

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL – UFRGS CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM
SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

APLICAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICO CALPUFF PARA ESTIMATIVA
DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DO RISCO POPULACIONAL EM REGIÃO SOB INFLUÊNCIA DE
EMPREENHIMENTOS TERMELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO EM CANDIOTA/RS

Rafael Freire de Macêdo

Orientador(a): Rita de Cássia Marques Alves

Porto Alegre, 10 de agosto de 2017

RAFAEL FREIRE DE MACÊDO

APLICAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICO CALPUFF PARA ESTIMATIVA
DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DO RISCO POPULACIONAL EM REGIÃO SOB INFLUÊNCIA DE
EMPREENDIMENTOS TERMELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE CANDIOTA/RS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, área de concentração em Sensoriamento
Remoto e Geoprocessamento aplicado

Orientador(a): Rita de Cássia Marques Alves (UFRGS)

Porto Alegre, 2017

RAFAEL FREIRE DE MACÊDO

APLICAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICO CALPUFF PARA ESTIMATIVA
DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DO RISCO POPULACIONAL EM REGIÃO SOB INFLUÊNCIA DE
EMPREENDIMENTOS TERMELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE CANDIOTA/RS

Dissertação apresentada à Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, área de concentração em Sensoriamento
Remoto e Geoprocessamento aplicado

Prof(a). Dr(a). Andréa Lopes Iescheck (UFRGS)

Prof(a). Dr(a). Eliana Veleda Klering (UFRGS)

Dr. André Luiz Fonseca Naime (IBAMA)

PORTO ALEGRE-RS 2017

Aos pais, irmãos, e esposa, àqueles que
me apoiam e que me fazem ser o deles a
cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelos valores culturais e educacionais. Por terem me ensinado os deveres de cidadão que me fazer cultivar os direitos de uma sociedade justa e igualitária.

Aos avós, que por gerações perpetuaram a prática do saber e a disciplina do estudo.

Aos familiares que por zelo transformaram e conservam nosso núcleo íntegro e acolhedor.

À minha esposa, por se dedicar à mim e em tempos de dedicação acadêmica ser o pilar de sustentação de nossa recente família, nos proporcionando a felicidade de um filho esperado.

À minha orientadora Dra. Rita de Cássia Marques Alves, pelo carisma e dedicação profissional ao trazer à todos os seus alunos o que há de mais significativo no estado da arte que escolhemos investigar e aplicar.

Aos colegas do PPGSR e do IBAMA/RS que além do valoroso auxílio durante a fase que se finda, foram amigos que acolheram o emigrante e me permitiram vivenciar a cultura de ser um gaudério.

Aos integrantes das empresas Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica – CGTEE, ENGIE Brasil, ENEVA e Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE, pelo fornecimento de dados que subsidiaram a elaboração desta dissertação.

Por fim, ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos recursos Naturais Renováveis – IBAMA, e aos colegas de trabalho, que apoiaram e deram suporte técnico ao longo desta trajetória como servidor público federal, função que exerço com orgulho e apreço.

APLICAÇÃO DO MODELO DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICO CALPUFF PARA ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL E DO RISCO POPULACIONAL EM REGIÃO SOB INFLUÊNCIA DE EMPREENDIMENTOS TERMELÉTRICOS: ESTUDO DE CASO EM CANDIOTA/RS

RESUMO: A Grande Jazida Candiota, localizada no Município homônimo do Estado do Rio Grande do Sul, possui o maior depósito de carvão mineral do país. Desde 1970 em operação, a Usina Termoeletrica (UTE) Presidente Médici opera atualmente com potência nominal de 796 MW, distribuídas em cinco unidades. Na mesma região encontra-se em instalação a UTE Pampa Sul, com potência nominal de 340 MW, enquanto outras usinas, totalizando 2.527 MW, estão em distintas fases de licenciamento ambiental federal (LAF). Na presente pesquisa aplicou-se o modelo regulatório CALPUFF para avaliar o comportamento da dispersão dos poluentes atmosféricos das fontes fixas prognosticando a vulnerabilidade ambiental em termos de saturação da bacia atmosférica pela estimativa do Índice de Pressão Ambiental (IPA). Pela análise de agrupamento das respostas das simulações incidentes em receptores dos núcleos urbanos, estimou-se o risco populacional em termos de Fração de Ingestão (FI) de poluentes. Ao compararmos o cenário futuro com o atual, apesar de maior distribuição espacial das fontes de emissão e significativo acréscimo de potência, as taxas de emissão total de SO₂ e MP para a área em estudo serão reduzidas entre os atuais 3.266,1 g SO₂/s e 696,3 g MP/s para futuros 1.899,9 g SO₂/s e 261,7 g MP/s. Contudo, para o poluente NOx esta tendência é inversa, passando da atual taxa de emissão de 375,8 g NOx/s para 1.423,9 g Nox/s. Para o período de 2011 a 2013, ao compararmos as médias anuais de poluentes entre o cenário atual e o futuro, contabilizou-se para a FI redução média de cerca de 15% de SO₂ e 42% de MP, ao passo que houve elevação de cerca de 524% para NOx. Avaliando-se a distribuição espacial da poluição provocada pelos três compostos, aplicou-se o IPA para raios concêntricos de influência considerando as médias anuais, concluindo-se que o cenário futuro exerce menor saturação na bacia aérea e portanto menores índices de vulnerabilidade ambiental e risco populacional. A sensibilidade e performance do modelo foram avaliadas por métodos estatísticos, concluindo-se que o mesmo é aplicável pois atendem os critérios de fração de predição, tendência média e de espalhamento aleatório.

Palavras chave: Modelagem da qualidade do ar, CALPUFF, Fração de Ingestão, Índice de Pressão Ambiental, vulnerabilidade ambiental, risco populacional, Candiota/RS

APPLICATION OF THE CALPUFF ATMOSPHERIC POLLUTANTS DISPERSION MODEL TO ESTIMATE ENVIRONMENTAL VULNERABILITY AND POPULATION RISK IN A REGION UNDER THERMOPOWER INFLUENCE: CASE STUDY IN CANDIOTA / RS

ABSTRACT: The Great Coal-Bed of Candiota, located in the homonymous municipality of the State of Rio Grande do Sul, has the largest coal deposit in the country. Since 1970 in operation, Presidente Médici Thermoelectric Power Plant (TPP) currently operates with nominal power of 796 MW, distributed in five units. In the same region, the Pampa Sul TPP is under construction, with a nominal power of 340 MW; while other plants, totaling 2,527 MW, are in different phases of federal environmental licensing (FEL). In the present research the CALPUFF regulatory model was applied to evaluate the behavior of the dispersion of the atmospheric pollutants emitted from fixed sources, predicting the environmental vulnerability in terms of saturation of the atmospheric basin by the estimation of the Environmental Pressure Index (EPI). The population risk in terms of Intake Fraction (IF) of pollutants was estimated by grouping the responses of the simulations incident on receptors of the urban nuclei. When comparing the future scenario with the current one, in spite of a greater spatial distribution of emission sources and a significant increase in power, the total emission rates of SO₂ and MP for the study area will be reduced from the current 3,266.1 g SO₂ / s 696.3 g MP / s for futures 1,899.9 g SO₂ / s and 261.7 g MP / s. However, for the NO_x pollutant this trend is reversed, from the current emission rate of 375.8 g NO_x / s to 1423.9 g Nox / s. For the period from 2011 to 2013, when comparing the annual averages of pollutants between the current and future scenarios, an average reduction of about 15% of SO₂ and 42% of MP was recorded for FI, while there was an increase of 524% for NO_x. The EPI was applied to concentric rays of influence considering the annual averages, concluding that the future scenario exerts a lower saturation in the aerial basin and therefore, lower levels of environmental vulnerability and population risk. The sensitivity and performance of the model were evaluated by statistical methods, concluding that it is applicable because they meet the criteria of prediction fraction, average tendency and random spread.

Palavras chave: Ai quality modeling, CALPUFF, Intake Fraction, Environmental Pressure Index, Environmental Vulnerability, Population Risk, Candiota/RS.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	10
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE ABREVIATURAS	16
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	18
1.2 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA.....	19
1.2.1 ÁREA DE ESTUDO	20
1.3 OBJETIVOS GERAIS.....	21
1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 GERENCIAMENTO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA.....	24
2.2 DINÂMICA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA.....	26
2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS PLUMAS.....	29
2.3 MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	30
2.3.1 CALPUFF DISPERSION MODEL.....	33
2.3.2 TESTE DE SENSIBILIDADE E PERFORMANCE DE MODELOS	36
2.4 INDICADORES DE CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS	41
2.4.1 FRAÇÃO DE INGESTÃO.....	41
2.4.2 ÍNDICE DE PRESSÃO AMBIENTAL	42
2.5 REFERENCIAIS METODOLÓGICOS	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1 ESTUDOS COLATERAIS E BANCOS DE DADOS GEOESPACIALIZADOS	53
3.1.1 DADOS GEOESPACIALIZADOS E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	53
3.1.2 ESTUDOS COLATERAIS CIENTÍFICOS E DISPONÍVEIS NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL.....	59
3.2 MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA CALPUFF	59
4 RESULTADOS	62
4.1 DADOS METEOROLÓGICOS	62
4.2 DADOS DE QUALIDADE DO AR	66
4.3 DADOS DE MONITORAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	67
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES MATEMÁTICAS DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E ESTIMATIVAS DE INDICADORES DE CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS	68
4.4.1 CENÁRIO ATUAL	69
4.4.1.1 CONCENTRAÇÕES DE SO ₂	69
4.4.1.1.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL	71
4.4.1.2 CONCENTRAÇÕES DE MP	77
4.4.1.2.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL	79
4.4.1.3 CONCENTRAÇÕES DE NO ₂	84

4.4.1.3.1	VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL	86
4.4.2	CENÁRIO FUTURO	90
4.4.2.1	CONCENTRAÇÕES DE SO ₂	90
4.4.2.1.1	VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL	92
4.4.2.2	CONCENTRAÇÕES DE MP	96
4.4.2.2.1	VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL	97
4.4.2.3	CONCENTRAÇÕES DE NO ₂	101
4.4.2.3.1	VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL	104
4.4.3	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CENÁRIOS	108
4.4.4	TESTE DE SENSIBILIDADE E PERFORMANCE DO MODELO	119
5	CONCLUSÕES.....	124
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
	APÊNDICE A – TIPOS DE PLUMAS DE EMISSÃO.....	135
	APÊNDICE B – ESTUDOS COLATERAIS	143
	APÊNDICE C – CONFIGURAÇÕES DO MODELO DE DISPERSÃO CALPUFF.....	159
	APÊNDICE D – DADOS METEOROLÓGICOS	207
	APÊNDICE E – DADOS DE QUALIDADE DO AR	251
	APÊNDICE F – DADOS DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	255
	APÊNDICE G – RELATÓRIO TÉCNICO DAS SIMULAÇÕES – CENÁRIO ATUAL	271
	APÊNDICE H – RELATÓRIO TÉCNICO DAS SIMULAÇÕES – CENÁRIO FUTURO	450
	APÊNDICE I – RELATÓRIO TÉCNICO DE PERFORMANCE DO MODELO	565

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área de Estudo.....	21
Figura 2 - Estrutura de Sistema de Tomada de Decisão acerca da Qualidade do Ar	26
Figura 3 - Fluxo de Parâmetros e Equações aplicadas ao estudo de Dispersão de Poluentes Atmosféricos.....	32
Figura 4 – Localização das Estações Meteorológicas	55
Figura 5 – Estações de Qualidade do Ar	56
Figura 6 - Distribuição geográfica dos empreendimentos termoeletrônicos e núcleos urbanos em Candiota/RS.....	57
Figura 7 - Receptores Vila Residencial e Vila Dario Lassance	57
Figura 8 - Receptor Vila Operária e Vila João Emílio	57
Figura 9 - Receptor Vila Seival	57
Figura 10 - Receptor Vila Votorantim.....	57
Figura 11 - Receptor Hulha Negra	57
Figura 12 - Receptor Bagé.....	58
Figura 13: Receptor Pedras Altas.....	58
Figura 14: Receptor Pinheiro Machado.....	58
Figura 15: Receptor Aceguá.....	58
Figura 18 - Dados digitais de elevação do terreno	60
Figura 19 - Modelo Digital de Elevação do Terreno	60
Figura 16: Malha Computacional	60
Figura 17: Receptores Discretos	60
Figura 20 – Classes de Uso e Ocupação do Solo.....	61
Figura 21 – Zonas de depleção da pluma	61
Figura 22 - Campos de ventos gerados no modelo	61
Figura 23 - Camadas de campos de ventos	61
Figura 24 – Variação da Temperatura - 2011	63
Figura 25 - Rosa dos Ventos, Frequência de Distribuição da Velocidade e Variabilidade Temporal - 2011	64
Figura 26 - Altura da Camada Limite Atmosférica (m) – 2011	65
Figura 27 - Classes de Estabilidade Atmosférica PGT – 2011	66
Figura 28 - Dados de monitoramento da qualidade do ar na rede da CGTEE – SO ₂ – 2011	67
Figura 29 - Dados de monitoramento das emissões atmosféricas da UTPM – SO ₂ – 2012	68
Figura 30 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para as médias horárias	70
Figura 31 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para as médias diárias.....	71
Figura 32 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para as médias anuais	71
Figura 33 - SO ₂ – Isolinhas – 2011.....	72
Figura 34 - SO ₂ – Isolinhas – 2012.....	72
Figura 35 - SO ₂ – Isolinhas – 2013.....	72
Figura 36 - SO ₂ – Isolinhas - 2014.....	72
Figura 37 - SO ₂ – Isolinhas - 2015.....	72
Figura 38 – SO ₂ – Receptores – 2011.....	73
Figura 39 - SO ₂ – Receptores – 2012	73
Figura 40 - SO ₂ – Receptores – 2013	73

Figura 41 - SO ₂ – Receptores – 2014	73
Figura 42 - SO ₂ – Receptores – 2015	73
Figura 43 - SO ₂ – Receptor Seleccionado - 2011	74
Figura 44 - SO ₂ – Receptor Seleccionado - 2012	74
Figura 45 - SO ₂ – Receptor Seleccionado - 2013	75
Figura 46 - SO ₂ – Receptor Seleccionado - 2014	75
Figura 47 - SO ₂ – Receptor Seleccionado - 2015	75
Figura 48 - Máximos valores ranqueados de MP para as médias horárias.....	79
Figura 49 - Máximos valores ranqueados de MP para as médias diárias	79
Figura 50 - Máximos valores ranqueados de MP para as médias anuais.....	79
Figura 51 – MP – Isolinha - 2011	80
Figura 52 - MP – Isolinha - 2012	80
Figura 53 - MP – Isolinha - 2013	80
Figura 54 - MP – Isolinha - 2014	80
Figura 55 – MP – Isolinha - 2015	80
Figura 56 – MP – Receptores - 2011.....	81
Figura 57 – MP – Receptores - 2012.....	81
Figura 58 – MP – Receptores - 2013.....	81
Figura 59 – MP – Receptores - 2014.....	81
Figura 60 – MP – Receptores - 2015.....	81
Figura 61 –MP – Receptores Seleccionados - 2011	82
Figura 62 -MP – Receptores Seleccionados - 2012	82
Figura 63- MP – Receptores Seleccionados - 2013	82
Figura 64- MP – Receptores Seleccionados - 2014	82
Figura 65- MP – Receptores Seleccionados - 2015	82
Figura 66 - Máximos valores ranqueados de NO ₂ para as médias horárias.....	85
Figura 67 - Máximos valores ranqueados de NO ₂ para as médias anuais.....	85
Figura 68-NO ₂ – Isolinhas - 2011.....	86
Figura 69 – NO ₂ – Isolinhas - 2012	86
Figura 70 – NO ₂ – Isolinhas - 2013	86
Figura 71 – NO ₂ – Isolinhas - 2014	86
Figura 72 – NO ₂ – Isolinhas - 2015	86
Figura 73 – NO ₂ – Receptores - 2011.....	87
Figura 74 – NO ₂ – Receptores - 2012	87
Figura 75 – NO ₂ – Receptores - 2013	87
Figura 76 – NO ₂ – Receptores - 2014.....	87
Figura 77 – NO ₂ – Receptores - 2015.....	87
Figura 78-NO ₂ -Receptores Seleccionados-2011.....	88
Figura 79- NO ₂ -Receptores Seleccionados-2012.....	88
Figura 80- NO ₂ -Receptores Seleccionados-2013.....	88
Figura 81- NO ₂ -Receptores Seleccionados-2014.....	88
Figura 82- NO ₂ -Receptores Seleccionados-2015.....	88
Figura 83 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para s médias horárias	91
Figura 84 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para s médias diárias.....	92
Figura 85 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para s médias anuais	92
Figura 86 – SO ₂ – Isolinhas - 2011	93
Figura 87 - SO ₂ – Isolinhas - 2012	93

Figura 88 - SO ₂ – Isolinhhas - 2013	93
Figura 89 – SO ₂ – Receptores - 2011	93
Figura 90– SO ₂ – Receptores - 2012	93
Figura 91– SO ₂ – Receptores - 2013	93
Figura 92 – SO ₂ – Receptores Seleccionados-2011	94
Figura 93 - SO ₂ – Receptores Seleccionados-2012	94
Figura 94 - SO ₂ – Receptores Seleccionados-2013	94
Figura 95 - Máximos valores ranqueados de MP para s médias horárias	97
Figura 96 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para s médias diárias	97
Figura 97 - Máximos valores ranqueados de SO ₂ para s médias anuais	97
Figura 98 – MP – Isolinhhas - 2011	98
Figura 99 – MP – Isolinhhas - 2012	98
Figura 100 - – MP – Isolinhhas - 2013	98
Figura 101-MP-Receptores-2011	98
Figura 102 – MP - Receptores-2012	98
Figura 103- MP – Receptores - 2013	99
Figura 104 – MP–Receptores Seleccionados - 2011	99
Figura 105-MP–Receptores Seleccionados - 2012	99
Figura 106 – MP–Receptores Seleccionados - 2013	100
Figura 107 - Máximos valores ranqueados de NO ₂ (Método ARM2) para médias horárias	103
Figura 108 - Máximos valores ranqueados de NO ₂ (Conversão Total) para médias horárias	103
Figura 109 - Máximos valores ranqueados de NO ₂ (Método ARM2) para médias anuais	103
Figura 110 - Máximos valores ranqueados de NO ₂ (Conversão Total) para médias anuais	104
Figura 111 – NO ₂ - Isolinhhas - 2011	104
Figura 112 – NO ₂ – Isolinhhas - 2012	104
Figura 113 – NO ₂ – Isolinhhas - 2013	104
Figura 114 – NO ₂ – Receptores - 2011	105
Figura 115 – NO ₂ – Receptores - 2012	105
Figura 116 – NO ₂ – Receptores - 2013	105
Figura 117 – NO ₂ -Receptores Seleccionados-2011	106
Figura 118– NO ₂ -Receptores Seleccionados-2012	106
Figura 119 –NO ₂ -Receptores Seleccionados-2013	106
Figura 120 – Diferença relativa entre os índices de saturação do padrão regulatório de SO ₂ entre o Cenário Atual e Futuro	116
Figura 121 - Diferença relativa entre os índices de saturação do padrão regulatório de MP ₁₀ entre o Cenário Atual e Futuro	116
Figura 122 - Diferença relativa entre os índices de saturação do padrão regulatório de NO ₂ entre o Cenário Futuro e o Atual	116
Figura 123 – IPA por raio de influência (km)	118
Figura 124 – IPA cumulativo por raio de influência (km)	119
Figura 125 – Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método FB	121
Figura 126 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método MG	122
Figura 127 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método VG	122

Figura 128 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método NMSE	123
Figura 129 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método FAC2.....	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de Estabilidade Atmosférica	27
Tabela 2 - Classes de estabilidade de Pasquill relacionadas à velocidade superficial dos ventos e insolação	28
Tabela 3 – Localização de Estações Meteorológicas consideradas no estudo	55
Tabela 4 - Localização de Estações de Qualidade do Ar consideradas no estudo	56
Tabela 5 – Núcleo Urbanos e Densidade Populacional	58
Tabela 6 – Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2011	69
Tabela 7 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2012	69
Tabela 8 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2013	69
Tabela 9 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2014	70
Tabela 10 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2015	70
Tabela 11 - Perímetro de influência da média anual de concentração de SO ₂ – Cenário Atual	74
Tabela 12 – Registros da média anual de SO ₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.	76
Tabela 13 – Concentrações ranqueadas de MP - 2011	77
Tabela 14 - Concentrações ranqueadas de MP - 2012	77
Tabela 15 - Concentrações ranqueadas de MP - 2013	78
Tabela 16 - Concentrações ranqueadas de MP - 2014	78
Tabela 17 - Concentrações ranqueadas de MP - 2015	78
Tabela 18 - Perímetro de influência da média anual de concentração de MP – Cenário Atual	81
Tabela 19 – Registros da média anual de MP por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão primário e secundário.	83
Tabela 20 – Concentrações ranqueadas de NO ₂ - 2011	84
Tabela 21 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ - 2012	84
Tabela 22 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ - 2013	84
Tabela 23 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ - 2014	85
Tabela 24 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ - 2015	85
Tabela 25 - Perímetro de influência da média anual de concentração de NO ₂ – Cenário Atual	87
Tabela 26 – Registros da média anual de NO ₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.	89
Tabela 27 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2011	90
Tabela 28 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2012	91
Tabela 29 - Concentrações ranqueadas de SO ₂ - 2013	91
Tabela 30 - Perímetro de influência da média anual de concentração de SO ₂ – Cenário Futuro	94
Tabela 31 – Registros da média anual de SO ₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.	95
Tabela 32 - Concentrações ranqueadas de MP - 2011	96
Tabela 33 - Concentrações ranqueadas de MP - 2012	96
Tabela 34 - Concentrações ranqueadas de MP - 2013	96
Tabela 35 - Perímetro de influência da média anual de concentração de MP – Cenário Futuro	99

Tabela 36 – Registros da média anual de MP por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão primário e secundário.	100
Tabela 37 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ (Método ARM2) - 2011	101
Tabela 38 - Concentrações ranqueadas de NO _x (Conversão Total) - 2011.....	102
Tabela 39 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ (Método ARM2) - 2012.....	102
Tabela 40 - Concentrações ranqueadas de NO _x (Conversão Total) - 2012.....	102
Tabela 41 - Concentrações ranqueadas de NO ₂ (Método ARM2) - 2013.....	102
Tabela 42 - Concentrações ranqueadas de NO _x (Conversão Total) - 2013.....	102
Tabela 43 - Perímetro de influência da média anual de concentração de NO ₂ – Cenário Atual.....	105
Tabela 44 – Registros da média anual de NO ₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.	107
Tabela 45 – Concentrações médias de SO ₂ por raio de influência.....	114
Tabela 46 - Concentrações médias de MP10 por raio de influência.....	114
Tabela 47 - Concentrações médias de NO _x por raio de influência	114
Tabela 48 – Índice de saturação do padrão regulatório de SO ₂ por raio de influência	115
Tabela 49 - Índice de saturação do padrão regulatório de MP10 por raio de influência	115
Tabela 50 - Índice de saturação do padrão regulatório de NO ₂ por raio de influência	115
Tabela 51 – Índice de Pressão Ambiental por raio de influência	118

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGTEE	Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
DFA	<i>Damage Function Approach</i> (“Abordagem pela Função de Dano”)
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEP	<i>Good Engeneering Practice</i> (“Boas Práticas de Engenharia”)
H ₂	Hidrogênio Gasoso
H ₂ O	Água ou Vapor de Água
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
HC	Hidrocarbonetos
HCHO	Formaldeído
HCl	Ácido Clorídrico
HNO ₃	Ácido Nítrico
HONO	Ácido Nitroso
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IF	<i>Intake Fraction</i> (Fração de Ingestão)
IPA	Índice de Pressão Ambiental
IEA	Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency</i>)
MP	Material Particulado
MP10	Material Particulado Inalável de 10 µm
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso

NO	Óxido Nítrico
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
NO ₃ ⁻	Nitrato
NHHC	Non Methane Hydrocarbons (“Hidrocarbonetos Não-Metano”)
Hg	Mercúrio
O ₂	Oxigênio
OH ⁻	Hidroxila
PAN	Peroxiacetil Nitrato
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
ppb	Partes por Bilhão (10 ⁹)
ppm	Partes por Milhão (10 ⁶)
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SO ₃	Trióxido de Enxofre
SIN	Sistema Interligado Internacional
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
SO _x	Óxidos de Enxofre
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UTE	Usina Termoelétrica
UTPM	Usina Termoelétrica Presidente Médici

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A interação entre a produção de energia e o sistema ambiental global é considerada como um dos mais importantes tópicos geopolíticos das próximas décadas. Nos anos recentes, debates acerca da taxaço das emissões de carbono surgiram e se tornaram alarmantes. Entretanto, riscos à saúde populacional e impactos ambientais locais - incluindo aqueles decorrentes de acidentes severos - se mantêm como principais questões no planejamento do setor de geração de energia.

No Brasil, a geração de energia elétrica de matriz predominantemente renovável, função da expansão hidroelétrica das últimas décadas, esteve sempre aliada às fontes não renováveis, seja por combustível fóssil, seja por nuclear. Estas fontes de grande porte e ditas firmes suplantam flutuações de consumo de carga em grandes centros e em períodos de estiagem hídrica.

Segundo dados atualizados do Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), 27,4% da capacidade total de geração elétrica no território nacional é proveniente de fontes termoelétricas, sendo destes 62,18% oriunda de fontes fósseis.

A despeito da preponderante contribuição do gás natural como principal combustível fóssil na geração termoelétrica nacional, a participação do carvão mineral registra crescimento a partir da instalação de novas usinas que se utilizam de combustível importado, bem como do advento, desde 2010, da operação da unidade Fase C da Usina Termoelétrica Presidente Médici (UTPM) e com a projeção para 2020 de acréscimo de 360 MW advindo da UTE Miroel Wolowski (UTE PAMPA SUL), ambos empreendimentos localizados na região da Grande Jazida Candiota/RS.

Para a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE, 2014), a região de Candiota/RS mantém potencial de expansão termoelétrico sem comprometimento do índice de saturação da bacia atmosférica a poluentes gasosos e particulados, desde que haja modernização de algumas usinas em operação e que as novas fontes disponham de dispositivos de controle dos gases de exaustão, limitando o aporte de poluentes atmosféricos.

Neste contexto de inserção regional, a presente pesquisa aplica modelo matemático Gaussiano-Lagrangiano - denominado CALPUFF - para simulação da dispersão de poluentes atmosféricos oriundo das fontes fixas das usinas termelétricas em licenciamento ambiental federal, estimando a consequência à população residente na área de estudo em termos do indicador Fração de Ingestão – FI - e a saturação da bacia atmosférica em zonas radiais em termos do indicador Índice de Pressão Ambiental – IPA. Como forma de avaliar a capacidade de prognóstico do modelo, realizou-se teste de sensibilidade e performance confrontando as respostas computacionais com dados de monitoramento, obtendo-se resultados confiáveis para aplicação da rotina metodológica como ferramenta útil à tomada de decisão.

1.2 DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

Localizada no Município homônimo do Estado do Rio Grande do Sul, a Grande Jazida Candiota possui o maior depósito de carvão mineral do país. Com camadas superficiais, porém de características que conferem baixo poder calorífico e elevadas concentrações de contaminantes, o mineral extraído em minas a céu aberto se torna útil para o aproveitamento termoelétrico em usinas classificadas como “boca de mina”. Estima-se reservas da ordem de 8,0 bilhões de toneladas de carvão mineral (CRM, 1983), sendo reservas medidas em aproximadamente 0,972 bilhões de toneladas (DNPM, 2010).

Dado o potencial mineral, desde a década de 1950 a geração termelétrica se desenvolveu na região. O atual parque gerador da UTPM tem potência nominal de 796 MW, consideradas as usinas denominadas Fases A, B, e C. As unidades das Fases A e B são de tecnologia obsoleta e seus sistemas de controle ambiental dos gases de exaustão são ineficientes ou inoperantes, decorrendo em elevadas taxas de emissão de poluentes atmosféricos. Já a unidade da Fase C, de maior potência nominal, possui tecnologias de controle ambiental para os gases de exaustão.

Além da UTE PAMPA SUL que se encontra em instalação na região, outras usinas já possuem análise favorável do IBAMA acerca do licenciamento ambiental e a depender do planejamento setorial podem vir a se concretizar.

Registros recentes do monitoramento da qualidade do ar na região (IBAMA, 2010 a,b ; 2014 a,b) reportaram violações do padrão secundário de qualidade para Dióxido de Enxofre (SO₂) na média diária, constatando o impacto destas usinas.

Não obstante, diante da probabilidade de alteração das taxas de emissão de poluentes por fontes fixas na região, há necessidade de avaliação das consequências socioambientais em decorrência da exposição populacional e da capacidade de suporte da bacia atmosférica frente aos impactos do cenário atual e quais serão aqueles prognosticados para o cenário futuro, permitindo, pelos critérios selecionados, comparar quais oportunidades se apresentam no processo de tomada de decisão.

1.2.1 ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo situa-se no Sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, distante cerca 380 km de Porto Alegre, localizada entre as coordenadas 54° 10' 58" e 53° 18' 35" O e 31° 17' 35" e 32° 02' 41", abrangendo uma área de 6.970 km² – vide Figura 1. Inserem-se os Municípios de Candiota, Hulha Negra, Pedras Altas, Pinheiro Machado, Bagé e Aceguá (FEPAM, 2004).

– vide Figura 1. Inserem-se os Municípios de Candiota, Hulha Negra, Pedras Altas, Pinheiro Machado, Bagé e Aceguá (FEPAM, 2004).

Os principais cursos d'água da região são o Arroio Candiota, que forma o Reservatório Candiota (Barragens I e II), e o Rio Jaguarão, principal afluente da Lagoa Mirim, corpo hídrico costeiro binacional. De Clima Subtropical (Cfa) com Precipitações durante todo o ano (~1.465,6 mm), apresenta temperaturas variando entre 17,9 e 24,1 °C. A vegetação é tipo "Campanha", com maior porte em capões naturais; extensos vassourais, formação arbustiva de caráter regional entre Candiota e Bagé e mata ciliar ao longo dos cursos d'água. A geomorfologia local é classificada, em geral, como coerente e plana, com variações de aproximadamente 50 m com elevações em forma de coxilhas, sendo a porção Norte aquela que apresenta maior número de elevações.

A população total residente na região, conforme censo oficial (IBGE, 2010) era de 150.994 habitantes (Candiota = 8.771, Hulha Negra = 6.043, Pedras Altas = 2.212, Pinheiro Machado = 12.780, Bagé = 116.794 e Aceguá = 4.394). No município de Candiota, ao todo, são 846 domicílios particulares permanentes em área urbana,

enquanto 1.978 em área rural. Contudo, há predominância de participação da população urbana em 76%, para o mesmo ano base de 2010.

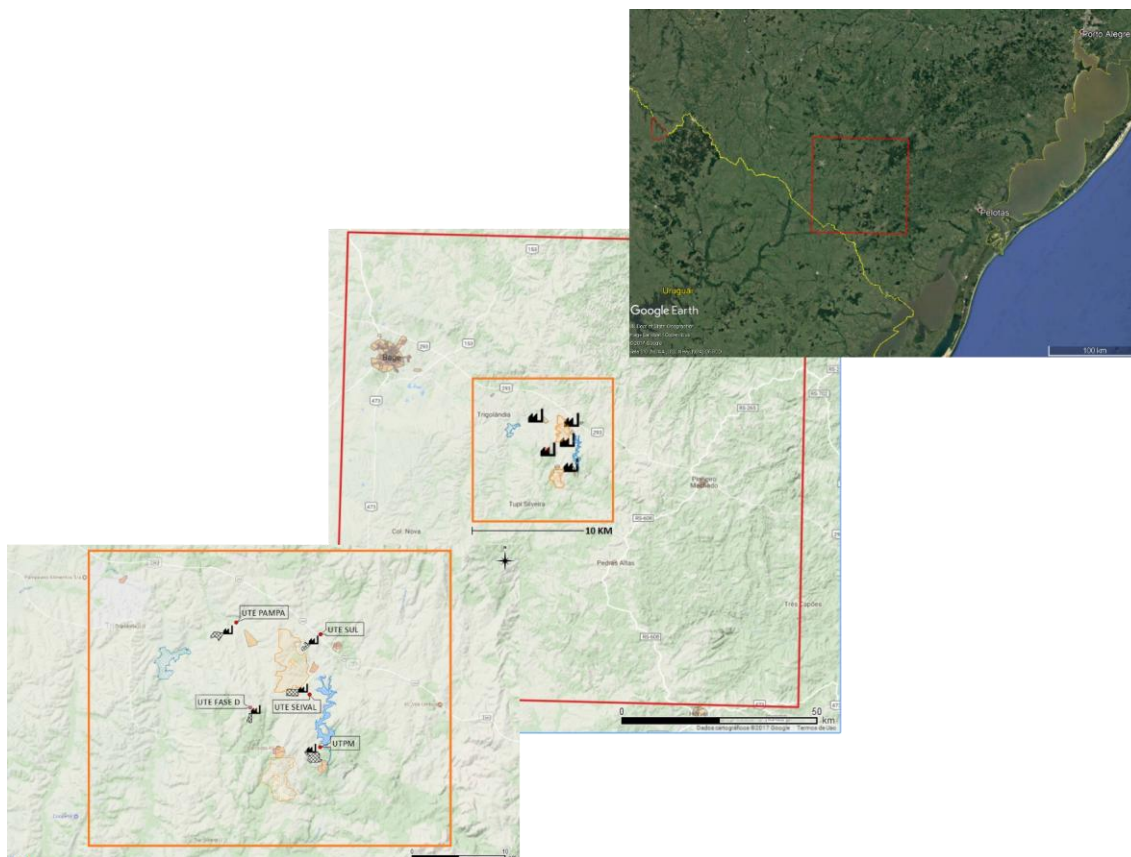


Figura 1 – Área de Estudo

Todos os municípios apresentam baixa densidade demográfica. A densidade populacional mais elevada na região do estudo encontra-se em Bagé, com 28,52 habitantes por km², porém, não ultrapassa a densidade média do Estado de 39,79 habitantes por km². A menor densidade demográfica por habitante é verificada no município de Pedras Altas, 1,61 hab/km².

Além das atividades de exploração de carvão mineral e geração de energia termoelétrica, são outras atividades marcantes a agropecuária, exploração mineral de calcário e as indústrias cimenteiras.

1.3 OBJETIVOS GERAIS

Desenvolver modelo de análise de consequência socioambiental em função da dispersão de poluentes atmosféricos na área de estudo compreendida por 7 municípios gaúchos localizados em região sobre influência das atividades correntes na Grande Jazida Candiota/RS e entorno, considerando dados primários de

monitoramento ambiental de empreendimentos em licenciamento ambiental no âmbito federal, dados secundários disponíveis em literatura científica e simulações matemáticas utilizando modelo de dispersão atmosférica CALPUFF.

1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Identificação e seleção das informações geográficas e de monitoramentos ambientais, tendo base as estações amostrais dos licenciamentos ambientais e de órgão oficiais, bem como dados colaterais disponíveis;
- b) Utilização de ferramentas de sensoriamento remoto e banco de dados para desenvolvimento de Sistema de Informações Geográficas para a área de estudo;
- c) Análise das respostas do modelo matemático de dispersão atmosférica CALPUFF diante dos cenários atuais e futuros, a partir dos dados gerados no Estudo de Capacidade de Suporte da Bacia Aérea de Candiota/RS (EPE, 2014), para o período de 2011 a 2013, atualizados a 2015;
- d) Análise de sensibilidade e performance das respostas do modelo matemático de dispersão atmosférica CALPUFF diante dos dados de monitoramento *in situ* da qualidade do ar e emissões atmosféricas;
- e) Sobreposição das respostas testadas do modelo matemático de dispersão atmosférica CALPUFF sobre a plataforma SIG e em análise de agrupamento frente aos dados de monitoramento ambiental e receptores selecionados estimar classes radiais de saturação da bacia atmosférica em termos do Índice de Pressão Ambiental e consequência socioambiental à populacional em termos de Fração de Ingestão;

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Em sequência ao presente capítulo há a revisão bibliográfica que apresenta literatura publicada relevante a esta pesquisa, incluindo uma descrição geral sobre as fontes e efeitos da poluição atmosférica; dinâmica da Camada Limite Atmosférica (CLA) e comportamento das plumas de dispersão; modelagem da dispersão atmosférica por métodos matemáticos Gaussianos-Lagrangeanos e avaliação de impacto; indicador de consequências populacional à poluentes atmosféricos,

denominado Fração de Ingestão; e indicador de consequência ambiental denominado Índice de Pressão Ambiental. O capítulo finaliza com a apresentação da revisão de trabalhos científicos cuja metodologia apresentada foi utilizada como referencial para o desenvolvimento desta pesquisa.

O capítulo 3 apresenta de forma sumária as fontes de dados coletados para utilização no desenvolvimento da dissertação e as respostas do pré-processamento da malha computacional; do terreno; e da meteorologia gerados pelo modelo CALPUFF. O capítulo 4 apresenta os resultados gerados nas simulações computacionais, servindo de base para análise sobre isolinhas de concentração de poluentes dispersos na região, com enfoque dado a receptores selecionados e estimativa das consequências socioambientais à população e saturação da bacia atmosférica pela aplicação dos indicadores selecionados. O capítulo apresenta uma comparação entre cenários atual e futuro para cada série de dados gerados, além de realizar o teste de sensibilidade e performance do modelo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa que são baseadas nas informações obtidas na seção de análise dos resultados. O capítulo também inclui informações sobre as limitações e desafios da pesquisa de modo a aduzir direções para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERENCIAMENTO DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

O poluente do ar é qualquer gás ou partícula na qual a concentração esteja alta o suficiente de modo que possa ser prejudicial à vida, o ambiente e/ou às propriedades. Podem ser de origem natural ou antropogênica, primários ou secundários (Pepper, 1996; Shallcross, 2009):

- a) Fonte primária: aquela em que o composto é diretamente emitido na atmosfera e são de origem biogênicas (solo, oceanos, biosfera) e antropogênicas (atividades humanas); além das erupções vulcânicas;
- b) Fonte secundária: representa a formação *in situ* do composto na atmosfera e são praticamente governadas pela disponibilidade de radiação solar.

As fontes de poluição antropogênica, foco deste trabalho, podem ser classificadas como móvel (veículos em geral) ou estacionária (fontes fixas); à combustão ou não-combustão; por área (associada à coletividade de fontes) ou pontual (chaminés, por exemplo); diretas ou indiretas (Matthias, Comrie & Musil, 1996).

Os tipos e impactos da química atmosférica variam de acordo com as alterações físicas e biológicas de suas interfaces com os meios. Os quatro processos gerais que controlam o transporte e o destino de contaminantes no ambiente são (Pepper, 1996):

- a) Advecção: transporte de matéria pelo movimento de um fluido;
- b) Difusão: espalhamento da matéria desde o centro da massa do contaminante, conforme se move em advecção;
- c) Transferência de massa: dissolução, evaporação, volatilização e sorção;
- d) Reações de transformação: processos abióticos de hidrólise, oxi-redução, reações fotoquímicas e decaimento radioativo; processos bióticos de biodegradação de compostos inorgânicos e orgânicos em condições aeróbicas e anaeróbicas e transformação de metais.

Para cada elemento e seus compostos um balanço pode ser construído reconhecendo suas fontes e sumidouros. Para os casos em que as fontes sejam maiores contribuintes do que a capacidade de remoção de compostos da atmosfera, a

concentração tenderá a aumentar no meio atmosférico, assim como poderá decair caso os sumidouros sejam mais efetivos.

São sumidouros físicos os processos de deposição úmida e seca responsáveis pela remoção de compostos pela incorporação em meio aquoso ou destruição/adsorção na superfície, respectivamente. O sumidouro fotoquímico ocorre quando o composto sofre interação com a radiação solar (fotólise) seguida de remoção química via reação com oxidantes, tais como o radical OH^- e O_3 .

Para que se desenvolva um sistema de gestão da poluição deve-se compreender uma sequência de eventos: (1) a geração de poluentes e sua emissão a partir da fonte; (2) seu transporte e transformação na, e remoção da, atmosfera; (3) seus efeitos nos seres humanos, materiais e ecossistemas. Assim, a formulação de uma estratégia de controle da poluição atmosférica para uma região envolve uma retroalimentação crítica a partir do (3) para o (1). Em síntese, todas as três áreas são importantes no plano de abatimento da poluição do ar (Flagan & Seinfeld, 1988).

Para Elbir, 2004, a ideia básica de sistemas de suporte ao planejamento da qualidade do ar é a de aprimorar o processo de tomada de decisão por agentes reguladores através do uso de ferramenta profissional. Este sistema geralmente agrega dados de monitoramento da qualidade do ar; inventários de emissão; modelos de qualidade do ar; mapeamento da qualidade do ar; avaliações de impacto das várias estratégias de controle e de suporte a planos de ação utilizando informações públicas acerca dos níveis passados e presentes da qualidade do ar.

Não obstante a complexidade para a escolha adequada do modelo que represente o sistema em análise e que possa gerar como resultados índices ou indicadores a serem utilizados em regras de tomadas de decisão, Laniak et al., 2013, consideram que a Modelagem Ambiental Integrada (do termo em inglês *Integrated Environmental Modeling - IEM*) inspirada pelas decisões políticas e problemas ambientais modernos, permite que consideremos através da ciência multidisciplinar e da capacidade computacional o ambiente de uma maneira abrangente.

A estrutura do sistema de tomada de decisão proposta por Elbir, 2004, em congruência com Guerrero et al., 2008; Lim et al., 2005; Elbir, 2004; Puliafito et al., 2003; Jensen et al., 2001; Lin & Lin, 2002; Finzi et al., 1991; é apresentada na Figura 2:

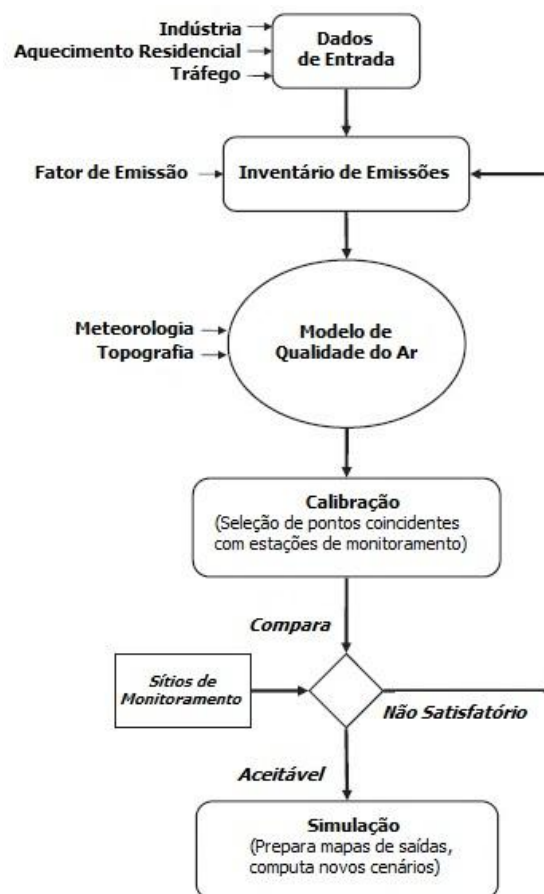


Figura 2 - Estrutura de Sistema de Tomada de Decisão acerca da Qualidade do Ar

2.2 DINÂMICA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

O balanço da radiação solar entre a superfície terrestre e a atmosfera é de fundamental importância pois regula tanto o clima na Terra como dirige a circulação atmosférica, mantendo a distribuição vertical da temperatura na atmosfera; regulando o ciclo hidrológico; desencadeando diversos processos químicos (Coe, 2009).

Para Garratt (1992), a CLA é *“a camada de ar diretamente acima da superfície da Terra onde os efeitos desta superfície (calor, resfriamento e fricção) são sentidos diretamente na escala de tempo menor que um dia; onde significantes fluxos de momento, calor ou matéria são incidentes pelo movimento turbulento na escala da profundidade da camada limite ou menor”*.

Na CLA a condição de turbulência da atmosfera é ocasionada por vários fatores que aumentam o movimento vertical do ar - seja ascendente ou descendente - tais como a força dos ventos sobre terrenos rugosos, árvores ou estruturas; migração de massas de ar com alta ou baixa pressão que geram ventos; radiação solar e turbulência

térmica de ar aquecido ascendente (Azad, 1993). Por conseguinte, a profundidade (altura) da CLA é variável em função da região e dos processos físicos atuantes na escala de tempo e espaço, podendo atingir alturas acima da superfície terrestre de até 5,0 km ou mais. Comumente se assume alturas de até 3,0 km sobre superfícies terrestres e de algumas centenas de metros sobre regiões oceânicas ou costeiras (Garratt, 1994).

No controle e gerenciamento da qualidade do ar a CLA está intimamente associada com o transporte e a dispersão de poluentes atmosféricos, incluindo plumas industriais. As condições de estabilidade atmosférica instável, estável ou neutra afetam a capacidade de mistura e dispersão de gases e partículas (Matthias, 1996).

O ar instável é resultante do movimento turbulento associado à convecção livre devido à flutuabilidade na atmosfera. No ar estável, a turbulência é suprimida, ou até ausente, pois a flutuabilidade tende a recuperar a parcela adiabática de ar deslocada para a sua altura original. A estabilidade neutra ocorre quando a força de flutuabilidade é zero decorrente de um balanço existente entre a gravidade (agindo de forma descendente) e a força do gradiente de pressão¹ (agindo de forma ascendente) que atuam na parcela de ar (Godish, 1991; Matthias, Musil & Bohn, 1996).

De maneira sumarizada, Turner (1994) apresenta as características das condições atmosféricas conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Condições de Estabilidade Atmosférica

CONDIÇÃO ATMOSFÉRICA	CONDIÇÃO TÍPICA	FLUXO DE CALOR	ESTRUTURA TÉRMICA	NATUREZA DA TURBULÊNCIA
INSTÁVEL	Meio do Dia Céu Límpido Vento leve	Balanço ascendente	Superadiabático	Consideravelmente Horizontal e Vertical
NEUTRA	Vento constante, ou, Nublado, ou, Transição	Zero	Quase seco Adiabático	Meio Termo
ESTÁVEL	Noturno Céu Límpido Vento leve	Balanço Descendente	Quase Isotérmico, ou, Inversão	Descendente Vertical

¹ Força do gradiente de pressão é a diferença entre a pressão no topo e na base da parcela de ar, dividido pela distância entre elas.

A mais difundida categorização de condições de turbulência atmosférica, ou classes de estabilidade, é a aquela definida por Paquill.

Pasquill introduziu um método para determinar a estabilidade da atmosfera incorporando considerações acerca da turbulência mecânica e turbulência de flutuabilidade. A turbulência mecânica é considerada no método pela inclusão da velocidade superficial do vento à aproximadamente 10 metros acima da superfície terrestre. A turbulência positiva por flutuabilidade é decorrente da insolação (entrada de radiação solar); enquanto a negativa decorrente da cobertura de nuvens no período noturno.

As classe são assim definidas (Sorbjan, 2003):

A = muito instável (convecção livre, com ou sem nuvens cúmulos)

B = instável (convecção forçada com ou sem nuvens cúmulos)

C = levemente instável (convecção diurna fraca)

D = neutra (convecção ausente ou muito fraca nos períodos diurno, noturno ou transiente entre o dia e a noite)

E = levemente estável (regime noturno com nuvens baixas e finas ou nuvens médias)

F = estável (sob céu límpido no período noturno)

Parâmetros utilizados para determinar o enquadramento das classes são apresentados na Tabela 2 (Beychok, 2005; Turner, 1994):

Tabela 2 - Classes de estabilidade de Pasquill relacionadas à velocidade superficial dos ventos e insolação

VELOCIDADE SUPERFICIAL DOS VENTOS	INSOLAÇÃO DIURNA ^a			COBERTURA NOTURNA DE NUVENS ^{b, c}	
	(m/s)	Forte	Moderada	Fraca	> 4/8 nuvens
< 2	A	A – B	B	-	-
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	C	B – C	D	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

a. Insolação:

Forte > 143 cal/m²/s , ou, fluxo ascendente de calor > 38 cal/m²/s

Moderada = $72 - 143 \text{ cal/m}^2/\text{s}$

Fraca $< 72 \text{ cal/ m}^2/\text{s}$, ou, fluxo ascendente de calor $< 18 \text{ cal/ m}^2/\text{s}$

- b. A classe D de neutralidade aplica-se ao céu fortemente nublado, durante o dia ou a noite.
- c. O período noturno está compreendido entre 1 hora antes do pôr do sol e 1 hora após o nascer do sol.

2.2.1 CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DAS PLUMAS

As plumas de poluentes gasosos e particulados emitidos por fontes contínuas assumem características, formatos e/ou perfis distintos na atmosfera em decorrência dos processos físicos não-uniformes e descontínuos (Moore, Milich & Liu, 1987).

Considerando que o espalhamento lateral de uma pluma ao longo do tempo é de difícil observação, a aparência vertical da pluma real é, contudo, de fácil observação. Isto permite expressar considerações acerca do estado da dinâmica térmica da baixa atmosfera.

As condições altamente instáveis, associadas à turbulência, podem causar meandros na pluma e eficiente mistura de ar promovendo a dispersão da concentração em uma larga coluna vertical da Camada Limite (~100 a 1.000 m). Mistura favorável geralmente ocorre em dias quentes quando a temperatura ao nível do solo é elevada pela incidência da radiação solar.

Em condições estáveis, a pluma é confinada em sua largura, particularmente na direção vertical. Nestas condições, o movimento turbulento ascendente de poluentes é praticamente não existente (Matthias, Comrie & Musil, 1996).

Para Slade (1968), pode-se classificar o comportamento das plumas em 6 tipos: *Fanning* (Leque), *Fumigation* (Fumigação) e *Trapping* (Aprisionado), *Looping* (Senoidal), *Coning* (Cone); *Lofting* (Lançamento Ascendente).

Segundo Moore, Milich & Liu, 1987, outros dois comportamentos podem ser considerados: *Bifurcation* (Bifurcação) e *Downwashing* (Depleção). A primeira ocorre próxima à chaminé, quando da presença de vórtices no sentido da direção predominante de ventos, fazendo com que a pluma sofra uma leve bifurcação para baixo. A segunda ocorre quando a pluma está sob efeito de zonas de baixa pressão formadas por edificações próximas à fonte.

No Apêndice A apresenta-se uma descrição detalhada sobre o comportamento de plumas industriais, exemplificado com imagens daquelas oriundas das fontes da UTPM.

2.3 MODELAGEM DA DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

A modelagem da dispersão atmosférica de poluentes é a ferramenta numérica que estabelece a relação causal entre emissões, concentrações atmosféricas, deposição e outros fatores, permitindo descrever, deterministicamente, o problema relacionado à qualidade do ar pela análise de fatores e causas (e.g. fontes de emissão, processos meteorológicos, transformações físico-químicas) e pelo estabelecimento de diretrizes para implementação de medidas mitigadoras (Zanetti, 2010).

A quantidade de material emitido na atmosfera é usualmente relacionada à taxa de liberação (e.g. massa/tempo) e a distribuição do material a favor da direção do vento é usualmente expressa em termos de concentração média ao longo do período (e.g. massa/volume).

O transporte de poluentes e subsequente diluição na atmosfera até atingir o nível superficial depende da (1) natureza físico-química do poluente e a diferença de sua densidade com a da atmosfera; (2) localização da fonte de emissão relativa à obstruções, usos do solo e à topografia no sentido do vento que carrega a pluma e (3) parâmetros meteorológicos que ocorrem em determinado período de tempo que promovem a deposição na superfície (Barlow, 2009; Godish, 1991).

Devido a estes parâmetros, a pluma assume geometrias qualitativamente distintas que vêm a definir os padrões de concentração do poluente ao nível do solo mediante diluição conforme se afasta da fonte emissora com o tempo (Moore, Milich & Liu, 1987).

Uma pluma emitida continuamente por uma fonte fixa industrial pode ser idealizada como sendo o lançamento sequenciado de um número infinito de lufadas (do termo inglês *Puff*) com um pequeno intervalo de tempo entre cada lançamento. Uma vez que esta pluma expande lateralmente e verticalmente na direção a favor do vento, se distanciando da fonte em determinado período de tempo, a concentração no centro da pluma tende a diminuir continuamente com a distância, sendo dependente

da estabilidade atmosférica ou, em escala de equivalência, da magnitude da turbulência (Slade, 1968).

Em condições atmosféricas instáveis, a dispersão vertical de poluentes será excelente, pois o gradiente vertical de temperatura é super-adiabático. Em condições atmosféricas neutras, boa dispersão de poluentes será atingida. Em condições atmosféricas isotérmicas, a estabilidade tende a ocorrer provocando moderada ou limitada dispersão de poluentes. Em condições atmosféricas de inversão, a estabilidade é plena e, portanto, o potencial de dispersão de poluentes é muito limitado (Matthias, Comrie & Musil, 1996).

Uma representação correta da abordagem matemática do fenômeno poluição do ar e sua interação no meio requer um conjunto de equações que se interligam, conforme representação esquemática da Figura 3 (Zanetti, 2010). A situação é ainda mais complexa pois a figura não representa explicitamente o conjunto de equações que representem as interações químicas que ocorrem entre os poluentes e o meio.

longo de muitos passos amostrais até que este seja diluído ou que tenha viajado por todo o domínio amostral (Thé, 2010).

Os avanços no conhecimento científico e no poder computacional aprimoraram consideravelmente o nível de compreensão fundamental que é incorporado no tipo de modelos baseados em processos, ou mecanicistas, que são amplamente utilizados na modelagem de grandes sistemas ambientais (Castelletti et al., 2012).

A modelagem atmosférica envolve procedimentos complexos e a necessidade de implementação de variados dados de entrada. A extensão destes dados e o escopo de análise é completamente dependente do tipo de modelo utilizado. Portanto, existem dois níveis de sofisticação para os modelos (Thé, 2010):

- a) Modelos de Varredura: estimativa simples da qualidade do ar;
- b) Modelos Refinados: requer dados de entrada mais precisos e detalhados e, por conseguinte, estimativa mais especializada da concentração.

2.3.1 CALPUFF DISPERSION MODEL

O sistema computacional do modelo de dispersão atmosférica CALPUFF foi desenvolvido seguindo as especificações (Scire, Strimaitis & Yamartino, 2000):

- a) Tratamento de fontes fixas de emissão não estacionárias de origem pontual, por área e por volume;
- b) Modelagem de domínios contidos em dezenas de metros à centenas de quilômetros a partir da fonte de emissão;
- c) Predições médias para escalas de tempo que variam entre uma hora a um ano;
- d) Aplicabilidade à poluentes inertes e aqueles sujeitos à remoção linear e por mecanismos de conversão química;
- e) Aplicabilidade para situações em terrenos acidentados ou complexos;

Os pacotes computacionais desenvolvidos para atendimento às especificações conceituais, bem como a integração futura a outros módulos foram:

- a) Modelos para geração de campos de vento para diagnóstico e prognóstico;
- b) Modelo de dispersão de *puff* Gaussiano com remoção química deposição seca e úmida, algoritmos para terrenos complexos, depleção de pluma provocado por edificações, fumigação de pluma, e outros efeitos;

- c) Programas de pós-processamento para apresentação dos dados dos campos meteorológicos, concentrações e fluxos de deposição de poluentes;
- d) Integração à modelo fotoquímico para contemplar reagentes reativos e não reativos;
- e) Integração à modelo Lagrangeano de Partículas;
- f) Integração à modelos meteorológicos de meso-escala;

O sistema do modelo CALPUFF é integrado a vários componentes (Scire, Strimaitis & Yamartino, 2000; Thé, 2010; USEPA, 1998 b):

- a) CALMET: pre-processador meteorológico que utiliza dados de superfície, localizados no sítio em estudo e de camada superior da atmosfera para criar um campo de ventos tridimensional e derivar parâmetros de camada limite baseados em dados de uso do solo na malha amostral;
 - b) CALPUFF: sendo um modelo de estado não estacionário de *puff* Lagrangeano Gaussiano, contendo módulos de multi-camadas e multi-espécies, capaz de simular os efeitos das condições meteorológicas que variam no tempo e no espaço e governam o transporte, a transformação e a remoção de poluentes na atmosfera. Contém algoritmos para simulação de efeitos que ocorrem próximos à fonte, tais como depleção da pluma por zonas de baixa pressão próximas à edificações, elevação transiente da pluma, penetração parcial da pluma em camadas de inversão, interações com o terreno em escala reduzida da malha amostral; bem como efeitos de longa escala como os de sumidouro por transformação química de poluentes, deposições úmidas e secas, cisalhamento vertical por ação dos ventos e transporte sobre corpos d'água e interações costeiras. Pode acomodar taxas variáveis de emissões arbitrariamente determinadas para fontes fixas e por área. Muitos dos algoritmos contém a opção de tratar os efeitos físicos em diferentes níveis de detalhes dependendo da aplicação do modelo;
 - c) CALPOST: pós-processador que recepciona as estimativas horárias do CALPUFF e gera n-horas de estimativas, bem como tabelas de valores máximos.
- Associados a cada componente estão os pré e pós processadores que facilitam a interface com outros modelos.

De maneira simplificada, os dados de entrada dos modelos são apresentados no Apêndice C (Scire, Strimaitis & Yamartino, 2000).

Nos termos do documento intitulado “*Federal Register/ Vol. 68, No. 72, 2003,*” a USEPA declara adoção do modelo CALPUFF em seu guia de modelos da qualidade do ar para as seguintes aplicações:

- a) Modelo preferencial para avaliação do transporte em larga escala de poluentes e seus impactos em áreas do tipo classe I;
- b) Modelo refinado para uso em análises de atendimento aos padrões de qualidade do ar e prevenção da significativa deterioração para SO₂ e Material Particulado em situações que o transporte seja maior que 50 km a partir da fonte; em análises envolvendo a mistura em ambos receptores com distâncias de curta e longa escalas; em casos onde as condições dos fluxos meteorológicos são complexos.

Já o grupo de trabalho em modelagem da qualidade do ar, formado por representantes de diversas agências dos Estados Unidos da América, publicou em seu relatório “*Interagency Workgroup On Air Quality Modeling (IWAQM) Phase 2 Summary Report And Recommendations For Modeling Long Range Transport Impacts*” a recomendação para utilização do CALPUFF nas seguintes aplicações:

- a) Condução de análises refinadas da Prevenção da Significativa Deterioração por incremento de consumo;
- b) Análise do impacto em Padrões Nacionais da Qualidade do Ar e impactos em Padrões de Valores Relacionados à Qualidade do Ar em área do tipo Classe I (ambientes protegidos);
- c) Técnicas de varredura para modelagem de impactos em piores cenários de transporte em distâncias de longa escala.

Em suma, para Thé (2010), a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos da América aprova a utilização do CALPUFF para análise de prognóstico ou diagnóstico nas seguintes aplicações (Thé, 2010):

- a) Efeitos na visibilidade provocados por plumas distantes e de fontes diversas;
- b) Determinação dos fluxos de deposição seca e úmida;
- c) Prevenção da Significativa Deterioração dado o incremento de consumo;

- d) Impactos em Padrões Nacionais de Qualidade do Ar e impactos em Padrões de Valores Relacionados à Qualidade do Ar em área do tipo Classe I (ambientes protegidos);
- e) Análises de varredura inicial;
- f) Modelagem do pior cenário de impactos em distâncias de transporte de larga escala (> 50 km);
- g) Impactos em campo próximo que envolvam terrenos complexos; condições de estagnação, inversão, recirculação e fumigação; transporte sobre a água e condições costeiras; condições de calmarias e de baixa velocidade dos ventos;
- h) Identificação de poluentes críticos, inclusive para elaboração de Planos Estaduais de Controle da Qualidade do Ar;
- i) Formação de poluentes secundários e modelagem de material particulado;
- j) Fontes de áreas turbulentas (e.g. incêndios florestais) ou fontes lineares (e.g. indústrias de redução de alumínio).

2.3.2 TESTE DE SENSIBILIDADE E PERFORMANCE DE MODELOS

A abordagem estatística para determinar se o modelo apresenta boa performance em simular um cenário de dispersão de poluente e consequente qualidade do ar envolve duas etapas (USEPA, 1992):

- a) Teste de varredura para eliminar modelos que falham na performance à um mínimo nível operacional. Estudos de avaliação de performance de modelos sugerem que o fator de dois é uma meta razoável a ser atingido pelo modelo para que este possa ser utilizado para fins regulatórios de análises refinadas;
- b) Aplicado àqueles modelos que passam pelo teste de varredura. Baseado em intensa varredura computacional utilizando técnica de reamostragem conhecida como “*bootstrapping*” que gera uma distribuição de probabilidades de dados com adequados resultados.

O teste de varredura mais utilizado é o denominado Fracional Bias (FB), ou Tendência Fracionada (da expressão em inglês *Fractional Bias*):

$$FB = 2 \cdot \left[\frac{OB - PR}{OB + PR} \right] \quad (\text{eq.1})$$

Onde:

OB = média dos 25 valores observados por medições;

PR = média dos 25 valores preditivos pelo modelo.

Uma outra forma comumente utilizada para a expressão acima:

$$FB = \frac{\left(\bar{C}_o - \bar{C}_p \right)}{0,5 \cdot \left(\bar{C}_o + \bar{C}_p \right)} \quad (\text{eq.2})$$

Onde:

C_o = média dos valores observados por medições;

C_p = média dos valores preditivos pelo modelo.

A mesma expressão pode ser utilizada para determinar o *Fractional Bias* do Desvio Padrão, sendo portanto o OB o desvio padrão dos 25 maiores valores observados e PR refere-se ao desvio padrão dos 25 maiores valores preditivos pelo modelo.

O Fracional Bias é simétrico e possui limites. Outra vantagem importante se dá ao fato de ser adimensional e, portanto, é conveniente para se comparar os resultados de estudos envolvendo diferentes níveis de concentração ou até poluentes diferentes.

Para interpretação mais coerente do FB, deve-se plotar em gráfico a relação de FB do desvio padrão (eixo y) e do FB da média (eixo x). Os valores estão contidos entre - 2,0 (extremamente superdimensionado) e + 2,0 (extremamente subdimensionado). Valores iguais à -0,67 são equivalentes à superdimensionados por um fator de dois, enquanto valores que são iguais à +0,67 são subestimados por um fator de dois. Se valores tendem à exceder o módulo de 0,67, deve-se reavaliar a utilização do modelo. O modelo perfeito deve ter FB = 0,0.

A Média Geométrica Bias (MG), ou Média Geométrica da Tendência (da expressão em inglês *Geometric Mean Bias*), também é linear, baseada em escala logarítmica, e reflete o grau de tendência geométrica ao invés da aritmética. Um modelo perfeito resulta em MG = 1,0, enquanto MG = 0,25 ou MG = 4 indica fator de quatro para superestimar ou subestimar a média, respectivamente; 0,5 e 2,0 indicam fator de dois para superestimar ou subestimar a média, respectivamente (Ghannam & El-Fadel, 2013, Rodd, 2014):

$$MG = \exp\left(\ln \bar{C}_o - \ln \bar{C}_p\right) \quad (\text{eq.3})$$

Tanto o FB como o MG são medidas de tendência média e indicam somente erros sistemáticos da taxação entre C_p e C_o e por isso sempre indicam superdimensionamento ou subdimensionamento, ou, superestimação ou subestimação (Patryl & Galeriu, 2011).

Erros aleatórios são devido às flutuações imprevisíveis e, portanto, não há valores esperados, pois os mesmos são espalhados relativamente no entorno da distribuição da concentração, tendendo à média aritmética nula quando a medição é repetida.

O Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE) mede o espalhamento relativo da distribuição de concentração:

$$NMSE = \frac{\overline{(C_o - C_p)^2}}{\left(\bar{C}_o \cdot \bar{C}_p\right)} \quad (\text{eq.4})$$

Assim, se as médias observacionais e preditivas são iguais, $NMSE = 0$ indicará que é igual à média.

A Variância Geométrica (VG) é dada por:

$$VG = \exp\left[\left(\overline{\ln C_o - \ln C_p}\right)^2\right] \quad (\text{eq.5})$$

NMSE e VG são medidas de espalhamento e refletem ambos os erros sistemáticos e não sistemáticos (aleatórios). Quão maior de 1,0 o NMSE se tornar, pode ser inferido que a distribuição não é normal - e.g. muitos valores baixos e poucos valores altos (Ghannam & El-Fadel, 2013). Um valor de VG de 1,6 indica quase fator de 2 de diferença entre pares de dados preditivos e observados.

Para Rodd (2014), os métodos FB e NMSE são apropriados quando a típica diferença entre as observações e os preditivos são aproximados ao fator de dois e a série de dados é pequena. Este não é o caso para quando as taxas dos dados preditivos e observados geralmente variam entre 0,01 a 100 e quando no conjunto de dados as concentrações variem entre 0 e $\sim 10.000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$. Nestes casos, uma medida log-

transformada da tendência do modelo e variância é mais apropriada por prover uma abordagem mais balanceada.

O Coeficiente de Correlação (R) reflete a relação linear entre duas variáveis. É intensivo para fatores aditivos ou multiplicativos. Um coeficiente de correlação perfeito é condição tão somente necessária, mas não suficiente, para um modelo perfeito.

$$R = \frac{\overline{(C_0 - \bar{C}_0)} \cdot \overline{(C_p - \bar{C}_p)}}{\sigma_{C_0} \cdot \sigma_{C_p}} \quad (\text{eq. 6})$$

Onde:

σ_{C_0} = desvio padrão da concentração observada;

σ_{C_p} = desvio padrão da concentração preditiva.

O Fator Preditivo contido em Fator de Dois (FAC2) é o método de medição mais robusto, porque não é excessivamente influenciado por resultados altos ou baixos. Portanto, reflete a porcentagem de concentrações preditivas que estão contidas em fatores de dois das observações (Ghannam & El-Fadel, 2013; Patryl & Galeriu, 2011):

$$\text{FAC2} = \text{fração de dados que satisfazem a expressão } 0,5 \leq C_p / C_0 \leq 2,0 \quad (\text{eq. 7})$$

Em resumo, as propriedades para medição de performance são (Chang & Hanna, 2004):

- a) Medições múltiplas de performance devem ser consideradas;
- b) Vantagens de cada medição de performance são parcialmente determinadas pela distribuição da variável;
- c) Para uma distribuição log-normal, MG e VG proveem um tratamento mais balanceado para valores extremamente altos e baixos;
- d) MG e VG podem ser mais apropriados para conjunto de dados que ambos dados de concentração preditivos e observados variam por muitas ordens de magnitude;
- e) Entretanto, MG e VG são fortemente influenciados por valores extremamente baixos e são indefinidos para valores zerados – é necessário impor um limite

mínimo para os dados, que pode ser o limite de detecção do método analítico (LD); neste caso, se C_p ou C_0 são inferiores ao LD, as concentrações são consideradas como o valor de LD;

- f) FB e NMSE são fortemente influenciados por ocorrências infrequentes de concentrações observadas ou preditivas;
- g) FAC2 é o método mais robusto, porque não é excessivamente influenciado por altos ou baixos resultados.

Para os autores, as interpretações devem ser dadas da seguinte forma:

- a) FB é simétrico e possui limites, cujos valores de tendência variam entre -2,0 (extremamente superestimado) à +2,0 (extremamente subestimado). Por ser um número adimensional, é conveniente para comparações entre resultados de estudos envolvendo diferentes níveis de concentração. Valores equivalentes à -0,67 indicam superestimativas por fator de dois; Valores equivalentes à +0,67 indicam subestimativas por fator de dois. Quando igual à zero, os dados preditivos do modelo são relativamente ausentes de tendência (bias);
- b) MG igual à +0,5 são equivalentes à dados preditivos superestimado por fator de dois; MG igual à +2,0 são equivalentes à dados preditivos subestimados por fator de dois;
- c) Valores de NMSE iguais à 0,5 corresponde à fator de tendência da média equivalente à dois. Não diferencia quando o fator é sub ou superestimado;
- d) Valores de VG iguais à 1,6 correspondem à fator de tendência da média equivalente à dois. Não diferencia quando o fator é sub ou superestimado.

Para Patryl & Galeriu, 2011, se os métodos estatísticos de teste de performance dos modelos acusarem os seguintes resultados, pode-se considerar que os modelos são aplicáveis:

- a) Se a fração de predição dentro do fator de dois das observações for cerca de 50% ou mais ($FAC2 > 0,5$);
- b) A tendência média estiver entre $\pm 30\%$ da média (módulo de $FB < 0,3$, ou, $0,7 < MG < 1,3$);
- c) Espalhamento aleatório estiver entre um fator de dois a três da média ($NMSE < 1,5$, ou, $VG < 4$);

Os seis métodos de performance descritos acima não são de qualquer forma exaustivos. Dependendo do propósito e da ênfase do estudo, outras medições podem ser definidas e facilmente incorporados em programas computacionais de *BOOT* (Chang & Hanna, 2004).

2.4 INDICADORES DE CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS

A poluição do ar afeta os humanos, sobretudo os sistemas respiratórios e pulmonar; a vegetação devido à absorção pelos estômatos das folhas ou pela deposição de poluentes sobre as folhas; propriedades e bens materiais, devido à erosão de superfícies externas de prédios, particularmente aqueles construídos com materiais cáusticos que reagem com ácido em precipitações (Godish, 1991).

Segundo Barnett (2008), índices de vulnerabilidade que são funções das alterações ambientais não devem ser considerados como significantes quando aplicados em sistemas de larga escala. Sendo assim, devem ser focados em escalas menores de análise.

2.4.1 FRAÇÃO DE INGESTÃO

O indicador denominado “Fração de Ingestão” (da expressão em inglês *Intake Fraction* - IF) considera a fonte emissora e representa o incremento integrado da absorção de um poluente emitido por uma fonte ou categoria (e.g. automóveis, usinas de geração termoelétrica ou refinarias) sobre todos os indivíduos expostos durante um determinado período de exposição, por unidade de poluente emitido (Bennett, 2002).

O FI depende de vários fatores, incluindo propriedades químicas do contaminante, localidade das emissões, condições ambientais, trajetórias de exposição, localização do receptor e atividades e características da população. Assim, o FI é uma propriedade extrínseca do poluente – o cenário de emissão e a condição de exposição são atributos essenciais e devem ser reportados.

A maioria das avaliações acerca da exposição humana é baseada na consideração de que os níveis observados em estações de monitoramento da qualidade do ar são representativos para exposições da população.

Para cálculo da fração de ingestão (IF), utiliza-se equação cuja função é dependente das variáveis de densidade populacional (P); concentração do poluente no

ambiente (C), decorrente das simulações dos modelos matemáticos ou medições em estações de monitoramento; taxa de respiração (BR), adotada como sendo 20 m³/d; e a taxa de emissão da fonte poluidora (Q):

$$FI = \frac{C \cdot BR \cdot P \cdot 365}{Q} \quad (\text{eq. 8})$$

Onde:

C = concentração ambiente (g/m³);

BR = taxa de respiração = 20 m³/d;

P = População na área de estudo;

365 d/ano;

Q = Taxa de emissão (g/ano).

2.4.2 ÍNDICE DE PRESSÃO AMBIENTAL

O propósito de caracterização de indicadores para avaliação de impactos ambientais é o de estimar a contribuição potencial de diferentes intervenções (emissões, extração de recursos e uso do solo) para diferentes categorias e de somar a quantidade de intervenções em único número dentro de cada categoria de impacto (Seppälä, 2003).

De acordo com a ISO 14.042 (2000), a caracterização deve ser baseada em análises científicas de processos ambientais relevantes e para este propósito os resultados de caracterização devem ser considerados como dados para um quadro de análise de decisões.

Adequando o modelo de indicadores proposto por Seppälä (2003), Santos (2011) propôs o Índice de Pressão Ambiental (IPA) como uma ferramenta para avaliação do desempenho ambiental de processos industriais. A estrutura de cálculo do impacto ambiental leva em consideração os elementos impactantes ($X_{i,j}$) e as categorias de impacto (C_i). As equações a seguir exemplificam o modelo proposto:

$$V_i = \sum X_{i,j} \cdot K_{i,j} \quad (\text{eq. 9})$$

Onde:

V_i = valor normalizado do impacto ambiental da categoria C_i ;

$X_{i,j}$ = elemento impactante;

$K_{i,j}$ = fator de equivalência do elemento impactante $X_{i,j}$ na categoria impacto ambiental C_i .

O impacto ambiental total, representado pelo IPA, é calculado de acordo com a equação que segue:

$$IPA = \sum W_i \cdot V_i \quad (\text{eq. 10})$$

Onde:

IPA = Índice de Pressão Ambiental;

W_i = peso da categoria de impacto ambiental C_{ii} ;

V_i = valor normalizado do impacto ambiental da categoria C_{ii} .

Para efeitos de aplicação neste trabalho, propõe-se a seguinte configuração para as variáveis:

$X_{i,j}$ = índice de saturação da bacia atmosférica (j) em termos do padrão secundário regulamentado para a média anual de concentração do poluente estudado (i);

$K_{i,j}$ = raio máximo de influência do índice de saturação da bacia atmosférica (j) em termos do padrão secundário regulamentado para a média anual de concentração do poluente estudado (i);

W_i = padrão secundário regulamentado para a média anual de concentração do poluente estudado (i).

Portanto, o IPA desenvolvido neste trabalho reflete o somatório dos impactos que os três poluentes estudados (NO_2 , SO_2 e MP) exercem sobre uma área em termos do grau de saturação individual da média anual estabelecida como padrão regulatório. Por assim, o IPA pode ser calculado como:

$$EPI = \sum \left(\frac{\sum \text{padrões_regulatórios}}{\text{padrão_regulatório}_i} \right) \cdot \sum \left(\frac{x_i}{\text{padrão_regulatório}_i} \right) \cdot \text{raio} \quad (\text{eq.11})$$

A somatória de todos os valores de concentração de padrões regulatórios de SO_2 , MP e NO_2 é presumido a partir das definições estabelecidas na Resolução CONAMA nº 03/90 ao que diz respeito que o efeito adverso à saúde ambiental é semelhante uma vez atingida determinada concentração de um determinado poluente "i", representado como padrão regulatório.

Ao dividir o somatório das concentrações padrão, pela concentração do padrão do poluente “i” obtém-se o peso relativo em termos de significância ao nível de saturação da bacia atmosférica; o valor da concentração média modelada “ x_i ” dividido pelo seu padrão regulatório respectivo e então multiplicado pelo raio de influência da concentração média nos dá o impacto do poluente “i” no nível de saturação da bacia atmosférica.

2.5 REFERENCIAIS METODOLÓGICOS

Em regiões sob influência da poluição atmosférica provocada por centros industriais é esperado que plantas antigas emitam poluentes atmosféricos em maior quantidade do que plantas modernas: parte em função de regulamentos recentes onde o controle ambiental acerca da concentração dos poluentes emitidos para novas plantas é mandatório; parte em função da deterioração da eficiência energética/produtiva ou de eventuais dispositivos de controle ambiental instalados em plantas antigas.

Neste cenário, ter um completo entendimento do comportamento dos poluentes gasosos na região de inserção de tais centros é de relevante importância para subsídio às políticas públicas e planejamento setorial. Considerando, portanto, a aplicação de sistemas de modelagem como o CALPUFF para fins de conformidade regulatória quanto à degradação da qualidade do ar provocada por fontes fixas, móveis ou difusas, citam-se alguns dos relevantes trabalhos científicos produzidos com esta finalidade e que servem de referencial metodológico para a presente pesquisa.

No Rio de Janeiro/RJ a denominada Bacia Aérea III é aquela que concentra a maior quantidade de fontes fixas e móveis e que mais contribuem com a poluição atmosférica, sendo registradas rotineiras violações dos padrões de qualidade do ar nesta sub-região. Soares da Silva, et. al. (2014) avaliaram comparativamente o desempenho entre os modelos AERMOD e CALPUFF em simular a qualidade do ar da sub-região utilizando-se de dados de Inventários de Emissões por Fontes Fixas e Móveis; dados meteorológicos medidos em estações de superfície e de ar superior; modelo digital de elevação SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com resolução de 90 metros; dados de uso e ocupação do solo provenientes do GLCC (Global Land

Cover Characterization); em domínio de 50 x 50 km, com resolução de grade de 500 m e 12 níveis verticais. Não foram utilizados algoritmos de sumidouros nas simulações, ou efeitos de depleção de plumas. Os dados de simulação foram comparados à dados observacionais, realizando-se análises de desempenho dos modelos por índices estatísticos (COR, DFP, DF, FA2, EMQN), gráficos Q-Q plot e mapas de concentração.

Os autores concluíram que o “desempenho do CALPUFF sistematicamente superou o AERMOD para as análises desenvolvidas para as situações *near field* na Bacia Aérea III da RMRJ”. Enquanto os resultados das simulações com CALPUFF superestimaram as concentrações monitoradas, os resultados do AERMOD subestimaram estas concentrações, apresentando o CALPUFF, portanto, um padrão mais conservativo, característica esta recomendada a modelos regulatórios. Estas observações podem estar associadas à limitações do modelo AERMOD em considerar certas características meteorológicas, como períodos de calma.

Em área urbana, costeira, associada a terrenos planos e complexos contida entre 5 cidades no Líbano, Ghannam e El-Fadel (2013) utilizaram o modelo não estacionário CALPUFF acoplado aos dados de saída do modelo meteorológico de mesoescala MM5 para avaliar o atendimento aos padrões de qualidade do ar, em um campo próximo de dispersão, considerando como fontes os complexos industriais, as rodovias e as atividades minerárias, usando como fatores de emissão aqueles recomendados pela USEPA e pela Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA). Os resultados das simulações foram comparados aos dados de monitoramento em superfície.

O domínio meteorológico utilizado foi de 50 x 50 km com resolução de malha de 0,5 km. Parâmetros padronizados foram tanto utilizados no CALMET para desenvolvimento do campo de ventos, assim como no CALPUFF para efeitos de sumidouro e transporte de material. Diversos cenários foram simulados de modo a se obter quais fatores de emissão seriam mais representativos no modelo para os quais as respostas das simulações pudessem ser comparados com os dados observacionais de qualidade do ar mediante uma análise de performance utilizando-se os métodos FB, MG, NMSE, e FAC2.

Concluem que os resultados das simulações do CALPUFF demonstram aceitação na habilidade de prever a extremidade superior das concentrações

observadas e reproduzir medições de campo em diversas localidades. Análises estatísticas demonstraram que os cenários de pior caso ocorrem quando as fontes emitem com baixa eficiência nos equipamentos de controle e baixa qualidade do combustível.

Na região do delta do Rio Pérola (PRDR) da Região Administrativa Especial de Hong Kong (HKSAR), onde fontes de grande porte contribuem com significativa emissão de SO₂ (Usinas de Geração de Energia, Embarcações Marítimas e Veículos), a degradação da qualidade do ar foi avaliada utilizando-se resultados de simulações do acoplamento de dados meteorológicos de meso-escala (MM5) no sistema computacional CALMET/CALPUFF comparados a dados de monitoramento de 11 estações de qualidade do ar localizadas em zonas urbanas e rurais distribuídas em terrenos complexos (Yim, Fung & Lau, 2010).

O domínio meteorológico de mesoescala foi dividido em três, sendo o maior formatado em 115 x 119 pontos de malha com resolução horizontal de 40,5 km e o menor (próximo à região de estudo) com 85 x 55 pontos de malha com resolução horizontal de 4,5 km. Os dados do MM5 são processados no CALMET como suposição inicial do campo de ventos para simulação da resolução mais refinada sobre a PRDR. O CALMET foi configurado com resolução horizontal de 500 m e 10 camadas verticais entre 30 e 2.600 m. Campos de ventos horários estendendo entre 4 meses de 2005 foram utilizados na modelagem de dispersão do CALPUFF. Para as 22 fontes simuladas foi utilizado inventário oficial para caracterização. Especificamente na PRDR, 72,3% das emissões de SO₂ são oriundas de usinas de geração de energia. No modelo, o poluente foi considerado inerte, dado o transporte em pequena escala.

Os resultados das simulações permitiram avaliar quais são as fontes que promovem maior degradação aos índices de qualidade do ar em determinados períodos do ano, comparando-se aos dados de monitoramento. Concluem que a contribuição das embarcações marítimas são significantes nos períodos de inverno e verão, provavelmente pela baixa altura de emissão e consequente deposição das plumas, ou puffs, próximo às fontes emissoras e na área urbana de HKSAR, afetando diretamente a população local. As fontes termoelétricas contribuíram em maior escala no início do verão, sendo os resultados importantes para se concluir que o impacto das

fontes fixas se dá em função da localidade e ventos predominantes incidentes no período de análise.

Na região metropolitana de Ulsan, Coréia do Sul, avaliou-se a influência de dois complexos industriais sobre o risco à deterioração da saúde populacional de áreas residenciais próximas. Lee et. al. (2014) utilizaram o sistema de modelagem CALPUFF acoplando dados de modelos meteorológicos de mesoescala WRF (Weather Research and Forecasting-Californian PUFF), simulando as concentrações de PM_{10} e SO_2 , além de estatisticamente promover a comparação entre os resultados simulados e as concentrações medidas localmente para o ano de 2012.

Dados meteorológicos de nove estações superficiais e do WRF foram utilizados nas simulações do CALMET, com domínio de 90 km x 90 km em células de 1 km. Oito camadas verticais foram consideradas, entre 20 m a 2.000 m. Considerou-se que a remoção seca e úmida se comporta como partículas e o algoritmo MESOPUFF II foi utilizado para computo da deposição seca mas não para transformações químicas. Os métodos estatísticos de avaliação do modelo foram o IOA, FB, NMSE e R.

Da aplicação das métricas estatísticas para avaliação da performance dos modelo, indica-se que o CALMET apresenta suficiente confiabilidade em prever as simulações do CALPUFF cujos campos de concentração demonstraram boa concordância com as concentrações observadas, sendo o poluente SO_2 aquele que demonstra melhor concordância. As concentrações máximas estiveram localizadas próximas às fontes. De maneira geral os autores concordam que o estudo pode ser considerado por autoridades regulatórias para tomada de decisão quanto à limites de emissão sazonais dependentes de condições meteorológicas.

Na costa leste do Golfo do México, na cidade de Tuxupan, o estudo conduzido por López et. al. (2004) avaliou o potencial impacto na qualidade do ar local provocado por uma central termoelétrica utilizando-se o modelo de *puff* Lagrangeano CALPUFF.

Foi considerado um domínio de modelagem de 120 km x 120 km, com resolução de 2,0 km por célula de grade. A área compreende aproximadamente 791.000 habitantes, incluindo população urbana e rural. As emissões atmosféricas de SO_2 , NO_x e PM_{10} foram apresentadas em base anual de 2001, utilizando-se dados de consumo de óleo combustível multiplicados a fatores de emissão estabelecidos em documentos de referência. Os dados meteorológicos de superfície foram submetidos à

análise de agrupamento (*cluster*) para determinação de grupos representativos, selecionando-se três semanas específicas para simulação da dispersão dos poluentes primários pelo CALPUFF. Acoplado a estes dados optou-se pelo uso de dados meteorológicos de mesoescala simulados computacionalmente (MM5). Para simulação de poluentes secundários, utilizou-se o algoritmo MESOPUFF II para as transformações químicas, além de parametrizações padronizadas pelo modelo para deposições úmidas e secas e concentrações ambientes de fundo para Amônia e Ozônio.

As simulações do modelo permitiram identificar um incremento da concentração média ponderada anual na população em $0,65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para PM_{10} primário, $1,45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para Sulfato de Amônia, $0,14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para Ácido Nítrico e $0,11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para Nitrato de Amônia. Algumas plumas ultrapassam os limites do domínio e as maiores concentrações foram identificadas dentro do raio de 20 km próximo à fonte emissora. As concentrações de sulfato aparentam ser de maior impacto em termos de concentração e cobertura espacial.

No trabalho de referência realizado por Levy et. al. (2002), utilizou-se o sistema de modelagem CALPUFF acoplado a dados meteorológicos providos pela NOAA (superficial e ar superior) para se investigar a contribuição das emissões atmosféricas de material particulado de nove centrais termoelétricas (vinte e quatro unidades geradoras) na concentração ambiente com uma razoável acuracidade ao longo de grandes distâncias no Estado de Illinois (EUA). Adicionalmente, utilizando-se funções lineares de resposta a doses, foi estabelecido o peso ponderado de concentração anual para as quais a população está sujeita.

O domínio de análise foi de aproximadamente 750 x 750 km, selecionando-se as principais fontes termoelétricas a carvão próximas ou a montante da cidade de Chicago. Além dos dados meteorológicos medidos, dados do modelo de mesoescala MM5 foram acoplados dentro do domínio, em células de 15 km e 14 camadas verticais, com escala até 5.100 m, com espaçamentos de 20 m próximo à superfície até 600 m próximo ao topo do domínio. No CALMET foram incorporadas apenas 8 camadas com altura até 4.500 m.

Foram desenvolvidos cenários com o propósito de refletir as atuais condições de emissão, sendo coletados dados de relatórios de monitoramento contínuo das emissões atmosféricas combinados com: dados de taxas de energia das unidades (do

termo em inglês *Heat Rate*); taxas de relação de $MP_{10}/MP_{2,5}$ em função das configurações das unidades e respectivos sistemas de controle ambiental; MP condensável a partir de fatores de emissão do USEPA AP-42 (1972 e revisões); e conteúdo de enxofre presente nos combustíveis. Todas as emissões foram assumidas como sendo uniformes ao longo do ano (1999 – 2000), dada a limitação de dados, apesar de ser reportado que durante o verão todas as usinas tendem à gerar mais energia. Em geral as fontes têm potência nominal entre 240 a 360 MW, porém algumas com muito menos potência (mínima de 75 MW) e outras com potências elevadas (máxima de 892,8 MW). Apenas duas fontes detêm altura de chaminé abaixo de 100 m. As taxas de emissão são variadas, recomendando-se a leitura das Tabelas 1 e 2 do trabalho.

No CALPUFF utilizou-se, no geral, as configurações padrão do modelo para os parâmetros de modelagem conforme recomendado pela USEPA. Foi realizada análise de sensibilidade para aqueles parâmetros que pudessem influenciar potencialmente os resultados. Efeitos de sumidouro foram utilizados considerando dados medidos de precipitação e de Ozônio. Os dados de concentração de fundo para amônia foram aqueles padronizados pelo CALPUFF. Não foram incorporados dados de depleção da pluma por efeitos de edificações. Para representação dos resultados no CALPOST, foram selecionados 8.237 receptores discretos contidos nos raios do censo demográfico.

Uma análise de sensibilidade paramétrica foi realizada focando-se principalmente naqueles elementos de incerteza que são quantitativos (e.g, incorporação de deposição seca e úmida; escolha do mecanismo químico de transformação; concentrações de fundo para os poluentes; tamanho da região dos receptores) e outros que são qualitativos (incertezas nos dados meteorológicos).

Os resultados das análises mudam em pequena escala quando são omitidos os algoritmos de deposição. O uso do algoritmo RIVAD/ARM3 em comparação ao MESOPUFF II na transformação química teve pequeno efeito no material particulado primário ou secundários de sulfato, porém aumenta os impactos de nitratos em 70% e assim aumentam os impactos totais. A utilização de concentração de fundo de Amônia em 1,0 ppb em comparação à 10,0 ppb afetou a produção secundária de nitrato, reduzindo seus impactos. Quanto ao tamanho do domínio, os autores consideram que

em estudos com traçadores a resposta do CALPUFF entre 50 a 200 km é razoavelmente não tendencioso (do termo em inglês *unbiased*), mas tende a superestimar concentrações para distâncias maiores por um fator de 2, o que reduziria o impacto nestas regiões.

Das análises, concluí-se que o incremento na população da concentração de $MP_{2,5}$ na média ponderada anual foi de $0,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, com incrementos máximos próximo às fontes, atingindo valores de até $0,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, com a maioria dos impactos relacionados à formação secundária de particulados. A análise de sensibilidade paramétrica das estimativas demonstrou robustez - incertezas do modelo de dispersão não podem ser mais influentes na estimativa de benefícios à saúde, embora subsequentes investigações sejam necessárias para se determinar a magnitude das incertezas associadas ao CALPUFF. Por fim, os autores concluem que a magnitude do incremento de concentração é potencialmente significativa e ilustra que modelos acurados de dispersão em larga escala podem prover informação significantes e de relevância política para a comunidade regulatória.

É fato que estudos epidemiológicos demonstraram significativa associação entre a exposição ambiental à MP temporários e duradouros (das expressões em inglês *short-term* e *long-term*) e o aumento da mortalidade (e.g. falência devido à doenças no coração e gargantas) e risco de morbidade (e.g. doenças cardiovasculares, pneumonia, doenças de obstrução pulmonar crônica). A formação de MP finos também está associada à presença de altas concentrações de SO_2 e NO_x , que são significantes poluentes emitidos por fontes de geração termoelétrica (Zhou, et. al., 2003).

O estudo desenvolvido em um domínio influenciado por unidade termoelétrica de 200 MW à carvão localizada em Pequim, China, teve dois objetivos. Inicialmente demonstrar como a fração de ingestão (da expressão em inglês *intake fraction*) dada a emissão de uma unidade de geração termoelétrica pode ser calculada utilizando-se modelo detalhado de transporte de poluentes em larga escala (CALPUFF); Secundariamente, testar como a sensibilidade dos resultados são em função dos conceitos chaves assumidos no modelo e comparar os resultados às estimativas de trabalhos científicos desenvolvidos com a mesma metodologia nos Estados Unidos.

O domínio da modelagem foi dividido em 120 x 120 células de 28 km de espaçamento, representando uma área de 3.360 km x 3.360 km. As simulações foram realizadas para o ano de 1995.

Foram utilizados dados meteorológicos de modelos de mesoescala (MM5) em domínio de 90 x 75 células de 60 km e modelo de física completa incorporando dados observacionais (FDDA – *Four Dimensional Data Assimilation*). Foram utilizadas 23 camadas verticais para geração de dados no modelo meteorológico. Em adição aos dados modelados, foram incluídos no CALMET dados de 22 estações superficiais, 3 estações de ar superior e 55 estações de precipitação. Parâmetros padronizados pelo CALMET foram utilizados para interpolar as taxas de deposição úmida. No CALMET apenas 10 camadas verticais foram utilizadas, entre 20 e 3.000 m.

Seis espécies foram modeladas no CALPUFF (SO_2 , SO_4 , NO_x , HNO_3 , NO_3 e $\text{MP}_{2,5}$) e o algoritmo MESOPUFF II foi utilizado para simular as transformações químicas. Concentrações ambientes de fundo para Amônia e Ozônio, que influenciam na taxa de transformação de poluentes primários, foram consideradas como as padronizadas pelo modelo em todo o domínio. Para deposição seca e úmida de gases e MP também optou-se por utilizar os parâmetros padronizados pelo modelo. Parâmetros de elevação da pluma também foram considerados no modelo.

Os resultados indicam que em todas as quatro estações a IF de MP primário foi a maior (ordem de 10^{-5}), enquanto a IF de SO_2 foi a segunda maior (ordem de 10^{-6}). As IFs para todos os poluentes são maiores em meses frios, provavelmente devido às condições meteorológicas e baixas precipitações. Os dados também demonstram que quanto maiores são as IFs quanto maior é a distância da fonte. A análise de sensibilidade demonstrou que as taxas de emissão têm uma influência negligenciável nas IFs; a concentração ambiente de fundo para o Ozônio tem um moderado impacto na IF de SO_4 e NO_3 e um sutil impacto na de SO_2 , enquanto a concentração ambiente de fundo de Amônia tem uma importante influência na IF do NO_3 . Outros parâmetros meteorológicos e de densidade populacional também têm provável impacto nas estimativas das frações de ingestão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de impacto na qualidade do ar na região de Candiota/RS e as consequências socioambientais devido à exposição da população residente nos núcleos urbanos da região em estudo e a saturação da bacia atmosférica em decorrência das emissões poluentes gasosos e particulados de fontes termoelétricas foi desenvolvido em 4 etapas, descritas sumariamente a seguir:

1. Levantamento de dados geoespacializados disponíveis em estudos colaterais (trabalhos científicos e de licenciamento ambiental de empreendimentos termoelétricos) e banco de dados oficiais para caracterização de receptores de interesse, considerando os núcleos urbanos e suas densidades populacionais, áreas de relevante interesse ambiental e dados ambientais gerados por modelos matemáticos e monitoramentos *in situ*.
2. Levantamento de dados de monitoramento da qualidade do ar e emissões atmosféricas, reportados ao licenciamento ambiental de empreendimentos termoelétricos da região;
3. Aplicação do modelo de dispersão CALPUFF para geração de Isolinhas de Concentração de Poluentes Atmosféricos ao Nível do Solo:
 - a. Delimitação de Área de Estudo e aquisição de dados classificados de uso e ocupação do solo e modelo digital de elevação para a etapa de processamento preliminar do terreno;
 - b. Aquisição de dados observacionais de monitoramento de parâmetros meteorológicos em superfície e dados de modelos meteorológicos de mesoescala para a etapa de processamento preliminar da meteorologia;
 - c. Configuração do módulo CALMET para processamento de dados preliminares de terreno e meteorologia, construindo a malha meteorológica e gerando os campos de ventos a serem utilizadas no módulo CALPUFF;
 - d. Caracterização no módulo CALPUFF das edificações que influenciam nos efeitos de depleção de plumas próximo às fontes;
 - e. Caracterização no módulo CALPUFF das fontes de emissão de poluentes atmosféricos;
 - f. Caracterização no módulo CALPUFF dos receptores discretos;

- g. Configuração do módulo CALPUFF que processa dados gerados pelo módulo CALMET e dados de caracterização de edificações, fontes emissoras e receptoras, calculando a concentração de poluentes atmosféricos ao nível do solo;
 - h. Configuração do módulo CALPOST para geração gráfica das isolinhas de concentração em médias de tempo e ranqueamento das máximas concentrações identificadas ao nível do solo.
4. Geração de cartas de isolinhas de concentração de poluentes ao nível do solo a partir das respostas do módulo CALPUFF, identificando os receptores de interesse para cálculo da fração de ingestão e cálculo do índice de pressão ambiental das máximas concentrações ambientais por área impactada.

3.1 ESTUDOS COLATERAIS E BANCOS DE DADOS GEOESPACIALIZADOS

A pesquisa foi conduzida em três etapas:

1. Levantamento de dados geoespacializados em bancos de dados oficiais e institucionais, permitindo construir as bases do Sistema de Informações Geográficas (SIG) da região.
2. Inventário e análise de estudos científicos realizados na região cuja temática se assemelha à presente pesquisa, utilizando-se as plataformas eletrônicas Periódicos CAPES e Scielo (*Scientific Electronic Library Online*) e o arquivo técnico do Centro Nacional de Informações Ambientais do IBAMA (CNIA), possibilitando compilar dados de monitoramento e respostas de modelos matemáticos com a finalidade de serem identificados receptores discretos para comparação com as respostas das simulações realizadas nesta pesquisa;
3. Inventário e análise de estudos desenvolvidos no âmbito do licenciamento ambiental dos empreendimentos termoelétricos, com os mesmos objetivos de compilação de dados, identificação de receptores e comparação com as respostas das simulações realizadas nesta pesquisa;

3.1.1 DADOS GEOESPACIALIZADOS E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Para a estruturação do SIG da região optou-se pela utilização dos programas computacionais denominados QGIS, ver. 2.12 – Pisa, e GoogleEarth Pro, uma vez que

estes são programas livres e cujas plataformas podem ser utilizadas por usuários interessados nos resultados deste trabalho.

Foram consultados os seguintes bancos de dados de informações geoespaciais:

- Portal de Mapas – IBGE
<http://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#homepage> ;
- Catálogo de Metadados – IBGE
http://www.metadados.geo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/main.home ;
- I3Geo – MMA
<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/mma/openlayers.htm?vp69d96gi9djqvf0qaddq9fls6>
- Sistema Compartilhado de Informações Ambientais (SISCOM) – IBAMA
<http://siscom.ibama.gov.br/> ;
- Biblioteca Digital – FEPAM
http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp ;
- I3Geo – INCRA
<http://acervofundiario.incra.gov.br/i3geo/interface/incra.htm> ;
- Sistema de Informações Geográficas da Mineração (SIGMINE) – DNPM
<http://www.dnpm.gov.br/assuntos/ao-minerador/sigmine> ;
- Sistema de Informações Georreferenciadas do Setor Elétrico (SIGEL) – ANEEL
<http://sigel.aneel.gov.br/sigel.html> ;
- Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - Escala 1:50.000 – Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia – UFRGS
<https://www.ufrgs.br/labgeo/index.php/dados-espaciais/250-base-cartografica-vetorial-continua-do-rio-grande-do-sul-escala-1-50-000> ;
- DNITGeo – DNIT
<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/dnit-geo> ;
- USGS – United States Geological Survey
<https://eros.usgs.gov/elevation-products>

O sistema é disponibilizado em mídia digital anexo ao presente trabalho.

São apresentados a seguir alguns dos mapas desenvolvidos no SIG e que identificam os principais pontos de monitoramento ambiental da região. São também apresentados os núcleos urbanos e a projeção dos setores censitários avaliados na

etapa de simulação da exposição à poluentes atmosféricos.

A localização das Estações de Monitoramento Meteorológico é apresentada na Figura 4, resumidas na Tabela 3:



Figura 4 – Localização das Estações Meteorológicas

Tabela 3 – Localização de Estações Meteorológicas consideradas no estudo

Estação	Localização	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Distância da Fonte (km)
A811	Canguçu	31,4058 S	52,7011 O	464	~ 95
A812	Caçapava do Sul	30,5477 S	53,4675 O	450	~ 115
A827	Bagé	31,3478 S	54,0133 O	230	~ 35
A832	São Gabriel	30,3414 S	54,3108 O	126	~ 145
A836	Jaguarão	32,5542 S	53,3764 O	47	~ 115
A881	Dom Pedrito	30,9925 S	54,8153 O	170	~ 120

A localização das Estações de Monitoramento da qualidade do ar pertencentes às empresas licenciadas pelo IBAMA (ícones em azul) assim como aquelas utilizadas em estudos colaterais avaliados (ícones em vermelho) é apresentada na Figura 5, resumidas na Tabela 4:



Figura 5 – Estações de Qualidade do Ar

Tabela 4 - Localização de Estações de Qualidade do Ar consideradas no estudo

Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Distância da Fonte (km)
Aeroporto	31°29'42.83"S	53°41'38.02"O	237	~ 6,0
Candiota	31°32'35.77"S	53°42'55.88"O	266	~ 3,3
Três Lagoas	31°35'42.32"S	53°43'42.71"O	182	~ 6,9
Sul	31°32'1.05"S	53°47'41.65"O	208	~ 11,0
Pinheiro Machado	31°34'29.30"S	53°23'11.22"O	408	~ 28,2
Pedras Altas	31°43'43.25"S	53°35'45.36"O	354	~ 21,7
Aceguá	31°51'51.85"S	54° 9'43.73"O	210	~ 57,6
Bagé	31°17'21.96"S	54° 4'16.20"O	271	~47,3
FEP_8 de agosto	31°40'31.02"S	53°35'16.92"O	290	~ 16,3
FEP_Pedras Altas	31°43'4.83"S	53°33'42.45"O	384	~ 22,5
FEP_Bagé	31°19'46.23"S	54° 7'10.02"O	211	~ 48,4
FEP_Aceguá	31°52'52.02"S	54° 8'37.75"O	241	~ 57,4

Os núcleos urbanos avaliados como receptores são apresentados nas Figuras 6 a 15, resumidos na Tabela 5:

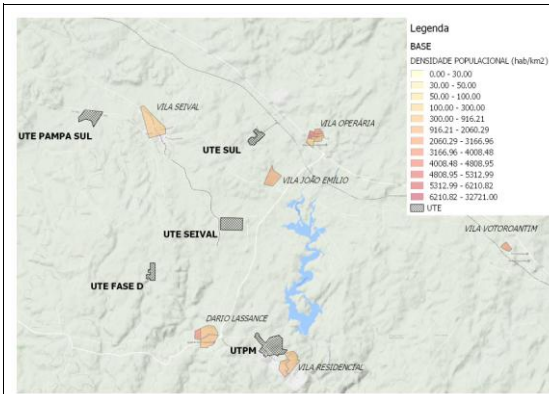


Figura 6 - Distribuição geográfica dos empreendimentos termelétricos e núcleos urbanos em Candiota/RS

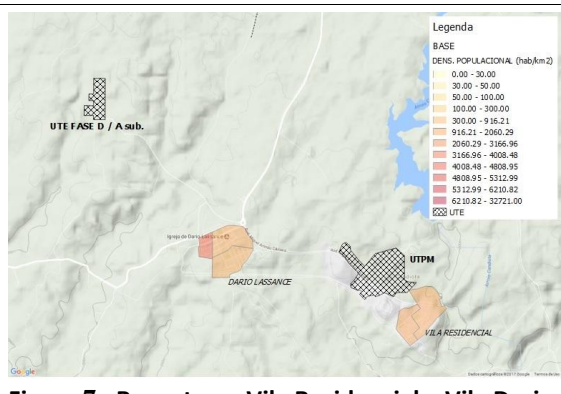


Figura 7 - Receptores Vila Residencial e Vila Dario Lassance

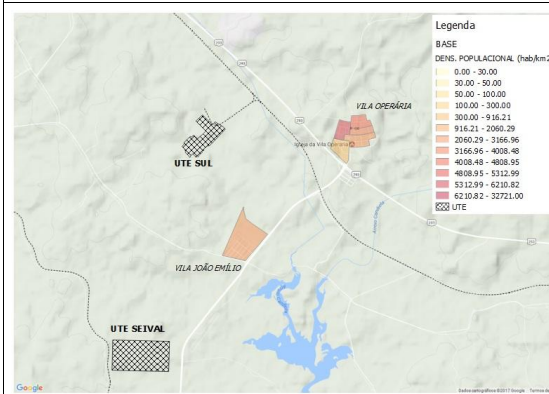


Figura 8 - Receptor Vila Operária e Vila João Emílio

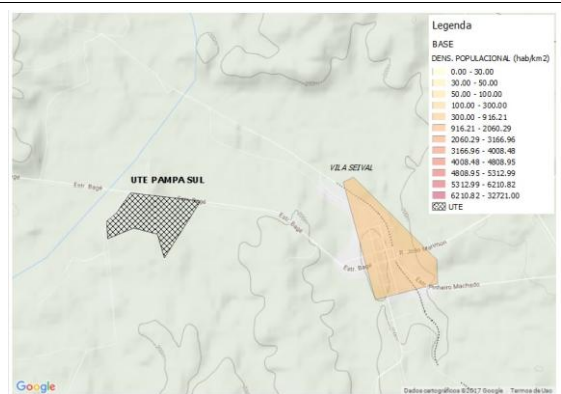


Figura 9 - Receptor Vila Seival

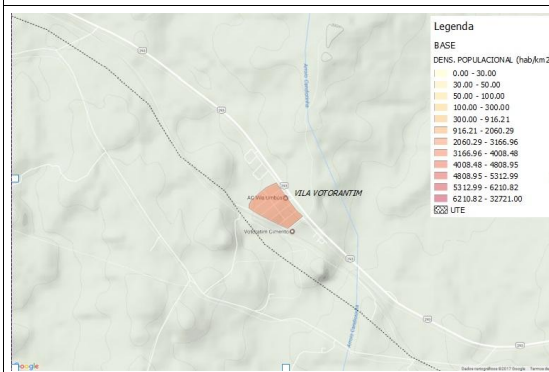


Figura 10 - Receptor Vila Votorantim

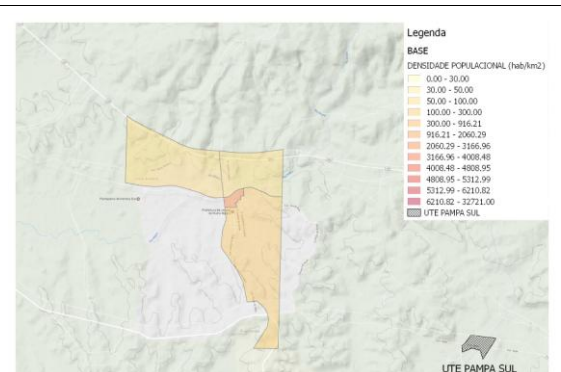


Figura 11 - Receptor Hulha Negra

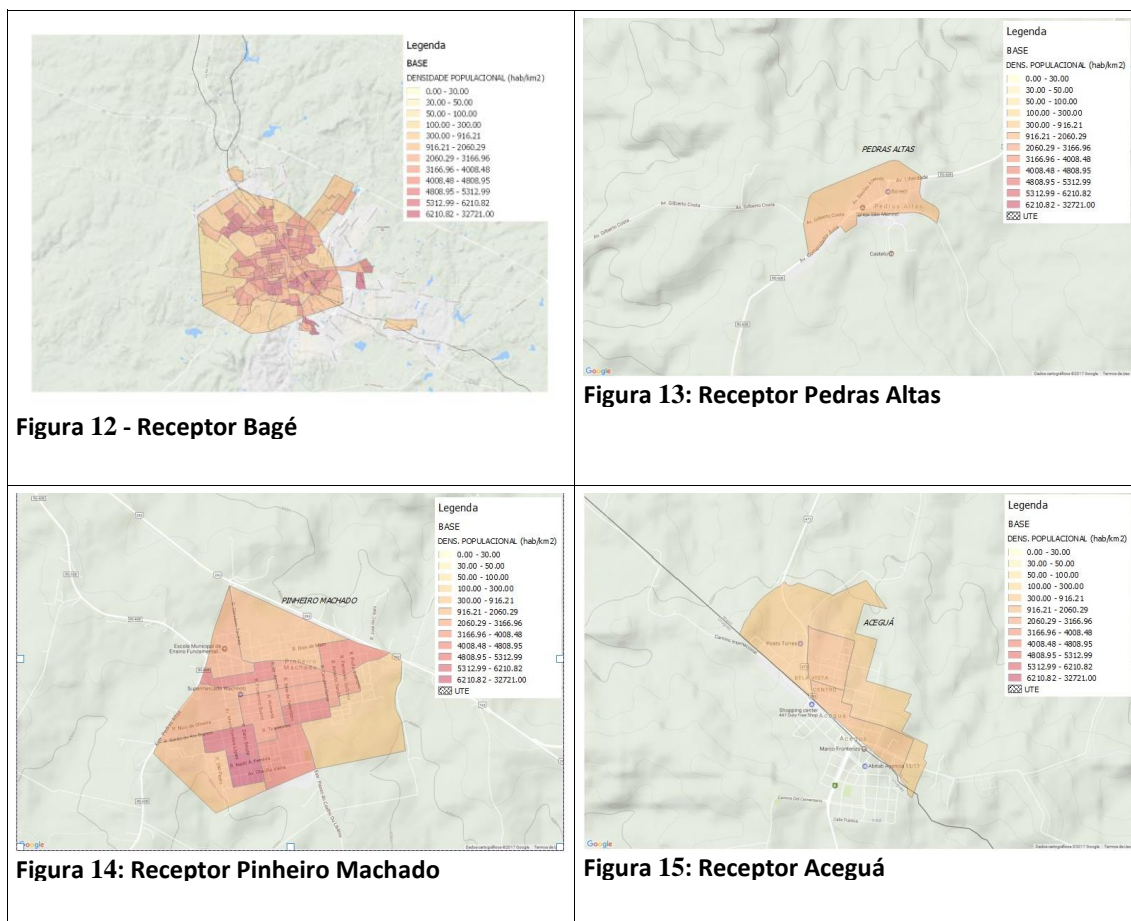


Tabela 5 – Núcleo Urbanos e Densidade Populacional

NÚCLEO URBANO	ÁREA (km ²)	POPULAÇÃO URBANA (hab)
Vila Residencial	0,71	746
Vila Dario Lassance	0,86	1.857
Vila João Emílio	0,42	964
Vila Operária	0,46	1.341
Vila Seival	0,93	495
Vila Votorantim	0,13	435
Hulha Negra	1,02	609
Pedras Altas	0,60	715
Pinheiro Machado	3,37	8.227
Aceguá	1,71	1.052
Bagé	47,24	1114.788

As informações foram obtidas a partir de dados vetoriais disponibilizados pelo IBGE para os setores censitários, selecionando-se aqueles incidentes nos núcleos urbanos de cada município da área de estudo.

3.1.2 ESTUDOS COLATERAIS CIENTÍFICOS E DISPONÍVEIS NO LICENCIAMENTO AMBIENTAL

No Apêndice B são apresentadas informações sumárias acerca de estudos científicos realizados na região e estudos de modelagem de dispersão de poluentes atmosféricos apresentados ao IBAMA em decorrência dos licenciamentos ambientais de termelétricas conduzidos pelo órgão ao longo de 20 anos.

Em geral, as áreas de estudo estiveram contidas em quadrantes inferiores à 50 x 50 km. Resultados de monitoramentos ambientais e respostas de simulações de modelos matemáticos de dispersão de poluentes atmosféricos indicaram que as zonas diretas de impacto ambiental estiveram contidas no raio de 25 km a partir da fonte emissora. Há entre os estudos de modelagem enorme variabilidade do número de fontes fixas de emissão consideradas e, sobretudo, suas taxas de emissão de poluentes atmosféricos e parâmetros físicos dos gases de exaustão. Ademais, não se constatou a realização de testes de performance das respostas dos modelos em comparação à dados observacionais.

3.2 MODELO DE DISPERSÃO ATMOSFÉRICA CALPUFF

O modelo de dispersão atmosférica CALPUFF é composto por cinco módulos que, em sucessão, permitem estimar a concentração de poluentes atmosféricos na coluna de ar em decorrência de fontes de emissão simuladas.

O Apêndice C discute os dados de entrada que foram utilizados na elaboração do trabalho de pesquisa e os parâmetros especificados em cada passo de cada módulo do modelo. Tanto os dados de entrada como os parâmetros são aqueles utilizados no Estudo de Capacidade de Suporte da Bacia Atmosférica da Região de Candiota/RS (EPE, 2015).

A seguir são apresentadas algumas ilustrações de respostas gráficas das simulações matemáticas dos módulos do modelo.

A malha computacional foi delimitada em quadrado de 100 x 100 km. Dentro da malha computacional foram delimitados 10.000 receptores discretos em quadrantes de 1,0 x 1,0 km, conforme Figura 16 e 17.

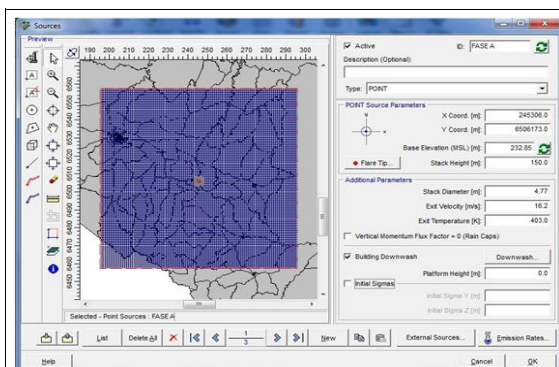


Figura 16: Malha Computacional

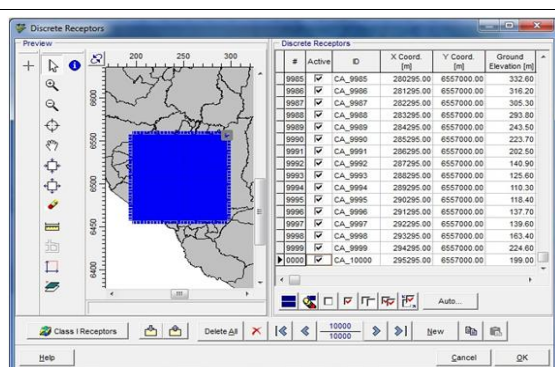


Figura 17: Receptores Discretos

Os dados digitais de elevação do terreno, com resolução de 90 x 90m foram obtidos no banco de dados do USGS e classificados no pré-processamento do terreno, conforme Figuras 18 e 19.

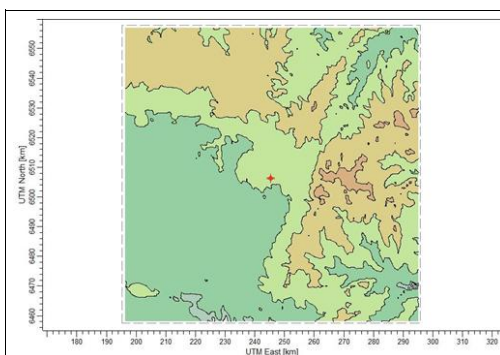


Figura 18 - Dados digitais de elevação do terreno

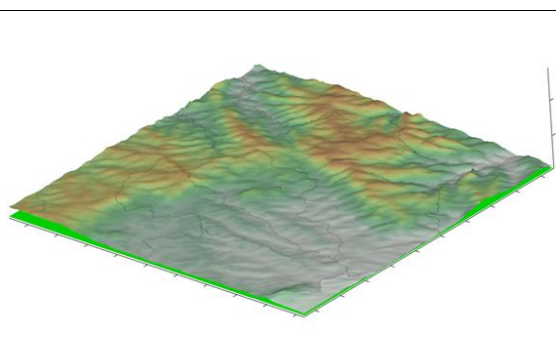
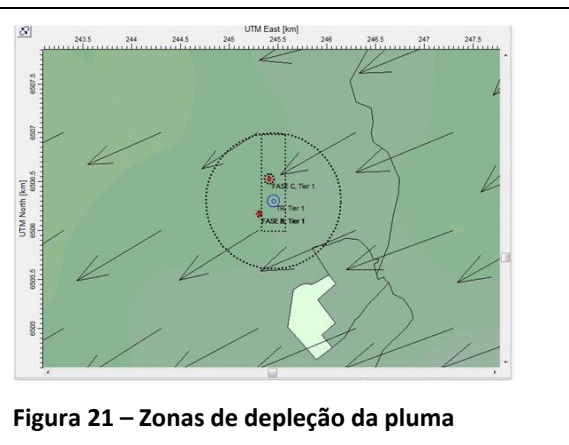
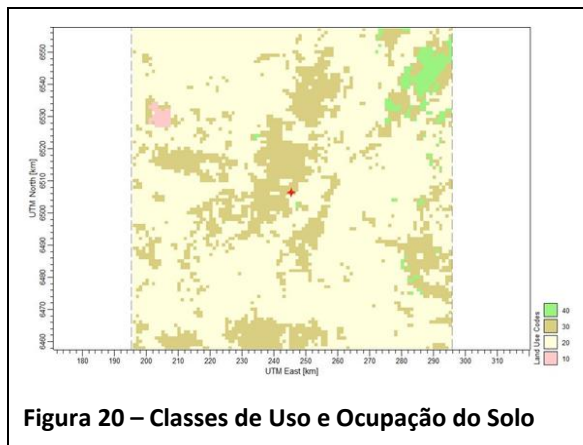


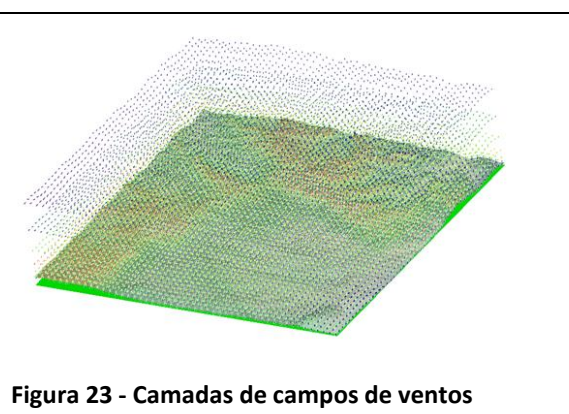
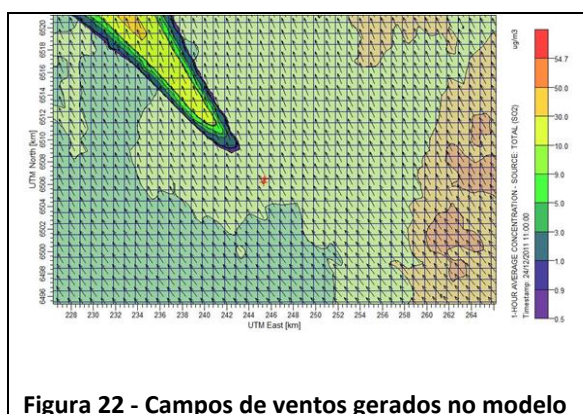
Figura 19 - Modelo Digital de Elevação do Terreno

Os dados digitais de uso do solo foram obtidos através de banco de dados do MMA – Probio, que utiliza imagens de Satélite Landsat 5 TM e 7 ETM+, ano base 2002. Complementarmente, foram sobrepostos conjuntos de dados digitais obtidos através do banco de dados WebGis (acoplado ao modelo CALPUFF), disponibilizados pela USGS oriundos do projeto *Global Land Cover Characterization* (GLCC), conforme Figura 20.

A zona de influência dos efeitos de depleção provocados pelas edificações da UTPM foi estimada pelo algoritmo BDIP, cujos resultados são ilustrados na Figura 21.



Das respostas do pré-processamento meteorológico, são apresentados nas Figuras 22 e 23 as camadas dos campos de ventos simulados sobre o terreno.



4 RESULTADOS

No presente tópico são apresentados os dados de monitoramento ambiental (qualidade do ar, temperatura, direção e velocidade dos ventos e emissões atmosféricas) e resultados das simulações matemáticas de parâmetros meteorológicos (altura da camada limite atmosférica e classes de estabilidade Pasquill- Gifford-Turner), dispersão de poluentes e estimativa de exposição da população e vulnerabilidade ambiental para os anos de 2011 a 2015.

4.1 DADOS METEOROLÓGICOS

São apresentados no Apêndice D os resultados do monitoramentos de temperatura e direção e velocidade dos ventos, além dos resultados das simulações de altura da camada limite atmosférica e da distribuição das classes de estabilidade Pasquill- Gifford-Turner. A seguir, apresenta-se a síntese dos resultados:

- Temperatura: Da interpretação dos dados dos registros de temperatura no anos estudados é possível identificar a clara distinção entre dois períodos no ano, podendo-se classificar como período mais quente aquele entre o 4º semestre do ano antecedente e o 1º semestre do ano seguinte; enquanto o 2º e 3º semestre de cada ano são aqueles mais frios. Claramente que esta é uma condição que se apresenta no hemisfério sul, muito embora em função da localização geográfica da região observar-se que este padrão é mais acentuado. Destaca-se que no período mais frio a amplitude térmica é mais proeminente do que no período quente. Como exemplo, a Figura 24 apresenta o Gráfico de Distribuição da Temperatura ao longo do ano de 2011.

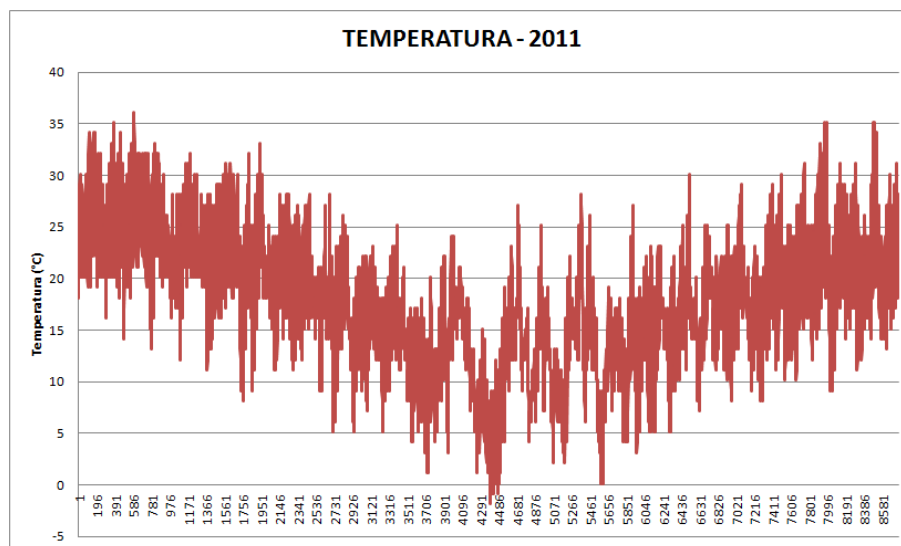


Figura 24 – Variação da Temperatura - 2011

- **Ventos:** No período estudado, a partir da interpretação dos dados dos registros de direção e velocidade dos ventos, observa-se que houve predominância de ventos provenientes de nordeste entre 2011 e 2014, enquanto em 2015 houve predominância de ventos do quadrante Leste. Ventos com velocidade entre 3,6 e 5,7 são mais frequentes, sendo considerado ventos de 3,0 a 4,0 m/s como médios entre todos os períodos.

Para os anos de 2011 a 2014 foi comum a maior ocorrência de calmaria no 2º trimestre, enquanto os ventos com maior velocidade ocorreram no 3º trimestre. A distribuição mais igualitária dos ventos, considerando direção e velocidade, ocorre nos 2º e 3º trimestres. Para o ano de 2015 o maior registro de calmarias também ocorreu no 2º trimestre, ao passo que ventos com maior velocidade foram mais comuns no 4º trimestre. A distribuição mais igualitária dos ventos ocorreu entre os 3º e 4º trimestres. Como exemplo, a Figura 27 ilustra os resultados da Rosa dos Ventos, Frequência de Distribuição da Velocidade e Variabilidade Temporal para o ano de 2011.

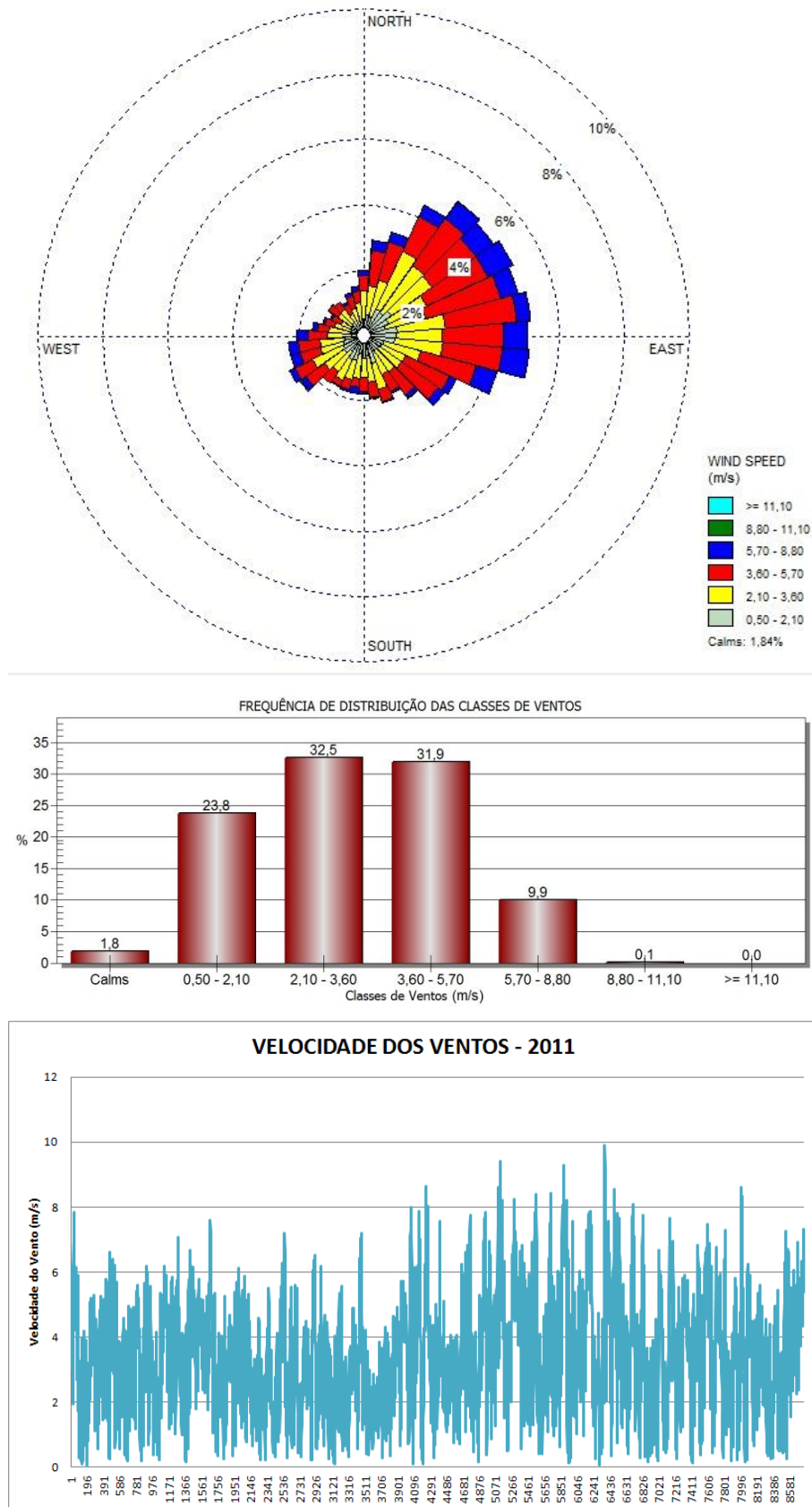


Figura 25 - Rosa dos Ventos, Frequência de Distribuição da Velocidade e Variabilidade Temporal - 2011

- Altura da Camada Limite Atmosférica: Da interpretação destes dados ao longo da série histórica observa-se a forte relação entre a temperatura ambiente e a CLA, em função do balanço de radiação e conseqüente movimento turbulento na atmosfera. Dada a necessidade de delimitação do campo vertical de simulação, adotou-se como valor inferior de altura 50,0 m. Desta forma, todos os mínimos registrados são com este valor. É notório que nos períodos com maior insolação, menor precipitação e conseqüentemente maiores temperaturas ambientes, a CLA atinge alturas mais elevadas no dia, comumente entre 2.000 e 2.600 m. Já no período mais frio, a CLA atinge alturas elevadas mais comumente entre 1,600 e 1.900 m, sendo no término do 2º trimestre e início do 3º trimestre mais comum atingir alturas máximas de 1.000 m. Como exemplo, a Figura 26 ilustra os resultados das simulações de altura da CLA para o ano de 2011.

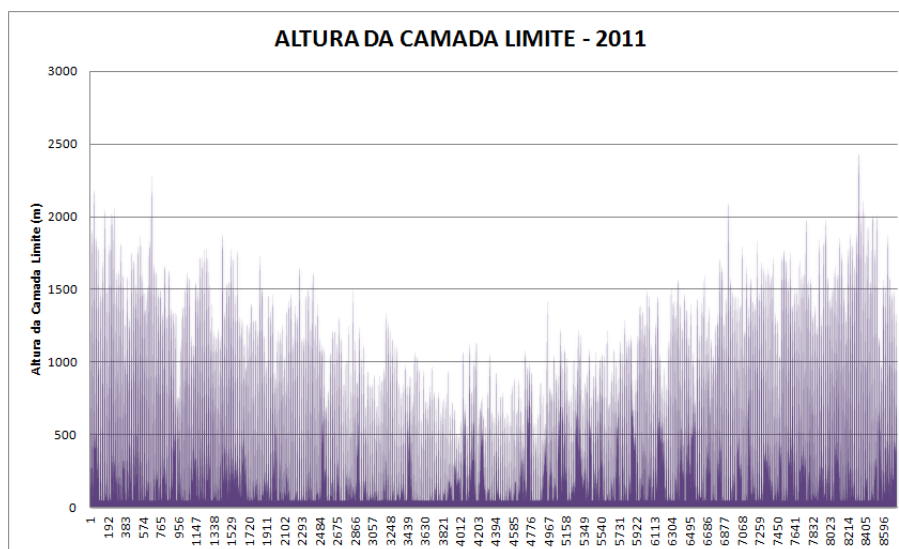


Figura 26 - Altura da Camada Limite Atmosférica (m) – 2011

- Classes de Estabilidade Pasquill-Gifford-Turner (PGT): Da interpretação destes dados ao longo da série histórica observa-se a predominância de períodos de estabilidade neutra (D), seguido por estabilidades estáveis (F) e levemente instáveis (C). Pode-se inferir que na região predomina-se condições favoráveis à boa dispersão de poluentes (neutra), seguido por condições de limitada ou moderada dispersão (estáveis) e por fim condições de distribuição verticalizada da pluma de poluentes (instáveis). Como exemplo, a Figura 27 apresenta a

distribuição percentual dos resultados das simulações de Classe de Estabilidade PGT para o ano de 2011.

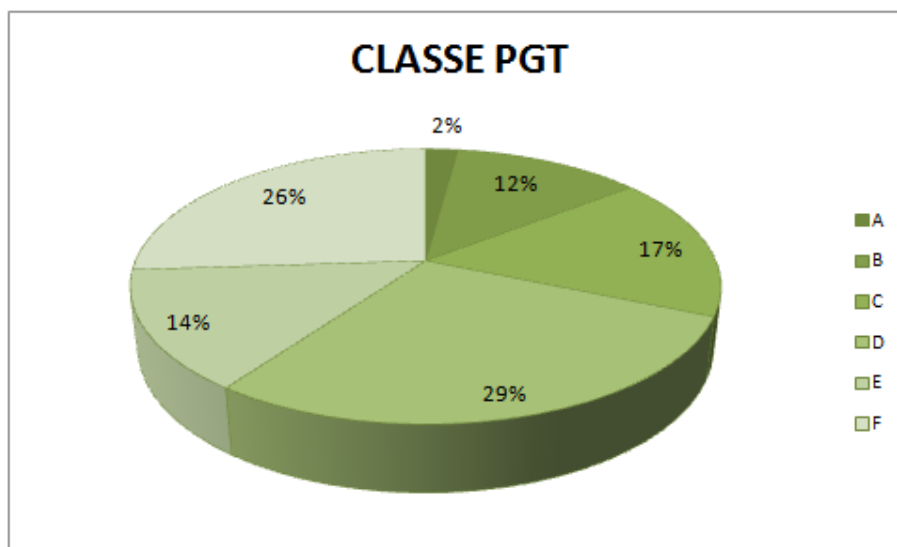


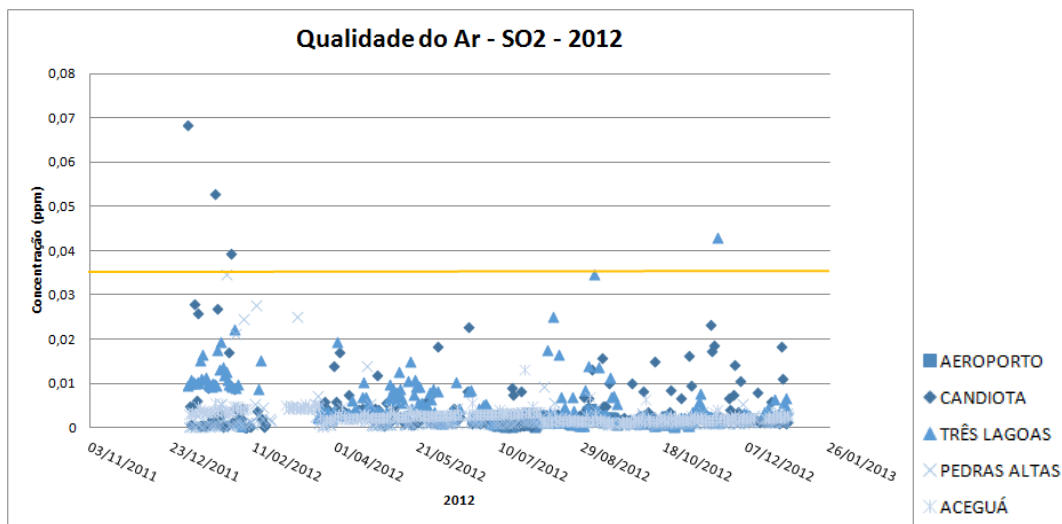
Figura 27 - Classes de Estabilidade Atmosférica PGT – 2011

4.2 DADOS DE QUALIDADE DO AR

Os dados de monitoramento da qualidade do ar são apresentados no Apêndice E. Estes dados foram obtidos junto ao Sistema de Informações Ambientais (SIA) disponibilizados pelo IBAMA. A fonte dos dados é proveniente dos registros da rede de monitoramento gerenciada pela CGTEE, constituída por cinco estações automatizadas, denominadas Candiota, Aeroporto, Três Lagoas, Pedras Altas e Aceguá.

Ao longo do período avaliado identificou-se violações de médias diárias do Padrão Secundário de Qualidade do Ar para o parâmetro SO₂ em 11 (onze) vezes na Estação Candiota em 25/12/2011, 31/12/2011, 01/01/12, 17/01/12, 27/01/12, 06/02/13, 17/08/14, 02/10/14, 02/11/14, 16/04/15 e 18/09/15; enquanto na Estação Três Lagoas ocorreu 01 (uma) violação em 18/11/12. Os registros de MP que superam a média diária do Padrão Secundário em 2011 ocorreram anteriormente à Novembro e portanto não são considerados como violações pois a rede de monitoramento não estava sendo supervisionada. Em 2015 foi registrada violação da média diária do Padrão Secundário de MP na Estação Aceguá em 03/12/15. Os registros de NO_x que superam a média horária do Padrão Secundário são anteriores a Novembro de 2011 e portanto não considerados como violações, dado que neste período a rede de monitoramento não estava sendo supervisionada.

A Figura 28 apresenta, como exemplo, os resultados gráficos da evolução do monitoramento das concentrações de SO_2 registrados na Estação Candiota no ano de 2012.



Linha em laranja representa o padrão secundário estabelecido na Resolução CONAMA nº 03/90

Figura 28 - Dados de monitoramento da qualidade do ar na rede da CGTEE – SO_2 – 2011

4.3 DADOS DE MONITORAMENTO DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

Os dados de monitoramento das emissões atmosféricas são apresentados no Apêndice F e foram obtidos junto ao Sistema de Informações Ambientais (SIA) disponibilizados pelo IBAMA. A rede de monitoramento é gerenciada pela CGTEE.

Ao longo do período estudado há constatação de violações sistêmicas dos limites máximos de emissão de SO_2 estabelecidos no licenciamento do complexo, sobretudo nos registros de 2011, 2013 e nos três primeiros trimestres de 2014. Em decorrência de extrapolações das emissões da Fase C, justamente a Fase com maior potência, bem como das eventuais ausências operacionais das Fases A e B, considera-se que esta usina seja a mais crítica em termos promover as violações do complexo.

As violações dos limites de MP foram esporádicas, com maiores incidências no ano de 2014. Novamente, as violações ocorridas nos padrões de emissão da Fase C são aquelas que contribuem em maior grau pelas violações do complexo.

As violações de NO_x também são eventuais e estão mais associadas às emissões das Fases A e B, considerando a baixa eficiência destas usinas, a ausência de sistemas de controle ambiental e o uso recorrente de óleo combustível em regimes operacionais de baixa potência.

A Figura 29 apresenta, como exemplo, os resultados gráficos da evolução do monitoramento das concentrações de SO₂ registrados nas fontes da UTPM no ano de 2012.

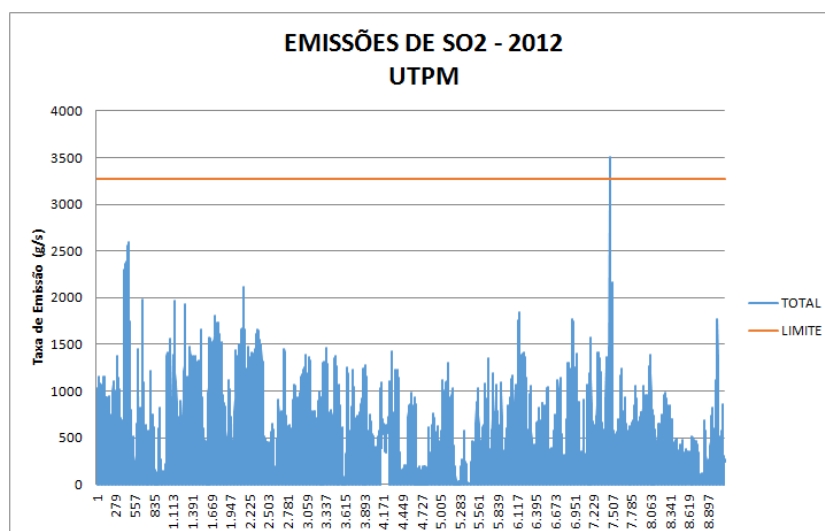


Figura 29 - Dados de monitoramento das emissões atmosféricas da UTPM – SO₂ – 2012

4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES MATEMÁTICAS DE DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E ESTIMATIVAS DE INDICADORES DE CONSEQUÊNCIAS SOCIOAMBIENTAIS

Neste tópico são apresentados os resultados das simulações de dispersão atmosférica de poluentes em dois Cenários, sendo o atual composto pelas fontes da UTPM e o futuro por todas as fontes em licenciamento ambiental pelo IBAMA, à exceção da UTE Ouro Negro.

Para cada cenário são trabalhados dados de médias horárias, diárias e anuais de concentração de poluente, incluindo-se análise de exposição destas concentrações em receptores selecionados (estações de monitoramento e núcleos urbanos).

No corpo desta dissertação optou-se por apresentar somente os resultados das simulações das médias anuais considerando que esta foi utilizada para estimativa dos indicadores de risco populacional e vulnerabilidade ambiental.

Os resultados detalhados para médias horárias, diárias e também anuais são apresentados nos Apêndice F (cenário atual) e Apêndice G (cenário futuro), em formato de relatório técnico.

4.4.1 CENÁRIO ATUAL

Neste cenário de simulação matemática da dispersão dos poluentes atmosféricos são consideradas as fontes da UTPM, sem adequações ambientais, e os dados meteorológicos dos anos 2011 a 2015.

4.4.1.1 CONCENTRAÇÕES DE SO₂

São apresentados os resultados das simulações do modelo matemático subdividindo em valores ranqueados para médias horárias, diárias e anuais, sejam em máximos registrados na grade – resumidamente apresentados nas Tabelas 6 a 10 e Figuras 30 a 32 - sejam em máximos registrados nos receptores.

Tabela 6 – Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2011

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	SO2_1H_RNK1	5.246,20	25/11/2011	10:00	244.295	6.506.000	1,01
	SO2_1H_RNK2	4.032,80	21/12/2011	09:00	244.295	6.506.000	1,01
	SO2_1H_RNK3	1.884,60	24/11/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,53
	SO2_1H_RNK4	1.786,90	25/11/2011	13:00	244.295	6.505.000	1,53
	SO2_24H_RNK1	547,66	25/01/2011	00:00	246.295	6.507.000	1,30
	SO2_24H_RNK2	267,49	15/12/2011	00:00	246.295	6.507.000	1,30
	SO2_24H_RNK3	193,21	15/12/2011	00:00	247.295	6.507.000	2,12
	SO2_24H_RNK4	176,18	30/05/2011	00:00	244.295	6.503.000	3,30
	SO2_1ANO	13,28	-	-	242.295	6.507.000	3,13

Tabela 7 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2012	SO2_1H_RNK1	4.398,70	18/04/2012	09:00	248.806	6.502.673	4,92
	SO2_1H_RNK2	2.156,40	15/12/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,60
	SO2_1H_RNK3	1.984,70	26/11/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,60
	SO2_1H_RNK4	1.886,50	16/12/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,60
	SO2_24H_RNK1	338,83	04/10/2012	00:00	243.806	6.507.673	2,13
	SO2_24H_RNK2	286,95	14/02/2012	00:00	243.806	6.506.673	1,61
	SO2_24H_RNK3	170,35	16/12/2012	00:00	244.806	6.504.673	1,56
	SO2_24H_RNK4	168,77	09/11/2012	00:00	244.806	6.504.673	1,56
	SO2_1ANO	8,88	-	-	243.806	6.503.673	2,94

Tabela 8 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2013

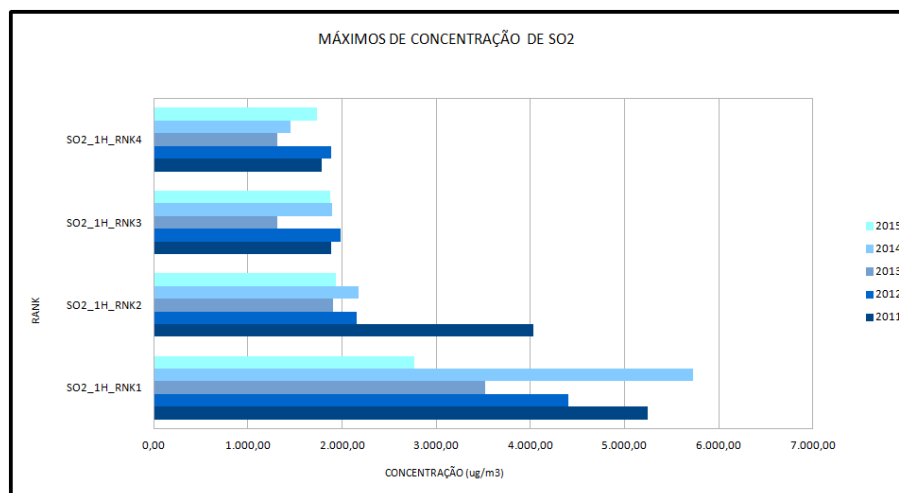
	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2013	SO2_1H_RNK1	3.519,30	11/06/2013	11:00	243.295	6.503.000	3,75
	SO2_1H_RNK2	1.901,10	25/12/2013	14:00	244.295	6.505.000	1,55
	SO2_1H_RNK3	1.308,50	25/12/2013	15:00	243.295	6.506.000	2,00
	SO2_1H_RNK4	1.307,80	27/01/2013	12:00	243.295	6.506.000	2,00
	SO2_24H_RNK1	281,70	28/12/2013	00:00	244.295	6.506.000	1,00
	SO2_24H_RNK2	187,80	29/12/2013	00:00	246.295	6.504.000	2,37
	SO2_24H_RNK3	143,99	08/03/2013	00:00	242.295	6.506.000	3,00
	SO2_24H_RNK4	143,22	25/12/2013	00:00	242.295	6.506.000	3,00
	SO2_1ANO	11,47	-	-	242.295	6.506.000	3,00

Tabela 9 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2014

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X	Y	
					(km)	(km)	
2014	SO2_1H_RNK1	5.725,60	06/05/2014	13:00	244.806	6.507.673	1,56
	SO2_1H_RNK2	2.175,00	11/10/2014	11:00	246.806	6.506.673	1,59
	SO2_1H_RNK3	1.891,80	09/11/2014	10:00	246.806	6.506.673	1,59
	SO2_1H_RNK4	1.451,60	22/11/2014	14:00	245.806	6.504.673	1,60
	SO2_24H_RNK1	455,94	06/05/2014	00:00	244.806	6.507.673	1,58
	SO2_24H_RNK2	319,93	18/08/2014	00:00	246.806	6.504.673	2,11
	SO2_24H_RNK3	185,03	20/10/2014	00:00	242.806	6.503.673	3,50
	SO2_24H_RNK4	172,80	22/10/2014	00:00	244.806	6.507.673	1,58
SO2_1ANO	9,70	-	-	-	247.806	6.507.673	2,93

Tabela 10 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2015

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X	Y	
					(km)	(km)	
2015	SO2_1H_RNK1	2.767,70	19/11/2015	07:00	243.806	6.504.673	2,12
	SO2_1H_RNK2	1.935,60	14/12/2015	12:00	245.806	6.503.673	2,58
	SO2_1H_RNK3	1.876,80	27/01/2015	11:00	245.806	6.504.673	1,57
	SO2_1H_RNK4	1.731,40	19/10/2015	09:00	245.806	6.504.673	1,57
	SO2_24H_RNK1	349,54	01/06/2015	00:00	246.806	6.501.673	4,72
	SO2_24H_RNK2	214,21	08/12/2015	00:00	242.806	6.503.673	3,50
	SO2_24H_RNK3	199,38	08/12/2015	00:00	243.806	6.504.673	2,11
	SO2_24H_RNK4	155,79	05/11/2015	00:00	242.806	6.507.673	2,90
SO2_1ANO	15,18	-	-	-	241.806	6.507.673	3,78

Figura 30 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para s médias horárias

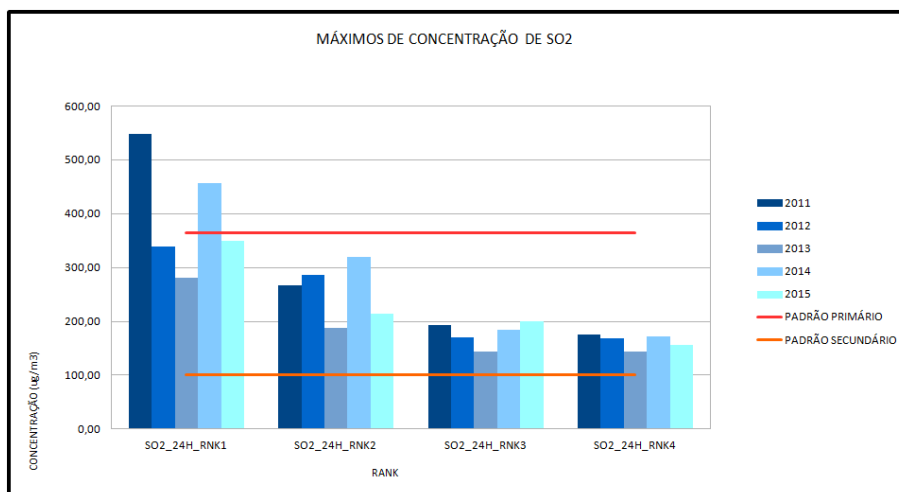


Figura 31 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para as médias diárias

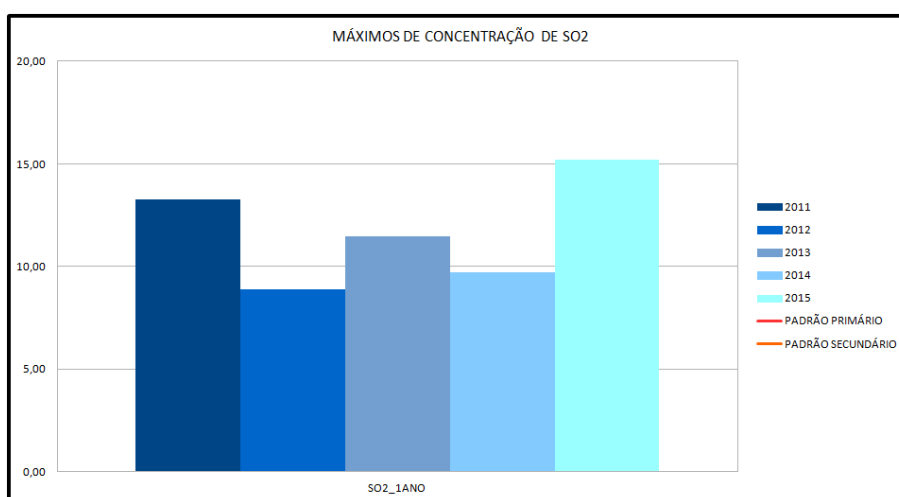


Figura 32 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para as médias anuais

4.4.1.1.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL

As Figuras 33 a 37 apresentam as isolinhas de concentração dos valores máximos da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de SO₂. Consultar os Gráficos Rosas dos Ventos, Altura da Camada Limite Atmosférica e a distribuição das classes de Pasquill-Gifford-Turner (PGT) no Apêndice D.



Figura 33 - SO₂ – Isolinhas – 2011

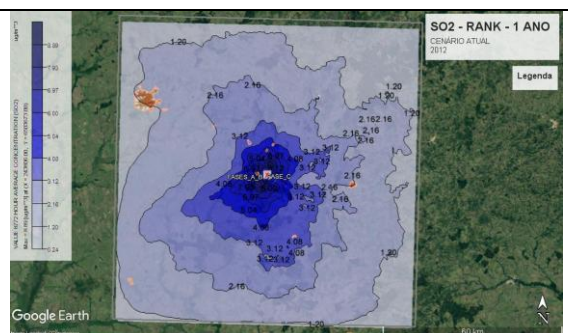


Figura 34 - SO₂ – Isolinhas – 2012

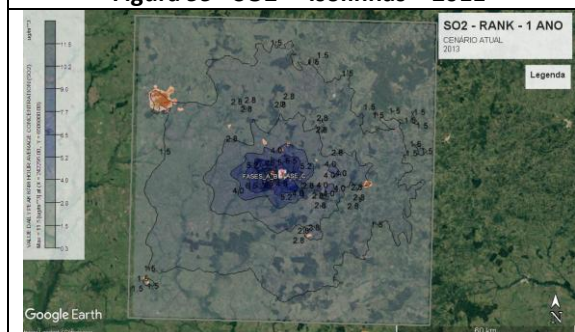


Figura 35 - SO₂ – Isolinhas – 2013

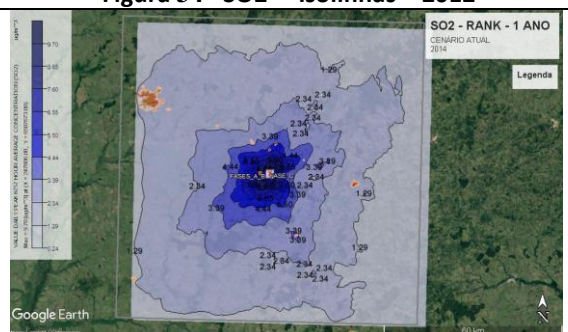


Figura 36 - SO₂ – Isolinhas - 2014

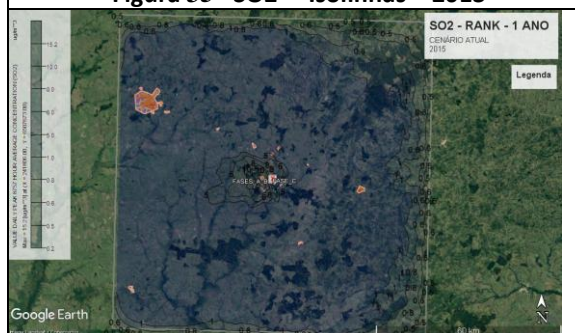


Figura 37 - SO₂ – Isolinhas - 2015

As Figuras 38 a 42 apresentam a distribuição espacial (distanciamento da fonte) das concentrações máximas em cada um dos 10.000 receptores da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de SO₂.

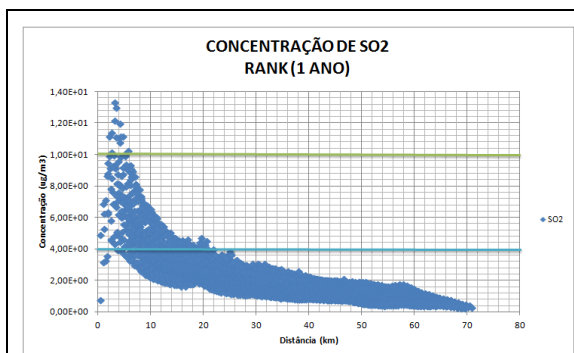


Figura 38 – SO₂ – Receptores – 2011

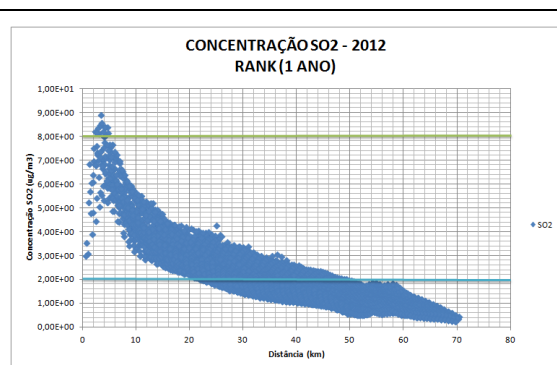


Figura 39 - SO₂ – Receptores – 2012

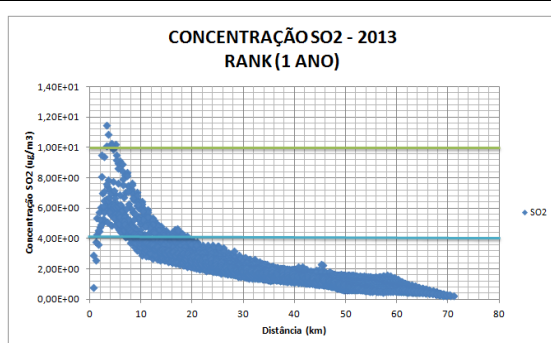


Figura 40 - SO₂ – Receptores – 2013

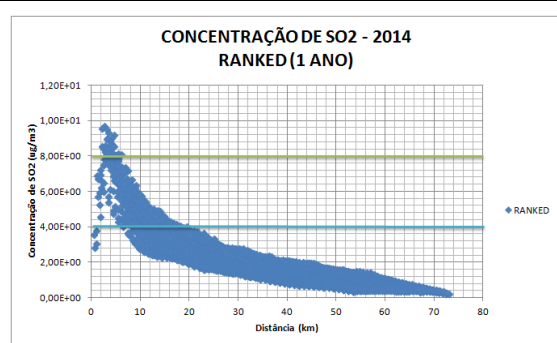


Figura 41 - SO₂ – Receptores – 2014

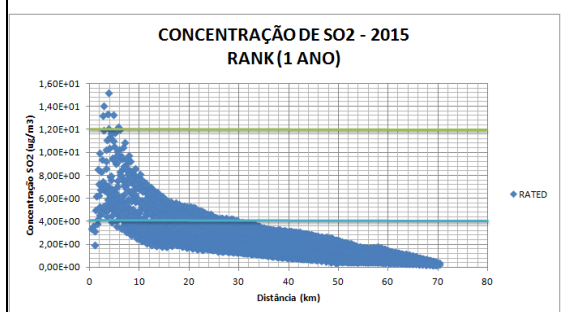


Figura 42 - SO₂ – Receptores – 2015

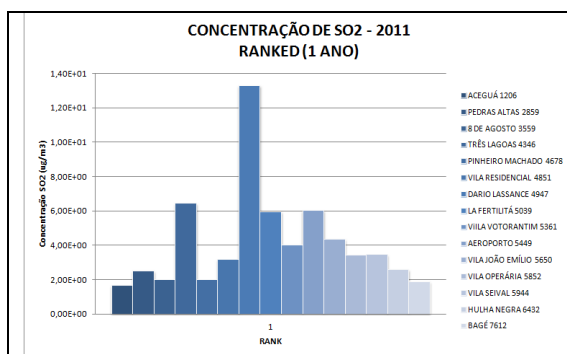
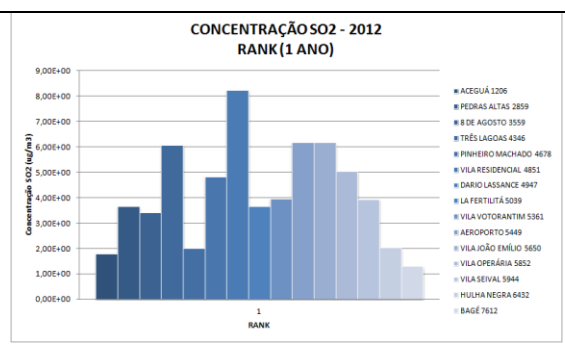
A Tabela 11 resume a interpretação dos gráficos em termos de perímetro de influência de faixas de concentração, tendo como centro da grade a fonte Fase C:

Tabela 11 - Perímetro de influência da média anual de concentração de SO₂ – Cenário Atual

FAIXA DE CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	RAIO MÁXIMO DE INFLUÊNCIA (km)
2 – 4	< 48 a 58
4 – 6	< 20 a 30
6 – 8	< 12 a 16
8 - 10	< 9,2 a 11
10 - 12	< 6 a 8
12 - 15	< 4,8 a 6

Dos gráficos identifica-se que os registros de concentrações máximas que são superiores à 25% (i.e 10 µg/m³) do padrão secundário da qualidade do ar (i.e 40 µg/m³) estão contidas no raio de 6,0 km a partir da UTPM, extrapolado à 8,0 km para os resultados das simulações do ano 2015. Concentrações inferiores à 10% (i.e. 4,0 µg/m³) do padrão secundário de qualidade do ar estão contidas no raio de 48,0 km de distância, extrapolado para 58,0 km para os resultados das simulações do ano 2015. Concentrações inferiores à 10% (i.e. 8,0 µg/m³) do padrão primário de qualidade do ar estão contidas no raio de 12,0 km de distância, extrapolado para 16,0 km para os resultados das simulações do ano 2015

As Figuras 43 a 47 apresentam os valores máximos de concentração registrados em receptores (núcleos urbanos e pontos de monitoramento):

Figura 43 - SO₂ – Receptor Selecionado - 2011Figura 44 - SO₂ – Receptor Selecionado - 2012

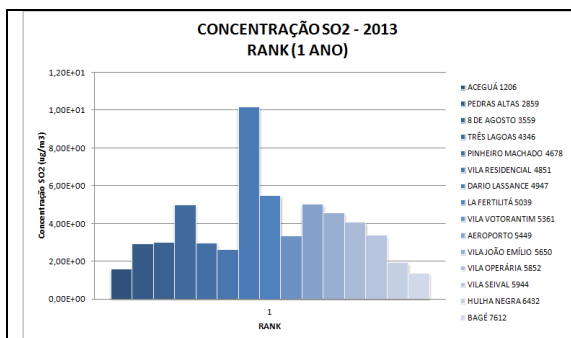


Figura 45 - SO₂ – Receptor Selecionado - 2013

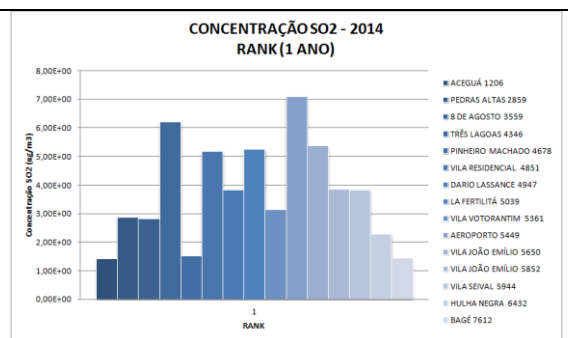


Figura 46 - SO₂ – Receptor Selecionado - 2014

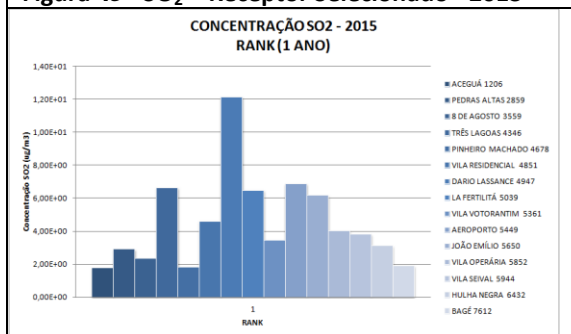


Figura 47 - SO₂ – Receptor Selecionado - 2015

A Tabela 12 resume a interpretação dos gráficos em termos de saturação da média anual de concentração nos receptores selecionados na bacia atmosférica estudada:

Tabela 12 – Registros da média anual de SO₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.

RECEPTOR	NÚMERO DE REGISTROS DA MÉDIA ANUAL POR FAIXA DE CONCENTRAÇÃO NO PERÍODO ESTUDADO			
	0 – 5%	5 – 10%	10 – 25%	25 – 32,5%
	0,0 – 2,0 µg/m ³	2,0 – 4,0 µg/m ³	4,0 – 10,0 µg/m ³	10,0 – 13,0 µg/m ³
Aceguá	5	-	-	-
Pedras Altas	-	5	-	-
8 de Agosto	-	5	-	-
Três Lagoas	-	-	5	-
Pinheiro Machado	1	4	-	-
V. Residencial	-	2	3	-
Dario Lassance	-	1	1	3
La Fertilitá	-	2	3	-
V. Votorantim	-	4	1	-
Aeroporto	-	-	5	-
João Emílio	-	-	5	-
V. Operária	-	2	3	-
V. Seival	-	5	-	-
Hulha Negra	1	4	-	-
Bagé	5	-	-	-

Dos gráficos, identifica-se que as máximas concentrações são registradas nos receptores selecionados que localizam-se próximos à fonte emissora, sendo mais expressivos na Vila Dario Lassance, onde registrou-se concentração superior à 25% de fração do padrão secundário da qualidade do ar. Nas Vilas Votorantim, João Emílio, Residencial e Operária e nos pontos de monitoramento Três Lagoas, La Fertilitá e Aeroporto registrou-se concentrações máximas que são superiores a 10% de fração do padrão secundário da qualidade do ar.

Utilizando-se a concentração registrada na área de cada núcleo populacional estimou-se a fração de ingestão de SO₂ pelos habitantes em toda a área de estudo: 1,947 x 10⁻⁸ para o ano de 2011, 1,446 x 10⁻⁸ para o ano de 2012; 1,529 x 10⁻⁸ para o ano de 2013; 1,458 x 10⁻⁸ para o ano de 2014; 1,973 x 10⁻⁸ para o ano de 2015. Isto

representa que para as emissões consideradas, combinadas com os efeitos da dispersão e remoção, o padrão de exposição ao longo do ano para a população afetada resulta em eventual inalação de 0,001947 g; 0,001446 g; 0,001529 g; 0,001458 g; 0,001973 g; por cada tonelada métrica de SO₂ emitida para cada ano. Portanto, considerando-se emissões contínuas ao longo do ano, a população dos núcleos urbanos estaria exposta à eventual inalação de 2.005 g; 1.489 g; 1.575 g; 1.575 g; 2.032 g de SO₂ para cada ano.

4.4.1.2 CONCENTRAÇÕES DE MP

São apresentados os resultados das simulações do modelo matemático subdividindo em valores ranqueados para médias horárias, diárias e anuais, sejam em máximos registrados na grade – resumidamente apresentados nas Tabelas 13 a 17 e Figuras 48 a 50 - seja em máximos registrados nos receptores.

Tabela 13 – Concentrações ranqueadas de MP - 2011

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	MP_1H_RNK1	1.128,30	25/11/2011	10:00	244.295	6.506.000	1,06
	MP_1H_RNK2	820,95	21/12/2011	09:00	244.295	6.506.000	1,06
	MP_1H_RNK3	407,67	24/11/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,78
	MP_1H_RNK4	391,17	25/11/2011	13:00	244.295	6.505.000	1,78
	MP_24H_RNK1	120,02	25/01/2011	00:00	246.295	6.507.000	1,18
	MP_24H_RNK2	53,52	15/12/2011	00:00	246.295	6.507.000	1,18
	MP_24H_RNK3	41,78	15/12/2011	00:00	247.295	6.507.000	2,14
	MP_24H_RNK4	38,00	01/06/2011	00:00	247.295	6.507.000	2,14
	MP_1ANO	2,78	-	00:00	242.295	6.507.000	2,95

Tabela 14 - Concentrações ranqueadas de MP - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2012	MP_1H_RNK1	996,23	18/04/2012	09:00	248.806	6.502.673	5,27
	MP_1H_RNK2	455,69	15/12/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,90
	MP_1H_RNK3	426,05	26/11/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,90
	MP_1H_RNK4	400,23	16/12/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,90
	MP_24H_RNK1	71,31	04/10/2012	00:00	243.806	6.507.673	1,81
	MP_24H_RNK2	61,91	14/02/2012	00:00	243.806	6.506.673	1,41
	MP_24H_RNK3	37,06	29/12/2012	00:00	243.806	6.506.673	1,41
	MP_24H_RNK4	34,48	09/11/2012	00:00	244.806	6.504.673	1,90
	MP_1ANO	1,85	-	-	243.806	6.503.673	3,18

Tabela 15 - Concentrações ranqueadas de MP - 2013

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2013	MP_1H_RNK1	795,51	11/06/2013	11:00	243.295	6.503.000	4,01
	MP_1H_RNK2	407,84	25/12/2013	14:00	244.295	6.505.000	1,78
	MP_1H_RNK3	284,15	27/01/2013	12:00	243.295	6.506.000	1,99
	MP_1H_RNK4	281,77	25/12/2013	15:00	243.295	6.506.000	1,99
	MP_24H_RNK1	60,82	28/12/2013	00:00	244.295	6.506.000	1,06
	MP_24H_RNK2	39,93	29/12/2013	00:00	246.295	6.504.000	2,75
	MP_24H_RNK3	30,96	08/03/2013	00:00	242.295	6.506.000	2,96
	MP_24H_RNK4	30,12	25/12/2013	00:00	242.295	6.506.000	2,96
	MP_1ANO	2,41	-	-	242.295	6.506.000	2,96

Tabela 16 - Concentrações ranqueadas de MP - 2014

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2014	MP_1H_RNK1	1.206,00	06/05/2014	13:00	244.806	6.507.673	1,21
	MP_1H_RNK2	490,13	11/10/2014	11:00	246.806	6.506.673	1,60
	MP_1H_RNK3	368,91	09/11/2014	10:00	246.806	6.506.673	1,60
	MP_1H_RNK4	306,17	15/08/2014	12:00	245.806	6.504.673	1,95
	MP_24H_RNK1	97,72	06/05/2014	00:00	244.806	6.507.673	1,21
	MP_24H_RNK2	68,94	18/08/2014	00:00	246.806	6.504.673	2,45
	MP_24H_RNK3	38,62	20/08/2014	00:00	242.806	6.503.673	3,73
	MP_24H_RNK4	35,59	22/10/2014	00:00	244.806	6.507.673	1,21
	MP_1ANO	1,99	-	-	247.806	6.507.673	2,84

Tabela 17 - Concentrações ranqueadas de MP - 2015

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2015	MP_1H_RNK1	602,09	19/11/2015	07:00	243.806	6.504.673	2,33
	MP_1H_RNK2	413,23	14/12/2015	12:00	245.806	6.503.673	2,92
	MP_1H_RNK3	403,31	27/01/2015	11:00	245.806	6.504.673	1,95
	MP_1H_RNK4	381,68	19/10/2015	09:00	245.806	6.504.673	1,95
	MP_24H_RNK1	73,60	01/06/2015	00:00	246.806	6.501.673	5,11
	MP_24H_RNK2	45,33	19/11/2015	00:00	243.806	6.504.673	2,33
	MP_24H_RNK3	41,63	08/12/2015	00:00	243.806	6.504.673	2,33
	MP_24H_RNK4	32,99	05/11/2015	00:00	242.806	6.507.673	2,66
	MP_1ANO	3,17	-	-	241.806	6.507.673	3,59

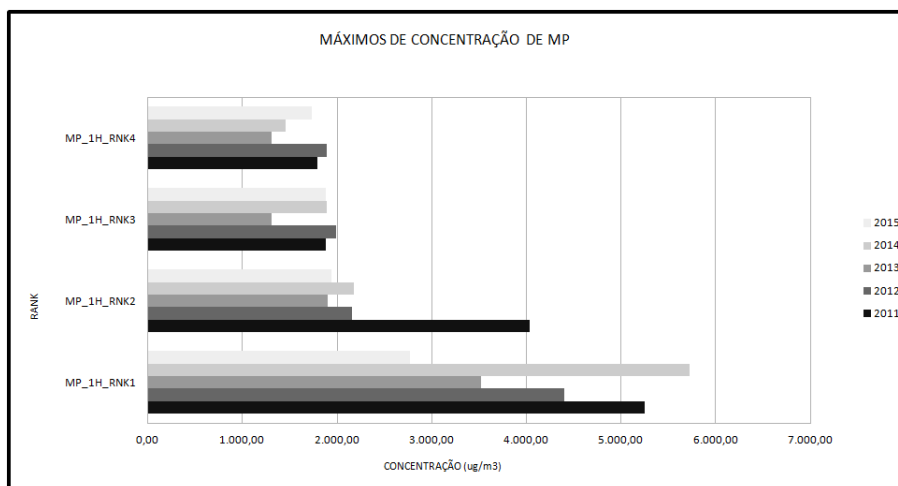


Figura 48 - Máximos valores ranqueados de MP para as médias horárias

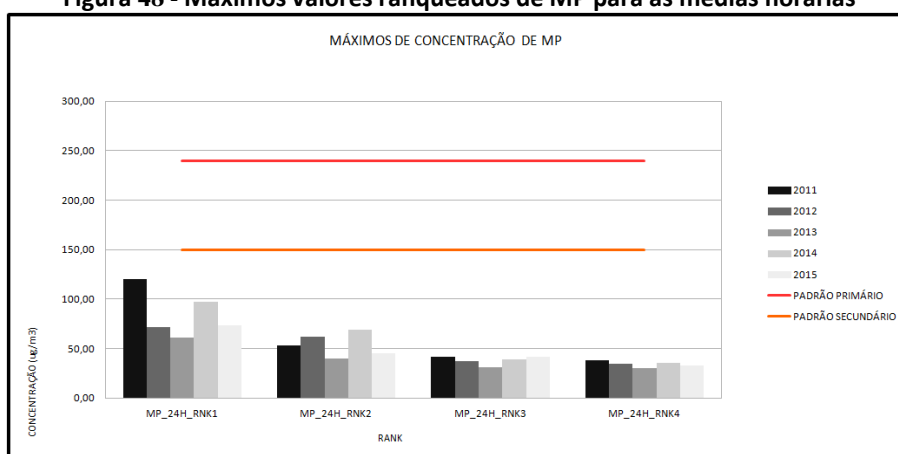


Figura 49 - Máximos valores ranqueados de MP para as médias diárias

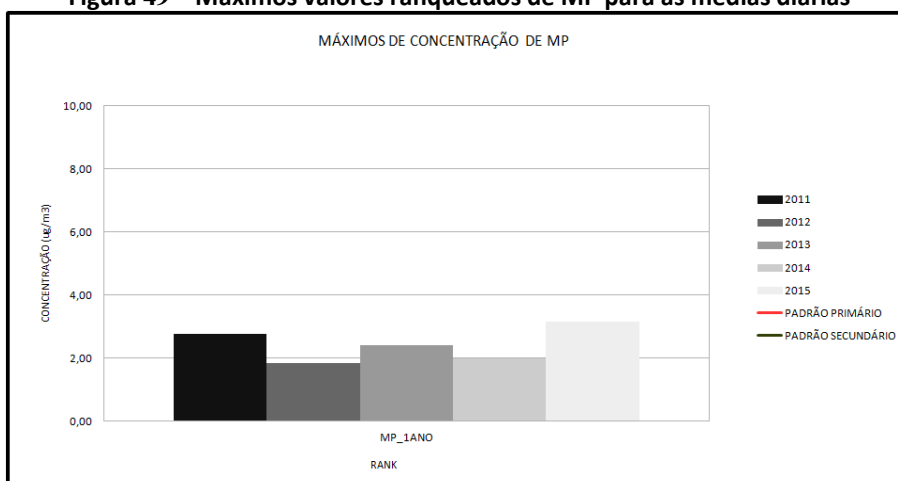


Figura 50 - Máximos valores ranqueados de MP para as médias anuais

4.4.1.2.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL

As Figuras de 51 a 55 apresentam as isolinhas de concentração dos valores máximos da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de MP,

Consultar os Gráficos Rosas dos Ventos, Altura da Camada Limite Atmosférica e a distribuição das classes de Pasquill-Gifford-Turner (PGT) no Apêndice D.

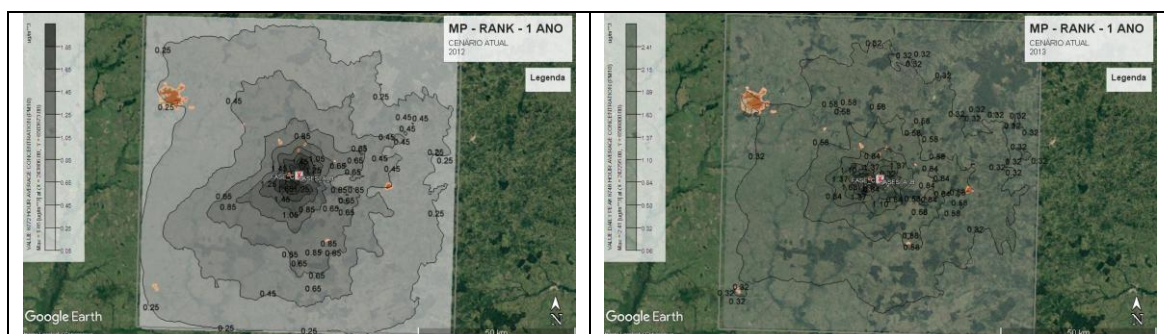


Figura 51 – MP – Isolinha - 2011

Figura 52 – MP – Isolinha - 2012

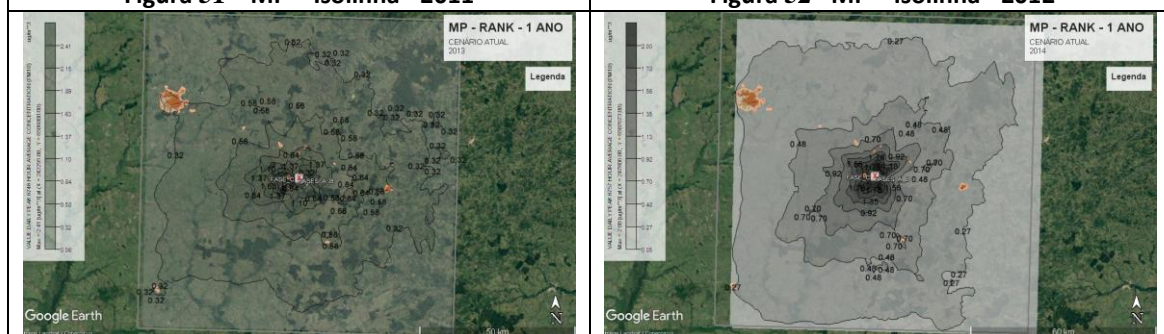


Figura 53 – MP – Isolinha - 2013

Figura 54 – MP – Isolinha - 2014

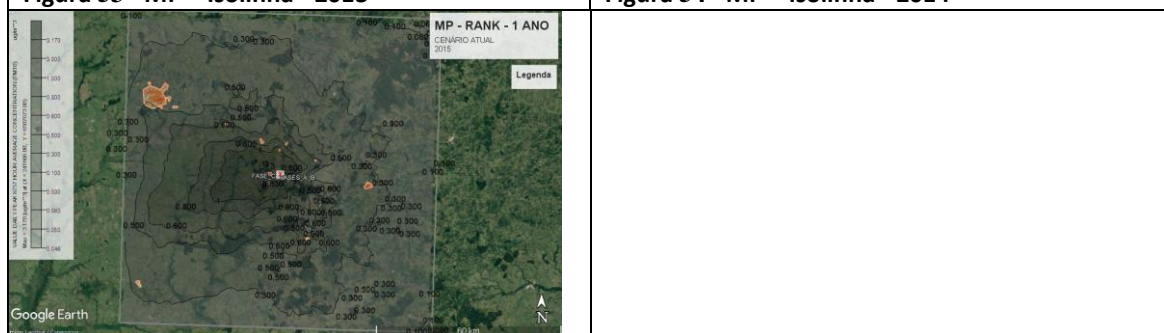


Figura 55 – MP – Isolinha - 2015

As Figuras 56 a 60 apresentam a distribuição espacial (distanciamento da fonte) das concentrações máximas em cada um dos 10.000 receptores da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de MP.

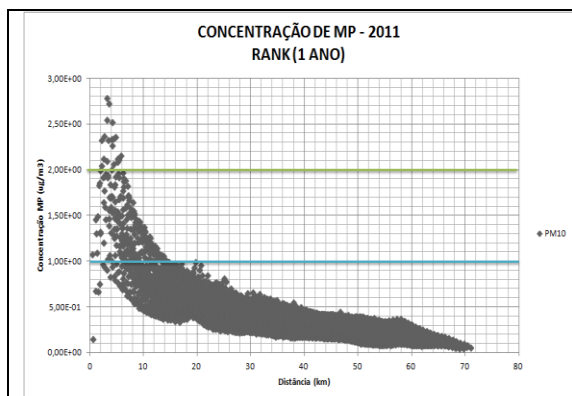


Figura 56 – MP – Receptores - 2011

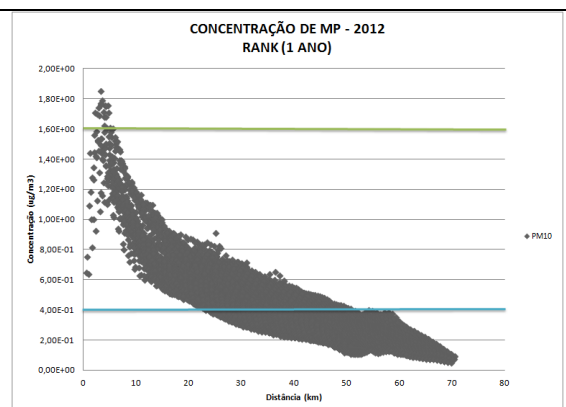


Figura 57 – MP – Receptores - 2012

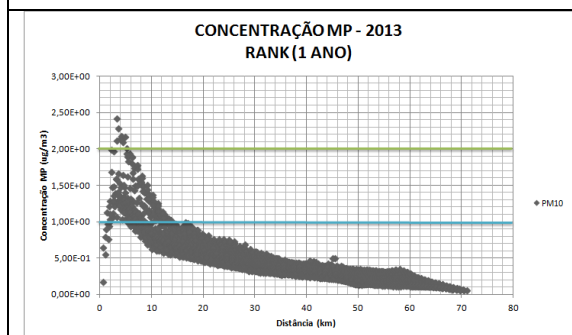


Figura 58 – MP – Receptores - 2013

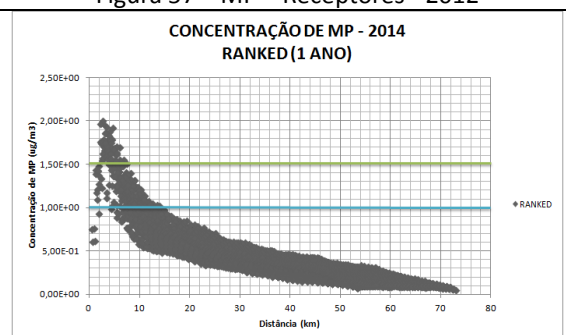


Figura 59 – MP – Receptores - 2014

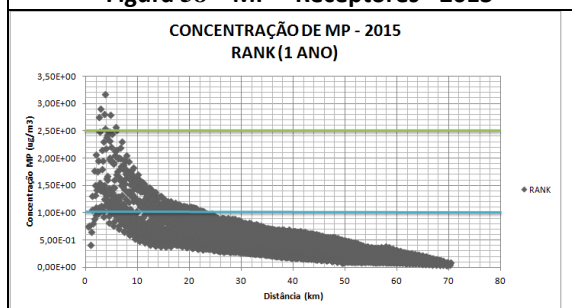


Figura 60 – MP – Receptores - 2015

A Tabela 18 resume a interpretação dos gráficos em termos de perímetro de influência de faixas de concentração, tendo como centro da grade a fonte Fase C:

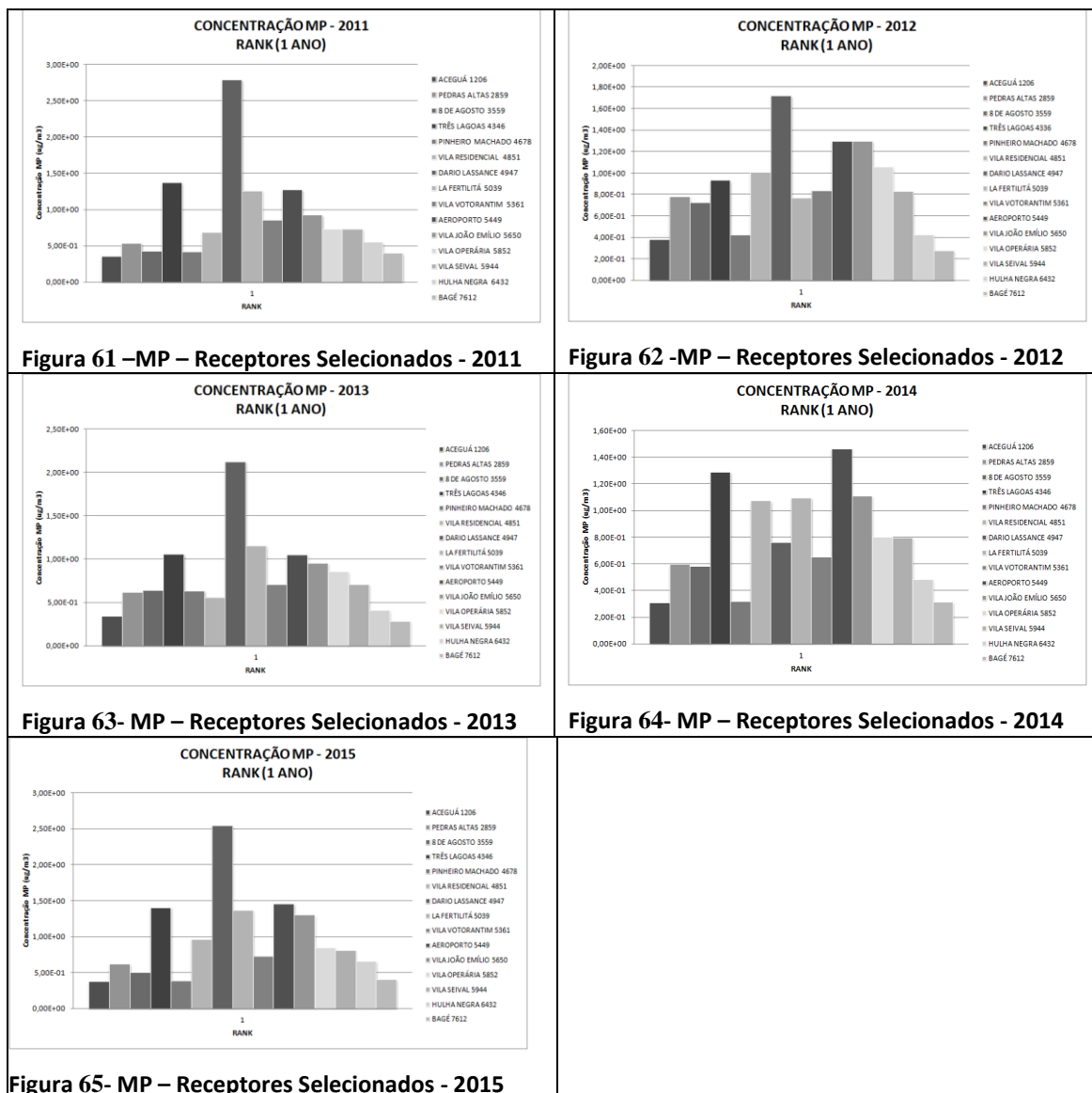
Tabela 18 - Perímetro de influência da média anual de concentração de MP – Cenário Atual

FAIXA DE CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RAIO MÁXIMO DE INFLUÊNCIA (km)
0,5 – 1	< 50
1 – 2,5	< 24
2,5 – 3,2	< 6

Dos gráficos, identifica-se que os registros de concentrações máximas que são superiores à 5% (i.e $2,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão primário e secundário da qualidade do ar

para partículas inaláveis (i.e $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estão contidas no raio de 6,0 km a partir da UTPM. Concentrações superiores à 2% (i.e. $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão primário e secundário de qualidade do ar estão contidas no raio de 24,0 km de distância.

As Figuras 61 a 65 apresentam os valores máximos de concentração registrados em receptores (núcleos urbanos e pontos de monitoramento):



A Tabela 19 resume a interpretação dos gráficos em termos de saturação da média anual de concentração nos receptores seleccionados na bacia atmosférica estudada:

Tabela 19 – Registros da média anual de MP por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão primário e secundário.

RECEPTOR	NÚMERO DE REGISTROS DA MÉDIA ANUAL POR FAIXA DE CONCENTRAÇÃO NO PERÍODO ESTUDADO		
	0 – 2,0%	2,0 – 5,0%	5,0 – 6,0 %
	0,0 – 1,0 µg/m ³	1,0 – 2,5 µg/m ³	2,5 – 3,0 µg/m ³
Aceguá	5	-	-
Pedras Altas	5	-	-
8 de Agosto	5	-	-
Três Lagoas	1	4	-
Pinheiro Machado	5	-	-
V. Residencial	3	2	-
Dario Lassance	1	2	2
La Fertilitá	1	4	-
V. Votorantim	5	-	-
Aeroporto	-	5	-
João Emílio	2	3	-
V. Operária	4	1	-
V. Seival	5	-	-
Hulha Negra	5	-	-
Bagé	5	-	-

Dos gráficos, identifica-se que as máximas concentrações são registradas nos receptores selecionados mais próximos à fonte emissora, sendo mais expressivos na Vila Dario Lassance, onde registrou-se concentração superior à 5% de fração do padrão primário e secundário da qualidade do ar. Na Vila Residencial e nos pontos de monitoramento Três Lagoas, La Fertilitá e Aeroporto registrou-se concentrações máximas que são superiores a 2% de fração do padrão primário e secundário da qualidade do ar.

Utilizando-se a concentração registrada na área de cada núcleo populacional estimou-se a fração de ingestão de MP pelos habitantes em toda a área de estudo: $1,936 \times 10^{-8}$ para o ano de 2011; $1,436 \times 10^{-8}$ para o ano de 2012; $1,515 \times 10^{-8}$ para o

ano de 2013; $1,471 \times 10^{-8}$ para o ano de 2014; $1,955 \times 10^{-8}$ para o ano de 2015. Isto representa que para as emissões consideradas, combinadas com os efeitos da dispersão e remoção, o padrão de exposição ao longo do ano para a população afetada resulta em eventual inalação de 0,001936 g; 0,001436 g; 0,001515 g; 0,001471 g; 0,001955 g por cada tonelada métrica de MP emitida. Portanto, considerando-se emissões contínuas ao longo do ano, a população dos núcleos urbanos estaria exposta à eventual inalação de 425 g; 315 g; 332 g; 323 g; 429, g de MP ao ano.

4.4.1.3 CONCENTRAÇÕES DE NO₂

São apresentados os resultados das simulações do modelo matemático subdividindo em valores ranqueados para médias horárias, diárias e anuais, sejam em máximos registrados na grade – resumidamente apresentados nas Tabelas 20 a 24 e Figuras 66 e 67 - seja em máximos registrados nos receptores.

Tabela 20 – Concentrações ranqueadas de NO₂ - 2011

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	NOX_1H_RNK1	502,73	25/11/2011	10:00	244.295	6.506.000	1,06
	NOX_1H_RNK2	498,14	21/12/2011	09:00	244.295	6.506.000	1,06
	NOX_1H_RNK3	244,02	25/11/2011	08:00	244.295	6.505.000	1,78
	NOX_1H_RNK4	229,02	21/12/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,78
	NOX_1ANO	1,56	-	-	242.295	6.507.000	2,95

Tabela 21 - Concentrações ranqueadas de NO₂ - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2012	NOX_1H_RNK1	480,70	18/04/2012	10:00	246.806	6.502.673	4,17
	NOX_1H_RNK2	260,40	14/02/2012	11:00	243.806	6.506.673	1,41
	NOX_1H_RNK3	230,14	16/01/2012	12:00	245.806	6.507.673	1,29
	NOX_1H_RNK4	215,62	26/11/2012	11:00	244.806	6.504.673	1,90
	NOX_1ANO	1,07	-	-	243.806	6.503.673	3,18

Tabela 22 - Concentrações ranqueadas de NO₂ - 2013

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2013	NOX_1H_RNK1	336,24	11/06/2013	11:00	242.295	6.503.000	4,58
	NOX_1H_RNK2	206,07	25/12/2013	14:00	244.295	6.505.000	1,78
	NOX_1H_RNK3	166,07	29/07/2013	12:00	244.295	6.503.000	3,65
	NOX_1H_RNK4	135,16	23/04/2013	14:00	244.295	6.503.000	3,65
	NOX_1ANO	1,29	-	-	242.295	6.506.000	2,96

Tabela 23 - Concentrações ranqueadas de NO2 - 2014

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2014	NOX_1H_RNK1	746,00	06/05/2014	13:00	244.806	6.507.673	1,21
	NOX_1H_RNK2	278,62	22/10/2014	12:00	244.806	6.507.673	1,21
	NOX_1H_RNK3	207,01	04/02/2014	11:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK4	169,88	22/10/2014	13:00	244.806	6.508.673	2,18
	NOX_1ANO	1,19	-	-	245.806	6.509.673	3,20

Tabela 24 - Concentrações ranqueadas de NO2 - 2015

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2015	NOX_1H_RNK1	276,77	19/11/2015	07:00	243.806	6.504.673	2,33
	NOX_1H_RNK2	193,56	14/12/2015	12:00	245.806	6.503.673	2,92
	NOX_1H_RNK3	187,68	27/07/2015	11:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK4	173,14	19/10/2015	09:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1ANO	1,52	-	-	241.806	6.507.673	3,59

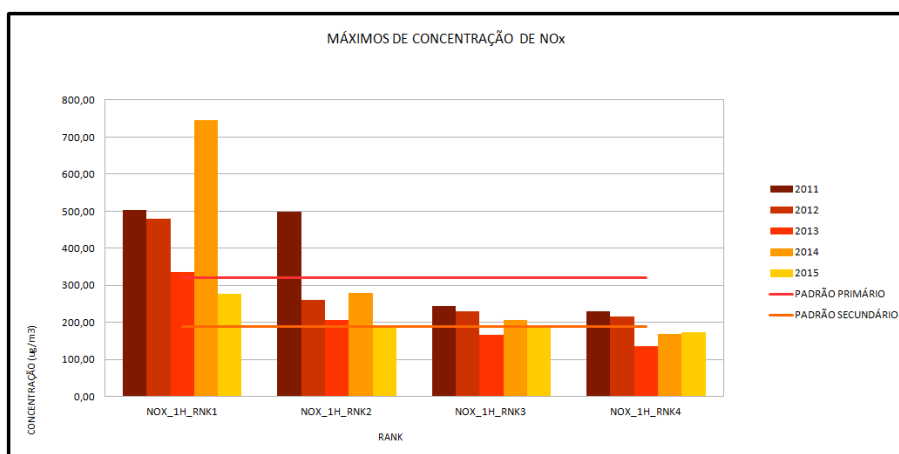


Figura 66 - Máximos valores ranqueados de NO2 para as médias horárias

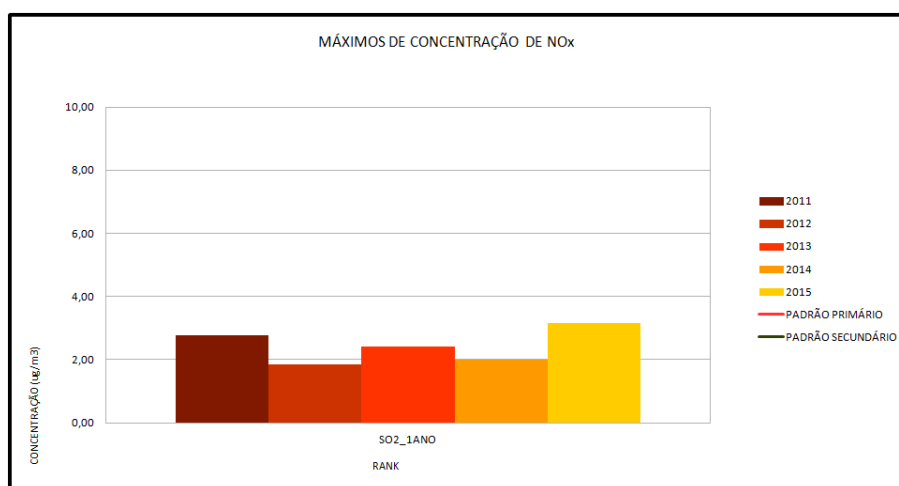


Figura 67 - Máximos valores ranqueados de NO2 para as médias anuais

4.4.1.3.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL

As Figuras 68 a 72 apresentam as isolinhas de concentração dos valores máximos da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de NO₂, Consultar os Gráficos Rosas dos Ventos, Altura da Camada Limite Atmosférica e a distribuição das classes de Pasquill-Gifford-Turner (PGT) no Apêndice D.

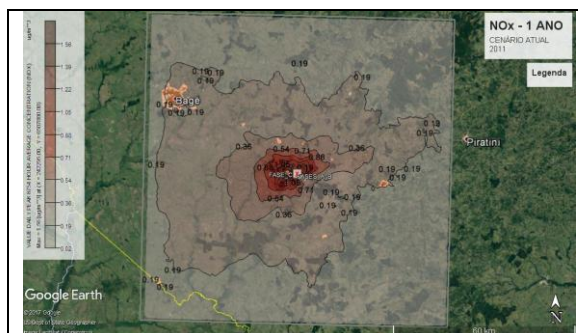


Figura 68-NO2 – Isolinhas - 2011

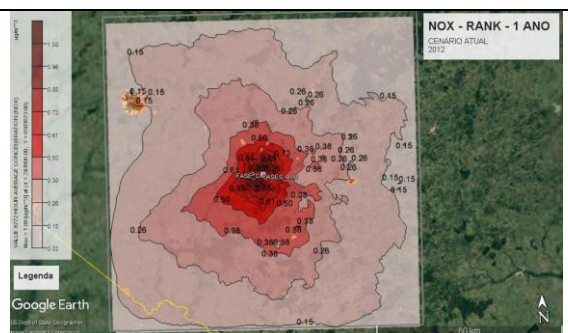


Figura 69 – NO2 – Isolinhas - 2012

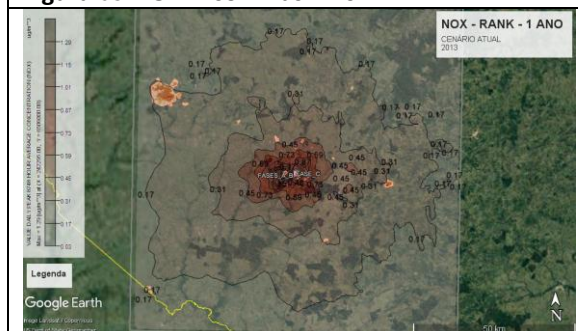


Figura 70 – NO2 – Isolinhas - 2013

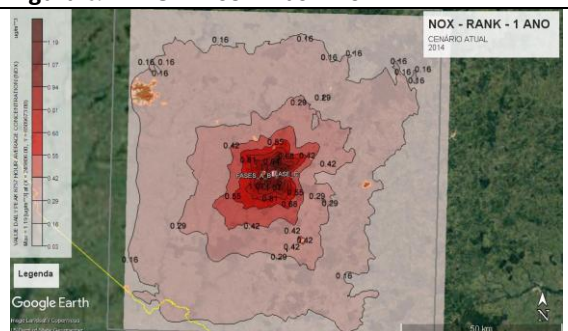
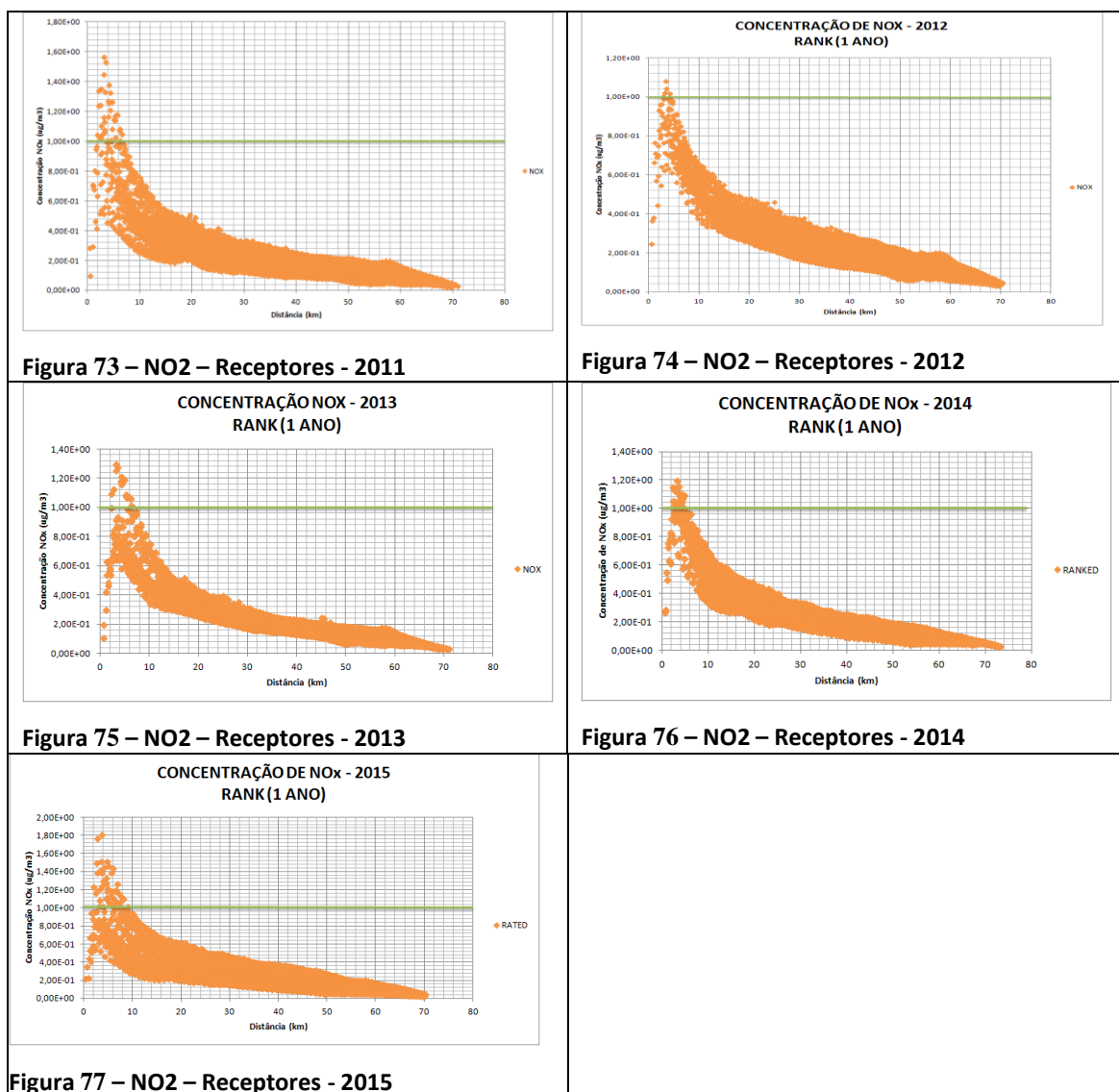


Figura 71 – NO2 – Isolinhas - 2014



Figura 72 – NO2 – Isolinhas - 2015

As Figuras 73 a 77 apresentam a distribuição espacial (distanciamento da fonte) das concentrações máximas em cada um dos 10.000 receptores da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de NO₂.



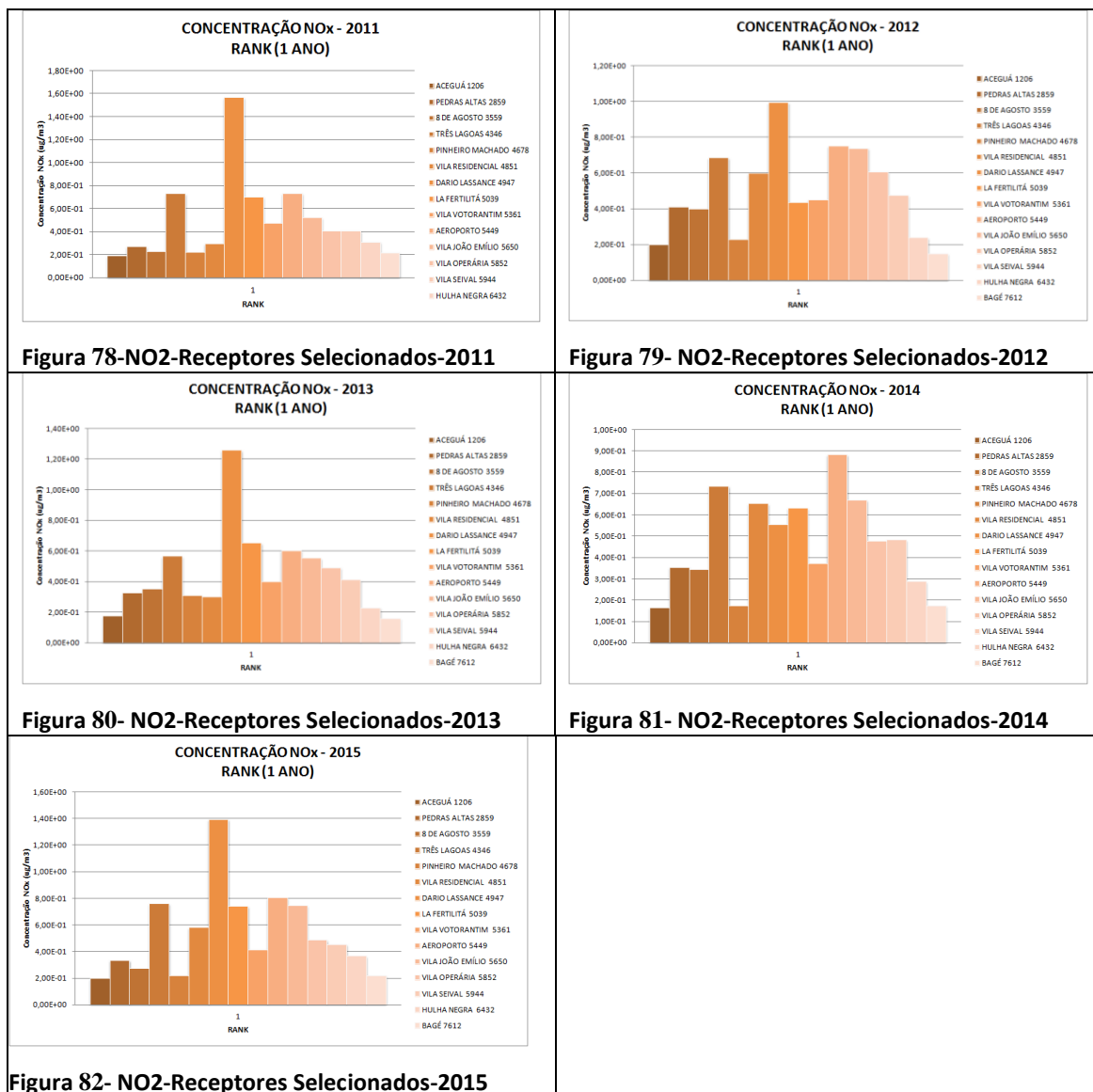
A Tabela 25 resume a interpretação dos gráficos em termos de perímetro de influência de faixas de concentração, tendo como centro da grade a fonte Fase C:

Tabela 25 - Perímetro de influência da média anual de concentração de NO₂ – Cenário Atual

FAIXA DE CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	RAIO MÁXIMO DE INFLUÊNCIA (km)
0,5 – 1,0	< 32
1,0 – 1,5	< 10

Dos gráficos, identifica-se que os registros de concentrações máximas que são superiores à 1% (i.e $1,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão primário e secundário da qualidade do ar (i.e $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estão contidas no raio de 10,0 km a partir da UTPM. Concentrações superiores à 0,5% (i.e. $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão primário e secundário de qualidade do ar estão contidas no raio de 32,0 km de distância.

As Figuras 78 a 82 apresentam os valores máximos de concentração registrados em receptores (núcleos urbanos e pontos de monitoramento):



A Tabela 26 resume a interpretação dos gráficos em termos de saturação da média anual de concentração nos receptores selecionados na bacia atmosférica estudada:

Tabela 26 – Registros da média anual de NO₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.

RECEPTOR	NÚMERO DE REGISTROS DA MÉDIA ANUAL POR FAIXA DE CONCENTRAÇÃO NO PERÍODO ESTUDADO		
	0 – 0,5%	0,5 – 1,0%	1,0 – 1,5%
	0,0 – 0,5 µg/m ³	0,5 – 1,0 µg/m ³	1,0 – 1,5 µg/m ³
Aceguá	5	-	-
Pedras Altas	5	-	-
8 de Agosto	5	-	-
Três Lagoas	-	5	-
Pinheiro Machado	5	-	-
V. Residencial	2	3	-
Dario Lassance	-	2	3
La Fertilidá	1	4	-
V. Votorantim	5	-	-
Aeroporto	-	5	-
João Emílio	-	5	-
V. Operária	4	1	-
V. Seival	5	-	-
Hulha Negra	5	-	-
Bagé	5	-	-

Dos gráficos, identifica-se que as máximas concentrações são registradas nos receptores selecionados mais próximos à fonte emissora, sendo mais expressivos na Vila Dario Lassance, onde registrou-se concentração superior à 1,0% de fração do padrão primário e secundário da qualidade do ar. Nas Vilas Residencial, João Emílio e Operária e nos pontos de monitoramento Três Lagoas, La Fertilidá e Aeroporto registrou-se concentrações máximas que são superiores a 0,5% de fração do padrão primário e secundário da qualidade do ar.

Utilizando-se a concentração registrada na área de cada núcleo populacional estimou-se a fração de ingestão de NO_x pelos habitantes em toda a área de estudo: $1,934 \times 10^{-8}$ para o ano de 2011; $1,455 \times 10^{-8}$ para o ano de 2012; $1,548 \times 10^{-8}$ para o

ano de 2013; $1,533 \times 10^{-8}$ para o ano de 2014; $1,979 \times 10^{-8}$. Isto representa que para as emissões consideradas, combinadas com os efeitos da dispersão e remoção, o padrão de exposição ao longo do ano para a população afetada resulta em eventual inalação de 0,001934 g; 0,001455 g; 0,001548 g; 0,001533 g; 0,001979 g para cada tonelada métrica emitida. Portanto, considerando-se emissões contínuas ao longo do ano, a população dos núcleos urbanos estaria exposta à eventual inalação de 229,3 g; 172,5 g; 183,6 g; 181,8 g; 234,6 g de NOx ao ano.

4.4.2 CENÁRIO FUTURO

Neste cenário de simulação matemática da dispersão dos poluentes atmosféricos são consideradas as fontes Fase C, Fase BIII e BIV adequadas, Fase A substituída, Fase D, UTE Sul, UTE Seival, UTE Pampa Sul I e II, e os dados meteorológicos dos anos 2011 a 2013. Os resultados detalhados em formato de relatório são apresentados no Apêndice H.

4.4.2.1 CONCENTRAÇÕES DE SO₂

São apresentados os resultados das simulações do modelo matemático subdividindo em valores ranqueados para médias horárias, diárias e anuais, sejam em máximos registrados na grade – resumidamente apresentados nas Tabelas 27 a 29 e Figuras 83 a 85 - sejam em máximos registrados nos receptores.

Tabela 27 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2011

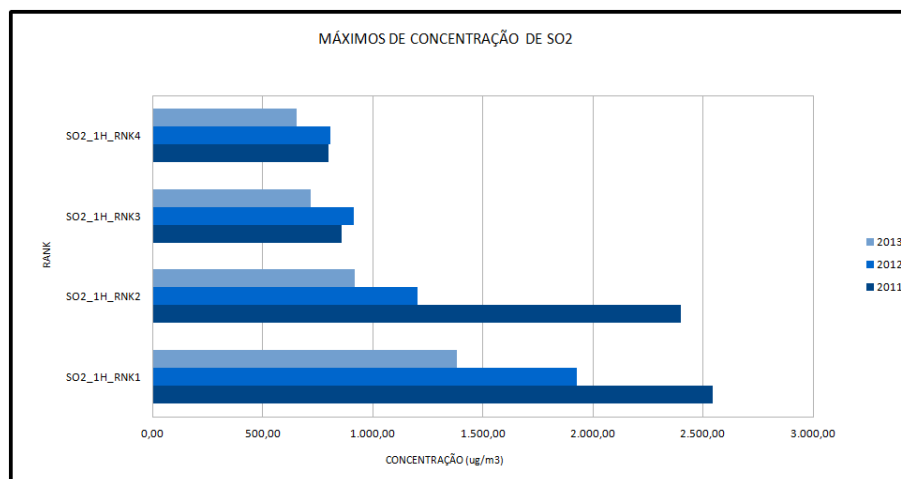
	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	SO2_1H_RNK1	2.542,00	21/12/2011	09:00	244.295	6.506.000	1,06
	SO2_1H_RNK2	2.397,00	25/11/2012	10:00	244.295	6.506.000	1,06
	SO2_1H_RNK3	858,95	21/12/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,78
	SO2_1H_RNK4	798,77	24/11/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,78
	SO2_24H_RNK1	215,92	25/01/2011	01:00	246.295	6.507.000	1,18
	SO2_24H_RNK2	167,48	15/12/2011	01:00	246.295	6.507.000	1,18
	SO2_24H_RNK3	99,20	04/11/2011	01:00	244.295	6.503.000	3,65
	SO2_24H_RNK4	98,76	28/04/2011	01:00	244.295	6.503.000	3,65
	SO2_1ANO	8,40			242.295	6.507.000	2,95

Tabela 28 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X	Y	
					(km)	(km)	
2012	SO2_1H_RNK1	1.925,00	18/04/2012	10:00	246.806	6.502.673	4,17
	SO2_1H_RNK2	1.204,50	04/10/2012	11:00	243.806	6.506.673	1,41
	SO2_1H_RNK3	915,09	01/02/2012	10:00	243.806	6.507.673	1,81
	SO2_1H_RNK4	807,17	24/02/2012	11:00	243.806	6.507.673	1,81
	SO2_24H_RNK1	172,19	04/10/2012		243.806	6.507.673	1,81
	SO2_24H_RNK2	140,09	14/02/2012		242.806	6.507.673	2,66
	SO2_24H_RNK3	98,85	09/11/2012		244.806	6.506.673	0,43
	SO2_24H_RNK4	91,75	15/12/2012		244.806	6.504.673	1,90
	SO2_1ANO	6,36			242.806	6.505.673	2,55

Tabela 29 - Concentrações ranqueadas de SO₂ - 2013

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X	Y	
					(km)	(km)	
2013	SO2_1H_RNK1	1.382,60	11/06/2013	11:00	242.295	6.503.000	4,58
	SO2_1H_RNK2	915,94	27/01/2013	11:00	244.295	6.506.000	1,06
	SO2_1H_RNK3	716,79	29/12/2013	08:00	245.295	6.505.000	1,53
	SO2_1H_RNK4	654,08	19/05/2013	12:00	245.295	6.505.000	1,53
	SO2_24H_RNK1	126,22	11/06/2013		242.295	6.503.000	4,58
	SO2_24H_RNK2	97,06	08/01/2013		245.295	6.509.000	2,47
	SO2_24H_RNK3	78,04	06/12/2013		245.295	6.508.000	1,47
	SO2_24H_RNK4	69,92	08/12/2013		245.295	6.503.000	3,53
	SO2_1ANO	7,78			242.295	6.506.000	2,96

Figura 83 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para s médias horárias

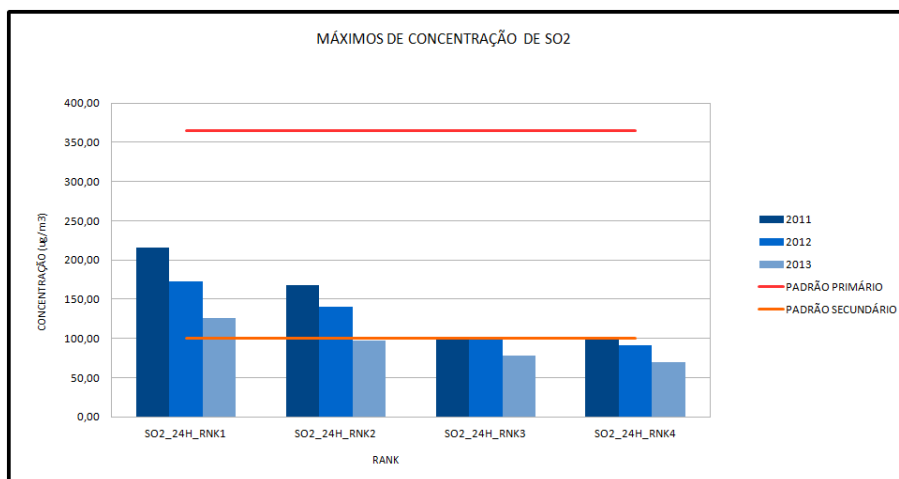


Figura 84 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para as médias diárias

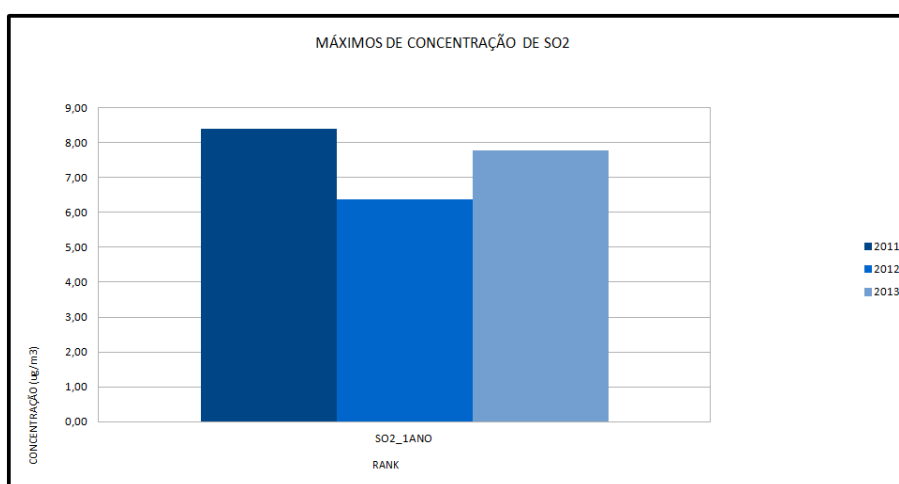


Figura 85 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para as médias anuais

4.4.2.1.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL

As Figuras 86 a 88 apresentam as isolinhas de concentração dos 4 valores máximos da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de SO₂. Consultar os Gráficos Rosas dos Ventos, Altura da Camada Limite Atmosférica e a distribuição das classes de Pasquill-Gifford-Turner (PGT) no Apêndice D.

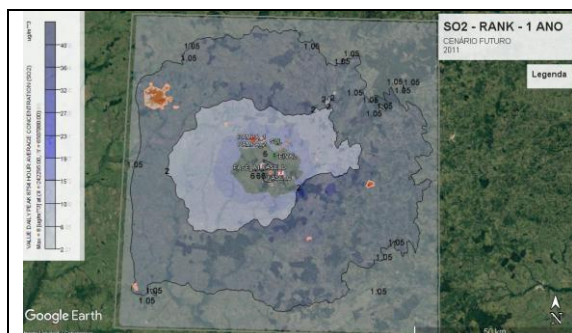


Figura 86 – SO₂ – Isolinhas - 2011

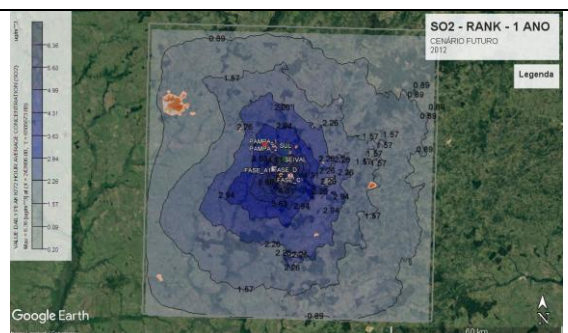


Figura 87 – SO₂ – Isolinhas - 2012

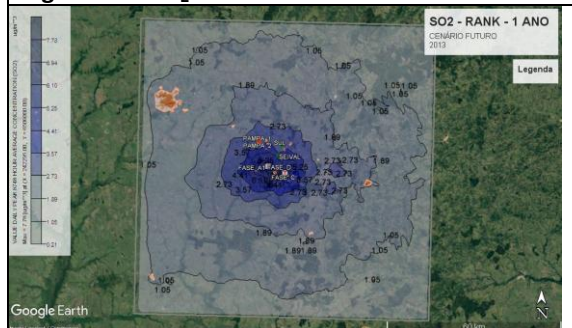


Figura 88 – SO₂ – Isolinhas - 2013

As Figuras 89 a 91 apresentam a distribuição espacial (distanciamento da fonte) das concentrações máximas em cada um dos 10.000 receptores da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de SO₂.

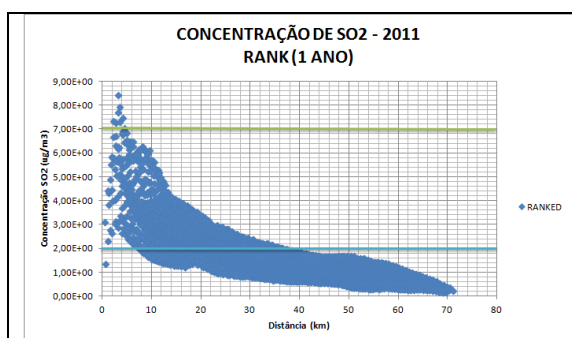


Figura 89 – SO₂ – Receptores - 2011

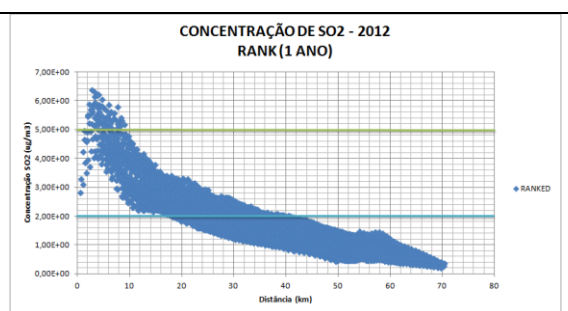


Figura 90 – SO₂ – Receptores - 2012

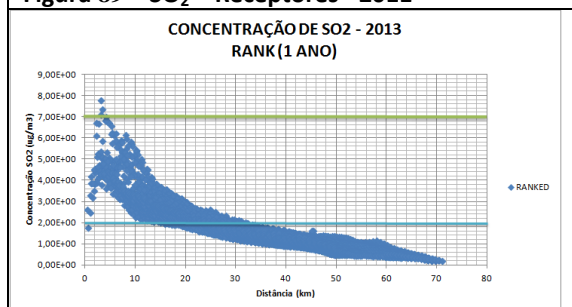


Figura 91 – SO₂ – Receptores - 2013

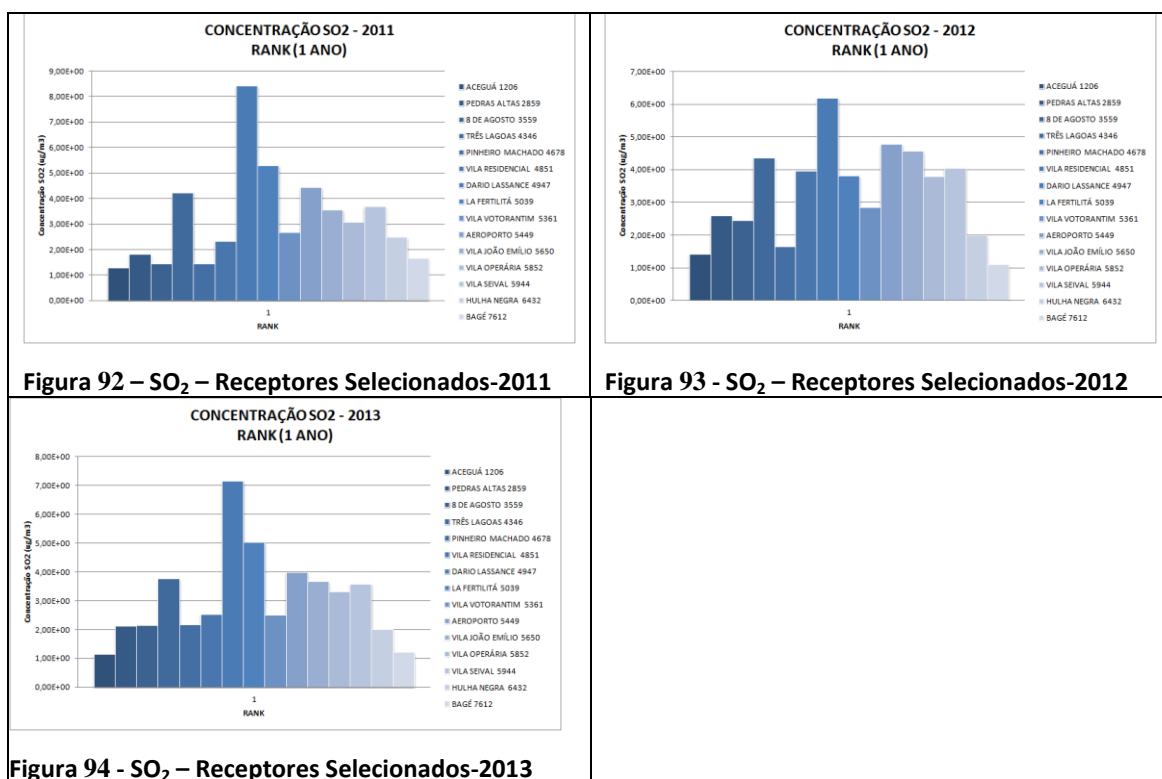
A Tabela 30 resume a interpretação dos gráficos em termos de perímetro de influência de faixas de concentração, tendo como centro da grade a fonte Fase C:

Tabela 30 - Perímetro de influência da média anual de concentração de SO₂ – Cenário Futuro

FAIXA DE CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RAIO MÁXIMO DE INFLUÊNCIA (km)
2 – 4	< 41
4 – 6	< 16
6 – 8,4	< 9,6

Dos gráficos, identifica-se que os registros de concentrações máximas que são superiores à 21% (i.e. 8,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão secundário da qualidade do ar (i.e. 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ou à 10% do padrão primário (i.e. 8,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) estão contidas no raio de 9,6 km a partir da UTPM. Concentrações inferiores à 10% (i.e. 4,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão secundário de qualidade do ar estão contidas no raio de 41,0 km de distância.

As Figuras 92 a 94 a seguir apresentam os valores máximos de concentração registrados em receptores (núcleos urbanos e pontos de monitoramento):



A Tabela 31 a seguir resume a interpretação dos gráficos em termos de saturação da média anual de concentração nos receptores selecionados na bacia atmosférica estudada:

Tabela 31 – Registros da média anual de SO₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.

RECEPTOR	NÚMERO DE REGISTROS DA MÉDIA ANUAL POR FAIXA DE CONCENTRAÇÃO NO PERÍODO ESTUDADO		
	0 – 5%	5 – 10%	10 – 21%
	0,0 – 2,0 µg/m ³	2,0 – 4,0 µg/m ³	4,0 – 8,4 µg/m ³
Aceguá	3	-	-
Pedras Altas	1	2	-
8 de Agosto	1	2	-
Três Lagoas	-	1	2
Pinheiro Machado	2	1	-
V. Residencial	-	3	-
Dario Lassance	-	-	3
La Fertilitá	-	1	2
V. Votorantim	-	3	-
Aeroporto	-	1	2
João Emílio	-	2	1
V. Operária	-	3	-
V. Seival	-	2	1
Hulha Negra	1	2	-
Bagé	3	-	-

Dos gráficos, identifica-se que as máximas concentrações são registradas nos receptores selecionados mais próximos à fonte emissora, sendo mais expressivos na Vila Dario Lassance, onde registrou-se concentração superior à 21% de fração do padrão secundário da qualidade do ar. Nas João Emílio e Seival e nos pontos de monitoramento Três Lagoas, La Fertilitá e Aeroporto registrou-se concentrações máximas que são superiores a 10% de fração do padrão secundário da qualidade do ar.

Utilizando-se a concentração registrada na área de cada núcleo populacional estimou-se a fração de ingestão de SO₂ pelos habitantes em toda a área de estudo: $1,636 \times 10^{-8}$ para o ano de 2011, $1,211 \times 10^{-8}$ para o ano de 2012; $1,318 \times 10^{-8}$ para o ano de 2013. Isto representa que para as emissões consideradas, combinadas com os efeitos da dispersão e remoção, o padrão de exposição ao longo do ano para a

população afetada resulta em eventual inalação de 0,001636 g; 0,001211 g; 0,001318 g; para cada tonelada métrica emitida para cada ano. Portanto, considerando-se emissões contínuas ao longo do ano, a população dos núcleos urbanos estaria exposta à eventual inalação de 1.685 g; 1.247 g; 1.358 g; de SO₂ para cada ano.

4.4.2.2 CONCENTRAÇÕES DE MP

São apresentados os resultados das simulações do modelo matemático subdividindo em valores ranqueados para médias horárias, diárias e anuais, sejam em máximos registrados na grade – resumidamente apresentados nas Tabelas 32 a 34 e Gráficos 95 a 97 - seja em máximos registrados nos receptores.

Tabela 32 - Concentrações ranqueadas de MP - 2011

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	MP_1H_RNK1	396,23	21/12/2011	09:00	244.295	6.506.000	1,06
	MP_1H_RNK2	373,77	25/11/2011	10:00	244.295	6.506.000	1,06
	MP_1H_RNK3	133,82	21/12/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,78
	MP_1H_RNK4	124,54	24/11/2011	10:00	244.295	6.505.000	1,78
	MP_24H_RNK1	33,53	25/01/2011		246.295	6.507.000	1,18
	MP_24H_RNK2	26,02	15/12/2011		246.295	6.507.000	1,18
	MP_24H_RNK3	15,25	04/11/2011		244.295	6.503.000	3,65
	MP_24H_RNK4	15,37	28/04/2011		244.295	6.503.000	3,65
	MP_1ANO	1,27			242.295	6.507.000	2,95

Tabela 33 - Concentrações ranqueadas de MP - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2012	MP_1H_RNK1	298,70	18/04/2012	10:00	246.816	6.502.673	4,18
	MP_1H_RNK2	187,79	04/10/2012	11:00	243.806	6.506.673	1,41
	MP_1H_RNK3	141,88	01/02/2012	10:00	243.806	6.507.673	1,81
	MP_1H_RNK4	125,84	04/02/2012	11:00	243.806	6.507.673	1,81
	MP_24H_RNK1	26,85	04/10/2012		243.806	6.507.673	1,81
	MP_24H_RNK2	21,72	14/02/2012		242.806	6.507.673	2,66
	MP_24H_RNK3	15,41	09/11/2012		244.806	6.504.673	1,90
	MP_24H_RNK4	14,24	15/12/2012		244.806	6.504.673	1,90
	MP_1ANO	0,94			243.806	6.503.673	3,18

Tabela 34 - Concentrações ranqueadas de MP - 2013

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2013	MP_1H_RNK1	215,56	11/06/2013	11:00	242.295	6.503.000	4,58
	MP_1H_RNK2	142,77	27/01/2013	11:00	244.295	6.506.000	1,06
	MP_1H_RNK3	111,76	29/12/2013	08:00	245.295	6.505.000	1,53
	MP_1H_RNK4	100,41	19/05/2013	12:00	245.295	6.505.000	1,53
	MP_24H_RNK1	19,41	28/12/2013		244.295	6.506.000	1,06
	MP_24H_RNK2	15,13	08/01/2013		245.295	6.509.000	2,47
	MP_24H_RNK3	12,16	06/12/2013		245.295	6.508.000	1,47
	MP_24H_RNK4	10,77	08/12/2013		245.295	6.503.000	3,53
	MP_1ANO	1,16			242.295	6.506.000	2,96

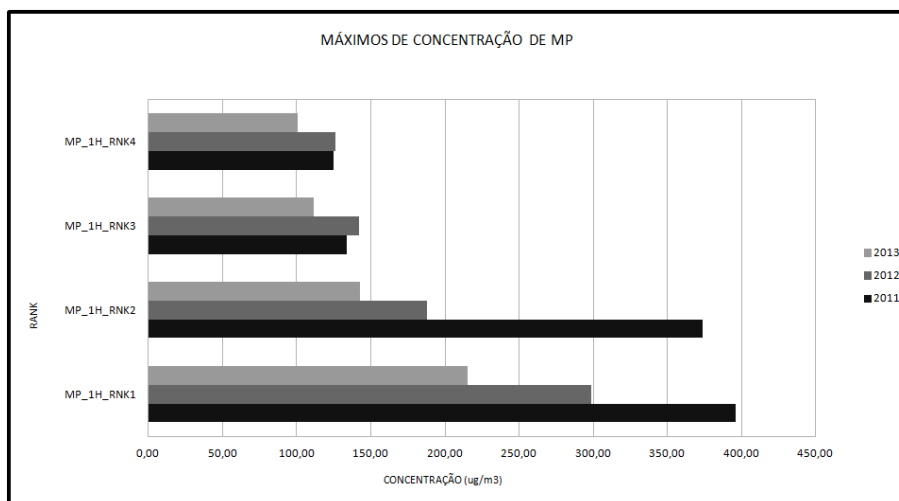


Figura 95 - Máximos valores ranqueados de MP para s médias horárias

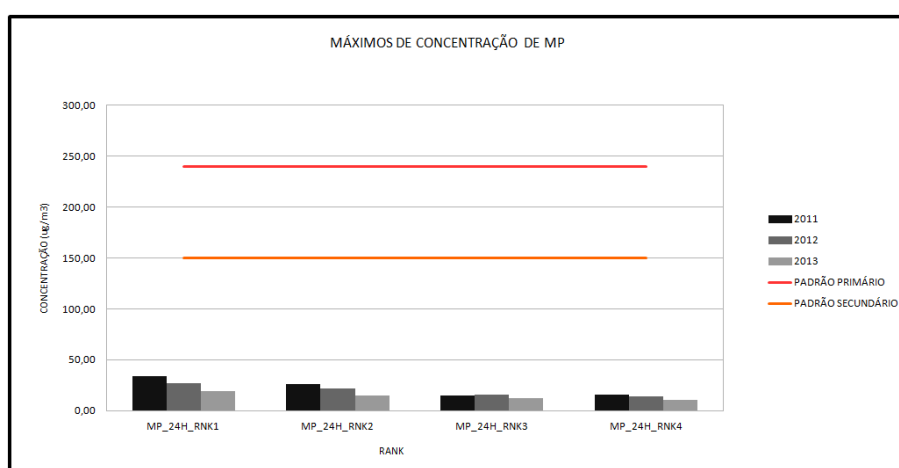


Figura 96 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para s médias diárias

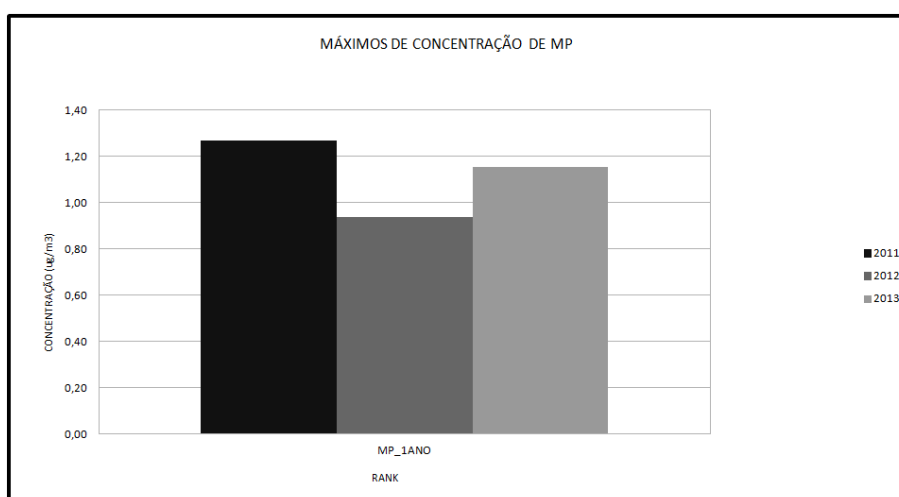


Figura 97 - Máximos valores ranqueados de SO₂ para s médias anuais

4.4.2.2.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL

As Figuras 98 a 100 apresentam as isolinhas de concentração dos valores máximos da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de MP.

Consultar os gráficos Rosas dos Ventos, Altura da Camada Limite Atmosférica e a distribuição das classes de Pasquill-Gifford-Turner (PGT) no Apêndice D.

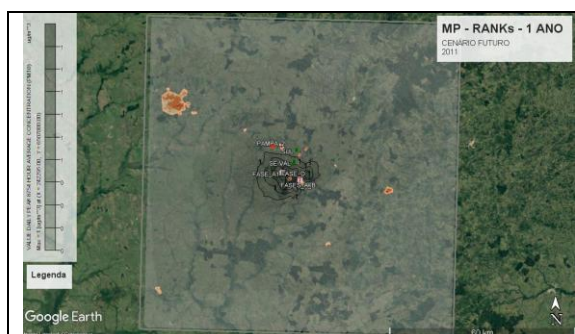


Figura 98 – MP – Isolinhas - 2011

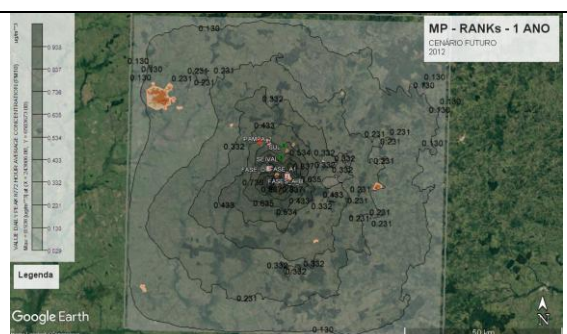


Figura 99 – MP – Isolinhas - 2012



Figura 100 – MP – Isolinhas - 2013

As Figuras 101 a 103 apresentam a distribuição espacial (distanciamento da fonte) das concentrações máximas em cada um dos 10.000 receptores da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de MP.

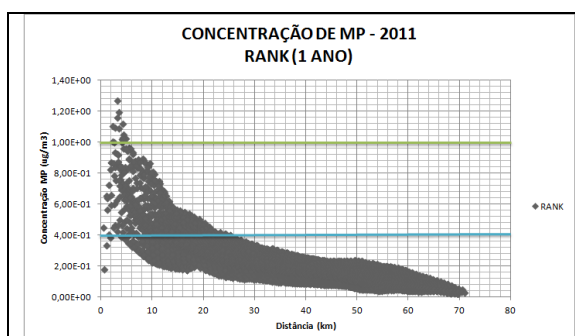


Figura 101-MP-Receptores-2011

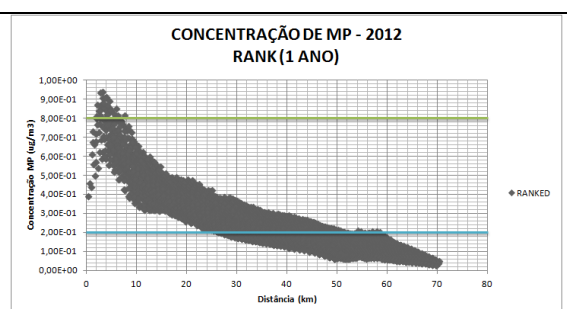


Figura 102 – MP - Receptores-2012

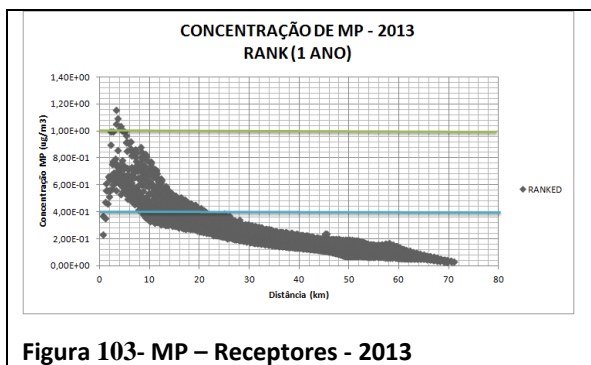


Figura 103- MP – Receptores - 2013

A Tabela 35 resume a interpretação dos gráficos em termos de perímetro de influência de faixas de concentração, tendo como centro da grade a fonte Fase C:

Tabela 35 - Perímetro de influência da média anual de concentração de MP – Cenário Futuro

FAIXA DE CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)	RAIO MÁXIMO DE INFLUÊNCIA (km)
0,4 – 0,8	< 26
0,8 – 1,27	< 8,8

Dos gráficos, identifica-se que os registros de concentrações máximas que são superiores à 2% (i.e 1,0 µg/m³) do padrão primário e secundário da qualidade do ar para parátículas inaláveis (i.e 50 µg/m³) estão contidas no raio de 6,0 km a partir da UTPM. Concentrações inferiores à 2,5% (i.e. 1,25 µg/m³) do padrão primário e secundário de qualidade do ar estão contidas no raio de 8,8 km de distância.

As Figuras 104 a 106 apresentam os valores máximos de concentração registrados em receptores (núcleos urbanos e pontos de monitoramento):

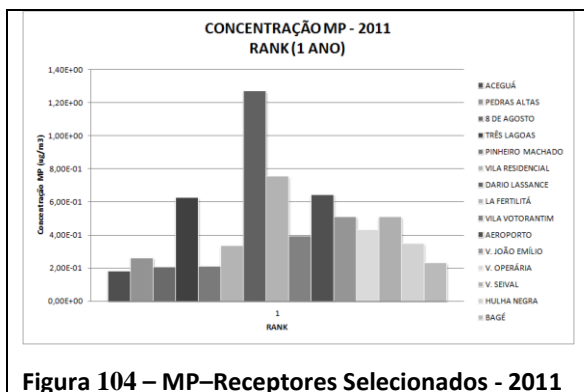


Figura 104 – MP–Receptores Selecionados - 2011

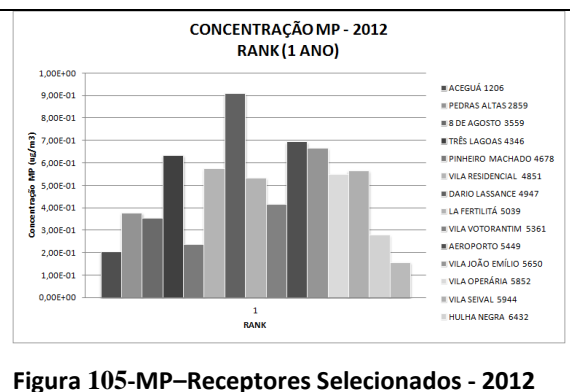


Figura 105-MP–Receptores Selecionados - 2012

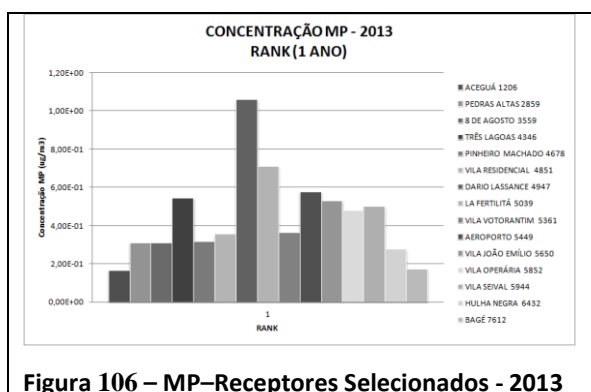


Figura 106 – MP–Receptores Selecionados - 2013

A Tabela 36 resume a interpretação dos gráficos em termos de saturação da média anual de concentração nos receptores selecionados na bacia atmosférica estudada:

Tabela 36 – Registros da média anual de MP por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão primário e secundário.

RECEPTOR	NÚMERO DE REGISTROS DA MÉDIA ANUAL POR FAIXA DE CONCENTRAÇÃO NO PERÍODO ESTUDADO		
	0 – 1,0%	1,0 – 2,0%	2,0 – 2,5 %
	0,0 – 0,5 µg/m ³	0,5 – 1,0 µg/m ³	1,0 – 1,25 µg/m ³
Aceguá	3	-	-
Pedras Altas	3	-	-
8 de Agosto	3	-	-
Três Lagoas	-	3	-
Pinheiro Machado	3	-	-
V. Residencial	2	1	-
Dario Lassance	-	2	1
La Fertilítá	-	3	-
V. Votorantim	3	-	-
Aeroporto	-	3	-
João Emílio	1	2	-
V. Operária	1	2	-
V. Seival	2	1	-
Hulha Negra	3	-	-
Bagé	3	-	-

Dos gráficos, identifica-se que as máximas concentrações são registradas nos receptores selecionados mais próximos à fonte emissora, sendo mais expressivos na Vila Dario Lassance, onde registrou-se concentração superior à 2,5% de fração do padrão primário e secundário da qualidade do ar. Na Vila Residencial, João Emílio, Operária e Seival e nos pontos de monitoramento Três Lagoas, La Fertilitá e Aeroporto registrou-se concentrações máximas entre 1 e 2% de fração do padrão primário e secundário da qualidade do ar.

Utilizando-se a concentração registrada na área de cada núcleo populacional estimou-se a fração de ingestão de MP pelos habitantes em toda a área de estudo: $1,094 \times 10^{-8}$ para o ano de 2011; $8,108 \times 10^{-9}$ para o ano de 2012; $8,816 \times 10^{-9}$ para o ano de 2013;. Isto representa que para as emissões consideradas, combinadas com os efeitos da dispersão e remoção, o padrão de exposição ao longo do ano para a população afetada resulta em eventual inalação de 0,001094 g; 0,0008108 g; 0,0008816 g para cada tonelada métrica emitida. Portanto, considerando-se emissões contínuas ao longo do ano, a população dos núcleos urbanos estaria exposta à eventual inalação de 240,3 g; 178 g; 193,6g; de MP ao ano.

4.4.2.3 CONCENTRAÇÕES DE NO₂

São apresentados os resultados das simulações do modelo matemático subdividindo em valores ranqueados para médias horárias, diárias e anuais, sejam em máximos registrados na grade – resumidamente apresentados nas Tabelas 37 a 42 e Figuras 107 a 110, seja utilizando o método de conversão de NO_x em NO₂ denominado ARM2, conforme discutido no Apêndice C, seja considerando conversão total de NO_x em NO₂ - seja em máximos registrados nos receptores.

Tabela 37 - Concentrações ranqueadas de NO₂ (Método ARM2) - 2011

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	NOX_1H_RNK1	141,12	12/07/2011	14:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK2	140,78	02/08/2011	11:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK3	138,98	08/07/2011	12:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK4	135,26	24/02/2011	10:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1ANO	0,03			242.806	6.507.673	2,66

Tabela 38 - Concentrações ranqueadas de NOx (Conversão Total) - 2011

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2011	NOX_1H_RNK1	268,00	12/07/2011	14:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK2	262,00	02/08/2011	11:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK3	238,00	08/07/2011	12:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1H_RNK4	209,00	24/02/2011	10:00	245.806	6.504.673	1,95
	NOX_1ANO	5,84			242.806	6.507.673	2,66

Tabela 39 - Concentrações ranqueadas de NO₂ (Método ARM2) - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2012	NOX_1H_RNK1	140,39	19/04/2012	12:00	247.806	6.505.673	2,73
	NOX_1H_RNK2	137,95	04/10/2012	12:00	247.806	6.505.673	2,73
	NOX_1H_RNK3	132,70	20/06/2012	13:00	235.806	6.509.673	9,91
	NOX_1H_RNK4	131,32	23/01/2012	10:00	246.806	6.505.673	1,81
	NOX_1ANO	0,003			243.806	6.506.673	1,41

Tabela 40 - Concentrações ranqueadas de NOx (Conversão Total) - 2012

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2012	NOX_1H_RNK1	255,00	19/04/2012	12:00	247.806	6.505.673	2,73
	NOX_1H_RNK2	228,00	04/10/2012	12:00	247.806	6.505.673	2,73
	NOX_1H_RNK3	195,00	20/06/2012	13:00	235.806	6.509.673	9,91
	NOX_1H_RNK4	189,00	23/01/2012	10:00	246.806	6.505.673	1,81
	NOX_1ANO	5,480			243.806	6.506.673	1,41

Tabela 41 - Concentrações ranqueadas de NO₂ (Método ARM2) - 2013

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2013	NOX_1H_RNK1	141,15	10/06/2013	11:00	246.806	6.505.673	1,81
	NOX_1H_RNK2	136,35	10/06/2013	11:00	247.806	6.505.673	2,73
	NOX_1H_RNK3	133,77	01/02/2013	09:00	245.806	6.505.673	1,04
	NOX_1H_RNK4	132,20	11/06/2013	12:00	236.806	6.509.673	8,97
	NOX_1ANO	0,02			243.806	6.507.673	1,81

Tabela 42 - Concentrações ranqueadas de NOx (Conversão Total) - 2013

	PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	DATA/HORA (DD/MM/AAAA)	HORA 00:00	COORDENADAS		DISTÂNCIA DA FONTE (km)
					X (km)	Y (km)	
2013	NOX_1H_RNK1	269,00	10/06/2013	11:00	246.806	6.505.673	1,81
	NOX_1H_RNK2	216,00	10/06/2013	11:00	247.806	6.505.673	2,73
	NOX_1H_RNK3	201,00	01/02/2013	09:00	245.806	6.505.673	1,04
	NOX_1H_RNK4	193,00	11/06/2013	12:00	236.806	6.509.673	8,97
	NOX_1ANO	5,21			243.806	6.507.673	1,81

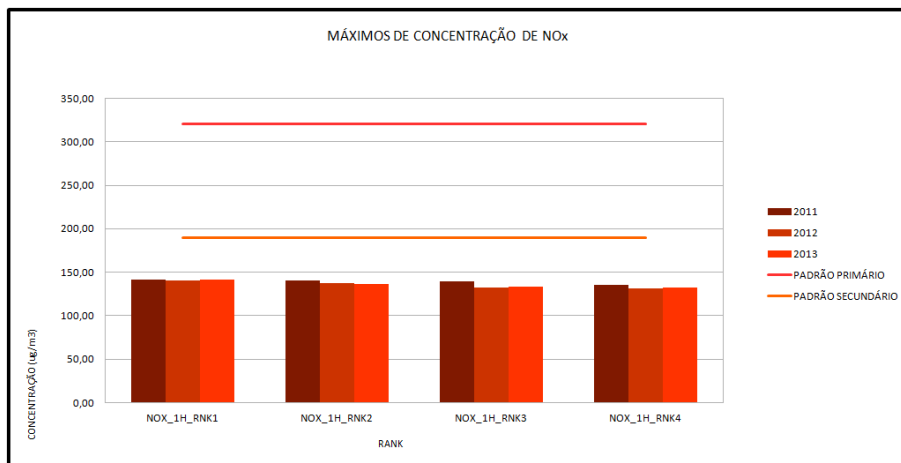


Figura 107 - Máximos valores ranqueados de NO₂ (Método ARM2) para médias horárias

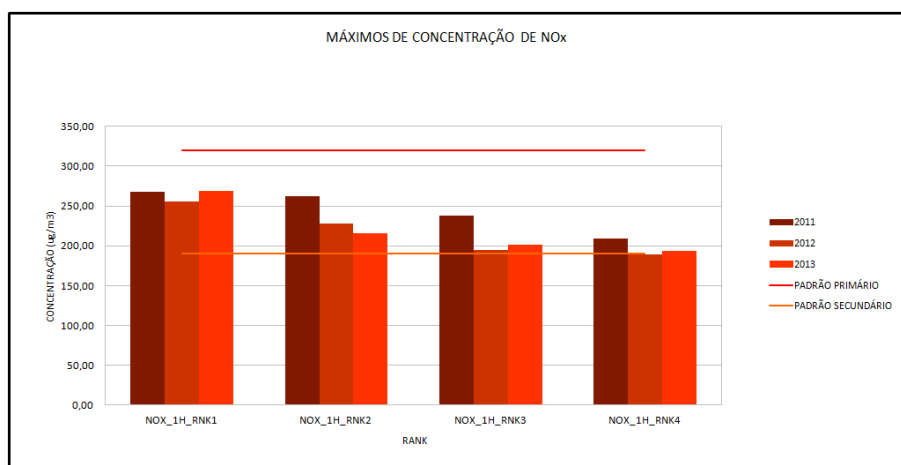


Figura 108 - Máximos valores ranqueados de NO₂ (Conversão Total) para médias horárias

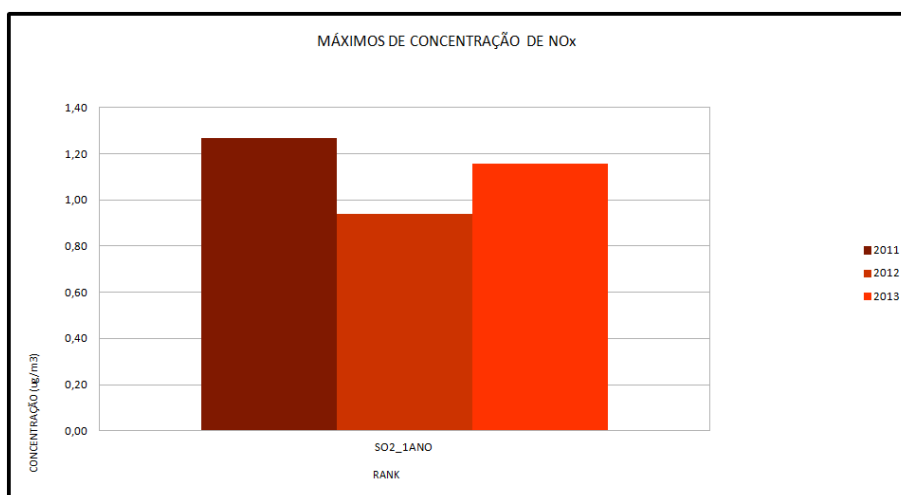


Figura 109 - Máximos valores ranqueados de NO₂ (Método ARM2) para médias anuais

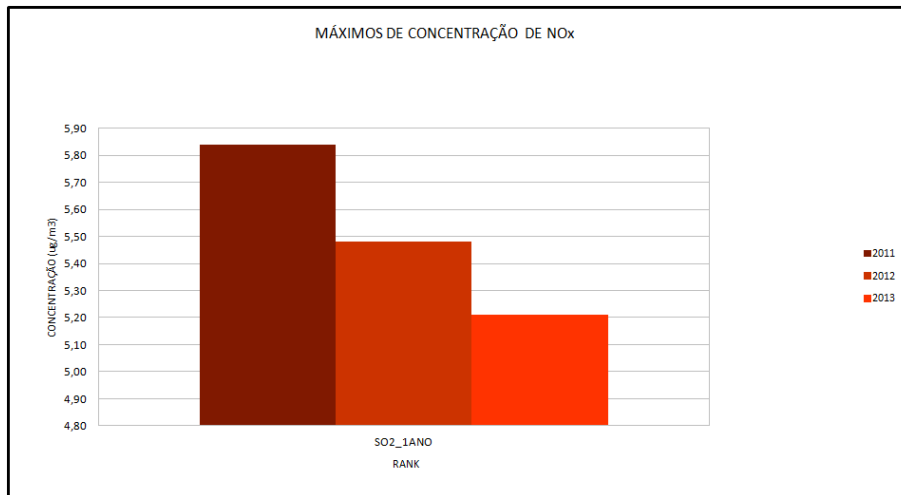


Figura 110 - Máximos valores ranqueados de NO₂ (Conversão Total) para médias anuais

4.4.2.3.1 VALORES RANQUEADOS PARA MÉDIA ANUAL

As Figuras 111 a 113 apresentam as isolinhas de concentração dos valores máximos da grade resultantes das simulações matemáticas de dispersão de NO₂. Consultar os gráficos Rosas dos Ventos, Altura da Camada Limite Atmosférica e a distribuição das classes de Pasquill-Gifford-Turner (PGT) no Apêndice D.

Neste cenário de análise da média anual optou-se por utilizar a conversão total de NOx em NO₂, conforme discutido no Apêndice C.

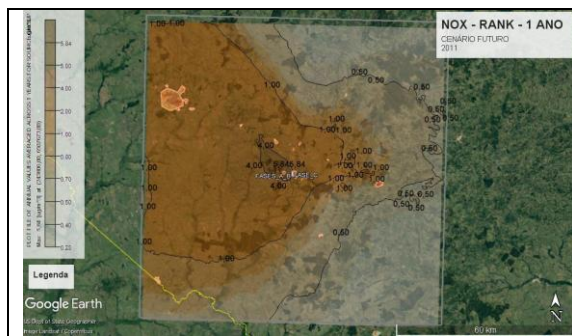


Figura 111 – NO₂ - Isolinhas - 2011

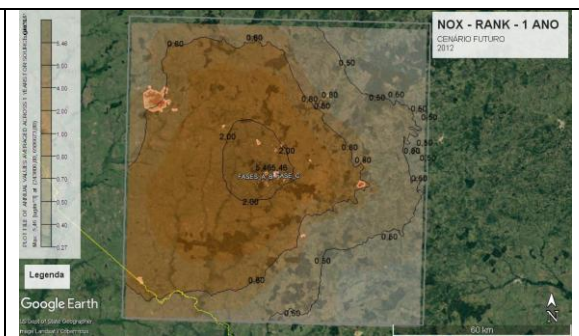


Figura 112 – NO₂ – Isolinhas - 2012

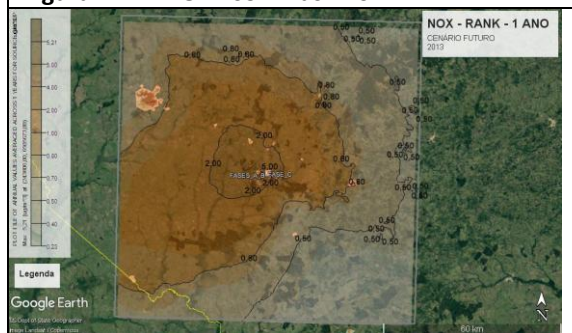
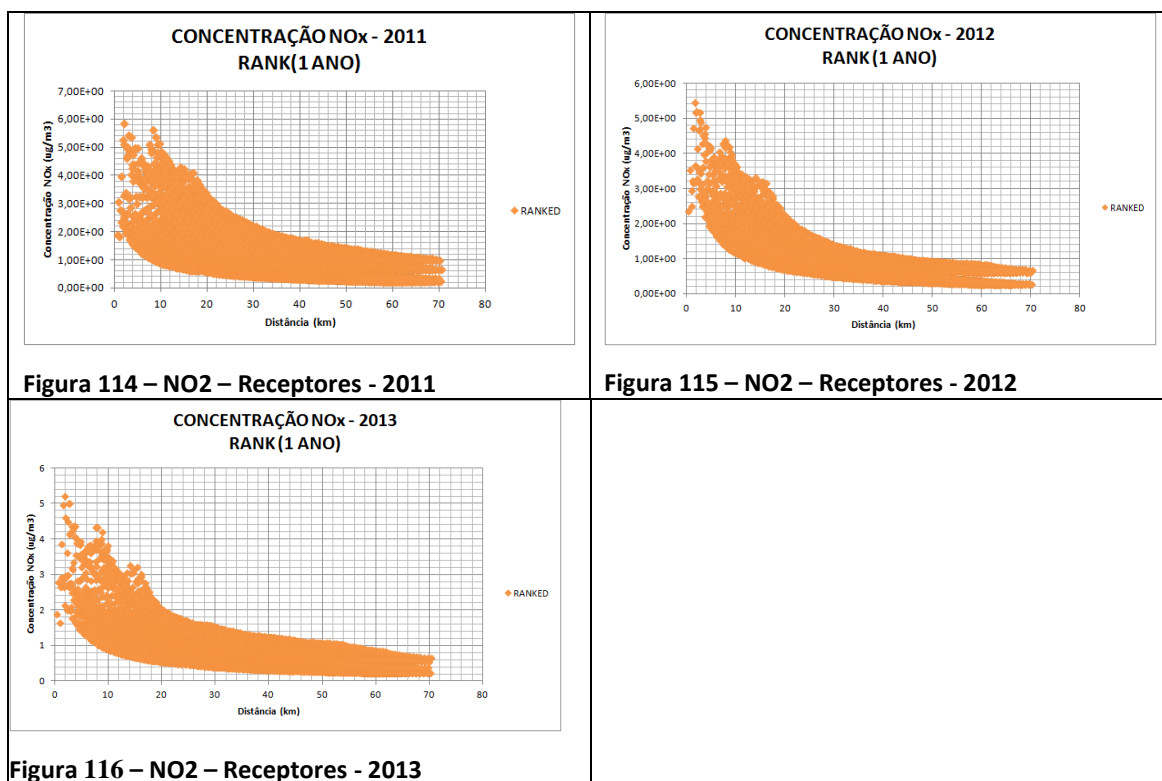


Figura 113 – NO₂ – Isolinhas - 2013

As Figuras 114 a 116 apresentam a distribuição espacial (distanciamento da fonte) das concentrações máximas em cada um dos 10.000 receptores da grade resultantes das simulações matemáticas.



A Tabela 43 resume a interpretação dos gráficos em termos de perímetro de influência de faixas de concentração, tendo como centro da grade a fonte Fase C:

Tabela 43 - Perímetro de influência da média anual de concentração de NO2 – Cenário Atual

FAIXA DE CONCENTRAÇÃO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RAIO MÁXIMO DE INFLUÊNCIA (km)
2,0 – 4,0	< 20
4,0 – 5,84	< 16

Concentrações na faixa de $2,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estão inseridos no raio de 20 km. Concentrações que atingem raio de concentração máxima que são superiores a 5% (i.e $5,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão primário e secundário da qualidade do ar (i.e $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) estão contidas no raio de 2,66 km a partir da UTPM.

As Figuras 117 a 119 apresentam os valores máximos de concentração registrados em receptores (núcleos urbanos e pontos de monitoramento):

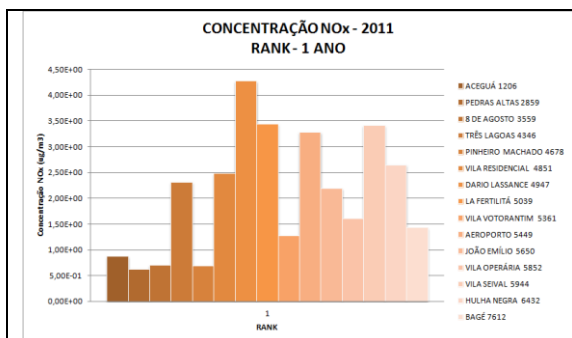


Figura 117 – NO2-Receptores Selecionados-2011

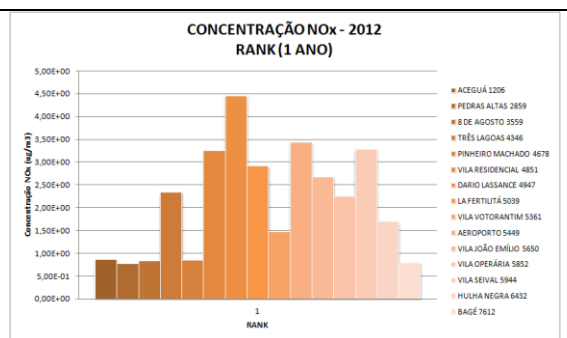


Figura 118– NO2-Receptores Selecionados-2012

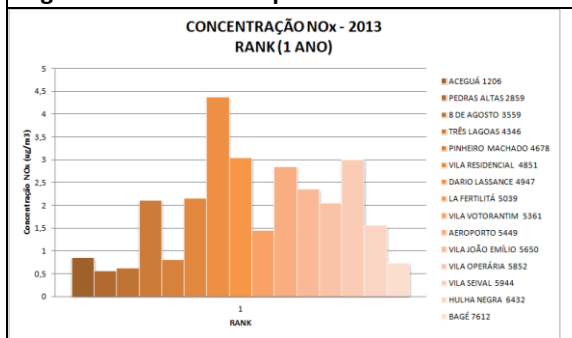


Figura 119 –NO2-Receptores Selecionados-2013

A Tabela 44 resume a interpretação dos gráficos em termos de saturação da média anual de concentração nos receptores selecionados na bacia atmosférica estudada:

Tabela 44 – Registros da média anual de NO₂ por faixa de concentração em receptores selecionados ao longo do período estudado, comparados ao padrão secundário.

RECEPTOR	NÚMERO DE REGISTROS DA MÉDIA ANUAL POR FAIXA DE CONCENTRAÇÃO NO PERÍODO ESTUDADO		
	0 – 2,0%	2,0 – 4,0%	4,0 – 4,5%
	0,0 – 2,0 µg/m ³	2,0 – 4,0 µg/m ³	4,0 – 4,5 µg/m ³
Aceguá	3	-	-
Pedras Altas	3	-	-
8 de Agosto	3	-	-
Três Lagoas	-	3	-
Pinheiro Machado	3	-	-
V. Residencial	-	3	-
Dario Lassance	-	-	3
La Fertilidá	1	3	-
V. Votorantim	3	-	-
Aeroporto	-	3	-
João Emílio	-	3	-
V. Operária	1	2	-
V. Seival	-	3	-
Hulha Negra	2	1	-
Bagé	3	-	-

Dos gráficos, identifica-se que as máximas concentrações são registradas de forma mais espacializada, chegando a serem maiores em receptores distantes das fontes de emissão nos anos de 2011 e 2013.

Utilizando-se a concentração registrada na área de cada núcleo populacional estimou-se a fração de ingestão de NO_x pelos habitantes em toda a área de estudo: $1,156 \times 10^{-7}$ para o ano de 2011; $7,282 \times 10^{-8}$ para o ano de 2012; $6,695 \times 10^{-8}$ para o ano de 2013. Isto representa que para as emissões consideradas, combinadas com os efeitos da dispersão e remoção, o padrão de exposição ao longo do ano para a população afetada resulta em eventual inalação de 0,01156 g; 0,007282 g; 0,006695 g para cada tonelada métrica emitida. Portanto, considerando-se emissões contínuas ao

longo do ano, a população dos núcleos urbanos estaria exposta à eventual inalação de 1.371 g; 863 g; 793,6 g; de NO₂ ao ano.

4.4.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CENÁRIOS

Nesta análise são comparados as respostas do modelo para as simulações das concentrações médias com a finalidade de se traçar um perfil sobre as alterações que ocorrem em escala espacial acerca da distribuição da poluição e as zonas de influência e vulnerabilidade.

Ao compararmos o cenário futuro com o atual, apesar de maior distribuição espacial das fontes de emissão e significativo acréscimo de potência entre os atuais 796 MW para 3.227 MW, ou seja, cerca de 4 vezes mais potência instalada, as taxas de emissão total de SO₂ e MP para a área em estudo serão reduzidas entre os atuais 3.266,1 g SO₂/s e 696,3 g MP/s para futuros 2.578,9 g SO₂/s e 367,7 g MP/s – i.e. cerca de 21% menos SO₂ emitido e 42% menos MP emitidos. Tais alterações só serão possíveis face à modernização do parque termelétrico e dos sistemas de controle ambiental das emissões atmosféricas incorporados a cada unidade geradora. Contudo, para o poluente NO_x, esta tendência é inversa, passando das atuais taxas de emissão de 375,9 g NO_x/s para 1.659,9 g NO_x/s – i.e. acréscimo de aproximadamente 441% da taxa de emissão de NO_x. Mesmo sendo adotados dispositivos de controle das emissões de NO_x nas usinas termelétricas, estes não representam tanta eficiência de abatimento pois este composto é altamente dependente da tecnologia de combustão associada ao processo de geração e à temperatura interna da câmara de combustão.

Ao compararmos os dados das simulações de dispersão de SO₂ para os anos de 2011 a 2013, obtemos:

- Em termos de máximas concentrações horárias para SO₂, observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 40 a 55% na comparação do cenário atual e o futuro;
- Em termos de raios de influência das máximas concentrações horárias de SO₂, observa-se redução de 42% no raio de influência para a faixa de concentração entre 500 e 1.000 µg/m³, passando de 28 km no cenário atual para 16 km no cenário futuro. O raio de influência para a faixa de concentração entre 1.000 e 2.500 µg/m³ reduz de 18 km para 10,0 km entre o cenário atual e o futuro, ou

seja, redução de 44%. Para faixa de concentração superior à $2.500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o raio de influência é de 11,0 km para o cenário atual exclusivamente, atingindo o máximo de 5.246,20 (2011) em raio inferior à 2,0 km.

- Em termos de máximas concentrações diárias para SO_2 , observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 37 a 60% na comparação do cenário atual e o futuro;
- Em termos de raios de influência das máximas concentrações diárias de SO_2 , observa-se redução de 48% no raio de influência para a faixa de concentração entre 50 e $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, passando de 50 km no cenário atual para 26 km no cenário futuro. O raio de influência para a faixa de concentração superior ao padrão secundário regulamentado de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ até a concentração de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reduz de 26 km para 8,1 km entre o cenário atual e o futuro, ou seja, redução de 69%. Para faixa de concentração superior à $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o raio de influência é de 12,0 km para o cenário atual exclusivamente, se observando a violação do padrão primário de $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sendo a máxima de $547,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2011) registrado no raio inferior à 3,0 km;
- Em termos de máximas concentrações anuais para SO_2 , observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 28 a 37% na comparação do cenário atual e o futuro;
- Em termos de raios de influência das máximas concentrações anuais de SO_2 , observa-se redução de 15% no raio de influência para a faixa de concentração entre 2 e $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, passando de 48 km no cenário atual para 42 km no cenário futuro. O raio de influência para a faixa de concentração entre 4 e $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ reduz de 20 km para 16,0 km entre o cenário atual e o futuro, ou seja, redução de 20%. Para faixa de concentração entre 6 e $8,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o raio de influência reduz de 12 km para 9,6 km entre o cenário atual e o futuro, ou seja, redução de 20%. O raio de influência para concentrações que representam superioridade à 21% de saturação (i.e. $8,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão secundário da média anual (i.e. $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ou, 10,5% do padrão primário da média anual (i.e. $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$), encontra-se contido no raio de 6,7 km exclusivamente para o cenário atual, atingindo o máximo de $13,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2011) em raio inferior à 3,2

km, ou seja, 33,2% de saturação do padrão secundário ou 16,6% de saturação do padrão primário.

- Em termos de Fração de Ingestão (FI), contabilizou-se 5.069,0 g de SO₂ no cenário atual, enquanto 4.290 g no cenário futuro, com redução de cerca de 15%

Ao compararmos os dados das simulações de dispersão de MP para os anos de 2011 a 2013, obtemos:

- Em termos de máximas concentrações horárias para MP, observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 54 a 72% na comparação do cenário atual e o futuro;
- Em termos de raios de influência das máximas concentrações horárias de MP, observa-se redução de 78% no raio de influência para a faixa de concentração entre 200 e 400 µg/m³, passando de 23 km no cenário atual para 5 km no cenário futuro. Para faixa de concentração entre 400 e 800 µg/m³, o raio de influência é de 13 km para o cenário atual exclusivamente, sendo para a faixa de concentração entre 800 e 1.000 µg/m³ contida no raio de 4,6 km, atingindo o máximo de 1.128,30 µg/m³ (2011) em raio inferior à 1,06 km.
- Em termos de máximas concentrações diárias para MP, observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 51 a 72% na comparação do cenário atual e o futuro;
- Em termos de raios de influência das máximas concentrações diárias de MP, observa-se redução de 89% no raio de influência para a faixa de concentração entre 25 e 35 µg/m³, passando de 25 km no cenário atual para 2,8 km no cenário futuro. Para faixa de concentração superior à 35 µg/m³ até 100 µg/m³, o raio de influência é de 12,0 km para o cenário atual exclusivamente, se observando máxima de 120,02 µg/m³ (2011) registrado no raio inferior à 1,0 km;
- Em termos de máximas concentrações anuais para MP, observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 49 a 54% na comparação do cenário atual e o futuro;

- Em termos de raios de influência das máximas concentrações anuais de MP, observa-se redução de 50% no raio de influência para a faixa de concentração entre 0,4 e 0,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, passando de 52 km no cenário atual para 26 km no cenário futuro. O raio de influência para a faixa de concentração entre 0,8 e 1,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ reduz de 12 km para 8,8 km entre o cenário atual e o futuro, ou seja, redução de 27%. O raio de influência para concentrações que representam superioridade à 2,54% de saturação (i.e. 1,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) do padrão primário e secundário da média anual de MP inalável (i.e. 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), encontra-se contido no raio de 6,0 km exclusivamente para o cenário atual, atingindo o máximo de 2,78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2011) em raio inferior à 2,98 km, ou seja, 5,56% de saturação do padrão primário e secundário.
- Em termos de Fração de Ingestão (FI), contabilizou-se 1.072,0 g de MP no cenário atual, enquanto 611,9 g no cenário futuro, com redução de cerca de 42%.

Ao compararmos os dados das simulações de dispersão de NOx para os anos de 2011 a 2013, obtemos:

- Em termos de máximas concentrações horárias para NOx, observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há redução entre 19 e 72% na comparação do cenário atual e o futuro para conversão com método ARM2 e entre 52 e 142% na comparação do cenário atual e o futuro para conversão total. A diferenciação maior entre cenários ocorre na comparação do 4º maior valor do ranque;
- Em termos de raios de influência das máximas concentrações horárias de NOx, observa-se elevação de 21% no raio de influência para a faixa de concentração superior à 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, passando de 23 km no cenário atual para 29 km no cenário futuro com conversão pelo método ARM2. Para faixa de concentração entre 190 e 320 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o raio de influência é de 13 km para o cenário atual exclusivamente, atingindo o máximo de 795,51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2011) em raio inferior à 4,01 km.
- Em termos de máximas concentrações anuais para NOx, observa-se para os 4 primeiros valores ranqueados por ano que há elevação de 374 a 512% na comparação do cenário atual e o futuro para conversão total;

- Em termos de raios de influência das máximas concentrações anuais de NO_x, observa-se redução de 865% no raio de influência para a concentração de 1,0 µg/m³, passando de 6,7 km no cenário atual para 58 km no cenário futuro com conversão total. O raio de influência para concentrações que representam superioridade à 5% de saturação (i.e. 5,0 µg/m³) do padrão primário e secundário da média anual de NO₂ (i.e. 100 µg/m³), encontra-se contido no raio de 8,9 km exclusivamente para o cenário futuro, atingindo o máximo de 5,84 µg/m³ (2011) em raio inferior à 2,66 km, ou seja, 5,84% de saturação do padrão primário e secundário.
- Em termos de Fração de Ingestão (FI), contabilizou-se 585,4 g de NO_x no cenário atual, enquanto 3.072,6 g no cenário futuro, com elevação de cerca de 524%.

Em relação às Frações de Ingestão (FI), ao compararmos as escalas de grandeza estimadas na ordem de 10⁻⁸ e 10⁻⁹ com referenciais científicos e metodológicos utilizados neste trabalho (Smith, 1993; Evans et al, 2002; Levy et al., 2002; Zhou et al., 2003), conclui-se que estas estão de duas a três ordens de magnitude inferiores. Há várias razões para serem consideradas.

Apesar das altas taxas de emissão de poluentes registradas para as fontes inseridas na região de estudo, esta possui baixa densidade demográfica, reduzindo o grau de exposição total dos indivíduos. Mesmo exposto à baixas concentrações de poluentes no ar, os maiores índices foram registrados em Bagé/RS, considerando que este município representa cerca de 87% da população total estudada. Logo, deve-se observar que o IF só é diretamente relevante para avaliações de risco de saúde populacional se o risco é proporcional à concentração ambiente – sem qualquer não linearidades ou limiares.

Outro fator importante é a área de abrangência do estudo. Enquanto Levy et al. (2002) utilizou uma grade computacional de aproximadamente 750 x 750 km contendo população de aproximadamente 33 milhões e Zhou et al (2003) utilizou 3.360 x 3.360 km com população de cerca de 1,1 bilhão de pessoas, o presente trabalhou se restringiu à 100 x 100 km de malha computacional com população residente de aproximadamente 131 mil habitantes.

Em termos de Índice de Pressão Ambiental (IPA), compara-se os efeitos de dispersão dos poluentes atmosféricos do cenários atual e futuro, adotando-se as equações discutidas no tópico 2.4.2, para os raios de influência de 1,0, 5,0, 10,0 ; 20,0 e 40,0 km na grade, tendo como centro a fonte da Fase C, utilizando-se as respostas das simulações para as médias anuais de concentração.

Os pesos para SO₂, MP₁₀ e NO₂ foram estimados em 4,75 SO₂; 3,8 MP₁₀ ; 1,9 NO₂, totalizando 10,5.

$$W_i = \frac{\sum C_{\text{padrão}}}{C_{\text{padrão}_i}} \quad (\text{eq. 11})$$

Os padrões de qualidade do ar utilizados são aqueles regulamentados para médias anuais conforme Resolução CONAMA n° 03/90, sendo o somatório dos padrões equivalente à 190 µg/m³. Portanto, 190/40 = 4,75 SO₂; 190/50 = 3,8 MP₁₀; 190/100 = 1,9 NO₂. Como o poluente atmosférico cuja menor concentração de padrão regulamentado é aquele com maior toxicidade ao meio ambiente, este tem peso maior diante dos demais. Representa-se, portanto, que em ordem de grandeza concentrações de SO₂ são exercem maior pressão ambiental do que as de MP₁₀ e NO₂, sucessivamente.

Os índices de saturação total para cada raio de influência são definidos pela multiplicação do peso total (10,5) pela distância. Assim, tem-se:

- IPA_{Sat 1,0 km} = 10,5
- IPA_{Sat 5,0 km} = 52,25
- IPA_{Sat 10,0 km} = 105,0
- IPA_{Sat 20,0 km} = 210,0
- IPA_{Sat 40,0 km} = 420,0

As médias das concentrações registradas nos receptores contidos em cada arco de raio para cada poluente atmosférico estudado são sumarizadas nas Tabelas 45 a 47:

Tabela 45 – Concentrações médias de SO₂ por raio de influência

		SO ₂					
		RAIO					
		(km)					
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00	
2011	ATUAL	4,65	6,87	4,22	2,7	1,51	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)
	FUTURO	3,37	4,54	3,26	2,23	1,22	
2012	ATUAL	4,77	6,54	4,46	3,01	1,7	
	FUTURO	3,93	4,77	3,6	2,49	1,37	
2013	ATUAL	3,52	6,35	4,23	2,82	1,54	
	FUTURO	3,18	4,53	3,37	2,33	1,25	

Tabela 46 - Concentrações médias de MP10 por raio de influência

		MP					
		RAIO					
		(km)					
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00	
2011	ATUAL	0,99	1,45	0,887	0,571	0,319	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)
	FUTURO	0,494	0,673	0,479	0,319	0,174	
2012	ATUAL	1,01	1,37	0,936	0,638	0,36	
	FUTURO	0,566	0,699	0,517	0,356	0,196	
2013	ATUAL	0,739	1,34	0,893	0,597	0,328	
	FUTURO	0,454	0,666	0,485	0,333	0,179	

Tabela 47 - Concentrações médias de NOx por raio de influência

		NO ₂					
		RAIO					
		(km)					
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00	
2011	ATUAL	0,504	0,802	0,487	0,31	0,171	CONCENTRAÇÃO (µg/m ³)
	FUTURO	2,99	2,57	2,14	1,43	0,795	
2012	ATUAL	0,549	0,778	0,522	0,346	0,193	
	FUTURO	3,5	2,8	2,1	1,35	0,75	
2013	ATUAL	0,393	0,752	0,496	0,325	0,176	
	FUTURO	2,94	2,49	2,01	1,3	0,718	

As Tabelas 48 a 50 resumem os índices de saturação do padrão regulatório para cada poluente atmosférico estudado em cada arco de raio:

Tabela 48 – Índice de saturação do padrão regulatório de SO₂ por raio de influência

		SO ₂					
		RAIO					
		(km)					
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00	
2011	ATUAL	11,63%	17,18%	10,55%	6,75%	3,78%	SATURAÇÃO (%)
	FUTURO	8,43%	11,35%	8,15%	5,58%	3,05%	
2012	ATUAL	11,93%	16,35%	11,15%	7,53%	4,25%	
	FUTURO	9,83%	11,93%	9,00%	6,23%	3,43%	
2013	ATUAL	8,80%	15,88%	10,58%	7,05%	3,85%	
	FUTURO	7,95%	11,33%	8,43%	5,83%	3,13%	

Tabela 49 - Índice de saturação do padrão regulatório de MP10 por raio de influência

		MP					
		RAIO					
		(km)					
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00	
2011	ATUAL	1,98%	2,90%	1,77%	1,14%	0,64%	SATURAÇÃO (%)
	FUTURO	0,99%	1,35%	0,96%	0,64%	0,35%	
2012	ATUAL	2,02%	2,74%	1,87%	1,28%	0,72%	
	FUTURO	1,13%	1,40%	1,03%	0,71%	0,39%	
2013	ATUAL	1,48%	2,68%	1,79%	1,19%	0,66%	
	FUTURO	0,91%	1,33%	0,97%	0,67%	0,36%	

Tabela 50 - Índice de saturação do padrão regulatório de NO₂ por raio de influência

		NO ₂					
		RAIO					
		(km)					
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00	
2011	ATUAL	0,50%	0,80%	0,49%	0,31%	0,17%	CONCENTRAÇÃO (ug/m ³)
	FUTURO	2,99%	2,57%	2,14%	1,43%	0,80%	
2012	ATUAL	0,55%	0,78%	0,52%	0,35%	0,19%	
	FUTURO	3,50%	2,80%	2,10%	1,35%	0,75%	
2013	ATUAL	0,39%	0,75%	0,50%	0,33%	0,18%	
	FUTURO	2,94%	2,49%	2,01%	1,30%	0,72%	

Em termos de saturação da média anual do padrão regulatório da bacia atmosférica da região de estudo, pode-se concluir que o maior impacto para todos os poluentes se concentra no raio de 10 km, sendo o raio de 5,0 km aquele com maiores índices.

Em termos comparativos entre o cenário atual e o futuro, aplicando-se análise de diferença relativa, obtêm-se os gráficos apresentados nas Figuras 120 a 122.

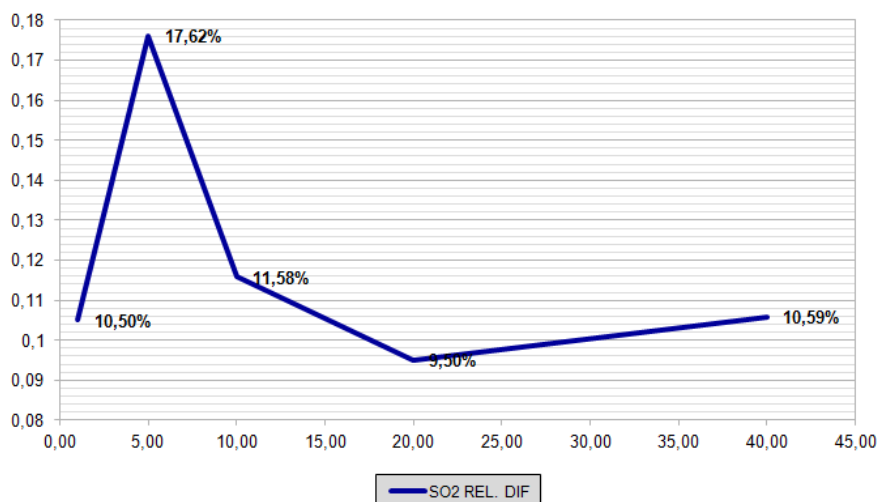


Figura 120 – Diferença relativa entre os índices de saturação do padrão regulatório de SO₂ entre o Cenário Atual e Futuro

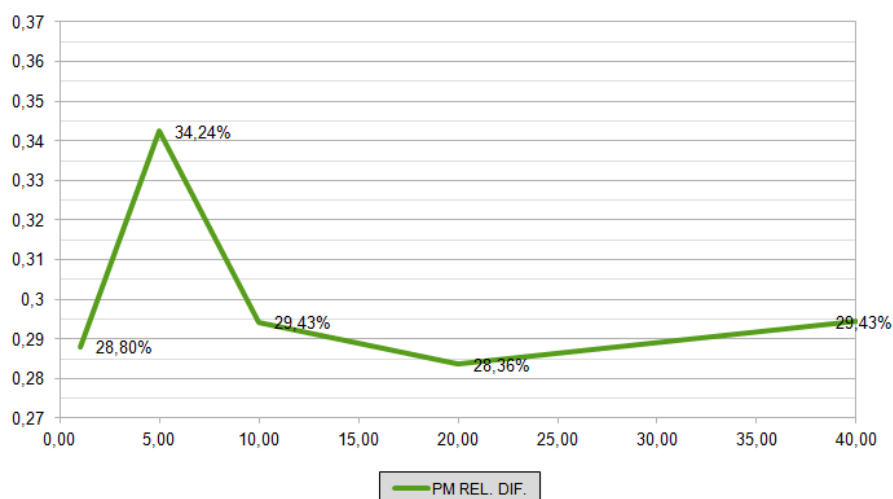


Figura 121 - Diferença relativa entre os índices de saturação do padrão regulatório de MP₁₀ entre o Cenário Atual e Futuro

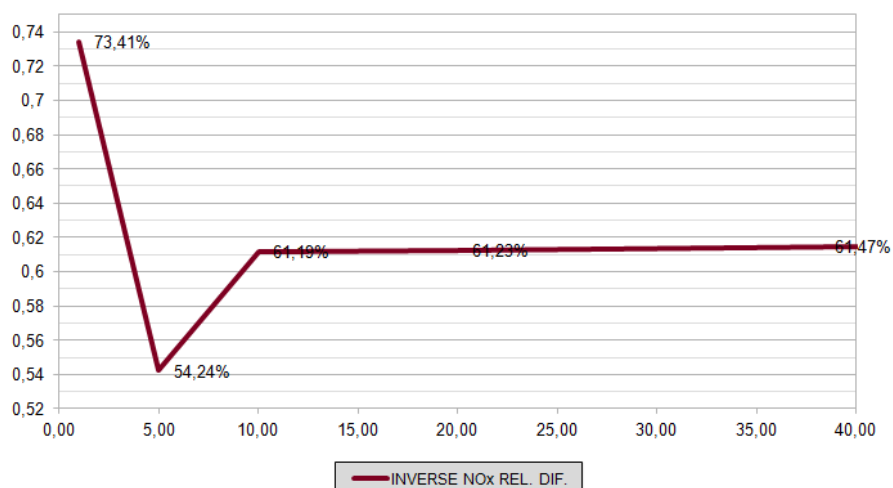


Figura 122 - Diferença relativa entre os índices de saturação do padrão regulatório de NO₂ entre o Cenário Futuro e o Atual

A diferença relativa entre o cenário cujos índices são maiores - cenário atual para SO_2 e MP_{10} ; cenário futuro para NO_2 – para o cenário cujos índices são menores permite interpretar a alteração percentual entre a saturação do padrão regulatório em cada raio de influência estudado.

Desta forma, é notório observar que tanto para SO_2 como para MP_{10} a região contida no raio de 5,0 km do centro da grade mantém magnitude superior de impactos provocados no cenário atual em comparação com o cenário futuro em função das altas taxas de emissão da UTPM. Note-se que a diferença relativa no raio de 20,0 km é a mais reduzida, pois justamente entre 5,0 e 20,0 km do centro da grade prevê-se a instalação de novas fontes, devendo-se considerar ainda a adequação da Fase B e a instalação das Fases A adequada e D no raio de 5,0 km, atenuando a correlação entre cenários. Ademais, observa-se que até o raio de 40,0 km a diferença relativa tem uma sutil elevação daquela registrada no raio de 20,0 km, consolidando a interpretação de ser o atual cenário mais impactante em termos de distribuição espacial de SO_2 e MP_{10} .

Para o composto NO_2 , a relação é distinta. As novas fontes a serem instaladas no raio de 5,0 km, somadas à Fase C e à adequação da Fase B, contribuem com cerca de 60% de toda a emissão do composto na grade computacional para o cenário futuro. Desta forma, constata-se grande contribuição no raio de 1,0 km. Entretanto, para o raio de 5,0 km do centro da grade tem-se uma redução da diferença relativa, indicando que o maior impacto do cenário atual se encontra neste setor. Ao se constatar a elevação da diferença relativa para os raios de 10,0, 20,0 e 40,0 km sucessivamente, conclui-se que as fontes contidas no raio de 10,0 a 20,0 km, somadas às demais do cenário futuro, promovem maior distribuição espacial de NO_2 na área estudada.

Na busca de interpretar qual cenário exerce maior impacto ambiental na região face às alterações dos índices de saturação do padrão regulatório para os distintos poluentes atmosférico, aplicou-se o método do Índice de Pressão Ambiental (IPA), que permite avaliar o sinergismo dos impactos provocados pelos distintos poluentes atmosféricos em uma relação linear. A Tabela 51 sumariza os IPAs estimados para cada cenário em cada raio de influência para cada ano e a média em termos absolutos e percentuais.

Tabela 51 – Índice de Pressão Ambiental por raio de influência

		IPA RAIO (km)				
		1,00	5,00	10,00	20,00	40,00
2011	ATUAL	0,637004	4,706253	5,7779	7,39822	8,27222
	FUTURO	0,494542	3,195515	4,64189	6,32453	6,92816
2012	ATUAL	0,653629	4,477635	6,10679	8,24999	9,31608
	FUTURO	0,576204	3,363808	5,06692	6,96787	7,67334
2013	ATUAL	0,481631	4,350953	5,796045	7,72844	8,44588
	FUTURO	0,467989	3,179318	4,752375	6,53391	7,02734
IPASAT		10,45	52,25	104,5	209	418
MÉDIO	ATUAL	0,590754	4,511613	5,893578	7,792217	8,67806
	FUTURO	0,512911	3,246213	4,820395	6,60877	7,209613
	ATUAL%	5,65%	8,63%	5,64%	3,73%	2,08%
	FUTURO%	4,91%	6,21%	4,61%	3,16%	1,72%

A Figura 123 apresenta o índice percentual do grau de saturação da bacia atmosférica por raio de influência para ambos cenários, conforme IPA estimado neste trabalho.

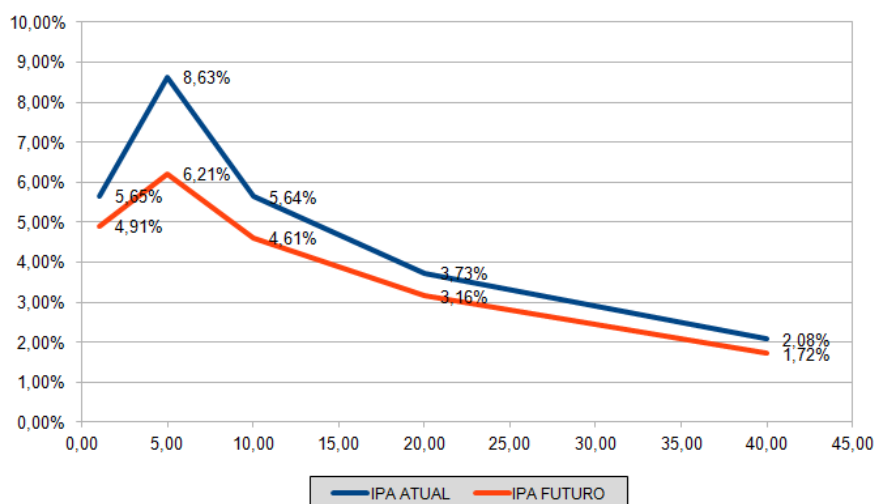


Figura 123 – IPA por raio de influência (km)

Conclui-se a partir dos dados reportados que o cenário atual provoca maior impacto ambiental em todos os raios de influência, assumindo-se o IPA como indicador de tomada de decisão para esta conclusão.

Notório observar que a partir de 20,0 km de distância os IPAs possuem escalas de grandeza muito próximas, podendo-se auferir com a alteração entre cenários atual e futuro que a zona de maior pressão ambiental - contida no raio de 20,0 km - terá

maior redução de impacto em termos proporcionais do que a zona de menor pressão – além do raio de 20,0 km.

Se avaliarmos a saturação cumulativa ao longo da grade computacional encontramos índices de 25,73% para o cenário atual e 20,62% para o cenário futuro, conforme Figura 124.

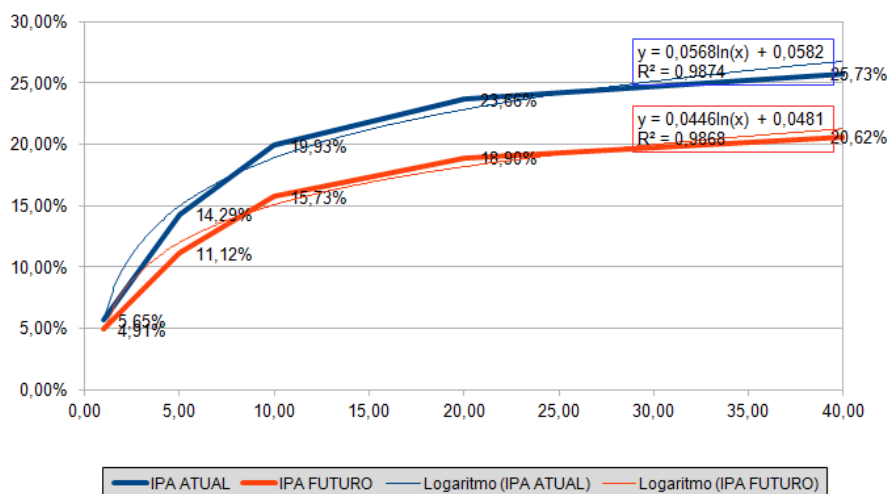


Figura 124 – IPA cumulativo por raio de influência (km)

4.4.4 TESTE DE SENSIBILIDADE E PERFORMANCE DO MODELO

No presente tópico são avaliadas as respostas do modelo matemático para os dias em que de acordo com os registros da rede de monitoramento da qualidade do ar ocorreram violações dos padrões regulamentados. Desta forma, apenas é possível avaliar as respostas do Cenário Atual.

Como análise de sensibilidade e teste de performance, propõe-se o seguinte roteiro:

- Análise das respostas dos registros de velocidade e direção dos ventos e das simulações para configuração da Camada Limite Atmosférica e das Classes de Estabilidade PGT do dia em avaliação;
- Comparação entre os registros de taxas de emissão do sistema de monitoramento contínuo do complexo UTPM com aqueles valores máximos permitidos pelo licenciamento e utilizados no modelo matemático;

- c) Comparação entre os registros de qualidade do ar na Estação de Monitoramento em que houve violação do padrão regulamentado com as respostas do modelo para aquele receptor;
- d) Testes de Tendência Fracionada (FB), Média Geométrica da Tendência (MG), Erro Quadrático Médio Normalizado (NMSE), Variância Geométrica (VG) e o Fator Preditivo contido em Fator de Dois (FAC2) são aplicados aos registros da estação de monitoramento em comparação aos registros do modelo, permitindo avaliar a performance em simular condições reais. Para este teste serão consideradas aproximações de escala geográfica entre o ponto de monitoramento e o ponto registrado como máxima concentração pelas simulações, considerando que estas concentrações simuladas estão no raio de influência da Estação de Monitoramento (~ 5,0 km).

O Apêndice I apresenta os resultados detalhados em formato de relatório.

Da análise comparativa de cenários identifica-se que a maioria dos registros de violação do padrão secundário de qualidade do ar para SO₂ foi na Estação Candiota (localizada na Vila Dario Lassance), justamente nas imediações da UTPM.

Para aqueles registros do 1º e 4º trimestres de cada ano, observou-se a influência de ventos provenientes do quadrante Leste, com registro de calmarias e/ou ventos fracos. Para aqueles que ocorreram no 2º ou 3º trimestre, os ventos também foram predominantes do quadrante Leste, sendo a velocidade oscilando entre calmarias à ventos moderados.

É relevante apontar que para todos os cenários o registro de médias horárias ocorreram quando da CLA acima da altura das fontes de emissão da UTPM, sendo mais expressivas no período diurno quando as classes PGT são instáveis ou neutras.

A despeito de ser praticamente impossível comparar os dados de taxas de emissões atmosféricas com aqueles utilizados no modelo, é possível afirmar a boa resposta das simulações em termos de distribuição espacial da pluma de poluentes na região que influenciam as estações avaliadas. Ademais, aplicando-se métodos de teste de performance foi possível concluir que o modelo é aplicável dentro de fatores de 2 dos testes e que portanto pode ser utilizado tanto para prognóstico como para diagnóstico, em havendo disponibilidade de dados meteorológicos do modelo de

meso-escala WRF, possibilitando refinamento caso os dados das taxas de emissão aplicados na simulação sejam o mais próximos dos dados reais.

As Figuras 125 a 129 apresentam os resultados em escala gráfica para cada teste de performance aplicado, sendo reportadas considerações em termos dos valores absolutos obtidos por cada método.

Para o FB obteve-se todos os valores absolutos dentro dos limites inferiores (subestimado) e superiores (superestimado) do método. A maior frequência de valores absolutos esteve entre -0,67 e +0,67, indicando tendências abaixo do fator de dois, critério para aprovação do modelo.

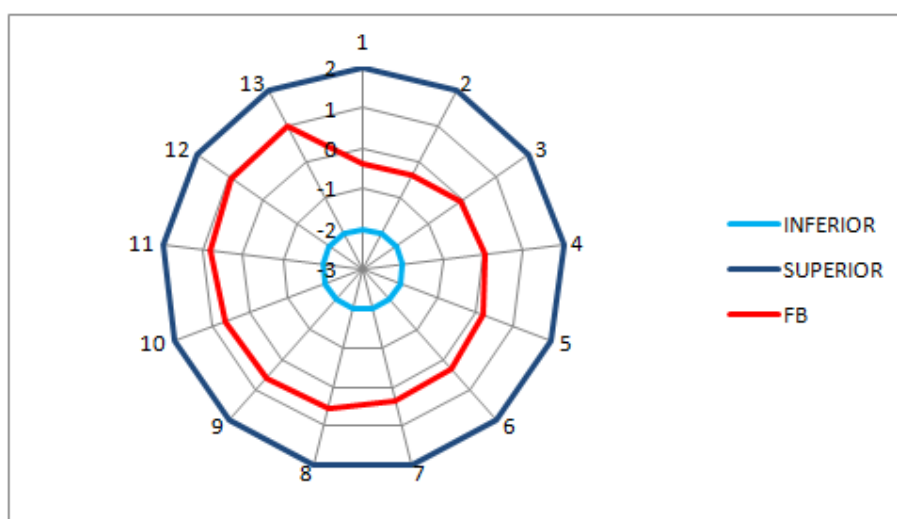


Figura 125 – Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método FB

Para o MG obteve-se três valores acima do limite superior +2,0, indicando para estes três cenários subestimativa dos dados preditivos por fator de dois, critério para aprovação do modelo.

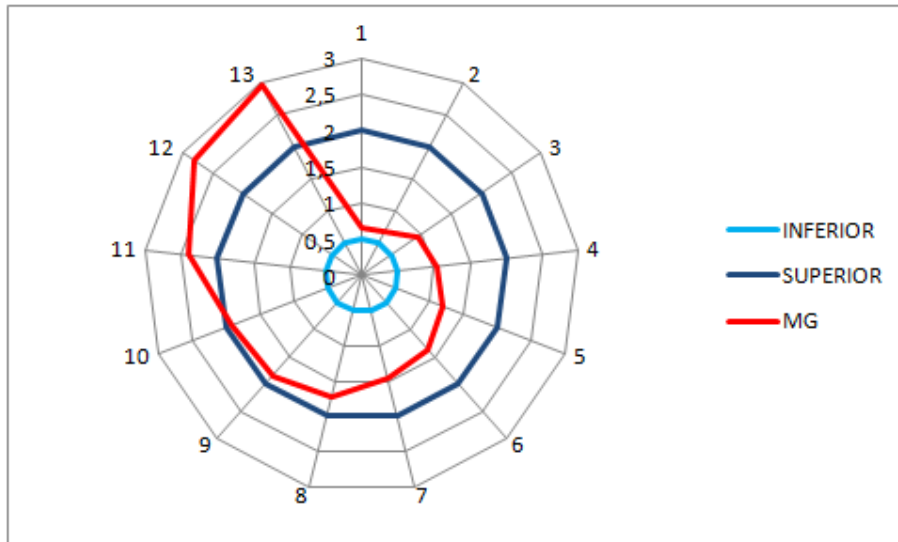


Figura 126 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método MG

Para o VG obteve-se três valores acima do limite superior de +1,6, indicando para estes três cenários fator de tendência da média superior à dois, critério para aprovação do modelo.

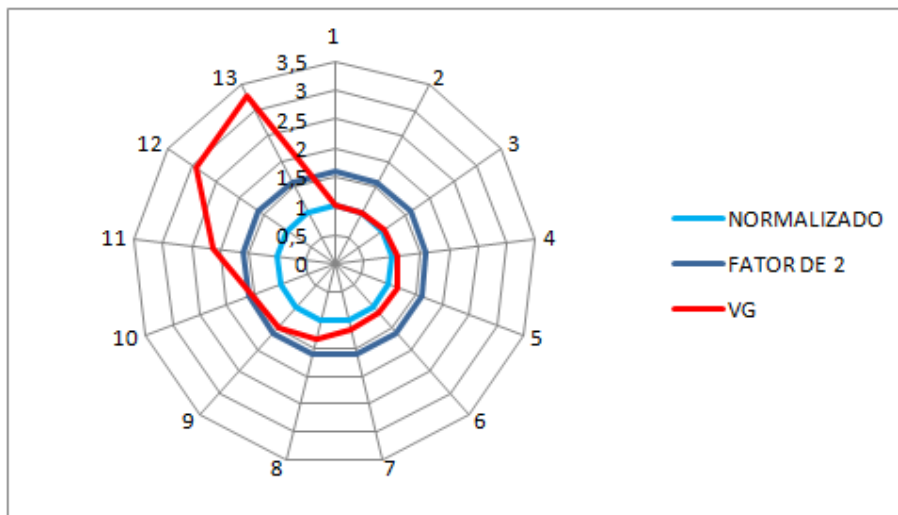


Figura 127 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método VG

Para o NMSE obteve-se dois valores acima do limite superior de +1,0, indicando para estes dois cenários fator de não normalização do modelo. Valores mais próximos à 0,0 indicam tendência à normalização do modelo.

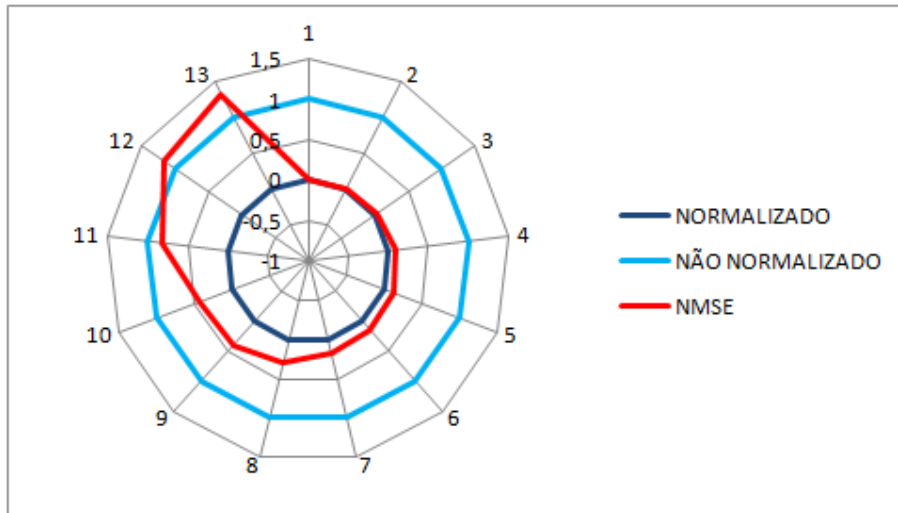


Figura 128 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método NMSE

Para o FAC2 obteve-se dois valores abaixo do limite inferior de 0,0. Como 50% ou mais dos valores absolutos obtidos estão contidos entre os limites inferiores e superiores, pode-se considerar que o modelo é aplicável dentro do fator de dois, critério para aprovação do modelo.

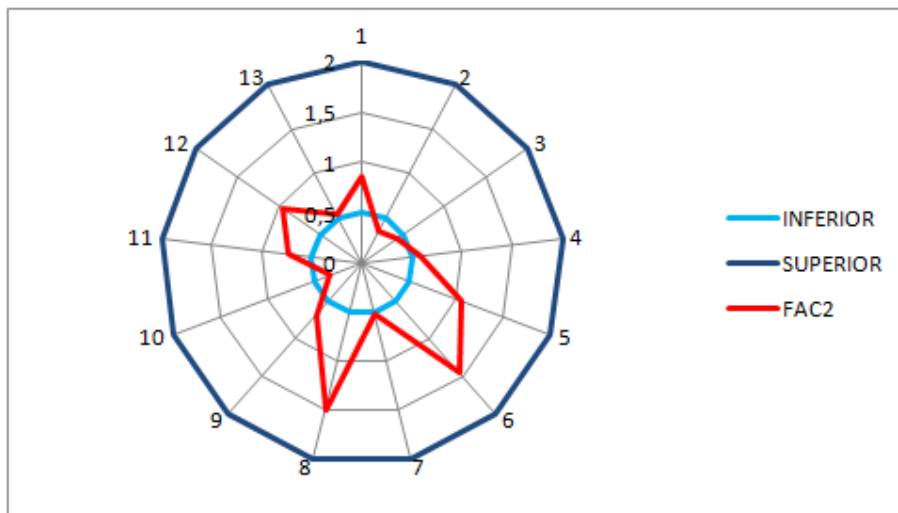


Figura 129 - Distribuição dos valores absolutos obtidos pelo método FAC2

5 CONCLUSÕES

A Grande Jazida Candiota detém a maior reserva de carvão mineral do país em termos de volume por área. Razoável admitir que por mais de um século este minério seja extraído de modo que o território se transforme culturalmente acerca de suas relações para com o uso da terra, assumindo-se os benefícios e malefícios que advém.

Desde a década de 1950 a geração termelétrica a carvão se estabeleceu localmente, proporcionando o assentamento de núcleos populacionais no entorno imediato. Se considerarmos a atual modernização e expansão do parque gerador, sem relevarmos discussões sobre efeitos ambientais extremos e alternâncias nos modos de produção e consumo da sociedade, é suficientemente admissível que tanto a atividade extrativista – i.e. mineração de carvão – como a produtiva – i.e. geração de energia elétrica - se estenderá por no mínimo mais 35 anos, ou seja, até aproximadamente à década de 2.050.

Consideremos que naquele passado quando a UTE Candiota I iniciou sua operação, pouco ou irrelevante interesse sobre questões ambientais relacionados à cadeia de produção e seus impactos na saúde do meio eram tão relevantes ou significativos como o é cientificamente nos dias atuais. Fácil é assumir que núcleos populacionais se desenvolvessem no entorno imediato ao local de trabalho e alavancador de renda. Esta ainda continua uma realidade presente não só a nível local, mas em escalas enfrentadas por todos os grandes empreendimentos atualmente submetidos ao Licenciamento Ambiental Federal.

Tendo estas bases como premissas, o presente estudo não só revela como a poluição atmosférica se distribuí em todos os 10.000 receptores discretos de uma malha computacional de 100 x 100 km tendo como centro as usinas da UTPM, como também alerta para a preocupação quanto às conseqüências de exposição da população residente nas proximidades das usinas termoelétricas inseridas ou planejadas para a região. Em outros termos, quantificar o quão uma política de uso e ocupação do solo pode estar associada à decisões coletivas ou individuais de apropriação e aproximação de uma relação entre meios de uma produção de utilidades públicas “*versus*” hábitos, costumes, conveniência ou assentamentos urbanos.

Dos resultados do Cenário Atual identificou-se que no entorno imediato às UTEs a população, ou recursos naturais, estão sob forte influência da poluição atmosférica

provocada e dispersa no raio até 10 km. Estimou-se com a modelagem matemática que em termos de exposição à concentração de SO_2 neste raio, há cerca de 8,8% a 17,8% de saturação média da bacia atmosférica, concernente às médias anuais comparadas ao padrão secundário regulamentados; 1,7% a 2,9% de MP_{10} ; e 0,39% a 0,78x% de NO_2 – assume-se conversão total de NO_x em NO_2 nestes resultados. Se discutirmos médias diárias, em comparação aos padrões regulamentados, teremos que no raio de 5,0 km há violação dos Padrões Secundários para SO_2 e NO_2 acima de 2 violações por ano. Neste raio, o receptor discreto que sofreu o maior número de violações foi aquele que no ano de 2011 teve 14 violações de SO_2 , o que nos diria 3,83% de saturação da média diária de SO_2 .

Acerca das médias horárias do parâmetro SO_2 , a despeito da inexistência de padrões nacionais de qualidade do ar, estimou-se no teste de sensibilidade e performance do modelo que há forte aderência entre a violação do Padrão Secundário Diário de SO_2 com curtas (cerca de 4 a 6 horas) exposições de altas concentrações médias horárias. Como recomendações para futuros trabalhos, avaliar qual patamar de taxas de emissão associados à determinados parâmetros meteorológicos são primordiais para ocorrência de tais excedentes horários.

Em face da dificuldade de comparar os dados de emissão real com os dados utilizados nas simulações o teste de performance fora prejudicado, mas não de maneira tão significativa que invalide a resposta do modelo quanto ao comportamento físico das plumas de dispersão – percurso e zonas de influência, considerando que a maioria dos resultados se inseriram no fator de 2 dos testes estatísticos, critério de aceitação dos métodos.

É evidente que a melhor compreensão sobre diversos parâmetros de entrada do modelo trarão refinamento à esta interpretação. Entretanto não se deve partir por uma premissa de invalidação dos resultados aqui expressos, mas sim pela necessidade de aprofundamento da pesquisa, como assim se preza em todas as áreas do conhecimento.

Ainda sobre médias horárias, mas agora com enfoque dado à dispersão de NO_x e sua conversão à NO_2 , preocupa-se o fato de o modelo demonstrar altas concentrações do composto no raio de 10 km, porém o monitoramento de NO_2 nas estações não corroborarem a conversão total assumida nesta dissertação. Há sobre

este relevante aspecto a necessidade de aprofundamento temático, sendo uma importante diretriz para futuros trabalhos o estudo da taxa média da relação NO_x/NO_2 nos monitoramentos da qualidade do ar, recomendando-se o uso do método ARM2 como abordagem metodológica.

Reforço este assunto ao considerarmos que para o cenário futuro haverá acréscimo das taxas de emissão de NO_x em comparação ao cenário atual, ao passo que tanto para SO_2 como para MP haverá decréscimo, assumindo-se que as UTEs garantam seus controles de emissão.

São conclusões que neste cenário futuro tem-se das simulações que haverá menor distribuição espacial da concentração de poluentes SO_2 e MP em termos de concentração acumulada em cada receptor, tanto para médias horárias, diárias e anuais, corroborando a análise realizada para aqueles receptores cujos maiores impactos do cenário atual decorreram da baixa eficiência dos sistemas de controle ambiental das Fases A e B da UTPM – ou seja, Vilas Residencial e Dario Lassance – e que no cenário futuro tem-se que haverá declínio de exposição.

Com relação à concentração de NO_x , observou-se comportamento distinto. Ao passo que as máximas concentrações horárias nos receptores se mantiveram inferiores no cenário futuro em comparação ao cenário atual, tanto utilizando-se o método de conversão de NO_x para NO_2 (ARM 2) tanto para conversão total; a média anual foi superior no cenário futuro para a conversão total.

Portanto, resta sobre este aspecto uma discussão sobre quão significativo é diminuir a exposição de uma área a determinado poluente, porém aumentando a exposição à outro poluente.

Em esforço de realização de uma análise elucidativa deste paradoxo, buscou-se explicar a relação entre níveis de emissão e a fração de ingestão de toda a população urbana residente na grade simulada, na busca de indicadores de consequências socioambientais.

Constatou-se que na comparação entre o cenário atual e o futuro a IF estimada para SO_2 e MP provoca menor exposição da população aos poluentes em 15 % e 42% respectivamente. Com relação à NO_2 , a IF estimada para o cenário futuro é 524% superior ao cenário atual.

Deve-se ter em mente que a maior parte da população estudada se concentra em Bagé e Pinheiro Machado e que mesmo sendo estes núcleos populacionais distantes das fontes e sujeitos à baixas concentrações de poluentes, estas são as populações que “elevam” o fator de exposição para toda a área de estudo.

A abordagem definitiva proposta para ponderar qual cenário exerce maior pressão ambiental foi a do Índice de Pressão Ambiental (IPA), em que considerou-se como peso do impacto o padrão secundário de qualidade do ar; o valor normalizado do impacto em termos de grau de saturação do padrão secundário de qualidade do ar; e o fator de equivalência sendo o raio máximo de influência do grau de saturação do padrão secundário da qualidade do ar.

Aplicando-se o método, obtém-se que para todos os raios de influência o cenário atual obteve maior IPA do que para o cenário futuro.

Conclui-se, portanto, que mesmo com o incremento de potência, maior número e distribuição espacial de fontes e aumento da taxa de emissão de NOx em toda a área, o cenário futuro exerce menor pressão ambiental na região em termos de dispersão de poluentes atmosféricos e consequente saturação do IPA.

A avaliação quantitativa expressa neste extenso trabalho tem como claro objetivo o de preparar bases para uma discussão sobre o ordenamento do uso e ocupação do solo relevando a necessidade da multidisciplinaridade das ciências ambientais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, R.C.M. Descrição das Circulações Locais na região de Candiota e seus efeitos no Transporte de Poluentes , Tese de Doutorado em Meteorologia. Universidade de São Paulo – USP. 2000.

ANEEL (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA). Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15> ;

AZAD, Ram S. The Atmospheric Boundary Layer for Engineers. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 1993.

BARLOW, Janet. Boundary layer meteorology and atmospheric dispersion. Chapter 9. Atmospheric Science for Environmental Scientists. Wiley-Blackwell. Oxford. 2009.

BARNET, Jon. LAMBERT, Simon. FRY, Ian. The hazards of indicators: Insights from the Environmental Vulnerability Index. Annals of the Association of American Geographers. Volume 98, 2008.

BEYCHOK, M. R. Fundamentals of Stack Gas Dispersion. Fourth Edition. Newport Beach. 2005.

BENNETT, Deborah, H. MCKONE, Thomas, E. EVANS, John, S. NAZAROFF, William, W. MARGNI, Manuele D. JOLLIET, Olivier. SMITH, Kirk, R. Defining Intake Fraction. Environmental Science & Technology. May 1, 2002.

CASTELLETTI, A. GALELLI, S. RATTO, M. SONCINI-SESSA, R. YOUNG, P.C. A general framework for Dynamic Emulation Modelling in Environmental Problems. Environmental Modelling & Software, 34, 5 – 18, 2012.

CHANG, J. C. HANNA, S. R. Air quality model performance evaluation. Meteorology Atmospheric Physics 87, 167 – 196. 2004.

COE, Hugh. Atmospheric energy and the structure of the atmosphere. Atmospheric Science for Environmental Scientists. Chapter 3. Wiley-Blackwell. Oxford. 2009.

CRM (COMPANHIA RIO GRANDENSE DE MINERAÇÃO). Mina de Candiota: preservação do meio ambiente. Porto Alegre. 1983.

DNPM (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL). Anuário Mineral Brasileiro. 2010;

ELBIR, Tolga. A GIS based decision support system for estimation, visualization and analysis of air pollution for large Turkish cities. Atmospheric Environment 38, 4509 – 4517 (2004).

EPE (EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS). Estudo de Capacidade de Suporte da Bacia Aérea da Região de Candiota/RS. Revisão 1. Rio de Janeiro, 2014;

FEPAM (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL HENRIQUE LUIZ ROESSLER). Estudos Ambientais em Candiota – Carvão e seus impactos. Porto Alegre/RS. 2004

FINZI, G., ZANI, L., ZECCHINI, M. A decision support system for the design of air quality monitoring networks. Environmental Software 6, 55e60. 1991;

FLAGAN, Richard C., SEINFELD, John H. Fundamentals of air pollution engineering. Prentice Hall. New Jersey. 1988.

GARRATT, J.R. The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press. 1992.

GARRATT, J.R. Review: The Atmospheric Boudary Layer. Earth-Science Reviews 37, 89-134, 1994.

GHANNAM, K. EL-FADEL, M. Emissions characterization and regulatory compliance at an industrial complex: an integrated MM5/CALPUFF approach. *Atmospheric Environment*, 69, 156 – 169. 2013.

GODISH, Thad. *Air Quality*. 2nd Ed. Lewis Publishers Inc. Chelsea. 1991.

GUERRERO, P.J., JORBA, O., BALDASANO, J.M., GASSO, S. The use of a modelling system as a tool for air quality management: annual high-resolution simulations and evaluation. *Science of the Total Environment* 390, 323e340. 2008;

HASENACK, H.; WEBER, E.(org.) Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

IBAMA (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS). Nota técnica 000417/2014 COEND/IBAMA. Licenciamento ambiental federal de usinas termelétricas na região de Candiota e avaliação do monitoramento da qualidade do ar, período de 2011 e 2012. 2014 a;

_____ Parecer Técnico 02001.003870/2014-60 COEND/IBAMA. Análise do Estudo de Impacto Ambiental da Usina Termoelétrica Pampa Sul. Brasília. 2014 b.

_____ Parecer Técnico nº 119 /2010/COEND/CGENE/DILIC/IBAMA. Análise de cumprimento às Condicionantes da LI nº 396/2006; prosseguimento ao Processo de Licenciamento Ambiental da UTE Candiota Fase C. Brasília. 2010 a.

_____ Parecer Técnico nº 108/2010/COEND/CGENE/DILIC/IBAMA. Análise técnica do Estudo “Avaliação Ambiental Complementar para o Empreendimento UTE MPX Sul – Atendimento a NT Nº 74/2010”, referente à solicitação de retificação da Licença Prévia da UTE MPX Sul contemplando os meios físico, biótico e

socioeconômico, não abrangendo portanto o Estudo da Análise de Risco bem como às formulações e proposições do Parecer Técnico nº 057/2010. Brasília. 2010 b.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Censo Demográfico 2010: características gerais da população, religião e pessoas com deficiência. 2010.

ISO (International Organization for Standardization) 2000a. ISO 14042: Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment. International Organization for Standardization, Geneva.

JENSEN, S.S., BERKOWICZ, R., HANSEN, H.S., HERTEL, O. A Danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures. Transportation Research Part D: Transport and Environment 6, 229e241. 2001;

LANIAK, G.F. et al. Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future. Environmental Modelling & Software 39 , 3 – 23. 2013.

LEE, Hyung-Don. YOO, Jung-Woo. KANG, Min-Kyoung. KANG, Ji-Soon. JUNG, Jong-Hyun. OH, Kwang-Joong. Evaluation of concentrations and source contribution of PM₁₀ and SO₂ emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF-CALPUFF modeling tools. Atmospheric Pollution Research, 5, 664-676. 2014.

LEVY, Jonathan I. SPENGLER, John D. HLINKA, Dennis. SULLIVAN, David. MOON, Dennis. Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: model sensitivity and implications. Atmospheric Environment, 36, 1063 – 1075. 2002.

LIM, L.L., HUGHES, S.J., HELLAWELL, E.E. Integrated decision support system for urban air quality assessment. Environmental Modelling & Software 20, 947e954. 2005;

LIN, MD. LIN, YC. The Application of GIS to air quality analysis in Taichung City, Taiwan, ROC. Environmental Modelling & Software, 2002.

LÓPEZ, Villegas, M. T. TZINTZUN, Cervantes M. G. INIESTA, Gomez R. GARIBAY, Bravo V. ZUK, M. ROJAS, Bracho, L. FERNANDEZ, Brenautz, A. Evaluating the impacts of Power plant emissions in Mexico. 9th Int. Conf. on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purpose. 2004

MATTHIAS, A. D., MUSIL, S. A., BOHN, H. L. Physical-Chemical Characteristics of the Atmosphere. Chapter 4. Environmental and Pollution Science. 2nd ed. Academic Press. Canada. 1996.

MATTHIAS, A. D., COMRIE, A. C., MUSIL, S. A. Atmospheric Pollution. Chapter 23. Environmental and Pollution Science. 2nd ed. Academic Press. Canada. 1996.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar. 2009. Disponível em:

http://www.mma.gov.br/estruturas/163/arquivos/pronar_163.pdf ;

MOORE, G. E., MILICH, L. B., LIU, M.K. Plume behaviors using lidar and SF₆ Tracer at a flat and hilly site. Atmospheric Environment Vol. 22, No. 8, pp. 1673-1688, 1987.

PATRYL, L. GALERIU, D. Statistical Performance measures – models comparison. CEA – energie atomique – energie alternatives. 2011. Disponível em: <https://www-ns.iaea.org/downloads/rw/projects/emras/emras-two/first-technical-meeting/sixth-working-group-meeting/working-group-presentations/workgroup-7-presentations/presentation-6th-wg7-statistical-performances.pdf> ;

PEPPER, Ian L., GERBA, Charles P., BRUSSEUAU, Mark L. Environmental and Pollution Science. 2nd ed. Academic Press. Canada. 2006.

PULIAFITO, E., GUEVARA, M., PULIAFITO, C. Characterization of urban air quality using GIS as a management system. Environmental Pollution 122, 105e117. 2003.

ROOD, Arthur S. Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset. *Atmospheric Environment* 48, 707 – 720, 2014.

RTP ENVIRONMENTAL ASSOCIATES, INC. Ambient Ratio Method Version 2 (ARM2) for use with AERMOD for 1-hr NO₂ Modeling. 2013.

SANTOS, Luciano Miguel Moreira dos. Avaliação ambiental de processos industriais. 4^o ed. - São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

SCIRE, Joseph, S. STRIMAITIS, David, G. YAMARTINO, Robert J. A user's guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5). Earth Tech, Inc. 2000.

SEPPÄLÄ, Jyri. Life Cycle Impact Assessment Based on Decision Analysis. Helsinki University of Technology Department of Engineering Physics and Mathematics. Espoo, Finland. August, 2003.

SHALLCROSS, Dudley. Biogeochemical Cycles. Chapter 4. *Atmospheric Science for Environmental Scientists*. Wiley-Blackwell. Oxford. 2009.

SLADE, David, H. *Meteorology and atomic energy*. U.S. Atomic Energy Commission. 1968

SMITH, K.R. Fuel Combustion, air pollution exposure and health: the situation in developing countries. *Annual Review of Energy and the Environment* 18, 529-566.

SOARES DA SILVA, Maurício. CUNHA, Bruno D'aiuto. PIMENTEL, Luiz Claudio Gomes. GUERRERO, Jesús Salvador Perez. VICENTINI, Pedro Caffaro. ANÁLISE COMPARATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE DIÓXIDO DE ENXOFRE VIA MODELOS REGULATÓRIOS AERMOD E CALPUFF E MONITORAMENTO PRÓXIMO ÀS FONTES DE EMISSÃO DA BACIA AÉREA III – RMRJ. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.2, 281 - 298, 2014.

SORBJAN, Zbigniew. Air-Pollution Meteorology. Chapter 4 .AIR QUALITY MODELING - Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software. Vol. I - Fundamentals (P. Zannetti, Editor). Published by The EnviroComp Institute and the Air & Waste Management Association. 2003.

THÉ, Jesse. Long Range Air Dispersion Model. CALPUFF Course Notes. Lakes Environmental, 2010.

TURNER, Bruce. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: an introduction to dispersion modeling. 2nd Ed. Lewis Publishers. Boca Raton. 1994.

_____ CONTROL OF MERCURY EMISSIONS FROM COAL-FIRED ELECTRIC UTILITY BOILERS. Triangle Park, NC. 2003. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttn/atw/utility/hgwhitepaperfinal.pdf> ;

_____ Screening procedure for estimating the air quality impact of stationary sources – Revised. Triangle Park, NC. 1992;

_____ A Comparison of CALPUFF Modeling Results to Two Tracer Field Experiments. Triangle Park, NC. 1998 (b);

YIM, Steve, H., L. FUNG, Jimmy, C. H. LAU, Alexis, K. H. Use of high-resolution MM5/CALMET/CALPUFF system: SO₂ apportionment to air quality in Hong Kong. Atmospheric Environment, 44, 4850 – 4858, 2010.

ZANETTI, Paolo, et al. Air Quality Modeling - Theories, Methodologies, Computational Techniques, and Available Databases and Software. Vol. I – Fundamentals. EnviroComp Institute and Air & Waste Management Association. Pittsburg, U.S.A. 2010.

ZHOU, Ying. LEVY, Johnathan I. HAMMITT, James, K. EVANS, John, S. Estimating population exposure to power plant emissions using CALPUFF: a case study in Beijing, China. Atmospheric Environment, 815 – 826, 2003.