



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO
AMBIENTAL**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO
BIOMONITORAMENTO DO OZÔNIO
TROPOSFÉRICO**

Campinas
2009

**André Luis Bertazolli
Fernando Lopes Bellini
Gilmar Issa Gallo**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DO
BIOMONITORAMENTO DO OZÔNIO
TROPOSFÉRICO**

Monografia apresenta à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do título de especialista em Gestão Ambiental.

**Campinas
2009**

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Universidade Estadual de Campinas, a Faculdade de Engenharia Mecânica e a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, pela oportunidade de crescimento intelectual.

Ao corpo docente do curso de Especialização em Gestão Ambiental, pelo empenho profissional em prol da construção de uma referência nacional em Gestão Ambiental.

Eu, André, faço um especial agradecimento aos meus pais, Rubens e Marlene e ao irmão Rubens pelo apoio incondicional. Agradeço também a todos aqueles que, a seu modo, contribuem sempre para um contínuo aprimoramento do conhecimento aplicado e seu compartilhamento em prol da interdisciplinaridade, princípio fundamental para a superação das limitações decorrentes da estanqueidade natural dos especialistas, proporcionando uma visão sistêmica dos processos que se fundem para compor a Gestão Ambiental. Agradeço finalmente, o exemplo daqueles que, mesmo diante das adversidades impostas pela vida, concentram os seus esforços naquilo que acreditam e que realmente contribui para o Desenvolvimento Humano. E, como não poderia deixar de ser, aos dois amigos, cujas contribuições foram indispensáveis a mais esta empreitada de aprendizagem coletiva.

Eu, Fernando, agradeço a Deus pela vida.

Aos meus amigos, André e Gilmar, pela solidariedade na execução do trabalho.

Dedico não apenas o trabalho, mas o curso de Especialização a meu pai, Waldemar, modelo de integridade, coragem, competência e amor, a minha mãe Darcy (*in memoriam*) exemplo de força, fé, tranquilidade e amor incondicional.

Aos meus irmãos, Henrique, Rogério e Luciana, pela retidão de conduta; pelo incentivo e amor; a minha esposa Fabiola, irrepreensível em sua determinação, estímulo e amor, e aos meus filhos, Juliana e Enzo, pela existência. Meus maiores incentivadores na busca do conhecimento.

Eu, Gilmar, agradeço a Deus por me prover vitalidade e saúde, aos meus pais, minha esposa Neide e ao meu filho Ricardo por superar com calma e compreensão a minha ausência, à Cetesb pela oportunidade, e possibilidade da realização deste curso, aos professores da pós-graduação do curso de Gestão Ambiental da Unicamp pela orientação e dedicação, aos colegas do ESSE pelo apoio e paciência, ao amigo Rodrigo C. Fialho pelo incentivo e apoio, aos colegas André e Fernando que solidariamente contribuíram para a concretização deste trabalho, a todos que direta ou indiretamente incentivaram-me durante o decorrer deste curso para o desenvolvimento de uma nova visão ambiental.

RESUMO

A presente monografia tem como objetivo conceituar de forma geral a relevância do monitoramento, em especial, do biomonitoramento, auxiliando o controle da poluição atmosférica, identificando suas principais fontes de emissão, os mecanismos de dispersão/transformação atmosféricos e seus impactos nos corpos receptores. A poluição do ar por fontes de natureza antrópica vem elevando a concentração dos poluentes atmosféricos em níveis críticos nos grandes centros urbanos, sobretudo nos períodos de estiagem, quando a baixa umidade do ar e a ausência de precipitação e, em alguns casos, acompanhados pelo fenômeno de inversão térmica, dificultam a dispersão destes poluentes. Outro mecanismo que vem sendo objeto de estudo por parte dos órgãos ambientais é o transporte de poluentes aéreos, primários e secundários, através das massas de ar, bem como seus impactos nas áreas por elas atravessadas. É nesse contexto que se abrem perspectivas para ferramentas de monitoramento qualitativo da poluição atmosférica menos custosas, assim viabilizando a sua aplicação em uma escala espacial mais abrangente, permitindo delineamento dos itinerários predominantes dos principais poluentes aéreos rastreados, cujas concentrações demandam ações de prevenção e controle. Os experimentos realizados com o cultivar *Nicotiana tabacum* Bel W3, desde a década de 1950, demonstraram a sua capacidade de assinalar a presença de Ozônio troposférico, um poluente secundário, em concentrações capazes de causar danos à vegetação nativa e perdas na produção agrícola. Estudos mais recentes comprovaram a fitotoxicidade das espécies ativas de oxigênio (EAOs), gerando estresse oxidativo e danos foliares como necroses e cloroses quando em locais com altas concentrações de ozônio. A existência de efeitos sinérgicos entre o ozônio e outros poluentes atmosféricos, como o dióxido de enxofre, o qual também produz injúrias foliares, bem como alterações na condutância estomática, alterando o período e o fluxo de entrada e saída de gases através dos estômatos, produzem variações nos danos foliares não relacionados estritamente à ação do ozônio troposférico nos locais do experimento (RMSP). Tal propriedade impede que a cultivar *Nicotiana tabacum* Bel W3 seja utilizado para biomonitoramento quantitativo, isto é, que seja capaz de dimensionar as concentrações do ozônio no local de estudo, sendo adequado para assinalar a presença deste poluente permitindo o

mapeamento e o histórico da distribuição espacial do poluente em uma área de abrangência muito maior que a de uma estação de monitoramento convencional, atuando de forma supletiva às estações, com um custo muito mais acessível e operação bastante simplificada no quesito da sua utilização *in situ*.

ABSTRACT

This monograph conceptualized the relevance of monitoring, especially biomonitoring, helping to control air pollution, identifying its main sources of emissions, the dispersion / transformation mechanisms in the atmosphere and the impacts on the receiving bodies. The air pollution from anthropic sources has increased the concentration of air pollutants in urban centers to critical levels, especially during periods of drought, when the low air humidity and lack of precipitation, sometimes happening with a thermal inversion phenomenon, prevent the dispersion of pollutants. Another mechanism, currently being studied by environmental agencies, is the transport of primary and secondary air pollutants with air masses and the impact on areas crossed by them. In this context, less expensive tools for quality monitoring of the atmosphere pollution are made possible, thus allowing its application in a broader spatial scale, outlining the predominant routes of the air pollutants tracked, when their concentration requires prevention and control actions. The experiments performed with *Nicotiana tabacum* cultivar Bel W3 since the 1950s have demonstrated their ability to detect the presence of tropospheric ozone, a secondary pollutant, in concentrations that may cause damage to native vegetation and losses in agricultural production. More recent studies have proved the phytotoxicity of the active oxygen species (EAOs), generating oxidative stress and damage, such as leaf chlorosis and necrosis, when in places with high concentrations of ozone. The existence of synergistic effects between ozone and other air pollutants such as sulfur dioxide, which also produces foliar injury and changes in stomatal conductance by changing the period and the inflow and outflow of gases through the stomata, produces variations in leaf damage not strictly related to the action of tropospheric ozone in the places of the experiment (RMSP). This property prevents the cultivar *Nicotiana tabacum* Bel W3 from being used for quantitative biomonitoring, i.e., prevents it from measuring the concentrations of ozone at the site studied, although it is appropriate to indicate the presence of this pollutant, allowing the mapping of historical and spatial distribution of the pollutant in an area of coverage much larger than the conventional monitoring system, adding the facility to stations at a much more accessible cost and very simple operation in terms of their use in site.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO DA LITERATURA	9
2.1 A POLUIÇÃO DO AR E SEUS IMPACTOS	9
2.1.1 Fontes de Poluição Atmosférica	10
2.1.2 Movimentação das Massas de Ar na Troposfera	13
2.1.3 Reações Físico-Químicas nas Massas de Ar	19
2.1.4 Efeitos Econômicos da Poluição do Ar	20
2.2. O CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	23
2.2.1 O Controle das Emissões dos Elementos Precusores do O ₃	23
2.2.2 A Importância do Protocolo de Montreal	27
2.2.3 A Implantação do Proconve no Brasil	27
2.2.4 A Importância do Monitoramento da Qualidade do Ar	29
2.2.4.1 Interação entre Qualidade de Ar e Mecanismos Meteorológicos	29
2.2.4.2 Ozônio e Fatores Meteorológicos	30
2.3. AS FERRAMENTAS DE MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR	37
2.3.1 A Utilização do Biomonitoramento como Alternativa de Baixo Custo	37
2.3.2 Critérios para a Localização de um Ponto de Monitoramento	39
2.3.3 Classificação das Plantas Bioindicadoras	41
2.3.4 A Utilização de <i>Nicotiana Tabacum</i> Bel W3 como Ferramenta Bioindicadora de O ₃	43
2.3.5 A Utilização de outras Plantas como Bioindicadoras da Poluição Atmosférica	44
2.4. OS EFEITOS FITOTÓXICOS DA POLUIÇÃO DO AR	45
2.4.1 Os Efeitos Fitotóxicos do Ozônio Troposférico	47
2.4.2 A Fitotoxicidade do O ₃ Troposférico no Cultivar <i>Nicotiana Tabacum</i> Bel W3	48
2.4.3 Critérios de Avaliação do Aparecimento de Injúrias Foliaves	52
2.4.3.1. Metodologia de Avaliação	55
2.4.4 Influências Geoclimáticas no Aparecimento de Injúrias Foliaves	56
2.4.5 Efeitos Sinérgicos de Outros Poluentes Aéreos	58
2.4.5.1 A Influência do SO ₂ no Aparecimento de Injúrias Foliaves	58
2.4.5.2 Influência dos Fluoretos (HF) no Aparecimento de Injúrias Foliaves	60
2.4.6 Viabilidade do Monitoramento Qualitativo de O ₃ pela Cultivar <i>Nicotiana Tabacum</i> Bel W3 na Cidade de São Paulo	63
3. CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS	69
GLOSSÁRIO	73

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica e seus efeitos deletérios sobre a biosfera estão sendo cada vez mais monitorados em virtude da premente necessidade de se manter a concentração dos poluentes atmosféricos em níveis comprovadamente apropriados à saúde da fauna e da flora, bem como da manutenção do equilíbrio dos fenômenos meteorológicos.

O constante aumento dos lançamentos de poluentes na troposfera, principalmente em função da sempre crescente necessidade de geração de energia nos mais diversos setores de produção e de transportes, causam um desequilíbrio no balanço da conversão matéria/energia, tornando as reações físico-químicas na atmosfera cada vez mais intensificadas, e, seus desdobramentos, por sua vez, mais impactantes.

As perdas na produção agrícola e na cobertura vegetal em regiões onde se acumulavam determinados poluentes atmosféricos, além dos prejuízos econômicos e ambientais, assinalaram aos pesquisadores um indicador natural da qualidade do ar e das concentrações de poluentes específicos, acima das quais apresentavam sintomas de desequilíbrio em seus sistemas fisiológicos e estruturais.

Os bioindicadores vêm sendo estudados cada vez mais profundamente em nível de suas estruturas internas, na distribuição espacial de seus indivíduos, aspectos de sazonalidade, entre outros, visando aprimorar seu conhecimento e garantir o seu correto emprego em campo, seguindo rígidos padrões de utilização.

A adição de uma ferramenta menos custosa para o monitoramento da poluição do ar, com capacidade de captar e assinalar alterações de longa duração e em escala regional torna-a apta a produzir um histórico das condições atmosféricas

em dada região, trabalhando de forma supletiva, porém com menor precisão, em relação às precisas e onerosas estações de monitoramento da qualidade do ar.

Considerando estes estudos, o objetivo desta monografia é avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso da ferramenta bioindicadora *Nicotiana tabacum* BEL W3, como indicador qualitativo da presença de Ozônio troposférico e seus efeitos mais diretos na biosfera.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A POLUIÇÃO DO AR E SEUS IMPACTOS

As alterações na qualidade do ar acontecem devido a uma série de eventos conjuntos de emissões acumulativas, nos quais atuam as fontes naturais e, mais recentemente também, as fontes antrópicas de poluição.

O nível de poluição atmosférica é determinado pela quantificação das substâncias poluentes presentes no ar. Conforme a Resolução CONAMA n. 3 de 28/06/1990¹, considera-se poluente atmosférico:

Qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso ou gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Com relação a sua origem, os poluentes podem ser classificados como primários (aqueles emitidos diretamente pelas fontes de poluição) e secundários (aqueles formados na atmosfera através da reação química entre poluentes e/ou constituintes naturais na atmosfera). Quando se determina a concentração de um poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores (seres humanos, outros animais, plantas e materiais) como resultado final do processo de lançamento deste poluente na atmosfera a partir de suas fontes de emissão e suas interações a atmosfera, do ponto de vista físico (diluição) e químico (reações

¹ <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>

químicas), podendo, o sistema, ser visto da seguinte forma: Fontes de Poluição / Poluentes / Processos Atmosféricos (diluição e/ou reações químicas) / Receptores.

Os dados de qualidade do ar e meteorológicos das estações automáticas de monitoramento são divulgados e continuamente atualizados no endereço eletrônico da CETESB², que apresenta ainda a classificação da qualidade do ar que, para efeito de divulgação, utiliza-se do índice mais elevado dos poluentes medidos em cada estação. Portanto, a qualidade do ar em uma estação é determinada diariamente pelo pior caso entre os poluentes que forem monitorados (LEMOS *et al.*, 2008).

2.1.1 Fontes de Poluição Atmosférica

Como fontes naturais de emissões podemos citar: incêndios/vulcanismo (lançamento de gases e PM); maremotos (alteração na turbidez); tempestades/furacões (danos ao solo superficial); variação da atividade solar; tempestades de areia (arraste eólico); decomposição da matéria orgânica; degelo; anomalias naturais do regime climático (secas/inundações), entre outros fatores.

As fontes de poluição de natureza antrópica remontam a época do surgimento de atividades humanas razoavelmente organizadas, principalmente através do uso do fogo como fonte de energia de transformação, inicialmente para uso doméstico e limpeza de pequenas áreas para atividade agrícola, com impactos restritos a pequenas áreas e pouca influência no bioma local devido à pequena escala destas atividades.

² www.cetesb.sp.gov.br

Atualmente, devido à escala das atividades de transformação da matéria através do uso de energia, as fontes de poluição de natureza antropogênica são os principais causadores da poluição atmosférica e da degradação da qualidade do ar, não apenas nas áreas onde se originam tais emissões, mas também em áreas para onde são transportados estes poluentes através das massas de ar em movimento.

Cerca de 100% do chamado “ar seco e puro” que respiramos é constituído de dois gases: 78% nitrogênio e 21% de oxigênio. O restante 1% inclui CO₂ (0,03%), gases inertes, além de uma série de outros gases (CO, O₃, H₂S, SO₂, NO₂ etc.) muitos dos quais passam a ser considerados como poluentes quando ocorrem em concentrações elevadas. Em condições naturais deve-se considerar, ainda, o vapor d’água, presente em concentrações ao redor de 4%, além dos chamados particulados (poeira, pólen, aerossóis etc.). Os métodos de produção industrial tornam difícil, senão impossível, evitar que os gases poluentes entrem na atmosfera. Em consequência do desenvolvimento industrial, a adição antropogênica de diferentes gases e outras substâncias à atmosfera tem gerado em níveis, locais e mesmo regionais, situações cada vez mais frequentes de poluição do ar, ou seja, de concentrações exageradas ou perigosas de vários contaminantes. É o caso, por exemplo, do SO₂, cuja emissão para a atmosfera provém, em sua maior parte, da queima dos combustíveis fósseis e da refinação do petróleo. Existem na natureza, mecanismos normais de remoção dos poluentes da atmosfera. Diretamente, a remoção ocorre quando o poluente encontra alguma superfície que tenha a capacidade de absorvê-lo e, indiretamente, quando o poluente se torna preso ao ciclo de precipitação (*rain out*, quando o poluente age como núcleo de concentração, *wash out*, quando o poluente é arrastado pelas gotas de chuva em queda). Os fatores de retenção *sink factors* para os poluentes atmosféricos são três: os

oceanos, os solos e a vegetação. No que diz respeito à vegetação, particularmente as florestas, e sua ação na retenção de poluição do ar, a maioria dos trabalhos são concordes em que a floresta pode, efetivamente, contribuir neste processo, através da absorção de alguns poluentes e através do efeito de filtragem dos particulados.

Os constituintes gerais da poluição do ar podem ser classificados com relação aos efeitos sobre as florestas como aqueles capazes de serem absorvidos pelos estômatos e pelas lenticelas (poluentes gasoso em geral como SO₂, NO₂, HF, O₃ etc.) e aqueles que não são normalmente absorvidos (particulados em geral). Além da morte propriamente dita, a poluição causa outros prejuízos às árvores. Lesões necróticas nas folhas são o resultado da absorção de gases poluentes em doses elevadas (efeito agudo). Há, ainda, destruição da clorofila e de carotenóides nas partes internervais das folhas, que se tornam esbranquiçadas, sendo o resultado da absorção de doses elevadas ou da absorção de doses sub-letais durante um período prolongado (efeito crônico). Outros sintomas incluem ainda desorganização celular, redução na absorção de água, crescimento lento, fechamento do estômato, desfolhamento prematuro e senescência prematura (LIMA, 1980).

No Estado de São Paulo, a CETESB caracteriza as principais fontes de poluição presentes nesta Unidade de Federação, por ser esta a de maior ocupação territorial, o maior contingente populacional (em torno de 41 milhões de habitantes), o maior desenvolvimento econômico (agrícola, industrial e serviços) e a maior frota automotiva registrada (17 milhões de veículos automotores, dos quais 1,1 milhões são movidos a diesel, três milhões são motocicletas e 12,9 milhões são veículos do tipo ciclo Otto – gasolina/álcool/gás). Como consequência, apresenta grande alteração na qualidade do ar, destacando-se as regiões metropolitanas de São Paulo, Campinas e o município de Cubatão. Para classificar a saturação da

qualidade do ar, o grau e a severidade, o Decreto Estadual N. 52.469 de dezembro de 2007³ confere nova redação ao DE n. 50.753 de abril de 2006 que trata dos critérios para estabelecimento dos graus de saturação da qualidade do ar de uma sub-região quanto a um poluente específico. Dentre as modificações destaca-se a inserção do critério de classificação das áreas consideradas saturadas, em termos do grau de severidade, o que possibilita a CETESB, nas sub-regiões em vias de saturação e saturadas, fazer exigências especiais para atividades em operação, com base nas metas, planos e programas de prevenção e controle de poluição. Ficam estabelecidos no Parágrafo 2, do Artigo 23, do DE N. 52.469/07, os valores de referência para as máximas concentrações de O₃ (severidade) nas áreas consideradas saturadas para exposições de curto prazo. No Parágrafo 3, Artigo 20, do referido DE, fica determinada a abrangência de cada sub-região onde houver estação para medição da qualidade do ar da seguinte forma: “1. para ozônio o território compreendido pelos municípios que, no todo ou em parte, estejam situados a uma distância de até 30 km da estação de monitoramento da qualidade do ar”.

2.1.2 Movimentação das Massas de Ar na Troposfera

Para Krupa e Manning (1988) a troposfera, a mais baixa e instável camada da atmosfera terrestre, é dividida em duas camadas (a troposfera livre $1 > e < 10$ km e a camada limite planetária < 1 km) é composta por uma série de gases em diferentes concentrações, com temperatura e pressões muito variadas, ocasionando uma variação de densidades entre as massas de ar gerando correntes convectivas e intensas trocas térmicas formando áreas de baixa pressão (ciclones)

³ http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/legislacao/estadual/decretos/2007_Dec_Est_52469.pdf

concentradoras de gases e áreas de alta pressão (anticiclones) dispersoras de gases.

A movimentação ininterrupta das massas de ar pela troposfera, faz com que poluentes gerados em uma determinada região do planeta, sejam transportados a longas distâncias e se acumulem em regiões completamente distintas daquela na qual se originaram.

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o ozônio ultrapassa freqüentemente o padrão de qualidade do ar de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estabelecido pela Lei Estadual 8.468, de 1976⁴, e por diversas vezes supera o valor de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (102 ppb), o que determina a qualidade do ar má, destacando-se, atualmente, como o poluente com maior número de ultrapassagens do padrão (LACAVA *et al.*, 2000).

A ocorrência de altas concentrações de O₃ está relacionada com as trajetórias das massas de ar que circulam sobre uma região e que transportam tanto os precursores como o ozônio formado na atmosfera através das reações fotoquímicas. Desse modo, é importante conhecer a direção e a velocidade do vento que predominam sobre a região (LACAVA *et al.*, 2000).

Durante um estudo realizado pela CETESB na RMSP, a separação dos cenários em grupos (clusters – agrupamento de dias com cenários de vento semelhantes) forneceu uma boa noção qualitativa dos diversos padrões de ventos e concentrações de ozônio nas estações da rede de monitoramento em escala urbana. Já os padrões de desvio relativo das concentrações mostram a ocorrência de gradientes devido ao transporte, os quais mostram quais estações devem receber os maiores acréscimos em suas concentrações. Naqueles grupos onde não

⁴ http://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Legisla%C3%A7%C3%A3o%20Ambiental/Decreto%20Estadual%201976_08.468.pdf

se observam gradientes, os acréscimos ocorrem generalizadamente em todas as estações (POMPEIA *et al.*, 2003).

Desde a década de 70, a CETESB mantém redes de monitoramento da qualidade do ar para avaliar os níveis de poluição atmosférica em diferentes escalas de abrangência. O estado possui áreas com diferentes características e vocações econômicas, as quais demandam diferentes formas de monitoramento e controle da poluição. Inicialmente, o monitoramento era efetuado através de estações manuais, que ainda são utilizadas pela CETESB em todo o Estado. Em 1981, foi iniciado o monitoramento automático que, além de ampliar o número de poluentes medidos, permitiu o acompanhamento dos resultados em tempo real. Atualmente, a rede automática conta com 30 estações fixas localizadas em diversos municípios do Estado de São Paulo. A publicação do Relatório Anual da qualidade do Ar agora apresenta a nova classificação de saturação para os municípios abrangidos pela rede de monitoramento da CETESB, considerando as alterações do Decreto Estadual No. 50.7530 de 2006, dadas pelo Decreto Estadual No. 52.469 de 12 de Dezembro de 2007, o qual, além da classificação de saturação, qualifica as áreas consideradas saturadas em termos de severidade, passando o Estado de São Paulo a ser dividido conforme as regiões abrangidas pelas 22 Unidades de Gerenciamento de Recurso Hídrico (UGRHs), dentro de uma nova abordagem integrada e mais objetiva em relação aos problemas advindos das diferentes vocações sócio-econômicas de cada região do Estado.

De acordo com as medições realizadas pelas estações telemétricas da CETESB no período de 1996 a 1998, pôde-se observar que a maior frequência do vento ocorre de direção sul/sudeste, seguida pela direção noroeste (LACAVA *et al.*, 2000).

Geralmente, os ventos que auxiliam a dispersão ou transporte de poluentes atmosféricos na RMSP possuem velocidade acima de 1,5m/s, e quando maior que 2m/s são considerados de moderados a fortes. Os ventos de direção noroeste, normalmente, possuem rajadas acima de 3m/s. O período observado predominante para ocorrência de episódios críticos de ultrapassagens do padrão primário da qualidade do ar para o poluente ozônio, apresenta-se desde o final do inverno até o início do verão. Nos meses mais quentes a formação é menor, devido ao aumento da nebulosidade, o que reduz a radiação solar e, conseqüentemente, diminui a formação do ozônio (LACAVA *et al.*, 2000).

Além da complexidade do sistema de reações químicas, fatores meteorológicos e topográficos fazem com que os gases precursores emitidos sejam transportados a vários locais, às vezes distantes das fontes, resultando em níveis altos de ozônio em locais distintos das áreas onde ocorreram as emissões (PRADELLA *et al.*, 1999).

Com o objetivo de conhecer a trajetória do transporte de ozônio na RMSP, o Setor de Ecossistemas Terrestres - ESSE da CETESB, realizou campanhas de monitoramento em alguns municípios da região com a utilização de um indicador biológico de poluição (LACAVA *et al.*, 2000).

Para realização das avaliações da qualidade do ar (PM Cabreúva – ofício GP/225/2005), foram selecionados 12 locais, em função de sua distribuição espacial, no entorno da região urbanizada de Cabreúva e a partir da segunda campanha, foram selecionados mais três pontos fora do município, na direção de Jundiaí, para avaliar um possível transporte de poluentes provenientes da região nordeste (FIALHO *et al.*, 2006).

Atualmente, a movimentação das massas de ar é bastante conhecida a ponto de ser possível prever, através do estudo de modelagens computacionais, com grande probabilidade de acerto, movimentações futuras, estabelecimento de padrões climatológicos e a distribuição espacial dos poluentes aéreos, permitindo análises mais consistentes do correlacionamento (somente nos grupos com parâmetros correlacionáveis) entre as variáveis meteorológicas e as concentrações dos poluentes nas escalas espaciais adequadas.

Para melhor interpretar o efeito de transporte de massas de ar sobre as concentrações de ozônio medidas nas estações e monitoramento, bem como as fortes influências nas medições pelas condições locais, pela dinâmica não linear na formação do ozônio e pela grande quantia de fontes primárias difusas, a CETESB realizou um estudo visando melhorar a correlação entre a máxima concentração de O₃ monitorada na estação Ibirapuera e os dados de vento monitorados na Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar da CETESB na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Esta melhora visa fornecer dados mais adequados para a previsão das concentrações de ozônio por meio do Projeto de Políticas Públicas da FAPESP – Desenvolvimento de tecnologia para previsão de ozônio na baixa atmosfera – (Projeto Neural) desenvolvido em parceria com a Escola Politécnica da USP. Desse modo, uma possível abordagem de análise consiste na manipulação matemática do vento monitorado nas estações para produzir o Vento Resultante Médio (VRM). Assim, diferente do vento predominante, que indica qual direção este soprou a maior parte do tempo, o vento resultante caracteriza uma sobreposição de ventos de direção que podem ser distintas entre si, mas que caracteriza um deslocamento horizontal efetivo da massa de ar. A utilização do Vento Global (PWD/GWD) faz com que o número de dados horários em

que se observam os códigos para descrever aspectos físicos seja consideravelmente menor, permitindo inclusive que sejam manipulados matematicamente.

O VRM pode ser calculado sobre uma região de interesse para uma dada hora (espacial), ou para uma seqüência de horários para uma única estação (temporal), evitando-se desse modo incorrer em determinados erros decorrentes da possibilidade de haver mais de uma massa de ar atuando no local, dentro do intervalo de tempo das seqüências de dados horários adotada. Entretanto, é possível encontrar dados que apresentam melhores correlações com a máxima de ozônio, quando calculadas cumulativamente sobre as horas que antecedem os picos da concentração quando se emprega a técnica multivariada de Análise de Grupamento (Cluster). Por exemplo: em todas as situações encontradas, verificou-se que as correlações com o módulo de VRM são ligeiramente melhores que aquelas obtidas quando feitas com a média aritmética dos dados de WS (velocidade média do vento predominante). É corrente a prática de correlacionar as concentrações horárias dos poluentes com as médias horárias de velocidade de vento geradas no mesmo horário, mas os valores de correlação para efeito de regressão linear obtidos geralmente são muito baixos (cerca de 0,3). Embora se verifique a tendência de diminuição das concentrações de ozônio na medida em que a velocidade dos ventos aumenta, esta informação é insuficiente para avaliar uma outra característica dos ventos bastante importante que é a sua influência na fração do ozônio proveniente de transporte em escala regional (LACAVA *et al.*, 2003).

As tendências de concentração de O₃ nas estações de Ibirapuera e Mauá no período de 1996 a 1999, de maneira geral, foram semelhantes, não sendo observados muitos casos de ultrapassagens em dias consecutivos. No entanto, do

total de dias de episódios que ocorreram nestas estações, nesse período somente 21% dos casos ocorreram nas duas estações. Isto provavelmente ocorre devido a diferente localização geográfica dessas estações na RMSP, sendo assim influenciadas por diferentes condições de transporte pelo vento (PRADELLA *et al.*, 1999).

Com base na análise de dados e modelos meteorológicos de previsão, a CETESB elabora um boletim meteorológico diário com a previsão das condições de dispersão de poluentes para as 24 horas seguintes (LEMOS *et al.*, 2008).

2.1.3 Reações Físico-Químicas nas Massas de Ar

Quando as fontes de emissão de natureza antrópica lançam na troposfera, resíduos gerados (poluentes primários) em seus diferentes e complexos processos de transformação (fontes primárias), estes elementos precursores são logo misturados aos elementos e gases existentes alterando a composição da atmosfera local, gerando novas reações e elementos químicos resultantes (poluentes secundários) que serão dispersos de acordo com a movimentação das massas de ar da região.

Após ocorrerem os processos de dispersão e de transformação físico-químicas destes elementos no ar, boa parte destes elementos serão precipitados na hidrosfera e na litosfera (sorvedouros naturais), onde ocorrerão novos processos de acumulação e transformação, mais reações e dispersão de novos compostos (RAVEN *et al.*, 1993).

2.1.4 Efeitos Econômicos da Poluição do Ar

O aumento da poluição atmosférica (PQAR < 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$ – AOT40 = 120ppb - CONAMA No. 03/90), ou até mesmo, a simples presença de determinado elemento químico em concentrações suficientes para causar alterações prejudiciais ao bioma de uma determinada região, ocasionam perdas econômicas em atividades agrícolas [VRPP = 6.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3/3\text{meses}$ ou AOT40 = 3000ppb e VRI = 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3/5\text{dias}$ (WHO, 2000)] e, nas áreas urbanas, produzem uma série de efeitos deletérios na saúde de suas populações, aumentando o grau de vulnerabilidade a problemas agudos no aparelho respiratório, principalmente em crianças e nos idosos, bem como males de natureza crônica por ação de elementos acumulados no organismo.

De maneira geral, os efeitos dos gases poluentes na saúde humana estão intimamente associados à sua solubilidade nas paredes do aparelho respiratório, fato este que determina a quantidade do poluente capaz de atingir as regiões mais distais dos pulmões. As populações das áreas urbanas são as que mais se expõem ao risco causado pela degradação da qualidade do ar (PQAR primário e secundário < 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$), colocando as cidades como as áreas de maior incidência de problemas relacionados à concentração de poluentes atmosféricos, com os respectivos prejuízos causados por enfermidades, devido à solubilidade destes gases no aparelho respiratório, do tipo nitrosaminas (algumas carcinogênicas), irritações (semelhantes ao enfisema) e redução na capacidade respiratória (asma) resultando em afastamentos, acidentes de trabalho, invalidez, óbitos, faltas constantes, queda de rendimento e aumento nos gastos com tratamentos, internações e medicações. Os efeitos da exposição ao monóxido de carbono estão associados à diminuição da capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue. Foi

demonstrado, experimentalmente, que a pessoa exposta ao monóxido de carbono pode ter diminuídos seus reflexos e acuidade visual e sua capacidade de estimar intervalos de tempo. Altos índices do poluente em áreas de fluxo intenso de veículos têm sido apontados como causa adicional de acidentes de trânsito. Poeiras em suspensão no ar afetam a capacidade do sistema respiratório remover as partículas do ar inalado, retendo-as nos pulmões, quanto mais finas as partículas, mais profundamente penetram no aparelho respiratório. As poeiras em suspensão também potencializam os efeitos dos gases presentes no ar.

Com relação do efeito do ozônio sobre a saúde, as ocorrências mais relatadas da exposição de seres humanos são irritações dos olhos, vias respiratórias e o agravamento de doenças respiratórias preexistentes, como a asma. Sabe-se que exposição repetida ao ozônio pode tornar as pessoas mais susceptíveis a infecções respiratórias e doenças nos pulmões. Adultos e crianças saudáveis também estão sujeitos aos efeitos danosos causados pelo ozônio se expostos a níveis elevados durante a prática de exercícios físicos (PRADELLA *et al.*, 1999).

Na RMSP, o ozônio ultrapassa freqüentemente o padrão de qualidade do ar de 160 µg/m³, estabelecido pela Lei Estadual 8.468, de 1976, e por diversas vezes supera o valor de 200 µg /m³ (102 ppb), o que determina a qualidade do ar má, destacando-se atualmente como o poluente com maior número de ultrapassagens do padrão. A duração dos episódios, em geral, é curta, isto é, as ultrapassagens do padrão ocorrem com maior freqüência por uma ou duas horas no dia, entre 13 e 15 horas. Em relação à distribuição dos episódios durante os dias da semana, não observou-se diferenças significativas entre os dias úteis e finais de semana (PRADELLA *et al.*, 1999).

Em nível de ecossistemas florestais, os efeitos da poluição podem resultar em uma série de alterações com o tempo como a eliminação das espécies sensíveis, redução na diversidade das espécies, remoção seletiva das espécies dominantes favorecendo as plantas das sinúsias inferiores, redução geral no crescimento e na biomassa, aumento da susceptibilidade ao ataque de pragas e doenças e à ação de fatores abióticos. O efeito da poluição nas florestas é diferente do efeito sobre outras plantas. Para plantas anuais e culturas agrícolas, por exemplo, os efeitos da poluição podem ser desastrosos e, às vezes, fatais. No caso das árvores, as necroses foliares decorrentes, por exemplo, do efeito crônico podem não chegar a afetar a produção de madeira. Além disso, o hábito de crescimento das árvores pode, também, ser alterado. As folhas tornam-se mais finas, o crescimento diminui, e ocorre distorção na estrutura do tronco e da copa. O crescimento e altura do pé, o mais afetado, do que em espessura, resultando como que um achatamento das copas. Muitos dos gases poluentes podem ser prejudiciais às árvores e a vegetação em geral, citando-se: SO₂, HF, NO₂, O₃, Cl, NH₄, Hg, sulfetos etc. Destes, o SO₂, o O₃ e o HF são considerados como os principais poluentes capazes de causar efeitos deletérios nas árvores, sendo reconhecidos internacionalmente como os ofensores primários mais importantes das florestas. O SO₂, por outro lado, é considerado o mais importante neste aspecto, embora os fluoretos cheguem a ser cerca de 100 vezes mais tóxicos. Na Califórnia (EUA), o efeito da poluição sobre as florestas tem sido observado até cerca de 100 quilômetros da fonte poluidora. No estado do Tennessee, nos Estados Unidos, a poluição do ar resultante da siderurgia de cobre na região de Cooper Hill foi responsável, desde o início da sua operação por volta de 1900, pela destruição total de mais de 7000 hectares de florestas ao redor da área, sendo ainda que, em cerca

de outros 12000 hectares, a vegetação ficou seriamente afetada e, até hoje, o solo ao redor encontra-se praticamente nu. O SO₂ está relacionado com a poluição do ar mais do que qualquer outro gás poluente. A fonte mais comum da emissão de SO₂ para a atmosfera resulta da queima de combustíveis fósseis. Uma vez no ar, a hidratação do SO₂ é rápida ($\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{HSO}_3 + \text{H}^+$). Ou ainda pode ser oxidado a SO₃ e, depois, reagindo com a água, para produzir H₂SO₄, que é a reação que dá origem ao perigoso “aerossol sulfúrico” (LIMA, 1980).

Outro efeito conhecido causado por altas concentrações de ozônio presentes na atmosfera é a redução da produção de biomassa pelas plantas, ou seja, a redução do crescimento, representando perdas econômicas substanciais da safra agrícola. Nos Estados Unidos, calcula-se a perda de, aproximadamente, três bilhões de dólares por ano, causadas pelo ozônio nas culturas agrícolas. No Brasil, objetiva-se estudar as culturas mais afetadas, e o que isto representaria na economia, de forma a motivar o desenvolvimento tecnológico, voltado para o controle das fontes emissoras de precursores do ozônio atmosférico ou, ainda, estimular a busca de alternativas que substituam os modelos de desenvolvimento existentes no país (FIALHO *et al.*, 2006).

2.2. O CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

2.2.1 O Controle das Emissões dos Elementos Precursores do O₃

O progressivo aumento dos lançamentos de substâncias poluentes na atmosfera considerados universais como PTS (Partículas Totais em Suspensão - PM₁₀/PM₃), HC (Hidrocarbonetos Totais) e outros devido a sua maior ocorrência e

efeitos adversos ao meio ambiente, dentre os quais estão os principais elementos precursores (poluentes primários: SO₂, Nox, CH₄, NH₃, CO, CO₂) do O₃, ocasiona grandes concentrações deste gás (poluente secundário) altamente reativo na troposfera, bem como o seu transporte pelo movimento sazonal das massas de ar ao longo das regiões englobadas em suas rotas (SANT'ANNA, 2007).

A adoção de critérios de representatividade de dados é de extrema importância em sistemas de monitoramento. O não atendimento a este critério para uma determinada estação ou período significa que as falhas de medição ocorridas comprometem a interpretação do resultado obtido. Em análises comparativas de ano a ano, é necessário cuidado para não se comparar diretamente dados representativos com aqueles não representativos. Parâmetros que possuem apenas padrão de qualidade de curto prazo, como o O₃ e o CO, ainda que possua médias representativas para comparação com os padrões, devem ser analisados de forma criteriosa em função de suas maiores concentrações normalmente serem registradas em períodos específicos. De forma que, mesmo não sendo necessária para estes casos à avaliação da representatividade anual, esta é importante nas análises comparativas ano a ano (LEMOS *et al.*, 2008).

A poluição veicular e algumas atividades industriais são responsáveis pela maior parcela das emissões destes precursores e o aumento da concentração do ozônio troposférico [acima de 40ppb – AOT40 (78,4 µg/m³/h)] nos grandes centros urbanos (LACAVA *et al.*, 2004). Programas de controle destas emissões, como o PROCONVE⁵, o qual cumpre as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para veículos automotores, já foram implantados e estão

⁵ <http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/proconve.asp>

sendo implementados, com resultados bastante significativos na redução do padrão de emissão das fontes móveis de poluição.

Locais mais próximos da emissão desses precursores geralmente são atingidos por concentrações mais baixas desse poluente (O₃) e locais mais afastados, por altas concentrações (LACAVA *et al.*, 2006). Isso ocorre porque a velocidade de formação e de decomposição do O₃ depende da razão COV/Nox e, como os locais mais próximos às fontes de emissão apresentam altas concentrações desses poluentes, o O₃ é consumido rapidamente e, portanto, não é acumulado na atmosfera. Radiação solar, umidade relativa do ar e temperatura estão entre os fatores meteorológicos que mais influenciam a concentração de O₃, inclusive ao longo de um dia. Além disso, nos meses de primavera e verão, há grande intensificação do processo de *smog* fotoquímico, enquanto que nos meses de outono e inverno esse processo é reduzido (SEINFELD, 1986).

Segundo SANT'ANNA (2007), a metrópole de São Paulo é considerada como uma das mais industrializadas e urbanizadas da América Latina, apresentando sérios problemas de poluição atmosférica causados pelas diferentes fontes poluidoras. Entre elas está a imensa frota veicular, que consome combustíveis variados, como álcool (etanol), gasolina, diesel e gás natural. O etanol é um combustível utilizado particularmente no Brasil e seu uso promove maior concentração de compostos oxigenados na atmosfera, tais como aldeídos, cetonas e ácidos orgânicos. Na cidade de São Paulo, por exemplo, já foi demonstrado que aldeídos e peróxido de hidrogênio têm sido encontrados em concentrações mais elevadas (1-50 ppb), se comparadas a outras áreas urbanas (0,9-15 ppb). Em função desses aspectos, a contaminação atmosférica na cidade de São Paulo pode ser considerada bastante peculiar, com alta concentração de EAOs, que são fatores

adicionais de estresse oxidativo às plantas *Nicotiana tabacum* Bel W3 expostas, produzindo efeitos aditivos, sinérgicos ou antagônicos de O₃ e de outros oxidantes fotoquímicos.

Na Campanha de Campo de Maio-Junho de 1998 para avaliação da qualidade do ar realizada pela CETESB na RMSP e no eixo Cubatão-Santos, foram enfocados, além do ozônio (O₃), outros poluentes de interesse, tais como o dióxido de nitrogênio (NO₂) por ser um precursor na formação do ozônio, partículas inaláveis (PI) e dióxido de enxofre (SO₂), para verificar a possibilidade de ocorrência de efeitos sinérgicos dos poluentes sobre as plantas (PRADELLA *et al.*, 1999).

Os perfis da concentração dos poluentes aéreos monitorados no Parque Ibirapuera e na Escola Pública foram bastante discrepantes. O monitoramento mostrou que a estação sediada na Escola, em Campo Belo, foi fortemente impactada por poluentes primários emitidos por fontes antrópicas, como material particulado inalável (PM₁₀), dióxido de nitrogênio (NO₂) e, principalmente, monóxido de nitrogênio (NO), entre os meses de julho e setembro de 2003. Ressalta-se que o ozônio não foi monitorado nesse local pela CETESB devido aos baixos valores registrados em anos anteriores (aproximadamente 5 ppb). Já a estação instalada no Parque Ibirapuera, em Moema, apresentou baixos níveis desses poluentes primários, porém a concentração de O₃ foi bastante elevada, superando o nível de atenção (80 ppb /h) durante todo o período de exposição, exceto em junho de 2003. As maiores concentrações ocorreram, principalmente, nos meses de setembro, outubro e novembro de 2002 e em março e outubro de 2003 (SANT'ANNA, 2007).

2.2.2 A Importância do Protocolo de Montreal

Quando ficou comprovado cientificamente o efeito degradador dos CFCs e HFCs nas altas camadas da atmosfera e sua contribuição direta para a diminuição do O₃, tomaram-se medidas conjuntas no sentido de reduzir a escala de utilização desta família de gases em suas diversas aplicações.

Para Krupa e Manning (1988) o ozônio estratosférico é responsável pela absorção da maior parte dos raios ultravioleta incidentes na alta atmosfera, evitando que a maior parte desta radiação atravesse a baixa atmosfera e atinja a superfície terrestre.

Segundo De Latt e De Gruijl (1996) a geração de Ozônio troposférico está diretamente relacionada com a incidência de UVA (300-400nm) sobre os gases precursores e sua conseqüente dissociação através da fotólise (*smog* fotoquímico ou fotodissociação). A redução da concentração do O₃ estratosférico ocasiona um aumento na concentração do O₃ nas baixas camadas da atmosfera (camada limite planetária), onde os processos químicos são intensificados e onde são lançados os poluentes que darão origem a este gás tão nocivo aos seres vivos.

2.2.3 A Implantação do Proconve no Brasil

Após o controle das fontes industriais nas décadas de 70 e 80, verificou-se, a partir de cálculos de inventário, que as fontes móveis – veículos – tinham impacto significativo na emissão de poluentes nas regiões metropolitanas. Isto levou os especialistas em controle de poluição veicular da CETESB a desenvolver normas e legislações de abrangência nacional para o efetivo controle da emissão de gases,

partículas e ruídos dos veículos rodoviários automotores novos, de duas e quatro rodas, nacionais ou importados, vendidos no país. Outras ações de grande eficácia foram à implantação de programas de gestão ambiental em frotas de transporte de cargas e passageiros, a capacitação de oficinas destinadas à melhoria de manutenção de veículos automotores do ciclo Otto e Diesel, o incentivo a contínua melhoria na qualidade de combustíveis automotivos, o estudo de novas alternativas energéticas veiculares, bem como o aumento do controle corretivo da emissão excessiva de fumaça preta nos veículos em uso movidos a diesel.

Constatada a gravidade da poluição gerada pelos veículos, a CETESB, durante a década de 80, desenvolveu as bases técnicas que culminaram com a Resolução N. 18/86 do CONAMA, que estabeleceu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), posteriormente complementados por outras Resoluções. O programa foi baseado na experiência internacional dos países desenvolvidos e exige que os veículos e motores novos atendam a limites máximos de emissão, em ensaios padronizados e com combustíveis de referência. A CETESB é o órgão técnico conveniado do IBAMA para assuntos de homologação de veículos, tendo a responsabilidade pela implantação e operacionalização do PROCONVE no país. Assim, todos os novos modelos de veículos e motores nacionais e importados são submetidos obrigatoriamente à homologação quanto à emissão de poluentes. Os fabricantes dos veículos vêm cumprindo as exigências legais, o que resultou na obtenção de redução média de mais de 94% na emissão de poluentes dos veículos leves novos de 2007, em relação ao início do programa. Os veículos leves foram considerados prioritários pelo PROCONVE, devido a sua grande quantidade e intensa utilização, que os caracterizam como o maior problema a ser enfrentado. O PROCONVE

considera a qualidade do combustível e a concepção tecnológica do motor como os principais fatores da emissão dos poluentes. Há uma tendência mundial pra a adição de compostos oxigenados à gasolina, visando à redução do impacto poluidor. A experiência internacional nesse sentido tem demonstrado a superioridade da utilização de álcool, notadamente do etanol como no caso brasileiro, em relação aos éteres, sob o ponto de vista ambiental e de saúde pública (LEMOS *et al.*, 2008).

2.2.4 A Importância do Monitoramento da Qualidade do Ar

A partir do monitoramento e dos estudos especiais, é possível efetuar uma análise comparativa com os padrões de qualidade do ar. As concentrações são comparadas tanto com os padrões para longos períodos de exposição, normalmente médias anuais, quanto com os padrões de curto tempo de exposição (menor ou igual há 24 horas). Os resultados obtidos no monitoramento refletem as variações na matriz de emissões dos poluentes, tais como modificações na frota de veículos, alteração no tráfego, mudanças de combustível, alterações no parque industrial, implementação de tecnologias mais limpas etc. E refletem também as condições meteorológicas observadas no ano (LEMOS *et al.*, 2008).

2.2.4.1 Interação entre Qualidade de Ar e Mecanismos Meteorológicos

A atmosfera pode ser considerada o local onde ocorrem, permanentemente, reações químicas. Ela absorve uma grande variedade de sólidos, gases e líquidos, provenientes de fontes, estacionárias (industriais e não-industriais), móveis (transportes aéreos, marítimos e terrestres, em especial os veículos

automotores) e de fontes naturais (mar, poeiras cósmicas, arraste eólico etc.). Essas emissões podem se dispersar, reagir entre si, ou com outras substâncias já presentes na própria atmosfera. Estas substâncias ou o produto de suas reações finalmente encontram seu destino num sorvedouro, como o oceano, ou alcançam um receptor (ser humano, outros animais, plantas, materiais). A concentração real dos poluentes no ar depende tanto dos mecanismos de dispersão como de sua produção e remoção. Normalmente a própria atmosfera dispersa o poluente, misturando-o eficientemente num grande volume de ar, o que contribui para que a poluição fique em níveis aceitáveis. As velocidades de dispersão variam com a topografia local e as condições atmosféricas locais. Em suma, é a interação entre as fontes de emissão de poluentes atmosféricos e as condições meteorológicas que define a qualidade do ar.

2.2.4.2 Ozônio e Fatores Meteorológicos

A capacidade de interpretação dos fenômenos meteorológicos predominantes em uma determinada região fornece aos órgãos ambientais elementos que os possibilitam elaborar métodos previsivos para os episódios atmosféricos. A possibilidade de se prever fenômenos atmosféricos precursores de episódios indesejáveis de concentração e/ou formação de determinados poluentes aéreos permite a adoção de medidas preventivas de controle e manutenção da qualidade do ar. Entre os métodos previsivos pode-se destacar o da Persistência, da Climatologia, dos Indicadores, da Árvore de Classificação e Regressão (CART), da Regressão, das Redes Neurais, o Fenomenológico (intuitivo) e o dos Modelos de Qualidade Tridimensionais.

Como fatores meteorológicos destacam-se:

- Luz Solar – A radiação ultravioleta é necessária para a formação do ozônio;
- Temperatura – A velocidade de formação de O₃ aumenta com a temperatura;
- As nuvens também influenciam na máxima temperatura;
- Perfil Vertical de Temperatura – Alta estabilidade dificulta mistura vertical;
- Inversões dificultam a mistura vertical;
- Ventos superficiais – Calmaria ou ventos fracos promovem a concentração dos precursores, aumentando a taxa de reação;
- Ventos Superiores – Transportam O₃ e precursores para uma região, durante a noite com formação de O₃ pela manhã.

Como condições meteorológicas temos:

- Núcleo de alta Pressão:
 - Ocorre de 1 a 2 dias depois que uma frente fria passou pela região (núcleo de baixa pressão);
 - É a condição mais favorável para a formação de ozônio;
 - À medida que um núcleo de alta pressão se instala, os ventos se tornam fracos (baixa ventilação) permitindo o acúmulo de precursores;
 - Temperaturas elevadas causam o aumento de emissões biogênicas e aumentam a evaporação de VOC (ou COVs);
 - Ventos de subsidência aquecem a atmosfera inferior, dificultando a formação de nuvens inibindo também a mistura vertical;
 - O céu é limpo e claro (baixa umidade);

- Inversões térmicas dificultam a dispersão.
- Cauda do Núcleo de Alta Pressão:
 - O ozônio formado pode ser transportado para regiões à jusante;
 - Temperaturas amenas e formação de ventos fracos;
 - Níveis de O₃ podem permanecer altos, viabilizando episódios em grandes áreas;
- Frente Fria:
 - Caracterizada por um núcleo de baixa pressão;
 - Ocorre quando o núcleo de alta se retira da região;
 - Essa condição produz nuvens e chuvas que reduzem as reações fotoquímicas;
 - Ventos mais fortes permitem mistura superficial e vertical.

Em um estudo realizado pelo Instituto Brasileiro de Petróleo em 2000, procurou-se simular um cenário atmosférico para a Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) para analisar a influência dos combustíveis oxigenados na formação do ozônio troposférico e o efeito de alterações nas emissões primárias na formação de poluentes secundários, principalmente o O₃ e o PAN. Neste trabalho é simulada a atmosfera da Região Metropolitana de Porto Alegre, para um cenário representativo, e analisada a contribuição dos combustíveis oxigenados à formação de poluentes secundários, principalmente o ozônio.

As análises de sensibilidade realizadas indicam que não são esperadas mudanças significativas na formação do ozônio atribuíveis meramente ao combustível veicular.

Os objetivos deste trabalho são simular um caso base para a RMPA, comparar os resultados com dados experimentais obtidos na área da rodoviária e analisar os efeitos de uma mudança nas emissões primárias sobre a formação de poluentes secundários, principalmente ozônio e PAN. Foi chamado de caso base, um cenário representativo das condições médias da RMPA durante o verão de 1997, quando eram usados etanol e gasolina com 15% de Éter Metil-Terciário Butílico (MTBE), uma molécula razoavelmente simples criada a partir do metanol, como combustível para veículos leves. Os dados experimentais foram obtidos numa campanha de monitoramento realizada entre abril de 1996 e março de 1997 pela DGA Inc.⁶, sob cobertura de convênio entre: Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS); Fundação Estadual de Proteção Ambiental – RS (FEPAM); Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). As simulações foram realizadas pelo Grupo de Química Atmosférica e Poluição, do Instituto de Química da UFRJ, e pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CEMPES) da PETROBRAS.

Para a definição do Caso Base para a RMPA, foram usados valores médios anuais para parâmetros meteorológicos da RMPA (temperatura de 20°C e umidade relativa de 76%). As relações entre compostos orgânicos voláteis (COVs), NOx e CO, para as emissões da frota circulante, foram estimadas a partir de inventários. Os valores de emissão calculados para 1996, expressos em massa de

⁶ <http://www.dga-surveys.com/index.cfm>

poluente emitida por ano, para o total de veículos que circulavam em Porto Alegre, foram usados para estimar essa relação. Essas relações foram mantidas constantes durante toda a simulação do caso base e considerada um parâmetro não ajustável do modelo, por serem uma informação independente e por considerar que eram características do tipo de combustível e das condições da frota veicular. Na simulação, as emissões de CO foram ajustadas de forma a reproduzir a concentração média horária experimental medida, durante o mês de dezembro de 1996, na estação Rodoviária da RMPA. Ao se usar as emissões de CO como parâmetro ajustável, foram considerados, implicitamente, fatores como a dispersão horizontal e a vertical (por diluição, ventos etc.). A escolha do CO como parâmetro de ajuste deveu-se: a sua baixa reatividade, o que faz com que sua concentração seja uma boa medida das emissões primárias; a que as medidas experimentais de CO estão sujeitas a menor erro que a concentração de outros poluentes; ao fato de ser este procedimento atualmente recomendado pela comunidade científica. As quantidades de COVs e NOx foram calculadas usando as relações: $COVs/CO = 0,131$ e $NOx/CO = 0,119$.

Na definição do Caso Hipotético para a RMPA, foram mantidas as mesmas características do cenário do caso base, com a substituição de gasolina + 15% de MTBE por gasolina + 24% de álcool. O resultado assim obtido é uma projeção, não podendo, obviamente, ser comparado com resultados experimentais. A substituição do combustível irá produzir mudanças nas concentrações de etanol e MTBE, nas concentrações de aldeído e formaldeído, na quantidade total de poluentes primários emitidos para a mesma frota veicular e nas relações COV/Nox/CO.

Como resultado para os Cenários Base e Hipotético da RMPA, conforme os resultados da simulação, a substituição de MTBE por álcool, produziria, em princípio, uma diminuição no ozônio máximo entre 3 e 28% (dependendo da época do ano simulada, um aumento de NO e uma diminuição dos COVs e CO). A diminuição observada para as concentrações de ozônio calculadas para o cenário hipotético dever-se-iam à maior emissão de óxidos de nitrogênio por parte da gasolina com álcool. Contudo, deve-se notar que os próprios óxidos de nitrogênio são poluentes, com efeitos a jusante da região das emissões primárias. Os resultados mostram que a incerteza nas concentrações de ozônio calculadas, devida à contribuição das reações de etanol e MTBE é muito pequena. A exclusão destas reações no mecanismo levaria a um erro de 1%. Se as constantes fossem 10 vezes maiores, as concentrações máximas de ozônio seriam apenas 5% maiores. Isso sugere que a contribuição da oxidação do etanol e do MTBE para a formação do ozônio é muito pequena em comparação com a contribuição de outras espécies na atmosfera. A contribuição do etanol para a formação de PAN e acetaldeído, mesmo sendo pequena, leva a variações um pouco maiores. A exclusão da reação levaria a um erro de 3% no cálculo da concentração máxima de PAN e de 5% na concentração máxima de acetaldeído. Se a constante kOH (constante de velocidade de oxidação) fosse 10 vezes maior, a concentração máxima de PAN seria 18% maior e a de acetaldeído 24% maior.

Para análise da contribuição das reações de oxidação do etanol e do MTBE para a formação de PAN, acetaldeído e formaldeído, outra forma de analisar a contribuição destas reações é calcular que porcentagem dos compostos de interesse é formada a partir do etanol e MTBE emitido pelo escapamento dos automóveis e oxidado na atmosfera. No caso do etanol, os principais poluentes

secundários formados são acetaldeído e PAN. No caso do MTBE, é formado principalmente formaldeído.

Para efeito de distribuição de compostos orgânicos voláteis (COVs), a fim de estimar a variação produzida pela incerteza na concentração individual dos COVs, foram feitas simulações do caso base, mantendo a concentração total de COV constante, mas mudando a concentração das espécies de maior interesse (etanol, MTBE, acetaldeído e formaldeído) e mais reativas (olefinas e compostos aromáticos), uma de cada vez. Para etanol, MTBE, acetaldeído e formaldeído, foram feitas simulações imaginando que as concentrações eram duas vezes maiores. Para olefinas e compostos aromáticos, foram feitas simulações com concentrações 50% maiores. Tais mudanças tendem a afetar tanto a distribuição inicial de hidrocarbonetos, quanto à distribuição de COVs emitidos.

Como conclusão deste estudo pode-se afirmar que a reatividade do etanol e do MTBE é muito baixa e desprezível em comparação com a de outros hidrocarbonetos. Ao se mudar o tipo de combustível, também se alteraria a distribuição de hidrocarbonetos, especialmente acetaldeído e formaldeído. Contudo, esta simulação mostra que a porcentagem de acetaldeído formada pela composição do etanol (p.ex.: acetaldeído secundário) é, pelo menos nas condições deste modelo químico, muito pequena. Da mesma maneira o formaldeído secundário, formada pela decomposição do MTBE, é uma porcentagem pequena do total.

As baixas concentrações de ozônio calculadas, especialmente para uso de gasolina + álcool, são devidas às relativamente altas concentrações de Nox, fato já conhecido para outras cidades brasileiras. Nas isopletras de ozônio, pode-se observar que Porto Alegre encontra-se na região das altas concentrações de Nox e

baixas concentrações de COVs, em comparação com as cidades do Hemisfério Norte. Essa porção é conhecida como “região dominada pela concentração de COVs”, o que significa que uma pequena imprecisão na estimativa da quantidade de COVs emitidos irá ocasionar uma significativa mudança nos resultados. Conforme os resultados experimentais obtidos na campanha de monitoramento, as concentrações médias mensais de ozônio, para a Rodoviária, são relativamente baixas para regiões urbanas, variando entre 4ppb, em junho de 1996, e 14 ppb, em novembro de 1996. Essa diferença é devida, principalmente, a menor radiação incidente no solo nos meses de inverno, o que diminui significativamente a produção de ozônio por via fotoquímica. Assim, as mudanças sazonais e as mudanças meteorológicas (quantidade de nuvens, albedo, absorção pelos gases que compõe a atmosfera e por material particulado etc.) irão afetar, provavelmente, as quantidades de ozônio numa forma muito mais significativa que a substituição de um combustível oxigenado por outro oxigenado com padrão de emissões semelhante (p.ex: relação COVs/NOx/CO semelhante) (MOREIRA *et al.*, 2000).

2.3. AS FERRAMENTAS DE MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR

2.3.1 A Utilização do Biomonitoramento como Alternativa de Baixo Custo

Bioindicadores, de uma maneira geral, são seres vivos de natureza diversa, vegetais ou animais, utilizados para avaliação da qualidade ambiental. Podem ser utilizados de uma forma passiva, quando se procede a uma avaliação dos seres que habitam a área de estudo, ou de uma forma ativa, expondo-se no ambientes espécies previamente preparadas. Tal exposição possibilitará, a partir de sua resposta, a avaliação da qualidade ambiental local. A vantagem do uso dos

bioindicadores sobre os métodos convencionais de avaliação da qualidade ambiental está em seu baixo custo, podendo, inclusive, serem utilizados para avaliação cumulativa de eventos ocorridos em determinados período de tempo, resgatando um histórico ambiental não passível de detecção ou medição por outros métodos. Recomenda-se a utilização de bioindicadores específicos para poluente atmosférico, de forma a permitir a sua identificação por meio dos sintomas característicos apresentados pelos vegetais. O Setor de Qualidade do Solo e Vegetação (ESSE) da CETESB vem realizando estudos dos efeitos da poluição atmosférica sobre a vegetação, investigando espécies que possam ser utilizadas como indicadores da qualidade do ar atmosférico. Inúmeros diagnósticos de degradação causados por fluoretos gasosos já foram realizados por meio do uso de *Cordilyne terminalis* (dracena), demonstrando a importância dos bioindicadores.

Similarmente, a variedade de tabaco conhecida como *Nicotiana tabacum* Bel W3 vem sendo estudada há décadas na Europa e Estados Unidos como um bioindicador específico de poluentes foto-oxidantes, principalmente o ozônio atmosférico, poluente formado pelas reações químicas na atmosfera, a partir de precursores como os hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio emitidos por processos de combustão, principalmente industriais e veiculares. Constata-se a ocorrência de altas concentrações de ozônio atmosférico em várias regiões do estado, destacando-se a Região Metropolitana de São Paulo e Cubatão. No Brasil, alguns grupos iniciaram pesquisas visando à utilização do tabaco no diagnóstico ambiental de Cubatão e, atualmente, a CETESB estuda a possibilidade de seu uso para suporte nas ações de controle da poluição por ozônio em todo o Estado (FIALHO, 2002).

O biomonitoramento é definido como o método que faz uso da vida para verificar e/ou identificar mudanças ambientais induzidas pela ação humana. Em programas de biomonitoramento, utilizam-se organismos ou comunidades de organismos que reagem de forma previsível e identificável a perturbações ambientais, por meio de alterações nas suas funções vitais ou composição química, podendo ser usados para avaliação da extensão das mudanças em seu ambiente, sendo denominados organismos bioindicadores (PEDROSO, 2006).

A bioindicação é um método eficiente e de baixo custo, que deve ser adequado às condições de cada país. Nas regiões tropicais, ainda são poucos os trabalhos sobre biomonitoramento da poluição utilizando espécies vegetais e no Brasil existem algumas iniciativas neste sentido (KLUMPP *et al.*, 1996a; KLUMPP *et al.*, 1996b).

Enquanto os índices registrados, através de instrumentos, se restringem a um momento específico de observação da poluição ambiental, sem informar sobre os efeitos que ela provoca ao longo do tempo, os bioindicadores apesar de levarem mais tempo para apresentar resultados e fornecer informações menos precisas, complementam aquelas obtidas pelos sensores automatizados. Permitem avaliar, não só o índice de poluição presente no ar, mas as conseqüências que o acúmulo de substâncias tóxicas traz aos organismos, bem como o tempo de duração destas conseqüências (PRADO FILHO, 1993 apud LACAVA *et al.*, 2000).

2.3.2 Critérios para a Localização de um Ponto de Monitoramento

Os níveis de concentração de poluentes observados em uma determinada estação de amostragem ocorrem em função de uma série de fatores relativos à

localização desta estação e das fontes de emissão que a influenciam. Entre os fatores que influenciam os resultados do monitoramento, pode-se destacar a proximidade das vias de tráfego, o uso e a ocupação do solo nas áreas próximas (existência de fontes industriais etc.), condições de relevo, existência de anteparos etc. Todos esses fatores determinam a escala de representatividade da estação, que deve ser escolhida conforme os objetivos do monitoramento. A escala espacial de representatividade define a área de abrangência em que os níveis de concentração e os valores medidos pela estação podem ser considerados similares. As escalas espaciais de maior interesse, conforme os objetivos que destinam, são:

- Microescala – concentrações abrangendo áreas de dimensão de poucos metros até 100 metros;
- Média-escala – concentrações para áreas urbanas (poucos quarteirões com características semelhantes) com dimensões entre 100 e 500 metros;
- Escala de bairro – concentrações para áreas da cidade (bairros), com atividade uniforme, com dimensões de 500 a 4.000 metros;
- Escala urbana – concentrações de cidades ou regiões metropolitanas, da ordem de 4 a 50 quilômetros;
- Escala regional – concentrações geralmente de uma área rural, de geografia razoavelmente uniforme e de dimensões de dezenas a centenas de quilômetros;
- Escalas nacional e global – concentrações de um país e do planeta como um todo, respectivamente.

No caso das estações de monitoramento de O₃, estas não devem estar localizadas muito próximas de vias de tráfego e de árvores, pois estas tendem a reduzir a concentração medida. Segundo a Agência Ambiental dos EUA (EPA), uma

estação que mede O₃ deve estar distante pelo menos 30 metros de vias de tráfego (acima de 20.000 veículos por dia) e a 20 metros de árvores. Como forma de auxiliar no entendimento das concentrações observadas nas estações utilizadas neste estudo, fez-se uma caracterização simplificada das condições de cada uma delas, juntamente com a rosa de vento obtida para o período de 1996 a 1998 (PRADELLA *et al.*, 1999).

Por meio da análise dos perfis médios dos poluentes de cada uma das estações observou-se um comportamento diferenciado devido à distância da via, assim as estações foram separadas e dois grupos: veiculares e não-veiculares. As estações não-veiculares, como Ibirapuera e Mauá, foram as que apresentaram o maior número de ultrapassagens. Já as estações Congonhas, Osasco, Lapa e Parque D. Pedro II, apresentaram um menor número de ultrapassagens em função da proximidade da via. Na análise do perfil das concentrações médias horárias de NO, NO₂ e O₃, observou-se que o valor máximo de NO ocorre normalmente no período da manhã, em todas as estações, por volta da 8 horas coincidindo com o pico de tráfego, e que ainda no período da manhã, a concentração de NO diminui, sendo acompanhada do aumento do NO₂, cujo pico ocorre por volta da 10 horas. Nas estações veiculares, o perfil médio da concentração de NO é elevado em função da forte emissão dos veículos que circulam próximos e a concentração de ozônio é baixa uma vez que é rapidamente consumido pelo NO (PRADELLA *et al.*, 1999).

2.3.3 Classificação das Plantas Bioindicadoras

PEDROSO (2006) classifica as plantas empregadas em biomonitoramento em:

- Bioindicadoras - plantas que apresentam sintomas visíveis como necroses, cloroses e distúrbios fisiológicos, tais como redução no crescimento, redução no número e diâmetro das flores;
- Biosensoras – plantas que reagem aos efeitos dos poluentes aéreos com efeitos não visíveis, apresentando alterações moleculares, celulares, fisiológicas e bioquímicas;
- Bioacumuladoras – plantas que também não apresentam sintomas visíveis e são menos sensíveis aos poluentes aéreos, porém acumulam partículas de poeira e gases dentro de seus tecidos;
- Biointegradoras – aquelas que indicam o impacto da poluição por intermédio do aparecimento, desaparecimento ou mudança na densidade da população ou até comunidades.

As plantas bioindicadoras são classificadas em apenas dois tipos: passivos e ativos. Os bioindicadores passivos são aqueles que já estão presentes no local do estudo. A sua utilização está frequentemente relacionada a toda área que está sendo pesquisada, e a sua utilização apresenta a vantagem de que as espécies nativas não necessitam de manutenção específica. Porém os resultados podem ser influenciados por variáveis, como qualidade do solo, condições climáticas, variabilidade genética, estado metabólico, heterogeneidade e distribuição espacial das espécies selecionadas. Já as plantas bioindicadoras ativas são introduzidas no local de estudo. Neste caso, a possibilidade de controle de fatores de confusão é maior, e a exposição em casa de vegetação livra os resultados das restrições descritas para os passivos (PEDROSO, 2006).

2.3.4 A Utilização de *Nicotiana Tabacum* Bel W3 como Ferramenta Bioindicadora de O3

Os efeitos da poluição atmosférica vêm sendo apontados desde o final do século XIX. Na década de 1950, no Sul da Califórnia (EUA), ocorreu uma queda na produção das indústrias de charuto em decorrência do aparecimento de manchas necróticas (*weather flecks*) nas folhas de tabaco (*nicotiana tabacum*). Pesquisadores do USDA Agricultural Research Center, em Beltsville e Riverside, também na Califórnia, patrocinados pela cooperativa agrícola local e utilizando três variedades de *Nicotiana tabacum*, a cultivar bioindicadora Bel W3 (mais sensível ao O3), juntamente com a Bel C (sensibilidade intermediária) e a Bel B (resistente ao ozônio) conseguiram comprovar que as manchas formavam-se em decorrência da presença de altas concentrações do ozônio troposférico naquele ambiente (REGGESTAD, 1991, apud PEDROSO, 2006).

Nicotiana tabacum Bel W3 é amplamente empregada em programas de biomonitoramento da qualidade do ar em regiões temperadas. Contudo, para sua utilização efetiva em estudos voltados ao monitoramento da qualidade do ar em regiões tropicais, é necessário estabelecer por que nessas regiões observa-se uma fraca relação entre a área foliar afetada por necrose e a concentração de ozônio no ar (PEDROSO, 2006).

Plantas de *Nicotiana tabacum* L. Bel W3, desenvolvidas conforme metodologia descrita no item 2.2.1, foram levadas a campo na semana de 27/4/98, juntamente com mudas de azaléia adquiridas no CEAGESP. Neste período foram utilizados, pela CETESB, 16 pontos que contemplaram a RMSP e o eixo Santos/Cubatão, os quais apresentam, a princípio, diferentes concentrações atmosféricas deste poluente. Para a seleção desses locais foi realizada uma visitação de alguns pontos pertencentes à rede telemétrica da RMSP. Decidiu-se

então realizar a exposição em 7 pontos da rede, quais sejam: estações de Osasco, Ibirapuera, Congonhas, Cubatão - Centro, Mauá, Lapa e Mooca, além de 9 pontos, selecionados em função da existência de indícios da ocorrência de ozônio; CETESB - sede, Alphaville, Santos - orla, Santos-centro, Cubatão - Casqueiro, Paranapiacaba, Instituto de Botânica, Ribeirão Pires e Barragem das Pedras.

Monitoramentos quinzenais, realizados para avaliar a existência de injúrias foliares, revelaram que na segunda semana de exposição, apareceram sintomas característicos desse poluente. Desta forma, verificou-se, preliminarmente, que o tabaco foi significativamente mais afetado em Mauá, local este onde se constataram maiores concentrações atmosféricas deste poluente durante o período de exposição. Os resultados permitem concluir que, conforme esperado, a espécie *Nicotiana tabacum* L. Bel W3, quando utilizada como bioindicador de ozônio atmosférico, pode constituir-se uma ferramenta de apoio às ações de controle e elaboração de diagnósticos, sendo necessário, apenas, cautela durante a interpretação dos resultados, uma vez que ainda deve ser realizado um maior número de repetições do experimento, a fim aumentar o grau de confiabilidade e segurança na discussão dos resultados. Destaca-se, por fim, que os resultados confirmam os dados bibliográficos, os quais indicam concentrações danosas a partir de 80 microgramas/m³, considerando que abaixo deste nível não foi possível detectar correlações com injúrias (PRADELLA *et al.*, 1999).

2.3.5 A Utilização de outras Plantas como Bioindicadoras da Poluição Atmosférica

Além de *Nicotiana tabacum* BEL W3, outras espécies têm sido indicadas na literatura como sendo sensíveis ao ozônio, destacando-se dentre elas o feijão *Phaseolous vulgaris* L. var Pinto (feijão), o qual tem sido usado como bioindicador

em diversos estudos de ozônio, apresentando injúrias visíveis após exposições de 196 microgramas/m³ de ozônio por 2 ou 3 horas. O uso das referidas espécies em grande escala, como bioindicador de altas concentrações de ozônio têm contribuído para o incremento das advertências sobre os efeitos deste poluente atmosférico, bem como para monitorar a sua ocorrência a um baixo custo e com facilidade de utilização. Também se utilizou experimentalmente o plantar do gênero *Rhododendron* (azaléia), todas com o objetivo de fornecer suporte às ações de avaliação da qualidade do ar, na CETESB, desenvolvendo instrumentos que possam embasar diagnósticos ambientais e monitoramentos, principalmente através de mapeamentos e indicações de áreas potencialmente poluídas, utilizando-se para isto, uma ferramenta de baixo custo e de fácil aplicação, como é o caso dos bioindicadores vegetais. A exposição em campo da azaléia foi interrompida, uma vez que esta espécie não apresentou qualquer resultado visualmente perceptível durante a exposição de um período de 28 dias (PRADELLA *et al.*, 1999).

2.4. OS EFEITOS FITOTÓXICOS DA POLUIÇÃO DO AR

Os poluentes gasosos entram na planta diretamente pelos estômatos durante as trocas gasosas, podendo provocar efeitos fisiológicos, metabólicos, ultraestruturais e estruturais, que levam a sintomas como clorose, descoloração da folha e necrose em tecidos e órgãos, que podem evoluir levando à morte o indivíduo. O ozônio, em particular, se dissocia muito rapidamente nos tecidos vegetais, formando oxigênio molecular e peróxidos, que afetam primeiramente a membrana plasmática e, posteriormente, todas as biomembranas. Tal toxicidade decorre da formação de espécies ativas de oxigênio (EAOs) nas células, as quais são muito

reativas e danificam as moléculas vitais como proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, afetando as membranas celulares e, alterando o metabolismo celular. A intensidade da ação biológica, no entanto, depende da eficiência do sistema celular antioxidativo, composto por substâncias capazes de capturar e neutralizar os EAOs (BRAY *et al.*, 2000, apud PEDROSO 2006).

Estas espécies ativas de oxigênio (EAOs) são altamente reativas e citotóxicas para todos os organismos, uma vez que podem reagir com ácidos graxos insaturados das membranas e promover a peroxidação lipídica. Desta forma, apesar dos organismos aeróbicos disporem de vantagens energéticas significativas, utilizando o oxigênio molecular como um oxidante terminal na respiração, a presença de oxigênio no ambiente celular constitui-se numa ameaça oxidativa constante às suas próprias estruturas e processos devido ao seu potencial de agir como redutor parcial e assim formar as EAOs, que podem se tornar altamente destrutivas para as células e tecidos se sua produção não for estritamente controlada. Assim, a formação das EAOs é uma consequência inevitável do metabolismo dos organismos aeróbicos e provocam estresse oxidativo devido à sua ação tóxica e mutagênica sobre as células (GRATÃO, 2003).

As EAOs são constantemente produzidas pelos organismos vivos durante suas funções metabólicas. As principais organelas nas quais tais espécies são formadas são aquelas em que ocorre transporte de elétrons, como mitocôndrias e cloroplastos. Além disso, já foi demonstrado em plantas, que as EAO, ao serem produzidas de forma ordenada, podem funcionar como sinalizadoras de mecanismos de defesa, ativando ou intensificando a produção de substâncias de defesa antioxidativa. Dessa forma, as plantas possuem diversos mecanismos para manter o equilíbrio pro-oxidante/antioxidante, de modo a evitar danos celulares

proporcionados pelas EAO. Entretanto, quando a planta está submetida a uma condição de estresse (p. ex: patógenos, seca ou poluentes), com conseqüente aumento da produção de EAO, o equilíbrio pode ser quebrado e, então, a planta passa a enfrentar uma condição de estresse oxidativo (MUGGLI, 1993, apud SANT'ANNA, 2007).

2.4.1 Os Efeitos Fitotóxicos do Ozônio Troposférico

O Ozônio é um oxidante ativo, que faz parte dos chamados oxidantes fotoquímicos. É sintetizado fotoquimicamente através de uma reação ácida que envolve dióxido de nitrogênio e oxigênio. Por ação da luz, a molécula de NO₂ é desmembrada, liberando um átomo de oxigênio, o qual combina-se com O₂ para produzir o ozônio (O₃). Em condições normais, a reação é reversível, havendo novamente produção de NO₂ e oxigênio. A adição de hidrocarbonetos provenientes da exaustão de motores de combustão interna e de outras fontes de poluentes, todavia, altera a reversibilidade da reação, permitindo o acúmulo de ozônio de dióxido de nitrogênio. Esta é, basicamente, a causa da formação da poluição fotoquímica (*smog*). O ozônio existe normalmente em altas atmosferas, sendo também produzido por descargas elétricas. Mas a ação fotolítica em atmosferas poluídas é, sem dúvida, importante fonte de O₃ causada pelas atividades humanas.

Vários fatores afetam a reação das árvores ao ozônio, principalmente condições relacionadas com o meio e com o estado fisiológico das árvores. Pode haver variação na resposta entre espécies, entre clones e mesmo entre folhas de um mesmo ramo. Os sintomas visuais incluem lesões pigmentadas, clorose e necrose nas folhas. Tais lesões aparecem, normalmente, na forma de pontuações

pequenas e discretas, constituídas de tecidos pigmentados, cloróticos ou necróticos distribuídos ao longo das folhas. Quando as lesões são numerosas, as folhas podem adquirir aspecto bronzeado ou prateado. O efeito deletério do ozônio sobre as árvores parece estar relacionado com os seguintes modos de ação: interferência com a atividade das mitocôndrias, distribuição da permeabilidade da membrana e inibição da fotossíntese. A respeito do efeito da poluição fotoquímica nas florestas de *Pinus ponderosa* nas montanhas San Bernardino, na Califórnia, as quais vêm apresentando sintomas de declínio gradual, há cerca de cinquenta anos, caracteriza-se por redução no crescimento, perda prematura das acículas, definhamento e, finalmente, morte das árvores. Através de ensaios de fumigação, chegou-se à conclusão de que a causa está relacionada com a poluição fotoquímica (*smog*), a qual era ainda agravada pela seca, mesmo considerando que a área situa-se a 80 quilômetros da cidade de Los Angeles (LIMA, 1980).

2.4.2 A Fitotoxicidade do O₃ Troposférico no Cultivar *Nicotiana Tabacum* Bel W3

O grau de sensibilidade de uma planta ao ozônio depende de sua capacidade de se defender contra a ação das EAO. O sistema antioxidativo, que tem como função capturar ou inativar as EAO, é composto por enzimas ou substâncias não enzimáticas solúveis ou não em água, que agem em rede e são oxidadas em lugar das moléculas vitais à planta (MUGGLI, 1993 apud SANT'ANNA, 2007).

A maior parte dos poluentes gasosos presentes na atmosfera é absorvida pelas plantas por meio dos estômatos, portanto, em ambientes com grandes concentrações de poluentes aéreos, as plantas podem apresentar alterações quantitativas e/ou qualitativas nos mesmos. Vários autores constataram tais

alterações, especialmente em plantas submetidas ao ozônio, entre elas, alteração na densidade estomática. Plantas de *Nicotiana Tabacum* Bel W3 expostas no Ibirapuera apresentaram a maior densidade estomática. Nesse local foi constatado o maior valor de AOT40, se considerados os três períodos de exposição (01-15/10/2003, 29/10-12/11/2003 e 26/11-11/12/2003), as maiores concentrações de material particulado e a mais alta porcentagem de área foliar necrosada. O índice estomático calculado para as mesmas plantas, não mostrou uma relação clara com a concentração de poluentes, o que justifica a falta de citações que mencionem tal característica em plantas submetidas a poluentes aéreos. A densidade de estômatos, ao contrário, é bastante empregada em estudos que consideram parâmetros estruturais quantitativos em plantas submetidas a poluentes aéreos.

A diminuição da densidade estomática pode representar uma estratégia para diminuir a entrada de poluente na planta, enquanto que aumento na densidade, quase sempre acompanhado de diminuição do tamanho do estômato, representa um mecanismo para maximizar a eficiência do fechamento deste, quando as concentrações de poluentes no ar são elevadas. Plantas submetidas a estresse hídrico apresentam igualmente aumento na densidade estomática, o que sugere que as plantas respondem de forma similar ao estresse seja ele a falta de água ou o aumento de poluentes.

As alterações provocadas pela poluição aérea nos elementos condutores (vasos lenhosos e liberianos) são similares àquelas observadas em plantas sob estresse hídrico. Nessa situação, uma das estratégias para sobrevivência consiste no aumento da capacidade de condução de água, ocorrendo uma ampliação da área do sistema vascular, isto é, maior quantidade de xilema (lenho), adensamento da venação das folhas e redução da distância de transporte, ou seja, internos mais

curtos. Aumento na frequência dos vasos, no cultivar Bel W3 do tabaco, pode ser interpretado como uma resposta para aumentar a eficiência na condução, enquanto que o seu agrupamento, uma garantia de maior segurança no transporte de água, uma vez que se houver interrupção no fluxo de um vaso, a seiva ascendente pode ser mais facilmente desviada para um vaso contíguo.

Quando a planta é exposta ao ozônio, o alvo principal é o mesófilo; as células começam a apresentar plasmólise ou encolhimento e o vacúolo aumenta, rompendo as estruturas internas, finalmente, levando à formação da necrose. O colapso das células do mesófilo pode provocar de pressão das células epidérmicas. No tabaco, as necroses são visualizadas em todo o limbo foliar nas regiões intervenais, porém não é possível prever o local onde a mesma será formada. Conhecimentos mais recentes dão conta de que as plantas alteram o metabolismo de várias maneiras, para se acomodar ao estresse ambiental, incluindo produção dos compostos osmoreguladores, tais como prolina e glicina betaína, e aumentando a produção de antioxidantes.

De uma maneira geral, os sintomas se repetem e os mais comuns são: aumento da erosão e degradação das ceras epicuticulares e obliteração dos estômatos. As alterações nas ceras decorrem do fato destas representarem a primeira barreira que o vegetal impõe à entrada de substâncias e organismos em seu interior. Com base nos resultados observados no tabaco Bel W3 conclui-se que a planta apresenta uma série de sintomas, que podem ser vistos como tentativa de minimizar os efeitos dos gases presentes no ar urbano. Contudo, as mudanças estruturais que ocorrem em tecidos não necrosados, ainda sem mudanças morfológicas visíveis, poderão contribuir para entender o porquê da fraca relação geralmente observada entre a porcentagem de área foliar afetada por necrose e a

concentração de ozônio na atmosfera, em estudos voltados ao monitoramento da qualidade do ar com *Nicotiana tabacum* Bel W3 (PEDROSO, 2006).

Considerando os processos naturais, os níveis de ozônio na troposfera deveriam variar entre 20 e 80ppb. Porém, em áreas onde o ar está poluído, esses níveis de ozônio são ultrapassados em várias ordens de magnitude (100-500ppb) devido à ocorrência do *smog* fotoquímico (SEINFELD, 1986). Nesse processo extremamente complexo, o equilíbrio foto-estacionário é quebrado devido à presença de compostos orgânicos, como os hidrocarbonetos (R), que promovem uma cadeia complexa de reações capaz de produzir não apenas o ozônio (O₃), mas também outros oxidantes fotoquímicos como o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitrato de peroxiacetila (PAN), aldeídos e cetonas. A quebra desse equilíbrio foto-estacionário pode levar ao aumento ou diminuição da concentração de ozônio.

Segundo SILLMAN (1999) e SANT'ANNA (2007) a concentração de ozônio depende da razão entre a emissão de óxidos de nitrogênio (Nox) e de compostos orgânicos voláteis (COV), sendo que em áreas urbanas a formação de O₃ depende principalmente da concentração de COV e, em regiões rurais, da concentração de Nox. A diminuição da concentração de O₃ ocorre quando há grande emissão de Nox para a troposfera, especialmente de óxido de nitrogênio. No presente estudo, a cultivar bioindicadora *Nicotiana tabacum* Bel W3 foi especialmente eficiente como marcadora do processo fotoquímico em escala local, destacando-se a influência das fontes de emissão de seus precursores na formação/degradação de ozônio. Os dados de danos foliares demonstraram que as plantas mantidas nas áreas próximas às fontes de emissão apresentaram os menores valores de porcentagens, enquanto que as plantas mantidas em áreas mais afastadas apresentaram os maiores valores de danos foliares por ação

oxidativa. Essa característica seguiu o padrão apresentado pela dinâmica de formação e consumo de ozônio em áreas com alto tráfego veicular, onde há grande aumento da concentração de NO, e nesse caso o ozônio e outros oxidantes fotoquímicos reagem rapidamente com esse poluente, consumindo-o. Já em áreas afastadas das fontes, pode haver aumento dos níveis de precursores de O₃, como os hidrocarbonetos (HCs), que promovem inúmeras reações radiculares, levando a redução do NO, deslocando o sentido das reações para a formação de ozônio.

Klumpp *et al.* (1996b) estudaram a região de Cubatão/São Paulo/Brasil e verificaram que quanto mais distantes das fontes de poluição, maiores as porcentagens de danos foliares. Métodos de estudo de fluorescência da clorofila a demonstraram que este é um processo utilizado pela planta para dissipar o excesso de energia não assimilada e servindo de parâmetro de avaliação por indicar, indiretamente, a condição fotossintética da planta, o qual se situa em torno de 83% de eficiência do fotossistema II (FS II) para um indivíduo em condição ótima. Tal parametrização permitiu aos pesquisadores verificar que quando a planta se encontra sob estresse oxidativo, como o provocado por altas concentrações de O₃, ocorre uma diminuição da fotossíntese (eficiência < 83%), efeito este, percebido através da medição da fluorescência da clorofila a.

2.4.3 Critérios de Avaliação do Aparecimento de Injúrias Foliares

A avaliação do efeito do ozônio nos indivíduos de tabaco expostos em cada ponto de amostragem, foi feita por meio de uma estimativa dos sintomas de injúrias visíveis presente após um período de 28 dias de exposição. A análise, de caráter visual e através da percentagem de injúrias foliares, foi comparada aos dados obtidos nos diversos pontos amostrados, bem como aos dados obtidos pela

estação automática de monitoramento da qualidade do ar da CETESB (ocorrência de ozônio e dados meteorológicos).

A fim de se evitar interferências subjetivas na avaliação das porcentagens de injúrias foliares, por parte do avaliador, foi desenvolvida uma metodologia que pudesse garantir a possibilidade de comparação de resultados entre diversas campanhas. Esses valores percentuais de área foliar injuriada são estimados pela comparação das folhas com padrões previamente definidos, os quais constituem de um conjunto de fotos de folhas com níveis conhecidos de diferentes áreas danificadas, calculadas pelo Sistema de Informação Geográfica (IDRISI) (PRADELLA *et al.*, 1999).

No que se refere aos valores de referência para proteção da vegetação, busca-se o conhecimento da dose mais baixa de ozônio capaz de produzir um efeito mensurável. O valor de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{h}$ de ozônio (aproximadamente 40 ppb) é citado, por diversos autores, como aquele a partir do qual injúrias podem ocorrer nas plantas de clima temperado (FIALHO, 2002).

Para se estimar a concentração atmosférica de O_3 com o uso de bioindicadores destacam-se duas diferentes metodologias: uma baseada na determinação química dos teores foliares de açúcares solúveis totais ou individuais, como é o caso do açúcar *miioinositol* e outra baseada na área foliar injuriada. A metodologia para determinação de açúcares solúveis é trabalhosa e envolve equipamentos como High Performance Liquid Chromatography (HPLC), que demanda tempo longo para análise de cada uma das amostras, o que impediria o trabalho com um grande número de amostras. Já a metodologia baseada na medição da área foliar injuriada, que consiste na exposição de plantas sensíveis aos poluentes oxidantes, e conseguinte avaliação da extensão do dano foliar, mostra-se mais

exeqüível, além de possibilitar a obtenção de uma quantidade maior de dados (PRADELLA *et al.*, 1999).

Logo, para a finalidade de monitorar os níveis de toxicidade do ozônio com *Nicotiana tabacum* Bel W3, aplica-se predominantemente apenas a análise visual dos danos foliares, devido à vantagem de poder ser realizada no próprio local onde se encontra a planta e de ser uma medida rápida, não destrutiva e bastante econômica. É um procedimento recomendado pelo *Verein Deutscher Ingenieure* (VDI), órgão alemão responsável pela definição e atualização dos protocolos relacionados ao biomonitoramento com plantas. Essa cultivar, por ser muito sensível, manifesta sintomas foliares visíveis rapidamente e sob baixos níveis de contaminação atmosférica por ozônio, os quais são mitos característicos e facilmente quantificados (HEGGESTAD, 1991).

As necroses induzidas tipicamente por ozônio nas folhas de *Nicotiana tabacum* Bel W3 têm diferentes tamanhos e formatos, ocorrendo sempre entre as nervuras. Inicialmente, ocorre o decréscimo de volume nas células injuriadas, formando depressões na superfície foliar superior, com o tempo tornando-se de cor prata e bege e então marrom clara (SANT'ANNA, 2007).

No desenvolvimento, na Europa, de uma abordagem de níveis críticos para proteger a vegetação da injúria por ozônio, tem sido aplicado o índice referente à exposição acumulada acima de 40 ppb (AOT40). Tal índice é a soma de todos os valores horários que excedem 40 ppb (por exemplo: o valor de 45 ppb observado em uma hora significa $AOT40 = 5$ ppb) (FIALHO, 2002).

O conceito de AOT40 é usado na Europa para mapear, geograficamente, áreas onde o ozônio ambiental excede níveis críticos. Esta abordagem é delineada

para implementar estratégias de controle para reduções de emissões dos poluentes precursores de ozônio (FIALHO, 2002).

2.4.3.1. Metodologia de Avaliação

A metodologia utilizada foi adaptada de Lorenzini *et al.* (1999) e tem como base à exposição de indivíduos de tabaco da variedade *Nicotiana tabacum* Bel W3, por um período de 28 dias, em locais selecionados que abranjam a área que se deseja estudar (LEMOS *et al.*, 2008).

A CETESB fez uso do método de aplicação de estufas ou casas de vegetação, com controle de umidade, luminosidade e ventilação, além disso, todos os indivíduos expostos foram cultivados em solo (substrato agrícola) livre de quaisquer contaminantes (Plantmax), as plantas foram cultivadas em campânulas fechadas com atmosfera isenta de ozônio, garantida por meio da filtragem do ar por carvão ativado, em condições de temperatura ambiente, com irrigação adequada por meio de um sistema de auto-rega, a partir de cordões de náilon, com uma das pontas previamente inserida nos vasos e a outra em contato com a água. As plantas foram mantidas em bandejas com água.

Em cada ponto monitorado foram expostas individualmente as plantas, em vasos de auto-rega, protegidos por sombrite (50%), de forma a evitar o impacto direto da chuva.

2.4.4 Influências Geoclimáticas no Aparecimento de Injúrias Foliare

A Influência das latitudes nos danos foliares por variação da intensidade luminosa foi observada por SANT'ANNA (2007) a qual afirma que alguns autores já demonstraram que variações meteorológicas interferem na eficiência bioindicadora de *Nicotiana tabacum* Bel W3.

Peñuelas *et al.* (1999), embora tenham demonstrado que o tabaco foi apropriado para o biomonitoramento de ozônio na atmosfera da Catalonia/Espanha, verificaram que a fitotoxicidade deste poluente varia fortemente em diferentes estações e períodos, dependendo de fatores como temperatura, umidade e ventos, que atuam na abertura e fechamento dos estômatos. Esses autores observaram, por exemplo, que plantas *Nicotiana tabacum* Bel W3 apresentaram danos intensos com doses acumuladas de O₃ (AOT-40, quando a intensidade luminosa está acima de 50w/M²) nos locais onde havia ventos pouco intensos, enquanto, nos lugares sob ventos mais fortes, as injúrias surgiram somente quando foram alcançados valores de AOT-40 mais elevados.

Em plantas, a produção das EAOs é favorecida por vários fatores ambientais de estresse como a exposição em níveis elevados de luminosidade, seca, metais pesados, elevadas concentrações de sais, extremos de temperatura, radiação UV, poluição do ar, herbicidas, estresse físico e mecânico e também como resposta aos estresses bióticos tais como ataques de patógenos e processos fotossintéticos induzidos durante condições abióticas tais como frio, seca e estresses provocados por ozônio (GRATÃO, 2003).

Em julho/agosto de 1998, a CETESB realizou uma campanha de campo na RMSP e no eixo Santos-Cubatão com o cultivar *Nicotiana tabacum* L. Bel W3 e

constatou uma correlação entre a altura dos indivíduos expostos e o número de ocorrências de concentrações de ozônio acima de 80 µg /m³ registradas durante o período de exposição nos diferentes locais, apresentando um coeficiente de -0.67 (p< 0,1), indicando uma correlação inversa e moderadamente forte, ou seja, existe uma tendência de que quanto maior os níveis de concentração de O₃ atmosférico, menor o crescimento da planta em altura. Ressalta-se que Cubatão, por possuir fatores ambientais distintos, tais como umidade, altitude, presença de spray marinho, coquetel de poluentes atmosféricos, entre outros, não foi contemplado na análise estatística (PRADELLA *et al.*, 1999).

Com relação aos aspectos sazonais da poluição do ar, as concentrações mais altas dos poluentes primários ocorrem, via de regra, no período compreendido entre os meses de maio a setembro, devido a maior ocorrência de inversões térmicas em baixos níveis, alta porcentagem de calmarias, ventos fracos e baixos índices pluviométricos. Com relação aos poluentes secundários, principalmente o ozônio, ocorrem com maior frequência entre o período de setembro a março (primavera e verão), meses mais quentes e com maior incidência de radiação solar no topo da atmosfera. Entretanto, o maior número de ocorrências de ozônio é registrado na transição entre os períodos seco e chuvoso na região sudeste. Estudos mostraram que a maior frequência do ozônio não ocorre necessariamente nos meses mais quentes (janeiro e fevereiro), provavelmente, em função do aumento da nebulosidade devido à atividade convectiva, que reduz a quantidade de radiação solar incidente no período da tarde e, conseqüentemente, diminui a formação de ozônio na baixa atmosfera. Devido a significativas alterações nas condições meteorológicas, o ano de 2007, no período de maio a setembro, esteve entre os mais desfavoráveis à dispersão de poluentes nos últimos 10 anos. A

maioria dos dias desfavoráveis ocorreu nos meses de junho a agosto. Esse ano foi meteorologicamente propício à formação de ozônio, principalmente nos meses de setembro a outubro, num período de dias secos e quentes (LEMOS *et al.*, 2008).

No município de Brotas, os resultados obtidos pelo biomonitoramento (ofício n. 0234/07GP-PMB de 07/03/2007) com *Nicotiana tabacum* Bel W3, mostraram injúrias foliares, características do efeito fitotóxico do ozônio troposférico. Apesar disto, as medianas dos níveis de injúrias foliares foram inferiores a 5%, com exceção do P3 APTA na terceira campanha (26/06/2007 a 25/07/2007) que apresentou mediana igual a 5 (LEMOS *et al.*, 2007).

No município de Biritiba-Mirim, os resultados obtidos pelo biomonitoramento (ofício n. 36/06DMDMAT/GP de 18/01/2006) com *Nicotiana tabacum* Bel W3, mostraram injúrias foliares, características do efeito fitotóxico do ozônio troposférico. Apesar disto, as medianas dos níveis de injúrias foliares foram inferiores a 5%, em todos os pontos de monitoramento nas campanhas 1, 2 e 3: na quarta campanha no verão de 2007 (06/02/2007 a 09/03/2007) pontos tiveram medianas superiores a 5% (7, 10 e 20%) e na quinta campanha no verão de 2008 (28/12/07 a 22/01/2008) apenas 1 ponto teve mediana superior a 5% (9%) (LEMOS *et al.*, 2008).

2.4.5 Efeitos Sinérgicos de Outros Poluentes Aéreos

2.4.5.1 A Influência do SO₂ no Aparecimento de Injúrias Foliares

A reação das plantas ao dióxido de enxofre apresenta muitas variações e envolve a interação entre as características do vegetal, condições ambientais, e dosagem e concentração do poluente. É consenso entre os vários autores que o

SO₂ penetra no tecido foliar através dos estômatos. Assim, fatores que afetam a abertura ou o fechamento dos estômatos irão afetar a reação dos vegetais ao SO₂. Na medida em que na maioria das plantas os estômatos fecham durante a noite, o dano causado por SO₂ resulta usualmente de exposições diurnas. Por outro lado, plantas expostas ao SO₂ tendem a abrir os estômatos mesmo à noite. Geralmente, a sensibilidade aumenta à medida que cresce a umidade relativa do ar, o que pode ser relacionado aos efeitos da umidade na abertura dos estômatos. Igualmente, existe relação entre a quantidade de glicose nas folhas e a sensibilidade ao SO₂ (de manhã a sensibilidade é maior do que à tarde, depois do período fotossintético), podendo ser ainda citada a maior sensibilidade das folhas jovens do que a velhas.

Quimicamente, o SO₂ é de natureza redutora, em comparação com outros poluentes, como o O₃, por exemplo, que é de natureza oxidante. A injúria causada pelo SO₂ às árvores pode ocorrer independentemente da aparição de sintomas visuais; injúria em nível sub-celular (ultra-estrutural), injúria em nível bioquímico e injúria em nível celular. O caráter ácido do ar e da precipitação que já se faz sentir em muitos países, principalmente em regiões altamente industrializadas, é apenas parte de um problema mais amplo: alteração do clima causada por uma variada emissão de poluentes na atmosfera. Tais emissões podem causar um problema local, regional ou global, dependendo apenas do tempo de residência dos poluentes na atmosfera. O pH da precipitação é o critério pela qual esta acidificação vem sendo observada em vários países. O SO₂, sem dúvida, desempenha importante papel nesta acidificação. A acidificação causará alteração no solo, principalmente em relação aos cátions adsorvidos aos colóides. Os cátions liberados são lixiviados e, conseqüentemente, deverá haver redução no grau de saturação das bases, processos estes que tendem a ocorrer também em profundidades no perfil do solo.

Em conseqüência, a fertilidade do solo diminuirá, afetando, desta forma, o crescimento das plantas (LIMA, 1980).

2.4.5.2 Influência dos Fluoretos (HF) no Aparecimento de Injúrias Foliares

Os fluoretos estão, normalmente, presentes em concentrações baixíssimas na água, no solo e mesmo na vegetação, não causando qualquer injúria às plantas. Todavia, atividades industriais relacionadas com metalurgia, combustão de carvão, cerâmica, fabricação de vidros, fertilizantes fosfatados e cimento, são responsáveis pela adição na atmosfera de poluentes contendo concentrações perigosas de fluoretos. Comparativamente, os fluoretos são mais danosos à vegetação do que concentrações equivalentes dos demais gases poluentes. A injúria causada pelo HF sobre as árvores decorre, usualmente, de um acúmulo gradativo do poluente nos tecidos vegetais durante determinado período de tempo. Desta forma, o grau de injúria vai depender da concentração do poluente, da duração da exposição ao gás e das condições gerais do meio, assim como da maior ou menor susceptibilidade da espécie. Aparentemente, a injúria por HF decorre da ação negativa deste poluente sobre o sistema enzimático da planta, assim como sobre o processo de fotossíntese (LIMA, 1980).

A problemática da poluição ambiental, antes mais restrita a países industrializados, tem hoje um caráter universal. No Brasil, cidades como São Paulo, Cubatão, Volta Redonda e Rio de Janeiro convivem com esse fato. Em São Paulo, estudos realizados em Cubatão têm mostrado os muitos danos à vegetação da Serra do Mar causados por poluentes atmosféricos e, na Reserva Biológica do Instituto de Botânica, os níveis de particulados atmosféricos são comparáveis aos de outros países comprovadamente poluídos. O flúor encontrado na atmosfera,

principalmente sob a forma de ácido fluorídrico (HF), apresenta grande fitotoxicidade para a vegetação. Sua concentração na precipitação atmosférica varia de 1 a 1.000 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, podendo chegar a 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ em áreas industriais. Os sintomas do flúor nas plantas incluem cloroses, necroses, redução no crescimento e remoção da cera epicuticular, entre outros (SILVA, 1998).

A degradação de diversas formações vegetais no entorno de alguns pólos industriais no Brasil encontram-se, significativamente, relacionadas à presença de flúor na atmosfera ou no solo, em consequência da atividade de indústrias de fertilizantes fosfatados e de usinas de alumínio. O monitoramento das emissões de flúor, quando existente, emprega métodos físico-químicos de alto custo e de difícil aplicação, ou biológicos que, em muitos casos, se reduzem a meras observações de injúrias em plantas ou animais. O uso de organismos indicadores, como abordagem alternativa e/ou complementar em programas de monitoramento de poluição ambiental, permite uma interpretação melhor das relações ecológicas envolvidas. Para isso, um pré-requisito essencial é que as espécies a serem empregadas como indicadores ativos ou passivos sejam de ampla distribuição regional e de sensibilidade diferenciada ao poluente. O padrão de distribuição de fluoreto nas plantas da maioria das gramíneas sugere que ele se acumula em tecidos com maior atividade metabólica, ou seja, na rebrota. A penetração do ânion no apoplasto de tecidos jovens é facilitada pela menor quantidade de cutícula, cera epicuticular e pela presença relativamente grande de pectinas. O crescimento vegetativo vigoroso e as altas taxas de movimento de água favorecem o maior acúmulo de F^- nos ápices e nas margens das folhas terminais. A relação entre a dose de F^- aplicada à planta e seu acúmulo nos tecidos jovens da rebrota.

A injúria foliar é um critério amplamente usado para a caracterização de condições de intoxicação de plantas. Espécies extremamente sensíveis como *Gladiolus gandavensis* L. cv. *Snow princess* e *Tulipa gesneriana* L. cv. *Blue parrot* são freqüentemente empregadas como plantas indicadoras em programas de monitoramento ativo de fluoreto atmosférico. No Brasil as espécies tropicais *Cordyline terminalis* e *Discorea* sp., *Gallesia gorazema*, *Genipa americana*, *Joannesia princeps*, *Peltophorum dubium*, *Spondias dulcis*, *Hemerocallis* sp. e gramíneas tropicais vêm sendo avaliadas e utilizadas com o mesmo propósito. É provável que a injúria foliar se encontre associada à alteração da matriz lipídica e sua relação com as proteínas solúveis da membrana, influenciando suas funções metabólicas, alterando a atividade de enzimas associadas, tais como as H⁺-ATPases. A inibição da atividade da H⁺-ATPase conduz a alterações do transporte secundário de vários nutrientes e na perda de metabólitos através da membrana plasmática.

Os fluoretos gasosos, extremamente fitotóxicos, foram extensivamente estudados nos países de primeiro mundo. Considerados um dos principais causadores da degradação da vegetação da Serra do Mar em Cubatão, mais especificamente no Vale do Mogi, são emitidos, sobretudo pelas indústrias de fertilizantes, de alumínio de fabricação de vidro e cerâmica. Visando o monitoramento de áreas potencialmente afetadas por este poluente, elegeu-se a espécie *Cordilyne terminalis*, vulgarmente conhecida como Dracena, como bioindicadora. O critério de seleção baseou-se, principalmente, em sua sensibilidade aos fluoretos e no fato de ela ser uma planta amplamente utilizada no paisagismo de jardins domésticos e industriais (FIALHO, 2002).

Como ação preventiva dos efeitos nocivos à vegetação decorrentes da ação de fluoretos, a CETESB estabeleceu, em 2003, como ferramenta básica para as ações de controle desenvolvidas, o padrão de emissão para fluoretos para indústrias cerâmicas. A adoção do padrão de emissão para esse tipo de indústria fez com que cerca de 90% das emissões desse poluente fossem reduzidas em algumas regiões do estado (LEMOS *et al.*, 2008).

2.4.6 Viabilidade do Monitoramento Qualitativo de O₃ pela Cultivar *Nicotiana Tabacum* Bel W3 na Cidade de São Paulo

Diferenças na porcentagem de área foliar afetada por necroses ao longo das exposições realizadas no período de estudo, em cada local, foram localizadas por meio de análise de variância (One Way ANOVA) e teste de comparação múltipla (Student-Newman-Keuls). Mapas de distribuição de porcentagem de área foliar afetada por necroses foliares, na região da cidade de São Paulo abrangida pelo estudo e nas diferentes estações do ano, foram desenhados com auxílio do programa *Surfer* versão 8. Análises de regressão foram aplicadas para estabelecer a relação entre porcentagem de área foliar afetada por necroses e concentrações atmosféricas de ozônio fornecidas pela CETESB. Análise de componentes principais foi realizada para evidenciar quais fatores abióticos foram mais importantes e responsáveis pela variabilidade total dos dados. Estas duas últimas foram realizadas com dados provenientes do Parque Ibirapuera, onde a CETESB mantém uma estação de monitoramento de poluentes e de variáveis meteorológicas. Além disso, foram realizados cálculos sugeridos pela rede europeia de biomonitoramento⁷, com

⁷ www.eurobionet.com

os quais é possível classificar as áreas de estudo quanto aos níveis de contaminação por ozônio.

Para estabelecimento dessas classes de contaminação atmosférica, utilizaram-se médias de área foliar danificada e respectivos desvios padrões, obtidos durante o experimento. Níveis de contaminação atmosférica por O₃, estabelecidos com base em quatro classes de porcentagem de área foliar afetada por necroses, em plantas *Nicotiana tabacum* Bel W3 expostas nos diferentes locais da cidade de São Paulo sendo: Classe 1 - dano foliar ≤ 10 , Classe 2 – $10 < \text{dano foliar} < 25$, Classe 3 – $25 < \text{dano foliar} < 40$, Classe 4 – dano foliar ≥ 40 . Plantas mantidas na situação de referência não apresentaram danos foliares durante todo o período de exposição. Com relação às plantas expostas *in situ*, o aparecimento de danos nas folhas de tabaco ocorreu em todos os sítios, sendo que a maior porcentagem de áreas afetadas por necroses foi freqüentemente observada no Jardim Botânico (B), e, em seguida, no Viveiro Manequinho Lopes (V), Parque do Ibirapuera (I), Aeroporto de Congonhas (A), Marginal Pinheiros (P) e Escola Pública (E). A partir desses resultados, foi possível separar as áreas de estudo em dois blocos, quanto ao nível de contaminação atmosférica por ozônio. Enquanto nos locais B, V e I, áreas mais sujeitas à ação do ozônio, as plantas indicaram, em muitas exposições, níveis de concentração alto (classe 3) a muito alto (classe 4), já nas áreas menos sujeitas ao ozônio (A, E e P), as plantas foram menos danificadas, indicando nível baixo (classe 1) a médio (classe 2) de contaminação por ozônio. Nesses últimos locais, verificou-se nível médio de contaminação em poucas exposições. Além disso, é possível verificar que houve grande variação na intensidade de danos foliares ao longo das exposições em cada local, sendo que,

em geral, as maiores porcentagens de necroses foliares foram observadas nos meses de fevereiro a abril de 2003.

Os mapas de distribuição de valores de porcentagem de danos foliares indicam que nos meses de primavera de 2002, e no verão e outono de 2003, as plantas foram mais danificadas. Em todo o período de exposição, observa-se um gradiente de aumento dos danos foliares da região mais central da cidade de São Paulo estudada (E e A) para a periferia onde estão situados os locais da região de Moema (V e I) e o Jardim Botânico (B). E, comparando a primavera dos dois anos de estudo, observa-se que a porcentagem dos danos foliares foi muito mais intensa no primeiro ano. Através do método de análise de regressão polinomial entre danos foliares nas referidas plantas (com os mapas de distribuição da porcentagem de danos foliares apresentados por plantas *Nicotiana tabacum* Bel W3 expostas nos seis locais de exposição) e as concentrações médias de ozônio no ar em cada exposição, verificou-se que os danos foliares não estão estritamente relacionados com a concentração de O₃, mas também apresentam relação com as variáveis climáticas, como temperatura e radiação, ocorrendo diferentes polaridades em relação ao eixo de gradientes da intensidade temporal de danos foliares nas unidades amostrais de primavera/verão (lado positivo) e nas unidades amostrais de outono/inverno (lado negativo).

No geral, a variação da concentração de O₃, no espaço e no tempo, foi acompanhada pela variação da intensidade de danos foliares, indicando que *Nicotiana tabacum* Bel W3 foi capaz de discriminar áreas e períodos com diferentes níveis de ozônio, conforme foi demonstrado através análise dos gráficos das exposições. Diante dessa paridade qualitativa entre danos e níveis de O₃, é possível explorar de modo mais abrangente a classificação da contaminação atmosférica

proposta pela rede européia de biomonitoramento e aplicado no presente estudo, estimando-se qualitativamente a faixa de concentração de O₃ na atmosfera, tendo como ponto de comparação os resultados obtidos no Parque Ibirapuera, onde houve monitoramento de O₃. Pode-se supor que até o nível médio de contaminação por O₃ (classe 2), que aconteceu em muitas amostragens realizadas nos locais da mais alta emissão veicular (Escola, Aeroporto e Pinheiros), as concentrações médias de O₃ em cada exposição não tenham sido superiores a 40 ppb. Observa-se, portanto, que *Nicotiana tabacum* Bel W3 mostrou-se adequada para biomonitoramento qualitativo de ozônio em São Paulo, tornando-se possível ampliar a área de monitoramento da qualidade do ar em toda a cidade, tendo como principais vantagens, o baixo custo e a possibilidade de estudar o efeito da poluição sobre os organismos vivos.

Da mesma forma que colocaram em prática o programa de biomonitoramento EuroBionet⁸, no qual utilizaram, entre outras plantas bioindicadoras a mesma cultivar de tabaco, mostraram resultado similar para o continente europeu. Entretanto, no presente estudo, ocorreram picos de danos foliares, especialmente nas plantas mantidas no Parque Ibirapuera nos meses de primavera e outono, quando as concentrações de O₃ não estavam altas e vice-versa, o que pode ser uma das causas da baixa explicabilidade do modelo encontrado entre danos foliares e concentrações de ozônio. O uso de *Nicotiana tabacum* Bel W3 para biomonitoramento quantitativo de ozônio, ou seja, para dimensionar as concentrações desse poluente, na atmosfera com base na intensidade dos danos foliares, é questionável para a cidade de São Paulo. No caso do presente estudo, a análise de componentes principais indicou que não somente

⁸ www.eurobionet.com

houve fraca relação entre concentração de ozônio e resposta bioindicadora, como também, que os danos foliares estiveram relacionados com variáveis ambientais envolvidas no processo de *smog* fotoquímico (positivamente com radiação e temperatura e negativamente com NO₂). Isto sugere que outros produtos do *smog* fotoquímico, além do ozônio, e/ou alguns fatores climáticos poderiam estar contribuindo para o aparecimento das necroses nas folhas de tabaco, e, devido a isso, a porcentagem de danos foliares não foi estritamente relacionada com as concentrações de ozônio, porque fatores climáticos podem interferir na resposta da planta bioindicadora, pois são fatores que alteram a condutância estomática e, como consequência, modificam a entrada do poluente na planta. Conclui-se, portanto, que a aplicação de *Nicotiana tabacum* Bel W3 na cidade de São Paulo é eficiente para biomonitoramento qualitativo, fazendo dessa cultivar uma importante ferramenta para estudos de qualidade do ar, porém não apresenta potencial para quantificar os níveis de ozônio (SANT'ANNA, 2007).

3. CONCLUSÃO

A técnica de biomonitoramento do ozônio troposférico através da utilização da cultivar *Nicotiana tabacum* Bel W3 mostrou-se apropriada, quando adotada para avaliação qualitativa da poluição atmosférica por este poluente aéreo secundário. Em relação à sua aplicabilidade, destaca-se a possibilidade de uma implantação em larga escala devido ao seu baixo custo e facilidade de operação, não necessitando de sítios específicos, revelando uma versatilidade e simplicidade adequada ao monitoramento da poluição do ar em nível regional.

A metodologia de utilização adotada pela CETESB visa impedir ou minimizar a influência de fatores externos ao estudo, os quais provocariam distorções significativas nos resultados das campanhas, invalidando a correlação entre os danos foliares e a presença do poluente aéreo monitorado.

REFERÊNCIAS

1. CETESB, São Paulo. **Avaliação da qualidade do ar no município de Jaú: Cartódromo – Bairro Jorge Stalla - SP.** São Paulo: CETESB, 2006. 62p. (Série Relatórios / CETESB).
2. CETESB, São Paulo. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2007.** São Paulo: CETESB, 2008. 294 p. (Série Relatórios / CETESB).
3. De LATT, J.M.; De GRUIJL, F.R. The role of UVA in the aetiology of non-melanoma skin cancer. **Cancer Surv**, United States, v.26, p.173-191, 1996.
4. FIALHO, R.C.; AZEVEDO, C.M.A.; DINIZ, K.M. **Diagnóstico de danos à vegetação por fluoretos gasosos em Cajati-SP.** Informe Técnico 003/93. São Paulo: CETESB, 1993.
5. FIALHO, R.C. **O uso de bioindicadores vegetais no controle da poluição atmosférica.** São Paulo: CETESB, 2002. (Informativo Técnico – Série Ambiente Técnico, Ano 2, n. 4).
6. FIALHO, R.C.; SOUSA, J.B.; LEMOS, M.M.G. **Estudos investigativos da ocorrência de ozônio troposférico por meio do biomonitoramento, no Município de Cabreúva – SP:** julho 2006. São Paulo: CETESB, 2006. 26 p. (Série Relatórios / CETESB).
7. GRATÃO, P.L **Análise da resposta antioxidativa das células de Nicotiana tabacum cv BY-2 submetidas ao cádmio** [dissertação]. Piracicaba, 2003. 109p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
8. HEGGESTAD, H.E. Origin of Bel-W3, Bel-C and Bel-B tobacco varieties and their use as indicators of ozone. **Environ Pollut**, v.74, n.4, p.264-291, 1991.
9. KLUMPP, A.; KLUMPP, G.; DOMINGOS, M. Bioindication of air pollution in the tropics. **Gefahrstoffe– Reinhaltung der Luft**, Düsseldorf, v.56, p.27-31.1996a.

10. KLUMPP, A.; KLUMPP, G.; DOMINGOS, M.; SILVA, M.D. Fluoride impact on native tree species of the Atlantic forest near Cubatão, Brazil. **Water Air Soil Pollut**, Netherlands, v.87, p.57-71. 1996b
11. KRUPA, S.V.; MANNING, W.J. Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. **Environ Pollut**, London, v.50, n.1-2, p.101-137, 1988.
12. LACAVAL, C.I.V.; MURAMOTO, C.A.; LOPES, C.F.F. **Estudo do comportamento do ozônio na região metropolitana de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2000. 63 p. (Série Relatórios / CETESB).
13. LACAVAL, C.I.V.; PONTES, R.S.; YANAGI, Y. **Análise dos padrões de vento e de sua influência sobre as máximas concentrações de ozônio na Estação Ibirapuera**: novembro 2003. São Paulo: CETESB, 2003. 40 p. (Série Relatórios / CETESB).
14. LACAVAL, C.I.V.; ANAZIA, R.; CURILOV, R. **Avaliação da qualidade do ar no município de Ribeirão Preto**: agosto de 2004 a março 2006. São Paulo: CETESB, 2006. 2v. 28p. (Série Relatórios / CETESB).
15. LEMOS, M.M.G.; MENEZES, G.V.; GALO, G.I. **Estudo investigativo da ocorrência de ozônio troposférico por meio do biomonitoramento, no Município de Brotas – SP**. São Paulo: CETESB, 2007. 26 p. (Série Relatórios / CETESB).
16. LEMOS, M.M.G.; MENEZES, G.V.; GALLO, G.I. **Estudo investigativo da ocorrência de ozônio troposférico por meio do biomonitoramento, no Município de Biritiba-Mirim - SP**. São Paulo: CETESB, 2008. 32 p. (Série Relatórios / CETESB).
17. LIMA, W.P. **As florestas e a poluição do ar**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais / Departamento de Silvicultura da E.S.A.L.Q. – USP, 1980. v.1 n.1, p.1 – 41. (Série Técnica/ ESALQ, IPEF).
18. MONTEIRO, T.R. Bioensaios de toxicidade com plantas. In: SIMPÓSIO DE BIOLOGIA VEGETAL, 2007. **Anais...** São Paulo, 2007.

19. MOREIRA, A.; MOREIRA, L.F.; GROSJEAN, D. et al. Estudo de sensibilidade da formação de ozônio na região urbana de Porto Alegre. In: IBP RIO OIL & GAS CONFERENCE, 2000. **Anais...** Rio de Janeiro, 2000. 8p. (Paper- Brazilian Petroleum Institute - IBP24400, 2000).
20. MURAMOTO, C.A.; FIALHO, R.C.; SOUSA, J.B. **Estudo investigativo da ocorrência de ozônio troposférico na região de Sorocaba – SP**. São Paulo: CETESB, 2008. 81 p. (Série Relatórios / CETESB).
21. NEGRÃO, C.E.; MURAMOTO, C.A.; LOPES, C.F.F. **Caracterização das estações de monitoramento de fumaça no interior do Estado de São Paulo**: estação do Município de Campinas. São Paulo: CETESB, 2007. 15 p. (Série Relatórios / CETESB).
22. PEDROSO, A.N.V. **Avaliação estrutural de *Nicotiana tabacum* var. Bel W3 sob diferentes níveis de contaminação atmosférica** [dissertação]. São Paulo, 2006. 60 p. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) - Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2006.
23. PEÑUELAS, J.; RIBAS, A.; GIMENO, B.S. et al. Dependence of ozone biomonitoring on meteorological conditions of different sites in Catalonia (N.E. Spain). **Environ Monit Assess**, Netherlands, v.56, n.2, p.221-224, May 1999.
24. POMPEIA, S.L.; AZEVEDO, C.M.A.; FIALHO, R.C. **Danos à vegetação por fluoretos gasosos em Alumínio, Mairinque - SP**. Informe Técnico Nº 001/93. São Paulo: CETESB, 1993.
25. PRADELLA, D.Z.A.; LOPES, M.R.; BATISTA, E.R. **Biomonitoramento ativo de ozônio atmosférico com utilização da espécie *Nicotiana tabacum* L. Bel W3**: relatório preliminar. São Paulo: CETESB, 1999. 48p. (Série Relatórios / CETESB).
26. RAVEN, P.H.; BERG, L.R.; JOHNSON, G.B. **Environment**. 4.ed. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1993. 569p.

27. SANT´ANNA, S.M.R. **Potencial de uso de *Nicotiana tabacum* Bel W3 para biomonitoramento dos níveis de contaminação atmosférica por ozônio, na cidade de São Paulo** [doutorado]. São Paulo, 2007. 116 p. Tese (Doutorado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) - Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007.
28. SEINFELD, J.H. **Atmospheric chemistry and physics of air pollution**. New York> Wiley, 1986.
29. SILVA, L.C. **Efeitos de chuva simulada, ácida e com fluoreto, sobre o desenvolvimento de plantas de espécies nativas arbóreas** [dissertação]. Viçosa, 1998. Dissertação (Mestrado em Botânica) – Universidade Federal de Viçosa.
30. STACHETI RODRIGUES, G. **Uso de bioensaios vegetais para teste de genotoxicidade de solos e lodos**. EMBRAPA MEIO AMBIENTE. (Slides).

GLOSSÁRIO

Adiabático	Processo termodinâmico em que não há troca de calor entre o sistema considerado e o ambiente externo a ele. Nos processos adiabáticos o aquecimento e o arrefecimento do ar ocorrem apenas por efeito da pressão, expansão ou compressão. Na atmosfera tais variações de pressão ocorrem pela ascensão do ar (expansão) que produz resfriamento, ou descida do ar (compressão) que produz aquecimento. Aquecimento e resfriamento adiabático são também denominados aquecimento e resfriamento dinâmicos. (dicionário IBGE)
Adsorção	Fenômeno físico ou químico no qual moléculas de gases ou líquidos aderem ou reagem sobre uma camada extremamente fina da superfície de corpos porosos, frequentemente sólidos.
Advecção	Processo de transferência de calor por movimento horizontal do ar atmosférico mediante fluxos ou massas de ar. A transferência de calor das latitudes baixas para as latitudes altas é um típico exemplo de advecção. (dicionário IBGE)
Aerossol	Sistema disperso em um meio gasoso, composto de partículas sólidas e/ou líquidas de tamanhos inferiores a 100µm. O mesmo que “aerosol”.
Agente Alergênico	Substância que, após um ou vários contatos subseqüentes com a pele ou mucosa, desencadeia uma reação inflamatória na área de contato e em outras áreas distantes do contato primitivo. Essa reação inflamatória envolve mecanismo imunológico e independe da duração do contato e da concentração do agente.
Agente Asfixiante	Substância que, através de ação química ou física, altera a oxigenação normal dos tecidos.
Agente Cancerígeno	Substância ou radiação capaz de provocar em determinados tecidos vivos o aparecimento de câncer. O mesmo que agente carcinogênico.
Agente Dispersante	Substância química que reduz a atração entre as partículas. (dicionário IBGE)
Agente Fitotóxico	Substância capaz de produzir danos aos vegetais.
Agente Irritante	Todo e qualquer agente físico ou químico que produza, quando em contato com a pele ou mucosa, lesão ou

reação inflamatória na área de contato. Essa lesão ou reação inflamatória não evolui mecanismo imunológico, mas depende apenas da duração do contato ou da concentração do agente.

Albedo	Relação de energia radiante refletida e recebida por uma superfície, expressa geralmente em porcentagem, sendo que uma aplicação mais comum é a luz refletida por um corpo celeste. (dicionário IBGE)
Alcalina	Solução resultante da dissolução de uma base em água com formação de íons hidróxido (OH^-). (dicionário IBGE)
Álcool	Composto orgânico que apresenta grupo hidroxila ou oxidrila (OH^-) ligado a um carbono saturado. (dicionário IBGE)
Aldeído	Composto que apresenta um grupo funcional carbonila e de fórmula geral RCHO , onde R é um átomo de hidrogênio, um grupo alquila ou um grupo arila. (dicionário IBGE)
Alísios	Ventos constantes que sopram das regiões subtropicais de alta pressão em direção às regiões equatoriais. As direções predominantes são de nordeste no hemisfério norte e sudeste no hemisfério sul (dicionário IBGE).
Agente Mutagênico	Substância ou radiação que provoca alterações genéticas nos organismos vivos, as quais podem ser transmitidas para gerações subsequentes.
Agente Oxidante	Substância que pode aceitar elétrons de outra substância ou aumentar o número de oxidação da outra. (dicionário IBGE)
Agente Redutor	Substância que pode ceder elétrons a uma outra substância ou diminuir o número de oxidação da outra. (dicionário IBGE)
Agente Teratogênico	Substância ou radiação que pode provocar má-formação durante o desenvolvimento embrionário.
Agente Tóxico	Qualquer substância exógena em quantidade suficiente que, em contato com o organismo, possa provocar uma ação prejudicial, originando um desequilíbrio orgânico.
Anticiclone	Termo utilizado em meteorologia para definir sistema de alta pressão formado por isóbaras fechadas, onde a pressão cresce do centro para a periferia. O sistema gira horizontalmente no sentido anti-horário no Hemisfério Sul e verticalmente no sentido descendente.

Atmosfera Estável	Termo utilizado em meteorologia para definir a situação na qual ocorre restrição do movimento vertical do ar, apresentando conseqüentemente condições precárias para a dispersão vertical.
Atmosfera Instável	Termo utilizado em meteorologia para definir a situação na qual ocorre intensificação na turbulência do ar, apresentando conseqüentemente condições favoráveis à dispersão dos poluentes.
Atmosfera Neutra	Termo utilizado na meteorologia para definir a situação na qual não ocorre variação na temperatura potencial em função da altitude, isto é, a atmosfera apresenta um perfil adiabático seco de temperatura.
Barlavento	Face de qualquer elemento voltada para o lado que sopra o vento. (dicionário IBGE)
Bioacumulação	Aumento da concentração de elementos e substâncias tóxicas nos organismos ao longo dos níveis tróficos de uma cadeia alimentar, podendo chegar a teores letais nas espécies do topo da cadeia alimentar. Ocorre preferencialmente com substâncias lipossolúveis, de difícil excreção pelos organismos. Uma vez ingeridas estas substâncias se acumulam nos tecidos ricos em gordura, tendendo a aumentar sua concentração ao longo da vida do organismo, e à medida que se “sobe” na cadeia alimentar, cresce o nível trófico do organismo. O homem, como topo da cadeia alimentar, é um dos organismos mais afetados pela bioacumulação. (dicionário IBGE)
Bioindicador	Animal ou vegetal cuja presença em um determinado ambiente indica a existência de modificações de natureza biológica, física ou química. Alguns bioindicadores são bioacumuladores, pois denunciam a presença de substâncias tóxicas, acumulando-as. (dicionário IBGE)
Bioma	Conjunto de vida (vegetal e animal) definida pelo agrupamento de tipos de vegetação contíguos e identificáveis em escala regional, com condições geoclimáticas similares e história compartilhada de mudanças, resultando em uma diversidade biológica própria. (dicionário IBGE)
Biomonitoramento	Monitoramento ambiental realizado através da utilização de organismos vivos, como por exemplo, o uso de peixes para avaliar a qualidade de águas e o de líquens para avaliar a qualidade do ar. (dicionário IBGE)

Caducidade	Processo de adaptação de um vegetal através do qual as folhas caem antes de brotarem as novas folhas, permitindo deste modo que seja conservada água durante a estação desfavorável, seja fria (hibernação) seja seca (estivação). Durante a estação desfavorável o vegetal permanece sem folhas. (dicionário IBGE)
Caducifólio	Vegetal que perde as folhas durante período climático desfavorável. (dicionário IBGE)
Camada de Inversão (1)	Termo utilizado em meteorologia para definir a camada de ar da atmosfera onde ocorre o fenômeno de inversão da temperatura. Esta camada é caracterizada pelas alturas de sua base e do seu topo e pela magnitude do gradiente térmico, sempre positivo.
Camada de Inversão (2)	Camada da atmosfera, particularmente da troposfera, que, por circunstâncias especiais e locais, em um determinado momento apresenta perfil de temperatura invertido em relação ao normal, isto é, com a temperatura aumentando com a altitude. Pode começar no nível do solo ou a partir de certa altitude. A base da cada de inversão bloqueia a dispersão de poluentes para cima e por esta razão é um amplificador da poluição atmosférica em grandes cidades com características geográficas de depressão, como são Paulo (Brasil), Los Angeles (EUA) e Santiago (Chile). Eventualmente estas cidades têm que recorrer até ao bloqueio do tráfego de veículos para que o ar não se torne irrespirável. É um fenômeno mais freqüente no inverno. (dicionário IBGE)
Catalisador	Substância que possui a propriedade de acelerar determinadas reações químicas sem sofrer alteração de sua estrutura molecular. As enzimas (proteínas especiais) são os catalisadores por excelência das reações químicas que ocorrem nos seres vivos. (dicionário IBGE)
Catalisador de emissões	Equipamento que filtra os gases da combustão dos automóveis. Por meio de reações de oxidação os compostos gasosos, orgânicos e inorgânicos, são transformados em substâncias menos agressivas ao ambiente, como vapor d'água e dióxido de carbono. (dicionário IBGE)
Chuva ácida	Chuva enriquecida em substâncias ácidas tais como ácido sulfúrico e ácido nítrico, sendo tais substâncias produzidas pela combinação da água atmosférica com os óxidos liberado pela queima de hidrocarbonetos, ou liberados por instalações industriais. (dicionário IBGE)

Ciclone	Termo utilizado em meteorologia para definir o sistema de baixa pressão formado por isóbaras fechadas, onde a pressão cresce do centro para a periferia. O sistema gira horizontalmente no sentido horário no Hemisfério Sul e verticalmente no sentido ascendente.
Cinzas	Matéria sólida, inorgânica e incombustível, presente em diversas substâncias combustíveis. Resíduo da combustão.
Climatologia	Ciência que estuda os climas da Terra e seus fenômenos, abrangendo sua descrição, classificação, natureza, evolução e seus processos formadores e modificadores. (dicionário IBGE)
Clorofila	Pigmento tetrapirrólico que contém no centro da molécula um átomo de magnésio. Encontra-se nos cloroplastídios das células vegetais, em órgãos aos quais confere a coloração verde. É a molécula responsável pela conversão da energia luminosa em energia química, dentro do processo de fotossíntese (dicionário IBGE).
Cloroplasto	Estrutura presente no interior das células dos vegetais e de outros seres fotossintetizantes, onde se encontra a clorofila, e onde ocorre a fotossíntese. (dicionário IBGE)
Clorose	Amarelamento da folhagem, como um dos sintomas da deficiência em clorofila, principalmente nos tecidos das folhas. (dicionário IBGE)
Combustão	Reação química de oxidação-redução onde necessariamente existem um combustível e um comburente, geralmente o oxigênio. Esta reação sempre libera energia calorífica e luminosa, no espectro visível ou não. (dicionário IBGE)
Combustão total	Combustão que ocorre quando existe oxigênio em quantidade suficiente para consumir todo o combustível e liberar o máximo de energia possível. Combustão completa. (dicionário IBGE)
Combustível fóssil	Denominação dada a restos orgânicos, utilizados atualmente para produzir calor ou força através da sua combustão. Incluem petróleo, gás natural e carvão. (dicionário IBGE)
Composto orgânico	Produto homogêneo derivado de resíduos orgânicos, obtido por meio de processo biológico pelo qual a matéria orgânica existente nos resíduos é convertida em outra, mais estável, pela ação de microorganismos já presentes no próprio resíduo ou adicionados por meio de inoculantes.

(dicionário IBGE)

Concentração de Poluentes	Quantidade total de poluentes contida em uma unidade de volume a uma dada temperatura e pressão. A concentração é normalmente expressa em massa, volume ou número de partículas por unidade de volume.
Controle ambiental	Conjunto de ações tomadas visando a manter em níveis satisfatórios as condições do ambiente. O termo pode também se referir à atuação do Poder Público na orientação, correção, fiscalização e monitoração ambiental, de acordo com as diretrizes administrativas e as leis em vigor. (dicionário IBGE)
Convecção	Movimento oscilatório que ocorre em um fluido que apresenta uma temperatura não uniforme, produzindo uma variação de densidade, tornando-o menos denso ou mais denso, propiciando dessa maneira a formação de fluxos ascendentes e descendentes. (dicionário IBGE)
Déficit de água	Diferenças acumuladas entre a evapotranspiração potencial e a precipitação durante determinado período, sendo que a precipitação apresenta o menor valor. (dicionário IBGE)
Difusão	Processo de transferência de massa que ocorre com substâncias de concentração diferente, em direção à região de menor concentração, atribuído ao movimento molecular.
Difusão Atmosférica	Resultado de um movimento rápido e irregular de porções macroscópicas de fluido (chamadas redemoinhos) em regime turbulento. Termo impropriamente aplicado para qualificar o comportamento das propriedades conservativas dos gases e partículas de um fluido turbulento.
Dispersão	Termo genérico usado para descrever a diluição de um poluente que integra os processos de transporte e difusão atmosféricos.
Dispersão Coloidal	Sistema de duas fases, no qual uma delas (fase dispersa) encontra-se distribuída em um meio contínuo (fase dispersante), em forma de partículas sólidas ou líquidas, cujo diâmetro está compreendido entre 10.000 nm e 100 nm.
Downwash	Denominação dada ao movimento descendente de parte ou totalidade de uma pluma, devido à baixa pressão formada por esteira (zona posterior a um obstáculo no sentido do vento) de uma chaminé ou edificação, ou, ainda, devido a uma declividade descendente do terreno.

Efeito Chaminé	Fenômeno que consiste na movimentação vertical de uma massa gasosa localizada ou de um fluxo de gases devido à diferença de temperatura ou pressão com o meio.
Efeito de <i>Coriolis</i>	Fenômeno devido à rotação da Terra que produz uma aceleração nas massas de ar, variável em função do local em que se encontram (equador, trópicos, pólos, etc.). A força gerada desloca os ventos à direita no hemisfério norte, e à esquerda no hemisfério sul. (dicionário IBGE)
Efeito Estufa	Denominação dada ao aumento de temperatura superficial da terra, numa escala global, decorrente do acréscimo das concentrações atmosféricas de gases com a característica de serem fortes absorventes de energia, na faixa de radiação infravermelha, e, fracos absorvedores no espectro visível. Em geral o termo é associado ao dióxido de carbono.
Efluentes Gasosos	Termo impropriamente utilizado para designar emissões atmosféricas.
Elevação da Pluma	Altura da linha de centro da pluma assim que esta se torna paralela ao terreno.
Emissão Atmosférica	Descarga de matéria e/ou energia, no ar.
Estômatos	Poros de dimensões reduzidas presentes na superfície inferior das folhas, que se abrem e fecham, permitindo as trocas gasosas, entre a folha e a atmosfera (dicionário IBGE).
Estratosfera	Segunda camada da atmosfera que se estende desde a tropopausa até a estratopausa, cerca de 50 km acima do solo. Ao contrário do que acontece na troposfera, na estratosfera geralmente a temperatura aumenta com a altitude. Como a densidade do ar é muito menor, até mesmo uma absorção pequena de radiação solar pelos constituintes atmosféricos, notadamente o ozônio atmosférico, produz um grande aumento de temperatura. A estratosfera contém grande parte do ozônio atmosférico, e sua concentração máxima ocorre em torno de 25 km acima da superfície terrestre. Diferentemente da troposfera, a estratosfera contém pouco, ou nenhum vapor d'água. Mudanças sazonais marcantes são características da estratosfera e, geralmente, que os ventos na estratosfera estejam ligados às mudanças de temperatura e de circulação na troposfera (dicionário IBGE).
Frente Fria	Região de transição entre duas massas de ar, onde o ar

frio (polar) substitui o ar quente (tropical ou subtropical).

Frente Quente	Região de transição entre duas massas de ar onde o ar quente (tropical) substitui o ar frio (polar).
Fuligem	Aglomerção de partículas, predominantemente de carbono, impregnadas de compostos orgânicos, provenientes de combustão incompleta de matéria orgânica.
Fumaça	Aerossol constituído por partículas resultantes da combustão incompleta de materiais orgânicos, geralmente com diâmetros inferiores a 1µm.
Fumos	Aerossol constituído por partículas sólidas formadas por condensação ou reação química. Geralmente com diâmetros inferiores a 1µm.
Gás	Denominação a substâncias que, a 25°C e a 101,3 kPa (760 mm Hg), estão na sua fase gasosa.
Gradiente Térmico	Relação da variação da temperatura da atmosfera e função do aumento da altitude, normalmente negativo para decréscimo da temperatura. Quando a temperatura aumenta com a altitude, o gradiente é positivo.
Incinerção	Processo de queima de resíduos, principalmente sólidos e semi-sólidos, visando a sua redução de volume e minimizando seus efeitos sobre o meio ambiente.
Índice de Poluição do Ar	Indicador qualitativo ou quantitativo, definido segundo cada órgão de controle com a finalidade de informar sobre o nível de qualidade do ar.
Insolação	Tempo, medido em horas, que o sol permanece descoberto e atingindo a superfície terrestre.
Inversão Térmica	Fenômeno em que, a certa altitude, ocorre uma inversão algébrica do gradiente térmico da atmosfera (geralmente negativo).
Lenho	Conjunto de tecidos de sustentação, condução e reserva que constituem o xilema dos caules e raízes. (dicionário IBGE)
Lenticela	(Botânica) Excrescência de formato elíptico, circular ou alongado, preenchida por tecido frouxo, que se forma na superfície das raízes, troncos e ramos de muitas espécies de plantas e que permite a realização de trocas gasosas entre o vegetal e atmosfera. (dicionário IBGE)

Material Particulado	Termo genérico utilizado para definir qualquer material sólido ou líquido, cujas dimensões são menores que 1000µm de diâmetro.
Metas de Qualidade do Ar Ambiente	Concentração de poluentes que se acredita não causar danos à saúde, aos materiais, à fauna e à flora, não sendo prejudicial à segurança, ao uso e gozo de propriedade, à economia e ao bem-estar da comunidade.
Modelo Físico	Tipo de modelo que trata de simular os processos atmosféricos que afetam os poluentes, por meio de uma representação em escala reduzida do verdadeiro problema estabelecido pela poluição do ar.
Modelo Matemático	Tipo de modelo capaz de representar valores observados sobre poluição atmosférica, por meio de equações deduzidas a partir de hipóteses prefixadas no curso de estudos já realizados.
Monitoramento	Medição contínua e repetitiva da qualidade do ar.
Movimento Turbulento	Estado de escoamento de um fluido no qual as velocidades instantâneas exibem flutuações irregulares e aparentemente randômicas, de tal forma que, na prática, apenas propriedades estatísticas podem ser reconhecidas e sujeitas a uma análise.
Neblina	Aerossol constituído por partículas líquidas formadas por condensação.
Nebulosidade	Parâmetro observacional utilizado em meteorologia para indicar a porção da abóbada celeste interposta por todas as nuvens presentes no momento da observação. É expresso por uma fração proporcional à área encoberta com aproximação de oitavos.
Névoa	Aerossol constituído por partículas líquidas independentemente de sua origem e de seu tamanho.
Névoa Seca	Nome genérico dado aos litometeoros (materiais particulados secos em suspensão), quando a visibilidade horizontal é superior a 1000m e a umidade relativa inferior a 80%.
Névoa Úmida	Fenômeno meteorológico semelhante a um nevoeiro tênue, onde as partículas são mais dispersas e em geral menores, enquanto a visibilidade horizontal é superior a 1000m.
Nevoeiro	Fenômeno meteorológico caracterizado pela presença de hidrometeoros (partículas de água muito pequenas,

produzidas próximo à superfície terrestre), que reduzem a visibilidade horizontal na superfície da terra a menos de 1000m.

Padrão de Emissão	Valores de emissão atmosférica estabelecidos legalmente para fontes específicas.
Padrão de Qualidade do Ar ambiente	Qualidade do ar legalmente estabelecida para um poluente específico.
Partícula	Pequena massa discreta de matéria sólida ou líquida.
Pluma	Fluxo relativo à emissão atmosférica de uma fonte específica, como, por exemplo, uma chaminé.
Poeira	Aerossol constituído por partículas sólidas formadas por ruptura mecânica, geralmente com diâmetro maior que 1µm.
Poluente Atmosférico	Toda e qualquer forma de matéria e/ou energia que, segundo suas características, concentração e tempo de permanência no ar, possa causar ou venha a causar danos à saúde, aos materiais, à fauna e à flora e seja prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade, à economia e ao bem-estar da comunidade. O mesmo que contaminante atmosférico.
Poluente Primário	Aquele que atinge o receptor na forma em que foi emitido.
Poluente Secundário	Aquele resultante da interação entre dois ou mais poluentes primários entre si e/ou com os constituintes normais da atmosfera, com ou sem reação fotoquímica.
Poluição do Ar	Presença de um ou mais poluentes atmosféricos. O mesmo que poluição atmosférica.
Qualidade do Ar	Qualidade do ar próximo ao nível do solo, expressa como concentração de poluente durante certo período de tempo.
Sinergismo	Situação na qual a ação combinada de dois ou mais agentes químicos, atando em conjunto é maior que a soma da ação dos agentes, quando estes atuam de modo isolado. O inverso de antagonismo.
Smog	Termo da língua inglesa, de definição imprecisa, derivado dos termos fumaça (smoke) e nevoeiro (fog), que qualifica certos tipos de poluição atmosférica por aerossóis.
Smog fotoquímico	Denominação dada às condições da atmosfera quando esta apresenta visibilidade reduzida e coloração marrom,

devido à evolução de reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos reativos, produzindo compostos oxidantes.

Sotavento	Face de qualquer elemento geográfico que se encontra voltada para o lado oposto que sopra o vento. (dicionário IBGE)
Spray	Termo da língua inglesa de uso consagrado na definição de aerossol constituído por partículas líquidas formadas por ruptura mecânica.
Subsidência	Fenômeno meteorológico que caracteriza a descida de massa de ar que foi submetida a um afundamento generalizado.
Taxa de Emissão	Quantidade de matéria emitida na unidade de tempo, usualmente expressa em Kg/h.
Turbidez	Medida da redução da transparência. Em meteorologia, indica qualquer condição da atmosfera que resulte na redução de sua transparência à luz, excluindo-se a presença de nuvens.
Turbulência	Do ponto de vista meteorológico, é a movimentação do vento, de maneira extremamente irregular, com rápidas alterações de velocidade e direção, acompanhada de correntes ascendentes e descendentes. É o principal mecanismo de difusão de poluentes no ar.
Umidade	Conteúdo de vapor de água no ar. O mesmo que umidade absoluta.
Umidade Específica	Relação entre a massa de vapor de água presente e a massa de ar seco.
Umidade Relativa	Relação expressa percentualmente entre a pressão parcial do vapor de água e a sua pressão de saturação à mesma temperatura.
Vapor	Fase gasosa de matéria que coexiste a 25°C e a 101,3 kPa (760 mm Hg) com sua fase líquida ou sólida. É um gás com temperatura inferior à crítica.