Gifford (1961), utilizando dados experimentais. O mesmo foi utilizado em inúmeros estudos, como por exemplo, Mahoney, (1974), Pasquill (1974), Gordon (1985), Boubel *et al.* (1994) e Kiely (1997).

Os principais fatores que influenciam estes parâmetros são: estrutura da turbulência atmosférica; existência de inversões de temperatura; altura sobre o solo; topografia do terreno; hora do nascer e por do Sol; hora que se deseja efetuar os estudos, além da velocidade e direção do vento (Panofsky, 1969).

A tabela 4, bem como a figura 17 mostram as relações entre o ângulo solar e os diversos níveis de intensidade de irradiância solar. O ângulo solar que é o ângulo formado entre os raios solares e a superfície horizontal, foi calculado a partir da hora em que se deseja calcular a dispersão dos poluentes.

Como neste trabalho a altura da pluma sobre o solo vai até algumas centenas de metros e o perfil do terreno foi considerado regular, então os demais fatores, com exceção da distância da fonte emissora, são englobados em seis categorias de estabilidade atmosférica (tabela 5). A classe A de estabilidade representa situações mais instáveis (poluente é mais facilmente dispersado na atmosfera),

portanto a classe F indica situações mais estáveis (poluente fica aprisionado próximo a fonte emissora).

Tabela 4 – Relação entre Ângulo Solar e cobertura de nuvens com a Radiação Solar

Ângulo Solar	Céu Claro	Céu Nublado
	Radiação Solar	
$> 60^\circ$	Forte	Fraca
$35^\circ - 60^\circ$	Moderada	Fraca
$< 35^\circ$	Fraca	Fraca

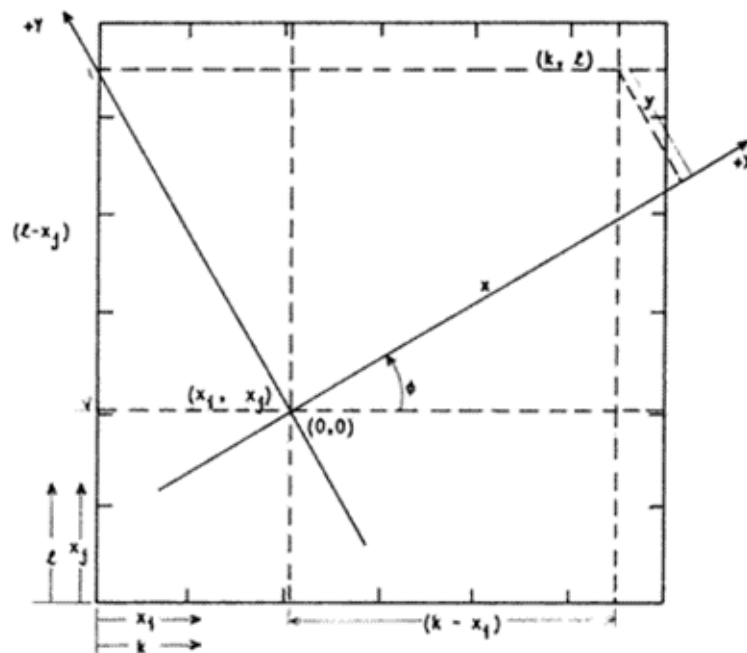


Figura 17 – Rotação e translação dos eixos coordenados. Fonte: Lapa & Silva, 1973.

Tabela 5 – Categorias de estabilidade atmosférica em relação a velocidade do vento e radiação solar

Velocidade do vento (m·s-1)	DIA			Noite
	Radiação Solar			
	Forte	Moderada	Fraca	
< 2	A	A	B	F
2 - 3	A	B	C	F
3 - 5	B	B	C	E
5 - 6	C	C	D	D
> 6	C	D	D	D

3.6.4 – Velocidade Média do Vento (U)

Lawal *et al.* (2005) afirmam que o vento é o principal mecanismo de transporte atmosférico e, portanto, fundamental para a dispersão dos poluentes. A componente vertical do vento (z) é responsável pela turbulência, enquanto que as outras componentes determinam essencialmente o transporte e a diluição do material particulado. A velocidade do vento aumenta exponencialmente de acordo com a altura, afetando de maneira mais direta a massa de poluentes emitidos em grande altura, principalmente no momento inicial da mistura dos gases com a camada atmosférica. Em condições de grande estabilidade atmosférica, o transporte do material em altura pode ser feito a longas distâncias e levar à situações de concentrações de poluentes a nível do solo em locais onde não há fontes poluentes próximas.

3.6.5 – Coordenadas da Quadrícula Receptora (X,Y)

No sistema de coordenadas utilizado, a origem dos eixos está situada ao nível do solo. O eixo x está disposto horizontalmente ao longo da direção do vento. O eixo y está disposto horizontalmente e perpendicularmente ao eixo x, e o eixo z é perpendicular ao plano formado pelos eixos x e y, passando pelo ponto de intersecção dos mesmos. Consequentemente, o movimento da pluma do poluente ocorre na direção do eixo x (figura 17). Desta forma, faz-se necessária a elaboração de um relação entre o sistema de coordenadas geográficas (x_i, x_j) e o sistema descrito (k,l). Mediante uma translação e rotação de eixos chega-se as seguintes expressões para cálculo das coordenadas x e y da quadricula receptora no sistema usado para a simulação:

$$x = (\ell - x_j) \text{sen } \phi + (k - x_i) \text{cos } \phi \quad (10)$$

$$y = (\ell - x_j) \text{cos } \phi + (k - x_i) \text{sen } \phi \quad (11)$$

Na expressão para o cálculo das concentrações (equação 1), a ordenada y é usada explicitamente, enquanto que a abscissa x está implícita nos valores de σ_y e σ_z .

3.6.6 – Altura Onde se Deseja Obter as Concentrações (Z)

Quando se desenvolve um estudo de concentrações de poluentes, é desejável, em alguns casos, se obter as concentrações em diversos níveis de

altura a partir do solo. Dessa forma, dependendo das necessidades, é feita a variação do parâmetro z , que aqui será de 2m.

3.7 – Visão Geral do Modelo Gaussiano

Este modelo foi inicialmente adaptado por Lapa e Silva (1973) em linguagem Fortran, porém seu desenvolvimento neste trabalho foi escolhida a linguagem Pascal através do aplicativo Delphi. Conforme Anselmo (2005), o Delphi é um ambiente de desenvolvimento de aplicações, orientado a objeto, que permite o desenvolvimento de aplicações para os Sistemas Operacionais da Microsoft. Ele combina códigos compiláveis, ferramentas visuais e tecnologia para a composição de bases de dados escaláveis, possuindo ainda facilidades para um rápido desenvolvimento em plataforma Windows.

Através da figura 18 pode-se observar a tela inicial do modelo gaussiano adaptado para o lixão de Maceió/AL, que dispõe das seguintes variáveis como dados de entrada para calcular a dispersão dos poluentes emitidos pelo lixão:

- Poluente – É possível escolher dois diferentes poluentes emitidos pelos lixões: Amônia (NH_3) ou Sulfeto de Hidrogênio (H_2S).
- Dia Juliano
- Hora que se deseja obter as concentrações
- Pressão atmosférica (mb)
- Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)
- Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) – Será utilizado a temperatura à 5cm

- Condições do tempo – São apresentados dois possíveis tipos: Tempo Claro ou Tempo Nublado
- Direção do vento (graus)
- Velocidade do vento ($m \cdot s^{-1}$)

Figura 18 – Tela inicial do modelo gaussiano desenvolvido.

O modelo utiliza alguns desses dados iniciais para calcular parâmetros necessários no desenvolvimento dos cálculos. A hora do nascer e do pôr do Sol é calculada a partir da escolha do dia Juliano pela equação de duração do dia:

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (12)$$

O resultado compreende ao número possível de horas de sol do dia em análise, sendo que metade dessas horas se encontram no período matutino e metade no período vespertino. Subtraindo-se (Nascer do Sol) ou somando (Por do Sol) esse resultado com 12 (referente ao meio-dia solar) encontra-se a hora do Nascer e do Pôr do Sol para este dia.

O ângulo solar, utilizado para classificar a estabilidade atmosférica dentro do modelo, é calculado a partir da hora em que se deseja obter as concentrações, conforme descrito no item 3.6.3.

Foram utilizados os dados oriundos da estação meteorológica automática instalada no lixão de Maceió/AL obtidos nas 3 temporadas (item 3.2). Porém, isso não impede a escolha de qualquer valor para inserção como dado inicial. No item temperatura do solo foi utilizado a profundidade de 5cm.

A escolha, pelo usuário do modelo, do poluente com o qual se pretende calcular sua dispersão faz com que o mesmo utilize o devido tempo de meia-vida para este poluente além da quantidade que cada poluente é emitido pelo lixão em relação ao total de biogás emitido por hora.

O modelo usado calcula a dispersão/concentração dos poluentes em uma grade de 20x20 quadrículas, sendo que cada quadrícula possui uma grade de 200mx200m. Dessa maneira o mesmo cobre uma área de 4km do entorno do lixão de Maceió. A simulação calcula a dispersão/concentração do poluente a 2m de altura da superfície.

É importante salientar que para o modelo são necessárias a pressão e a temperatura de saída dos gases que se pretende simular sua dispersão, porém

durante este trabalho não foi possível obter estes dados, portanto no mesmo está sendo utilizada a pressão atmosférica, e a temperatura do solo medidas no momento inicial de simulação para preencher esses requisitos. Sabe-se que esses valores não são iguais, porém nada impede em estudos posteriores de obter esses dados e utilizar para um melhor detalhamento da simulação.

3.7.1 – Exemplo de Simulação da Concentração Gerada pelo Modelo Gaussiano

O modelo desenvolvido possui dois modos de exibição. No primeiro modo, após a inserção dos dados iniciais, pode-se observar (figura 19) as concentrações em cada quadrícula a partir da fonte emissora (marcado em vermelho). Ainda é possível, através dos 3 botões na parte superior esquerda da figura: **Visualizar gráfico**, indo para o segundo modo de visualização; **Sair da simulação** retornando para a tela inicial de inserção dos dados ou **Sair do modelo** fechando assim o aplicativo.

A figura 20 representa o segundo modo de exibição, onde no lado esquerdo observam-se os dados de entrada considerados para a realização dos cálculos necessários. Para este exemplo (figuras 19 e 20) foram utilizados os seguintes dados de entrada:

Poluente: Amônia (NH_3)

Dia Juliano: 138

Hora que se deseja calcular a dispersão/concentração: 10h (Hora local)

Altura que se deseja calcular a dispersão/concentração: 2m

Pressão Atmosférica: 1000mb

Temperatura do ar: 20°C

Temperatura do solo: 25°C

Condições do tempo: Tempo Claro

Direção do vento: 135°

Velocidade do vento: 5m·s⁻¹

A simulação mostra as concentrações de ar para a fonte considerada, emitindo 0,235g·h⁻¹ de amônia. As figuras 19 e 20 mostram a dispersão/concentração do poluente emitido pelo lixão de Maceió no dia 18 de Maio de 2005 as 10horas. A localização da fonte emissora na figura 19 é mostrado em vermelho com o número 5. Esse número, se comparado a legenda no lado direito da figura com a parte inferior da mesma, onde existe a indicação do máximo e mínimo valor calculado na simulação em curso, representa a maior concentração de poluentes emitidos pela fonte.

Na figura 20 ainda é possível observar, através da legenda do lado direito da mesma, cinco (5) concentrações diferentes para a simulação. Semelhante ao item 3.7.1, onde é mostrado que o HYSPLIT_4 possui quatro contornos de concentrações, então este modelo também seguiu esta mesma quantidade de divisão das concentrações. As concentrações no mapa, codificadas como números refletem um limite entre os valores de concentração dados a direita da figura (por exemplo, as concentrações na área do mapa codificada como 3 representam concentrações de Amônia entre aproximadamente 4,9·10⁻⁷g·m³ e 1,2·10⁻⁷g·m³).

O modelo, na primeira parte da simulação (figura 19), é mostrado com uma grade de 20 x 7 quadrículas sendo cada quadrícula abrangendo 200m x 200m. Já para a segunda parte da simulação (figura 20) têm-se uma grade de 20 x 20 quadrículas, abrangendo até 5km, na direção do vento, a partir da fonte emissora.

Dispersão dos poluentes do Lixão de Maceió/AL						
Visualizar gráfico Sair da simulação X Sair do modelo						
9,17476142863277E-23	2,84918880518963E-24	3,82284414027069E-26	1,87424926007846E-28	0	0	0
7,39833782962652E-22	2,39120665784482E-23	3,20915005418835E-25	1,48815115838816E-27	0	0	0
6,26583048650524E-21	2,14111980958773E-22	2,91425722619551E-24	1,29093712962487E-26	1,44223003560196E-29	0	0
5,56647398282501E-20	2,049084913296E-21	2,87702843511659E-23	1,23326028027627E-25	1,21491450899137E-28	0	0
5,17300940502202E-19	2,09778107906531E-20	3,1025648695033E-22	1,30870336325911E-24	1,14620642205057E-27	0	0
5,0044127419063E-18	2,29632267725702E-19	3,67067611822395E-21	1,55695020851311E-23	1,22743137027475E-26	0	0
5,00024030560078E-17	2,68077436471804E-18	4,78083222641156E-20	2,09681535373135E-22	1,51488925563948E-25	0	0
5,09781188260934E-16	3,31855618811642E-17	6,86656607153692E-19	3,22813575251819E-21	2,07024911530718E-24	5,82687920815739E-29	0
5,20728970410524E-15	4,31057756665192E-16	1,08626425739386E-17	5,52848493694915E-20	2,39308162011002E-23	4,05732136801839E-28	0
5,18737651369864E-14	5,77207525982641E-15	1,84418829449744E-16	8,97300664650593E-19	3,40559360974941E-22	3,37804282553353E-27	0
4,84329894376918E-13	7,68457757616282E-14	3,07169046703097E-15	1,76675427893923E-17	6,19322702339647E-21	3,51140032007124E-26	0
3,99991115315621E-12	9,60010298838025E-13	5,66486281207459E-14	4,28255076554093E-16	1,50537084221828E-19	4,83031986700114E-25	0
2,7392603890446E-11	1,12261943728417E-11	1,116919080679E-12	1,28603266602954E-14	5,15716465045873E-18	9,527497221569E-24	0
1,37500929336823E-10	1,09868848096313E-10	2,18930286326049E-11	4,71692865431072E-13	2,64228134264853E-16	2,99122851651882E-22	0
4,07625273279235E-10	7,42685653617916E-10	3,69590518866921E-10	1,98805082494432E-11	2,13180863162664E-14	1,57153108550911E-20	0
5,02053003141486E-10	2,48082163152193E-9	4,05811271347746E-9	8,12092962395719E-10	2,61280826388756E-12	2,67182940044282E-18	0
1,42653838650749E-10	2,24734074145984E-9	1,6535684760239E-8	2,04721468236881E-8	5,10570957552582E-10	1,10942642474425E-15	0
3,37646259011213E-12	1,7996892737787E-10	7,5594555160186E-9	1,18611497324311E-7	7,73846317753056E-8	6,68831378893595E-13	0
1,04696407316695E-15	1,3154941631624E-13	3,34981456899317E-11	1,04027574910881E-8	1,13642884275918E-6	1,71131518491862E-8	0
1,0788439159237E-22	1,15010646199948E-20	2,69513030650643E-18	5,1310215252212E-16	1,14232266782938E-11	1,23198160430192E-5	0,000402177028229734

Figura 19 – Exemplo de simulação da dispersão/concentração da amônia liberada pelo lixão de Maceió em 18 de maio de 2005 (dia juliano 138) às 10h(hora local).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Definição dos Períodos Seco e Chuvoso

A costa leste do nordeste (ENEB) – onde se encontra a área de estudo - é caracterizada por possuir um período chuvoso (meses com máxima precipitação) nos meses de Abril, Maio, Junho e Julho, conforme a normal climatológica (SERHI, 2003). Porém, os dados coletados no período de estudo, se comparado com a referida normal climatológica, mostra na Figura 21 uma pequena defasagem de cerca de dois meses, onde o período chuvoso passou a ser Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro, pois se nota claramente que foram os meses mais chuvosos.

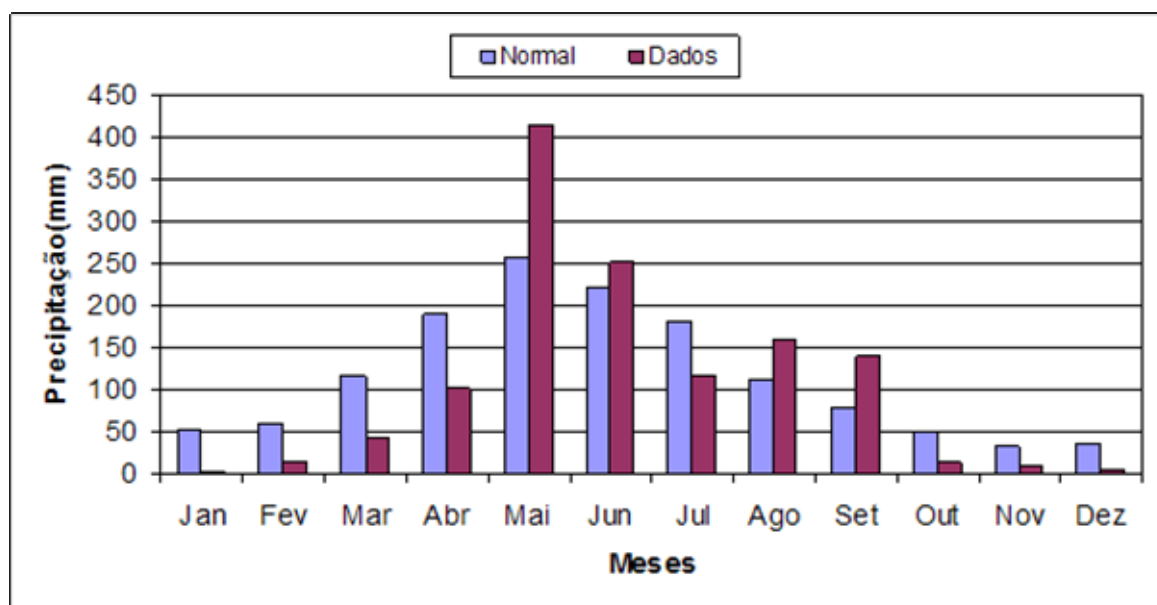


Figura 21 - Comparação entre a normal climatológica da precipitação (mm) para cidade de Maceió-AL (1961-2001) e dados coletados no lixão de Maceió no período de agosto de 2004 a julho de 2005.

De acordo com Molion & Bernardo (2002) existem mecanismos de macro, meso e escala local que provocam chuvas na região do Nordeste do Brasil. Dentre os mecanismos de grande escala destacam-se os sistemas frontais e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Perturbações ondulatórias no campo dos Alísios (POAs), complexos convectivos e brisas marinha e terrestre fazem parte da mesoescala, enquanto circulações orográficas e pequenas células convectivas se constituem fenômenos da microescala. Possivelmente um desses mecanismos citados pelos referidos autores pode ter produzido a defasagem anteriormente citada.

Percebe-se que durante o período estudado, a quantidade de precipitação medida foi geralmente menor do que a normal climatológica, com exceção dos meses de agosto e setembro de 2004 (111,2 x 158,8mm e 77,1 x 140mm, respectivamente) e maio e junho de 2005 (258,6 x 415,8mm e 222,5 x 252,9mm, respectivamente), sendo setembro de 2004, com quase o dobro da climatologia (181%), o mês com maior diferença positiva em relação a normal climatológica. Conforme CPTEC/CLIMANÁLISE (2005) abril de 2005, mês onde deveria se iniciar a quadra chuvosa da região, ocorreram chuvas escassas devido ao posicionamento da Zona de Convergência Intertropical ao norte de sua climatologia, além da ausência de aglomerados convectivos que costumam atuar com maior frequência nesta época do ano, sendo esse, provavelmente, o motivo da precipitação registrada ser menor que a normal climatológica.

Outro mês situado dentro da quadra chuvosa que se destaca foi julho de 2005. Contatou-se um déficit de precipitação (aproximadamente 47% menor) por

causa da quase não formação de distúrbios de leste – comuns neste período do ano - e um dos principais mecanismos de formação de precipitação na região.

Já o período seco apresentou valores sempre abaixo do esperado se comparado com a normal climatológica, podendo destacar o mês de janeiro de 2005, onde se esperava 51,87mm e só foi coletado 3mm de precipitação (menos que 6% do esperado). Em particular para este mês, o desvio (negativo) foi causado pela atuação de vórtices ciclônicos em altos níveis (VCANs) que se posicionaram, em sua maioria, sobre o leste do Nordeste e oceano adjacente (CPTEC/CLIMANÁLISE, 2005).

4.2 – Variáveis Meteorológicas

4.2.1 Direção e Velocidade do Vento

Durante o período da 1ª temporada (07/12/2004 a 22/12/2004) pode-se analisar na figura 22 que os maiores valores percentuais da direção predominante do vento são oriundos de Leste (aproximadamente 53%), seguidos das direções Este-Sudeste (ESE) com aproximadamente 15% e Este-Nordeste (aproximadamente 13%). Essa distribuição da direção de vento com predominância de quadrante Leste faz com que o resultado da combustão espontânea (fumaça / cinzas), que ocorrem principalmente durante o período seco da região sejam levados principalmente para as regiões no quadrante Oeste.

O fato da direção predominante dos ventos na região neste período ser proveniente do quadrante leste pode ser explicado pela ocorrência dos ventos

Alísios. De acordo com Varejão (2001), na zona equatorial convergem ventos provenientes dos cinturões subtropicais de alta pressão (localizado em torno de 30°N e 30°S), impulsionados pela força do gradiente de pressão. Existem ventos alísios ou na zona litorânea dos continentes do nordeste no Hemisfério Norte e de sudeste do Hemisfério Sul, observados principalmente sobre os oceanos, onde a influência devida à rugosidade da superfície é muito pequena.

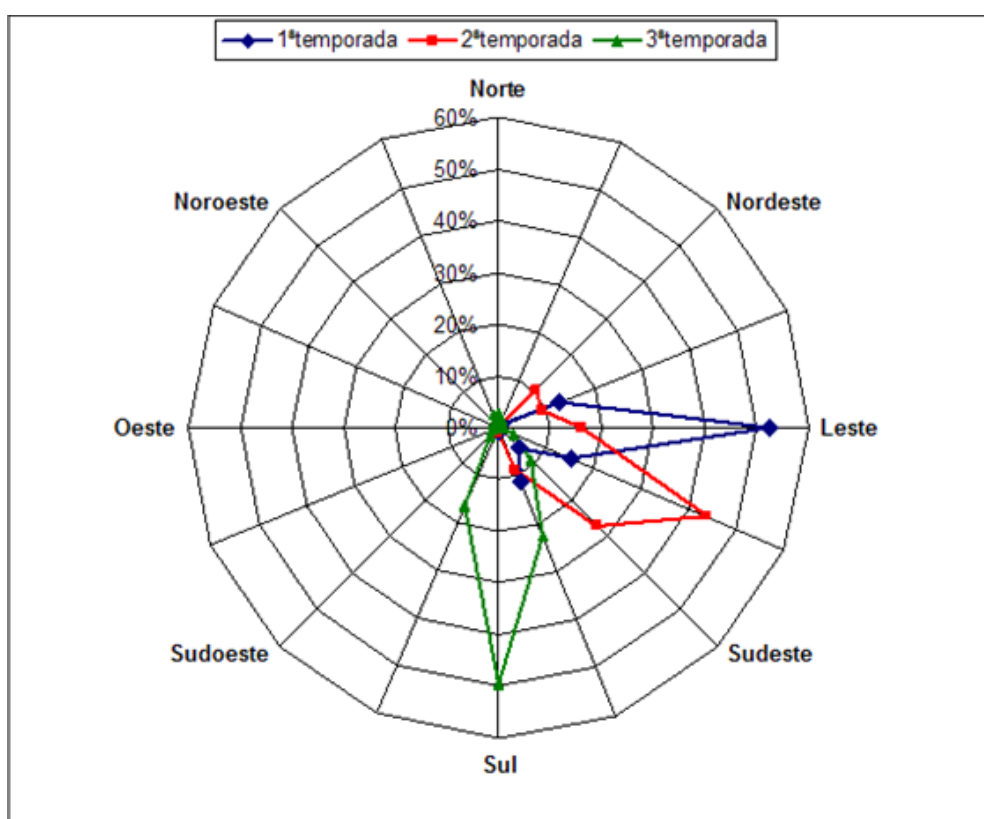


Figura 22 - Distribuição da frequência da direção do vento (%) para os 3 períodos de estudo na área do Lixão de Maceió-AL.

Para a 2ª temporada do período seco (12/02/2005 a 26/02/2005) a direção predominante do vento foi de ESE (compreendendo 44% da frequência da direção do vento), enquanto a direção sudeste obteve a segunda maior frequência com 27%. Observa-se na figura 22 que apesar de uma pequena mudança,

comparado a 1ª temporada, a direção predominante do vento faz parte da componente leste, portanto novamente a influência dos ventos alísios faz-se presente na direção predominante.

Já para a 3ª temporada é possível observar que houve uma mudança significativa da direção predominante do vento. Os ventos durante este período de estudo (20/06/2005 a 04/07/2005) em grande parte foram oriundos do sul (com aproximadamente 50%), enquanto a direção Sul-Sudeste (SSE) obteve a segunda maior frequência (23%). Uma possível explicação para a direção predominante do vento ser do quadrante sul durante esse período de estudo é a ausência de distúrbios de leste que atingem a região e que são comuns neste período do ano.

Para a velocidade média do vento observou-se através da figura 23, que a direção com maiores valores durante a realização da 1ª temporada foi Leste (com aproximadamente $5,7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), seguido da direção Este-Sudeste (aproximadamente $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Dessa forma, mesmo a dispersão dos poluentes liberados pelo lixão de Maceió nas direções Oeste e Noroeste sendo constante (conforme mostrado na figura 2), ocorre uma maior e mais rápida dispersão (diluição dos poluentes), de uma forma geral, devido aos valores altos de velocidade média do vento. Entretanto, quando a direção do vento neste período foi de Sul ou Sul-Sudoeste (aproximadamente 1,8% e 1,2%, respectivamente), a atmosfera demora mais para dispersar os poluentes devido aos baixos valores da velocidade média do vento (aproximadamente $2,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), afetando intensamente as direções Norte e Norte-Nordeste.

Durante a 2ª temporada percebe-se que o maior valor da velocidade do vento foi de Oeste, com aproximadamente $5,8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, seguido da direção Este-Sudeste com $5,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Vale ressaltar que apesar da direção Oeste possuir o maior valor da velocidade média do vento, a mesma só foi detectada em 0,3% dos dados obtidos durante a 2ª temporada. Já para a 3ª temporada a direção Sul obteve a maior velocidade média do vento com aproximadamente $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

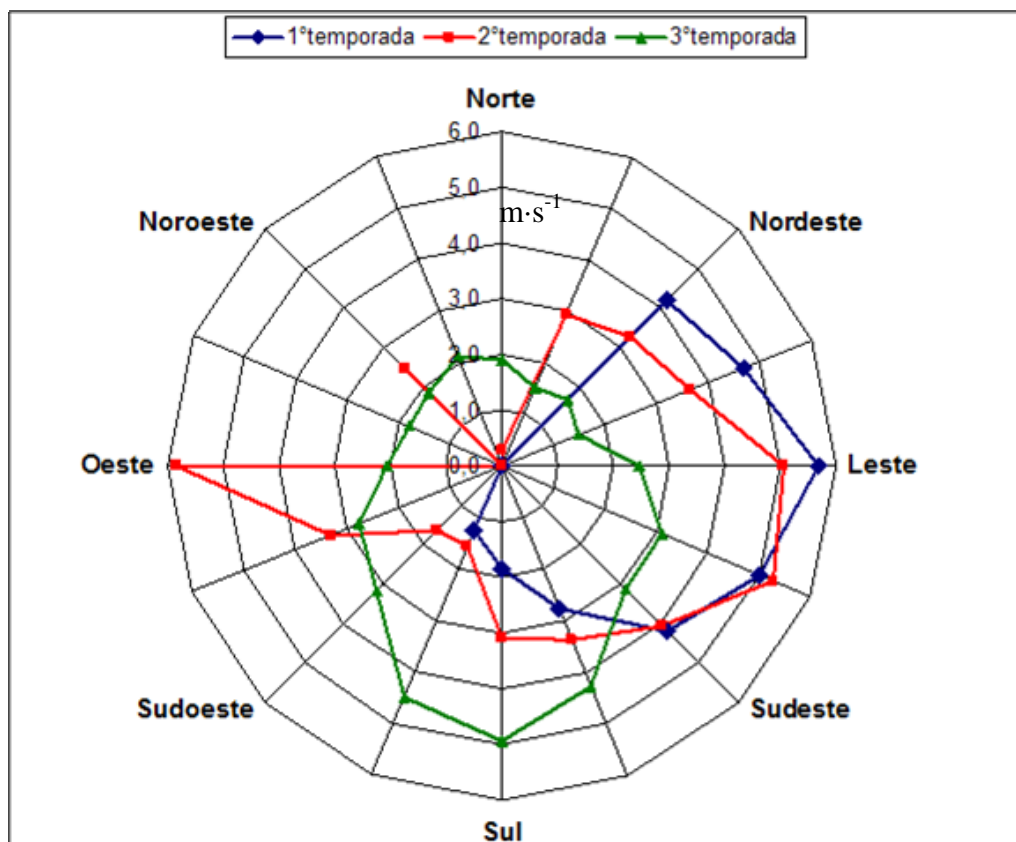


Figura 23 - Distribuição da velocidade do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) de acordo com a direção para os 3 períodos de estudo na área do Lixão de Maceió-AL.

4.2.2 - Período Seco

Durante o período seco da região em estudo o que incomoda a população é a presença de fumaça, provocada principalmente pelo fenômeno da combustão

espontânea no lixão, enquanto a emissão dos gases resultante da atividade bacteriana é mínima. (Mariano, 2004).

Villarrubia e Villarrubia (2003) afirmam que neste período existe maior risco de auto combustão pela presença de material seco e do acúmulo de metano emitido pelas bactérias. Já Leite (1973) afirma que a combustão espontânea ocorre por causa do metano, gás inflamável resultante da degradação anaeróbica da matéria orgânica, ou através dos catadores de lixo na área do lixão. Em ambos os casos, a combustão de um material tão heterogêneo produz densa e irritante fumaça, muito desagradável para a vizinhança, e contém moléculas orgânicas tóxicas como a dioxina, que é um agente cancerígeno.

Durante a 1ª temporada não foi registrado nenhum caso de precipitação, perfazendo um total de 20 dias desde a última ocorrência de precipitação no local. Esse fato, em conjunto com a radiação solar global média acima de $24\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (figura 24), resulta numa maior ocorrência de combustão espontânea na área.

Conforme Andreottola e Cossu (1988), a temperatura do solo (no caso temperatura do lixo) é de extrema importância, pois assim que o lixo é depositado a sua temperatura aumenta pela existência de reações aeróbicas nas camadas superiores da célula de lixo, por causa da presença do oxigênio. Esta fase persiste por duas até três semanas, até que o oxigênio gradualmente vai decrescendo à medida que outras camadas de lixo são depositadas acima. Após esse período iniciam-se reações anaeróbicas que estão diretamente relacionadas com a produção do biogás. Essas reações são exotérmicas e a temperatura do

lixo aumenta. A produção de biogás depende estritamente da temperatura do lixo, assim como os processos biológicos dependem da variação da temperatura.

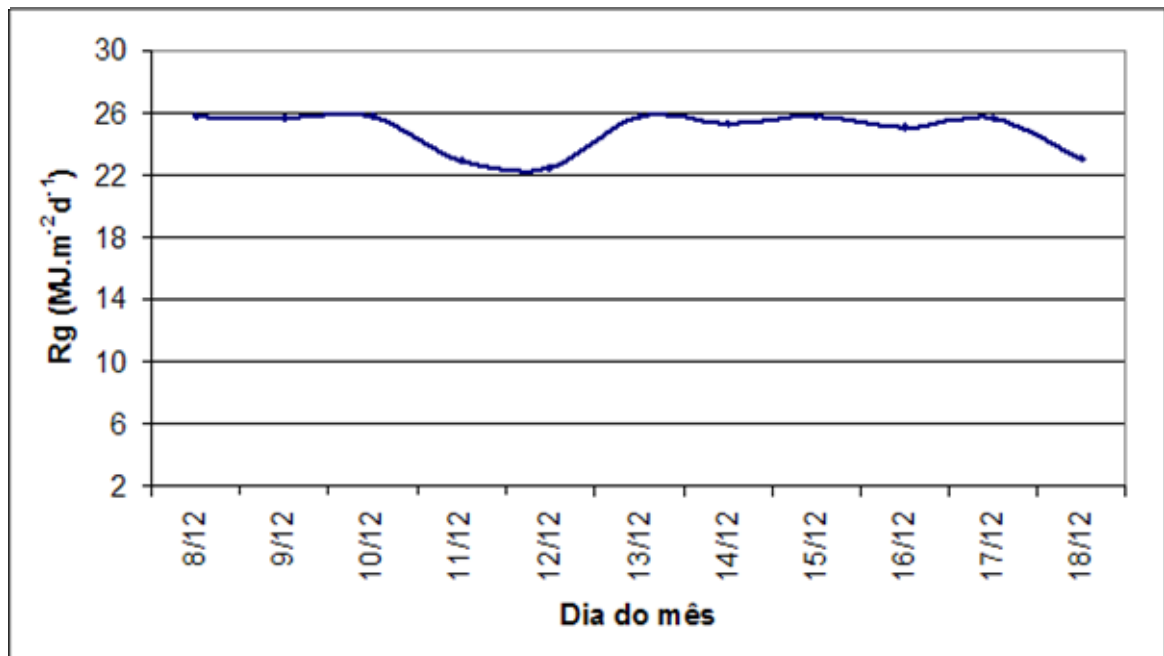


Figura 24 - Radiação solar global (Rg) diária ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) durante a 1ªtemporada de medições na área do estudo.

Nota-se na figura 25 que a temperatura do solo nos níveis próximos a superfícies na 1ªtemporada é menor se comparados com profundidades maiores. Os máximos valores ocorreram na profundidade de 25cm, sendo provavelmente devido a produção de biogás como consequência da presença de processos químicos e biológicos que ocorrem nessa profundidade. Também é possível perceber a influência direta do ciclo da radiação solar nos diversos níveis medidos de temperatura do solo. O nível mais próximo a superfície é claramente influenciado pela radiação solar. A 25cm de profundidade é possível notar uma maior variação, conforme a variação da radiação solar, já que para os níveis seguintes não se percebe grande diferença na variação de sua temperatura.

Lacey (1980) afirma que a temperatura ideal para o crescimento dos microorganismos no estágio biológico está entre 10-40°C. Ainda, segundo o autor, os fungos não toleram temperaturas acima de 60°C, enquanto certas bactérias podem sobreviver em temperaturas até 75°C.

A 2ªtemporada dentro do período seco foi realizada como resultado da não ocorrência de precipitação durante a 1ªtemporada, contudo novamente não foram registrados eventos com precipitação significativa. Conforme mostrado na figura 1, climatologicamente espera-se chuvas aproximadamente de 52mm para o mês de janeiro, contudo percebeu-se um decréscimo na quantidade da precipitação durante o ano do experimento se comparado com a normal climatológica de Maceió. Dessa forma, foi escolhido o mês de fevereiro para instalação da 2ªtemporada.

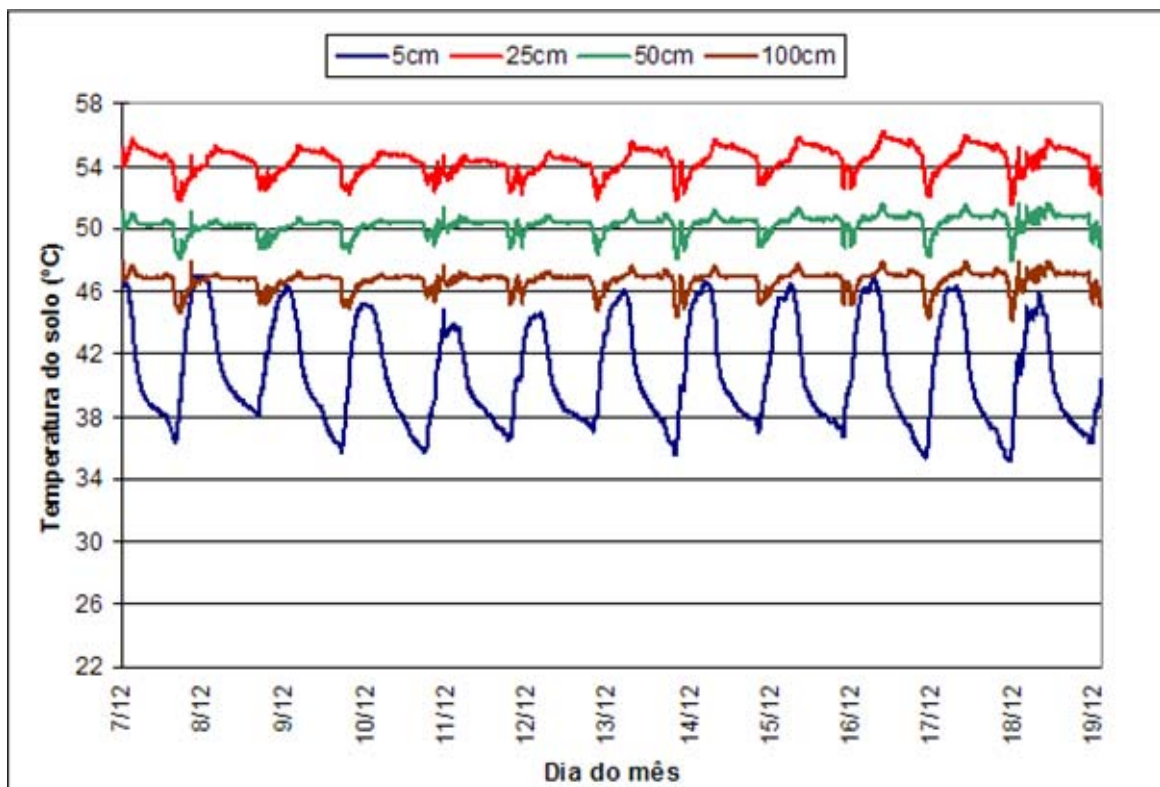


Figura 25 - Temperatura do Solo (°C) nos níveis de 5, 25, 50 e 100cm durante a 1ªtemporada de medições na área do Lixão de Maceió.

A radiação solar global média diária foi de aproximadamente $24 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (figura 26), portanto, o alto índice de radiação solar global pode ocasionar combustão espontânea, neste caso na superfície (pois o oxigênio é um componente indispensável para ocorrer o processo) resultando em fogos do segundo tipo descrito por Bergström & Björner (1992) quando afirmam que os fogos nos lixões podem ser divididos em duas categorias: profundos e de superfície, dependendo da posição onde se encontra o fogo. Os fogos profundos estão associados com a pirólise e produzem gases sem a presença de oxigênio, que contêm substâncias cancerígenas e mutagênicas. Já os gases dos fogos de superfície contêm quantidades muito mais baixas de tais substâncias.

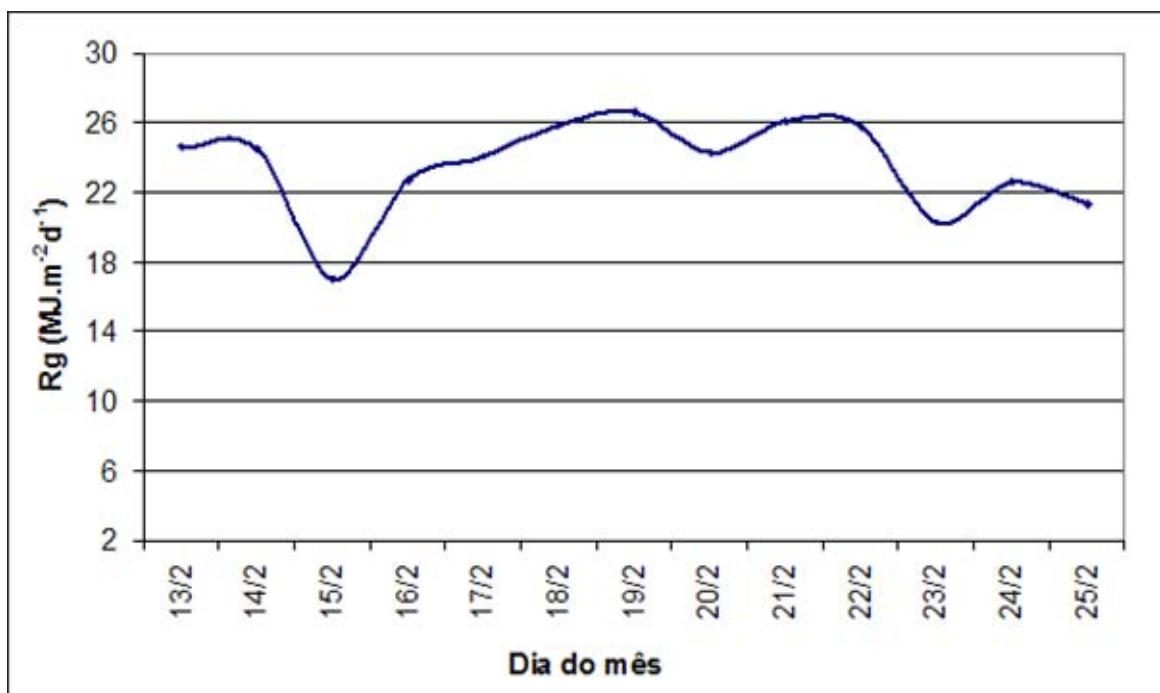


Figura 26 - Radiação solar global (R_g) diária ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) durante a 2ª temporada de medições na área do estudo.

A temperatura do solo nos diversos níveis medidos (figura 27) também se mostrou semelhante aos dados obtidos durante a 1ª temporada. Entretanto, é

importante ressaltar que durante este período as temperaturas nas profundidades de 25cm, 50cm e 100cm possuíram valores mais próximos entre si do que durante a 1ªtemporada. Já que o local onde o experimento foi realizado foi o mesmo durante as duas temporadas, essa aproximação dos valores da temperatura do solo nesses níveis pode ter sido devido a existir uma tendência das camadas do solo se homogeneizarem e com isso acarretar a homogeneização do solo.

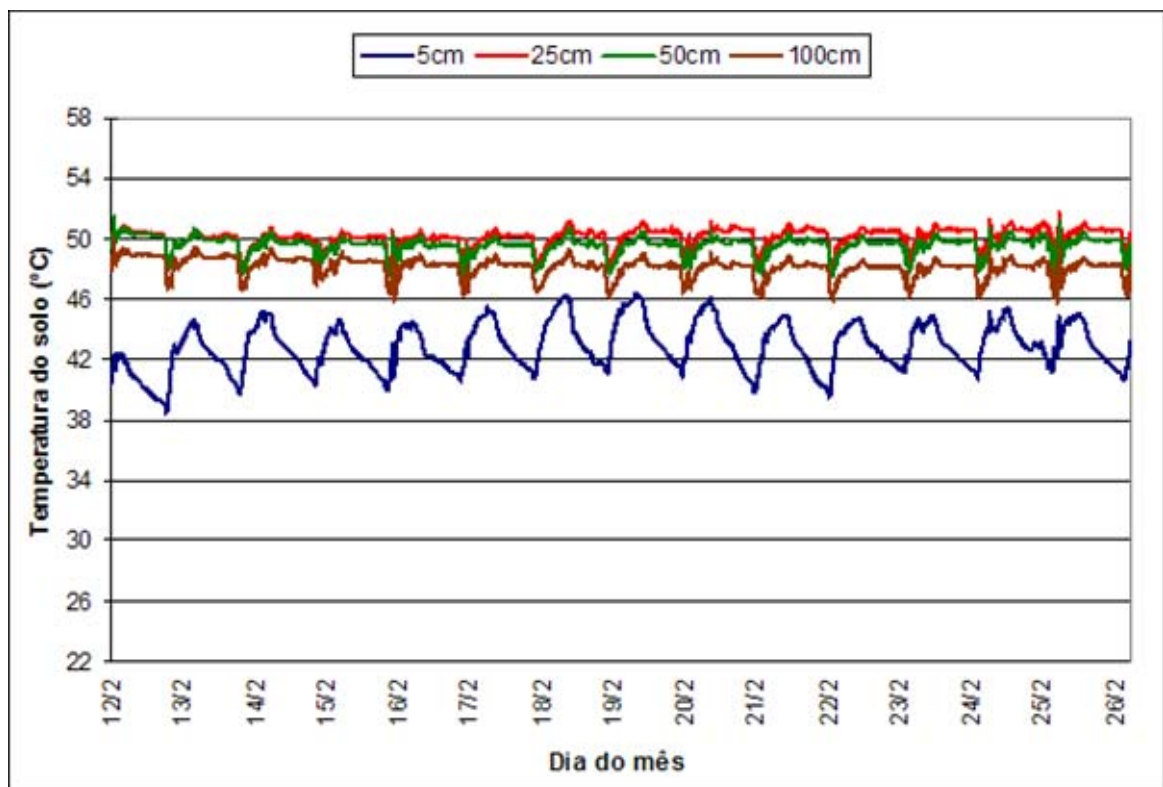


Figura 27 - Temperatura do Solo (°C) nos níveis de 5, 25, 50 e 100cm durante a 2ªtemporada de medições na área do Lixão de Maceió.

Uma outra explicação possível para essa ocorrência é a idade do lixo, ou seja, o tempo entre a deposição do mesmo no lixão e a realização do experimento. De Walle *et al.* (1978) afirmam que o lixo descarregado em um lixão está sujeito a processos de degradação aeróbica até o oxigênio ser totalmente

consumido. Contudo, após as camadas de lixo serem compactadas e cobertas novamente por lixo ou terra torna-se impossível a penetração do oxigênio. Então, uma subsequente fase anaeróbica se inicia e determina um aquecimento da temperatura do lixo devido a esse processo.

4.2.3 – Período Chuvoso

Durante o período chuvoso o principal problema que afeta a população residente próximo ao lixão é a emissão de gases odoríferos oriunda da atividade bacteriana no lixo depositado. Conforme Farquhar e Rovers (1973), as características biológicas do material dos lixões através dos processos de degradação geram gases. Os gases mais abundantes são o CO₂ (gás carbônico) e o CH₄ (metano) que, atuam como sumidouros do oxigênio do solo, até mais do que por seu efeito tóxico direto. Contudo, apesar desses gases serem os mais abundantes emitidos pelos lixões, a Amônia (NH₃) e o Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) desempenham um papel importante, pois possuem forte odor característico de material em decomposição incomodando por demais os moradores.

Hodgson *et al.* (1992) constataram que os aterros municipais produzem gases com uma variedade de solventes clorinados e benzeno, muitos daqueles conhecidos como agentes cancerígenos ou elementos suspeitos de o serem. Além disso, os pesquisadores detectaram estes gases em concentrações que são potencialmente significativos para a saúde da comunidade exposta a estas emissões. Fact Sheet (1997) complementa afirmando que o biogás gerado pelo lixo além de incluir pequenas proporções de nitrogênio, hidrogênio, amônia e

sulfeto de hidrogênio, também produzem outros gases de menores proporções (gases traços), entre eles pode-se destacar o benzeno, tolueno, alcanos, ésteres, os quais se encaixam na denominação de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e possuem efeitos contaminantes de alta toxicidade. A quantidade de VOCs varia conforme o aterro, dependendo do clima, da composição do lixo e das reações químicas que ocorrem.

Nota-se que durante a 3ª temporada do experimento foram observados casos de ocorrência de precipitação (11 casos de um total de 15 dias de experimento) (figura 28).

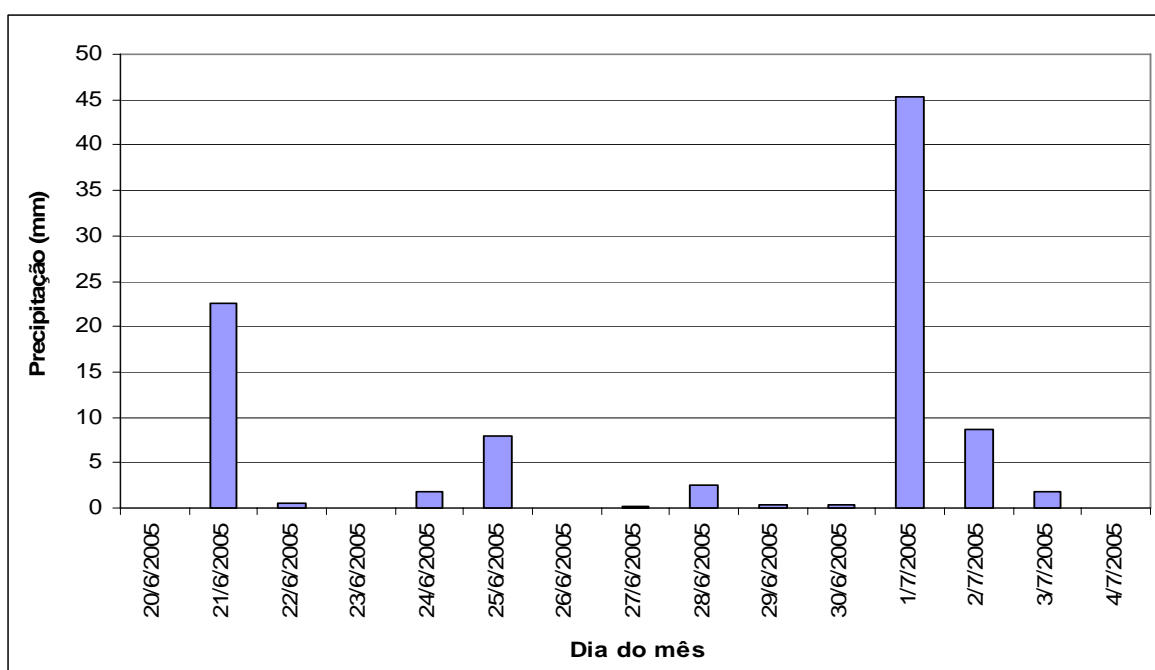


Figura 28 - Precipitação diária (mm) durante a 3ªtemporada na área do Lixão de Maceió-AL.

O aumento da precipitação na região ao longo da temporada fez com que os valores médios diários da radiação solar global diminuíssem (figura 29). A radiação média do período foi de $11,8 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, já quando houve grande

nebulosidade devido à precipitação, como por exemplo, nos dias 25/06 e 01/07, os valores foram de 5,8 e 4,5 $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ respectivamente.

Uma importante informação dos moradores que residem nas regiões mais próximas ao lixão é que os odores provenientes do mesmo não são muito perceptíveis durante a manhã, mas sim durante os períodos vespertinos e noturnos. Isso provavelmente está relacionado à atividade bacteriana que tem como produto esses odores, os quais são mais fortes com maiores valores da radiação solar global. Desse modo a radiação solar global média desempenha um papel importante para a produção dos gases odoríferos nos lixões no período chuvoso.



Figura 29 - Radiação solar global (Rg) diária ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) durante a 3ª temporada de medições na área do estudo.

Um contraste foi encontrado na comparação da temperatura do solo nos dois períodos estudados: o nível com maiores valores no período chuvoso foi de

100cm (figura 30), enquanto que no período seco foi de 25cm. Isso pode ser resultado do nível onde a emissão de gases provenientes do lixo é maior. Andreottola & Cossu (1988) afirmam que a produção de biogás depende estritamente da temperatura do lixo, assim como os processos biológicos dependem da variação da temperatura.

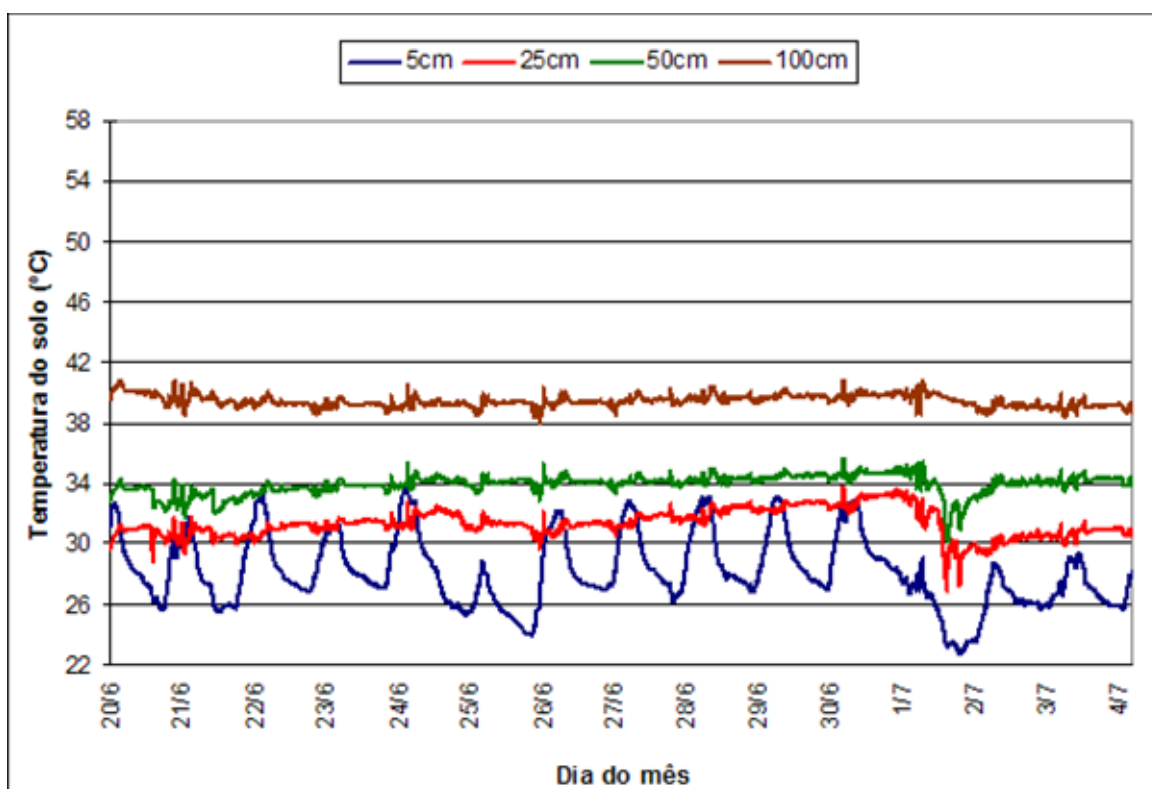


Figura 30 - Temperatura do Solo (°C) nos níveis de 5, 25, 50 e 100cm durante a 3ªtemporada de medições na área do Lixão de Maceió.

Chen *et al.* (2003) analisaram a emissão de gases do maior lixão (Fresh Kills Landfill) do mundo, encontrado em Staten Island – New York (EUA) em diferentes profundidades. Concluiu-se que a emissão de gás aumenta com a profundidade, sendo o máximo de emissão a 2m de profundidade. Os autores ainda afirmam que não se pode concluir que a geração do gás do lixo é maior

nessa profundidade, pois outros fatores podem coexistir na consumação do biogás produzido.

Um outro problema causado pelo odor oriundo da atividade bacteriana no lixão durante o período chuvoso é a proliferação de insetos. Conforme Lima (1995) o lixo contém substâncias de alto teor energético e oferece disponibilidade simultânea de água, alimento e abrigo, portanto o local é preferido por inúmeros organismos vivos, a ponto de algumas espécies o utilizarem como nicho ecológico.

Pode-se classificar em dois grandes grupos os seres que habitam o lixo: os macrovetores, como por exemplo, ratos, baratas, moscas. No segundo grupo os microvetores, vermes, bactérias, fungos e vírus, sendo estes últimos os de maior importância epidemiológica por serem patogênicos e, portanto nocivos ao homem. Estes vetores, quando em contato com o homem, são responsáveis pelo surgimento de doenças respiratórias, epidérmicas, intestinais e outras enfermidades lesivas e até letais, como a cólera, o tifo, a leptospirose, etc. Quanto aos macrovetores, os que oferecem maior risco ao homem e ao meio ambiente são os ratos, as moscas e as baratas. Além disso, o odor do material em decomposição atrai a presença de urubus, que causa grande transtorno à população que reside próxima ao lixão (Lima, 1995).

4.3 – Simulações Numéricas de Dispersão dos Poluentes durante o Período Seco

4.3.1 – Evento do Dia 08/12/2004

A escolha do dia em análise foi por se tratar de um dia sem precipitação, como todo o período da 1ªtemporada, porém com o maior valor médio diário da radiação solar global, aproximadamente $26 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, bem como altos valores médios diários da temperatura do ar ($27,2^{\circ}\text{C}$) e temperatura do solo nos diversos níveis estudados (42°C -5cm; 54°C -25cm; 50°C -50cm e 47°C -100cm). Conforme dito anteriormente, principalmente nesse período do ano, altos valores de radiação solar contribuem para a ocorrência de combustão espontânea do lixo, sendo esse o principal problema dos lixões durante o período seco da região.

A figura 31 mostra a concentração da amônia emitida pelo lixão de Maceió neste dia em questão com o modelo HYSPLIT. A máxima concentração na simulação entre 04h e 05h é de $1,5\cdot 10^{-11} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. É possível observar que a área mais atingida pelos gases liberados pelo lixão (área amarela) foi aproximadamente 2km na direção do vento, sendo que os bairros mais atingidos pela fumaça resultante da combustão espontânea do lixo e da deposição das cinzas durante esse período foram parte de Cruz das Almas, Sítio São Jorge e Serraria. A simulação da dispersão do Sulfeto de Hidrogênio mostrou uma máxima concentração de $1,5\cdot 10^{-08} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ com dispersão semelhante à mostrada na figura 31.

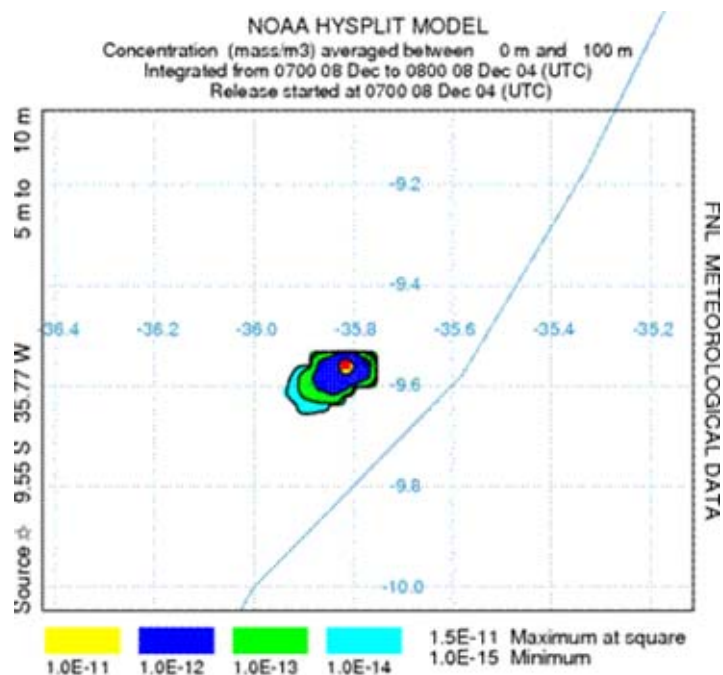


Figura 31 – Simulação da dispersão / concentração às 04h pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia (g.m^{-3}) liberada pelo lixão Maceió em 08/12/2004.

Nota-se na figura 32 que o dia escolhido para realizar simulações da concentração dos poluentes liberados pelo lixão de Maceió foi caracterizado por duas predominâncias da direção do vento. Segundo os dados da EMA instalada no local, de 3h até aproximadamente 7:30h a direção predominante do vento foi de 160° (Sul Sudeste) e a velocidade média do vento para o mesmo período foi de aproximadamente 2m.s^{-1} , enquanto que durante o início de madrugada até às 03h e a partir das 08h até o final do dia a direção predominante do vento passou a ser 95° (Leste) e a velocidade média do mesmo foi de aproximadamente $5,5\text{m.s}^{-1}$.

Portanto, é possível notar uma discrepância entre a direção do vento coletada pela EMA instalada no lixão, indicando dispersão aproximadamente para a direção Este-Noroeste, e a simulação do modelo HYSPLIT que indica uma

dispersão no sentido sudoeste. Também é possível observar neste exemplo que o modelo indica uma pequena dispersão dos poluentes, no caso amônia, provavelmente resultante da estabilidade atmosférica no período da simulação ocasionando em uma não dispersão dos poluentes durante esse período do dia.

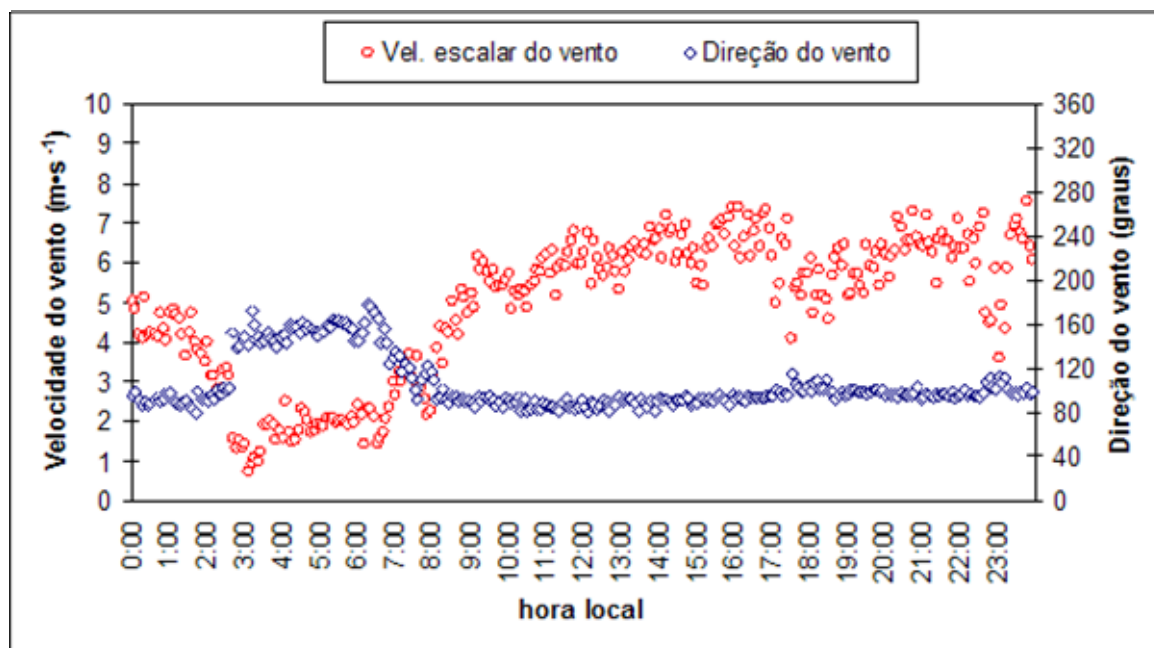


Figura 32 - Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 08 de dezembro de 2004 na área do Lixão de Maceió.

Os dados coletados pela EMA ainda indicam que a dispersão dos poluentes ocorre, para este dia, em dois sentidos principais. Durante a maior parte do dia os poluentes são dispersos para o leste da região do lixão, mas durante o início da manhã os mesmos são dispersos no sentido Este-Noroeste. Entretanto, vale ressaltar também a influência da velocidade do vento na dispersão desses poluentes. O período que o lixão afeta mais os moradores do seu entorno neste dia é durante o início da manhã, pois são os menores valores, se comparado com os valores da velocidade do vento para o resto do dia, possuindo diferença de até $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ em determinados períodos. Entretanto, os

moradores afetados serão aqueles que residem bastante próximos ao lixão, pelo mesmo motivo citado.

A figura 33 mostra a simulação da dispersão da Amônia (NH_3) pelo modelo gaussiano entre 4-5h do dia em questão. No lado esquerdo da figura podem-se observar os dados de entrada do modelo, dados estes obtidos pela EMA instalada no lixão na mesma hora da simulação do modelo. O resultado gerado mostra um máximo valor próximo a fonte emissora de aproximadamente $9,9 \cdot 10^{-09} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Além disso é possível observar que a direção em que os poluentes são dispersos é compatível com os dados obtidos pela EMA, mostrando que as áreas marcadas com os valores 4 e 3 são as mais atingidas pela dispersão dos poluentes, atingindo aproximadamente 2km. Essa área possui valores de concentrações entre $9,9 \cdot 10^{-09} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ e $3,7 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. Já para a simulação da dispersão do Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) encontrou uma máxima concentração de $2,1 \cdot 10^{-04} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ com dispersão no mesmo sentido da mostrada na figura 33.

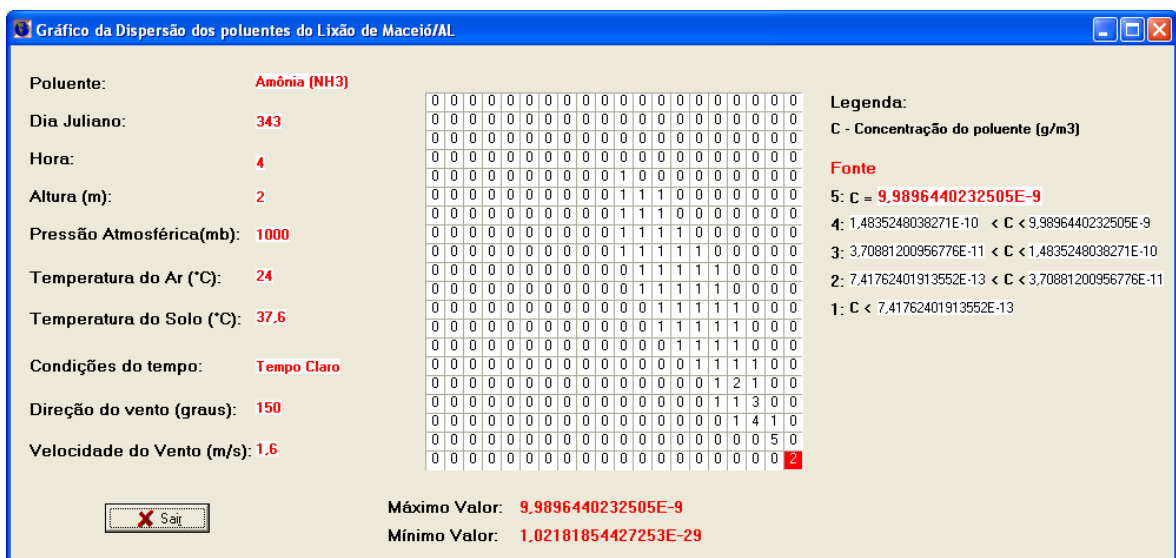


Figura 33 – Simulação da dispersão / concentração ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) às 04h pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 08/12/2004.

A figura 34 mostra que as camadas mais próximas à superfície até o nível de aproximadamente 930mb se encontravam instáveis as 6Z (3h local – perfil vertical mais próximo ao momento da simulação). Conforme mostrado no item 3.6.3 este modelo gaussiano calcula inicialmente o grau de estabilidade atmosférica para calcular a dispersão dos poluentes. Quando se compara o resultado obtido pelo modelo gaussiano e a simulação do perfil vertical da atmosfera é possível perceber que o modelo, no que diz respeito ao cálculo da estabilidade atmosférica para esse caso específico, mostra-se bastante satisfatório. O mesmo indica que a estabilidade atmosférica se encontra no grau B (item 2.6.3), ou seja, condicionalmente instável, sendo compatível com o resultado mostrado na figura 34.

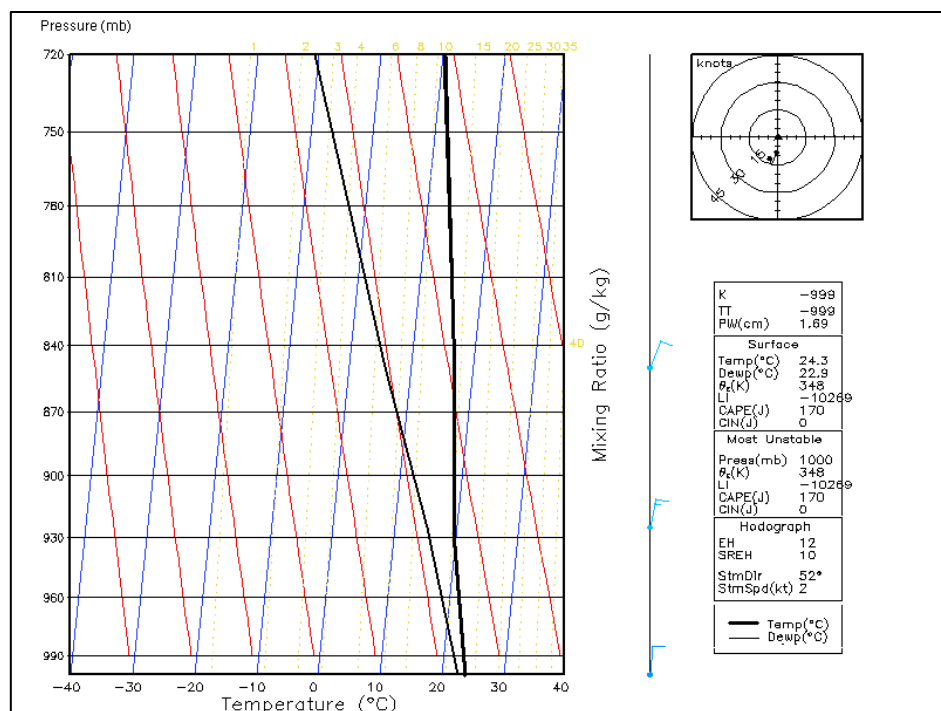


Figura 34 – Perfil vertical da atmosfera gerado pelo GrADS para o dia 08/12/2004 às 03h, hora local na região do lixão de Maceió.

Apesar da diferença nas concentrações máximas dos poluentes simulados em ambos os modelos, nota-se que os poluentes se concentraram próximos à fonte emissora nas duas simulações realizadas, provavelmente resultante de dois motivos: a estabilidade atmosférica presente na região durante o momento e a baixa velocidade do vento.

4.3.2 – Evento do Dia 11/12/2004

O dia em questão foi escolhido por possuir um dos menores valores médios, se comparados com outros dias da 1ª temporada de coleta de dados, de temperatura do ar (26,8°C) além dos menores valores médios diário da radiação solar global, aproximadamente $22,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, temperatura do solo em todos os níveis medidos (5cm-39°C; 25cm-54°C; 50cm-20,24 e 100cm-46°C). Portanto, um caso apropriado para se analisar a dispersão dos poluentes do lixão de Maceió, ou seja, a fumaça resultante da combustão espontânea que incomoda os moradores da região, além do incômodo das cinzas transportadas pelo vento junto com a fumaça.

Na figura 35 observa-se a simulação da dispersão da amônia no modelo HYSPLIT_4 em dois períodos diferentes: 03h às 04h (figura 35a) e de 14h às 15h (figura 35b). A máxima concentração mostrada na figura 35a é de $1,8\cdot 10^{-11} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ afetando principalmente (área amarela) 3,5km ao longo da trajetória (atingindo os bairros de Cruz das Almas e Jacintinho), enquanto que a figura 35b mostra a máxima concentração de $8,2\cdot 10^{-12} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ de amônia sendo emitido e disperso para a atmosfera afetando Cruz das Almas, Feitosa e Gruta de Lourdes (11km).

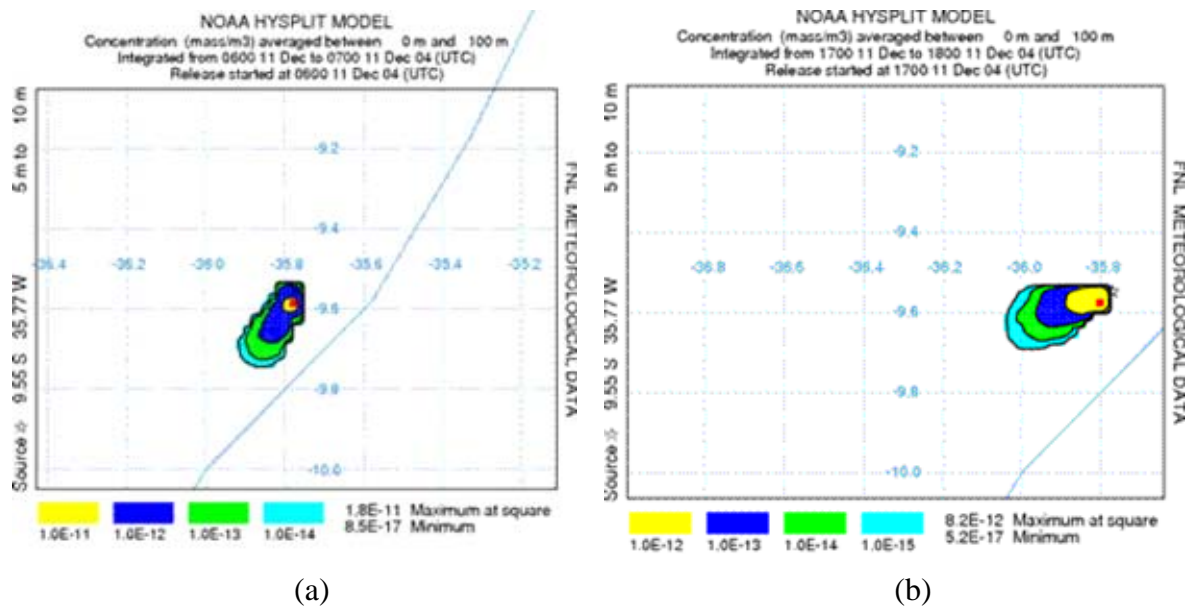


Figura 35 – Simulação da dispersão / concentração às 03h(a) e 14h(b) pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 11/12/2004.

A simulação da dispersão do Sulfeto de Hidrogênio foi semelhante à da amônia mostrada na figura 35, no entanto como resultado da concentração inicial de poluentes inserida no modelo obtêm-se concentrações máximas de $1,8\cdot 10^{-08}$ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e de $8,2\cdot 10^{-09}$ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivamente para os períodos da madrugada e vespertino.

A direção do vento, mostrada na figura 36, possuiu duas predominâncias durante o dia, entre 00h até 9h é de Sul-Sudeste (aproximadamente 155°) e a partir das 9h até aproximadamente 22h sendo de Leste (aproximadamente 96°). Dessa maneira os poluentes foram dispersos em dois sentidos principais: Norte-Nordeste, durante a madrugada e início da manhã do dia em análise; Oeste, durante a maior parte do dia. Porém, a simulação do modelo HYSPLIT, novamente, mostrou resultados incompatíveis com os dados obtidos através da

EMA instalada no lixão. A simulação para as 03h e 14h realizadas pelo HYSPLIT mostra uma dispersão no sentido Sudoeste (3h) e Leste (14h), divergindo no primeiro período simulado da direção do vento obtida pela EMA.

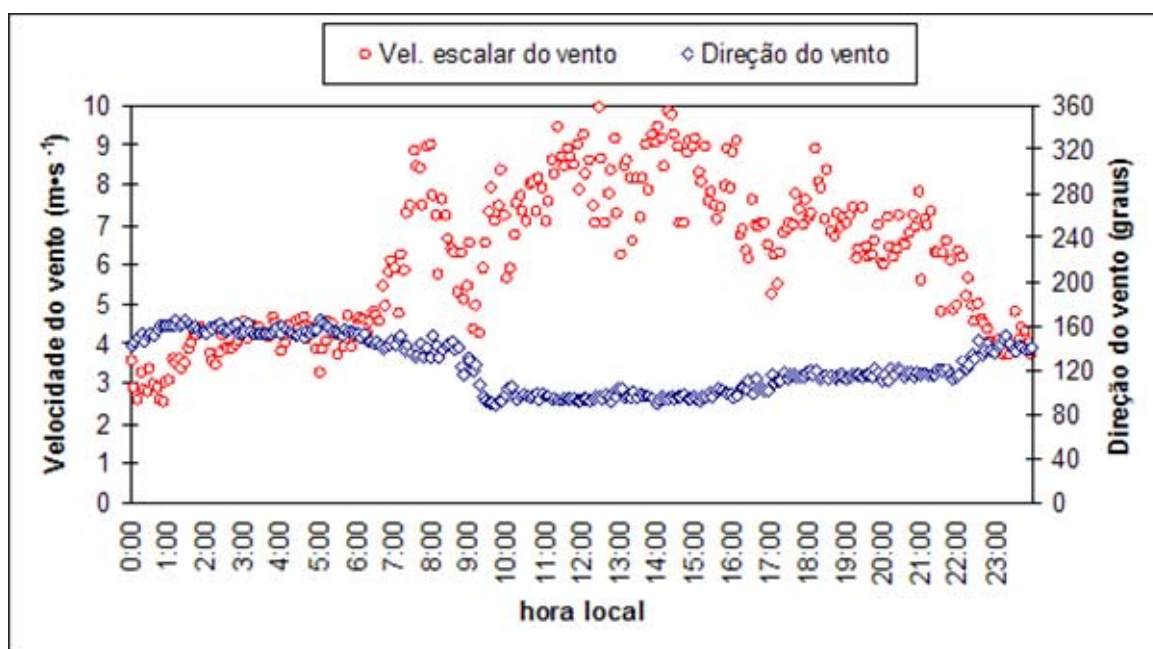
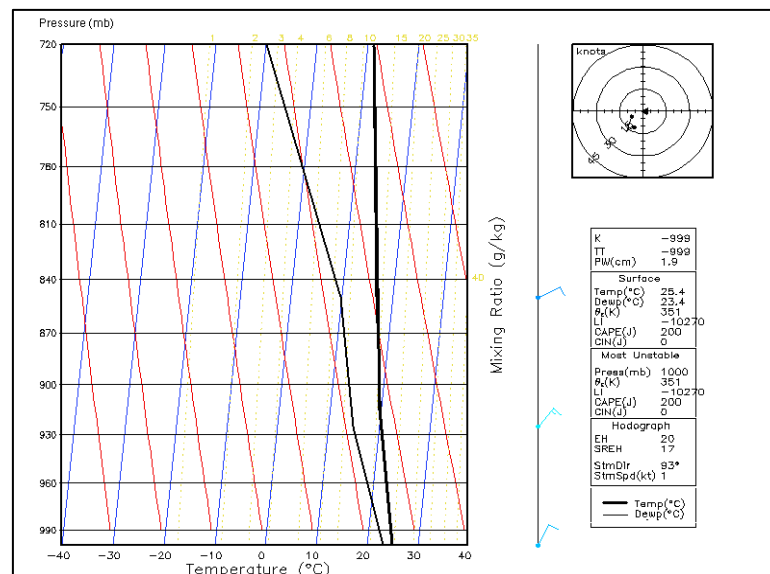


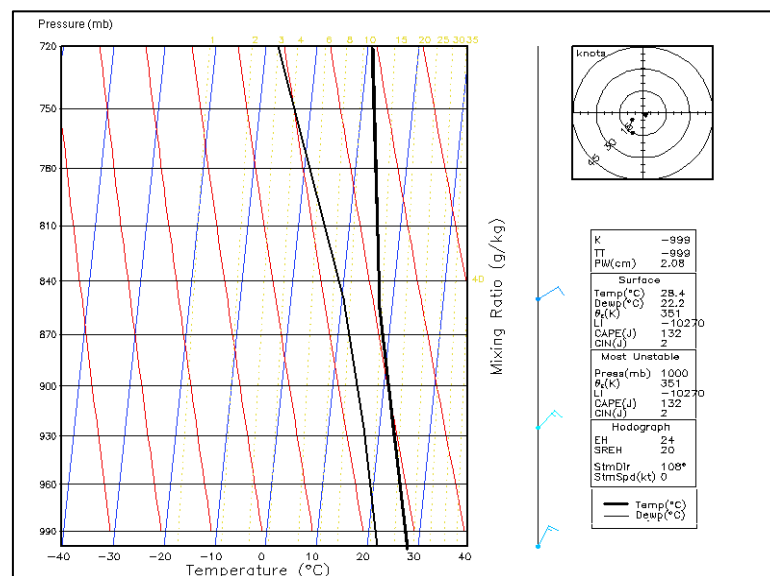
Figura 36 - Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 11 de dezembro de 2004 na área do Lixão de Maceió.

Ainda é importante observar que existiu grande variação na velocidade do vento neste dia. Durante a primeira predominância da direção do vento, a velocidade média obtida pela EMA instalada no lixão foi de aproximadamente $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, enquanto no segundo período analisado foi o dobro (aproximadamente $8,3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Dessa forma, os poluentes seriam mais dispersos durante o segundo período em análise diminuindo a máxima concentração, o que as simulações pelo modelo HYSPLIT indicam claramente (principalmente se ressaltarmos a área amarela das figuras e pelo valor da máxima concentração).

É possível perceber que a atmosfera durante o período da madrugada, conforme mostra a figura 37a, está condicionalmente estável, em contrapartida se encontra mais instável durante a tarde do dia em análise. O modelo indica graus de estabilidade/instabilidade parecido com o resultado da simulação do script pelo GrADS. Sendo grau E durante o período da madrugada, ou seja, bastante estável e grau C, condicionalmente instável durante o período da tarde.



(a)



(b)

Figura 37 – Perfil vertical da atmosfera gerado pelo GrADS para o dia 11/12/2004 às 03h(a) e 15h(b) – hora local na região do lixão de Maceió.

Seinfeld (1986) afirma que uma das dificuldades no uso de alguns modelos de dispersão de poluentes é a estimativa do grau de estabilidade atmosférica, segundo a classificação de Pasquill, cuja determinação depende de parâmetros meteorológicos, tais como a radiação solar e cobertura de nuvens que nem sempre estão disponíveis e, por isso são utilizadas formas empíricas para a obtenção da mesma. Todavia, com a utilização de uma EMA instalada no período onde se deseja simular a dispersão de poluentes esse problema não existe.

A estabilidade do ar, segundo vários autores, tais como Godish (1985), Baumbach (1996) e Almeida (1999) compromete a dispersão dos poluentes. Além disso faz com que ocorra deposição das cinzas decorrentes da fumaça resultante da combustão espontânea do lixo afetando os moradores residentes próximos ao Lixão, mesmo durante a madrugada. Portanto, apesar da concentração simulada pelo modelo HYSPLIT_4 durante o período vespertino ($8,2 \cdot 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) ser menor do que o período diurno ($1,8 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) pode acontecer casos dos poluentes afetarem mais a população durante a noite, como no exemplo acima citado, por conta da menor intensidade do vento e pela estabilidade do ar.

Um importante fenômeno que é observado por moradores da região circunvizinha ao lixão são os casos de queimas do lixo durante a noite. Segundo relatos da gerência do Lixão, acontece que eventualmente ocorre combustão espontânea e os responsáveis para conter o fogo não apagam o mesmo, seja por não terem notado ou pela hora da ocorrência (final do turno de trabalho). Desse modo, normalmente o fogo começa durante o período vespertino e avança noite adentro.

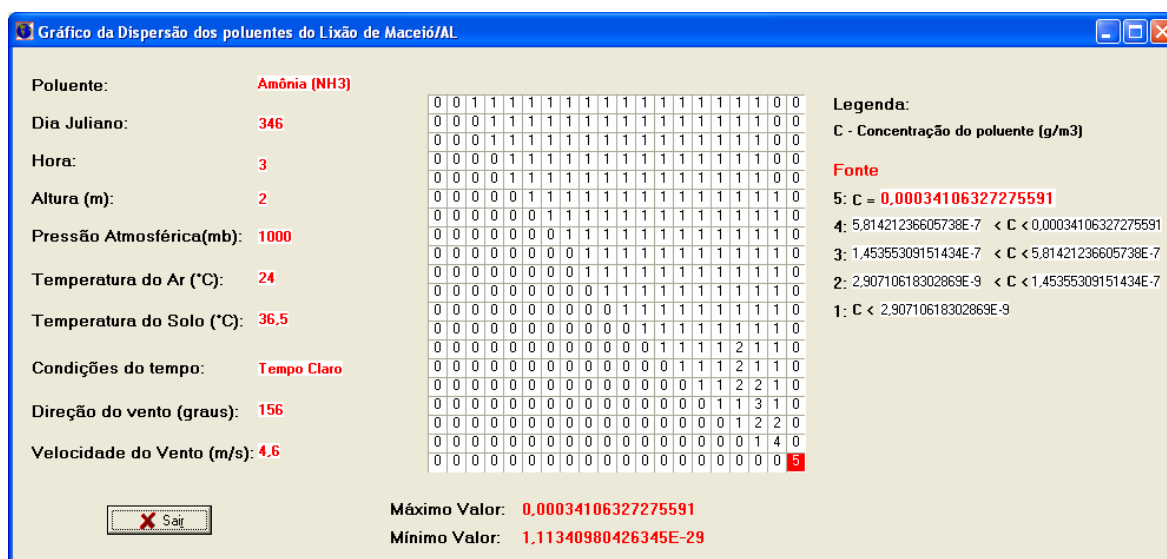
Vale ressaltar que no final da tarde do dia 31/12/2004 iniciou-se, através de combustão espontânea, focos de incêndio no lixo. Esses fogos se alastraram por toda a área onde o lixo é depositado, devido à ausência de funcionários nesse dia. Este incêndio se prolongou durante 3 dias seguidos, pois os funcionários do lixão não conseguiram contê-lo, afetando bastante todos os moradores circunvizinhos ao lixão.

Já a simulação pelo modelo gaussiano mostra a dispersão/concentração da amônia emitida nos dois períodos analisados durante o dia 11/12/2004: 3h (figura 38a) e 14h (figura 38b). O padrão da dispersão mostrado nas figuras se aplica também para o Sulfeto de Hidrogênio, bem como para todo o biogás emitido pelo lixão, só variando as concentrações de cada componente do biogás.

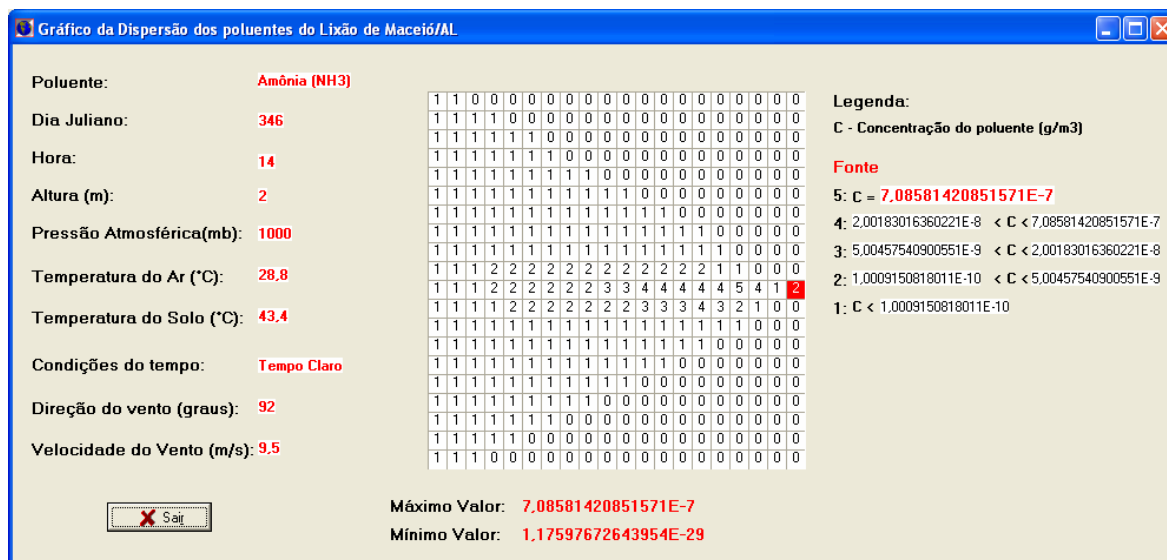
A máxima concentração da amônia para o período da madrugada estudado é de $3,4 \cdot 10^{-04} \text{ g.m}^{-3}$, enquanto para o sulfeto de hidrogênio foi de $3,6 \cdot 10^{-01} \text{ g.m}^{-3}$ sendo ambos dispersos no sentido Norte-Noroeste, portanto compatível com a direção do vento obtida pela EMA. Durante o período vespertino (14h) foram calculadas as concentrações máxima de $7,1 \cdot 10^{-07} \text{ g.m}^{-3}$ de amônia e $2,9 \cdot 10^{-02} \text{ g.m}^{-3}$ de sulfeto de hidrogênio dispersados na direção Oeste do lixão de Maceió, também compatível com a direção do vento obtida pela EMA no período

Comparando as figuras 38a e 38b percebe-se que a concentração dos poluentes durante o período da madrugada é maior do que durante a tarde do dia analisado. Além disso, a dispersão dos poluentes é menor durante a madrugada (atingindo aproximadamente 1km x 2km se considerado as concentrações grau 5, 4 e 3 das simulações), provavelmente, conforme já comentado anteriormente, resultado da estabilidade atmosférica presente na região durante esse período.

Dessa forma os poluentes, durante a madrugada, possuem uma concentração maior, contudo afetando uma área mais próxima ao lixão, se comparado com o outro período analisado.



(a)



(b)

Figura 38 – Simulação da dispersão / concentração (g.m⁻³) às 03h(a) e 14h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 11/12/2004.

A comparação da principal distância alcançada da amônia liberada pelo lixão simulada pelos modelos mostrou uma incompatibilidade. Embora mostre que ocorre uma maior dispersão e diluição durante a tarde, o modelo HYSPLIT tende a superestimar a distância alcançada pelo poluente. Isso provavelmente é decorrente da resolução do modelo de aproximadamente 190km.

4.3.3 – Evento do Dia 17/02/2005

O dia em questão foi escolhido pelo fato do dia anterior ter ocorrido cerca de 3mm de precipitação. Este dia também teve alto valor de radiação solar ($24\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), um dos maiores durante a realização da 2ª temporada (12/02/2005 a 26/02/2005). Além disso, também foram registrados altos valores médios diários da temperatura do ar ($28,6^{\circ}\text{C}$) e da temperatura do solo nos diversos níveis estudados - aproximadamente $43,0^{\circ}\text{C}$ - 5cm; $50,0^{\circ}\text{C}$ - 25cm; $49,4^{\circ}\text{C}$ - 50cm e $48,1^{\circ}\text{C}$ - 100cm.

A 2ª temporada estava prevista inicialmente para ser realizada durante o mês de janeiro, que conforme a normal climatológica é o mês mais chuvoso durante o período seco da região (figura 21). Durante o decorrer do mês de janeiro não foi percebido nenhum indício do começo das chuvas climatologicamente esperadas, provavelmente devido a atuação de vórtices ciclônicos em altos níveis (VCANs) que se posicionaram, em sua maioria, sobre o leste do Nordeste e oceano adjacente, inibindo assim a ocorrência de precipitação nesse mês. Sendo assim, a temporada de coleta de dados foi adiada para o mês de fevereiro, na esperança de eventos com precipitação a serem analisados, o

que não ocorreu. Entretanto dois dias antes do dia simulado, não estando dentro do período da temporada, ocorreu precipitação.

A figura 39 mostra a simulação da dispersão/concentração da amônia pelo modelo HYSPLIT emitida pelo lixão de Maceió para o dia em análise em dois períodos distintos: 05h às 06h (figura 39a) e 10h às 11h (figura 39b). As figuras indicam as concentrações máximas bem como a dispersão da amônia (área amarela das figuras indicando aproximadamente 6km em ambas as simulações) bastante similar entre o período da madrugada ($8,5 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) se comparado com o período da manhã ($8,7 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$).

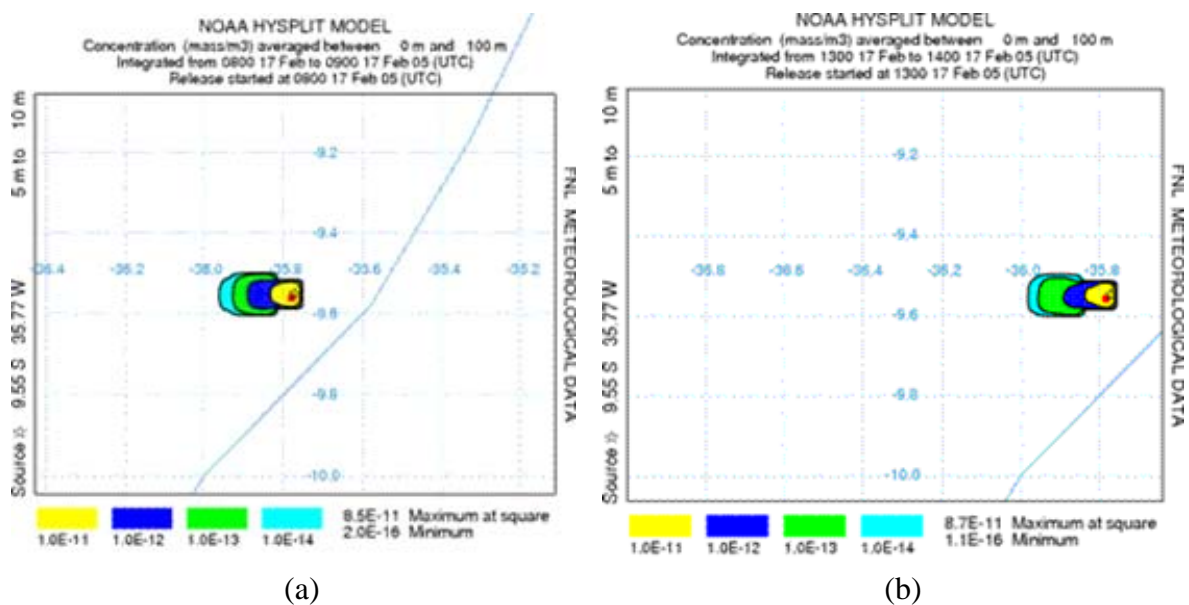


Figura 39 – Simulação da dispersão / concentração às 5h(a) e 10h(b) pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 17/02/2005.

A análise da velocidade do vento (figura 40) para os dois períodos distintos mostra que a mesma passa aproximadamente de $3,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (período da madrugada) para $5,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (final da manhã e começo da tarde). Desse modo, os

poluentes emitidos pelo lixão de Maceió durante as primeiras horas do dia analisado permanecem provavelmente mais tempo e em maior concentração, no entorno do lixão, se comparado com o outro período do dia analisado. A direção do vento medida pela EMA mostra que foi praticamente constante durante todo o dia (aproximadamente 120° - Leste-Sudeste). Portanto, o modelo HYSPLIT durante as simulações realizadas indica uma direção do vento discordante com os dados medidos, Oeste-Noroeste.

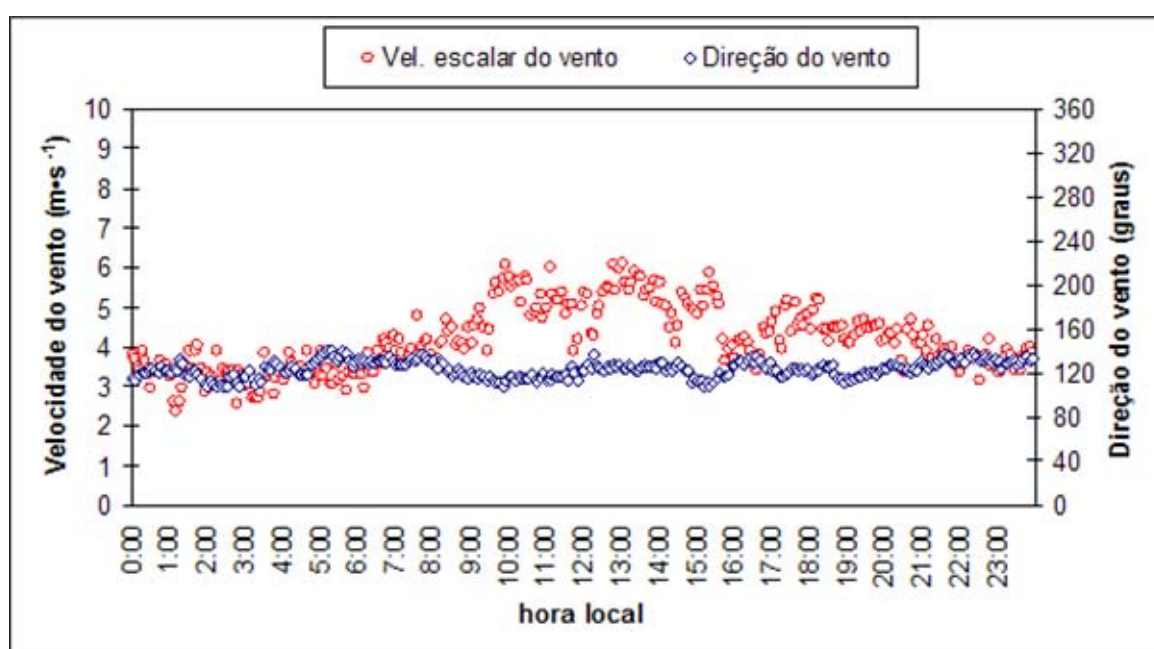
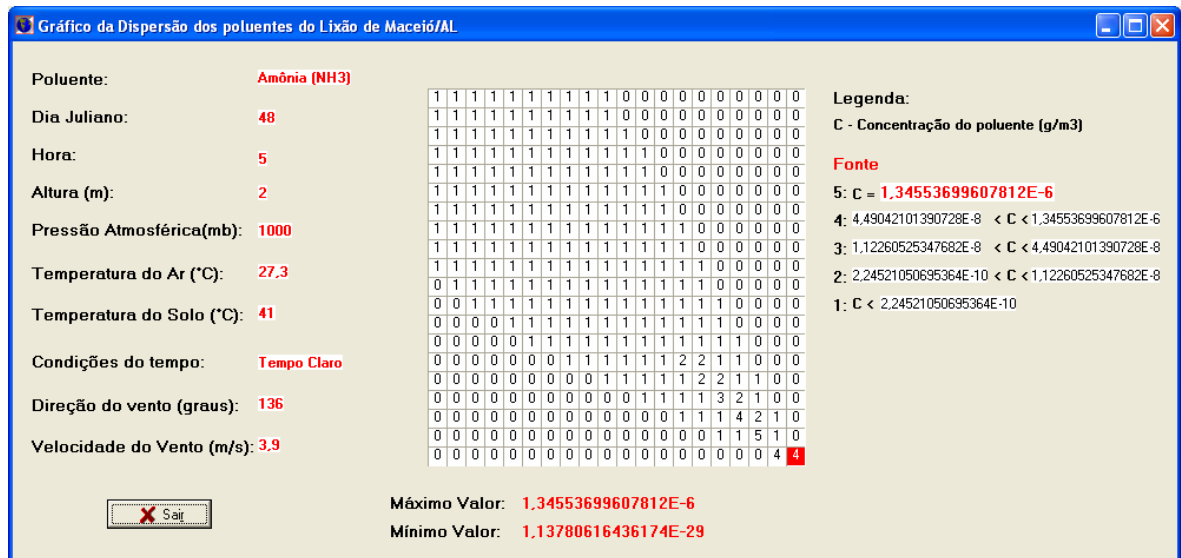


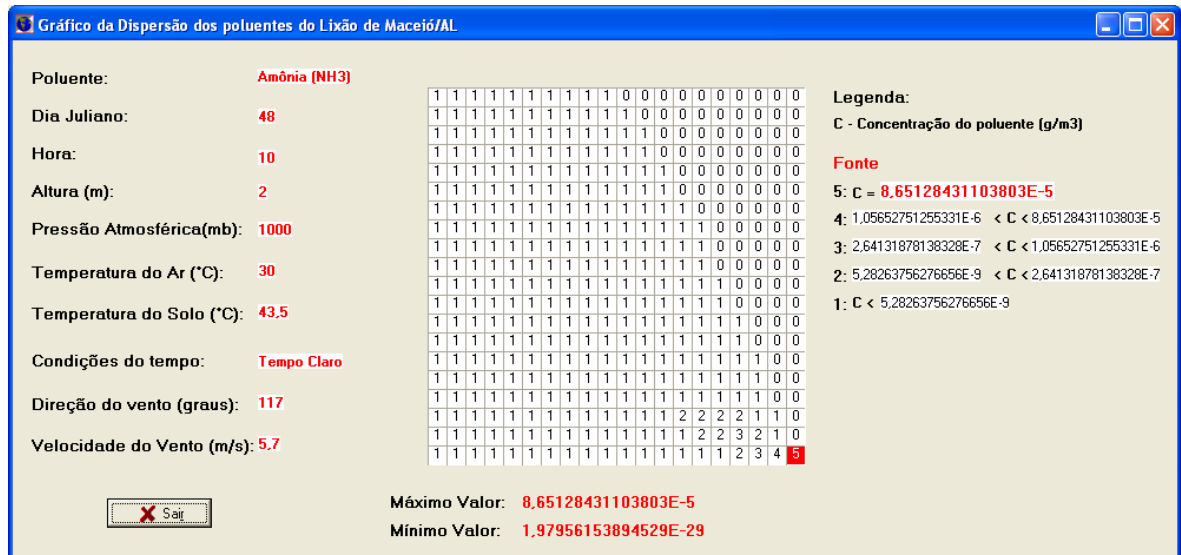
Figura 40 - Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 17 de fevereiro de 2005 na área do Lixão de Maceió.

A simulação pelo modelo gaussiano (figura 41) concorda com a direção do vento medida pela EMA, sendo a dispersão dos poluentes esperada para a mesma direção, alcançando aproximadamente 2km em ambos os períodos. Entretanto, o modelo gaussiano também mostra que a máxima concentração da amônia dispersada a partir do lixão durante o período da madrugada analisado ($1,3\cdot 10^{-06} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) é um pouco menor do que durante o período vespertino ($8,6\cdot 10^{-05}$

g.m^{-3}). Possivelmente essa discordância com o esperado, nesse caso, ocorre por causa da importância que a temperatura do ar possui no modelo gaussiano (diferença de 3°C entre os dois períodos analisados), contudo a diferença entre os dois períodos analisados em ambos os modelos utilizados é pequena.



(a)



(b)

Figura 41 – Simulação da dispersão / concentração (g.m^{-3}) às 05h(a) e 10h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 17/02/2005.

Já a simulação da dispersão do Sulfeto de Hidrogênio segue o mesmo padrão de dispersão mostrado na figura 41. Da mesma forma, este componente apresenta uma maior concentração máxima, no segundo período analisado ($8,8 \cdot 10^{-02} \text{ g.m}^{-3}$) se comparado com o período da madrugada ($4,5 \cdot 10^{-03} \text{ g.m}^{-3}$).

Apesar de ambos os modelos mostrarem uma maior concentração da amônia e de Sulfeto de Hidrogênio no segundo período simulado, esperar-se-ia o inverso. A análise da estabilidade atmosférica calculada pelo modelo indica que durante a madrugada desse dia a atmosfera se encontrava estável contribuindo assim, juntamente com os baixos valores da velocidade do vento medida pela EMA, para a não diluição dos poluentes emitidos pelo lixão. Já para o período da tarde a atmosfera se encontrava condicionalmente instável, o que juntamente com os maiores valores da velocidade do vento, fez com que os poluentes fossem bastante dispersos e diluídos na atmosfera, afetando menos os moradores próximos ao lixão.

4.4 – Simulações Numéricas de Dispersão dos Poluentes Durante o Período Chuvoso

4.4.1 – Evento do Dia 23/06/2005

O dia escolhido para simulação da dispersão dos poluentes através dos modelos analisados foi pelo fato do mesmo ser o primeiro dia sem registro de precipitação após dois dias seguidos de ocorrência da mesma perfazendo um total acumulado de aproximadamente 24mm. Este dia, mesmo sem a ocorrência

de precipitação, apresentou radiação solar global baixa como ocorrência de nebulosidade (aproximadamente $11 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), contudo a temperatura do ar foi uma das maiores da 3ª temporada (aproximadamente 27°C).

A figura 42 mostra as simulações pelo modelo HYSPLIT_4 em dois horários distintos durante o dia em análise: 10h às 11h (figura 42a) e 15h às 16h (figura 42b). Observa-se que as simulações realizadas pelo modelo HYSPLIT_4 foram bastante similares, incluindo a máxima concentração, sendo de $2,1\cdot 10^{-11} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ no horário de 10 às 11 horas (figura 42a) e $5,2\cdot 10^{-11} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ de 15h às 16h (figura 42b). Essa semelhança entre as duas simulações pode ter ocorrido por se tratar de horários com alta incidência de radiação solar na área estudada.

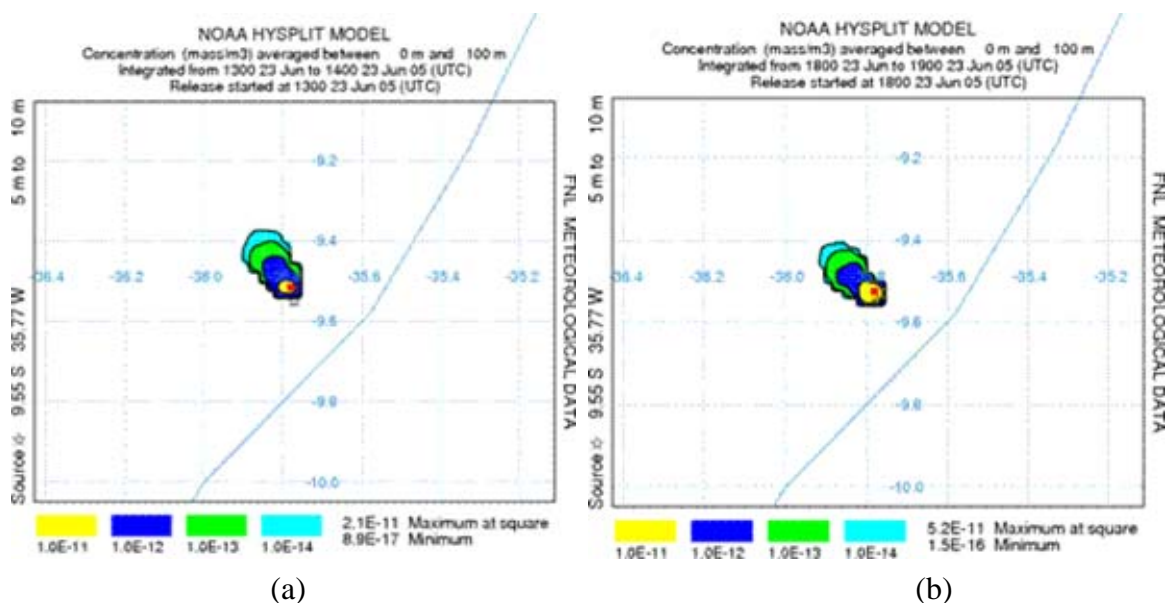


Figura 42 – Simulação da dispersão / concentração às 10h(a) e 15h(b) pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 23/06/2005.

A análise da direção predominante e da velocidade média do vento (figura 43) mostra uma grande variação na velocidade do vento, sendo a mínima de aproximadamente $2,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ durante o período da tarde e a máxima de

aproximadamente $6,7 \text{ m.s}^{-1}$ durante o período da manhã. Essa variação deveria indicar na simulação uma maior dispersão dos poluentes principalmente durante o primeiro período analisado, mas conforme comentado anteriormente não se percebe essa maior dispersão, sendo bastantes similares mesmo com uma variação máxima de 4 m.s^{-1} entre os períodos analisados, ocorrendo justamente o contrário: maior dispersão no segundo período (6km para o período vespertino x 2km para o período matutino). Já a direção do vento se manteve aproximadamente constante durante todo o dia (aproximadamente 190°) de Sul-Sudeste, assim sendo o modelo HYSPLIT se mostrou aproximadamente correto nos dois períodos analisados sobre a direção da dispersão dos poluentes emitidos pelo lixão, dispersando aproximadamente para Noroeste.

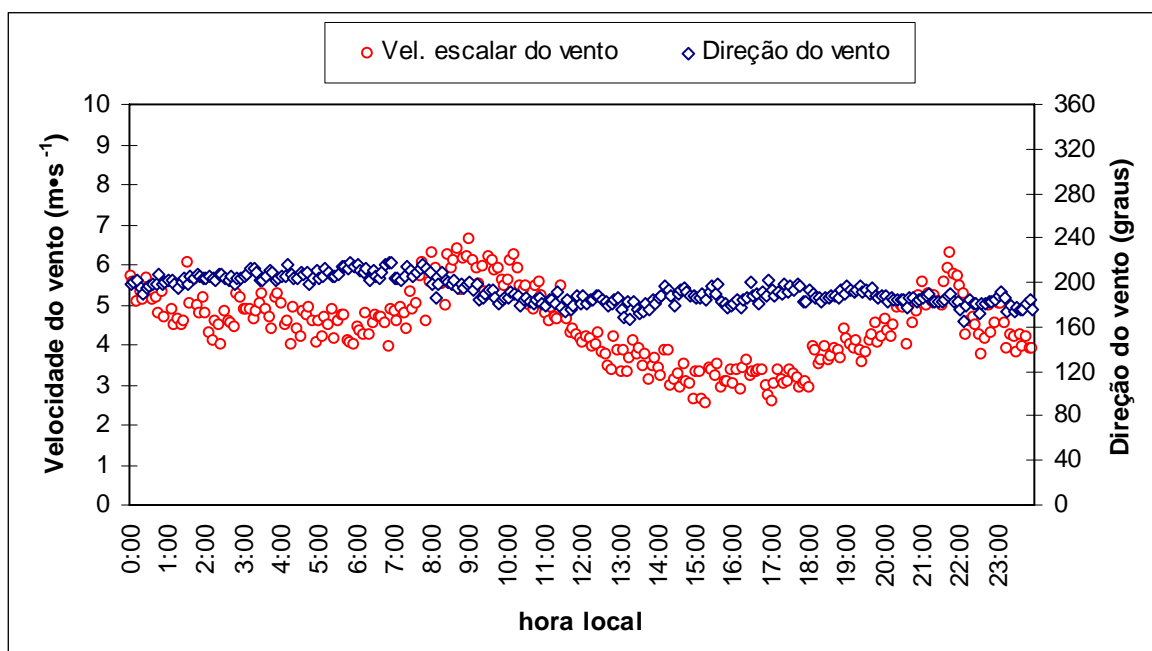
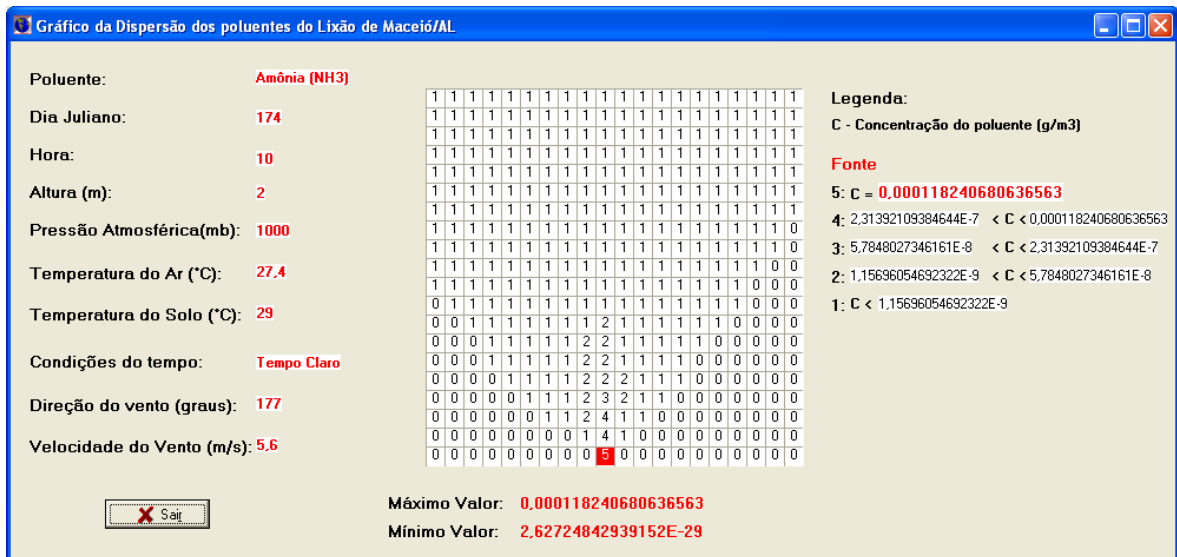


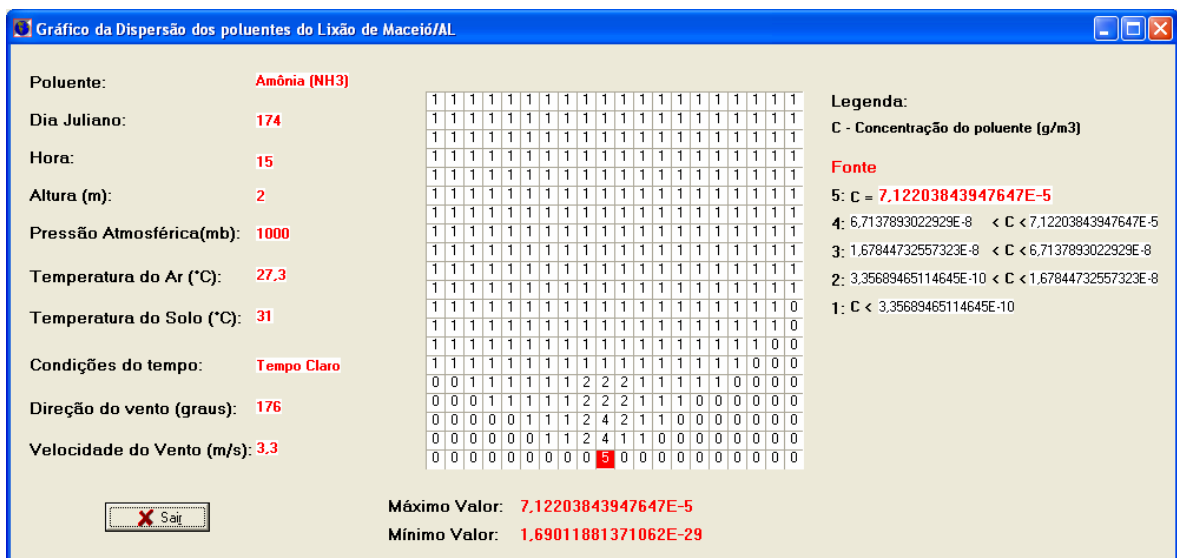
Figura 43 - Velocidade escalar (m.s^{-1}) e direção do vento (graus) no dia 23 de junho de 2005 na área do Lixão de Maceió.

A maior concentração máxima calculada pelo HYSPLIT ocorreu no período da tarde, o modelo gaussiano discorda desse fato e indica uma máxima

concentração durante o período da manhã ($1,2 \cdot 10^{-04} \text{ g.m}^{-3}$ para a amônia e $1,4 \cdot 10^{-01} \text{ g.m}^{-3}$ para o sulfeto de hidrogênio) na figura 44a, se comparado com o período da tarde ($7,1 \cdot 10^{-07} \text{ g.m}^{-3}$ para a amônia e $9,7 \cdot 10^{-02} \text{ g.m}^{-3}$ para o sulfeto de hidrogênio) na figura 44b.



(a)



(b)

Figura 44 – Simulação da dispersão / concentração (g.m^{-3}) às 10h(a) e 15h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 23/06/2005.

Uma possível explicação para a concentração máxima ser maior no período matutino além desse período possuir uma maior área atingida (parte amarela) pela amônia liberado pelo lixão é a condição do perfil atmosférico. Durante esse período a camada limite atmosférica se encontra mais baixa permitindo assim uma maior concentração dos poluentes.

Apesar da diferença do valor da concentração de amônia entre os dois modelos analisados, as simulações da dispersão da amônia através dos mesmos mostrou que a concentração máxima da mesma se restringe a um raio de alcance de aproximadamente 2km, área amarela nas simulações do HYSPLIT no primeiro período simulado e até grau 2 pelo modelo gaussiano em ambos as simulações. Esse resultado é condizente com os resultados obtidos por Sarkar *et al.* (2003), que analisaram a concentração de poluentes emitidos por um lixão no Reino Unido durante todo o ano de 1998 através de modelagem e coleta de amostras de ar. Os autores observaram que existe um perímetro de até aproximadamente 2km, na direção do vento, da máxima concentração de poluentes.

4.4.2 – Evento do Dia 28/06/2005

O dia em questão foi escolhido pela ocorrência de precipitação no dia anterior, bem como na manhã do dia em análise. Além disso, após essa precipitação foram registrados altos valores de radiação solar. Como anteriormente comentado, a radiação solar posterior à ocorrência de precipitação aumenta a atividade bacteriana no lixo, aumentando a emissão dos gases odoríferos, o que faz este dia bom para análise.

Inicialmente a análise da direção do vento (figura 45) nos mostra que a mesma permaneceu praticamente constante durante todo o dia (aproximadamente 180°). Contudo, percebe-se uma variação na velocidade do vento em 3 períodos distintos: durante a madrugada, entre 5h e 18h e no final do dia. A variação da velocidade do vento no período da madrugada ocorreu devido à precipitação registrada neste horário, que cessou no final da madrugada. Dessa maneira a atividade bacteriana se iniciou logo no início da manhã e perdurando todo o dia por causa dos altos valores de radiação solar registrados.

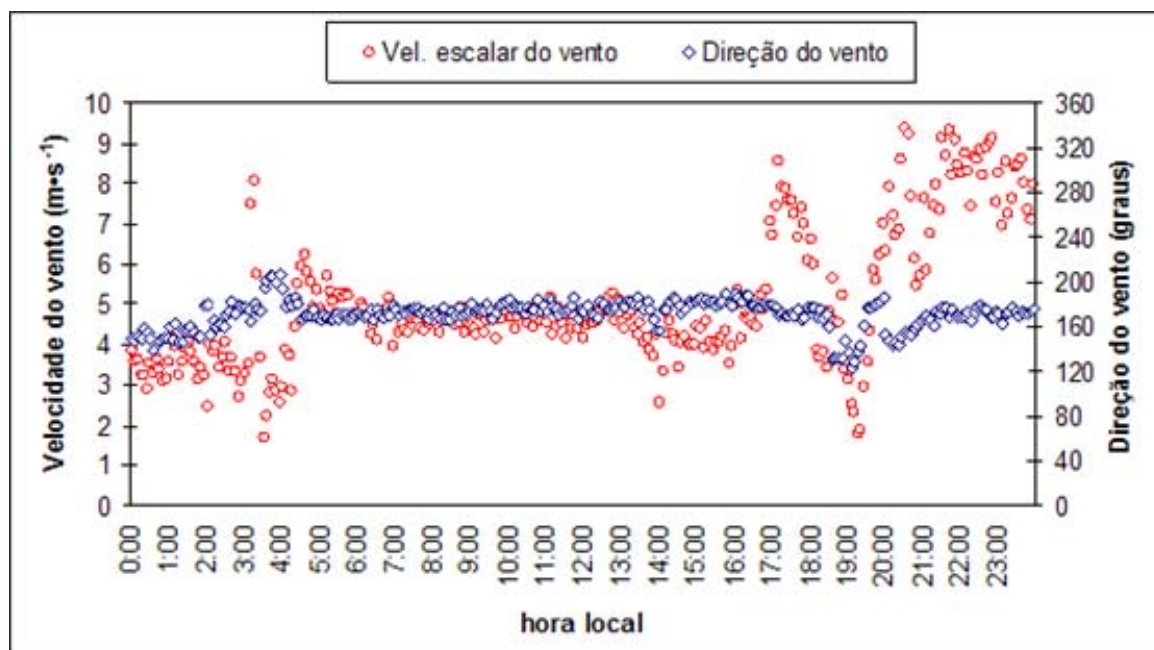


Figura 45 - Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 28 de junho de 2005 na área do Lixão de Maceió.

O período escolhido para simulação no HYSPLIT foi entre 09h e 10h (figura 46), pois neste período, além dos altos valores de radiação solar já mencionado, a direção e velocidade do vento foram constantes, sendo, portanto capaz de analisar melhor o resultado do modelo.

A dispersão dos poluentes simulada (figura 46) mostrou uma máxima concentração neste período de $1,9 \cdot 10^{-11} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ para a amônia e de $1,9 \cdot 10^{-08} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ para o sulfeto de hidrogênio, ficando claramente perceptível um erro referente a direção da dispersão desses poluentes. O modelo indica uma direção do vento de Oeste-Noroeste, enquanto os dados coletados pela EMA mostram que deveria ser Norte. Ainda através da figura observa-se que o modelo simula uma área atingida pelos poluentes (área amarela) de aproximadamente 3km, atingindo os seguintes bairros: Cruz das Almas, São Jorge e Barro Duro. Contudo, se considerarmos essa mesma distância na direção norte (direção da dispersão dos poluentes mostrada pela EMA) Cruz das Almas e Jacarecica seriam os bairros mais afetados pelos poluentes.

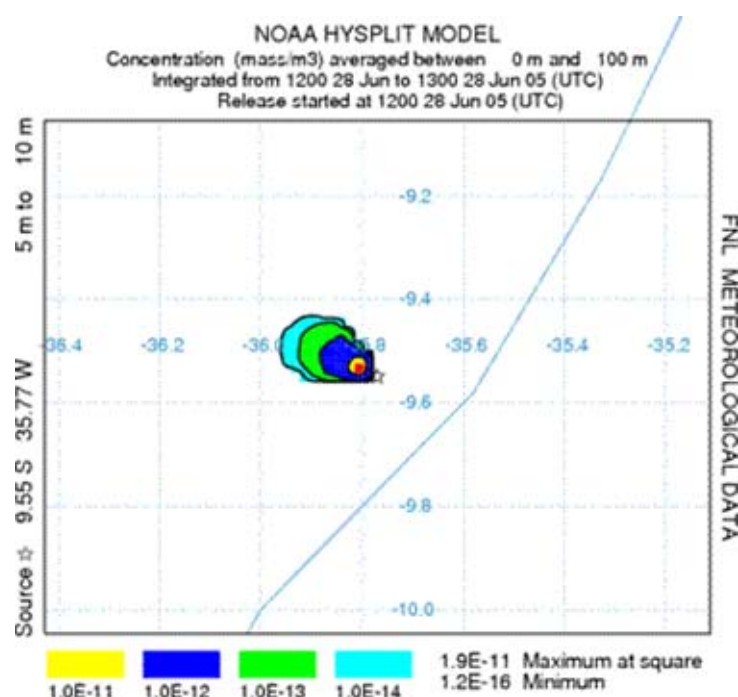


Figura 46 – Simulação da dispersão / concentração às 9h pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 28/06/2005.

Moraes (2001) afirma que as informações meteorológicas, variando no tempo, necessárias para os modelos de qualidade do ar podem vir de observações ou de saídas de modelos meteorológicos. Estes podem ser classificados ainda como diagnósticos ou prognósticos. Os modelos diagnósticos utilizam observações meteorológicas ou saídas de outros modelos para produzir os campos necessários aos modelos de dispersão. O modelo HYSPLIT, por se tratar de um modelo diagnóstico, utiliza dados de saída de outros modelos, dessa maneira aumenta a possibilidade de um erro, conforme o exemplo acima apresenta.

Em contraste com a simulação do HYSPLIT, o modelo gaussiano mostra a direção da dispersão da amônia emitida pelo lixo (figura 47) em concordância com os dados coletados. A máxima concentração alcançada nesta simulação foi de $6,1 \cdot 10^{-05} \text{g.m}^{-3}$, para a amônia e de $7,6 \cdot 10^{-02} \text{g.m}^{-3}$ para o sulfeto de hidrogênio.

Quando se analisa o perfil vertical da atmosfera no horário da simulação do modelo gaussiano (figura 48) constata-se que a atmosfera se encontrava aproximadamente estável, contribuindo para uma não dispersão dos poluentes na área. A análise do resultado dos modelos mostra que os poluentes não foram bem dispersos (o valor 4, por exemplo, na simulação do modelo gaussiano só está presente nas primeiras 2 quadrículas, 400m na direção do vento) atingindo aproximadamente 1km na direção do vento.

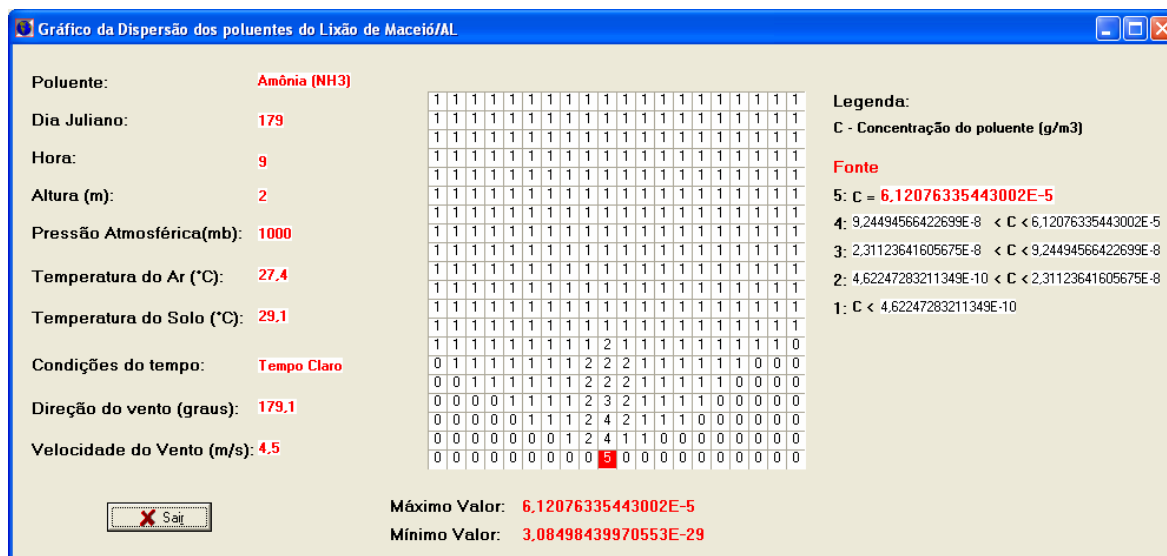


Figura 47 – Simulação da dispersão / concentração ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) às 9h pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 28/06/2005.

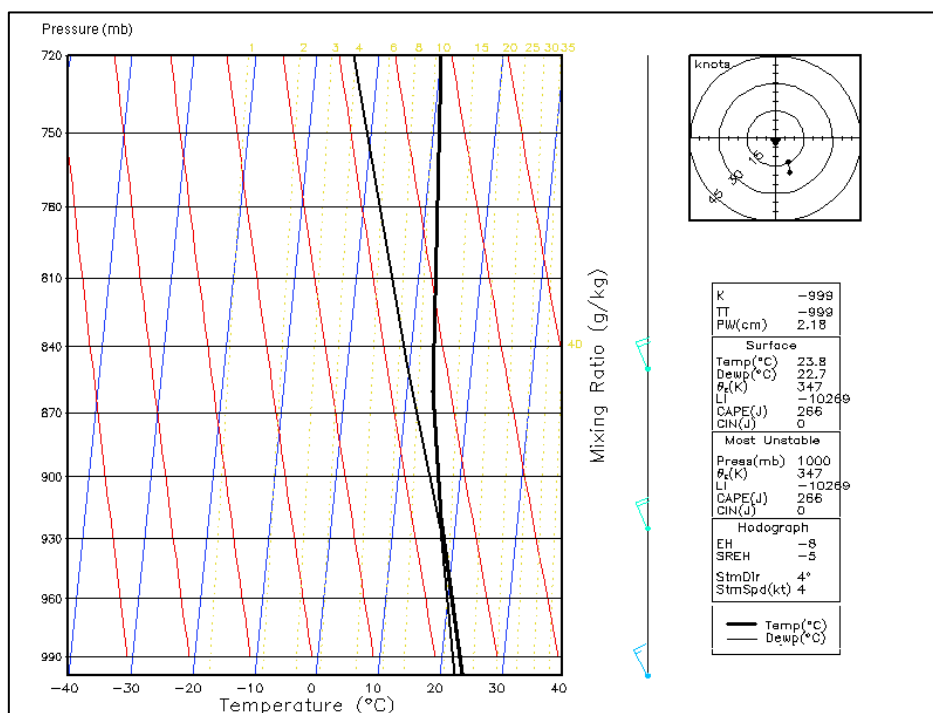


Figura 48– Perfil vertical da atmosfera gerado pelo GrADS para o dia 28/06/2005 às 9h – hora local na região do lixão de Maceió.

4.4.3 – Evento do Dia 03/07/2005

No dia 01/07/2005 ocorreu forte precipitação (aproximadamente 45mm), sendo a maior do período do experimento, e o menor valor de radiação solar global média dentro do período chuvoso, $4,5 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. No dia seguinte também ocorreu precipitação, perfazendo um total acumulado nesses dois dias de aproximadamente 55mm. Conforme já comentado, a radiação solar aumenta a atividade bacteriana que resulta na emissão de gases do lixo. Dessa forma escolheu-se o dia em questão, pois mesmo com a ocorrência de baixa precipitação (2mm) foram registrados quase o dobro do valor médio diário da radiação solar do dia 01/07/2005 ($10 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

Nota-se que a direção do vento foi predominantemente Sul durante todo o dia em análise (figura 49); logo, os poluentes emitidos pelas bactérias deverão ser soprados ao norte do lixão. Entretanto, se analisarmos a simulação do modelo HYSPLIT para os dois períodos escolhidos (13h às 14h - figura 50a e 18h às 19h – figura 50b) percebemos que o mesmo não indica uma direção do vento oriunda do Sul, mas de Sudeste, dispersando os poluentes para noroeste até uma distância de aproximadamente 6km em ambas as simulações.

Uma possibilidade para os erros decorrentes da direção do vento no local simulado pode ser a importância excessiva que o HYSPLIT dê aos ventos alísios. Nessa época do ano, apesar de não registrado durante esse período do experimento, a direção predominante do vento para Maceió é de Sudeste, principalmente pela atuação dos ventos alísios. Dessa maneira, acredita-se que o HYSPLIT, por causa dos poucos dados meteorológicos presentes na região,

considere a direção do vento como a da climatologia do local, sem considerar fenômenos sinóticos de meso e micro escala que afetem a região.

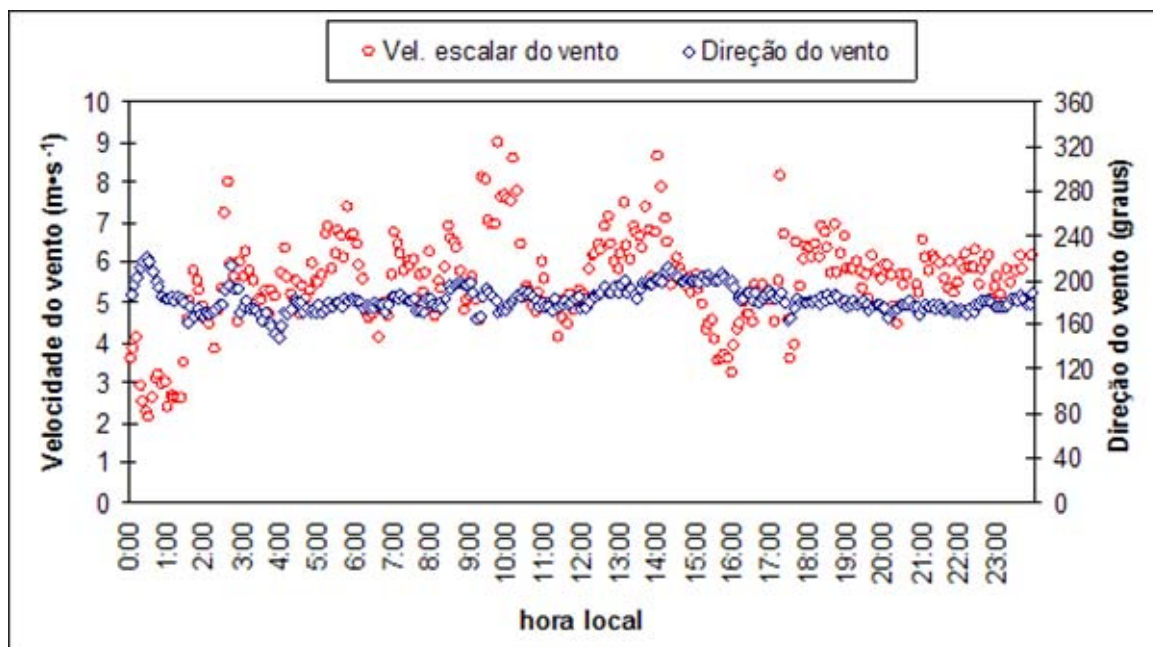


Figura 49 - Velocidade escalar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) e direção do vento (graus) no dia 03 de julho de 2005 na área do Lixão de Maceió.

Outra possibilidade é que sejam erros oriundos dos dados de reanálise do NCEP, cujos dados meteorológicos o modelo HYSPLIT utiliza para realizar suas simulações. Pode-se notar na figura 50 que os dados do NCEP concordam com a direção do vento mostrada na simulação do modelo HYSPLIT (51a) e ambas diferem da direção do vento medida pela EMA durante o experimento.

O mesmo modelo mostra ainda uma maior concentração durante o período noturno (figura 51b) se comparado com o período vespertino (figura 51a) analisado ($4,0\cdot 10^{-11} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ x $3,5\cdot 10^{-11} \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$). Conforme observado na figura 49, a velocidade do vento, se confrontados os dois períodos analisados, foram praticamente iguais (com exceção do final do período vespertino escolhido,

chegando a diminuir até $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$). Estes valores não devem ter sido calculados pelo modelo como resultado da velocidade do vento, pois quanto menor maior a concentração de poluentes. Uma possível explicação é a estabilidade atmosférica dos dois períodos. Durante o período vespertino, devido a maior incidência de radiação solar, o perfil da atmosfera próximo à superfície se encontra instável, dispersando melhor os poluentes do que durante o período noturno, ocorrendo o inverso.

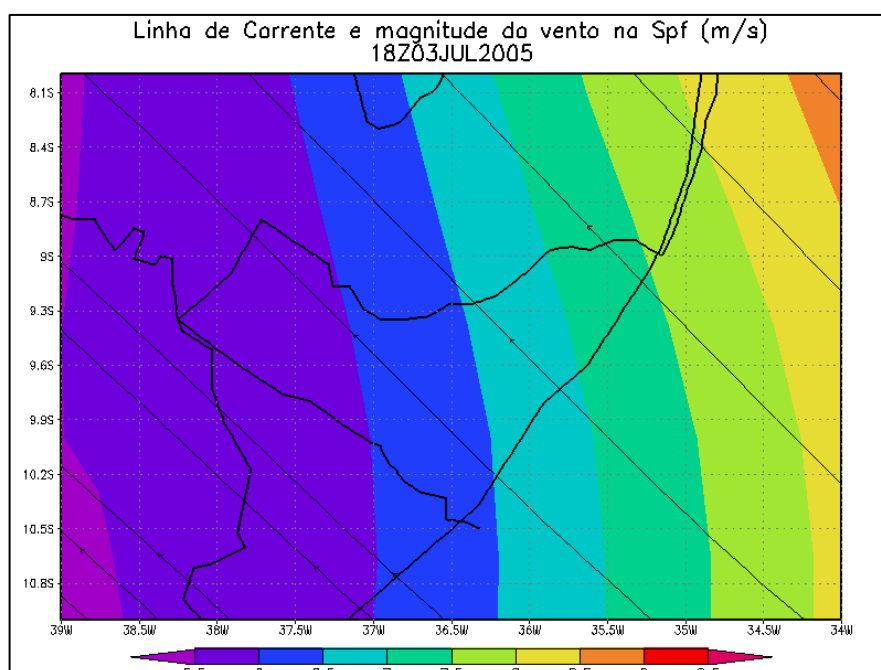


Figura 50 - Linhas de corrente e magnitude do vento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) para as 15h (hora local) do dia 03/07/2005

A simulação da dispersão da amônia pelo outro modelo utilizado também indica uma maior concentração máxima durante o período noturno ($3,1\cdot 10^{-04}\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na figura 52a se comparado com o período da tarde ($9,9\cdot 10^{-05}\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na figura 52b. Para o sulfeto de hidrogênio temos uma máxima concentração de $1,2\cdot 10^{-01}\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para o período vespertino e $3,6\cdot 10^{-01}\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para o período de simulação noturna.

Ressalta-se ainda que as simulações mostram a dispersão dos poluentes (amônia e sulfeto de hidrogênio, mas sendo aplicado a todo o biogás emitido pelo lixão) nas direções Norte-Nordeste e Norte, para os períodos vespertino e noturno respectivamente, direções esperadas conforme dados coletados através da EMA o lixão.

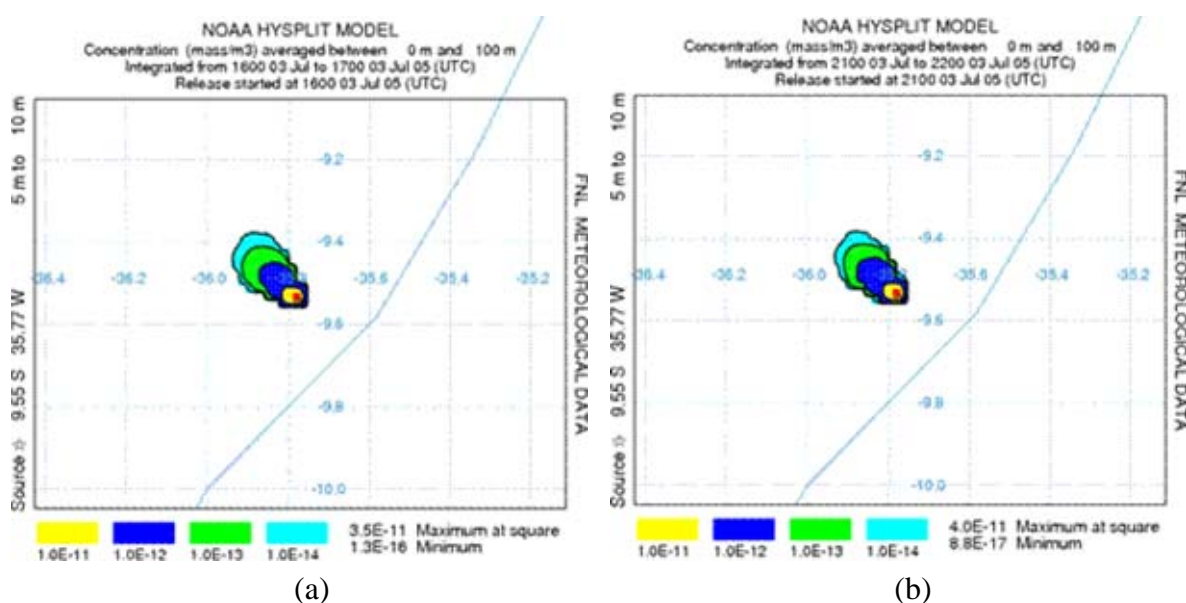
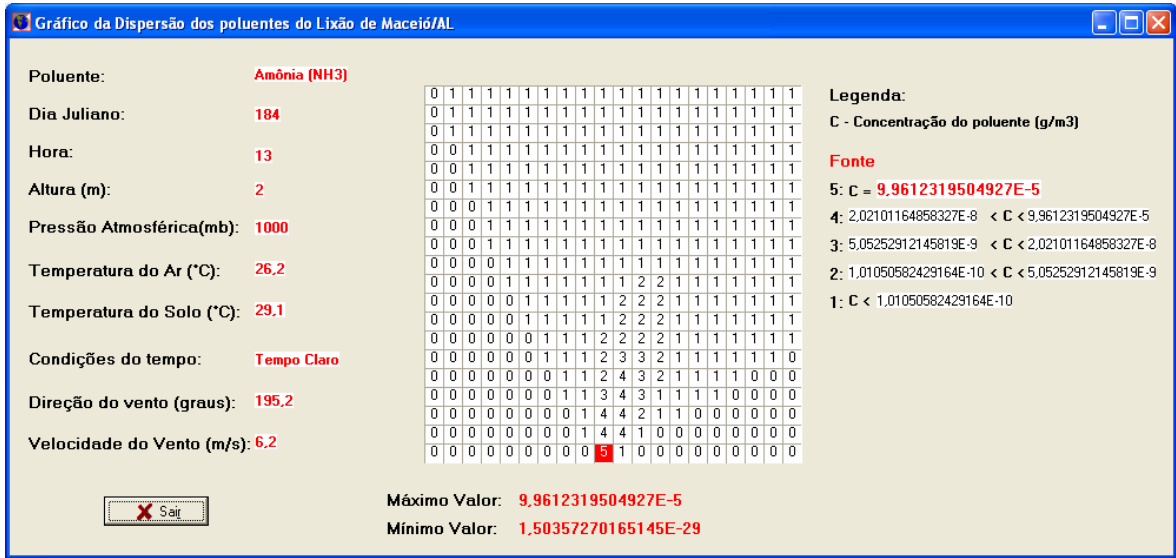
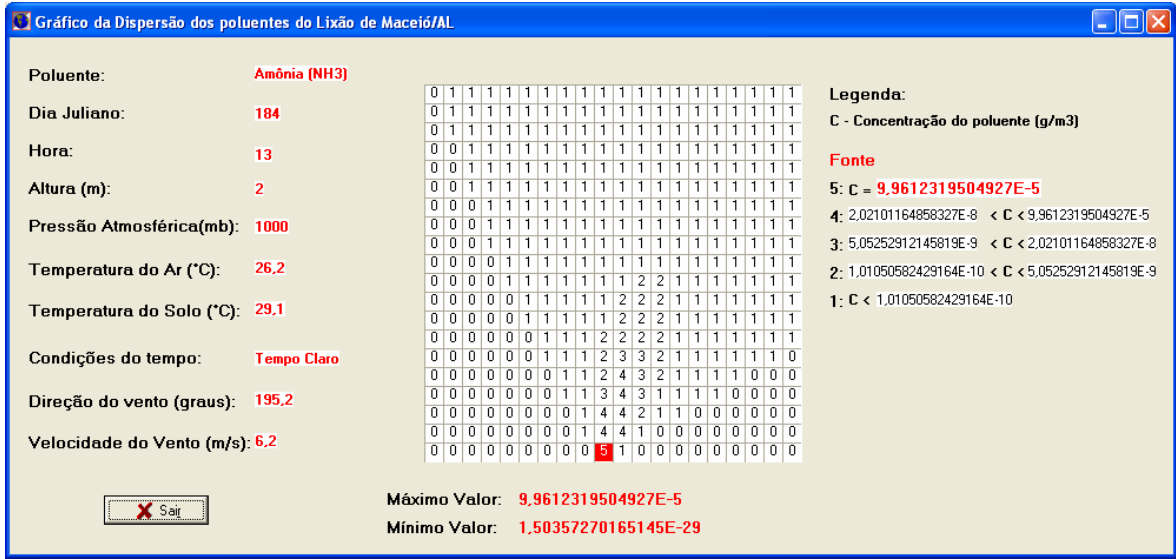


Figura 51 – Simulação da dispersão / concentração às 13h e 18h pelo modelo HYSPLIT_4 da amônia ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) liberada pelo lixão Maceió em 03/07/2005.

Além disso, percebe-se claramente que a dispersão dos poluentes alcança uma área maior durante o segundo período analisado, o que reforça a idéia da importância da estabilidade atmosférica nos períodos das simulações. A maior estabilidade durante a noite contribui para uma menor dispersão dos poluentes.



(a)



(b)

Figura 52 – Simulação da dispersão / concentração (g.m⁻³) às 13h(a) e 18h(b) pelo modelo gaussiano da amônia liberada pelo lixão Maceió em 03/07/2005.

5. CONCLUSÕES

Durante o período estudado constatou-se um atraso no período chuvoso da região, passando para os meses de Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro (sendo anteriormente os meses de Abril, Maio, Junho e Julho mais chuvosos). O atraso no início do período chuvoso foi decorrente do posicionamento da Zona de Convergência Intertropical mais ao norte de sua climatologia, e a ausência de aglomerados convectivos que costuma atuar nesse período.

A temperatura do solo nos níveis estudados mostrou que a máxima temperatura ocorreu nos níveis de 25cm, para as duas temporadas realizadas durante o período seco, e 100cm para a temporada realizada no período chuvoso. Isto indica que nesses níveis, nos períodos citados, a produção bacteriana e a emissão dos gases é maior.

A distribuição da frequência da direção do vento para as temporadas realizadas durante o período seco da região revelou as regiões Leste e Leste-Sudeste como regiões predominantes do vento, com aproximadamente 53% e 44% de ocorrência respectivamente. Isto pode ser devido à atuação dos alísios de sudeste, que atuam na região durante todo o ano. Já para a temporada realizada durante o período chuvoso, a região com maior predominância do vento foi Sul, com aproximadamente 50% de ocorrência. Também se destaca a velocidade média do vento nos horários das simulações como um importante fator na dispersão dos poluentes.

Em algumas ocasiões, o modelo HYSPLIT_4 mostrou certa discrepância em relação à direção do vento se comparado com os dados medidos pela EMA instalada no referido lixão, possivelmente devido aos dados meteorológicos utilizados pelo modelo serem dados de reanálise do NCEP, suscetíveis à falhas. Já para o modelo gaussiano essa inconsistência não foi observada, pois o mesmo utiliza os dados obtidos através da EMA.

Os raios das máximas concentrações nas simulações variam geralmente entre 2 e 11km de distância da fonte emissora pelo modelo HYSPLIT e até 3km nas simulações pelo modelo gaussiano, tanto no período chuvoso quanto no período seco. Portanto, os bairros de Cruz das Almas, São Jorge, Serraria, Barro Duro e Feitosa são os mais atingidos pela fumaça, que ocorre como resultado da combustão espontânea do lixo principalmente no período seco. O odor emitido pela atividade bacteriana, que ocorre essencialmente durante todo o ano, contudo, com mais intensidade durante o período chuvoso, atinge também o bairro de Jacarecica.

A análise da estabilidade atmosférica nos eventos simulados mostrou que ambos os modelos indicam uma maior concentração como consequência de uma menor dispersão dos poluentes durante os períodos com maior estabilidade atmosférica, principalmente durante a madrugada e início da manhã. Na maioria dos eventos simulados os dois modelos concordaram com o período onde ocorre uma maior concentração de poluentes. Em especial destaca-se ainda o cálculo da estabilidade atmosférica pelo modelo gaussiano que se mostrou satisfatório, concordando com o perfil vertical da atmosfera próximo à superfície.

O cálculo das concentrações dos poluentes estudados simulados nos modelos mostrou ter influência direta principalmente dos seguintes fatores: estabilidade atmosférica, velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura do solo. Contudo, a emissão dos poluentes durante o período chuvoso possui relação com a ocorrência de dias com precipitação anteriores à simulação com altos valores de radiação solar global no dia da simulação. Já para o período seco, a relação encontrada foi inversa, ou seja, quanto mais dias consecutivos de não-ocorrência de precipitação além de radiação solar global intensa, maior será a ocorrência de combustão espontânea, sendo assim maior a liberação/deposição de poluentes (fumaça/cinzas).

6. RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados obtidos, recomendam-se os seguintes procedimentos futuros:

- Estudar a temperatura e a pressão de saída dos gases produzidos pela atividade bacteriana para servir de dados de entrada no modelo gaussiano utilizado nesse trabalho.
- Instalar uma estação meteorológica automática em um período mais extenso para melhor análise.
- Obter amostras de ar em diversos horários para analisar a variação da produção de gás do lixo no lixão de Maceió.
- Obter amostras de ar no entorno do lixão de Maceió a fim de calibrar o modelo gaussiano apresentado neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, I. T. de. **A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto**. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia) - Escola Politécnica, Depto. de Engenharia de Minas, Univ. de São Paulo, São Paulo, 194p, 1999.
- AMSTEL, A. V. **Global anthropogenic methane emission comparisons**. IGAC Activities Newsletter, v.12, p.11-17, 1998.
- ANDREOTTOLA, G., COSSU, R. **Modello matematico di produzione del biogas in uno scarico controllato (mathematical model of biogas production)**. Rifiuti Solidi, v.2, 473p. 1988.
- ANSELMO, F. Apostila de Delphi. Disponível através de: <http://www.delphibrasil.com>, 195p. Acesso em : 26 de setembro de 2005.
- ARIGALA, S., TSOTSIS, T. T., WEBSTER, I. A., YORTSOS, Y. C., KATAPURAM, J. **Gas generation, transport and extraction in MSW landfills**. J. of Env. Engineering Division, ASCE, v.121, p.33, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **Apresentação de projetos de aterros de resíduos sanitários sólidos urbanos - Procedimento - NBR 8419**, Rio de Janeiro-RJ, 13p. 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - **Degradação do Solo – terminologia: NBR – 10.703/89**. São Paulo-SP, 1989.
- ASSUNÇÃO, J. V. **Poluição Atmosférica**. In: CASTELLANO, E. G. , Desenvolvimento Sustentado: problemas e estratégias. São Paulo, Academia de ciências do Estado de São Paulo, p. 271-308, 1998.

- ATKINSON, R., ASCHMANN, S. M. **Products of gas-phase OH radical-initiated reactions of 4-methyl-2- and 2,6-dimethyl-4-heptanone.** J. Chem. Kinetical. v.27, p.261-275, 1995.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos.** Rio de Janeiro-RJ, Bertrand Brasil, 332p. 1998.
- BARROS, R.T.de V., CHERNICHARO, C. A. de L., HELLER, L., SPERLING, M. V. **Manual de Saneamento e Proteção Ambiental para os Municípios,** Belo Horizonte-MG, Escola de Engenharia da UFMG, 221p. 1991.
- BAUMBACH, G. **Air Quality Control.** Berlin, Springer-Verlag, 490p. 1996.
- BOECKX, P., CLEEMPUT, V. O., VILLARALVO, I. **Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil.** Soil Biology and Biochemistry, v. 28, n.10/11, p.1397-1405, 1996.
- BOGNER, J., MEADOWS, M., CZEPIEL, P., **Fluxes of methane between landfills and the atmosphere: Natural and engineered controls.** Soil Use and Management, n.13, p.268–277. 1997.
- BOUBEL, R., FOX, D., TURNER, D., STERN, A. **Fundamentals of Air Pollution,** 3ªedição, 595p. 1994.
- BRANCO, S. M., MURGEL, S. **Poluição do Ar,** Coleção Polêmica, 7ª Impressão, Ed. Moderna, São Paulo – SP, p.26, 1995.
- BRASGRECO WHEATER. Estabilidade Atmosférica. Artigo disponível em: http://www.brasgreco.com/weather/nuvens/n_dsnv.html. Acesso em: 08 de outubro de 2005.

BRILHANTE, O. M. Gestão e avaliação da poluição, impacto e risco na saúde ambiental. In: BRILHANTE, O. M. & CALDAS, L. Q. de A. Gestão e avaliação de risco em saúde ambiental. Rio de Janeiro-RJ, Ed. FIOCRUZ, 173p. 1999.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS – CPTEC – Climanálise – Boletins CLIMANALISE 2005. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/>. Acesso em: 15 de Novembro de 2005.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório da qualidade do ar do estado de São Paulo 1997**. São Paulo-SP, CETESB, 1998.

CHEN, Y., CHEN, K., WU, C. **Numerical simulation of gas flow around a passive vent in a sanitary landfill**. J. of Hazardous Materials, v.100, p.39–52, 2003.

CNE – CORPO NACIONAL DE ESCUTAS. A Rosa dos ventos. Disponível em: http://www.cne-escutismo.pt/recursos/orientacao/orien_rosadosventos.htm. Acesso em: 15 de novembro de 2005.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO - **Nosso Futuro Comum**, 2ª Edição, Rio de Janeiro-RJ, Ed. da Fundação Getulio Vargas, 1991.

CZARNETZKI, A. Disponível em: http://meted.ucar.edu/dispersion/cam_hys/navmenu0.htm. Acesso em 01 de novembro de 2003.

DE WALLE F. B., CHIAN, E., HAMMERBERG, E. **Gas production from solid waste in landfills**. J. Environment Engineering, v.104, p.403-415, 1978.

DEPARTMENT OF THE ENVIRONMENT, UK.; **Landfill gas—waste management paper no. 27**. London: Crown Copyright; 1991.

DIRETÓRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE ALAGOAS – DRH/AL.
Comunicação Pessoal, 2003.

DRAHLER, R. R., HESS, G. D., **Description of the HYSPLYT_4 modeling system**. NOAA Tech Memo ERL ARL-224, 24p. 1997.

FAASSEN, D. Van, Landfill Gas Disponível em:
<http://www.geocities.com/RainForest/Canopy/6251/LFGsite.htm>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2003.

FACT SHEET, **What do you need to know about: MUNICIPAL WASTE LANDFILL GASES**. 1997.

FARQUHAR G. J., ROVERS F. A. **Gas production during refuse decomposition**, Dept. of Civil Engineering, Ontario-Canadá, 24p. 1973.

FEITOSA, F. A. C., MANOEL F. J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**, Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID - UFPE, 391p. 1997

FERREIRA, M. S., BARBARIOLI, A. B., GUERRERO, J. S. P., BODSTEIN, G. C. R., PIMENTEL, L. C. G. **Estudo da dispersão de poluentes atmosféricos sobre terrenos planos e complexos utilizando o modelo AERMOD**. Anais in: XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza-CE, 2004.

FISCH, G., **Camada limite amazônica: aspectos observacionais e de modelagem**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos- SP, p.171, 1996.

FUNDO DAS AÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA – UNICEF. Impacto Sócio-Ambientais dos lixões – Manual do Promotor. Disponível em http://www.unicef.org/brazil/lixoecidadania/Files/m_promotor/Impactos_socios-ambientais.doc. Acesso em: 07 de novembro de 2002.

GALVÃO, L. A., OLIVEIRA, M. L. C., AUGUSTO, L. G. S. Indicadores de saúde e ambiente. Informe Epidemiológico do SUS, Brasília-DF, ano VII, nº 2, p. 45 – 53, 1998.

GÄRDENÄS S., THÖRNQVIST T. **Självuppvärmning och Substansförluster vid Lagring av Torv—en Litteraturstudie (Spontaneous Combustion and Dry Matter Losses in Peat Storage—a Literature Study)**. Research Notes No. 156, Dept. of Forest Products, Swedish University of Agriculture Sciences, Uppsala, Sweden, 1984

GIFFORD, J. F. A. **Use of Meteorological observations for estimating Atm. Dispersion**, Nuclear Safety, n.2, p.47-52, 1961.

GODISH. T. **Air Quality**, Lewis Publishing Company, Chelsea, Michigan, 360p. 1985.

GORDON, S. I. **Computer Models in Env. Planning**, New York-EUA, p.78-79, 1985.

GORGATI, C. Q., LUCAS JÚNIOR, J. **Fração orgânica de lixo urbano como substrato para biodigestor e como matéria-prima para compostagem e vermicompostagem**, FCA/UNESP, Botucatu-SP, Energia na Agricultura, Botucatu, v. 16, n. 2, p. 63-69, 1994.

GUIMARÃES, L. T. **Utilização do sistema de informação geográfica (SIG) para identificação de áreas potenciais para disposição de resíduos na bacia**

- do Paquequer, município de Teresópolis – RJ.** Rio de Janeiro – RJ, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, UFRJ, p.170, 2000.
- HICKMAN, H., LANIER, JR. **Principles of Integrated Solid Waste Management.** American Academy of Env. Engineers. Annapolis, MD. USA. 660p. 1999.
- HOBBS, P. V., **Introduction to Atm. Chemistry.** Cambridge University Press, 262p. 2000.
- HODGSON, A., GARBESI, K., SEXTRO, R. G., DAISEY, J. M. **Contaminação pelo gás do solo e a entrada dos Compostos Voláteis Orgânicos numa casa perto de um aterro.** J. Air and Waste Management, v.42, p.277-283, 1992.
- HOGLAND, W., BRAMRYD, T., PERSSON, I. **Physical, biological and Chem. effects of unsorted fractions of industrial solid waste in waste fuel storage,** Waste Manage Research, n.14, p.197–210, 1996.
- HOGLAND, W., MARQUES, M. **Physical, biological and Chem. processes during storage and spontaneous combustion of waste fuel,** Resources, Conservation and Recycling, n.40, p. 53–69, 2003.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 1989,** Rio de Janeiro-RJ, 197p. 1991.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Censo demográfico. Disponível em www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/default/shtm. Acesso em 15 de agosto de 2002.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado.** 2ªedição, São Paulo-SP, IPT/CEMPRE, 278p. 2000.

- JARDIM, N. S., MANO, V. G. T., WELLS, C., CASTRO, A. P. de, SCHNEIDER, D. **M. Lixo Municipal: manual de gerenciamento integrado**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), e Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), São Paulo-SP, 278p, 1995.
- JUCÁ, J. F. T. **Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: Situação atual e perspectiva**, 10º Simpósio Luso- Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 32p. 2002
- JUCÁ, J. F. T. **Relatório Final: Diagnóstico de Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / MMA - Projeto de Execução Nacional - Contrato: Nº 2001/004090 - RELATÓRIO 03/2002**. Maceió-AL, p.16-42, 2002.
- KALNAY, E. **Atm. modeling, data assimilation and predictability**, Maryland, University of Maryland, 341p. 2003.
- KIELY, G. **Env. Engineering**. Ed. McGraw-Hill International, UK. 1997.
- LACEY, J. **Colonization of Dump Organic Substrates and Spontaneous Heating**. The Society for Applied Bacteriology, Technical Series 15 "Microbial Growth and Survival in Extremes of Environment", London, U.K., Academic Press, 1980.
- LAPA, M. R. L. L., SILVA, S. C. **Simulação da dispersão de poluentes na atmosfera**. Dissertação de Mestrado em Ciências da Computação, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE, 133p. 1973.
- LAWALL, S., TORRES, F. T. P., MARTINS, L. A. Estudos sobre a concentração do material particulado inalável sobre a área urbana de Juiz de Fora – MG. Artigo disponível em: http://www.igeo.uerj.br/VICBG2004/Eixo2/E2_311.htm. Acesso em: 11 de outubro de 2005.

- LEITE, C. C. **Características da camada limite convectiva durante a transição da estação seca para chuvosa na Amazônia - comparação floresta/pastagem (dry to wet amc/lba – 2002)**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Univ. Fed. de Alagoas-UFAL, Maceió-AL, 95p. 2004.
- LEITE, L. E. H. B. da C. **Manual de limpeza pública**. Instituto Brasileiro de Administração Municipal, Laboratório de Administração Municipal, Rio de Janeiro-RJ, 115p. 1973.
- LIMA, L. M. Q. **The Biodegradability Method to Determine the Production of Methane in the Landfill of Santa Barbara**, in the CiQ of Campina, CPFL, Campinas, 1985.
- LIMA, L.M.Q. **Lixo -Tratamento e Bio-remediação**, São Paulo-SP, Hemus Ed. Ltda, 3º Edição, 265p, 1995.
- LONGHETTO, A. E. **Atm. Planetary Boundary Layer Physics**. New York-USA, Elsevier, 424p. 1980.
- MAHONEY, J. R. **Meteorological Aspects of Air Pollution**. Industrial Pollution, n.15, p. 409-455, 1974.
- MARIANO, G. L. **Utilização do modelo HYSPLIT_4 na simulação da dispersão dos poluentes liberados pelo lixão de Maceió nos períodos seco e chuvoso**. Monografia (Bacharel em Meteorologia) – Depto. de Meteorologia, Univ. Fed. de Alagoas - UFAL, Maceió/AL, 69p. 2004.
- MDAP – Modelagem da difusão atmosférica de poluentes. Disponível em: <http://socrates.if.usp.br/~fernando/poluicao/fpa.htm>. Acesso em 14 de Junho de 2002.

- MOLION, L. C. B., BERNARDO, S. O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro**, Rev.. Brasileira de Meteorologia, v 17, n.1, p.1-10, 2002.
- MORAES, M. R. **Implementação de um sistema de modelos para a qualidade do ar**, Proposta de tese de doutorado da Univ. Fed. de Santa Catarina, 2001.
- MOREIRA, D., TIRABASSI, T. **Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: um instrumento técnico para a gestão ambiental**. Rev. Ambiente & Sociedade, v.7, n.2, p.159-171, 2004.
- MSW MANAGEMENT. **Landfill gases & Leachate: Changing the schedule**. Feature article, Julho/Agosto, 2000.
- NASTEV, M., THERRIEN, R., LEFEBVRE, R., GELINAS, P. **Gas production and migration in landfills and geological materials**, J. of Contaminant Hydrology, n.52, p.187-211, 2001.
- PANOFSKY, H.A.; DUTTON, J.A; **Atmospheric Turbulence: Models and Methods for Engineering Applications**, John Wiley and Sons, New York-USA, p 417. 1984
- PARK, Jin-Won., SHIN, Ho-Chun. **Surface emission of landfill gas from solid waste landfill**, Atm. Environment, n.35, p.3445–3451, 2001.
- PASQUILL, F. **Atm. Difusion**, 2ªedição, 1974.
- PASQUILL, F. **Atm. Dispersion of Pollution**, Quaterly J. of the Royal Meteorological Society, v.97, p.369-375, 1971.
- PEER, R. L., THORNELOE, S. A., EPPERSON, D. L. **A comparison of methods for estimating global methane emissions from landfills** Chemosphere, v.26, Issues 1-4, p.387-400, 2003.

PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO – PNSB – 2000.

Comentários sobre os resultados apresentados no tema de Limpeza Urbana pelo Consultor J. H. Penido, Monteiro. J. H. Penido Monteiro, abril, 2002.

RAISZ, E. **General Cartography.** New York-USA, 2ª edição, 354p. 1953.

RODRIGUES, F. L., CAVINATO, V. M. **Lixo: de onde vem?, Para onde vai?,** São Paulo-SP, Ed. Moderna, p.14-58, 1998.

ROLPH, G. D. Real-time Env. Applications and Display system (READY) – Dispersion Models. Disponível em: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. Acesso em: 30 de outubro de 2003.

RUSSO, P. R. Poluição atmosférica: Refletindo sobre a qualidade ambiental em áreas urbanas. Artigo disponível em <http://www.educacaopublica.rj.gov.br/biblioteca/geografia/geo05c.htm>. Acesso em: 8 de outubro de 2005.

SAITO, M., AMAGAI, K., OGIWARA, G., ARAI, M. **Combustion characteristics of waste material containing high moisture.** Fuel, n.80, p.1201-1209, 2001.

SARKAR, U., HOBBS, S. E., LONGHURST, P. **Dispersion of odour: a case study with a municipal solid waste landfill site in North London, United Kingdom,** J. of Env. Management, v.68, p.153–160, 2003.

SEINFELD, J. H. **Atm. Chemistry and Physics of Air Pollution,** John Willey & Sons, Nova York- EUA, 250p. 1986.

SERHI - Secretaria de Estado de Recursos Hídricos e Irrigação - **Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos de Alagoas - NMRH-AL,** Posto: Maceió (01), 2003.

- SHUSTERMAN, D. **Critical Review: the health significance of Env. odor pollution.** Arch. Env. Health, v.47, p.76-87, 1992.
- SILVA DOS SANTOS, A. **Alguns aspectos dinâmicos e termodinâmicos de um vórtice ciclônico de altos níveis (VCAN) sobre sua região de atuação.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Univ. Fed. de Alagoas – UFAL, Maceió-AL, 90p. 2005.
- SOLTANI-AHMADI, H. **A Review of the Literature Regarding Non-Methane and Volatile Organic Compounds In Municipal Solid Waste Landfill Gas.** SWANA/Hickman Intern, 2000.
- SOUTO, M. J., SOUTO, J. A., PEREZ-MUNUZURI, V., CASARES, J. J., BERMUDEZ, J. L. **A comparison of operational lagrangian particle and adaptative puff models for plume dispersion forecasting.** Atm. Environment, v.35, p. 2349-2360, 2001.
- STULL. R. B. **An introduction to boundary layer meteorology.** Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 666p, 1988.
- TAMADDON, F., HOGLAND, W., KJELLBERG, J. **Storage of Waste-Fuel by Baling Technique,** Lund University Report No. 3188, Dept. of Water Resources Engineering, Lund University, Lund-Sweden, p.18, 1995
- TENNEKES, H. **A model for dynamics of inversion above a convective boundary layer,** J. of Atm. Sciences, v.30, p.558-567, 1973.
- THÖRNQVIST T. **BRÄNDER I STACKAR MED SÖNDERDELAT TRÄDBRÄNSLE (Spontaneous Combustion in Piles with Chipped Wood Fuel).** Research Notes No. 163, Department of Forest Products, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 1987.

UNICEF - FUNDO DAS AÇÕES UNIDAS PARA A INFÂNCIA. Introdução – Manual do Promotor. Disponível em: http://www.unicef.org/brazil/lixoecidadania/Files/m_promotor/Introducao.doc Acesso em: 07 de novembro, 2002.

VAREJÃO – SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília – INMET, Gráfica e Ed. Pax, 532p. 2001.

VILLARRUBIA, M., VILLARRUBIA, J. Producción de biogás en vertederos de Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Disponível em: <http://www.energuia.com> Acesso em: 23 de fevereiro de 2003.

8. ANEXOS

Anexo 1 - Programa Principal

```

VAR DDIC,VVC,TOTAL,QE,HH,TTC:ARRAY[1..20,1..20] OF REAL;
VAR Q:TIPO_Q;
VAR QC:TCOR;
VAR II,JJ:ARRAY[1..12] OF INTEGER;
VAR A,B:ARRAY[1..12] OF REAL;
VAR    VEL,TQ,XI,XJ,XDHO,YDTR,SIGMAH,SIGMAV,H,VC,DIC,PA,XM,TC,TA,
DELTH,Z,VM,HNS,HPS,ANGS,ANGVEN,VTEMPO,HOR,X,Y,VMIN,XMULT,SOL
O,ANG,MAX,MAX1,MIN,INTERV,I1,I2,I3: REAL;
VAR I,J,K,L,NF,NQX,NQY,NC,M,P:INTEGER;
VAR JULI,HORA,ANG1,POLU,G,ALT:STRING;
VAR CURVA,CURVA1:CHAR;
VAR TEMPO:BOOLEAN;

BEGIN

NF:=1; //Número de Fontes
NQX:=20; //Quantidade de quadrículas - eixo X
NQY:=20; //Quantidade de quadrículas - eixo Y

JULI:=FORM1.EditDJ.Text; // Recebe valor do Dia Juliano
HNS:=HN(JULI); // Executa rotina para cálculo da Hora de Nascer do Sol
HPS:=HP(JULI); // Executa rotina para cálculo da Hora do Por do Sol

HORA:=FORM1.EditHOR.Text; // Recebe valor da hora
HOR:=STRTOFLOAT(HORA); // Transforma Hora para tipo float
ANGS:=ANGSOL(HORA); // Executa rotina para cálculo do ângulo solar

ALT:=FORM1.EditZ.Text; //Recebe valor da altura
Z:=STRTOFLOAT(ALT); //Altura em que se deseja obter as concentrações

PA:=STRTOINT(FORM1.EditPa.Text); // Recebe valor da pressão
TA:=STRTOFLOAT(FORM1.EditTar.Text); // Recebe valor da Temp. do ar
VEL:=STRTOFLOAT(FORM1.EditVV.Text); // Recebe valor da vel. do vento
SOLO:=STRTOFLOAT(fORM1.EditSolo.Text); // Recebe valor da Temp. do solo

TQ:=200; // Tamanho (m) de cada quadrícula

// Detecta o poluente para escolha do tempo de meia-vida
POLU:=(FORM1.cbP.Text);
IF (POLU='Amônia (NH3)') THEN
  VM:=27.7 // Meia-vida da Amônia (horas)
ELSE
  VM:=50; // Meia-vida do Sulfeto de Hidrogênio (horas)

VMIN:=10E-30; // Valor mínimo para exibição

```

```
ANG1:=(FORM1.EditDD.Text); // Recebe valor da Direção do vento
ANG:=STRTOFLOAT(ANG1); // Transforma Dir. do vento para tipo float

// Transforma para "para onde o vento sopra" para "de onde o vento sopra"
  ANGVEN:=ANG+180;
// "Corrige" o angulo do vento caso passe de 360°
If (ANGVEN>=360) then
  ANGVEN:=ANGVEN-360;

// Coordenadas da quadrícula emissora (XI,XJ) e marcação da localização da
fonte
// conforme o ângulo do vento

IF (ANGVEN >337.5) OR (ANGVEN<=22.5) THEN
BEGIN
  XI:=0.1;
  XJ:=9.5;
  form3.Label194.Color:=clred;
  form3.Label194.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label409.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label409.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >22.5) AND (ANGVEN<=67.5) THEN
BEGIN
  XI:=0.1;
  XJ:=0.1;
  form3.Label191.Color:=clred;
  form3.Label191.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label400.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label400.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >67.5) AND (ANGVEN<=112.5) THEN
BEGIN
  XI:=9.1;
  XJ:=0.1;
  form3.Label101.Color:=clred;
  form3.Label101.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label220.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label220.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >112.5) AND (ANGVEN<=157.5) THEN
BEGIN
  XI:=19.1;
  XJ:=0.1;
```

```
form3.Label1.Color:=clred;
form3.Label1.Font.Color:=clwhite;
form4.Label20.Font.Color:=clwhite;
form4.Label20.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >157.5) AND (ANGVEN<=202.5) THEN
BEGIN
  XI:=19.1;
  XJ:=9.5;
  form3.Label4.Color:=clred;
  form3.Label4.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label29.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label29.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >202.5) AND (ANGVEN<=247.5) THEN
BEGIN
  XI:=19.1;
  XJ:=19.1;
  form3.Label7.Color:=clred;
  form3.Label7.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label39.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label39.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >247.5) AND (ANGVEN<=292.5) THEN
BEGIN
  XI:=9.1;
  XJ:=19.1;
  form3.Label107.Color:=clred;
  form3.Label107.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label239.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label239.Color:=clred;
END;

IF (ANGVEN >292.5) AND (ANGVEN<=337.5) THEN
BEGIN
  XI:=0.1;
  XJ:=19.1;
  form3.Label197.Color:=clred;
  form3.Label197.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label419.Font.Color:=clwhite;
  form4.Label419.Color:=clred;
END;

// Detecta o tempo (claro ou nublado)
case FORM1.CbCN.ItemIndex of
```



```

0: begin
    tempo:=True;
end;
1: begin
    tempo:=False;
end;
end;

ANGVEN:=((PI*(ANGVEN))/180);
X:=SIN(ANGVEN);
Y:=COS(ANGVEN);

//Chama a procedure que calcula o tipo de estabilidade atmosférica
STAB (HNS,HPS,VEL,HOR,ANGS,TEMPO,CURVA,CURVA1);

FOR K:=1 TO NQX DO
FOR L:=1 TO NQY DO
TOTAL[K,L]:=0; //Zera as concentrações das fontes

FOR M:=1 TO NF DO
BEGIN
FOR K:=1 TO NQX DO
FOR L:=1 TO NQY DO
Q[K,L]:=0; //Zera as concentrações de cada quadrícula
END;

I:=TRUNC(XI)+1;
J:=TRUNC(XJ)+1;

//CARACTERISTICAS DA FONTE EMISSORA

// Detecta o poluente para escolha da quantidade de poluente emitida (g/h)
IF (POLU='Amônia (NH3)') THEN
QE[I,J]:=0.235 // Quantidade de poluente emitido da Amônia (g/h)
ELSE
QE[I,J]:=235.268; // Quantidade de poluente emitido do Sulfeto de
Hidrogênio(g/h)

DDIC[I,J]:=3; // Diâmetro interno da fonte (m)
HH[I,J]:=0; // Altura da fonte (m)
TTC[I,J]:=SOLO; // Temperatura de saída dos gases (°C)
VVC[I,J]:=VEL; // Velocidade de Saída dos gases (m/s)

//RECEBE CARACTERISTICAS DA FONTE EM ANÁLISE

H:=HH[I,J];
VC:=VVC[I,J];
DIC:=DDIC[I,J];

```

```

TC:=TTC[I,J];

FOR L:=1 TO NQY DO
FOR K:=1 TO NQX DO
BEGIN
XMULT:=1;
// Chama a rotina para cálculo da concentração na quadrícula que existe a fonte
// emissora

IF (I=K) AND (J=L) THEN
  CFONTE(XI,XJ,TQ,ANGVEN,XDHO,YDTR,XMULT)
ELSE
  DXDY(TQ,X,Y,XI,XJ,XDHO,YDTR,K,L);

IF (XDHO>=1) THEN
BEGIN

// Chama a rotina que calcula o desvio padrão
  SIG (XDHO,CURVA1,SIGMAH,SIGMAV);

// Chama a rotina que calcula a altura efetiva da fonte
  IF (XDHO>=300) THEN
    HREAL(H,CURVA1,XDHO,VC,DIC,VEL,PA,TC,TA,DELTH);

// Chama a rotina que calcula as concentrações nos diversos receptores
  QRECE(QE[I,J],VM,XDHO,YDTR,VEL,Z,H,SIGMAH,SIGMAV,Q[K,L]);
  Q[K,L]:=Q[K,L]*XMULT;
  H:=HH[I,J];
  IF (Q[K,L]<(VMIN)) THEN Q[K,L]:=0;

// Calcula a concentração acumulada devido as N fontes
  TOTAL[K,L]:=TOTAL[K,L]+Q[K,L];
  END;

END;

```

Anexo 2- Rotina para o cálculo da hora do Nascer do Sol

```
Function HN(var DJ:String):Real;

var dec,dia,angH,Lat: Real;

begin

    // Latitude do Lixão de Maceió/AL
    Lat:=-9.55;

    // Recebe valor do dia Juliano
    Dia:=StrToFloat(DJ);

    // Cálculo da declinação solar
    Dec:= 23.45*(Sin((((Dia)+284)*0.986301369)*0.017453292));

    // Cálculo do Angulo Horário
    AngH:=(Arccos((((tan(LAT))*(-1))*(tan(DEC))))*0.017453292)/1;

    //Cálculo da Hora de Nascer do Sol
    HN:= 12-((((AngH)*57.3)*2/15)/2);

end;
```

Anexo 3 - Rotina para o cálculo da hora do Por do Sol

```
Function HP(var DJ:String):Real;

var dec,dia,angH,Lat: Real;

begin

    // Latitude do Lixão de Maceió/AL
    Lat:=-9.55;

    // Recebe valor do dia Juliano
    Dia:=StrToFloat(DJ);

    // Cálculo da declinação solar
    Dec:= 23.45*(Sin((((Dia)+284)*0.986301369)*0.017453292));

    // Cálculo do Angulo Horário
    AngH:=(Arccos((((tan(LAT))*(-1))*(tan(DEC))))*0.017453292)/1;

    //Cálculo da Hora do Por do Sol
    HP:= 12+((((AngH)*57.3)*2/15)/2);

end;
```

Anexo 4 - Rotina para cálculo do ângulo solar

```
Function ANGSOL(var HOR:String):Real;
var AN: Real;
begin

// Recebe o valor da hora
AN:=StrToFloat(HOR);

// Calculo do Angulo Solar
If AN > 12 then
  AN:=(18-AN)*15
else
  begin
    AN:=(AN-6)*15;
  end;

ANGSOL:=AN;
end;
```

Anexo 5 - Rotina para cálculo do grau de estabilidade atmosférica

```

Procedure Stab (HNS,HPS,VEL,HOR,ANGS:Real; Tempo:Boolean; var
Curva,Curva1:Char);
var INSOL:Integer;
begin

  HNS:=HNS+1;
  HPS:=HPS-1;

  // Verifica se o tempo está limpo
  If (Tempo) then
  //Verifica o ângulo solar
  Begin
    If ANGS >60 then
      INSOL:= 1
    else
      If ANGS < 35 then
        INSOL:=3
      else
        INSOL:=2;
    end
  else
    INSOL:=3;

  //Se a velocidade do vento é menor do que 2m/s
  if VEL < 2 then
    if (HOR>=HNS) and (HOR<=HPS) then
      begin
        case INSOL of
          1:
            begin
              Curva:='A';
              Curva1:='1';
            end;
          2:
            begin
              Curva:='A';
              Curva1:='1';
            end;
          3:
            begin
              Curva:='B';
              Curva1:='2';
            end;
        end;
      end
    end
  end
end

```

```
else
begin
  Curva:='F';
  Curva1:='6';
end;

if (VEL>= 2) and (VEL<=3) then
if (HOR>=HNS) and (HOR<=HPS) then
begin
  case INSOL of
    1:
      begin
        Curva:='A';
        Curva1:='1';
      end;
    2:
      begin
        Curva:='B';
        Curva1:='2';
      end;
    3:
      begin
        Curva:='C';
        Curva1:='3';
      end;
  end;
end
else
begin
  Curva:='F';
  Curva1:='6';
end;

if (VEL>= 3) and (VEL<=5) then
if (HOR>=HNS) and (HOR<=HPS) then
begin
  case INSOL of
    1:
      begin
        Curva:='B';
        Curva1:='2';
      end;
    2:
      begin
        Curva:='B';
        Curva1:='2';
      end;
    3:
```

```

        begin
            Curva:='C';
            Curva1:='3';
        end;
    end;
end
else
begin
    Curva:='E';
    Curva1:='5';
end;

if (VEL>= 5) and (VEL<=6) then
if (HOR>=HNS) and (HOR<=HPS) then
begin
    case INSOL of
        1:
            begin
                Curva:='C';
                Curva1:='3';
            end;
        2:
            begin
                Curva:='C';
                Curva1:='3';
            end;
        3:
            begin
                Curva:='D';
                Curva1:='4';
            end;
    end;
end
else
begin
    Curva:='D';
    Curva1:='4';
end;

if (VEL>= 6) then
if (HOR>=HNS) and (HOR<=HPS) then
begin
    case INSOL of
        1:
            begin
                Curva:='C';
                Curva1:='3';
            end;

```



```
2:
  begin
    Curva:='D';
    Curva1:='4';
  end;
3:
  begin
    Curva:='D';
    Curva1:='4';
  end;
end;
else
begin
  Curva:='D';
  Curva1:='4';
end;
end;
```

Anexo 6 - Rotina para cálculo da concentração de poluente na quadrícula onde está localizada a fonte emissora.

```
PROCEDURE CFONTE (XI,XJ,TQ,ANGVEN:REAL; VAR XDHO,YDTR:REAL;
VAR XMULT:REAL);
VAR
C1,C2,C3,C4,ANG1,ANG2,ANG3,ANG4,CI,CX,CJ,CY,SFINAL,RADIC,X1,Y1,X,Y,
ATAN,
```

```
DIST,DIST1,AC1,AC2,GAMA1,GAMA2,GAMA3,KF0,A1,A2,A3,A4,ALFA1,ALFA2,
ALFA3,
```

```
ALFA4,ALFA5,ALFA6,ALFA7,ALFA8,XM,XM1,YIN,XIN,XF1,YF1,PIS2,PIS4,BETA
1,BETA2,
  BETA3,BETA4,STSD,STR,XF2,YF2,S1,S2,STSE,STID,STIE:REAL;
  IANGVEN:INTEGER;
```

```
{DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS
```

```
XI,XJ - COORDENADAS DO PONTO ONDE A FONTE EMISSORA.
```

```
TQ - TAMANHO DA QUADRÍCULA
```

```
ANGVEN - DIREÇÃO DO VENTO MEDINDO O ANGULO POSITIVO,
PARTINDO DO LESTE
```

```
XDHO - DISTANCIA AO LONGO DA DIREÇÃO DO VENTO
```

```
YDTR - DISTANCIA TRANSVERSAL A DIRECAO DO VENTO
```

```
XMULT - PERCENTAGEM DA QUADRICULA QUE É AFETADA PELA
EMISSAO PROVENIENTE DA FONTE EM CONSIDERAÇÃO }
```

```
{METODO: A CONCENTRAÇÃO PARA ESTE CASO É IGUAL A CALCULADA
PARA O PONTO SITUADO
```

```
A MEIA DISTANCIA ENTRE A FONTE EMISSORA E O LIMITE DA
QUADRICULA, MULTIPLICADA
```

```
PELA PERCENTAGEM DA QUADRICULA QUE É AFETADA PELAS
EMISSOES}
```

```
//REALIZA AS OPERAÇÕES DO 'GOTO 80' DO FORTRAN
```

```
PROCEDURE GOTO80;
```

```
BEGIN
```

```
  DIST:=SQRT(RADIC);
```

```
  DIST1:=DIST*TQ;
```

```
  XDHO:=DIST1/2;
```

```
  YDTR:=0;
```

```
  XM1:=-1/XM;
```

```
  YIN:=C4;
```

```
  XIN:=(YIN-CY)/XM1+CX;
```

```
  IF (XIN)<(C3) THEN
```

```

BEGIN
  XF1:=C3;
  YF1:=XM1*(XF1-CX)+CY;
  YIN:=C2;
  XIN:=(YIN-CY)/XM1+CX;
  IF (XIN)<(C1) THEN
    BEGIN
      YF2:=C2;
      XF2:=(YF2-CY)/XM1+CX;
      // CALCULO DA AREA DO TRIANGULO C2-C3
      STSE:=((XF2-C3)*(C2-YF1))/2;
      IF (KF0=2) OR (KF0=3) THEN
        SFINAL:=STSE
      ELSE
        SFINAL:=1-STSE;
      XMULT:=SFINAL;
    END
  ELSE
    BEGIN
      XF2:=C1;
      YF2:=XM1*(XF2-CX)+CY;
      //CALCULO DA AREA DO TRAPEZIO (C1 - C3)
      S1:=(C2-YF2)*(C1-C3);
      S2:=((YF2-YF1)*(C1-C3))/2;
      STR:=(S1)+(S2);
      IF (KF0=2) OR (KF0=3) THEN
        SFINAL:=STR
      ELSE
        SFINAL:=1-STR;
      XMULT:=SFINAL;
    END;
  END
ELSE
  IF (XIN)<(C1) THEN
    BEGIN
      YF1:=C4;
      XF1:=(YF1-CY)/XM1+CX;
      XIN:=C1;
      YIN:=XM1*(XIN-CX)+CY;
      IF (YIN)<(C2) THEN
        BEGIN
          IF (YIN)<=(C4) THEN
            BEGIN
              YIN:=C2;
              XIN:=(YIN-CY)/XM1+CX;
              IF (XIN)<=(C3) THEN
                BEGIN
                  XF2:=C3;

```

```

YF2:=XM1*(XF2-CX)+CY;
// CALCULO DA AREA DO TRIANGULO C3-C4
STIE:=((XF1-C3)*(YF2-C4))/2;
  IF (KF0<=2) THEN
    SFINAL:=1-STIE
  ELSE
    SFINAL:=STIE;
  XMULT:=SFINAL;
END
ELSE
BEGIN
YF2:=YIN;
XF2:=XIN;
// CALCULO DA AREA DO TRAPEZIO (C2-C4)
S1:=(XF2-C3)*(YF2-C4);
S2:=((XF1-XF2)*(YF2-C4))/2;
STR:=S1+S2;
  IF (KF0<=2) THEN
    SFINAL:=1-STIE
  ELSE
    SFINAL:=STIE;
  XMULT:=SFINAL;
  END;
END
ELSE
BEGIN
XF2:=XIN;
YF2:=YIN;
// CALCULO DA AREA DO TRIANGULO (C1-C4)
STID:=((YF2-C4)*(C1-XF1))/2;
  IF (KF0=1) OR (KF0=4) THEN
    SFINAL:=STID
  ELSE
    SFINAL:=1-STID;
  XMULT:=SFINAL;
  END;
END
ELSE
BEGIN
YF2:=C2;
XF2:=(YF2-CY)/XM1+CX;
// CALCULA A AREA DO TRAPEZIO (C2 - C4)
S1:=(C2-C4)*(XF1-C3);
STR:=S1+S2;
  IF (KF0=2) OR (KF0=3) THEN
    SFINAL:=STR
  ELSE
    SFINAL:=1-STR;

```

```

        XMULT:=SFINAL;
        END;
    END
ELSE
    BEGIN
        //CRUZAMENTO COM C1
        XF1:=C1;
        YF1:=XM1*(XF1-CX)+CY;
        //CRUZAMENTO COM C2
        YIN:=C2;
        XIN:=(YIN-CY)/XM1+CX;
        IF (XIN)<=(C3) THEN
            BEGIN
                XF2:=C3;
                YF2:=XM1*(XF2-CX)+CY;
                //CALCULO DA AREA DO TRAPEZIO (C1-C3)
                S1:=(C2-YF2)*(C1-C3);
                S2:=((YF2-YF1)*(C1-C3))/2;
                STR:=S1+S2;
                IF (KF0)<=2 THEN
                    SFINAL:=STR
                ELSE
                    SFINAL:=1-STR;
                XMULT:=SFINAL;
            END
        ELSE
            BEGIN
                YF2:=C2;
                XF2:=(YF2-CY)/(XM1+CX);
                //CALCULO DA AREA DO TRIANGULO (C1-C2)
                STSD:=((C2-YF1)*(C1-XF2))/2;
                IF (KF0)<=2 THEN
                    SFINAL:=STSD
                ELSE
                    SFINAL:=1-STSD;
                XMULT:=SFINAL;
            END;
        END;
    END;
END;

BEGIN
C1:=1; C2:=1; C3:=0; C4:=0;
ANG1:=0; ANG2:=Pi/2; ANG3:=Pi; ANG4:=3*(Pi/2);
CI:=Trunc(XI);
CX:=XI-CI;
CJ:=Trunc(XJ);
CY:=XJ-CJ;

```

```

IANGVEN:=5;

IF (ANGVEN)=(ANG1) THEN IANGVEN:=1;
IF (ANGVEN)=(ANG2) THEN IANGVEN:=2;
IF (ANGVEN)=(ANG3) THEN IANGVEN:=3;
IF (ANGVEN)=(ANG4) THEN IANGVEN:=4;

CASE (IANGVEN) OF
1:
  BEGIN
    XDHO:=((C1-CX)/2)*TQ;
    YDTR:=0;
    SFINAL:=(C1-CX)*C2;
    XMULT:=SFINAL;
  END;
2:
  BEGIN
    XDHO:=((C2-CY)/2)*TQ;
    YDTR:=0;
    SFINAL:=(C2-CY)*C1;
    XMULT:=SFINAL;
  END;
3:
  BEGIN
    XDHO:=(CX/2)*TQ;
    YDTR:=0;
    SFINAL:=CX*C2;
    XMULT:=SFINAL;
  END;
4:
  BEGIN
    XDHO:=(CY/2)*TQ;
    YDTR:=0;
    SFINAL:=C1*CY;
    XMULT:=SFINAL;
  END;
ELSE
BEGIN
  PIS2:=Pi/2;
  PIS4:=PIS2/2;
  X:=SIN(ANGVEN);
  Y:=COS(ANGVEN);
  XM:=X/Y;
  IF (CX=0) AND (CY=0) THEN
  BEGIN
    IF (ANGVEN)<(PIS4) THEN
    BEGIN
      X1:=1;
    
```

```

Y1:=XM*(X1-CX)+CY;
RADIC:=(Y1-CY)*(Y1-CY)+(X1-CX)*(X1-CX);
DIST:=SQRT(RADIC);
DIST1:=DIST*TQ;
XDHO:=DIST1/2;
YDTR:=0;
SFINAL:=1;
XMULT:=SFINAL;
END
ELSE
BEGIN
  IF (ANGVEN)<(PIS2) THEN
    BEGIN
      Y1:=1;
      X1:=(Y1-CY)/XM+CX;
      RADIC:=(Y1-CY)*(Y1-CY)+(X1-CX)*(X1-CX);
      DIST:=SQRT(RADIC);
      DIST1:=DIST*TQ;
      XDHO:=DIST1/2;
      YDTR:=0;
      SFINAL:=1;
      XMULT:=SFINAL;
    END
  ELSE
    BEGIN
      SFINAL:=0;
      YDTR:=0;
      XDHO:=0;
      XMULT:=SFINAL;
    END;
  END;
END
ELSE
IF CX=0 THEN
BEGIN
  AC1:=(C2-CY)/(C1-CX);
  AC2:=(C1-CX)/(CY-C4);
  GAMA1:=ARCTAN(AC1);
  GAMA2:=ARCTAN(AC2);
  GAMA3:=ANG4+GAMA2;
  IF ((ANGVEN)<(GAMA1)) OR ((ANGVEN)>(GAMA3)) THEN
  BEGIN
    X1:=1;
    Y1:=XM*(X1-CX)+CY;
    KF0:=1;
    RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(X1-CX);
    GOTO80;
  END

```

```

ELSE
IF (ANGVEN)<(ANG2) THEN
BEGIN
  Y1:=1;
  X1:=(Y1-CY)/XM+CX;
  KF0:=2;
  RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(X1-CX);
  GOTO80;
END
ELSE
IF (ANGVEN)<(ANG4) THEN
BEGIN
  X1:=0;
  Y1:=XM*(X1-CX)+CY;
  KF0:=3;
  RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(CX-X1);
  GOTO80;
END
ELSE
BEGIN
  Y1:=0;
  X1:=(Y1-CY)/XM+CX;
  KF0:=4;
  RADIC:=SQR(CX-X1)+SQR(CY-Y1);
  GOTO80;
END;
END
ELSE
IF (CY=0) THEN
BEGIN
  AC1:=(C2-CY)/(C1-CX);
  AC2:=(C2-CY)/(CX-C3);
  GAMA1:=ARCTAN(AC1);
  GAMA2:=(ANG3)-(ARCTAN(AC2));
  IF (ANGVEN)<(GAMA1) THEN
  BEGIN
    X1:=1;
    Y1:=XM*(X1-CX)+CY;
    KF0:=1;
    RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(X1-CX);
    GOTO80;
  END
  ELSE
  IF (ANGVEN)<(GAMA2) THEN
  BEGIN
    Y1:=1;
    X1:=(Y1-CY)/XM+CX;
    KF0:=2;

```



```

        RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(X1-CX);
        GOTO80;
    END
    ELSE
    IF (ANGVEN)<(ANG3) THEN
    BEGIN
        X1:=0;
        Y1:=XM*(X1-CX)+CY;
        KF0:=3;
        RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(CX-X1);
        GOTO80;
    END
    ELSE
    BEGIN
        XDHO:=0;
        SFINAL:=0;
        YDTR:=0;
        XMULT:=SFINAL;
    END;
END
ELSE
BEGIN
    A1:=(1-CY)/(1-CX);
    A2:=CX/(1-CY);
    A3:=CY/CX;
    A4:=(1-CX)/CY;
    ALFA1:=ARCTAN(A1);
    ALFA2:=(PIS2)-(ALFA1);
    ALFA3:=ARCTAN(A2);
    ALFA4:=(PIS2)-(ALFA3);
    ALFA5:=ARCTAN(A3);
    ALFA6:=(PIS2)-(ALFA5);
    ALFA7:=ARCTAN(A4);
    ALFA8:=(PIS2)-(ALFA7);
    BETA1:=ALFA1;
    BETA2:=(BETA1)+(ALFA2)+(ALFA3);
    BETA3:=(BETA2)+(ALFA4)+(ALFA5);
    BETA4:=(BETA3)+(ALFA6)+(ALFA7);
    IF ((ANGVEN)<(BETA1)) OR ((ANGVEN)>=(BETA4)) THEN
    BEGIN
        X1:=1;
        Y1:=XM*(X1-CX)+CY;
        KF0:=1;
        RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(X1-CX);
        GOTO80;
    END
    ELSE
    IF (ANGVEN)<(BETA2) THEN

```

```
BEGIN
  Y1:=1;
  X1:=(Y1-CY)/XM+CX;
  KF0:=2;
  RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(X1-CX);
  GOTO80;
END
ELSE
IF (ANGVEN)<(BETA3) THEN
BEGIN
  X1:=0;
  Y1:=XM+(X1-CX)+CY;
  KF0:=3;
  RADIC:=SQR(Y1-CY)+SQR(CX-X1);
  GOTO80;
END
ELSE
BEGIN
  Y1:=0;
  X1:=(Y1-CY)/XM+CX;
  KF0:=4;
  RADIC:=SQR(CX-X1)+SQR(CY-Y1);
  GOTO80;
END;
END;
END;

END; //CASE
END; //PROCEDURE
```

Anexo 7 - Rotina para cálculo da distância entre a fonte emissora e as quadriculas receptoras, na direção do vento e perpendicular a ela.

```
Procedure Dx Dy (var TQ,X,Y,XI,XJ,XDHO,YDTR:Real; K,L:Integer);  
var RL,RK:Real;
```

```
{DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS
```

```
TQ   - Tamanho da quadricula  
ANGVEN - Direção do vento (graus)  
XI,XJ - Coordenadas do ponto onde está a fonte emissora  
K,L   - Índices da quadrícula receptora considerada  
XDHO  - Distancia ao longo do vento, calculada  
YDTR  - Distancia transversal a trajetória do vento, calculada }
```

```
BEGIN
```

```
  RL:=L-(0.5)-XJ;  
  RK:=K-(0.5)-XI;  
  XDHO:=TQ*(RL*X+RK*Y);  
  YDTR:=TQ*(RL*Y-RK*X);
```

```
END;
```

Anexo 8 - Rotina para cálculo da altura efetiva da chaminé

```
PROCEDURE HREAL (VAR H:REAL; CURVA1:CHAR;
XDHO,VC,DIC,VEL,PA,TC,TA:REAL; VAR DELTH:REAL);
```

```
{DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS
```

```
H - Altura da chaminé (m), que na saída fornece a altura efetiva da emissão
```

```
CURVA1- Categorias de estabilidade atmosférica:
```

```
=1 - Tempo Extremamente Instável
```

```
=2 - Tempo Moderadamente Instável
```

```
=3 - Tempo Levemente Instável
```

```
=4 - Tempo Neutro
```

```
=5 - Tempo Levemente Estável
```

```
=6 - Tempo Moderadamente Estável
```

```
XDHO - Distância ao longo do vento (calculada)
```

```
VC - Velocidade de saída dos gases(m/s)
```

```
DIC - Diâmetro Interno da Chaminé (m)
```

```
VEL - Velocidade média do vento(m/s)
```

```
PA - Pressão atmosférica (mb)
```

```
TC - Temperatura dos gases na chaminé(°C)
```

```
TA - Temperatura do ar (°C)
```

```
DELTH - Aumento da altura na pluma }
```

```
// Observação: 2.68*001 É uma contante com unidade: (MB-1*M-1)
```

```
// Equação de Holland utilizada para os cálculos
```

```
VAR CTE:REAL;
```

```
Begin
```

```
CTE:=2.68*0.001;
```

```
DELTH:=(VC*DIC/VEL)*(1.5+CTE*PA*((TC-TA)/(TC+273.16))*DIC);
```

```
CASE CURVA1 OF
```

```
'1':
```

```
DELTH:=0.8*DELTH;
```

```
'2':
```

```
DELTH:=0.8*DELTH;
```

```
'3':
```

```
DELTH:=0.9*DELTH;
```

```
'4':
```

```
DELTH:=1.1*DELTH;
```

```
'5':
```

```
DELTH:=1.2*DELTH;
```

```
'6':
```

```
DELTH:=1.2*DELTH;
```

```
END;
```

```
H:=H+DELTH;
```

```
END;
```

Anexo 9 - Rotina para cálculo da quantidade de poluente que chega a uma quadrícula

```
PROCEDURE QRECE (QE1,VM,XDHO,YDTR,VEL,Z,H,SIGMAH,SIGMAV:REAL;
VAR Q1:REAL);
```

```
{ DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS
```

```
QE1   - Quantidade Emitida pela quadrícula emissora (g/s)
VM    - Meia-vida do poluente
XDHO  - Distância ao longo do vento (calculada)
YDTR  - Distância transversal à trajetória do vento (calculada pela rotina
      DxDy) em metros
VEL   - Velocidade média do vento(m/s)
Z     - Altura sobre a quadrícula emissora, que se deseja calcular a concentração
      do poluente(m)
H     - Altura efetiva da fonte (Calculada pela rotina Hreal (m))
SIGMAH - Desvio padrão da dispersão horizontal (m)
SIGMAV - Desvio padrão da dispersão vertical (m)
Q1    - Parâmetro de saída - Contém a quantidade de poluente que chega a
      quadrícula receptora (K,L), proveniente da fonte emissora(g/m3)
}
```

```
VAR
```

```
T,CAJU0,CAJU1,CAJU2,CAJU3,D,PARTE1,PARTE2,PARTE3,PARTE4:REAL;
```

```
BEGIN
```

```
  T:=XDHO/VEL;
```

```
  CAJU0:=-0.693*T/VM;
```

```
  D:=EXP(CAJU0);
```

```
  CAJU1:=-(YDTR*YDTR)/(2*SIGMAH*SIGMAH);
```

```
  CAJU2:=-(Z-H)*(Z-H)/(2*SIGMAV*SIGMAV);
```

```
  CAJU3:=-(Z+H)*(Z+H)/(2*SIGMAV*SIGMAV);
```

```
  PARTE1 := QE1*D/(2*3.1415926*SIGMAH*SIGMAV*VEL);
```

```
  PARTE2 := EXP(CAJU1);
```

```
  IF (PARTE1 < (10E-80)) THEN PARTE2 := 0;
```

```
  IF (PARTE1 = 0 ) OR (PARTE2 =0 ) THEN
```

```
    Q1 := 0
```

```
  ELSE
```

```
  BEGIN
```

```
    PARTE3 := EXP(CAJU2);
```

```
    PARTE4 := EXP(CAJU3);
```

```
    Q1 := PARTE1*PARTE2*(PARTE3+PARTE4);
```

```
  END;
```

```
END;
```

Anexo 10 - Rotina para cálculo do desvio padrão das dispersões (horizontal e vertical)

```
PROCEDURE SIG (XDHO:REAL; CURVA1:CHAR; VAR
SIGMAH,SIGMAV:REAL);
```

{DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS

XDHO - Distância ao longo do vento (calculada)

CURVA1- Categorias de estabilidade atmosférica:

=1 - Tempo Extremamente Instável

=2 - Tempo Moderadamente Instável

=3 - Tempo Levemente Instável

=4 - Tempo Neutro

=5 - Tempo Levemente Estável

=6 - Tempo Moderadamente Estável

SIGMAH - Desvio padrão da dispersão horizontal (m)

SIGMAV - Desvio padrão da dispersão vertical (m)}

```
CONST VH:ARRAY [1..16,1..7] OF REAL
```

```
= ((0,0,0,0,0,0,0),
(200,54.5,36,25,14,11,8),
(400,95,70,44.5,30,24,13),
(600,140,100.5,67,43.75,33,20),
(800,175,131.5,85,57.5,43,29),
(1000,211,157.5,104,69,50,33),
(2000,432,300,198,122,90,61),
(4000,729,550,366,240,178,95),
(6000,1020,790,540,363,245,176),
(8000,1298,985,688,458,335,224),
(10000,1580,1190,835,550,425,270),
(20000,2700,2000,1500,850,750,430),
(40000,4740,3600,2650,1700,1200,800),
(60000,6850,5200,4050,2480,2050,1220),
(80000,8720,6800,5000,3250,2450,1620),
(100000,11060,8000,6100,4100,3000,1975));
```

```
CONST VV :ARRAY [1..16,1..7] OF REAL
```

```
= ((0,0,0,0,0,0,0),
(200,30,20,13,7.5,6,3),
(400,76,46,26,14,11,7),
(600,160,68,38,22,14,10),
(800,290,88,50,27,17.5,12),
(1000,450,110,60,32,22,14),
(2000,1250,225,125,50,37.5,17.5),
(4000,2850,490,210,75,48,28),
(6000,4100,775,325,100,61,36),
(8000,5350,1090,420,118,72,44),
```

```
(10000,6600,1360,500,134,80,47),
(20000,14600,2800,900,200,85,75),
(40000,30600,6000,1800,280,150,80),
(60000,46600,9000,2500,330,160,85),
(80000,62600,12400,3150,430,170,87),
(100000,78600,15600,4000,450,180,92));
```

```
VAR I,J,IER:INTEGER;
```

```
BEGIN
```

```
VAL(CURVA1,J,IER);
```

```
J:=J+1;
```

```
I:=1;
```

```
WHILE (VH[I,1]<=XDHO) AND (I<17) DO
```

```
  I:=I+1;
```

```
  SIGMAH:=VH[I-1,J]+(XDHO-VH[I-1,1])*(VH[I,J]-VH[I-1,J])/(VH[I,1]-VH[I-1,1]);
```

```
  SIGMAV:=VV[I-1,J]+(XDHO-VV[I-1,1])*(VV[I,J]-VV[I-1,J])/(VV[I,1]-VV[I-1,1]);
```

```
END;
```

Anexo 11 - Rotina para cálculo dos máximos e mínimos valores calculados na simulação

```
VAR I,J:INTEGER;
    MAX2,MIN1,MIN2:REAL;

BEGIN
  MAX1:=Q[1,1];
  MAX2:=Q[1,1];
  MIN1:=99;
  MIN2:=99;

  FOR I:=1 TO 20 DO
  BEGIN
    FOR J:=1 TO 20 DO
    BEGIN
      IF Q[I,J] > MAX1 THEN
      BEGIN
        MAX2:=MAX1;
        MAX1:=Q[I,J];
      END
      ELSE
      IF (Q[I,J] > MAX2) THEN
        MAX2:=Q[I,J];
      IF Q[I,J] < MIN1 THEN
      BEGIN
        MIN2:=MIN1;
        MIN1:=Q[I,J];
      END
      ELSE
      IF (Q[I,J] < MIN2) AND (Q[I,J]>0) THEN
        MIN2:=Q[I,J];
      END;
    END;
  END;
  MAX:=MAX1;
  MAX1:=MAX2;
  IF MIN1>0 THEN
    MIN:=MIN1
  ELSE
    MIN:=MIN2;
  END;
END;
```