

UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSOS DE EXTENSÃO
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL**

Utilização de Modelos Matemáticos de Poluição Atmosférica na Gestão da Qualidade do Ar

**Autores: José Bezerra de Sousa
Elias Manoel de Brito Lima**

**Orientadores: Físico (MsC) Ricardo Scudeler Pontes
Meteorologista Ricardo Anazia**

Junho/08

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSOS DE EXTENSÃO

Utilização de Modelos Matemáticos de Poluição Atmosférica na Gestão da Qualidade do Ar

Autores: José Bezerra de Sousa
Elias Manoel de Brito Lima

Orientadores: Físico (MsC) Ricardo Scudeler Pontes
Meteorologista Ricardo Anazia

Curso: Especialização em Gestão Ambiental – X Turma – 2005.

Monografia apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica – FEM/UNICAMP, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Especialização em Gestão Ambiental.

Campinas, 2008
S.P. – Brasil

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao Comitê de Capacitação da CETESB pela oportunidade de realizarmos este curso.

Ao Ricardo Anazia e ao Ricardo Scudeller pelo apoio e orientação, sem o qual não teríamos concluído este trabalho.

Ao Rodrigo Fialho (Gerente do ESSE/CETESB) e ao Domênico Tremarolli (Gerente da Agência de Jundiaí/CETESB) pelo apoio durante a realização do curso.

Aos professores deste renomado curso, pelo conhecimento transmitido.

À Eliane e demais funcionários da Secretaria de Pós-graduação da FEM/UNICAMP, pela atenção e apoio durante as aulas.

Aos nossos colegas de curso: Saltinho, Barba, Morto, Vladas, Cana, Lampadinha, Osmar, Plínio, Emerson, Carine, Verena, Michele, Boni, Bruno, Camila, Camilinha, Deoclides, Eduardo, Fernando, Inês, Paulo Lange; Leopoldo, Luizinho, Marcelão, Mineirinha; Suely, Osvaldo, Dênis, Max, Adilson, Paula, Ana Paula, Tereza.e demais colegas pela amizade que selamos.

E um agradecimento especial as nossas famílias pela compreensão, paciência e apoio, durante a nossa ausência nas noites de sexta-feira e durante os sábados.

Resumo

SOUSA, José Bezerra de; LIMA, Elias Manoel de Brito. **Utilização de modelos matemáticos de poluição atmosférica na gestão da qualidade do ar.** Trabalho Final de Especialização em Gestão Ambiental. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 54 p.

No Relatório Anual de Qualidade do Ar - RAQAr (CETESB, 2006) é possível verificar que a poluição do ar, oriunda dos óxidos de enxofre (SO_x) encontram-se controlados e que as concentrações de material particulado caíram significativamente. As ações corretivas e preventivas tem sido para a diminuição das emissões dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e dos compostos orgânicos voláteis (COV), todos precursores da formação do ozônio troposférico, a partir dos processos de licenciamento, principalmente nas regiões saturadas e em vias de saturação. O ozônio é o poluente que tem ocasionado o maior número de ultrapassagens do Padrão de Qualidade do Ar (PQAR), tanto na RMSP como no interior e Cubatão.

A grande dificuldade de controlar o ozônio troposférico é o fato deste poluente não ser um poluente primário, ou seja não é emitido diretamente pelas fontes, mas formado na atmosfera através da reação entre os compostos orgânicos voláteis (COVs) e óxidos de nitrogênio (NO_x) na presença de luz solar. Embora benéfico na estratosfera, onde forma uma camada protetora contra efeitos danosos da radiação ultravioleta, tem efeitos tóxicos nas camadas mais baixas da atmosfera, por atingir diretamente os seres vivos (CETESB, 2004).

Além de ser resultado desse complexo sistema de reações químicas, fatores meteorológicos e topográficos fazem com que os gases precursores emitidos sejam transportados a diversos locais, resultando em níveis altos de ozônio em locais distantes das fontes dos precursores, muitas vezes ocorrendo até mesmo em regiões sem fontes significativas de poluição (CETESB, 2004).

Dentro deste contexto, a investigação da dispersão e do transporte de poluentes na atmosfera é uma atividade fundamental na proteção da qualidade do ar. Atualmente, numa leitura rápida do funcionamento da gestão da qualidade do ar realizada no Estado de São Paulo, é possível prever a inserção da utilização de modelos matemáticos de poluentes atmosféricos, especialmente aqueles com módulos fotoquímicos, como ferramenta de diagnóstico da qualidade do ar em escala regional.

Do nosso ponto de vista, dentre os modelos analisados, o CIT desenvolvido pelo CALTECH (California Institute of Technology) e Carnegie Mellon University apresenta-se, nos trabalhos pesquisados, como o mais indicado para utilização como uma ferramenta de gestão da qualidade do ar.

Além disso, sobressai a necessidade da gestão da qualidade do ar estar integrada a outras políticas públicas. A deterioração da qualidade do ar deve ser uma preocupação constante nas políticas urbanas, devendo constar dos planos diretores das cidades e até mesmo estar previsto nos planos decenais, só assim vislumbraremos a possibilidade de atingir o objetivo final, que é o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: poluição atmosférica, meteorologia, ozônio troposférico, modelos de dispersão de poluentes na atmosfera, gestão da qualidade do ar; monitoramento e controle da poluição atmosférica; qualidade do ar; padrões de qualidade do ar.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BD – banco de dados
- CALGRID - California Photochemical Grid Model
- CALMET – California Meteorological Model
- CALPUFF – California Puff Model (modelo gaussiano)
- CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo
- CIT – Modelo euleriano de dispersão de poluentes desenvolvido pelo California Institute of Tecnologia (USA)
- CLP – camada limite planetária
- CO – monóxido de carbono
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- COV – compostos orgânicos voláteis (VOC em inglês)
- CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto de Pesquisas Espaciais
- GIS – Geographic Information System (Sistema Geográfico de Informações)
- HC – hidrocarboneto
- IAG/USP – Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo
- MCE – Memorial de Caracterização de Empreendimento
- MP – material particulado
- MP₁₀ - material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm
- MTD – melhor tecnologia prática disponível
- NO_x -óxidos de nitrogênio
- OMS – Organização Mundial de Saúde
- OZIPR – Ozone Isopleth Plotting Package
- PAN – Nitratos de peroxiacetila
- PQAR – Padrão de Qualidade do Ar
- PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
- PROMOT – Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas
- RAQAr – Relatório Anual de Qualidade do Ar
- RMBS – Região Metropolitana da Baixada Santista
- RMC – Região Metropolitana de Campinas
- RMSP – Região Metropolitana de São Paulo
- RPM-IV – Reactive Plume Model IV (modelo numérico de pluma)
- SIGMA – diâmetro de uma pluma de dispersão
- SIPOL – Sistema de Fontes de Poluição (banco de dados de empreendimentos licenciados da CETESB)
- SO_x – óxidos de enxofre
- USEPA – United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

INDICE

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS	04
3. REVISÃO DA LITERATURA	05
3.1. Monitoramento e Controle da Poluição Atmosférica	05
3.2. Ozônio Troposférico	11
3.3. Modelagem matemática de dispersão de poluentes atmosféricos	16
3.4. Aplicabilidade dos modelos – Estudos de Caso já Realizados.....	22
3.4.1. Simulação utilizando o modelo CIT e modelo meteorológico RAMS	22
3.4.2. Simulação utilizando o modelo fotoquímico RPM-IV (Reactive Plume Model IV)	26
3.4.3. Simulação utilizando o modelo fotoquímico CALGRID e modelo meteorológico CALMET	28
3.4.4. Simulação utilizando o modelo fotoquímico CALPUFF e modelo meteorológico CALMET	29
3.4.5. Simulação utilizando o modelo atmosférico de trajetórias OZIPR (Ozone Isopleth Plotting Packge)	31
3.4.6. Simulação utilizando modelos baseados em Redes Neurais	32
4. DISCUSSÃO – UTILIDADE DOS MODELOS FOTOQUÍMICOS NA GESTÃO DA QUALIDADE DO AR	37
5. CONCLUSÕES	42
6. BIBLIOGRAFIA	45

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um fenômeno tipicamente urbano-industrial. Os 67 municípios das três regiões metropolitanas do Estado de São Paulo concentram cerca de 21,7 milhões de habitantes, ou seja, 58,6% da população do estado e 12% do total do País. Essas três regiões metropolitanas — a de São Paulo (RMSP, 17,8 milhões de habitantes), a de Campinas (RMC com 2,3 milhões) e a da Baixada Santista (RMBS com 1,5 milhão) — contribuem com 63,2% do PIB estadual e quase um quarto do nacional. Esses três centros possuem, além das emissões industriais, a maior frota de veículos do país, o que lhes confere uma deterioração da qualidade do ar que exige atenção especial no controle da poluição atmosférica (SÃO PAULO, 2003). Em muitos casos essa deterioração não fica restrita a estes centros e os poluentes são transportados para cidades vizinhas ou, as vezes, significativamente distantes destes centros.

No interior do Estado de São Paulo as cidades que se caracterizam por intensa atividade industrial, apresentam monitoramento da qualidade do ar. Entretanto, em algumas dessas áreas onde existe a prática da queimada nas monoculturas, como a cana-de-açúcar, além de outros tipos de queimas de biomassa, há um relativo impacto na qualidade do ar, devido a produção e liberação para a atmosfera de material particulado e de gases como dióxido e monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, metanos e hidrocarbonetos não metanos para a atmosfera. Estes últimos, gases quimicamente ativos que contribuem para a produção fotoquímica do ozônio troposférico.

No Relatório Anual de Qualidade do Ar - RAQAr (CETESB, 2006) é possível verificar que a poluição do ar oriunda dos óxidos de enxofre (SO_x) encontra-se controladas e que as concentrações de material particulado caíram significativamente. As ações corretivas e preventivas, a partir dos processos de licenciamento, principalmente nas regiões saturadas e em vias de saturação, tem sido orientadas para a diminuição das emissões dos óxidos de nitrogênio (NO_x) e dos compostos orgânicos voláteis (COV), todos precursores da formação do ozônio

troposférico.

O ozônio é o poluente que tem ocasionado o maior número de ultrapassagens do Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PQAR), tanto na RMSP como no interior e Cubatão. Constitui-se atualmente no poluente a merecer maior atenção pela CETESB, pelas altas concentrações observadas não só na RMSP, mas em vários municípios do interior, avaliados pelas estações móveis e fixas. Essa preocupação se deve às constantes ultrapassagens do nível de padrão de qualidade do ar para o ozônio, estabelecido em 160 microgramas/m³ por 1 hora de amostragem, estabelecido pela Resolução CONAMA 003/90. Se for levado em conta o nível de atenção sugerido pela Organização Mundial da Saúde (OMS), estipulado em 120 microgramas/m³, numa amostragem de 8 horas, também é verificado que em vários dias esses valores foram ultrapassados. É importante considerar que pelos novos índices estabelecidos pela OMS, onde a média de 8 horas recomendada para o ozônio (O₃) é de 100 µg/m³, o número de violações cresce significativamente.

De acordo com o RAQAr, em 2005, o ozônio ultrapassou o padrão em 51 dias, considerando todas as estações que medem este poluente na RMSP, representando cerca de 14% dos dias do ano, sendo menor do que os anos anteriores. Numa comparação com anos anteriores vale citar que esses números foram significativamente maiores: em 1999 foram 109 dias, em 2000 foram 75 dias, em 2001 foram 86 dias, em 2002 foram 90 dias, em 2003 foram 77 dias e em 2004 foram 63 dias (CETESB, 2006), tendo relação direta com as condições meteorológicas.

Na figura 1 é possível observar o número médio de dias de ultrapassagem do PQAR para ozônio, por mês, na RMSP de 1999 a 2005, onde nos meses de inverno (maio a julho) há uma significativa redução do número de ultrapassagens. Os períodos críticos observados para ocorrência de episódios de ultrapassagens do PQAR vão do final do inverno (agosto) até o final do verão (abril), devido a maior incidência de radiação na primavera e no verão.

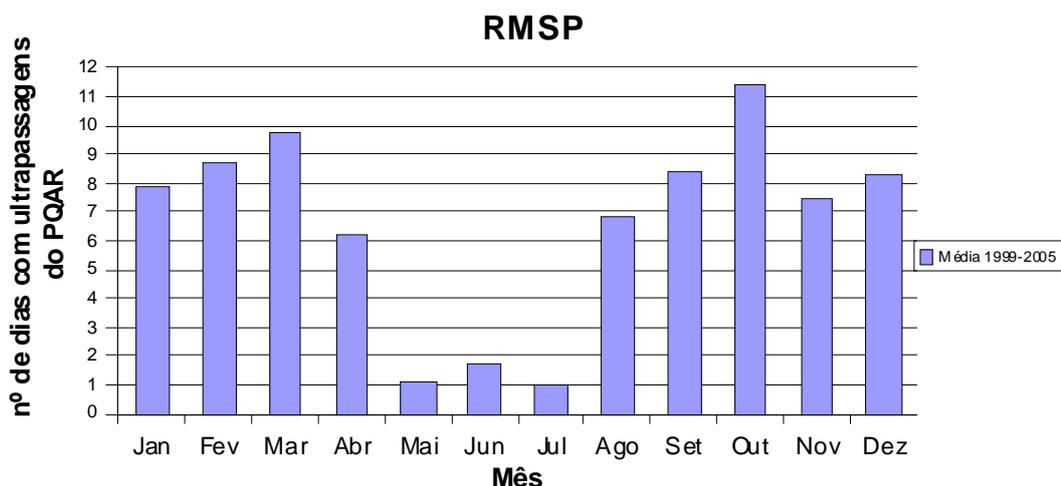


Figura 1 - Média de dias que ocorreram ultrapassagem do Padrão de Qualidade do Ar (PQAR) para ozônio por mês na RMSP de janeiro/1999 a dezembro/2005 (Fonte dos dados: CETESB, 2006)

Nas outras cidades monitoradas (Paulínia, São José dos Campos, Cubatão-Centro, Cubatão-Vila Parisi, Jaú, Sorocaba e Ribeirão Preto), a cidade de Paulínia é a que apresenta o maior número de dias em que as concentrações horárias excederam o padrão (foram 19 dias em 2005), podendo sua frequência de ultrapassagens ser comparada à de estações da RMSP (CETESB, 2006).

Embora benéfico na estratosfera, onde forma uma camada protetora contra efeitos danosos da radiação ultravioleta, o ozônio tem efeitos tóxicos nas camadas mais baixas da atmosfera, por atingir diretamente os seres vivos (CETESB, 2004). Provoca irritação dos olhos, nariz e garganta, envelhecimento precoce da pele, náusea, dor de cabeça, tosse, fadiga, aumento do muco, diminuição da resistência orgânica às infecções e agravamento de doenças respiratórias. Além disso, o gás tem forte ação oxidante e reduz a vida útil dos materiais. Vale destacar, também, que o ozônio pode, inclusive, afetar a produção agrícola, reduzindo a safra de forma discreta, mas economicamente significativa (CETESB, 2006).

Além de ser resultado de um complexo sistema de reações químicas, fatores meteorológicos e topográficos contribuem para que os gases precursores emitidos sejam transportados a diversos locais, resultando em níveis altos de ozônio em locais distantes das fontes dos precursores, muitas vezes ocorrendo até mesmo

em regiões sem fontes significativas de poluição (CETESB, 2004).

Dentro deste contexto, a investigação da formação, dispersão e do transporte de poluentes na atmosfera a partir da utilização de modelos fotoquímicos é uma atividade fundamental na gestão da qualidade do ar.

2. OBJETIVOS

Avaliar a aplicabilidade de modelos matemáticos dinâmicos de poluição atmosférica, dentro do contexto da gestão da qualidade do ar.

Discutir a formação de poluentes secundários, especificamente o ozônio, assim como a dificuldade de estabelecer estratégias de controle para este poluente.

Serão analisados alguns dos modelos utilizados pela agência ambiental americana, institutos de pesquisas nacionais e internacionais, relatando os estudos de casos onde os modelos foram aplicados.

Também será identificado e justificado o modelo mais adequado e realizar uma abordagem acerca de sua aplicação como ferramenta operacional da CETESB/SMA para diagnóstico, prognóstico e gestão estratégica, enfatizando seus potenciais, limitações, demandas e viabilidade operacional.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Controle e Monitoramento da Poluição Atmosférica

O objetivo do controle da poluição do ar é preservar a saúde e o bem-estar do ser humano, dos animais, a proteção da vegetação natural ou cultivada, a preservação das propriedades físicas do meio natural e das interferências ao seu uso normal e satisfatório (STEWART, 1979; BOUBEL et al., 1984 apud PIRES, 2005). O controle da poluição atmosférica consiste principalmente na contenção das emissões de compostos primários para a atmosfera, por serem estes causadores originais de efeitos adversos, com conseqüente deterioração da qualidade natural do ar troposférico, além de serem precursores dos poluentes secundários formados na atmosfera (PIRES, 2005).

No Brasil, dentre os vários tipos de indicadores e diagnósticos que podem ser utilizados para a gestão da qualidade do ar, uma das mais empregadas é o monitoramento baseado em padrões de qualidade do ar (PQAR), geralmente utilizando uma rede de estações, como é o caso do Estado de São Paulo. Os dados gerados são utilizados para mapear regiões, indicando sua aptidão para receber novas fontes, ou não, além de servir para intensificar a fiscalização das fontes já instaladas com o objetivo de reduzir essas emissões.

A rede de monitoramento automático de poluentes atmosféricos da CETESB é formada atualmente por 29 estações fixas, 3 móveis e em torno de 45 estações manuais que medem os poluentes atmosféricos regulamentados e parâmetros meteorológicos. A rede abrange, principalmente, as três regiões metropolitanas do estado de São Paulo (RMSP, RMC e RMBS), além de Sorocaba e São José dos Campos, cidades que pelo seu porte industrial e populacional já demandam monitoramento mais detalhado. A rede manual se espalha em direção ao interior do estado e os parâmetros medidos são o dióxido de enxofre e material particulado em 36 locais, 15 em áreas distintas das regiões metropolitanas citadas. Além disso, conta com dois laboratórios volantes e 32 pontos com monitores passivos localizados em

áreas não metropolitanas. Diariamente são divulgados boletins com os dados de qualidade do ar das localidades onde ocorre o monitoramento (www.cetesb.sp.gov.br/Ar).

No âmbito nacional, a Portaria Normativa n.º 348 de 14/03/90 do IBAMA estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar e os respectivos métodos de referência, ampliando o número de parâmetros anteriormente regulamentados através da Portaria GM 0231 de 27/04/76, sendo submetida ao CONAMA em 28/06/90 e transformados na Resolução CONAMA n.º 03/90 (CETESB, 2006). Nessa resolução são estabelecidos os padrões primários e secundários de qualidade do ar.

As concentrações dos poluentes monitorados são classificadas conforme o PQAR, que é um nível referencial estabelecido legalmente através de um limite máximo para a concentração de um componente atmosférico que assegure a saúde e o bem estar das pessoas. Esses padrões são baseados em estudos científicos que averiguam os efeitos produzidos pelos poluentes e são fixados em níveis tais de forma a propiciar uma margem de segurança adequada para proteção do meio ambiente (CETESB, 2006).

Como prevê a própria Resolução CONAMA n.º 03/90, a aplicação diferenciada de padrões primários e secundários requer que o território nacional seja dividido em classes I, II e III conforme o uso pretendido e que enquanto não for estabelecida a classificação das áreas os padrões aplicáveis serão os primários. Os parâmetros regulamentados são as partículas totais em suspensão (PTS), fumaça (FMC), partículas inaláveis (PI), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono, ozônio (O₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Na tabela 1 estão listados os padrões nacionais de qualidade do ar fixados na Resolução CONAMA n.º 03 de 28/06/90 (CETESB, 2006).

Tabela 1 – Padrões Nacionais de Qualidade do Ar – PQAR

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRÃO PRIMÁRIO µg/m ³	PADRÃO SECUNDÁRIO µg/m ³	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Partículas totais em suspensão	24 horas ¹	240	150	Amostrador de grandes volumes
	MGA ²	80	60	
Partículas inaláveis	24 horas ¹	150	150	Separação inercial/filtração
	MAA ³	50	50	
Fumaça	24 horas ¹	150	100	Refletância
	MAA ³	60	40	
Dióxido de enxofre	24 horas ¹	365	100	Pararosanilina
	MAA ³	80	40	
Dióxido de nitrogênio	24 horas ¹	320	190	Quimiluminescência
	MAA ³	100	100	
Monóxido de carbono	1 hora ¹	40000	40000	Infravermelho não dispersivo
		35 ppm	35 ppm	
	8 horas ¹	10000	10000	
		9 ppm	9 ppm	
Ozônio	1 hora ¹	160	160	Quimiluminescência

1 – Não deve ser excedido mais que uma vez no ano

2 – Média Geométrica Anual

3- Média Aritmética Anual

Fonte: CETESB, 2006

Os padrões primários de qualidade do ar podem ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo (CETESB, 2006).

“Para os padrões secundários de qualidade do ar, as concentrações de poluentes atmosféricos encontram-se abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo, com o objetivo de criar uma base para uma política de prevenção da degradação da qualidade do ar. Devem ser aplicados às áreas de preservação (por exemplo: parques nacionais, áreas de proteção ambiental, estâncias turísticas, etc.). Não se aplicam, pelo menos a curto prazo, a áreas de desenvolvimento, onde devem ser aplicados os padrões primários” (CONAMA (1990) apud CETESB (2006)).

Entende-se por curto, médio e longo prazos, a necessidade de uma política que conduza a níveis desejados de qualidade do ar.

É possível estabelecer que o controle da qualidade do ar adotado pela CETESB é baseado em padrões legais. Vale citar também que tem forte influência da legislação internacional, com destaque para a legislação americana. Nos Estados Unidos, assim como no Brasil, existe uma legislação federal que regula a poluição do ar, o “Clean Air Act” (Lei do Ar Limpo) e baseia-se no estabelecimento de padrões para os seis poluentes atmosféricos mais comuns, chamados “*criteria pollutants*”. São eles: chumbo¹, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio, dióxido de enxofre e ozônio. Estes padrões são conhecidos como “National Ambiente Air Quality Standards – NAAQS (Padrões Nacionais de Qualidade do Ar), e estabelece nacionalmente as concentrações aceitáveis para cada poluente. Foram desenvolvidos dois padrões de NAAQS: o padrão primário, onde são definidas as concentrações de poluentes que protegem exclusivamente a saúde da população e o padrão secundário que define as concentrações de poluentes que protegem o bem estar da população, a fauna, a flora e o meio ambiente em geral.

Na implementação destes padrões, a EPA exigiu que os estados da federação apresentassem um Plano de Implementação Estadual, mostrando como cada estado pretendia alcançar os padrões estabelecidos, num período determinado. No entanto se no tempo determinado existirem áreas onde os padrões não foram alcançados (áreas não atendidas), o estado deveria submeter à EPA um novo plano de ação para estas áreas.

As revisões do “Clean Air Act” são realizadas a cada cinco anos, onde são tomadas decisões baseadas nas mais recentes pesquisas realizadas e também considerando historicamente a evolução contínua da ciência no conhecimento dos

¹ Nos EUA o chumbo tetraetila é utilizado como aditivo na gasolina para aumentar sua octanagem, por isso sua presença no NAAQS, enquanto que no Brasil, após a implantação do PROCONVE em 1986, não foi mais permitido a adição do chumbo tetraetila na gasolina e sim álcool. No ESP a CETESB estabeleceu a média trimestral de $1,5\mu\text{g}/\text{m}^3$, para o padrão de qualidade do ar do parâmetro chumbo nas partículas totais em suspensão, através da Decisão de Diretoria 001/99/C de 19/01/99 e publicada no Diário Oficial do Estado de São Paulo.

riscos de exposições a poluentes, tornando possível o alcance das diretrizes propostas.

No final da década de 80, pelos estudos desenvolvidos pela CETESB utilizando modelo receptor como ferramenta de análise verificou-se que, com relação ao material particulado, as emissões veiculares possuíam maior importância que as industriais, e indicava a necessidade de desenvolver ações de controle sobre os veículos a diesel (CETESB, 2003).

Já na década de 90, com o grande crescimento da frota veicular, o monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), por exemplo, eram emitidos mais intensamente nos municípios da RMSP e também em outras cidades, demandando ações de restrições da circulação de veículos na cidade de São Paulo.

No ano de 1996 essa restrição foi realizada de forma voluntária, sendo posteriormente obrigatória, através do Decreto nº 41.858 de 12 de junho de 1997 que regulamentou a Lei nº 9.690 de 2 de junho de 1997 (SÃO PAULO, 1997), que autorizou o poder executivo a implantar programa de restrição a circulação de veículos automotores na RMSP, conhecido como “operação rodízio”, nos anos de 1997 e 1998.

O controle ambiental adotado em São Paulo baseia-se em procedimentos de fiscalização das emissões de cada empreendimento, que devem atender aos padrões legais, estabelecidos pela Lei Estadual nº 997, de 31 de maio de 1976, regulamentada pelo decreto nº 8468, de 18 de setembro de 1976 e suas atualizações. Esse regulamento dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição e estabelece as atribuições da CETESB, os padrões de qualidade ambiental, os padrões de emissão de poluentes, o sistema de licenciamento de fontes de poluição e as sanções aplicáveis às infrações cometidas (SÃO PAULO, 2003).

Quando não há um padrão estabelecido de emissão para a fonte, como no caso dos óxidos de nitrogênio, são exigidos sistemas de controle da poluição do ar baseados na melhor tecnologia disponível, com plano de controle com as medidas a

serem adotadas e a redução almejada, previamente aprovada pela CETESB.

A caracterização das fontes das emissões dos poluentes também é uma ferramenta importante, pois permite estabelecer ações específicas naquela que contribui com a maior parcela das emissões, principalmente em períodos críticos, como por exemplo a Operação Inverno implantada anualmente pela CETESB, que dura de maio a setembro, quando as condições desfavoráveis à dispersão dos poluentes são bastante frequentes, intensificando as ações de controle das fontes de emissão de poluentes primários considerados críticos.

De acordo com o Relatório Anual de Qualidade do Ar (CETESB, 2006), as maiores porcentagens das emissões de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio na RMSP é de origem veicular (veículos leves e pesados), ficando as emissões de origem industrial com um percentual relativamente menor (Figura 2).

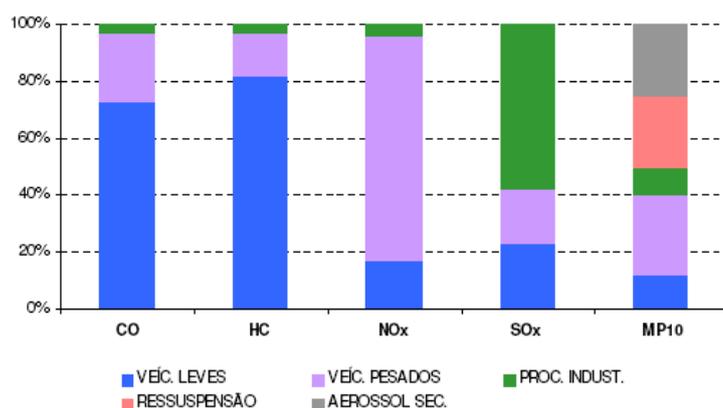


Figura 2 - Emissões relativas de poluentes por tipo de fontes na RMSP – 2005 (Fonte: CETESB, 2006)

Em anos anteriores tentou-se restringir a circulação de carros na RMSP, porém não foi possível estabelecer uma relação direta da qualidade do ar com a diminuição das emissões de poluentes de origem veicular, ficando mais evidente a influência do comportamento das condições meteorológicas na dispersão dos poluentes e por consequência numa melhor ou pior qualidade do ar. Entretanto, de acordo com CETESB (1998), este fato não diminui a importância do rodízio na redução das emissões.

Em contrapartida, como consequência positiva, através do PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, comparando as emissões dos veículos automotores nas décadas de 70 e 80 com as atuais, é possível estabelecer que os poluentes atmosféricos primários caíram significativamente, porém, em algumas regiões metropolitanas do estado, ainda são registrados eventos esporádicos de ultrapassagens do padrão de qualidade do ar para partículas inaláveis (MP_{10}) e principalmente ozônio. As emissões oriundas dos veículos leves são os maiores contribuintes para a emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos.

Vale destacar também que os compostos orgânicos voláteis são também emitidos por fontes naturais. Esses compostos orgânicos de origem biogênica são vários e, o tipo e a quantidade emitida merecem avaliação detalhada. Um exemplo desses compostos orgânicos emitidos por plantas vivas, responsável pelo odor característico de limão e pinho, é o terpeno. Em regiões densamente florestadas há uma grande emissão de isopreno, que é também um composto orgânico volátil de origem biogênica (TRESMONDI, 2003). Nesses casos, apesar de não ser possível controlar essas emissões, é necessário estimá-las para avaliar seu impacto na formação do ozônio troposférico.

De acordo com MARTINS (2002), através da simulação em um modelo fotoquímico, os resultados das simulações mostraram um aumento médio das concentrações de ozônio em 15,3%, de 20,4% na concentração de PAN, de 1,7% na concentração de NO_2 e diminuição de 2,4% na concentração de NO, quando comparado com os resultados da simulação sem a inclusão das emissões biogênicas.

3.2. Ozônio Troposférico

O ozônio ocorre em duas camadas na atmosfera: na troposfera, camada mais baixa da atmosfera situada entre a superfície terrestre e uma altura <10 km, onde é um poluente que causa prejuízos à saúde humana, a vegetação e aos materiais; e na estratosfera, onde a camada de ozônio estende-se por quase 30 quilômetros na

vertical e tem a função de absorver os raios da radiação ultravioleta.

A poluição por ozônio tem características próprias. No caso dos demais poluentes essas características estão relacionadas diretamente com a emissão das fontes e para a dispersão do ozônio, os fatores climáticos e ambientais são determinantes, favorecendo a sua formação pela incidência de luz solar.

A luz solar, torna o ozônio um poluente ainda mais singular, pois nos meses mais ensolarados (agosto a abril – Figura 1) apresenta os dias de piores padrões de qualidade do ar, ao contrário do que ocorre no inverno, quando as causas da poluição são os poluentes primários, devido às dificuldades de dispersão.

Para o homem, além de causar irritação nos olhos e vias respiratórias, sua ação oxidante destrói os cílios das vias aéreas, responsável pela primeira filtragem das impurezas do ar, diminuindo a capacidade de defesa da pessoa contra microrganismos. Isso faz aumentar ou agravar os casos de doenças respiratórias e de reações alérgicas como rinite, otite, amigdalite, sinusite e, também, de bronquite e pneumonia. Essas sintomatologias foram sugeridas em estudo realizado no Laboratório de Poluição Atmosférica do Departamento de Patologia da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo - FMUSP - São Paulo (SP) – Brasil, que constatou um aumento no número de internações hospitalares relacionadas a essas doenças nos dias em que o nível de ozônio esteve acima dos padrões em São Paulo (CANÇADO, 2006).

O ozônio causa também danos à colheita e à vegetação natural. Nas plantas, o oxidante reduz as taxas de crescimento, pode aumentar a vulnerabilidade a insetos e causar problemas de pigmentação, alterando a fotossíntese. Na Califórnia, nos Estados Unidos, há uma estimativa de que o ozônio ocasione perdas de 20% no cultivo de uva e do algodão. Em todos os EUA, outras projeções indicam que o poluente provoca perdas de bilhões de dólares para a horticultura e a agricultura (EPA, 2005).

Na figura 3 é possível observar o comportamento médio das concentrações

de CO, NO, NO₂ e O₃ medidas durante o período de janeiro de 2000 a novembro de 2006, na estação de monitoramento localizada em Paulínia, onde é observado um padrão de comportamento típico descrito na literatura. Há um pico de NO pela manhã, acompanhado pelo pico de CO, devido ao aumento das emissões veiculares, que combinado com a inversão térmica e a diminuição da ventilação (Figura 4); acarreta por volta das 9 horas num ligeiro aumento do NO₂, que decresce logo em seguida com o início do aumento da radiação (Figura 4) e da concentração do O₃, que atinge uma maior concentração média às 15 horas. A concentração média de NO apresenta valores quase nulos no período de alta concentração de ozônio (CETESB, 2004).

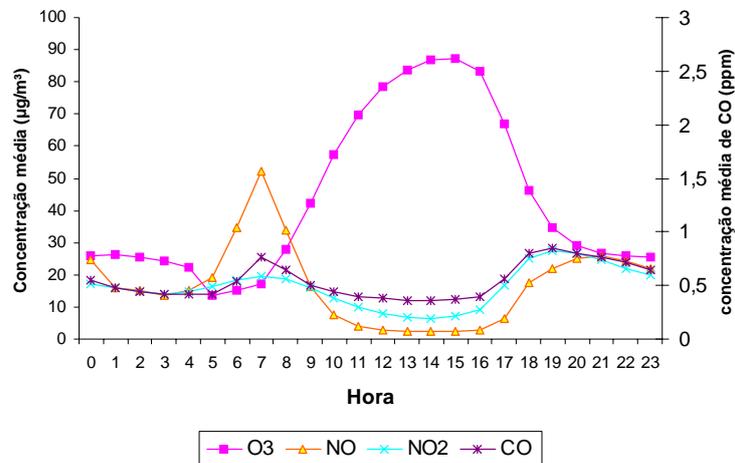


Figura 3 – Concentração Média Horária de NO, NO₂ e O₃ - medidas durante período de janeiro de 2000 a novembro de 2006, em Paulínia – SP

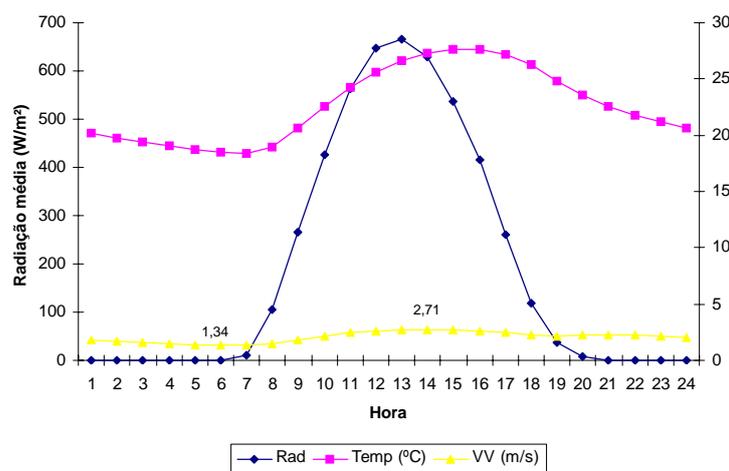


Figura 4 – Radiação, Temperatura e Velocidade do Vento (VV) na estação de Paulínia – médias horárias do período de janeiro de 2000 a novembro de 2006.

A Figura 5 mostra de forma resumida o comportamento da concentração dos poluentes precursores do ozônio num cenário urbano durante o dia, em momentos e locais específicos.

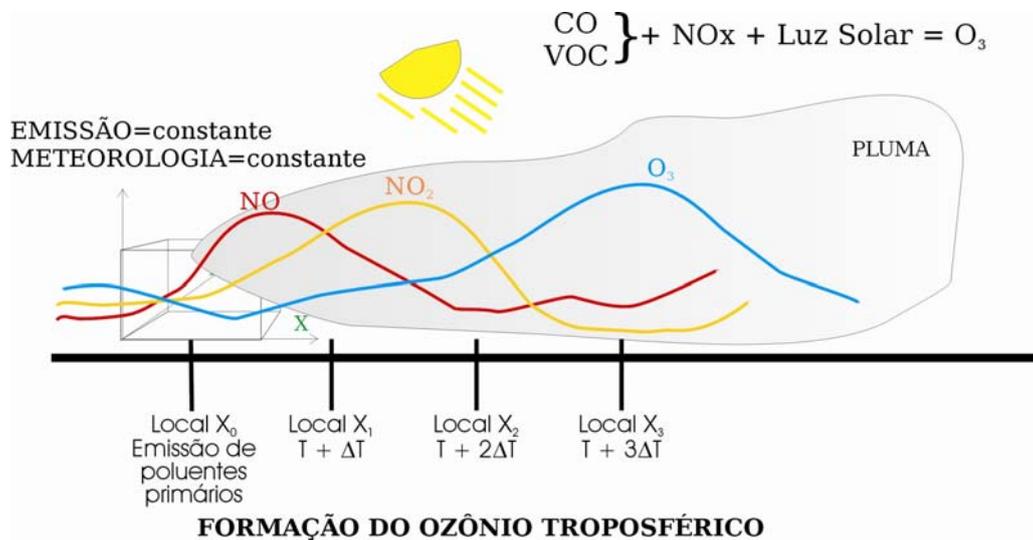


Figura 5 – Representação esquemática espacial das emissões e reações para uma “ilha” de emissão

De forma simplificada, pode-se considerar que os locais próximos as fontes dos poluentes primários, espera-se uma maior concentração de poluentes tais como o SO_2 , CO , HC e NO , e concentrações mais baixas de O_3 devido ao seu consumo pelo NO . De forma inversa, nas locais distantes dessas fontes, espera-se concentrações mais baixas de CO , HC e NO e maiores condições para a ocorrência de picos de ozônio.

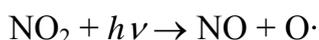
Assumindo-se um cenário fictício estacionário, com emissão de poluentes primários e meteorologia constantes, pode-se explicar que no local X_0 , intensificam-se as emissões veiculares e as concentrações dos poluentes vão aumentando gradativamente. Após algumas horas ($T + \Delta T$) de emissão contínua dos veículos, no Local X_1 , localizado na direção preferencial dos ventos, são medidas concentrações menores de NO e maiores de NO_2 , que com a presença da luz solar, propiciam a formação do ozônio. No Local X_2 , transcorrido o tempo $T + 2\Delta T$, observa-se um decaimento das concentrações do NO e NO_2 e um aumento do O_3 , sendo medido no Local X_3 , também na direção preferencial do vento e transcorrido o tempo $T + 3\Delta T$,

a maior concentração de ozônio.

A reação mais importante na produção do ozônio na atmosfera é entre o oxigênio atômico e o molecular (SEINFELD, 1986):



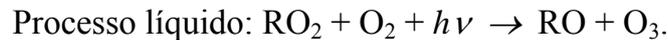
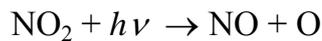
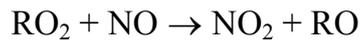
Onde M é um terceiro elemento, tal como o N₂ ou O₂, que remove a energia da reação e estabiliza o O₃. A altas altitudes (acima de 20 km), os átomos de oxigênio são produzidos pela fotodissociação do oxigênio molecular por absorção da radiação do ultravioleta profundo. A altitudes mais baixas, onde há apenas radiação com comprimentos de onda maiores que 280 nm, a única fonte de oxigênio atômico é a fotodissociação do dióxido de nitrogênio. Essa dissociação ocorre pela fotólise do dióxido de nitrogênio (NO₂) que na presença de radiação ultravioleta é quebrado em óxido de nitrogênio (NO) e oxigênio reativo (O·). A reação é demonstrada abaixo:



O comprimento de onda do fóton de energia $h\nu$ varia entre 280 e 430 nm. Depois da formação do ozônio, esta molécula reage rapidamente com o óxido de nitrogênio, regenerando a molécula de NO₂:



As três reações acima ocorrem rapidamente, estabelecendo uma concentração estável do ozônio. Entretanto, apenas estas reações não justificam o nível de ozônio encontrado em atmosferas urbanas poluídas. Nesta última reação, uma molécula de ozônio é necessária para a geração de NO₂, consumindo uma molécula de NO. Uma reação que converta o NO para o NO₂ sem consumir a molécula de ozônio pode fazer com que o ozônio se acumule. Tal reação acontece na presença de hidrocarbonetos. Em particular, radicais peróxi (RO₂, onde R é um grupo alquil) produzidos na oxidação de moléculas de hidrocarbonetos reagem com o NO para formar o NO₂, permitindo uma maior produção do ozônio. O processo é descrito abaixo:



3.3. Modelagem matemática de poluentes atmosféricos

O controle da poluição atmosférica em escala local ou regional é realizado geralmente através de uma rede de monitoramento da qualidade do ar, que é considerada um instrumento útil para a segurança da saúde humana e do ambiente, e permite analisar o benefício de ações de saneamento, além de possibilitar intervenções específicas no caso de acontecer superação dos limites estabelecidos pela legislação (MOREIRA & TIRABASSI, 2004).

MOREIRA & TIRABASSI (2004) citam que, por motivos econômicos e administrativos, o número de pontos monitorados por uma rede é limitado e sua disposição espacial geralmente não é estudada cuidadosamente, podendo estar posicionados em um local pouco representativo. Dentro deste contexto, a utilização de modelos matemáticos que simulam o transporte e a difusão dos poluentes na atmosfera constitui uma importante ferramenta para auxiliar no conhecimento e previsão das concentrações de poluentes atmosféricos.

Ainda segundo MOREIRA & TIRABASSI (2004), com uma resposta de boa qualidade fornecida pelo modelo, é possível analisar a contribuição das diversas fontes para a poluição geral e então propor ações para limitar as emissões das fontes que causam maior impacto. Com a utilização de modelos matemáticos é possível fazer previsões ou simular campos de concentração para proposição de políticas de limitação de emissões de poluentes.

Os processos que governam o transporte e a difusão de poluentes são numerosos e de uma complexidade tal que não é possível descrevê-los sem a utilização de modelos matemáticos capazes de integrar espaço-temporalmente todas essas informações. Os modelos matemáticos utilizam dados experimentais e podem estimar em tempo real a qualidade do ar; auxiliar nas liberações acidentais e avaliar as áreas de risco; identificar as fontes poluidoras; avaliar a contribuição de uma única fonte à carga poluidora e administrar e planejar o território (MORAES, 2001).

Portanto, a utilização da modelagem matemática permite um salto de qualidade na gestão da qualidade do ar, porque os modelos permitem estabelecer funções além daquelas realizadas nas medições da rede de monitoramento.

O cálculo do transporte e dispersão de poluentes na atmosfera leva em consideração diversos fatores, tais como as condições meteorológicas, as características das fontes emissoras de precursores. Dados como temperatura da atmosfera, velocidade dos ventos, incluído suas flutuações (turbulência), insolação do local da fonte, direção do vento, estabilidade da atmosfera e relevo, são os fatores mais importantes. Também é necessário saber o tamanho da chaminé (altura e diâmetro), a localização da indústria, os padrões de emissão e a composição química dos gases. Os parâmetros de emissão dos gases é diferente para cada tipo de fonte (MORAES, 2001).

A dispersão também é um processo extremamente complexo. Isto se deve ao fato que os escoamentos na troposfera, dentro da chamada camada limite planetária (CLP), serem influenciados pelas turbulências térmica e mecânica, cuja física ainda permanece longe de ser completamente equacionada. Portanto, os modelos de transporte e dispersão de poluentes, devem ser capazes de simular em detalhes os efeitos da turbulência para obter previsões confiáveis da dispersão dos contaminantes aéreos. Estes modelos variam em grau de complexidade e podem ser classificados em duas principais classes: os eulerianos e lagrangeanos. Os modelos eulerianos utilizam um sistema de coordenadas fixo em relação a terra. As propriedades do fluido como densidade, temperatura e velocidade são calculadas em

um ponto fixo no espaço (x,y,z) no tempo t (Figura 6).

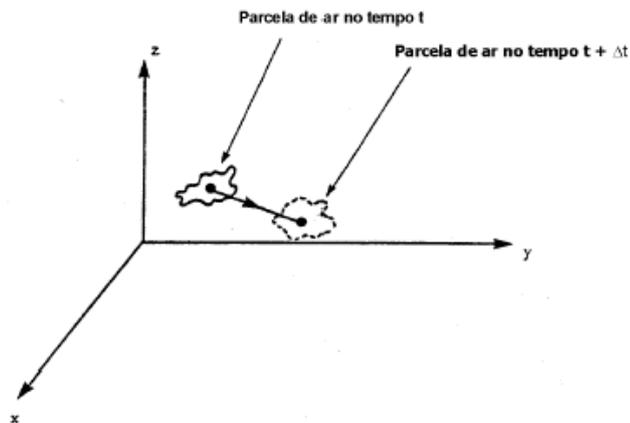


Figura 6 – Sistema de referência utilizados em modelos do tipo Eulerianos
Fonte: ZANNETII (1990) apud ALVARES JR. et al. (2002)

Já os modelos lagrangeanos descrevem as concentrações do poluente em termos das propriedades dos deslocamentos de grupos de partículas liberadas na atmosfera., simulando suas trajetórias através da utilização de um sistema de coordenadas baseado na posição de uma partícula em um tempo t , relativo a sua posição (x, y, z) em um tempo de referência t_0 (Figura 7). Essas coordenadas lagrangeanas são fisicamente mais naturais na descrição do movimento do fluido, no entanto são muito mais difíceis no tratamento matemático. Segundo alguns autores são as ferramentas mais potentes para o estudo do transporte e dispersão de poluentes (ZANNETTI, 1997).

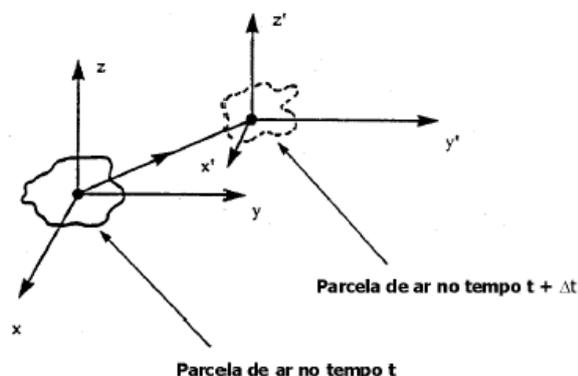


Figura 7 – Sistema de referência utilizados em modelos do tipo Lagrangeanos
Fonte: ZANNETII, 1990 apud ALVARES JR et al. (2002)

Os modelos Lagrangeanos se diferenciam dos Eulerianos porque utilizam um sistema de referência que segue o movimento da atmosfera. Atualmente, são imersos nesta classe todos os modelos que acompanham a nuvem de poluentes em "elementos" discretos, como segmento "puff" ou partículas fictícias (MORAES, 2001).

Segundo SOUTO et al. (2001 apud MORAES, 2001), os modelos gaussianos são considerados uma subclasse desses dois modelos citados anteriormente e são os mais comuns, mas por sua vez são extremamente limitados. Eles se aplicam somente a situações de vento constante e turbulência homogênea, que dificilmente são encontradas na CLP. Modelos gaussianos/lagrangeanos do tipo puff, aperfeiçoamentos destes últimos, já possuem uma aplicabilidade maior, com a vantagem de consumir menos tempo de processamento do que os modelos lagrangeanos de partícula (Souto et al. (2001) apud MORAES (2001)).

De acordo com ALVARES JR. et al. (2002), os modelos baseados na análise de pluma gaussiana são os de uso mais freqüente nos estudos de impacto de fontes de poluição do ar. Esses modelos são baseados no fato de que, sob condições meteorológicas de vento e turbulência e de emissões homogêneas e estacionárias (que não variam no tempo), as concentrações médias de uma pluma a partir de um ponto fixo (fonte pontual) seguem uma distribuição gaussiana. A figura 8 mostra uma representação do modelo de pluma gaussiana, em que a pluma segue a direção do eixo x , \vec{u} é o vetor velocidade do vento, h_s é a altura da chaminé e H a altura efetiva da emissão.

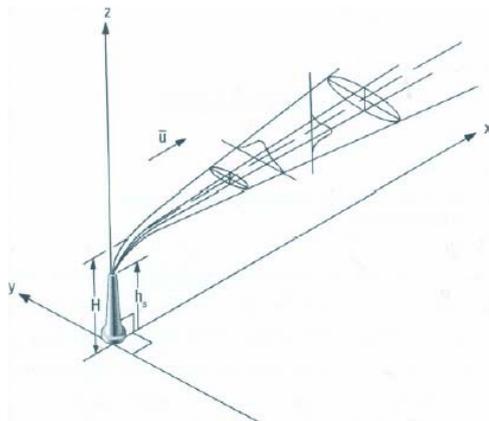


Figura 8 - Representação de uma pluma gaussiana.

MOREIRA & TIRABASSI (2004) descrevem que o modelo Gaussiano é fundamentado no pressuposto teórico que a solução exata, mas não real, da equação de transporte e difusão na atmosfera, no caso em que o vento e o coeficiente de difusão turbulenta são constantes com a altura. A solução é forçada a representar situações reais através de parâmetros empíricos, os chamados "sigmas". Podem ser estacionários (independentes do tempo, e considerados "modelos pluma") e os que dependem do tempo (os modelos "puff"). O nome de tais modelos deriva do fato de que a distribuição dos poluentes, ambos vertical e transversalmente à direção do vento, é descrita da famosa curva descoberta pelo físico-matemático Gauss. As várias versões dos modelos Gaussianos se diferenciam essencialmente pela técnica utilizada para calcular o sigma em função da estabilidade atmosférica e da distância da fonte emissora. Podem ser distinguidas duas técnicas fundamentais neste sentido: a primeira faz uso de funções adimensionais construídas com a idéia de medidas disponíveis da intensidade da turbulência; a segunda utiliza funções semi-empíricas para o sigma construído para a classe de estabilidade com que são esquematizados de acordo com o estado da atmosfera.

ALVARES JR. et al (2002) cita que é importante apontar que existe uma quantidade enorme de modelos desenvolvidos. Nessa variedade de modelos, geralmente a diferença é o grau de detalhes e o volume considerados nos dados de entradas (inputs) e saídas (outputs) dos modelos. Os modelos gaussianos são os mais utilizados para estimativas de impacto de fontes de poluentes primários (emitidos diretamente na atmosfera), enquanto que os modelos numéricos são normalmente mais apropriados que os modelos gaussianos para áreas urbanas que envolvem reações químicas na atmosfera. Porém, esses modelos exigem um número maior de informações de entrada, sem as quais não podem ser aplicados de forma satisfatória, além do tempo de processamento elevado.

De acordo com ALVARES JR. et al (2002), são utilizados também modelos prognósticos não dinâmicos, como os estatísticos, normalmente empregados em situações em que não há um completo entendimento dos processos físicos e químicos envolvidos, ou quando a escassez de dados de entrada inviabiliza a

utilização de modelos numéricos ou gaussianos. Citam também que, embora ainda seja objeto de poucos estudos, mais recentemente tem-se investigado também o uso de modelos baseados em redes neurais. Seu funcionamento é semelhante aos dos modelos puramente estatísticos, uma vez que não são considerados os aspectos fenomenológicos e, portanto não se pode aplicar em situações de causalidade.

Outra variável importante para inicialização dos modelos são as informações meteorológicas, incluindo os efeitos da turbulência, podendo ser de observações ou de saídas de modelos meteorológicos, pois em muitos casos não há uma rede meteorológica implantada para fornecer esse tipo de dado. Os modelos meteorológicos podem ser classificados ainda como diagnósticos ou prognósticos (MORAES, 2001).

Os modelos diagnósticos utilizam observações meteorológicas ou saídas de outros modelos para produzir os campos de ventos (direção e velocidade) necessários aos modelos de dispersão. Isto é feito utilizando as equações de conservação, sem os termos de variação temporal, onde os campos produzidos obedecem a conservação de massa. Em resumo, estes modelos calculam a melhor solução para os campos de velocidade de um determinado local para um dado tempo, a partir das informações meteorológicas fornecidas a ele. Em geral são utilizados procedimentos do tipo análise objetiva (MORAES, 2001).

Os modelos meteorológicos prognósticos, por sua vez, resolvem as equações de conservação avançando no tempo. Estes modelos fornecem os campos de velocidades, temperaturas e outras variáveis de interesse, que o modelo de dispersão possa necessitar. O grande avanço na modelagem numérica da atmosfera obtidos nas últimas décadas tornou possível através destes modelos preverem com um grande grau de precisão, circulações atmosféricas relevantes para a dispersão de poluentes em um determinado local para um tempo futuro próximo (~36 h). Isto é obtido pela integração das equações governantes utilizando métodos numéricos, tarefa que hoje é conhecida como previsão numérica do tempo. Com os avanços nas técnicas de solução e melhorias na representação dos processos físicos, é possível hoje em dia

representar com um grande grau de precisão os fenômenos atmosféricos das mais diversas escalas de tempo e espaço. Os chamados modelos regionais de previsão do tempo são hoje em dia as ferramentas mais avançadas na representação destes fenômenos (MORAES, 2001).

3.4. Aplicabilidade dos modelos – Estudos de Casos já realizados

3.4.1. Simulação utilizando o modelo CIT e modelo meteorológico RAMS

O Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo (IAG/USP), através do Departamento de Ciências Atmosféricas, realizou vários estudos do transporte dos poluentes primários emitidos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a formação de poluentes secundários em suas vizinhanças. Para isso, realizou uma simulação da qualidade do ar num período crítico de poluição com o modelo fotoquímico CIT, desenvolvido no California Institute of Technology. As condições meteorológicas, fundamentais para o transporte dos poluentes, foram fornecidas pelo modelo meteorológico de meso-escala RAMS (YNOUE & ANDRADE, 2001).

O modelo CIT (McRae et al., 1982a; Harley et al., 1993 apud YNOUE & ANDRADE, 2001) calcula a distribuição de concentração de espécies gasosas em uma região resolvendo a equação de conservação das espécies para um sistema reagente. Trata das emissões, reações químicas, transporte e deposição dos gases envolvidos na produção dos oxidantes fotoquímicos, sendo que especial ênfase foi dada à descrição do ozônio.

De acordo com YNOUE & ANDRADE (2001), a principal simplificação adotada no modelo é que na presença de gases poluentes e dos aerossóis, as condições meteorológicas de escala urbana não são significativamente afetadas. A importância desta aproximação é que ela permite que a dinâmica da concentração

seja desacoplada da equação que descreve os campos de escoamento na área de estudo. Esta consideração reduz a complexidade do problema computacional, mas ainda necessita de uma especificação do campo do vento e das características da camada de mistura. Além disso, a distribuição das concentrações iniciais e as concentrações nas fronteiras também são necessárias para a solução da equação.

Nesse trabalho é descrito que os três módulos do modelo CIT são: meteorologia, emissões pelas fontes e interações químicas. Cita também que nas entradas do modelo CIT estão incluídas as emissões, os campos meteorológicos (campo tridimensional do vento, as temperaturas superficiais, a umidade e altura da camada de mistura), características topográficas (como utilização da superfície e rugosidades superficiais) e dados de qualidade do ar para as condições iniciais e de fronteira. Para a radiação solar é utilizado um cálculo a partir de uma função do ângulo zenital (obtido com a latitude e longitude) para cada hora do dia, sendo atenuado quando há cobertura de nuvens.

Nessa simulação, utilizando o modelo CIT, a área de estudo é uma parte da RMSP delimitada pelos paralelos 22,9°S, 24,2°S, 48°O e 45°O. O modelo fotoquímico utiliza as coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator). Neste sistema, o canto inferior é definido como 200km E e 7320 km N. A grade horizontal tem 60 pontos na direção leste-oeste e 30 pontos na direção norte-sul, com espaçamento de 5 km entre os pontos em ambas as direções, ou seja, seu domínio é de 300 km x 150 km. Na direção vertical, a região foi dividida em 5 camadas, definidas de tal maneira que a resolução próxima à superfície fosse maior, diminuindo sucessivamente. O topo do modelo está a 1700 m da superfície.

Segundo YNOUE & ANDRADE (2001), seguindo as metodologias utilizadas por CARDOSO (1997) e YNOUE (1999), as simulações fotoquímicas com o modelo CIT foram feitas para o período de 9 a 12 de agosto de 1999. Os autores descrevem que entre os dias 10 e 13, a RMSP ficou sob o domínio de um sistema de alta pressão, sem nenhuma nebulosidade, com ventos fracos e grandes períodos de calmaria, temperaturas máximas acima dos 25°C e umidades relativas

mínimas abaixo dos 30%, determinando um período extremamente desfavorável à dispersão de poluentes, sendo portanto, de grande interesse para o estudo.

Para as emissões veiculares (móveis), limitadas à RMSP, foi considerado o perfil baseado em CASTANHO (1999), já para as emissões fixas (calculadas apenas para Cubatão), as emissões foram consideradas contínuas. Para esse cálculo, foram utilizadas as estimativas de emissão fornecidas pela CETESB (2000) para os poluentes CO, NO_x, SO₂ e HC's. Estes foram devidamente divididos nas classes de acordo com análises de combustível (gasolina e álcool).

Para geração dos dados meteorológicos foi utilizado modelo de prognóstico RAMS (Regional Atmospheric Modeling System).

Os autores citam que o modelo RAMS (Pielke et al., 1992) é um modelo prognóstico de equações primitivas altamente modular, que permite configurações diversas. No estudo em questão, esse modelo foi executado na versão 4.3 utilizando duas grades, sendo a maior delas com um espaçamento horizontal de 20 km num domínio de 600 por 400 km (30 x 20 pontos de grade). A grade vertical tem espaçamento inicial de 90 m, a partir de então, com alargamento numa taxa de 1.2 até alcançar 1000m, mantendo esta resolução até o topo do modelo, a 19 km de altura num total de 29 níveis, sendo que o primeiro está a 43m acima do solo. O centro desta grade coincide com o da grade utilizada no CIT, coincidente também com a grade aninhada. Esta grade menor tem espaçamento horizontal de 5 km num domínio de 330 por 170 km (66 x 34 pontos de grade). O modelo do solo tem 6 níveis. A equação da continuidade é descrita em sua forma anelástica, eliminando as ondas sonoras. Para as radiações de ondas curtas e longas foram utilizadas as parametrizações de Harrington, ou seja, há interação da radiação com o material condensado e com o vapor d'água. Apesar da falta de precipitação durante o período de estudo, a parametrização convectiva e da microfísica estão ativadas, visando uma simulação mais realística. Os coeficientes de difusão horizontal são parametrizados segundo a aproximação de Smagorinsky, onde a viscosidade turbulenta é derivada do cisalhamento local e do comprimento de mistura. A difusão vertical é

parametrizada de acordo com o esquema de Mellor e Yamada, que emprega a equação prognóstica da energia cinética turbulenta.

Para a topografia e tipo de vegetação foram utilizados os arquivos do International Geosphere Biosphere Program (IGPB), com 1 km de resolução e o tipo de solo foi considerado constante (sandy clay loam). A versão 4.3 do RAMS disponibiliza 30 tipos de vegetação, entre elas há o tipo de vegetação “cidade”.

No estudo da circulação local na região de interesse os autores citam que foi feita uma simulação das 00 GMT do dia 09 de agosto de 1999 às 03 GMT do dia 13 de agosto de 1999. Estas simulações foram periodicamente alimentadas por condições de contorno fornecidas pelas reanálises do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC / INPE.

Os resultados dessa simulação são apresentados na Figura 9, que mostra a variação diurna dos poluentes NO, NO₂ e O₃ (todos em ppb) para o dia 12 de agosto de 1999 em um ponto dentro da RMSP. Os autores citam que para os dias 09, 10 e 11 os resultados foram semelhantes.

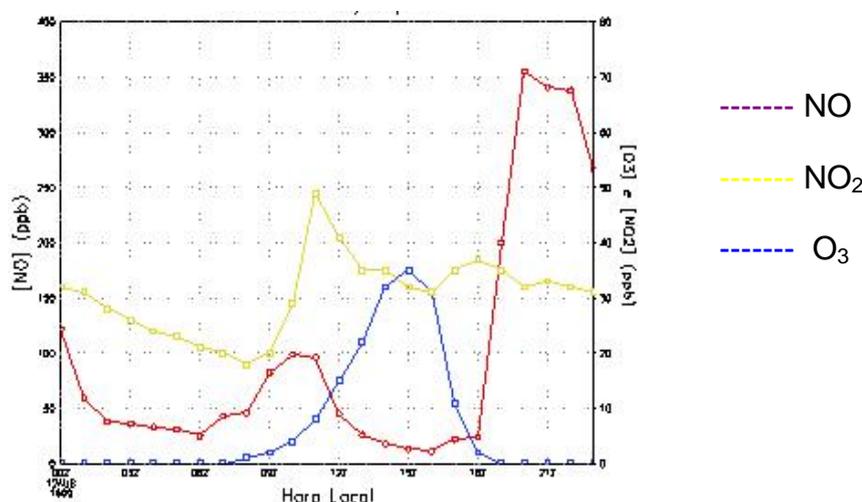


Figura 9 - Simulação numérica da variação diurna dos poluentes (em ppb) no dia 12 de agosto de 1999 para um ponto dentro da RMSP (Fonte: YNOUE & ANDRADE (2001)).

Dentre as conclusões do estudo, os autores citam que as concentrações dos poluentes primários CO, NO e HC's são maiores próximo às fontes e, em geral, os picos das concentrações se encontram dentro das regiões emissoras; que o poluente

NO₂ é espalhado e produzido por toda a área simulada, fazendo com que altas concentrações sejam simuladas nas regiões rurais, principalmente no período noturno. Entretanto, os picos das concentrações se encontraram dentro ou muito próximo das fontes; e no caso ozônio, suas maiores concentrações foram simuladas fora da RMSP, estando de acordo com estudos feitos para outras metrópoles.

Uma importante conclusão do estudo que deve ser destacada, é que a evolução diurna dos poluentes NO, NO₂ e O₃ dentro da RMSP, é compatível com as observações feitas pela rede telemétrica da CETESB e que há uma variação espacial da concentração dos poluentes primários e secundários tanto dentro da RMSP (região emissora) quanto fora da região urbana. Vale destacar, porém, que não foi realizada nenhuma correlação entre as concentrações horárias medidas pelas estações da CETESB e as concentrações obtidas na simulação deste modelo numérico.

3.4.2. Simulação utilizando o modelo fotoquímico RPM-IV (Reactive Plume Model IV)

Em outro estudo, com o objetivo de sistematizar de forma metodológica a análise de inserção de uma Usina Termoelétrica, no contexto de planejamento, no âmbito regional, sob o ponto de vista de impacto ambiental atmosférico com base em informações disponíveis em banco de dados e uma análise preliminar da região de influência do empreendimento, estimando a carga de poluentes atmosféricos de origem industrial, móvel (veicular) e agrícola. Esta carga inicial é designada como poluição de fundo previamente existente (NEGRI, 2002).

Nesse estudo, as taxas de emissão por fonte foram obtidas através de fatores de emissão, enquanto que a qualidade do ar é obtida por modelo de dispersão. Com o modelo utilizado, o impacto do novo empreendimento é incluído para avaliação do acréscimo. O modelo foi aplicado na análise de emissão e dispersão do NO_x, poluente precursor da formação do ozônio (NEGRI, op. cit.).

NEGRI (2002), considerando que os modelos de dispersão mantêm os poluentes “in natura” ao longo da trajetória de diluição na atmosfera e que as reações entre os hidrocarbonetos não queimados e os óxidos de nitrogênio, na presença de luz, formam o ozônio, é necessário, para operação de uma usina termoeletrica, uma avaliação do mecanismo de formação do ozônio, segundo este princípio, com base na carga de poluentes presentes na área de influência e o respectivo potencial de síntese de ozônio. De acordo como autor, esta atividade não fez parte do escopo do trabalho, porém foi incorporado para integrar a previsão de impacto na qualidade do ar regional.

De acordo com NEGRI (op. cit.), o “smog” fotoquímico é afetado por um grande número de fatores complexos e variáveis no espaço e no tempo, envolvendo um grande número de poluentes primários e secundários, de forma não linear e ainda não bem esclarecida em todos os seus detalhes. As escalas temporais das variações de concentrações tipicamente observadas durante a ocorrência do “smog” fotoquímico são da ordem de poucas horas, sendo estas variações bastante significativas dentro do período de um dia e cita que existe uma variedade de modelos matemáticos para simulação de aspectos do “smog” fotoquímico os quais diferem em aspectos relacionados à fluidodinâmica, meteorologia e mecanismos de geração e de destruição das substâncias participantes.

Na descrição de um modelo adequado para essas situações (NEGRI, op. cit.), é sugerido que o modelo RPM-IV (“Reactive Plume Model IV”) apresenta as características desejáveis para uma análise do problema em questão. O modelo RPM-IV é um modelo numérico de pluma que simula as complexas interações existentes entre a dispersão e fenômenos fotoquímicos envolvidos. É citado que o modelo pode ser utilizado para a simulação de efluentes gerados em uma única fonte pontual, fontes superficiais e, em alguns casos, várias fontes pontuais, que devem estar alinhadas no eixo de direção do vento. O autor descreve que esse modelo tem sido aplicado em uma série de estudos, tendo também sido rigorosamente testado comparando-se seus resultados com amostras atmosféricas coletadas por aviões para o caso de plumas emitidas pela “Labadie Power Plant”, localizada perto de St. Louis.

De acordo com o autor, na conclusão desses estudos (EPA, 1999), considerou-se que o modelo RPM-IV foi bem sucedido na simulação das concentrações de ozônio e de óxidos de nitrogênio decorrentes de emissões pontuais, embora os autores do estudo tenham recomendado a execução de testes adicionais.

É comentado também que o modelo RPM-IV tem sido empregado de forma incipiente na avaliação de situações similares ao caso analisado, ou seja, impacto de uma usina termoeletrica na qualidade do ar. Como exemplo é citado que o modelo aceita múltiplas fontes emissoras desde que estas estejam alinhadas com a direção do vento, o que não corresponde à realidade. Conseqüentemente, a descrição geométrica das fontes emissoras deverá ser modificada para cada direção de vento a ser considerada. Assim, devido especialmente a esse problema, essa atividade deverá ser elaborada de forma cuidadosa e deverá constituir objeto de esforço considerável.

Por outro lado, segundo NEGRI (2002), em função das limitações do modelo de representação dos efeitos fotoquímicos, avaliações atuais e usuais do fenômeno não prevêem modelagem, tendo em vista a complexidade dos fenômenos envolvidos e as incertezas das reações de formação de ozônio. Essas avaliações se limitam a estudos globais de potencial de formação com base nas cargas de NOx e hidrocarbonetos presentes na atmosfera.

3.4.3. Simulação utilizando o modelo fotoquímico CALGRID e modelo meteorológico CALMET

SILIBELLO et al.(1998), utilizou o modelo fotoquímico CALGRID e o modelo meteorológico CALMET para simular a redução das altas concentrações de ozônio durante o período de verão em áreas urbanas da Itália, com o objetivo de avaliar estratégias de diminuição de poluentes primários e de precursores de ozônio (O3) e dióxido de nitrogênio (NO2).

O modelo foi aplicado para a área metropolitana de Milão e seus subúrbios, uma região altamente industrializada e populosa. Foi considerada uma extensão de

100 x 100 km² e selecionado um período de verão, geralmente caracterizado pela alta atividade fotoquímica.

Para alimentação do modelo foram levadas em conta as emissões de origem veicular (fontes móveis), estacionárias (indústrias) e também fontes biogênicas da pluma urbana, que foi dividida dentro de células utilizando um sistema de GIS, baseado em banco de dados do governo italiano.

O sistema de modelagem foi ajustado para a avaliação e comparação de diferentes estratégias de controle de emissões. Uma vez que as principais fontes de poluentes na área atualmente são automóveis, foi avaliado o impacto da utilização de combustíveis limpos nos carros.

Os resultados da simulação mostraram boa correlação com a concentração de ozônio medido, mas houve deficiência na correlação com a concentração de NO_x, especialmente nas estações de monitoramento urbanas durante a noite.

3.4.4. Simulação utilizando o modelo fotoquímico CALPUFF e modelo meteorológico CALMET

Com o objetivo principal de implementar uma ferramenta para a previsão do campo de vento e concentração de poluentes na micro-escala atmosférica, foi utilizado por MORAES (2004) o modelo California Meteorological Model (CALMET) e o California Puff Model (CALPUFF). Os resultados obtidos para as concentrações de poluentes, como modelo CALPUFF, foram por sua vez, comparados com dados reais de concentração de poluentes, fornecidos pela empresa Tractebel Energia S.A., medidos nos arredores do complexo termelétrico Presidente Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo (SC).

O CALPUFF é um modelo gaussiano que estima concentrações devido a emissões de curta duração, para condição não estável que contém módulos para os efeitos de terrenos complexos, transporte sobre água (por exemplo, sobre

reservatórios, lagos, etc.), quebra de pluma devido a edificações, remoção úmida e seca (deposição) e transformações químicas simples. O modelo foi projetado para estimar concentrações em escalas que vão de dezenas de metros até centenas de quilômetros e pode ser utilizado para estudos de modelagem de qualidade do ar, estudos de impacto ambiental, etc.. Uma parte integrante do sistema CALPUFF é o CALMET, um modelo meteorológico que inclui um gerador de valores de ventos para diagnóstico, contendo análises objetivas e tratamentos parametrizados das tendências de fluxos, efeitos cinemáticos devido ao terreno, efeitos de bloqueio do terreno e um modelo micro meteorológico para camadas limites sobre terreno firme e água (EPA).

O sistema CALMET/CALPUFF inclui três principais componentes: um modelo meteorológico diagnóstico tridimensional (CALMET), o modelo de dispersão propriamente dito (CALPUFF) e um programa de pós-processamento (CALPOST). Cada um destes programas tem uma interface própria e separada.

O modelo CALPUFF possui quatro opções internas para a parametrização dos efeitos de transformação química. A primeira baseada no esquema do modelo MESOPUFF II, a segunda baseada no esquema RIVAD/ARM3 e a terceira onde o usuário especifica as taxas de transformação, para um ciclo de 24 horas. Uma última opção permite que o usuário “desligue” o módulo de transformação química.

Os modelos de puff Gaussianos representam a pluma através de um número muito grande de puffs discretos de material poluente. Cada puff tem uma determinada massa que é distribuída inicialmente de maneira uniforme ou Gaussiana (a mais utilizada). O puff é transportado de acordo com a trajetória de seu centro de massa, que é determinada pelo vetor velocidade do vento local, enquanto se expande de maneira Gaussiana no tempo através dos coeficientes de dispersão $x \sigma$, $y \sigma$ e $Z \sigma$. Estes coeficientes são dependentes do tempo, e os responsáveis pelo crescimento de cada puff. A Figura 10 mostra a evolução de um puff emitido de uma fonte pontual (chaminé).

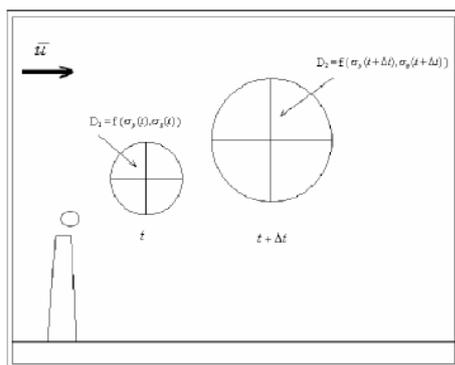


Figura 10 - Um puff em dois instantes de tempo.

No instante de tempo t o diâmetro D_1 é função dos parâmetros y σ e z σ no instante t . No instante posterior, $t + \Delta t$, o diâmetro D_1 é agora D_2 , que por sua vez é função dos parâmetros y σ e z σ no instante $t + \Delta t$. À medida que o puff é transportado no ar, a concentração do material poluente no mesmo vai diminuindo. Ao encontrar um receptor, a concentração de material poluente do puff (naquele instante) é “computada” para o receptor.

De acordo com MORAES (2004), os resultados obtidos pelo modelo CALPUFF estão dentro do esperado, pelo menos com relação a comparações semelhantes existentes na literatura. Vale ressaltar que a simulação realizada previu somente a concentração de dióxido de enxofre, visto que o modelo realiza apenas transformações químicas simples, porém a implantação dessa ferramenta na gestão da qualidade do ar deve ser aperfeiçoada.

3.4.5. Simulação utilizando o modelo atmosférico de trajetórias OZIPR (Ozone Isopleth Plotting Package)

O modelo atmosférico OZIPR (“Kinetic Model and Ozone Isopleth Package for Research”), versão para pesquisa do programa OZIPP (“Kinetic Model and Ozone Isopleth Package”) da U.S.-EPA. Esse modelo permite a simulação da formação de ozônio e outros poluentes secundários em atmosferas urbanas. Calcula

também os valores máximos (média horária) para um conjunto de condições iniciais, concentrações de precursores, parâmetros meteorológicos e de transporte e emissões. Estes resultados permitem calcular as “isopletras de ozônio”, curvas de igual concentração de ozônio (valor máximo), em função das concentrações de óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis para um dado ambiente urbano. Os resultados permitem fazer estimativas e elaborar estratégias de controle ambiental.

ARBILLA (2002) utilizou o modelo OZIPR para simular as concentrações de ozônio para uma área urbana, com alto fluxo veicular, no centro da cidade do Rio de Janeiro. Foi desenhado um caso base utilizando dados experimentais, do mês de dezembro de 1999, para a Avenida Presidente Vargas, Rio de Janeiro.

A correlação entre os resultados calculados e os dados experimentais foi considerada satisfatória. O pico de ozônio calculado aconteceu às 15:15 horas (23,0 ppb). Foi realizada uma análise de sensibilidade e incertezas e desenhados alguns cenários hipotéticos para ilustrar a capacidade preditiva do modelo. Vale ressaltar que a simulação foi realizada para apenas um ponto.

Dentre as conclusões, ARBILLA (2002) cita que os resultados mostram o potencial dos modelos de qualidade do ar para descrever e prever as respostas das estratégias de controle. É relatado também que o modelo é útil para explicar os principais aspectos da poluição atmosférica, mas em geral, não é um bom caminho para estabelecer estratégias para uma bacia aérea.

3.4.6. Simulação utilizando modelos baseados em “Redes Neurais”

Os modelos baseados em redes neurais são largamente utilizados para previsão do ozônio na baixa atmosfera. A literatura internacional fornece uma gama de trabalhos relacionados ao tema.

COMRIE (1997) investigou o potencial de uso de redes neurais para previsão da poluição por ozônio, comparando-o com os tradicionais modelos de regressão

linear multivariada. Os modelos de regressão múltipla e as redes neurais foram examinadas utilizando cidades com diferentes climas e com concentração de ozônio variada, possibilitando um estudo comparativo para essas duas propostas. Foram utilizados dados de oito cidades ao redor dos EUA: Atlanta (GA), Boston (MA), Charlotte (NC), Chicago (IL), Phoenix (AZ), Pittsburgh (PA), Seattle (WA) e Tucson (AZ).

De acordo com COMRIE (1997), na comparação dos modelos é possível indicar que as redes neurais são algo melhor que os modelos de regressão para a previsão diária da previsão de ozônio e que todos os tipos de modelos são sensíveis às condições meteorológicas e concentração de ozônio e que a persistência de algumas variáveis favorece a previsão. ((hot, sunny, and frequently less windy))

MELAS et al. (2000), numa experiência de previsão de nível de poluentes fotoquímicos usando um modelo de redes neurais, desenvolvido para mostrar as máximas concentrações a partir de dados meteorológicos e medições de ozônio e NO₂ na cidade de Atenas. As variáveis meteorológicas foram selecionadas através dos processos que determinam o favorecimento do transporte e as transformações dos poluentes.

Como conclusão MELAS et al. (2000), cita que os modelos de previsão são geralmente um tanto insensíveis às pequenas perturbações na maioria dos dados meteorológicas de entrada, com exceção de uma sensibilidade relativamente maior nas mudanças na velocidade e direção dos ventos.

De acordo com NARASIMHAN et al. (1999), um modelo para previsão da concentração de ozônio na cidade de Tulsa (Oklahoma – EUA), foi desenvolvido utilizando técnicas de modelagem baseada em redes neurais. Os modelos neurais foram desenvolvidos utilizando dados meteorológicos e concentração de ozônio do Oklahoma Mesonet, dados de medições de óxidos e dióxidos de nitrogênio dos locais de monitoramento da EPA na região de Tulsa.

NARASIMHAN et al. (1999) cita que o modelo inicial foi treinado somente

com oito variáveis meteorológicas de entrada e foi selecionado o dióxido de nitrogênio para simular a concentração de ozônio, onde foi possível estabelecer um coeficiente de correlação de 0,77. O modelo treinado foi então utilizado para avaliar a sensibilidade para as variáveis primárias que afetam a concentração de ozônio. As mais importantes variáveis (NO₂, temperatura, radiação solar e umidade relativa) mostraram curvas de resposta com forte co-dependência não linear. A inclusão das concentrações de ozônio para a previsão de 3 dias dentro do modelo aumentou o coeficiente para 0,82.

NARASIMHAN et al. (1999) cita também que, como era esperado, a melhor correlação da concentração de ozônio é para os valores das previsões de curto período (previsão de 1 dia). O coeficiente de correlação do modelo subiu pra 0,88 com a incorporação dos dados meteorológicos do “National Weather Service’s Nested Grid Model”. Análises de sensibilidade para as variáveis de ar superior indicaram uma correlação positiva pouco comum entre a concentração de ozônio e a umidade relativa de 500 hPa (5000m) para a tropopausa, enquanto era esperado correlações com temperaturas do ar superior, velocidade vertical do vento e com a espessura de 1000-500hPa.

Como conclusão NARASIMHAN et al. (1999) cita que os resultados do modelo neural são animadores para promover o uso desses sistemas para avaliação de parâmetros complexos co-sensitivos, e para o uso em sistemas automáticos de previsão do ozônio.

A CETESB, órgão vinculado ao governo do estado de São Paulo responsável pelo controle da poluição, face aos problemas relacionados à poluição por ozônio na RMSP, tem trabalhado no desenvolvimento de um modelo para prever com alguma antecedência os níveis de ozônio na atmosfera da região, com o objetivo de dotar os órgãos públicos de informações em tempo adequado para a tomada de decisões referentes às medidas de controle e de saúde pública.

Num levantamento preliminar, no início dos trabalhos, os autores citam a existência de estudos da mesma natureza, em países desenvolvidos como os EUA e

também alguns modelos testados na RMSP, porém sem sucesso, devido às condições meteorológicas relativamente complexas da região, em comparação com locais de clima mais regular. A utilização desses modelos demandam sistemas computacionais complexos, inventário detalhado das emissões e um rede de pontos de monitoramento da poluição do ar densa, além do uso do etanol como combustível no Brasil ocasionar em dificuldades adicionais para o usos de modelos convencionais (GUARDANI et al., 1999).

A RMSP possui extrema variabilidade, inclusive diária, das características climáticas e uma diversidade de fontes de precursores de ozônio que torna difícil a implantação de modelos para previsão. Essa dificuldade, de acordo com os autores, pode ser em parte contornada pela aplicação de modelos baseados em “Redes Neurais”, que apresentam grande capacidade de simular o comportamento de determinados fenômenos por um processo de “aprendizado”. No ajuste deste modelo matemático foram utilizados dados de concentrações de poluentes da atmosfera e também meteorológicos oriundos das estações medidoras da Rede Telemétrica da CETESB (CETESB, 2002).

O modelo foi desenvolvido para um ponto (Parque do Ibirapuera – São Paulo - SP) em conjunto com uma equipe do Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), detentora de algumas experiências bem sucedidas de desenvolvimento e aplicação de modelos multivariados baseados em “redes neurais artificiais”, com apoio financeiro da FAPESP (linha de políticas públicas). Os autores descrevem que dada a grande capacidade apresentada por esses modelos para o reconhecimento e adaptação de padrões com grande número de variáveis é possível simular o comportamento de sistemas complexos, como no caso da formação do ozônio (GUARDANI, 2003).

Para verificação da viabilidade de aplicação do modelo, foi montada uma base de dados referente a um período específico de medições registradas por algumas das estações medidoras da CETESB. Os dados foram preparados visando eliminação de erros e falhas de medidas e foram testados ajustes de modelos com

diferentes características.

A partir desses resultados, foi montado um algoritmo computacional para previsão dos níveis de ozônio a partir de valores previstos das variáveis meteorológicas. Como o modelo depende de previsões dessas variáveis, procedeu-se a um estudo dos modelos disponíveis para previsão meteorológica, tendo sido adotado o modelo “Eta”, operado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (www.cptec.inpe.br/prevnum/modelo_eta). Uma vez que o modelo de previsão meteorológica faz previsões com vários dias de antecedência (com níveis de precisão diferentes), o modelo desenvolvido para prever os níveis de ozônio pode ser utilizado para prognosticar a concentração deste poluente com vários dias de antecedência.

Os resultados obtidos mostraram a possibilidade aplicação de modelos baseados em redes neurais para associar os valores das variáveis de qualidade do ar monitoradas pela CETESB com os níveis de ozônio. Resultados similares foram obtidos para as estações do Parque Ibirapuera e Centro.

Como conclusão GUARDANI et al. (1999) cita que face a complexidade das características que envolvem a modelagem matemática da concentração de ozônio troposférico, com um número de diferentes fatores afetando o sistema, o uso de modelos baseados em “Redes Neurais” pode representar uma ferramenta valiosa para o estudo das tendências dos níveis de ozônio troposférico sob diferentes cenários e condições meteorológicas.

4. DISCUSSÃO – UTILIDADE DOS MODELOS FOTOQUÍMICOS NA GESTÃO DA QUALIDADE DO AR

Os dados disponíveis nos relatórios anuais de qualidade do ar da CETESB, indicam que as principais fontes que contribuem para deterioração da qualidade do ar em áreas urbanas, principalmente na RMSP, é o tráfego veicular. O tráfego veicular, em particular, é responsável em um ano, por quase a totalidade das emissões de monóxido de carbono e de grande parte dos óxidos de nitrogênio, além dos compostos orgânicos voláteis, excluindo o metano e, freqüentemente, das partículas totais em suspensão.

Também devido a crescente descentralização industrial pela qual passa o Estado de São Paulo, sobretudo pelos incentivos fiscais oferecidos por municípios do interior, que além da redução de custos proporcionada, fornece mão-de-obra qualificada e condições ambientais adequadas para sua implantação. Nestas áreas, com uso e ocupação do solo com predomínio de monoculturas, observa-se um perfil agro-industrial, com indústrias acrescentando significativas emissões atmosféricas, que são somadas às emissões oriundas da queima de biomassa.

As condições meteorológicas adversas à dispersão de poluentes também contribuem para a degradação geral da qualidade do ar nos locais onde existem altas emissões de poluentes, e podem dar lugar a episódios críticos de poluição atmosférica tanto em regiões metropolitanas como em algumas áreas do interior do estado.

A capacidade de prever com um mínimo de precisão, os impactos da poluição do ar é uma necessidade recorrente. Entretanto, é necessário priorizar a elaboração de inventários precisos das diversas fontes de emissão e ao desenvolvimento de modelos que permitam prever a qualidade do ar com uma resolução adequada as condições de cada região. Esses modelos devem ser alimentados por dados consistentes, de forma a refletir o mais adequadamente possível as especificidades das áreas em questão, com um constante aperfeiçoamento

das redes meteorológicas, do monitoramento da qualidade do ar e dos inventários de emissão (MMA, 2006).

Com esse diagnóstico prévio, é possível estabelecer estratégias onde utilização dos modelos matemáticos de dispersão de poluentes na atmosfera podem contribuir como um instrumento técnico dentro da gestão da qualidade do ar.

Atualmente, numa leitura rápida do funcionamento da gestão da qualidade do ar realizada no Estado de São Paulo, é possível prever a inserção da utilização de modelos matemáticos de poluentes atmosféricos, especialmente aqueles com módulos fotoquímicos, como ferramenta de diagnóstico da qualidade do ar em escala regional. O fluxograma abaixo (Figura 11) ilustra os vários tipos de ações realizadas no âmbito do órgãos ambientais no Estado de São Paulo e também propõe a utilização de modelos matemáticos de qualidade do ar dentro das estratégias para gestão da qualidade do ar.

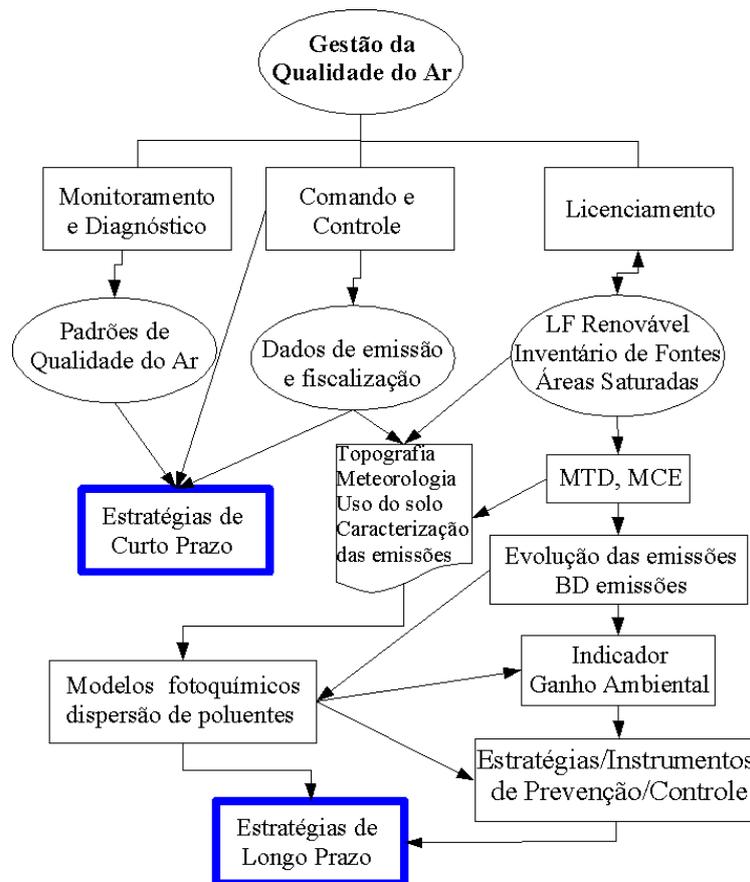


Figura 11 – Utilização de modelos matemáticos no gerenciamento da qualidade do ar

De maneira geral, pode-se considerar que o monitoramento e diagnóstico da qualidade do ar através dos Padrões de Qualidade do Ar (PQAR), que as atividades de comando e controle realizadas através da fiscalização dos empreendimentos licenciados em operação e das suas respectivas emissões, estão inseridos numa estratégia de curto prazo, com objetivo de orientar ações imediatas.

Estas ações, por exemplo, juntamente com o licenciamento ambiental (novos licenciamentos, ampliações de empreendimentos e renovações de licença), que exige a utilização da melhor tecnologia prática disponível (MTD) para redução das emissões e em áreas onde o PQAR é excedido, permite que sejam realizadas restrições para o funcionamento das fontes de poluição atmosférica nessas áreas.

Essas restrições para emissões atmosféricas, citadas no parágrafo anterior, para o licenciamento de empreendimentos, foram introduzidas com o objetivo de permitir ganhos ambientais em áreas consideradas saturadas de poluição do ar.

A ferramenta legal foi implementada pelo Decreto 48.523 de 02/03/2004, que alterou parte do decreto 8468/76 e prevê que nas sub-regiões em vias de saturação e nas já saturadas, a CETESB poderá fazer exigências especiais para as atividades que se encontram em operação, tendo por fundamento metas, planos e programas de prevenção e controle da poluição, quer na renovação da licença de operação, quer durante sua vigência, incluindo um índice de 110% de compensação para ampliação ou instalação de empreendimentos no Estado de São Paulo.

Já o Decreto 50.753/06, complementar ao 48.523/04, define o critério para estabelecimento de graus de saturação da qualidade do ar em determinada região. Na versão anterior, de número 48.523/04, o Decreto limitava-se a impor restrições ao estabelecimento de novas indústrias numa determinada área. Na versão atual, em seu anexo anexo 11, são estabelecidos os procedimentos para a compensação ambiental das emissões. Neste Decreto também é estabelecido que a área de uma bacia aérea é delimitada por um raio de 30 quilômetros, contados a partir de uma estação medidora da CETESB. Essa medida é alvo de intensas discussões, devido a falta de um embasamento científico que sustente esta determinação, como as peculiaridades

de cada região e sua topografia.

Com a utilização das informações geradas pelas ações já estabelecidas na gestão da qualidade ambiental no Estado de São Paulo, no tocante a poluição atmosférica, poderia se estabelecer medidas de longo prazo, com um acompanhamento da evolução das emissões, utilizando-se um banco de dados (BD) de emissões, além da utilização de modelos matemáticos de dispersão de poluentes, que poderiam funcionar para avaliação dos ganhos ambientais, dentro das estratégias de prevenção e controle, numa perspectiva de longo prazo.

O problema maior é que atualmente as informações das fontes de poluição do Estado de São Paulo, encontram-se no SIPOL (Sistema de Fontes de Poluição), um sistema informatizado que contempla um inventário das fontes, as licenças expedidas e informações de controle das fontes de poluição. Porém, para uma análise técnica mais detalhada, ou seja, apuração dos processos de maior significado ambiental, manipulando e integrando as informações desse sistema, ainda não é possível, o que torna o sistema atual uma ferramenta meramente administrativa.

As bases de dados de qualidade ambiental existentes na CETESB, tais como monitoramento da qualidade do ar, áreas contaminadas, águas subterrâneas, águas superficiais interiores e litorâneas e outras, apesar de subsidiar as ações de controle da poluição no âmbito da CETESB, não estão integradas ao SIPOL.

Com o objetivo de integrar as informações de qualidade ambiental e das fontes de poluição, a empresa está implementando um novo “Sistema Integrado de Licenciamento Ambiental”, denominado SIIPOL Web, onde pretende-se que o novo sistema, além de integrar as bases e sistema paralelos utilizados na empresa, contemplará aspectos técnicos e administrativos, permitindo um novo modelo de gestão, onde será possível utilizar as informações de qualidade ambiental e das fontes de poluição licenciadas.

Neste cenário, a utilização de modelos matemáticos fazendo uso desse inventário atualizado das fontes de poluição, podendo ser confrontando com os

dados de qualidade do ar, apresenta-se como uma importante ferramenta de avaliação das ações de controle empregadas, não só para as reduções dos níveis de ozônio e seus precursores, como também para os demais poluentes.

A figura 12 ilustra os tipos de dados de entrada necessários (“inputs”) para o modelo matemático de poluentes e as respostas possíveis que o modelo poderia fornecer (“outputs”).

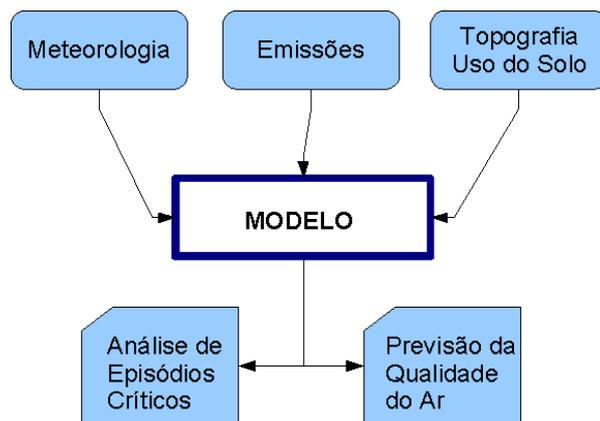


Figura 12 – Dados de entrada do modelo e algumas de suas respostas

Apesar da simplificação demonstrada na figura 12, há uma dificuldade extrema para obter dados de “inputs” com a qualidade necessária para que o modelo forneça uma previsão confiável. O estado não possui uma rede de meteorologia que forneça dados para todas as regiões, sendo necessário pesquisar em diversos órgãos (IAC, INMET, FAB, etc.) e mesmo assim não há uma cobertura completa das diversas regiões do estado.

Os dados de emissão de poluentes devem incluir não só as emissões industriais, que são licenciadas pela CETESB, mas também as emissões veiculares, as da queima de biomassa e as de origem biogênica. Vale destacar aqui, que as emissões veiculares e as queimas de biomassa não passam pelo licenciamento ambiental e dependem de ações específicas dos órgãos ambientais, como por exemplo a “Operação Inverno”, a “Operação Rodízio” (nos anos de 1996 a 1998), “Fumaça Preta”, a proibição da queima da palha de cana em períodos de baixa umidade relativa do ar e programas como o PROCONVE e PROMOT.

5. CONCLUSÕES

Para escolha e implementação de um modelo fotoquímico que descreva as condições de formação e transporte de oxidantes fotoquímicos, como o ozônio, nas regiões metropolitanas do Estado de São Paulo, faz-se necessário um diagnóstico dessas regiões, quanto as fontes de precursores, para servir a entrada de dados do modelo escolhido, dados de monitoramento da qualidade do ar da região de estudo para a calibração desse modelo, além de uma série de análises e ajustes, nos seus módulos de química e meteorologia, que permitirá um melhor entendimento do comportamento da dispersão da poluição aérea, não só especificamente do ozônio, mas também para outros poluentes, nas regiões que serão alvos desse tipo de estudo.

O inventário de fontes da CETESB não encontra-se sistematizado e não contempla todos os empreendimentos. Há portanto, uma defasagem real na qualidade dos dados disponíveis (inventário, dados meteorológicos, dados topográficos e de qualidade do ar), que independente do modelo utilizado, impedem que o mesmo seja aplicado corretamente e que seja possível utilizá-lo para calcular as reduções necessárias para a melhoria da qualidade do ar.

Apesar disso, a utilização de modelos matemáticos como uma das ferramentas de avaliação da qualidade ambiental, seja para o licenciamento de novas fontes ou mesmo para avaliação dos impactos, pode auxiliar nas propostas de redução das emissões atmosféricas.

Dentro desse contexto, os projetos que introduzem novas fontes de emissão ou para reduzir emissões, requer cuidadosas análises para quantificar os impactos nas concentrações atmosféricas mais próximas da realidade.

Do nosso ponto de vista, dentre os modelos analisados, o CIT desenvolvido pelo CALTECH (California Institute of Technology) e Carnegie Mellon University apresenta-se, nos trabalhos pesquisados, como o mais indicado para utilização como uma ferramenta de gestão da qualidade do ar, conforme segue: este modelo vem sendo estudado e adaptado para as condições da RMSP, pelo Instituto Astronômico e

Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG-USP) (YNOUE & ANDRADE,2002) e, o referido instituto em parceria com a CETESB vem aprimorando e incrementando no CIT os “inputs” (módulo meteorológico, módulo de química atmosférica, além dos inventários de fontes móveis e fixas), estando inserido atualmente no Programa de Pesquisas em Políticas Pública da FAPESP (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo), cujo objetivo principal é o de implementar, de forma operacional na Agência Ambiental Paulista (CETESB), um modelo fotoquímico euleriano que descreva as condições de formação e transporte de poluentes, como o ozônio, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Com esse modelo adaptado às condições da RMSP e a implementação do SIIPOL Web, onde as bases e sistema paralelos utilizados na empresa serão integrados, será possível utilizar os dados do inventário das fontes de poluição licenciadas e as informações de qualidade ambiental, como entrada do modelo, permitindo sua utilização para propor políticas de controle mais efetivas na redução das emissões atmosféricas. Além disso, possibilitará ser utilizado em outras regiões do Estado de São Paulo, como uma ferramenta importante na gestão da qualidade do ar.

Vale destacar que no relatório de avaliação de 20 anos de implementação do PROCONVE (MMA, 2006), em suas considerações finais e recomendações é ressaltado o fato dos inventários de fontes fixas estarem voltados para subsidiar as atividades de licenciamento ambiental e a necessidade dessas bases de dados carecerem de atualizações regulares das informações, que se fossem adquiridos de forma sistemática e regular, acrescentariam confiabilidade aos modelos de previsão de qualidade do ar.

Além disso, sobressai a necessidade da gestão da qualidade do ar estar integrada a outras políticas públicas. No México, por exemplo, existe um programa com planejamento de 10 anos, com diversos segmentos da sociedade (setores privados, educativos, governo e sociedade em geral) com o objetivo de melhorar a qualidade do ar na Zona Metropolitana do Vale do México chamado PROAIRE

2002-2010 (MÉXICO, 2002).

Se houver iniciativa semelhante em São Paulo, poder-se-ia direcionar ações, por exemplo, num melhor aparelhamento do transporte público, com o objetivo de diminuição das emissões veiculares, que teriam relativa melhora da qualidade do ar, principalmente nas metrópoles, visto que nessas áreas estas emissões causam significativo impacto na qualidade do ar e também na saúde pública.

A deterioração da qualidade do ar deve ser uma preocupação constante nas políticas urbanas, devendo constar dos planos diretores das cidades e até mesmo estar previsto nos planos decenais, só assim vislumbraremos a possibilidade de atingir o objetivo final, que é o desenvolvimento sustentável.

6. BIBLIOGRAFIA

ALVARES JR., O.M.; LACAVAL, C.I.V.; FERNANDES, P.S. 2002. *Emissões Atmosféricas*. Programa SENAI de Educação à Distância em Tecnologias e Gestão Ambiental. Brasília, 2002, 373 p.

ARBILLA, G.; MARTINS, E.M.; MOREIRA, A.; MOREIRA, L.F.R. 2002. *Ozone Air Quality Modeling. A Case Study: A Heavily Vehicle Impacted Urban Avenue in Rio de Janeiro, Brazil*. **J. Braz. Chem. Soc.**, Vol. 13, No. 3, 308-317, 2002.

CANÇADO, J. E. D., BRAGA, A., PEREIRA, L. A. A. et al. 2006. *Clinical repercussions of exposure to atmospheric pollution*. **J. Bras. Pneumol.**, mayo 2006, vol.32 supl.1, p.S5-S11.

CASTANHO, A.D.A., 1999. *A determinação quantitativa de fontes de material particulado na atmosfera da cidade de São Paulo*. Tese (Mestrado), IF/USP, 1999.

CETESB. 1998. *Efeitos da operação rodízio 98 na qualidade do ar na região metropolitana de São Paulo*. São Paulo: CETESB, 1998 (Relatório Técnico). 26 p.

CETESB. 2002. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2001*. São Paulo: CETESB, 2002. 124 p.

CETESB. 2003. *Modelo receptor: estudo de caracterização de aerossóis na Região Metropolitana de São Paulo - Cerqueira César*. São Paulo: CETESB, 2003. 139 p.

CETESB. 2004. *Estudos investigativos da ocorrência de ozônio troposférico na Região de Sorocaba – SP*. São Paulo: CETESB, 2004. 87 p. (Relatório Técnico)

CETESB. 2006. *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo-2005*. São Paulo: CETESB, 2006 (Série Relatórios). 140 p.

COMRIE, A.C. 1997. *Comparing Neural Networks and Regression Models for Ozone Forecasting*. **Journal of the Air & Waste Management Association**, June 1997, vol. 47: 653-663.

GUARDANI, R.; AGUIAR, J.L.; NASCIMENTO, C.A.O.; LACAVAL, C.I.V. et al. 2003. *Ground-Level Ozone Mapping in Large Urban Areas Using Multivariate Statistical Analysis: Application to the São Paulo Metropolitan Area*. **Journal of the Air & Waste Management Association**, may 2003, vol. **53**:553-559.

GUARDANI, R.; NASCIMENTO, C.A.O.; GUARDANI, M.L.G. et al. 1999. *Study of Atmospheric Ozone Formation by Means of a Neural Network-Based Model*. **Journal of the Air & Waste Management Association**, march 1999, vol. **49**:316–323.

LUCON, O.S. 2003. *Modelo HORUS – Inventário de emissões de poluentes atmosféricos pela queima de combustíveis no Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado), São Paulo: IEE/USP, 2003. 229 p.

MARTINS, L.D. 2002. *Estimativas do impacto das emissões de hidrocarbonetos pela vegetação na formação de oxidantes fotoquímicos em São Paulo*. Tese (Mestrado), São Paulo: IAG/USP, 2002, 109 p.

MELAS, D.; KIOUSSIUKIS, I; ZIOMAS, I.C. 2000. *Neural Network Model for Predicting Peak Photochemical Pollutant Levels*. **Journal of the Air & Waste Management Association**, April 2000, vol. **50** : 495-501.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. 2006. *Avaliação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE – 20 anos respirando um ar melhor*. Brasília: COPPTEC/UFRJ, 2006. 128p.

MÉXICO – Gobierno del Estado del México (Comision Ambiental Metropolitana). 2002. *Programa para Mejorar la Calidade del Aire de la Zona metropolitana del Valle del México 2002-2010*. México: 2002.

MORAES, M.R. 2001. *Implementação de um Sistema de Modelos para a Qualidade do ar*. Proposta de Tese, Florianópolis, UFSC: 2001. 109 p.

MORAES, M.R. 2004. *Ferramenta para a Previsão de Vento e Dispersão de Poluentes na Micro-escala atmosférica*. Tese (Doutorado), Florianópolis: UFSC, 2004. 166 p.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. 2004. *Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: Um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental*. **Ambiente & Sociedade**,

Dez 2004, vol.7, no.2, p.159-172.

NARASIMHAN, R.; KELLER, J.; SUBRAMANIAM, G.; RAASCH, E. et al. 2000. *Ozone Modeling Using Neural Networks*. **Journal of Applied Meteorology**, March 2000, Vol. **39**: 291-296.

NEGRI, J.C. 2002. *Modelo Preditivo da Emissão e Dispersão do NOx Gerado em Usinas Termoelétricas como Instrumento de Análise de Inserção e Capacidade de Suporte Regional da Qualidade do Ar*. Tese (Doutorado), São Paulo: EPUSP, 2002, 234 p.

PIRES, D.O. 2005. *Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Tese (Mestrado), Rio de Janeiro: UFRJ, 2005, 194 p.

SÃO PAULO. 2003. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. *Cadernos de Legislação Ambiental Estadual. Vol. I – Licenciamento Ambiental*. São Paulo, 2003. 251 p. (disponível em www.ambiente.sp.gov.br)

SÃO PAULO. 2003. Secretaria de Estado do Meio Ambiente. *Agenda 21 em São Paulo 1992-2002*. São Paulo: SMA, 2002. 160 p.

SEINFELD, J.H. 1986 *Atmospheric chemistry and physics of air pollution*. John Wiley & Sons. New York, 1986, 738 p.

SILIBELLO, C.; CALORI, G.; FINARDI, S.; PIROVANO, G. 2001. *Sensitivity of Ozone Predictions to Prognostic and Diagnostic Generated Meteorological Fields*. Proc. Int. Conf. A Changing Atmosphere - 8th European Symposium on the Physico-Chemical Behaviour of the Atmospheric Pollutants, Torino, 2001.

TRESMONDI, A.C.C.L. 2003. *Qualidade do ar na área de influência do Polo Industrial de Paulínia – SP: 2000-2002*. Tese (Doutorado), Campinas: FEQ/UNICAMP, 2003, 325 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2003. *Guidelines for Developing an Air Quality (Ozone and PM2.5) Forecasting Program.. EPA-456/R-03-002* June 2003, 126 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 2005. *Review*

of the National Ambient Air Quality Standards for Ozone: Policy Assessment of Scientific and Technical Information. OAQPS Staff Paper – First Draft. Report EPA-452/D-05-002, November 2005. 406 p.

YNOUE, R.Y. & ANDRADE, M.F. 2002. *Simulação numérica da formação de ozônio nas áreas vizinhas à Região Metropolitana de São Paulo.* Congresso Brasileiro de Meteorologia, **12** : 2002 : Foz do Iguaçu, PR; Anais Jaboticabal : Fábrica da Palavra, 2002, p. 1639-1648.

YNOUE, R.Y. 1999. *O impacto do uso de campos meteorológicos diagnóstico e prognóstico na produção e dispersão dos oxidantes fotoquímicos em São Paulo.* Tese (Mestrado), São Paulo: IAG/USP, 1999, 111 p.

ZANETTI, P. 1997. *Air Pollution Modeling.* New York: Van Nostrand, 1997, 568 p.

SITES VISITADOS

www.epa.gov – acessado em março/2006; julho/2006 e novembro/2006

www.cetesb.sp.gov.br – acessado de julho a dezembro/2006

www.ambiente.sp.gov.br – acessado de julho a dezembro/2006

www.iag.usp.br – acessado em fevereiro/2006 e de julho a dezembro/2006.

www.master.iag.usp.br – acessado em setembro e novembro/2006

www.ozoneresearch.org/reports.htm – acesso em novembro/2005 e julho/2006

http://reports.eea.europa.eu/92-9167-028-6/en/index_html – acessado em dezembro/2005

<http://www.arl.noaa.gov/ready.html> – acessado em março/2006

<http://www.giub.unibe.ch/klimet/metphomod/> - acessado em março/2006.