



**Instituto de Botânica – IBt
Programa de Pós-graduação em
Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente
Curso de Capacitação de Monitores e Educadores**

**Poluentes Atmosféricos & Plantas Bioindicadoras
Andrea Nunes Vaz Pedroso**

São Paulo, 2007

Poluentes atmosféricos x Plantas bioindicadoras

Andrea Nunes Vaz Pedroso

Doutoranda, Pós-graduação em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente – andreanvpedroso@gmail.com

O ambiente e o homem

A atmosfera apresenta cerca de 500 km de extensão, sendo a região do planeta Terra que possui fundamental importância. Nela são encontrados elementos que protegem a vida, impedindo as grandes oscilações de temperatura, influenciando a distribuição de luz e calor, suprimindo os organismos com os gases fundamentais: dióxido de carbono (CO₂) e oxigênio (O₂). Ela é constituída por gases (nitrogênio – 78%, oxigênio – 21%, argônio – 0,07% e dióxido de carbono – 0,03%), vapor d'água, sais marinhos, microorganismos, grãos de pólen e esporos, propágulos, produtos voláteis das plantas e poluentes (Freedman 1995).

A atmosfera pode ser dividida esquematicamente em cinco regiões: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera (Figura 1). Destacaremos a troposfera, região onde vivemos e onde ocorrem os efeitos nocivos dos produtos das atividades antrópicas.



Fonte: www.comune.pisa.it/aziende-estenalizzazioni/images/terra.jpg

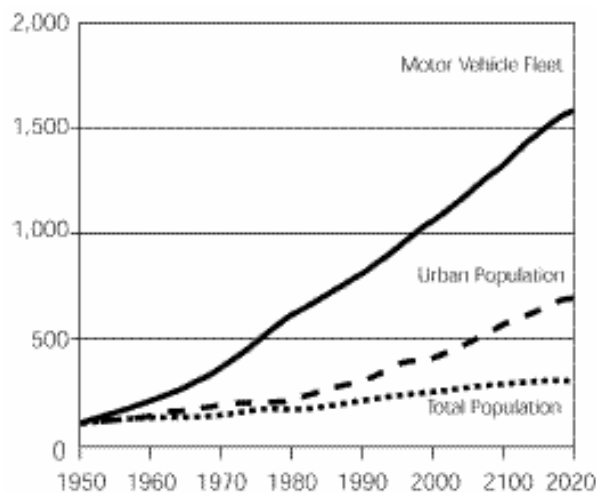
Figura 1. Regiões constituintes da atmosfera.

Poluentes atmosféricos

Nos últimos séculos o aumento e a concentração da população humana mundial nas grandes metrópoles (Figura 2) têm gerado efeitos positivos, como o progresso econômico e tecnológico (Freedman 1995). Entretanto, esses benefícios provocaram uma série de consequências ambientais desfavoráveis, que resultou na contaminação do ar por uma variedade de poluentes, originados de fontes estacionárias e móveis, principalmente a partir da queima de combustíveis fósseis (Figura 3) (Freedman 1995, Han & Naeher 2006).

Freedman (1995) define poluente atmosférico como qualquer substância adicionada à atmosfera em concentrações suficientemente altas para causar efeitos mensuráveis nos seres vivos e em materiais. Essa definição também está de acordo com a Resolução Conama nº3, de 28/06/1990 (Conama 1990), que considera 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 e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.



Fonte: Fenger (1999).

Figura 2. O aumento da população total mundial, da população urbana e do número de veículos (exceto motos e triciclos – UNEP/WHO 1992) desde 1950.

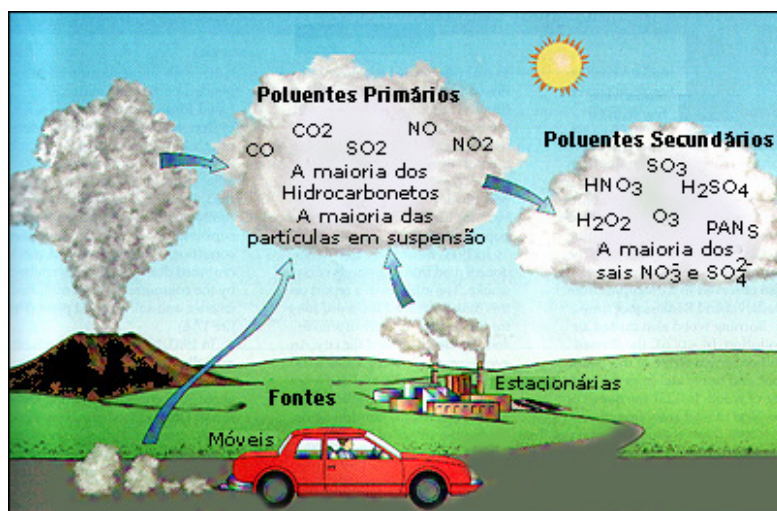
Classificação dos poluentes atmosféricos

Os poluentes podem ser divididos em primários e secundários (Figura 3). Os poluentes primários são aqueles liberados diretamente das fontes de emissão, como o dióxido de enxofre (SO_2), o sulfeto de hidrogênio (H_2S), os óxidos de nitrogênio (NO_x), a amônia (NH_3), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4). Os poluentes secundários são aqueles formados na atmosfera através de reações químicas entre os poluentes primários; se destacando o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), o ácido sulfúrico (H_2SO_4), o ácido nítrico (HNO_3), o trióxido de enxofre (SO_3), os nitratos (NO_3^-), os sulfatos (SO_4^{2-}), o ozônio (O_3) e o nitrato de peroxiacetila – PAN – ($\text{CH}_3 = \text{OO}_2\text{NO}_2$), sendo que os dois últimos estão entre os mais prejudiciais às pessoas e à vegetação (Freedman 1995) porque formam radicais livres (superóxidos, hidroxilas, dentre outros) que atacam os seres vivos.

Alguns desses poluentes, mais especificamente o SO_2 e o NO_2 , quando se difundem na atmosfera, podem reagir com a água e formar a chuva ácida, que causa corrosão aos materiais e danos à vegetação (Freedman 1995).

Os nitratos, produtos da dissociação do NO_x pela água, são considerados nutrientes, mas em excesso, ocasionam a eutrofização de corpos d' água (Freedman 1995).

Em adição a esses poluentes, há ainda hidrocarbonetos, compostos orgânicos voláteis (COVs), mercúrio (Hg), e material particulado (MP), que corresponde às partículas em suspensão com diâmetro menor que $50\mu\text{m}$. Estas partículas podem conter elementos tóxicos como o arsênico (As), o chumbo (Pb), o cobre (Cu) e o níquel (Ni) e também aerossóis emitidos pela combustão (Freedman 1995).



Fonte: www.brookscole.com

Figura 3. Classificação dos poluentes atmosféricos.

Agências de proteção ambiental

As agências de proteção ambiental definem valores limites para os poluentes que são utilizados como referência para avaliar a situação ambiental. Dentre as agências internacionais podem ser destacadas a US EPA-NAAQS (Environmental Protection Agency - National Ambient Air Quality Standards), localizada nos Estados Unidos da América e a WHO (World Health Organization) com sede em Geneve, Suíça (Tabela 1).

Em São Paulo, a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental) monitora, através de estações telemétricas, a situação dos poluentes nas regiões que compreendem a região Metropolitana de São Paulo, algumas cidades do interior do Estado (Campinas, Paulínia e Sorocaba) e Cubatão. Os valores dos limites seguem os sugeridos da OMS (Organização Mundial de Saúde).

Poluentes gasosos tóxicos às plantas

Em geral, os poluentes são absorvidos pelas plantas através dos estômatos, que são poros existentes na superfície das folhas que permitem as trocas gasosas entre a planta e o meio ambiente (Figura 4). Dentre todos os poluentes gasosos citados, destacamos alguns que são mais tóxicos às plantas (SO_2 , NO_x e O_3 troposférico). Na tabela 2 estão indicadas suas principais características, suas fontes, o tempo de vida e os riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

O SO_2 é considerado um dos poluentes mais tóxicos às plantas, podendo ser absorvido tanto pelas raízes quanto pelos estômatos (Freedman 1995). Quando absorvido pelos estômatos, o gás é dissolvido em água, resultando na formação de dois compostos, o sulfeto de hidrogênio e o sulfito, estes são fotooxidados a sulfato, um composto menos tóxico para a planta (Manning & Feder 1980). Na Região Metropolitana de São Paulo a emissão do SO_2 está controlada, apresentando níveis até oito vezes menores do que o permitido (Figura 5).

O NO_x é absorvido pelos estômatos e, no interior da folha pode reagir com a água formando o ácido nítrico ou nitroso, que são dissociados em nitrato e nitrito, acidificando os espaços internos da folha (Freedman 1995). O nitrato que está disponível no solo também pode ser absorvido pelas raízes. As concentrações mais elevadas de NO_x estão localizadas próximas às avenidas que possuem intenso tráfego automotivo, principalmente de veículos pesados (Figura 6).

O O_3 entra nas folhas pelos estômatos durante as trocas gasosas (Manning & Feder 1980), sendo um gás altamente reativo é rapidamente decomposto, formando o oxigênio molecular e os

peróxidos, que afetam primeiramente à membrana plasmática e, posteriormente, todas as biomembranas (Larcher 2000). Na região Metropolitana de São Paulo as concentrações médias anuais de O₃ atingem 30-45 ppb anual, o que já é considerado suficiente para causar efeitos tóxicos à vegetação. Contudo, algumas estações da CETESB registram valores muito acima destes como se vê na figura 7.

Além disso, a Cetesb registra o número de dias em que as concentrações de O₃ ultrapassam o limite padrão (80 ppb) e o estado de atenção (200 ppb). Observa-se que entre os anos de 2000 a 2005 houve uma diminuição na quantidade de dias (Figura 8). No ano de 2005 nota-se que na primavera e no verão o número de dias que ultrapassam o limite padrão e o estado de atenção aumenta (Figura 9), mostrando uma relação direta, uma vez que, neste período há maior incidência solar, o que favorece a produção do ozônio.

Tabela 1. Valores-padrão dos poluentes estabelecidos pelas agências ambientais CESTESB, NAAQS e WHO.

Poluente	Tempo de amostragem	CETESB	NAAQS	WHO
CO (monóxido de carbono)	1 h	35 ppm	35 ppm	26 ppm
NO ₂ (dióxido de nitrogênio)	8 h	9 ppm	9 ppm	8.7 ppm
	1 h	320 µg/m ³	-	200 µg/m ³
PM ₁₀ (material particulado)	Anual	100 µg/m ³	53 ppb	40 µg/m ³
	24 h	150 µg/m ³	150 µg/m ³	-
PM _{2,5} (material particulado)	Anual	50 µg/m ³	50 µg/m ³	-
	24 h	-	65 µg/m ³	-
O ₃ (ozônio troposférico)	Anual	15 µg/m ³	15 µg/m ³	-
	1 h	160 µg/m ³	120 ppb	-
SO ₂ (dióxido de enxofre)	8 h	120 µg/m ³	80 ppb	120 µg/m ³
	24 h	125 µg/m ³	140 ppb	125 µg/m ³
	Anual	80 µg/m ³	30 ppb	50 µg/m ³

- Valores não determinados.

ppm = partes por milhão.

ppb = partes por bilhão.

Fonte: Han & Naeher (2006) e Cetesb (2005).

Tabela 2. Principais poluentes gasosos tóxicos às plantas.

Poluente	Característica	Fonte		Tempo de vida	Riscos	
		Natural	Antrópica		À saúde humana	Ao meio ambiente
SO ₂ (dióxido de enxofre)	Gás incolor e com forte odor	Vulcões e incêndios florestais	Combustão de carvão, gás e petróleo	Longo e pode ser transportado à longas distâncias	Irritação das mucosas	Formação de chuva ácida
NO, NO ₂ (óxidos de nitrogênio)	NO: gás incolor, inodoro e insípido NO ₂ : gás marrom avermelhado	Denitrificação do nitrato em solo e água, fixação do N ₂ pela luz, incêndios florestais	Combustão de carvão, gás e petróleo	Curto	Irritação das membranas respiratórias	O NO ₂ pode levar à formação da chuva ácida
O ₃ troposférico (ozônio)	Gás azulado, com odor característico, altamente reativo e principal componente da névoa fotoquímica	Não é emitido diretamente à atmosfera	Produzido fotoquimicamente na presença da luz solar sobre os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis	Curto	Irritação e dano às membranas respiratórias e olhos	Injúrias nas plantas, perdas agrícolas

Fonte: Freedman (1995).

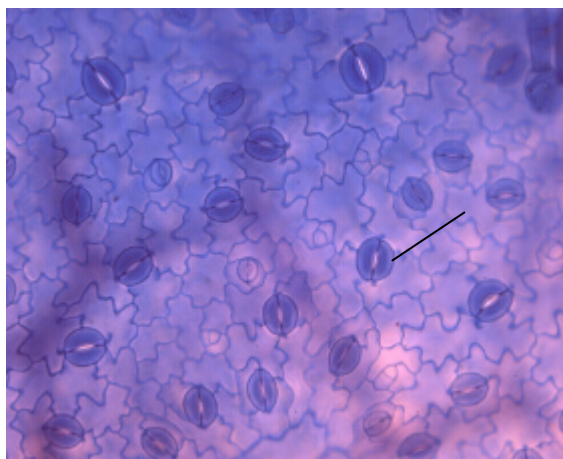
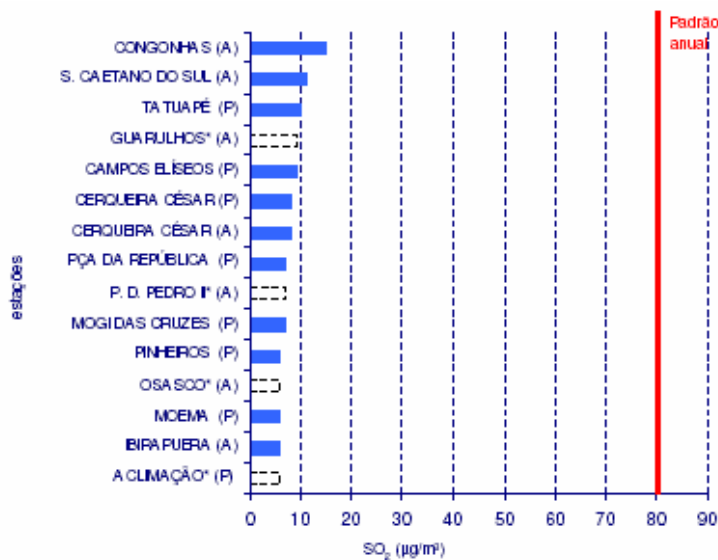


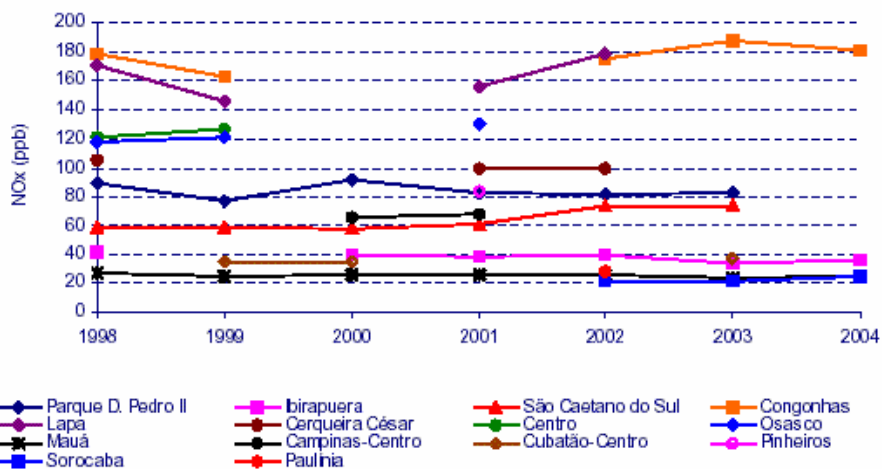
Foto: A.N.V. Pedroso

Figura 4. Fotomicrografias de secções paradérmicas da superfície inferior da folha de *Nicotiana tabacum* 'Bel-W3' destacando os estômatos (seta).



Fonte: Cetesb (2005).

Figura 5. Concentração de SO₂ na região Metropolitana de São Paulo.



Fonte: Cetesb (2005).

Figura 6. Evolução das concentrações médias de NO_x na Região Metropolitana de São Paulo, Cubatão e Interior.

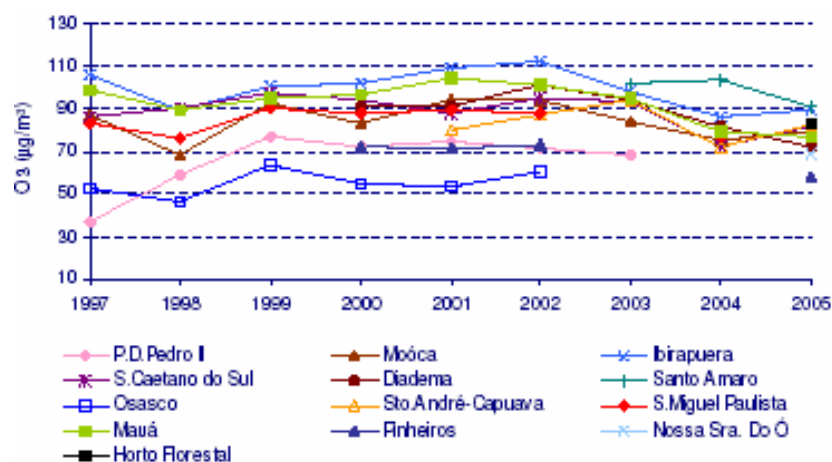


Figura 7. Evolução das concentrações de O_3 na região Metropolitana de São Paulo no período de 1997 a 2005.

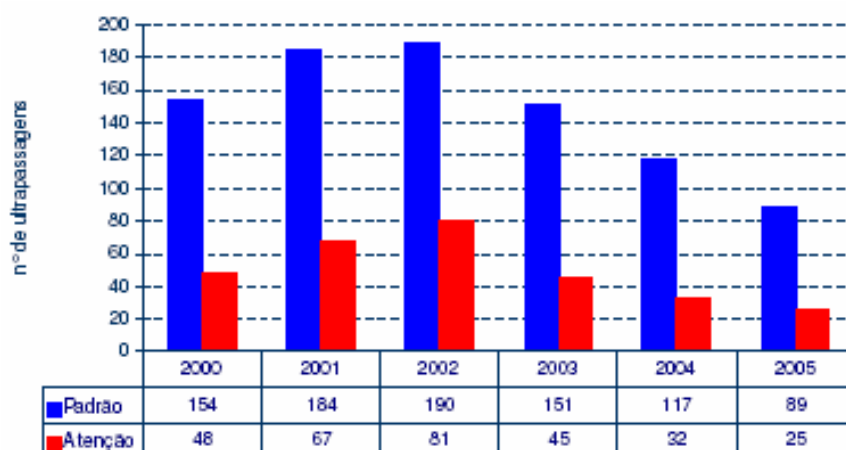


Figura 8. Número de ultrapassagens das concentrações médias de O_3 na Região Metropolitana de São Paulo no período de 2000 a 2005.

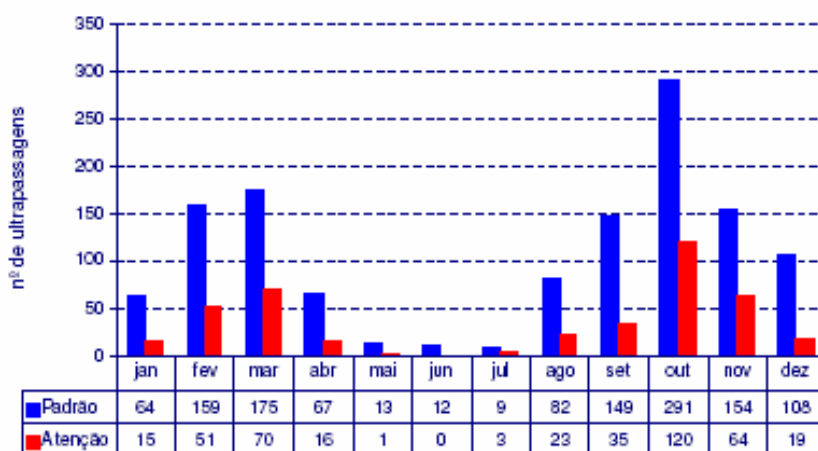
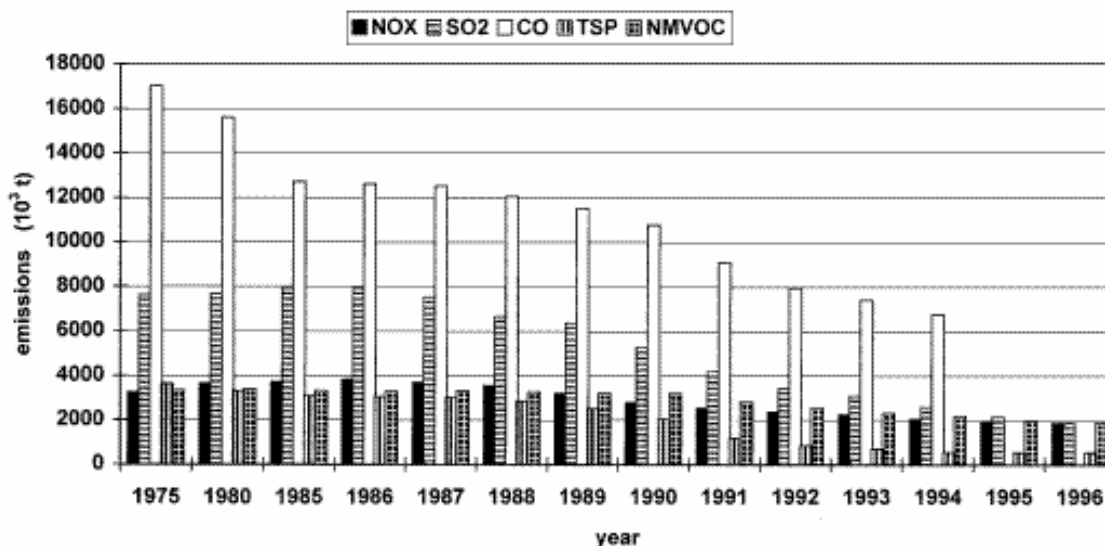


Figura 9. Número de ultrapassagens das concentrações médias de O_3 na Região Metropolitana de São Paulo no ano de 2005.

Ao contrário do que acontece em países em desenvolvimento, em países desenvolvidos há um maior controle na emissão de poluentes primários, como por exemplo na Alemanha, que desde a década de 70, controla a emissão de óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, partículas totais em suspensão e a maioria dos compostos orgânicos voláteis (Figura 10).



Fonte: Mayer (1999).

Figura 10. Emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), partículas totais em suspensão (TSP), e compostos orgânicos voláteis não metano (NMVOC) na Alemanha de 1975 até 1996.

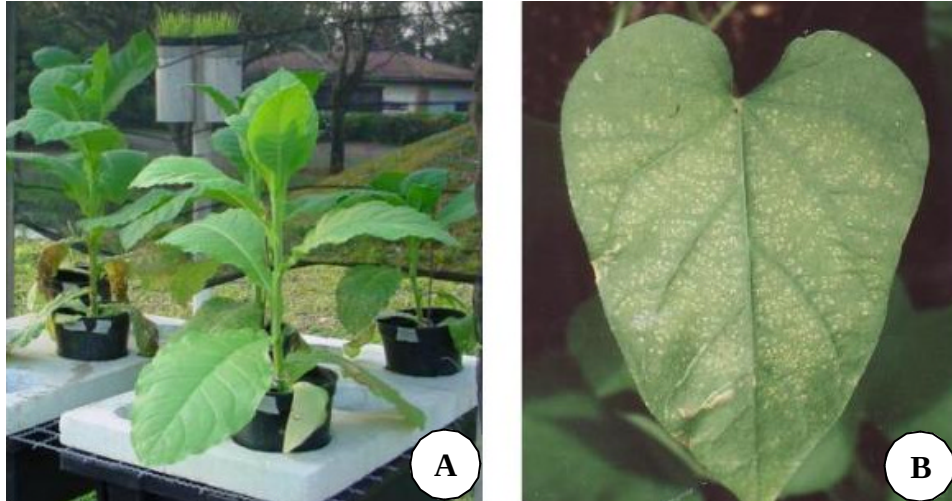
Bioindicadores e sua classificação

Na literatura, as alterações causadas pelos poluentes atmosféricos nas plantas mais citadas são: o aumento ou a diminuição na produção de algumas enzimas (Antonielli *et al.* 1997, Pasqualini *et al.* 2003), alterações genéticas (Guimarães *et al.* 2000, Klumpp *et al.* 2006), alterações quantitativas e qualitativas de metabólitos, aumento na concentração de hormônios vegetais relacionados ao estresse (Djak & Ormond 1982), aumento ou diminuição da respiração, distúrbios na fotossíntese (Heath 1994, Pääkkönen *et al.* 1998, Kolb & Matyssek 2001, Gerosa *et al.* 2003) e alterações na abertura e no fechamento estomático (Schaub *et al.* 2005). Conseqüentemente estas alterações levam à sintomas como clorose e necrose em tecidos e órgãos, que podem evoluir, levando o indivíduo à morte (Manning & Feder 1980, Larcher 2000).

Em decorrência destas alterações organismos ou comunidades de organismos que reagem de forma previsível e quantificável a perturbações ambientais, por meio de alterações nas suas funções vitais ou composição química, podem ser usados para avaliação da extensão das mudanças em seu ambiente, são denominados organismos bioindicadores (Arndt & Schweizer 1991).

De Temmerman *et al.* (2004) classificaram as plantas bioindicadoras em quatro grandes grupos:

1. Bioindicadoras – plantas que apresentam sintomas visíveis como necroses, cloroses e distúrbios fisiológicos, tais como redução no crescimento, redução no número e diâmetro das flores.



Fotos: M. Domingos.

Figura 11. A. *Nicotiana tabacum* 'Bel W3' e B. *Ipomea tricolor* apresentam sintomas visíveis e são consideradas bioindicadoras de O₃.

2. Biosensoras – plantas que reagem aos efeitos dos poluentes aéreos com efeitos não-visíveis, apresentando alterações moleculares, celulares, fisiológicas e bioquímicas.



Foto: www.provincia.bz.it/mutagenesi_i.htm

Foto: www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1001

Figura 12. A. *Tradescantia* clone 4430 e B. *Tradescantia pallida* 'Purpurea' apresentam quebras cromossômicas nas células-mãe de grãos de pólen.

3. Bioacumuladoras – plantas que também não apresentam sintomas visíveis, e são menos sensíveis aos poluentes aéreos, porém acumulam partículas de poeira e gases dentro dos seus tecidos.



Foto: www.garden.tversu.ru/collection_rus.htm



Foto: www.cetesb.br

Figura 13. A. *Brassica oleracea acephala* acumula em seus tecidos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. B. *Lolium multiflorum ssp italicum* acumula metais pesados e enxofre.

4. Biointegradoras – aquelas que indicam o impacto da poluição por intermédio do aparecimento, desaparecimento ou mudança na densidade da população ou até de comunidades.



Foto: www.gva.es/ceam/ICP-forests/index.htm

Figura 14. Em florestas de regiões temperadas *Rumex* sp são consideradas sensíveis ao ozônio apresentando sintomas foliares nas folhas da superfície superior.

Programas de biomonitoramento

As plantas bioindicadoras são utilizadas em programas de biomonitoramento, que é o método que faz uso da vida para identificar e/ou caracterizar mudanças ambientais induzidas pela ação humana (Arndt & Schweizer 1991).

Existem inúmeros programas de biomonitoramento no mundo, destacamos o Programa de Biomonitoramento do Ozônio realizado pelo USDA - Forest Service's/Forest Inventory and Analysis (FIA) (Figura 15) que monitora o impacto do ozônio troposférico em áreas florestais, para informações adicionais consulte www.fiaozone.net/



Figura 15. Logotipo do programa de biomonitoramento do ozônio (USDA-FIA).

O “Air Quality Biomonitoring Program on National Forests of Northwest Oregon and Southwest Washington” teve seu início na década de 90 empregando os líquens e os musgos para detectar e descrever o impacto dos poluentes aéreos na região, e determinar o potencial bioindicador dos mesmos, para mais informações consulte www.fs.fed.us/r6/aq/lichen/ (Figura 16).



Um outro exemplo de programa que obteve êxito criado em 1999 e encerrado em 2002, foi o EuroBionet - rede européia para a avaliação da qualidade do ar usando plantas bioindicadoras (www.eurobionet.com), envolveu 12 cidades em oito países europeus e que teve como principais objetivos: demonstrar ao público o impacto de poluentes atmosféricos em seres vivos; informar a população sobre a qualidade do ar na sua cidade; sensibilizar a população para com problemas ambientais; incentivar atividades dos próprios municípios, de escolas, grupos e indivíduos na área de proteção ambiental e melhoria da qualidade de vida e fornecer aos parceiros opções e possibilidades de utilizar a participação no projeto para o marketing municipal e como fator comercial. O programa foi um sucesso, uma vez que mostrou que as plantas bioindicadoras monitoram de forma muito eficiente a qualidade do ar, além de serem altamente indicadas em atividades de educação ambiental, e contribuem com uma comunicação mais eficiente entre os cidadãos e as autoridades municipais (EuroBionet 2004) (Figura 17).



Figura 17. Logotipo do Programa EuroBionet.

No Brasil ainda não existem programas de biomonitoramento nesses níveis, porém existem grupos de pesquisa que empregam plantas bioindicadoras. Dentre eles destacamos estudos com plantas bioindicadoras já consagradas ou com espécies nativas com tal potencial, visando, sob diferentes enfoques, avaliar o efeito da poluição atmosférica em algumas localidades do país, como Salvador (Lima *et al.* 2000, Klumpp *et al.* 2003), São Paulo (Domingos *et al.* 1998, Batalha *et al.* 1999, Ferreira *et al.* 2000, Guimarães *et al.* 2000, Alves *et al.* 2001, Domingos *et al.* 2002, Moraes *et al.* 2002, Alves *et al.* 2003, Alves 1995), Viçosa (Prado-Filho 1993, Chaves *et al.* 2002, Silva *et al.* 2005a, Silva *et al.* 2005b) e Curitiba (Alves 2001, Bujokas 2001, Maranhão *et al.* 2006).

Validação dos sintomas visíveis

No hemisfério norte existe uma tradição na pesquisa dos efeitos da poluição do ar nas plantas. Grupos especializados buscam confirmar que o ozônio é o principal responsável pelos sintomas foliares observados nas espécies nativas.

Um desses grupos é o International Co-operative Program on Assessment of Air Pollution Effects on Forests (ICP-Forests), que estabeleceu um protocolo comum para os grupos que trabalham com a avaliação da qualidade do ar (www.gva.es/ceam/ICP-forests).

O Centro de Estudos Ambientais do Mediterrâneo (CEAM), com sede na Espanha, participa do ICP-Forests. Para confirmar que os sintomas visíveis observados na vegetação são semelhantes àqueles provocados pelo ozônio, utilizam-se câmaras de topo aberto (Figura 18) com doses elevadas do poluente (Oredovinci *et al.* 2003). Logo após os sintomas visíveis serem validados (Figura 19), são criados manuais com guias fotográficos para que outras pessoas possam utilizá-los como instrumento de trabalho (Sánchez *et al.* 2003).



Foto: www.gva.es

Figura 18. Câmaras de topo aberto

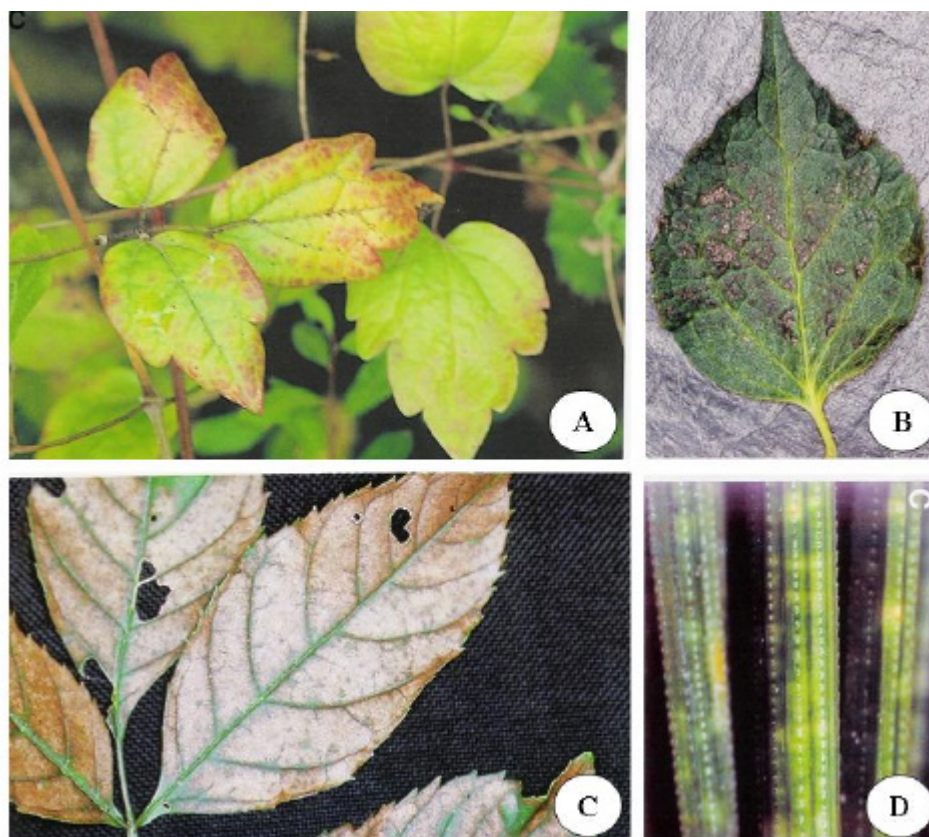
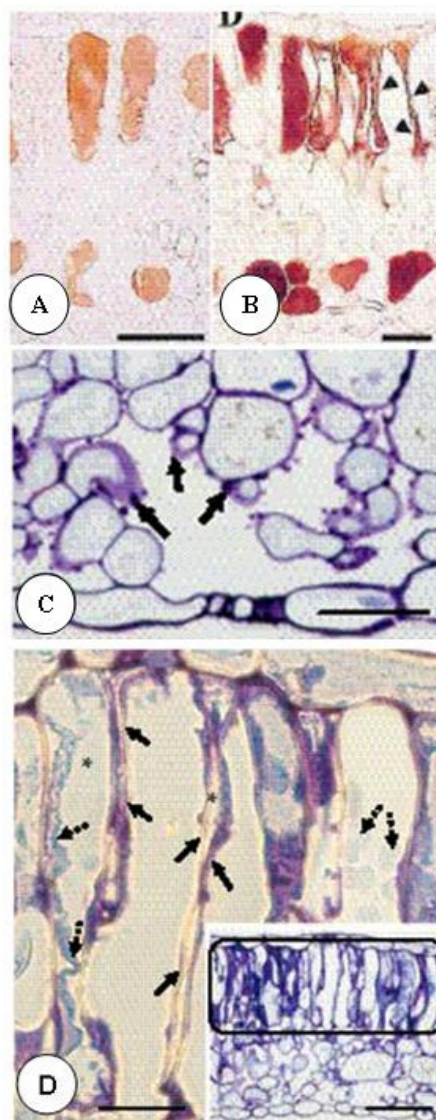


Foto: Sánchez *et al.* 2003

Figura 19. Diferentes tipos de sintomas visíveis nas folhas de plantas submetidas ao ozônio. A. *Clematis* ssp. - manchas rosadas na superfície superior. B. *Philadelphus coronarius* – necroses na superfície superior. C. *Fraxinus excelsior* – manchas bronzeadas na superfície inferior. D. *Pinus halepensis* – clorose na superfície superior.

Na Europa Central, o Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research (WSL), que também participa do ICP-Forests, utiliza os marcadores microscópicos para a confirmação do efeito do ozônio nas plantas. Como exemplos de marcadores podemos citar: protusões nas paredes celulares, ruptura das estruturas celulares, colapso das paredes celulares, degradação de organelas celulares, aumento de antioxidantes no conteúdo celular e acúmulo de compostos secundários (Figura 20) (Vollenweider *et al.* 2003, Günthardt-Goerg & Vollenweider 2007).



Fonte: Vollenweider *et al.* 2003, Günthardt-Goerg & Vollenweider 2007.

Figura 20. Fotomicrografias de secções transversais de folhas. A-B. *Robinia pseudoacacia*. A. Assintomática. B. Sintomática. B. Compostos de protoantocianidinas foram oxidados (coloração vermelha) nos vacúolos e colapso das paredes celulares do parênquima paliçádico (setas pretas). C-D. *Sambucus racemosa*. C. Protusões nas paredes celulares do parênquima lacunoso (setas). D. Ruptura das estruturas celulares (*), condensação do conteúdo celular e colapso das paredes celulares do parênquima paliçádico (setas). Barras: A-D = 25 μm , Detalhe D= 100 μm .

Perspectivas

Algumas medidas são necessárias para que haja a diminuição dos níveis de poluentes no ar a longo prazo. Dentre elas podem ser citadas: (i) maior rigor no controle das emissões, tanto móveis como estacionárias, por parte das agências de proteção ambiental; (ii) a melhoria e o incentivo do transporte público; (iii) revisão das concentrações limites estabelecidas com base em valores utilizados no hemisfério norte, adequando-as às realizações locais.

Além disso, são necessários mais estudos que avaliem os efeitos dos poluentes em ecossistemas e também a seleção e padronização de plantas nativas a serem usadas como bioindicadoras em associação com plantas bioindicadoras já consagradas no hemisfério norte. Estudos que utilizem simultaneamente plantas nativas e bioindicadoras clássicas poderão gerar informações importantes e possíveis cooperações entre programas internacionais.

Referências bibliográficas

- Alves, E.S. 1995. The effects of the pollution on wood of *Cecropia glaziovii* (Cecropiaceae). IAWA Journal 16: 69-80.
- Alves, V. 2001. Análise dos efeitos dos poluentes de fábrica de cimento em plantas bioindicadoras: *Nicotiana tabacum* L. (Solanaceae) e *Zinnia elegans* Cav. (Asteraceae). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Alves, E.S., Giusti, P.M., Domingos, M., Saldiva, P.H.N., Guimarães, E.T. & Lobo, D.J.A. 2001. Estudo anatômico foliar do clone híbrido 4430 de *Tradescantia*: alterações decorrentes da poluição aérea urbana. Revista Brasileira de Botânica 24: 567-576.
- Alves, E.S., Pedroso, A.N.V., Domingos, M., Guimarães, E.T. & Saldiva, P.H.N. 2003. Biomonitoramento do potencial mutagênico do ar em laboratórios e herbário do Instituto de Botânica por meio do bioensaio Trad-MCN. Hoehnea: 89-94.
- Antonielli, M. Pasqualini, S., Ederli, L., Batini, P., Moscatello, S. & Loreto, F. 1997. Physiological characteristics of tobacco cultivars with contrasting sensitivity to ozone. Environmental and Experimental Botany 38: 271-277.
- Arndt, U. & Schweizer, B. 1991. The use of bioindicators for environmental monitoring in tropical and subtropical countries. In: Signals from the environment. Ellenberg *et al.* (eds.). Biological monitoring. Vieweg, Eschborn. pp. 199-298.
- Batalha, J.R.F., Guimarães, E.T., Lobo, D.J.A., Lichtenfels, A.J.F.C., Deur, T., Carvalho, H.A., Alves, E.S., Domingos, M., Rodrigues, G.S. & Saldiva, P.H.N. 1999. Exploring the clastogenic effects of air pollutants in São Paulo (Brazil) using the *Tradescantia* micronuclei assay. Mutation Research 426: 229-232.
- Bujokas, W.M. 2001. O impacto da poeira de cimento em *Schinus terebinthifolius* Raddi. (Anacardiaceae). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Cetesb 2005. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2004. Série Relatórios.
- Chaves, A.C.F., Silva, E.A.M., Azevedo, A.A. Cano, M.A.O. & Matsuoka, M.K. 2002. Ação do flúor dissolvido em chuva simulada sobre a estrutura foliar de *Panicum maximum* Jacq. (Colônia) e *Chloris gayana* Kunth. (Capim – Rhodes) – Poacea. Acta Botânica Brasilica 16: 395-406.
- Conama. 1990. Resolução nº3, de 28/09/1990. Ministério do Meio Ambiente. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>
- De Temmerman, L., Bell, J.N.B., Garrec, J. P., Klumpp, A., Krause, G.H.M. & Tonneijck, A.E.G. 2004. Biomonitoring of air pollutants with plants – considerations for the future. In: Urban air pollution, bioindication and environmental awareness. A. Klumpp, W. Ansel. & G. Klumpp (eds). Cuvillier Verlag. Göttingen. pp. 337-373.
- Domingos, M., Klumpp, A., & Klumpp, G. 1998. Air pollution impact on the Atlantic forest in the Cubatão, region, SP, Brazil. Ciência & Cultura. 50: 230-236.
- Domingos, M., Bourette, C., Klumpp, A., Klumpp, G. & Forti, M.C. 2002. Impactos de poluição atmosférica sobre remanescentes florestais. In: Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, unidade de conservação que resiste à urbanização de São Paulo. D.C. Bicudo, M.C. Forti & C.E.M. Bicudo (orgs.). Editora Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo. pp. 221-249.
- Dijak, M. & Ormrod, D.P. 1982. Some physiological and anatomical characteristics associated with differential ozone sensitivity among pea cultivars. Environmental and Experimental Botany 22: 395-402.
- EuroBionet. 2004. European Network for the Assessment of Air Quality by the Use of Bioindicator Plants. Klumpp, A., Ansel, W. & Klumpp, G. (eds.). University of Hohenheim.
- Fenger, J. 1999. Urban air quality. Atmospheric Environment 33: 4877-4900.
- Ferreira, M.I., Petrenko, H., Lobo, D.J.A., Rodrigues, G.S., Moreira, A. & Saldiva, P.H.N. 2000. In situ monitoring of the mutagenic effects of the gaseous emissions of a solid waste incinerator

- in metropolitan São Paulo, Brazil, using the *Tradescantia* Stamen-Hair assay. *Journal of the Air & Waste Management Association* 50: 1852-1856.
- Freedman, B. 1995. *Environmental ecology. The ecological effects of pollution, disturbance and other stresses*. 2nd. Academic Press Inc. San Diego.
- Gerosa, G., Marzuoli, R., Bussotti, F., Pancrazi, M. & Ballarin-Denti, A. 2003. Ozone sensitivity of *Fagus sylvatica* and *Fraxinus excelsior* young trees in relation to leaf structure and foliar ozone uptake. *Environmental Pollution* 125: 91-98.
- Guimarães, E.T., Domingos, M., Alves, E.S., Caldini, N., Lobo, D.J.A., Lichtenfels, A.J.F.C., & Saldiva, P.H.N. 2000. Detection of the genotoxic of air pollutants in around the city of São Paulo (Brazil) with the *Tradescantia*-micronucleus (Trad-MCN) assay. *Environmental and Experimental Botany* 44: 1-8.
- Günthardt-Goerg, M.S. & Vollenweider, P. 2007. Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. *Environmental Pollution* 147: 467-488.
- Han, X. & Naeher, L.P. 2006. A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world. *Environmental International* 32: 106-120.
- Heath, R.L. 1994. Possible mechanisms for the inhibition of photosynthesis by ozone. *Photosynthesis Research* 39: 439-451.
- Klumpp, A., Hintemann, T., Lima, J.S. & Kandeler, E. 2003. Bioindication of air pollution effects near a copper smelter in Brazil using mango trees and soil microbiological properties. *Environmental Pollution* 126: 313-321.
- Klumpp, A., Ansel, W., Klumpp, G., Calatayud, V., Carrec, J.P., He, S., Peñuelas, J., Ribas, A., Ro-Poulsen, H., Rasmussen, S., Sanz, M.J. & Vergne, F. 2006. *Tradescantia* micronucleus test indicates genotoxic potential of traffic emissions in European cities. *Environmental Pollution* 139: 515-522.
- Kolb, T.E. & Matyssek, R. 2001. Limitations and perspective about scaling ozone impacts in trees. *Environmental Pollution* 115: 373-93.
- Larcher, W. 2000. *Ecofisiologia vegetal*. RiMa, São Carlos.
- Lima, J.F., Fernández, E.B. & Fawcett, W.N. 2000. *Mangifera indica* and *Phaseolus vulgaris* in the bioindication of air pollution in Bahia, Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 46: 275-78.
- Manning, W.J. & Feder, W.A. 1980. *Biomonitoring air pollutants with plants*. Applied Science Publishers Ltd., London.
- Maranho, L.T., Galvão, F., Preussler, K.H., Muniz, G.I.B. & Kuniyoshi, Y.S. 2006. Efeitos da poluição por petróleo na estrutura da folha de *Podocarpus lambertii* Klotzsch ex Endl., Podocarpaceae. *Acta Botânica Brasílica* 20 (3): 615-624.
- Mayer, H. 1999. Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*. 33: 4029-4037.
- Moraes, R.M., Klumpp, A., Furlan, C.M., Klumpp, G., Domingos, M., Rinaldi, M.C.S. & Modesto, I.F. 2002. Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil. *Environment International*. 28. 367-74.
- Oredonvici, T., Skelly, J.M., Ferdinand, J.A. Savage, J.E., Sanz, M.J. & Smith, G.C. 2003. Response of native plants of northeastern United States and southern Spain to ozone exposures; determining exposure/response relationships. *Environmental Pollution* 125: 31-40.
- Pääkkönen, E., Günthardt-Goerg, M.S. & Holopainen, T. 1998. Responses of leaf processes in a sensitivity birch (*Betula pendula* Roth) clone to ozone combined with drought. *Annals of Botany* 82: 49-59.
- Pasqualini, S., Piccioni, C., Reale, L., Ederli, L., Torre, G.D. & Ferranti, F. 2003. Ozone-induced cell death in tobacco cultivar Bel W3 plants. The role of programmed cell death in lesion formation. *Plant Physiology* 133: 1122-1134.
- Prado-Filho, J.F. 1993. Uso de bioindicadores para monitoramento do ar. *Ambiente*. 7 (1): 57-64.
- Sánchez, M.J.S., Peña, G.S., Lorente, V.C., Gallengo, M.T.M. & Albert, J.C. 2003. La contaminación atmosférica en los bosques: guía para la identificación por ozono. Editora Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid.

- Schaub, M., Skelly, J.M., Zhang, J.W., Ferdinand, J.A., Savage, J.E., Stevenson, R.E., Davis, D.D. & Steiner, K.C. 2005. Physiological and foliar symptoms response in the crowns of *Prunus serotina*, *Fraxinus Americana* and *Acer rubrum* canopy trees to ambient under forest conditions. *Environmental Pollution* 133: 553-567.
- Silva, L.C., Azevedo, A.A., Silva, E.A.M. & Oliva, M.A. 2005a. Effects of simulated acid rain on the growth of five species Brazilian tree species and anatomy of the most sensitivity species (*Joannesia principes*). *Australian Journal of Botany* 53: 789-96.
- Silva, L.C., Oliva, M.A., Azevedo, A.A., Araújo, J.M. & Aguiar, R.M. 2005b. Micromorphological and anatomical alterations caused by simulated acid rain in restinga plants: *Eugenia uniflora* and *Clusia hilariana*. *Water, Air, and Soil Pollution* 168: 129-43.
- Vollenweider, P. Ottige, M. & Günthardt-Goerg, M.S. 2003. Validation of leaf ozone symptoms in natural vegetation using microscopical methods. *Environmental Pollution* 124: 101-118.