

ADRIANA LUISA DA CUNHA

**Avaliação do crescimento de plantas jovens de
Caesalpinia echinata Lam. (pau-brasil)
expostas à poluição aérea em diferentes
regiões da cidade de São Paulo, SP**

**Dissertação apresentada ao
Instituto de Botânica da Secretaria
do Meio Ambiente, como parte dos
requisitos exigidos para obtenção
do título de MESTRE em
BIODIVERSIDADE VEGETAL E
MEIO AMBIENTE, na Área de
Concentração de Plantas
Vasculares em Análises
Ambientais.**

**SÃO PAULO
2006**

ADRIANA LUISA DA CUNHA

**Avaliação do crescimento de plantas jovens de
Caesalpinia echinata Lam. (pau-brasil)
expostas à poluição aérea em diferentes
regiões da cidade de São Paulo, SP**

**Dissertação apresentada ao
Instituto de Botânica da Secretaria
do Meio Ambiente, como parte dos
requisitos exigidos para obtenção
do título de MESTRE em
BIODIVERSIDADE VEGETAL E
MEIO AMBIENTE, na Área de
Concentração de Plantas
Vasculares em Análises
Ambientais.**

Orientadora: Dra. Regina Maria Moraes

Ficha Catalográfica elaborada pela Seção de Biblioteca do Instituto de Botânica

Cunha, Adriana Luisa da

C972a Avaliação do crescimento de plantas jovens de *Caesalpinia echinata* Lam. (pau-brasil) expostas à poluição aérea em diferentes regiões da cidade de São Paulo / SP
Adriana Luisa da Cunha -- São Paulo, 2006.
62 p. il.

Dissertação (mestrado)—Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2006
Bibliografia.

1. Leguminosae-Caesalpinoideae. 2. Crescimento. 3. Poluição atmosférica. I.
Título.

CDU 582.738

*Dedico este trabalho
aos meus queridos pais
José Luiz e Marina*

*“As árvores são poemas que a Terra escreve
para o céu. Nós a derrubamos e a
transformamos em papel para
registrar todo nosso vazio.”*

(Kahil Gilbram)

Agradecimentos

Agradeço em especial....

A Dra. Regina Maria Moraes, orientadora e mais do que isso mãe científica que ajudou e incentivou e, além disso, acreditou na minha capacidade para que eu pudesse chegar até o fim deste trabalho. Sou muito grata a você.

A Mirian Cilene, não somente pelas análises de laboratório, mas também por ajudar nos momentos mais estressantes deste trabalho e pela grande amizade. Obrigada Miriam.

A Dra. Marisa Domingos, pelo conhecimento que me proporcionou nestes longos anos como aluna.

A Dra. Rita de Cassia Leone Figueiredo Ribeiro, pela oportunidade de participar do projeto pau-brasil.

Aos pesquisadores da Seção de Ecologia, Dr. Eduardo Gomes e a Dra. Carla Ferraguti por me socorrerem com as análises de estatística.

A todos os professores das disciplinas do curso de Pós-Graduação do Instituto de Botânica, por contribuírem para o meu aprendizado como aluna de pós-graduação.

Ao Instituto de Botânica e o Curso de Pós-Graduação, pelo fornecimento de ferramentas chave para ampliar minha base científica.

Para funcionárias Valdenice, Amarílis, Marli, e Neuzete, por participarem das viagens de campo, na colaboração das análises de laboratório e também pela convivência destes anos.

Aos amigos que conquistei no botânico em toda esta jornada, Sil Sant, Lui, Ilka, Lílian, Kika, Caline, Lu Morandi, Sil Faustino, Tati, Beths, Bárbara, Lu mãe, Carla (fisiologia) Andréa maranhão, Sandra, Marina, Daniele, Mau, Bia (mãe do Artur e Alexandre), Ariane (mãe do Gustavo), Juliana, Alisson, Patricia, Yukio, Sabrina, Gisele, Marisia, Daniel, Andreia (anatomia), e aos amigos do Index Paulo, Moacir, Liliana, Cristina, Jubis japa, e Simone, por compartilharmos momentos alegres em todo este período de convívio.

Aos funcionários do Instituto de Botânica com carinho ao Bilú (produção de mudas), Tânia (Ecopefi), Jéferson (Biblioteca), Márcia (secretária da Pós) e Wilson (motorista) pela atenção e prestatividade.

Aos amigos Fábi, Charles e Kátia preta que sempre estiveram presentes em todos os momentos.

As minhas grandes amigas da Eco Sil Sant, Mari e a Jubis que muitas vezes cederam seus minutos de trabalho para um café escutando minhas angustias e felicidades.

Aos amigos das viagens de campo, Dra. Edenise e Denise, Eduardo, Renata, Carla, Sil Sant, Moacir, Neuzete, Marli, Amarílis, Pati, Paulo e Wilson por acompanhar e colaborar nas saídas de campo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo financiamento do projeto temático "*Caesalpinia echinata* Lam. (pau-brasil): da semente à madeira, um modelo para estudos de plantas arbóreas tropicais brasileiras".

Aos meus pais José Luiz e Marina e a minha irmã Luciana que são pessoas essenciais na minha vida. E ao Gê por compreender esses últimos meses de estresse.

A todas essas pessoas que estiveram presentes nesta longa trajetória agradeço do fundo do coração pelo carinho. Obrigada a todos vocês.

Índice

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	10
3. Material e Métodos.....	11
3.1. Áreas de estudo.....	11
3.2. Métodos de cultivo e exposição.....	14
3.3. Clima e qualidade do ar.....	16
3.4. Medidas de crescimento avaliadas.....	18
3.5. Análise estatística.....	19
4. Resultados.....	20
4.1. Clima e qualidade do ar.....	20
4.2. Medidas de crescimento.....	23
4.3. Análise conjunta das variáveis biológicas.....	32
4.4. Correlação de Pearson e teste.....	35
5. Discussão.....	38
6. Conclusão.....	45
7. Referências Bibliográficas.....	46
8. Resumo.....	59
9. Abstract.....	61

1. Introdução

Poluentes são definidos como qualquer substância adicionada ao ambiente em concentração suficientemente alta para causar efeito mensurável em seres vivos e não vivos (Freedman 1995). Os poluentes podem ser classificados em dois tipos: primários e secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente das fontes de poluição, como por exemplo, monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de nitrogênio (NO), material particulado (MP), fluoretos, hidrocarbonetos e metais. Já os poluentes secundários são aqueles formados pela interação entre poluentes primários ou entre estes e os constituintes naturais da atmosfera. Exemplos destes são: O₃ (ozônio), PAN (nitrato de peroxiacetila), NO₂ (dióxido de nitrogênio), H₂SO₄ (ácido sulfúrico), H₂NO₃ (ácido nítrico) e H₂O₂ (peróxido de hidrogênio) (Krupa 1997).

Os poluentes podem ter origem *natural*, como os liberados pela atividade vulcânica, por incêndios florestais, pela suspensão de partículas de sais marinhos, ou antrópicas (liberados pela atividade humana). As fontes de poluentes podem ser estacionárias, como indústrias e usinas termelétricas, ou móveis, como os veículos automotores (Krupa 1997).

Os principais poluentes aéreos presentes nos grandes centros urbanos, como a Região Metropolitana de São Paulo, são gases, como o SO₂, NO_x e O₃, e MP, que apresentam composição variada, incluindo metais pesados.

O SO₂ foi o primeiro poluente reconhecido como agente causador de injúrias à vegetação e plantas. Atualmente, sua emissão está controlada nos países desenvolvidos e ele representa riscos apenas nos países em desenvolvimento (Holland *et al.* 1995,

Emberson *et al.* 2001, Emberson *et al.* 2003). A principal fonte de SO₂ na cidade de São Paulo é a queima de combustíveis fósseis por indústrias e veículos (CETESB 2004).

O enxofre (S) é um nutriente essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Embora ele seja absorvido do solo pelas raízes na forma de sulfato (SO₄²⁻) e transportado para as folhas, pode também ser absorvido diretamente pelas folhas na forma de SO₂ atmosférico. O SO₂ presente na atmosfera entra nas folhas principalmente através dos estômatos, embora uma pequena proporção possa entrar via cutícula. Nas paredes das células vegetais, ele é primeiramente dissolvido na água, originando o íon sulfito, sendo então oxidado e transformado em sulfato (Larcher 2000). Em ambientes onde o SO₂ encontra-se em baixas concentrações, ele pode entrar no metabolismo do enxofre como se tivesse sido absorvido pelas raízes, atuando como nutriente para as plantas (Szabo *et al.* 2003, Zeiger 2002). Porém, em altas concentrações, o enxofre atmosférico pode provocar diversas alterações nas plantas entre as quais se destacam: alteração nos movimentos dos estômatos, inibição de várias etapas da fotossíntese, danos às membranas dos cloroplastos e redução no crescimento (Domingos *et al.* 2002). Vários estudos verificaram efeitos do SO₂ no crescimento das plantas, como redução em diâmetro basal e altura (Pandey & Agrawal 1994), alteração da razão raiz/parte aérea, (Lorenzini *et al.* 1995), redução do peso seco de folhas, caules e raízes (Klumpp *et al.* 1998) e redução da biomassa de caules e raízes (Szabo *et al.* 2003). Nem sempre o SO₂ causa redução do crescimento, Pensa *et al.* (2004) verificaram aumento no diâmetro basal e em altura, enquanto que Szabo *et al.* (2003) observaram que plantas de indivíduos jovens de *Tibouchina pulchra* apresentaram aumento no número de ramos e de folhas em área poluída por SO₂ em Cubatão.

Assim como o SO₂, o NO₂ atmosférico, quando absorvido em baixas concentrações pode ser metabolizado e apresentar um efeito nutricional, principalmente

em plantas crescendo sobre solos deficientes em nitrogênio (Mansfield 2003). A entrada de NO₂ nas plantas se dá através dos estômatos, embora uma parcela dele possa se difundir através da cutícula (Larcher 2000). Quando em contato com a água nas paredes celulares, são formados os ácidos nítrico e nitroso, os quais são dissociados e transformados em nitrato e nitrito. Esses íons ativam as enzimas nitrito e nitrato redutases estimulando a síntese de aminoácidos e proteínas. Embora os efeitos diretos do NO₂ nas plantas ainda sejam pouco conhecidos, sabe-se que quando a demanda nutricional por nitrogênio é excedida, há um custo metabólico resultante do combate à ação do nitrito, que é tóxico. Siegwolf *et al.* (2001) observaram redução da razão raiz/parte aérea em plantas expostas ao NO₂.

Embora sejam geralmente necessárias altas concentrações atmosféricas de NO₂ para o surgimento de danos em espécies vegetais, sabe-se atualmente que quando o NO₂ é encontrado na presença de SO₂ sua ação fitotóxica é muito aumentada (Mansfield 2003). Essa situação ocorre com frequência, pois o NO₂ raramente é encontrado sozinho, uma vez que ele e o SO₂ são originados da queima de combustíveis fósseis. Taylor & Ferris (1996) verificaram que NO₂ sozinho não causava redução da razão raiz/parte aérea, mas na presença de SO₂ isso acontecia. Kupcinkiene *et al.* (1997), também estudando a ação combinada de NO₂ + SO₂, verificaram que indivíduos de *Agrostis capillaris*, além de apresentarem injúrias foliares visíveis, apresentaram também redução significativa no peso seco de folhas, raízes e número de brotos em relação às plantas controle. Lyons *et al.* (1999), por outro lado, comentam que o NO₂, por possuir um elétron desemparelhado, age no apoplasto como um oxidante, causando danos às membranas. Essa situação caracterizada pela presença de vários poluentes misturados num determinado local e tempo é muito frequente em áreas urbanas próximas a vias de tráfego intenso e áreas industriais (Fangmeier *et al.* 2003).

O O₃ é um poluente secundário formado por reações fotoquímicas entre óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs) sendo que as concentrações mais elevadas ocorrem nos períodos de maior radiação que coincidem com a primavera e o verão (Bobbink 1998). O ozônio troposférico não só está presente na atmosfera dos grandes centros urbanos, como ele e seus precursores podem ser transportados a longas distâncias encontrando-se também em áreas rurais em concentrações fitotóxicas (Emberson *et al.* 2001, Emberson *et al.* 2003, Guerra *et al.* 2004). Além disso, como as concentrações de SO₂ foram muito reduzidas nos países desenvolvidos (Karnosky *et al.* 2003), o O₃ é o poluente que atualmente tem recebido a maior atenção por parte de pesquisadores e governos em grande parte do mundo.

O O₃ penetra na folha através dos estômatos durante os processos normais de trocas gasosas, sendo a cutícula impermeável a esse gás. No interior da folha o ozônio não se acumula, ele reage com os componentes da parede celular e da membrana plasmática produzindo espécies ativas de oxigênio (EAO) como radicais superóxidos (O₂⁻), radicais hidroxilas (OH[•]) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (Krupa & Manning 1988, Kangasjärvi *et al.* 1994). As EAO são moléculas reativas, que degradam lipídios, proteínas e ácidos nucleicos, gerando estresse oxidativo (Bray *et al.* 2000).

Os efeitos induzidos pelo ozônio em espécies arbóreas foram observados em vários estudos. Entre os mais frequentes pode-se citar, por exemplo, redução na taxa fotossintética, no conteúdo de clorofila e na massa seca de acículas (Shan *et al.* 1997), antecipação da senescência e redução da biomassa de raiz e parte aérea (Zheng *et al.* 2000), redução da área foliar, da biomassa de folhas e raízes e da taxa de crescimento relativo (Oksanen 2001), redução na biomassa total e de raízes e na razão raiz/parte aérea (Karlsson *et al.* 2003). Muitos estudos foram realizados com plantas de importância econômica como soja (Morgan *et al.* 2003), trigo (Ollerenshaw & Lyons

1999), alcachofra (Sanz *et al.* 2002a), maçã (Manning *et al.* 2004), beterraba, cenoura, salsa, pepino, tomate (Cooley & Manning 1987), batata, feijão, tomate, tabaco, milho, entre uma enorme lista de produtos agrícolas citados por Percy (2003) e Emberson *et al.* (2003). Embora não exista monitoramento das concentrações de ozônio nas áreas rurais brasileiras, certamente o O₃ deve ocorrer nelas em concentrações fitotóxicas, uma vez que as condições climáticas são favoráveis à formação do poluente e há emissão de seus precursores por veículos, indústrias e queimadas. Na cidade de São Paulo a concentração de O₃ frequentemente ultrapassa o padrão nacional de qualidade do ar para esse poluente (CETESB 2004), principalmente na região do Parque Municipal do Ibirapuera, onde Pina (2005) observou que a concentração do poluente alcança níveis fitotóxicos, induzindo a manifestação de sintomas foliares visíveis em *Psidium guajava* ‘Paluma’, espécie sensível ao O₃ (Furlan 2004).

Além dos poluentes gasosos, a atmosfera urbana é contaminada também por materiais particulados de composição variada, incluindo metais pesados. O material particulado ou aerossol, como também é chamado, é composto por partículas sólidas ou líquidas em suspensão num gás. Ele é proveniente da queima de combustíveis fósseis, da exaustão veicular, de processos industriais, da ressuspensão de poeiras, spray marinho e emissões biogênicas naturais como erupções vulcânicas, tempestades de areia, etc. Seu tamanho pode variar de 0,1 a 10 µm de diâmetro sendo constituído basicamente por sulfatos, nitratos, amônia, aerossol carbonáceo, sais marinhos, elementos do solo como alumínio, silício, titânio, cálcio e ferro, e metais pesados como prata, chumbo, zinco, molibdênio, cobre, níquel, cádmio e mercúrio (Castanho 1999, Farmer 2003, Bourotte *et al.* 2006). Alguns desses elementos são necessários às plantas como micronutrientes (cobre, zinco e ferro), porém em certas condições ambientais,

esses mesmos elementos podem ser acumulados em concentrações capazes de causar danos às plantas (Domingos *et al.* 2002).

A absorção de metais pesados pelas plantas geralmente se dá através das raízes, que os retiram do solo onde foram depositados por via seca ou úmida. Uma pequena porção pode entrar pelas folhas, mas essa entrada geralmente é muito limitada. O processo de incorporação de metais pelas raízes se dá pelo transporte ativo, contra um gradiente de concentração. Uma fração de metais disponíveis é absorvida na forma iônica por difusão passiva, através das membranas celulares das raízes onde é imobilizada no vacúolo. A seguir, os metais móveis atravessam as membranas das células xilemáticas para que possam ser transportados para várias partes da planta (Ormrod 1984, Chang *et al.* 1994, Domingos *et al.* 2002). Os metais pesados podem ser tóxicos às plantas devido, principalmente, à sua interferência no transporte eletrônico da respiração e da fotossíntese e da inativação de enzimas vitais e, como consequência do baixo nível energético, há uma diminuição da absorção dos nutrientes minerais e crescimento (Larcher 2000).

As respostas das espécies vegetais aos poluentes são determinadas por fatores bióticos e abióticos, além da natureza física e química do poluente ou mistura de poluentes. Entre os fatores bióticos destacam-se a espécie, variedade ou genótipo, o hábito, a idade, a fase de atividade e o vigor geral da planta. Entre os abióticos destacam-se temperatura, umidade, radiação solar, velocidade dos ventos e condições edáficas, sendo que alguns destes fatores podem variar em intensidade e duração em escalas de tempo que vão de horas a dias, estação ou anos. Além destes, a natureza química, a concentração e a velocidade de deposição do poluente irão determinar a resposta da planta (Larcher 2000, Schützendübel & Polle 2002, Manning 2003).

Os estudos dos efeitos dos poluentes nas espécies e comunidades vegetais são muito numerosos nos países desenvolvidos, mas o mesmo não ocorre nas regiões mais pobres do planeta, inclusive o Brasil. Embora alguns estudos isolados tenham sido realizados na década de 1980 (Struffaldi-De Vuono & Marzolla 1984), os principais estudos sobre os efeitos da poluição aérea na vegetação e plantas no Brasil iniciaram-se na região do complexo industrial de Cubatão, localizado na região da baixada Santista, sudeste do Brasil, São Paulo. Neste complexo estão situadas cerca de 230 fontes poluidoras entre indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas e de fertilizantes. Como resultado das altas emissões de vários poluentes e dispersão insuficiente, graves problemas foram verificados na floresta pluvial Atlântica na região (Leitão *et al.* 1993, Klumpp *et al.* 1994, 1996, 1998, Pompéia 1997, Domingos *et al.* 1998, Mayer *et al.* 2000a, b, entre outros).

Klumpp e colaboradores (1998), trabalhando com espécies arbóreas nativas como *Tibouchina pulchra* Cogn., *Cecropia glaziovii* Sneathl., *Miconia pyrifolia* Naudin, *Psidium guajava* L. e *Psidium cattleyanum* Sabine verificaram que indivíduos de *T. pulchra*, *C. glaziovii* e *M. pyrifolia*, expostos na área poluída principalmente por fluoretos, apresentaram incremento em altura menor do que os mantidos na área de referência. Por outro lado, as plantas de *P. guajava* e *P. cattleyanum* expostas em Paranapiacaba e Caminho do Mar apresentaram aumento em altura, mas redução no peso seco de folhas, caules e raízes.

Moraes *et al.* (2000) também verificaram redução em altura, diâmetro do caule, biomassa de folhas, ramos, raízes e razão raiz/parte aérea em *T. pulchra* expostas nas proximidades de indústrias petroquímicas. Em outro trabalho, os mesmos autores verificaram redução da razão raiz/parte aérea em indivíduos jovens de *P. guajava* e *P. cattleyanum* expostos perto de indústrias petroquímicas (Moraes *et al.* 2002). Klumpp *et*

al. (2000) também verificaram alterações na razão parte aérea/ raiz. Szabo *et al.* (2003), trabalhando com *T. pulchra*, verificaram que as plantas introduzidas em locais poluídos apresentaram padrões de crescimento bastante alterados, como redução da biomassa de caules e raízes e da razão raiz/parte aérea, porém, observaram aumento na produção de folhas e ramos. Furlan (2004), estudando *T. pulchra* e *P. guajava* expostas em área poluída principalmente por fluoretos, observou redução em altura, biomassa de folhas, caule e raiz em comparação com plantas da área de referência.

Todos os trabalhos citados acima foram realizados na região do complexo industrial de Cubatão. Estudos na cidade de São Paulo ainda são muito escassos. Entre eles podem ser destacados os realizados com o clone 4430 de *Tradescantia* ou com *Tradescantia pallida* var. *purpurea* (Guimarães *et al.* 2001, Guimarães *et al.* 2004) para avaliar o potencial mutagênico da poluição da cidade, verificar alterações na anatomia foliar (Alves *et al.* 2001) e verificar acúmulo foliar de elementos traço (Sumita *et al.* 2003). Além destes, Sant'Anna *et al.* (2004) e Sandrin *et al.* (2004) avaliaram o acúmulo de metais pesados e alterações em carboidratos solúveis em *Lolium multiflorum* ssp. *italicum* var. Lema. Até o presente momento, não foram realizados estudos abordando os efeitos dos poluentes aéreos no crescimento de espécies arbóreas nativas na cidade de São Paulo.

Em 2000, foi iniciado no Instituto de Botânica de São Paulo, mas contando com pesquisadores de diversas outras instituições, um projeto amplo com a espécie *Caesalpinia echinata* Lam., o pau-brasil. Nele, o pau-brasil foi investigado sob vários aspectos, incluindo a biologia e a conservação de suas sementes (Barbedo *et al.* 2002, Borges *et al.* 2005), a morfologia polínica (Corrêa 2003), a genética (Del Giudice *et al.* 2004), sua história, distribuição geográfica e conservação (Rocha 2004), características da madeira (Angyalossy *et al.* 2005), entre outros.

Caesalpinia echinata Lam., pau-brasil ou ibirapitanga como os índios a conheciam, pertence à família Fabaceae, sub-família Caesalpinoideae. É uma espécie arbórea, nativa do Domínio Atlântico Brasileiro, cuja área de ocorrência original ia do Rio de Janeiro até o Rio Grande do Norte. O pau-brasil é uma árvore frondosa, de belo porte, podendo atingir cerca de 30m de altura, com tronco e ramos aculeados. Suas flores são amarelas e perfumadas, e suas folhas apresentam um verde-escuro brilhante (Rocha 2004).

O pau-brasil foi explorado comercialmente desde o início do século XVI até 1875, por causa do corante presente em sua madeira, a brasileína. Os índios utilizavam o corante do pau-brasil para colorir penas, enquanto que na indústria européia, ele era utilizado para tingimento de tecidos, motivo que lhe conferia grande valor comercial (Rocha 2004). Devido ao extrativismo intenso pelo qual passou e também à redução de seu habitat, o pau-brasil é considerado atualmente uma espécie ameaçada de extinção.

Como o pau-brasil pode ser utilizado em paisagismo e na arborização urbana (Rocha 2004) por causa de suas qualidades ornamentais, idealizou-se a adoção dessa prática como uma estratégia para sua conservação. Para isso, entretanto, era necessário conhecer seu grau de suscetibilidade aos poluentes aéreos. Nesse sentido, foram realizados estudos buscando verificar a atividade do sistema de defesas antioxidantes (Bulbovas 2005) e possíveis alterações na estrutura caulinar (Tavares 2005) nos indivíduos expostos à poluição aérea nesse estudo.

2. Objetivos

O objetivo deste estudo foi avaliar o crescimento de indivíduos jovens de *Caesalpinia echinata* expostos aos poluentes aéreos de diferentes regiões da cidade de São Paulo, para verificar se ocorrem alterações em parâmetros de crescimento (altura, diâmetro do caule, número de folhas e de ramos) e na produção e alocação de biomassa (folhas, caules/ramos, parte aérea, raízes e total) entre as partes das plantas, visando com isso, contribuir para o estabelecimento do grau de suscetibilidade da espécie à poluição.

3. Material e métodos

3.1. Áreas de estudo

A cidade de São Paulo situa-se a cerca de 770 m sobre o nível do mar, nas coordenadas 23°30'S e 46°40'W, região sudeste do Brasil. O clima é caracterizado por apresentar inverno seco, durante os meses de junho a agosto, e verão úmido, de dezembro a março. Junto com as cidades do entorno, forma a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) que, com população superior a 17 milhões de habitantes, é o terceiro maior conglomerado urbano do mundo e a região mais industrializada do país. A região sofre todo tipo de problemas ambientais, entre os quais está a deterioração da qualidade do ar devido às emissões atmosféricas de cerca de 2000 indústrias e de uma frota de aproximadamente 7,8 milhões de veículos automotores, bastante antiga, pois cerca de 50% desta é anterior a 1993 (Bulbovas 2005, CETESB 2004).

A qualidade do ar na RMSP depende tanto das fontes de poluição como também das condições topográficas e meteorológicas. Por sua localização, a cidade de São Paulo sofre influências tanto da circulação terra-mar quanto do aquecimento continental. Nos meses de inverno a qualidade do ar é agravada porque as condições meteorológicas são desfavoráveis à dispersão de monóxido de carbono (CO), material particulado (MP) e dióxido de enxofre (SO₂). Por outro lado, nos meses de primavera e verão são registradas as maiores concentrações de ozônio, pois o aumento da luminosidade e da temperatura cria condições favoráveis à sua formação (CETESB 2002).

A escolha das áreas de estudo foi baseada no fato de que a concentração de poluentes aéreos em São Paulo apresenta variação espacial. Existem áreas submetidas a tipos e níveis de poluentes diferentes devido à suas localizações nas proximidades de

vias de trânsito veicular intenso, ou de áreas industriais, ou mesmo áreas verdes, onde o ozônio se acumula. Além disso, era necessário que a concentração de poluentes em cada área fosse conhecida, por isso, foram escolhidas áreas em que a Companhia Estadual de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB) realiza o monitoramento da qualidade do ar. As áreas escolhidas e suas principais características são apresentadas na Figura 1 e na Tabela 1.

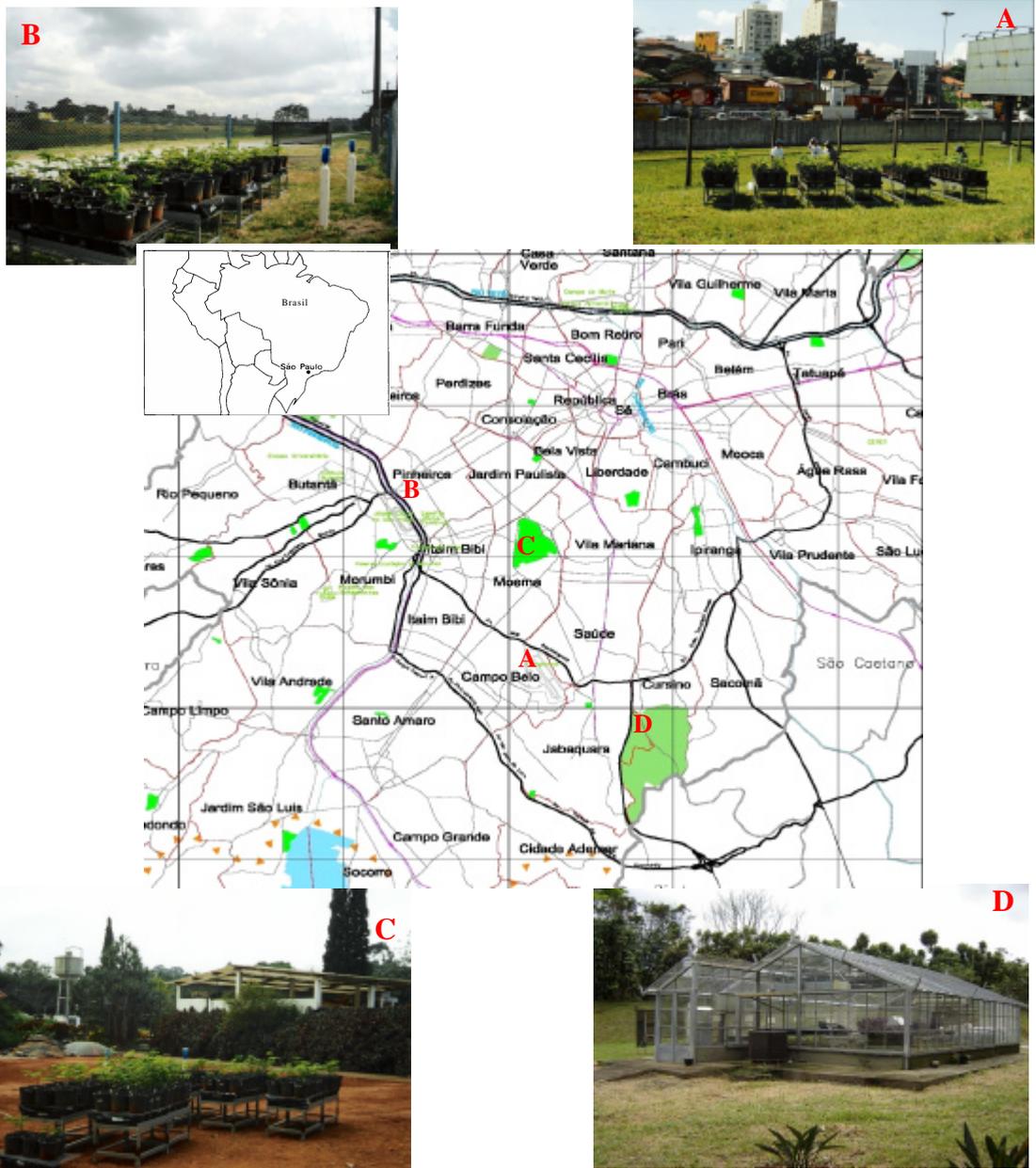


Figura 1. Mapa da região da cidade de São Paulo com a localização das áreas onde foram expostas as plantas de *Caesalpinia echinata*. A) Congonhas; B) Pinheiros; C) Ibirapuera e D) casa de vegetação. (Fonte: Bulbovas 2005)

Tabela 1. Características gerais das quatro áreas de estudo localizadas na cidade de São Paulo, SP.

	Congonhas	Pinheiros	Ibirapuera	casa de vegetação
Coordenadas	23° 36'S e 46° 39'W	23° 33'S e 46° 42'W	23° 35'S e 46° 39'W	23° 38'S e 46° 37'W
Altitude	760 m	665 m	690 m	805 m
Localização	Aeroporto de Congonhas	Projeto Pomar	Viveiro Manequinho Lopes	Instituto de Botânica de São Paulo
Principais poluentes	MP ₁₀ , CO, NO _x e SO ₂	MP ₁₀ , NO _x e SO ₂	O ₃	ar filtrado

3.2. Métodos de cultivo e exposição das mudas

Plantas jovens de *Caesalpinia echinata* Lam. foram obtidas a partir da germinação de sementes coletadas em arboreto da espécie existente na Reserva Biológica e Estação Experimental de Mogi Guaçu. As sementes germinaram em tubetes com substrato Plantmax do tipo hortaliça (Eucatex) e foram transplantadas para vasos plásticos de 6L com o mesmo substrato, ao qual se acrescentou adubo encapsulado Osmocote N:P:K (15:10:10). As plantas também receberam aplicações semanais alternadas de adubo de enraizamento N:P:K (9:45:15) e de adubo foliar N:P:K (30:10:10). Em março de 2002, um grupo de 520 plantas com aproximadamente 24 cm de altura e 6 folhas e com idade de 1 ano, foi trazido para uma casa de vegetação com ar filtrado no Instituto de Botânica, na qual permaneceu cerca de um mês para aclimação (Figura 2).



Figura 2. Grupo de plantas jovens de *Caesalpinia echinata* que permaneceram durante um mês para aclimação sob ar filtrado em casa de vegetação.

As plantas foram irrigadas por capilaridade em um sistema adaptado do proposto por Arndt & Schweizer (1991). Cordas de náilon foram inseridas na base dos vasos sendo que uma extremidade ficava em contato com as raízes e a outra, mergulhada em reservatórios de água (caixas de polietileno com 40 cm de largura, 70 cm de comprimento e 20 cm de profundidade) (Figura 3A e B). Sobre as caixas foram colocadas telas de arame galvanizado e sobre estas, folhas de plástico preto. Os vasos ficavam apoiados sobre a tela. Os barbantes foram inseridos em furos feitos no plástico preto e mergulhados na água. Esse plástico foi usado para evitar a propagação de algas e de larvas de vetores de doenças. As caixas foram colocadas sobre mesas com altura de 70 cm. Durante o experimento, o mesmo adubo encapsulado foi adicionado ao solo a cada seis meses e uma alíquota de 100 ml de solução preparada com adubo 10:30:20 foi aplicada mensalmente (Bulbovas 2005).

Após o período de aclimação, foram organizados quatro lotes de 130 plantas. Um deles permaneceu na casa de vegetação, em condições ambientais controladas, no Instituto de Botânica, e os três lotes restantes foram distribuídos nos locais descritos na tabela 1.

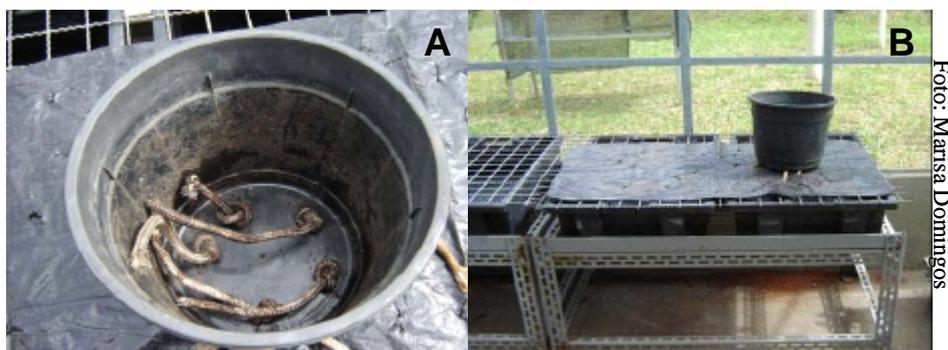


Figura 3. Sistema de irrigação. **A)** Cordas de náilon inseridas na base do vaso. **B)** Vaso sobre folhas plásticas e tela de arame, cordas de náilon inseridas nas caixas.

3.3. Clima e qualidade do ar

Em cada uma das áreas de estudo foram instalados pluviômetros e termohigrógrafos. O volume acumulado de precipitação foi medido semanalmente. A irradiância foi medida uma vez por semana com radiômetro portátil (LI-185B, LI-COR, USA). Os termohigrógrafos fizeram registros horários da temperatura e umidade relativa, que foram utilizados para o cálculo das médias e máximas diárias.

As áreas de estudo escolhidas para a realização do experimento localizam-se próximas a estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB. A CETESB mede em diversas regiões da cidade de São Paulo os seguintes poluentes: MP₁₀ (material particulado com diâmetro inferior a 10 µm), MP_{2,5} (material particulado com diâmetro inferior a 2,5 µm), FMC (fumaça), PTS (partículas totais em suspensão), SO₂ (dióxido de enxofre), NO (monóxido de nitrogênio), NO₂ (dióxido de nitrogênio), NO_x

(óxido de nitrogênio), CO (monóxido de carbono), O₃ (ozônio), CH₄ (metano), HCNM (hidrocarbonetos totais menos metano).

Estas estações medem os poluentes que constituem os maiores problemas em cada local, ou seja, aqueles que geralmente se encontram nessas áreas em concentrações que podem alcançar níveis tóxicos à saúde humana. Por isso, geralmente, as estações monitoram somente alguns poluentes. Assim, em Congonhas são medidos MP₁₀, SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO; em Pinheiros são medidos MP₁₀, MP_{2,5}, FMC, PTS, SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO, O₃ e no Ibirapuera, MP₁₀, MP_{2,5}, FMC, PTS, SO₂, NO, NO₂, NO_x, CO, O₃. Foram calculadas as concentrações médias diárias, médias do período de estudo e anotadas as concentrações máximas de cada poluente. Foi também calculada a AOT40 (*accumulated exposure over a threshold of 40 ppb* – exposição horária acumulada de O₃ acima de 40 ppb). Este índice é obtido somando-se todos os valores horários que excedem 40ppb medidos durante o período do dia em que há luz (CETESB 2004). A AOT40 foi desenvolvida na Europa (Fuhrer *et al.* 1997) e tem como objetivo detectar os riscos à vegetação causados pelo O₃. Ela foi utilizada aqui apenas em termos comparativos, uma vez que não existe um índice similar desenvolvido para espécies de regiões tropicais.

Na área de referência (casa de vegetação) a filtragem do ar foi feita, através de filtros de lã de vidro e papel, que retinham partículas grossas e finas, respectivamente, e filtros de carvão ativado impregnado com permanganato de potássio, que retinham gases (O₃, SO₂, NO_x e PAN). Semanalmente foram realizadas medidas descontínuas da concentração de partículas inaláveis (MP₁₀ – partículas menores que 10 µm) segundo ABNT (1997) e a concentração dos gases O₃ (Lodge, 1989), SO₂ (ABNT, 1993) e NO₂ (Saltzman, 1960) através de um amostrador de grande volume de ar (AGV) e um amostrador de pequeno volume de ar (APV Trigás), ambos da marca Energética.

3.4. Medidas de crescimento avaliadas

Foram realizadas medidas iniciais de altura (do solo até a gema apical), diâmetro do caule à altura do solo, número de folhas e de ramos em todas as plantas, antes destas serem transportadas para os locais de estudo. Em um lote adicional de 15 plantas, além dessas medidas, foram determinadas também a massa da matéria seca de folhas, caules, raízes e planta inteira.

O experimento foi implantado em abril de 2002. As coletas de dados ocorreram em Jul/02, Out/02, Jan/03, Abr/03 e Jun/03. Nessas ocasiões foram realizadas, em todas as plantas, medidas de altura, diâmetro, número de folhas e de ramos. Posteriormente, calculou-se o incremento relativo referente a cada um desses parâmetros (incremento relativo = [(média final – média inicial) / média inicial x 100].

As medidas de massa de matéria seca foram feitas em 15 plantas retiradas de cada local em cada coleta. A escolha das plantas se deu por sorteio. No laboratório, as plantas foram separadas em folíolos, pecíolos, caules + ramos e raízes e levadas para a estufa a cerca de 70 °C, onde permaneceram até que a massa seca fosse obtida. A massa de cada fração foi determinada em balança de precisão. A seguir foi calculada a razão raiz:parte aérea (massa de matéria seca da raiz:massa de matéria seca da parte aérea), a razão número de folhas:massa de matéria seca de folhas e a taxa de crescimento relativo: $TCR = [(Ln_2 - Ln_1) / t_2 - t_1]$: onde Ln_2 e Ln_1 = logaritmo natural da massa de matéria seca total final – logaritmo da massa de matéria seca total inicial; $t_2 - t_1$ = número de dias ($mg \cdot mg^{-1} \cdot dia^{-1}$) (Benincasa 1988).

3.5. Análise estatística

Os resultados obtidos em cada local num mesmo período foram comparados por meio de Análise de Variância (ANOVA one-way). Quando foram identificadas diferenças, estas foram discriminadas com a utilização de teste de comparações múltiplas de Student-Newman-Keuls ($p < 0,05$).

Para avaliação conjunta dos dados foi utilizada análise multivariada - Análise de Componentes Principais (ACP). A ACP foi realizada somente para a análise dos dados biológicos, sendo retirados os valores “outliers” através do programa MINITAB (versão 13.1). Utilizou-se uma matriz de correlação com dados transformados pela amplitude da variação [ranging: $(x - x_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$].

4. Resultados

4.1 Clima e qualidade do ar

Na figura 4 são apresentados os resultados referentes às condições climáticas durante o período de estudo, nas quatro áreas em que as plantas jovens de *C. echinata* foram expostas. Elas foram razoavelmente semelhantes, principalmente quanto à temperatura. A irradiância foi um pouco menor na casa de vegetação.

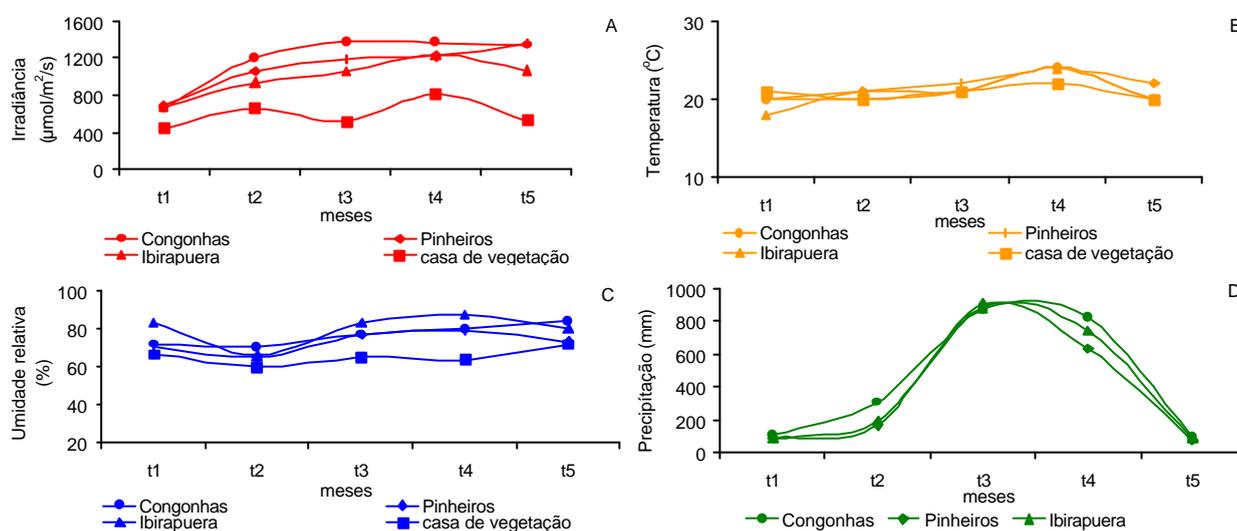


Figura 4 Parâmetros climáticos verificados nas quatro áreas de estudo ao longo dos 15 meses de exposição. Médias trimestrais de **a)** irradiância ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), **b)** temperatura ($^{\circ}\text{C}$), **c)** umidade relativa (%) e **d)** volume de chuva acumulado no trimestre (mm). **T1**: Abr.-Jul./02; **T2**: Jul.-Out./02; **T3**: Out./02-Jan./03; **T4**: Jan.-Abr./03; **T5**: Abr.-Jul./03.

Os dados de qualidade do ar durante o período de estudo estão apresentados na tabela 2. Em Congonhas foram medidas as maiores concentrações máximas horárias e também as maiores médias de MP_{10} , SO_2 e NO_2 , enquanto que a região do Ibirapuera apresentou os maiores níveis de O_3 . Os níveis de poluição aérea em Pinheiros foram intermediários aos das demais áreas. O sistema de filtragem do ar na casa de vegetação foi bastante eficiente, pois esta apresentou concentrações muito baixas ou não detectáveis de todos os poluentes analisados.

Tabela 2 Médias trimestrais das concentrações horárias de material particulado inalável (MP₁₀), ozônio (O₃), dióxido de enxofre e de nitrogênio (SO₂ e NO₂) e AOT40 (exposição horária acumulada de O₃ acima de 40 ppb) em cada uma das áreas de estudo ao longo dos 15 meses de exposição.

	meses	casa de vegetação	Congonhas	Pinheiros	Ibirapuera
MP₁₀ (µg/m³) (máxima horária)	T1		69,3 (796)	56,0 (254)	49,3 (311)
	T2	14,79 (20,16) [#]	88,0 (374)	66,6 (317)	49,0 (196)
	T3		75,7 (281)	43,5 (470)	28,8 (188)
	T4	10,40 (19,64) [#]	38,2 (184)	43,2 (329)	36,3 (653)
	T5	12,47 (20,88) [#]	56,6 (246)	61,1 (251)	65,6 (474)
O₃ (mg/m³) (máxima horária) ✓ AOT40 (ppb.h)	T1		*	56,4 (117) ✓ 136	100,0 (252) ✓ 3744
	T2	2,89 (5,6) [#]	*	81,3 (244) ✓ 2566	120,3 (326) ✓ 8595
	T3		*	81,0 (221) ✓ 2296	123,0 (333) ✓ 9175
	T4	2,62 (8,07) [#]	*	67,2 (236) ✓ 1741	106,5 (279) ✓ 7433
	T5	2,96 (6,52) [#]	*	57,5 (158) ✓ 374	88,1 (210) ✓ 2209
SO₂ (mg/m³) (máxima horária)	T1		22,3 (126)	*	8,9 (103)
	T2	< nd [#]	22,1 (79)	*	9,5 (62)
	T3		18,1 (114)	*	4,1 (72)
	T4	< nd [#]	15,2 (98)	*	4,9 (105)
	T5	< nd [#]	20,1 (90)	*	7,2 (44)
NO₂ (mg/m³) (máxima horária)	T1	0,003 (0,004) [#]	88,5 (339)	*	43,3 (253)
	T2		95,5 (310)	*	45,2 (202)
	T3		87,0 (291)	*	28,9 (159)
	T4	5,97 (16,19) [#]	77,0 (251)	*	30,0 (143)
	T5	8,25 (23,31) [#]	79,0 (275)	*	35,2 (203)

T1: Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Abr.-Jul./03.

* Dado não disponível; [#] Medidas descontínuas; nd- nível de detecção

✓ AOT40: Exposição acumulada acima do limite de 40 ppb;

4.2 Medidas de crescimento

Na figura 5 estão apresentados os dados de altura média e incremento relativo médio em altura das plantas jovens de *Caesalpinia echinata* expostas nas áreas de estudo ao longo dos 15 meses de exposição (Tabela 3). As médias de altura das plantas de todas as áreas não diferiram até os 3 meses de exposição. A partir daí, as plantas mantidas na casa de vegetação apresentaram sempre alturas maiores do que as demais (Figura 5A). O incremento em altura não ocorreu da mesma maneira nas plantas de todas as áreas ao longo do experimento. As plantas da casa de vegetação apresentaram incrementos sucessivamente maiores até os 12 meses de exposição, enquanto nas outras áreas, os incrementos variaram a cada período, tendo os menores valores ocorridos aos 6 meses (Figura 5B). Aos 15 meses, o incremento em altura foi reduzido nas plantas de todas as áreas, quando comparados ao verificado aos 12 meses.

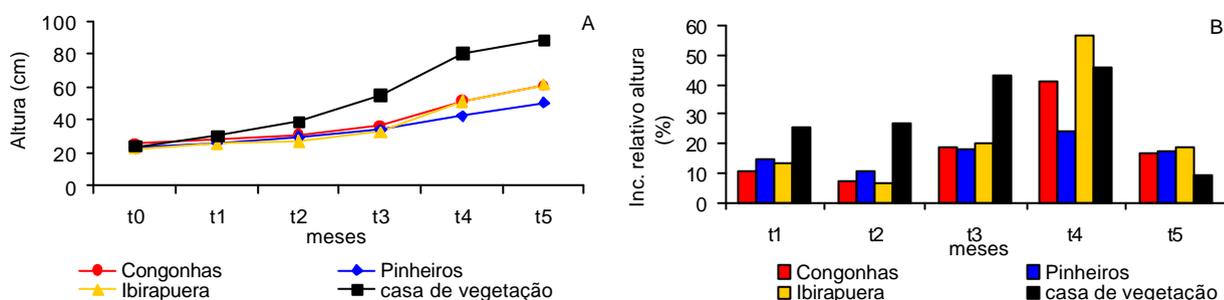


Figura 5. Altura média (A) e incremento relativo em altura (B) em plantas jovens de *C. echinata* expostas nas áreas de estudo, durante o período de quinze meses. **T0:** Mar./02; **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03.

Tabela 3. Valores de altura, diâmetro, número de folhas e número de ramos (média \pm (m) desvio padrão (dp); n=15) de plantas jovens de *Caesalpinia. echinata* expostas à poluição aérea de diferentes regiões da cidade de São Paulo, SP, durante o período de quinze meses de estudo. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si ($P < 0,05$). **T0:** Mar./02; **T1:** Abr. -Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Abr.-Jul./03.

Parâmetro	Área	T0		T1		T2		T3		T4		T5	
		m	dp	m	dp	m	dp	m	dp	m	dp	m	dp
Altura (cm)	Cong.	25,94	a 6,83	28,64	a 8,12	30,72	b 11,11	36,47	b 14,36	51,52	b 21,61	60,29	b 18,34
	Pinh.	22,94	a 4,30	26,33	a 5,32	29,13	b 7,87	34,43	b 10,78	42,83	b 14,77	50,33	b 20,36
	Ibirap.	22,73	a 5,12	25,71	a 6,96	27,41	b 8,39	32,88	b 11,07	51,54	b 21,86	61,47	b 30,72
	c. veg.	24,21	a 5,52	30,41	a 8,71	38,67	a 12,81	55,27	a 20,66	80,51	a 35,99	88,19	a 46,69
Diâmetro (mm)	Cong.	5,43	a 0,78	5,95	a 1,04	6,38	a 1,58	7,56	a 1,86	9,08	b 2,17	10,11	b 2,45
	Pinh.	5,07	a 0,66	5,64	a 0,82	5,89	b 1,10	6,12	b 1,40	8,54	b 2,15	9,53	b 2,27
	Ibirap.	5,04	a 0,92	5,66	a 0,98	5,76	b 1,09	6,71	b 1,40	9,44	a 2,15	10,57	a 2,88
	c. veg.	5,05	a 0,74	5,59	a 0,93	6,04	b 1,20	6,10	b 1,67	7,85	b 2,23	8,56	b 2,93
Número de folhas	Cong.	7,14	a 2,71	5,32	a 2,63	6,00	a 2,64	11,41	a 5,76	17,45	b 5,17	23,67	a 6,88
	Pinh.	6,55	a 2,20	5,50	a 2,48	7,86	a 4,60	11,73	a 4,32	20,23	b 7,81	21,50	a 7,40
	Ibirap.	6,48	a 3,92	4,31	a 2,89	4,90	a 3,10	9,17	a 4,95	21,97	b 8,66	22,53	a 11,03
	c. veg.	6,24	a 2,09	4,10	a 1,96	4,84	a 2,05	8,10	a 3,30	13,51	a 6,84	19,75	a 13,30
Número de ramos	Cong.	1,18	a 0,51	1,31	a 0,73	1,41	a 0,68	2,26	a 1,31	2,41	a 1,21	3,00	a 1,41
	Pinh.	1,11	a 0,39	1,48	a 0,95	1,57	a 0,95	1,68	b 0,86	2,23	a 1,26	2,19	b 0,78
	Ibirap.	1,21	a 0,77	1,24	a 0,83	1,21	a 0,68	2,03	a 1,48	2,66	a 2,16	3,74	a 2,45
	c. veg.	1,04	a 0,29	1,17	a 0,56	1,06	a 0,32	1,33	b 0,66	1,58	b 0,96	2,19	b 1,38

O diâmetro médio do caule foi semelhante para todas as plantas até os 3 meses de exposição (Figura 6A e Tabela 3). Aos 6 e 9 meses de estudo, as plantas expostas em Congonhas apresentaram diâmetro maior do que as plantas das outras áreas de estudo mas a partir dos 12 e 15 meses, foram as plantas do Ibirapuera que apresentaram o maior diâmetro. O incremento relativo em diâmetro nas plantas de *C. echinata* não seguiu o mesmo padrão ao longo do tempo, com as médias de cada área diferindo bastante nos vários períodos de coleta, como se verifica na Figura 5B, mas o período mais favorável foi aos 12 meses.

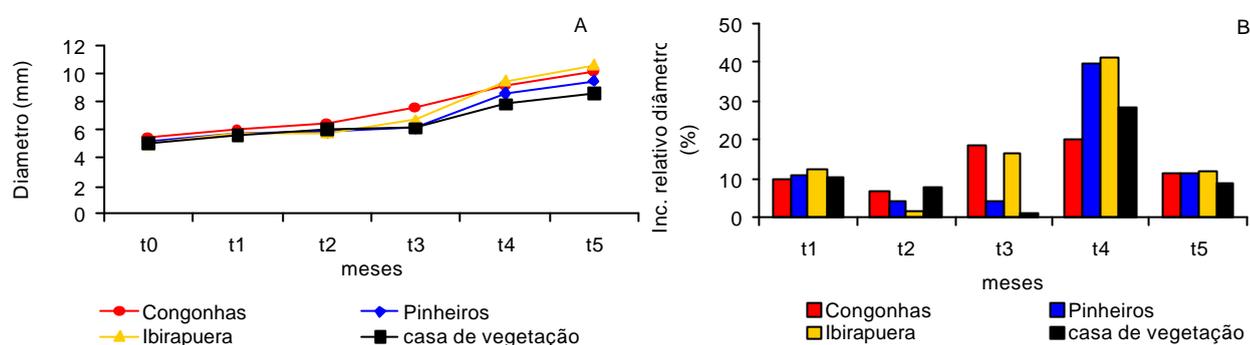


Figura 6. Diâmetro médio do caule (A) e incremento relativo do diâmetro (B) em plantas jovens de *C. echinata* expostas nas áreas de estudo, durante o período de quinze meses. **T0:** Mar./02; **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03.

Todas as plantas apresentaram médias de número de folhas semelhantes até o 9º mês de exposição (Figura 7A e Tabela 3). A maior produção de novas folhas ocorreu aos 9 e 12 meses de exposição. Os resultados das plantas mantidas na casa de vegetação apresentaram uma tendência a serem menores do que os obtidos com as plantas das áreas sob poluição. Após o início do experimento, as plantas de todas as áreas perderam folhas o que resultou em incremento negativo no número de folhas aos 3 meses de exposição (Figura 7B). No período seguinte a produção de novas folhas foi retomada. As plantas de Congonhas e da casa de vegetação apresentaram maior incremento relativo do número de folhas aos 9 meses e as de Ibirapuera e Pinheiros aos 12 meses.

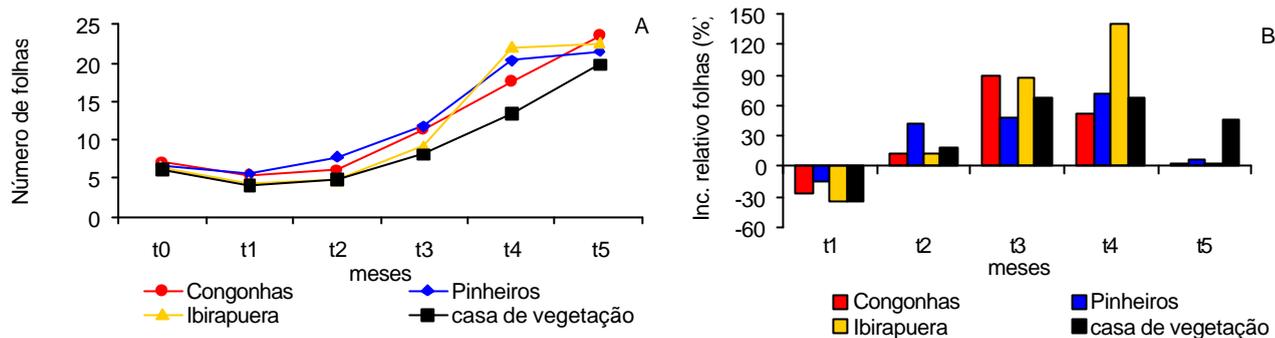


Figura 7. Número médio de folhas (A) e incremento relativo do número de folhas (B) de plantas jovens de *C. echinata* expostas nas áreas de estudo, durante o período de quinze meses. **T0:** Mar./02; **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03.

Os valores referentes ao número médio de ramos (Figura 8A), de acordo com a análise estatística, foram significativamente iguais para todas as plantas das quatro áreas de estudo até os 6 meses de exposição (Tabela 3). A partir de então, houve uma tendência de as plantas sob ar filtrado apresentarem menor número de ramificações. Esta tendência foi confirmada a partir dos 9 meses de exposição, embora nessa amostragem, e também aos 15 meses, não houve diferença entre os resultados obtidos com plantas da casa de vegetação e de Pinheiros. O incremento relativo em número de ramos apresentou grande variação entre as plantas de cada área a cada amostragem (Figura 8B).

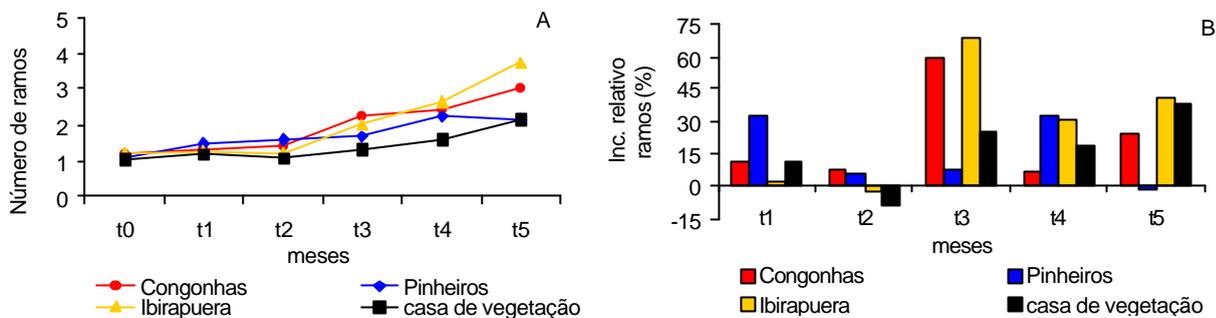


Figura 8. Número médio de ramos (A) e incremento relativo de ramos (B) de plantas jovens de *C. echinata* expostas nas áreas de estudo, durante o período de quinze meses. **T0:** Mar./02; **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03.

Como a seleção das plantas que seriam coletadas para obtenção das massas secas foi feita por meio de sorteio, em alguns momentos obteve-se médias inferiores às observadas em amostragens anteriores, principalmente na amostragem correspondente aos 6 meses de exposição.

As plantas que permaneceram no ambiente com ar filtrado apresentaram massa de matéria seca de folhas maior do que as demais plantas a partir do 6^o mês de exposição (Figura 9A e Tabela 4), embora no 12^o mês não houve comprovação estatística devido à grande variação dos resultados, como pode ser constatado a partir dos valores de desvio-padrão.

No que se refere a massa de matéria seca de caules:ramos (Figura 9B e Tabela 4), as plantas mantidas nas quatro áreas de estudo apresentaram produção bastante semelhante em alguns períodos da exposição, porém, aos 9 e 15 meses os resultados obtidos nas plantas da casa de vegetação foram mais altos do que os obtidos com as plantas das outras áreas de estudo.

A massa de matéria seca da parte aérea foi obtida pela soma das massas secas de caules, ramos e folhas. As folhas corresponderam a 60% da massa seca da parte aérea em

todas as áreas, deste modo, os resultados referentes a este parâmetro seguiram o mesmo padrão que a massa seca de folhas, ou seja, também apresentaram valores mais altos nas plantas mantidas sob ar filtrado (Figura 9C e Tabela 4).

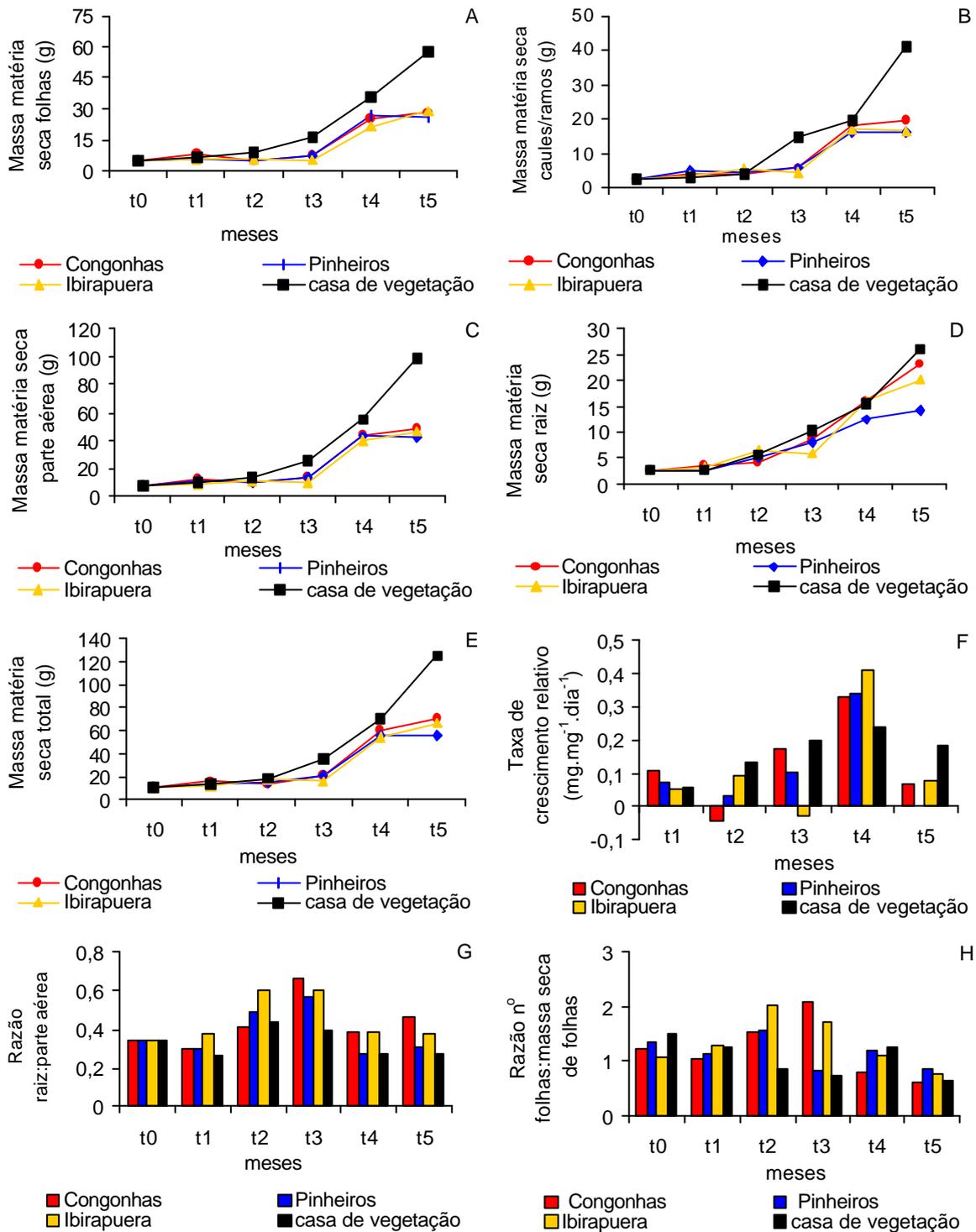


Figura 9. Massa da matéria seca de folhas (A), massa da matéria seca de caules/ramos(B), massa da matéria seca da parte aérea (C), massa da matéria seca de raiz (D), massa da matéria seca total (E), taxa de crescimento relativo (F); razão raiz:parte aérea (G) e razão número de folhas: massa de matéria seca de folhas (H) de plantas jovens de *C. echinata* expostas nas áreas de estudo, durante o período de quinze meses. **T0:** Mar./02; **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03

Tabela 4. Valores de massa da matéria seca de folhas, parte aérea, raiz, total e razões raiz:parte aérea e n° de folhas:massa de matéria seca de folhas (média desvio padrão; n=15) de plantas jovens de *Caesalpinia. echinata* expostas à poluição aérea de diferentes regiões da cidade de São Paulo, SP, durante o período de quinze meses de estudo. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si ($P < 0,05$).). **T0:** Mar./02; **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03.

Massa da matéria seca	Área	T0		T1		T2		T3		T4		T5	
		m	dp	m	dp	m	dp	m	dp	m	dp	m	dp
Folhas	Cong.	5,35	a 0,49	8,01	a 3,13	5,17	b 1,69	7,15	b 0,81	25,60	a 7,80	28,47	b 5,34
	Pinh.	5,35	a 0,49	5,97	a 0,56	5,15	b 0,49	13,45	a 5,19	26,83	a 6,40	25,62	b 4,24
	Ibirap.	5,35	a 0,49	5,60	a 1,28	5,60	b 1,93	5,38	b 1,78	21,86	a 10,56	29,22	b 4,07
	C. Veg.	5,35	a 0,49	6,86	a 0,53	8,97	a 1,20	16,46	a 4,98	35,62	a 7,96	57,77	a 19,57
Caules/ Ramos	Cong.	2,73	a 0,30	3,95	a 0,77	4,21	a 1,03	5,90	b 0,97	18,36	a 6,44	19,57	b 3,50
	Pinh.	2,73	a 0,30	4,70	a 1,26	4,56	a 0,15	5,94	b 2,34	16,19	a 2,88	16,04	b 3,85
	Ibirap.	2,73	a 0,30	3,58	a 0,48	5,13	a 1,23	4,58	b 1,23	16,80	a 3,26	16,51	b 2,51
	C. Veg.	2,73	a 0,30	3,21	a 0,43	4,22	a 0,52	14,79	a 3,27	19,82	a 4,93	41,23	a 15,82
Parte aérea	Cong.	8,08	a 2,25	11,96	a 3,68	9,38	a 2,72	13,05	b 1,38	43,96	a 14,24	48,04	b 7,27
	Pinh.	8,08	a 2,25	10,67	a 1,58	9,71	a 0,49	13,45	b 5,20	43,01	a 8,89	41,66	b 7,90
	Ibirap.	8,08	a 2,25	9,18	a 1,37	10,74	a 3,05	9,96	b 3,28	39,18	a 15,92	45,73	b 6,40
	C. Veg.	8,08	a 2,25	10,07	a 0,82	13,19	a 1,00	25,07	a 7,48	55,45	a 12,87	99,00	a 35,36
Raiz	Cong.	2,70	a 0,55	3,55	a 1,72	4,02	a 1,84	8,62	a 1,20	16,02	a 5,48	23,15	a 2,46
	Pinh.	2,70	a 0,55	2,66	a 0,23	4,99	a 0,06	8,15	a 5,95	12,55	a 3,01	14,34	b 3,25
	Ibirap.	2,70	a 0,55	3,41	a 0,47	6,51	a 2,66	6,03	a 1,75	16,09	a 6,62	20,31	a 2,79
	C. Veg.	2,70	a 0,55	2,66	a 0,76	5,60	a 0,88	10,28	a 4,22	15,47	a 5,93	25,99	a 5,42
Total	Cong.	10,78	a 0,96	15,50	a 5,34	13,40	a 4,56	21,67	b 2,58	59,98	a 19,64	71,19	b 9,62
	Pinh.	10,78	a 0,96	13,33	a 1,80	14,70	a 0,54	21,60	b 11,14	55,57	a 10,75	56,00	b 11,10
	Ibirap.	10,78	a 0,96	12,60	a 1,83	17,25	a 5,66	15,72	b 4,98	55,27	a 22,53	66,04	b 8,45
	C. Veg.	10,78	a 0,96	12,73	a 0,35	18,79	a 1,81	35,36	a 11,70	70,92	a 18,74	124,99	a 40,20
Razão raiz:parte aérea	Cong.	0,34	a 0,06	0,30	a 0,05	0,41	b 0,05	0,66	a 0,03	0,39	a 0,03	0,46	a 0,06
	Pinh.	0,34	a 0,06	0,30	a 0,03	0,49	b 0,06	0,57	a 0,09	0,27	b 0,04	0,31	bc 0,01
	Ibirap.	0,34	a 0,06	0,38	a 0,02	0,60	a 0,06	0,60	a 0,01	0,38	a 0,04	0,38	ab 0,05
	C. Veg.	0,34	a 0,06	0,26	a 0,08	0,44	b 0,05	0,39	b 0,06	0,27	b 0,04	0,27	c 0,05
Razão n° folhas:massa	Cong.	1,22	a 0,15	1,04	a 0,32	1,55	a 0,23	2,07	a 1,07	0,77	a 0,23	0,62	a 0,16
	Pinh.	1,35	a 0,42	1,12	a 0,17	1,56	a 0,28	0,81	b 0,41	1,21	a 0,30	0,87	a 0,03

Já em relação à massa seca de raiz (Figura 9D e Tabela 4), esta não diferiu significativamente entre as plantas expostas nos diversos ambientes até o período de 12 meses. Foi apenas aos 15 meses de exposição que as plantas mantidas em Pinheiros apresentaram massa da matéria seca de raiz menor que as plantas dos outros ambientes. Quanto à massa seca total, observou-se o mesmo padrão das massas secas de folhas e parte aérea: tendência a valores mais altos nas plantas da Casa de Vegetação, sendo as diferenças comprovadas aos 9 e 15 meses (Figura 9E e Tabela 4).

A produção de biomassa não seguiu um padrão uniforme nas plantas de *C. echinata* que ficaram expostas nas diferentes áreas. As plantas que permaneceram na Casa de Vegetação apresentaram taxas de crescimento relativo sucessivamente maiores até os 12 meses, após o qual houve uma redução. O período mais favorável à produção de massa seca ocorreu aos 12 meses, quando foram registradas as mais altas taxas de crescimento relativo para as plantas de todas as áreas (Figura 9F). Nos demais períodos de amostragem, as TCR obtidas a cada coleta apresentaram grandes diferenças entre as áreas (exceto aos 3 meses).

Não foi possível verificar um padrão nítido nos valores médios da razão raiz/parte aérea, mas houve uma tendência a que as plantas da Casa de Vegetação apresentassem os valores mais baixos desse parâmetro (Figura 9G e Tabela 4).

Com relação à razão número de folhas/massa da matéria seca de folhas (Figura 9H e Tabela 4), novamente verifica-se uma tendência de as plantas da Casa de Vegetação apresentarem as menores médias ao longo do estudo.

No final do experimento, comparando-se os resultados obtidos com as plantas mantidas nas áreas poluídas, com aquelas mantidas sob ar filtrado, verifica-se que as primeiras apresentaram reduções menores em altura (entre 30 e 40%) e de massa seca total (entre 43 e 55%). Por outro lado, elas apresentaram aumentos em diâmetro (11-23%),

número de folhas (9-20%), número de ramos (37-71%) e razão raiz/parte aérea (15-70%) (Tabela 5).

Tabela 5. Diferença percentual entre os resultados obtidos com plantas de áreas poluídas (Congonhas, Pinheiros, Ibirapuera) e plantas da área de referência (casa de vegetação com ar filtrado) após 15 meses de exposição.

	Congonhas	Pinheiros	Ibirapuera
Altura	- 32	- 43	-30
Diâmetro	+ 18	+ 11	+ 23
Número de folhas	+ 20	+ 9	+ 14
Número de ramos	+ 37	0	+ 71
Massa seca de folhas	- 51	- 57	- 49
Massa seca da parte aérea	- 51	- 58	- 54
Massa seca de raízes	- 11	- 45	- 22
Massa seca total	- 43	- 55	- 47
Razão raiz/parte aérea	+ 70	+ 15	+ 41
Razão n. folhas/MS folhas	0	+ 38	+ 20

4.3 Análise conjunta das variáveis biológicas

Aplicou-se a Análise de Componentes Principais (ACP) com o objetivo de identificar as principais tendências de variação dos parâmetros de crescimento de plantas jovens de *C. echinata* expostas em ambiente de ar filtrado e em ambientes poluídos. A análise resumiu 69% da variabilidade dos dados em seus dois primeiros componentes, sendo que o eixo 1 explicou 52% e o eixo 2 17% (Figura 9, Tabela 7).

No lado negativo do eixo 1 (Figura 10, Tabela 6) foram alocadas todas as unidades amostrais referentes ao ambiente de ar filtrado em todos períodos de estudo, sendo as unidades altamente associadas aos altos valores dos parâmetros de crescimento em altura, massa de matéria seca de folhas, massa total e massa de raiz, as quais apresentaram alta correlação com o eixo ($r > 0,6$). Em relação aos ambientes poluídos, as unidades amostrais de Congonhas (TC1) e Ibirapuera (TII, II2) mostraram-se mais associadas aos maiores valores dos parâmetros de massa e altura no período inicial. Diferentemente, no lado positivo do eixo 1 encontraram-se a maioria das unidades amostrais dos ambientes poluídos, os quais foram associados aos altos valores de diâmetro do caule, número de folhas, número de ramos e razão raiz:parte aérea das plantas de *C. echinata*, tendo estes parâmetros alta correlação com o eixo ($r > 0,5$; Figura 10, Tabela 6). Assim, o eixo 1 representou a separação do ambiente de ar filtrado dos ambientes poluídos.

Em relação ao eixo 2, a maior contribuição para ordenação foi dada pela variável razão raiz:parte aérea, sendo altamente correlacionado com o eixo ($r > -0,7$). No geral, notou-se uma maior associação das unidades amostrais do Ibirapuera aos altos valores de razão raiz:parte aérea (Figura 10, Tabela 6). Em oposição, as unidades da Casa de Vegetação associaram-se aos baixos valores de razão raiz:parte aérea.

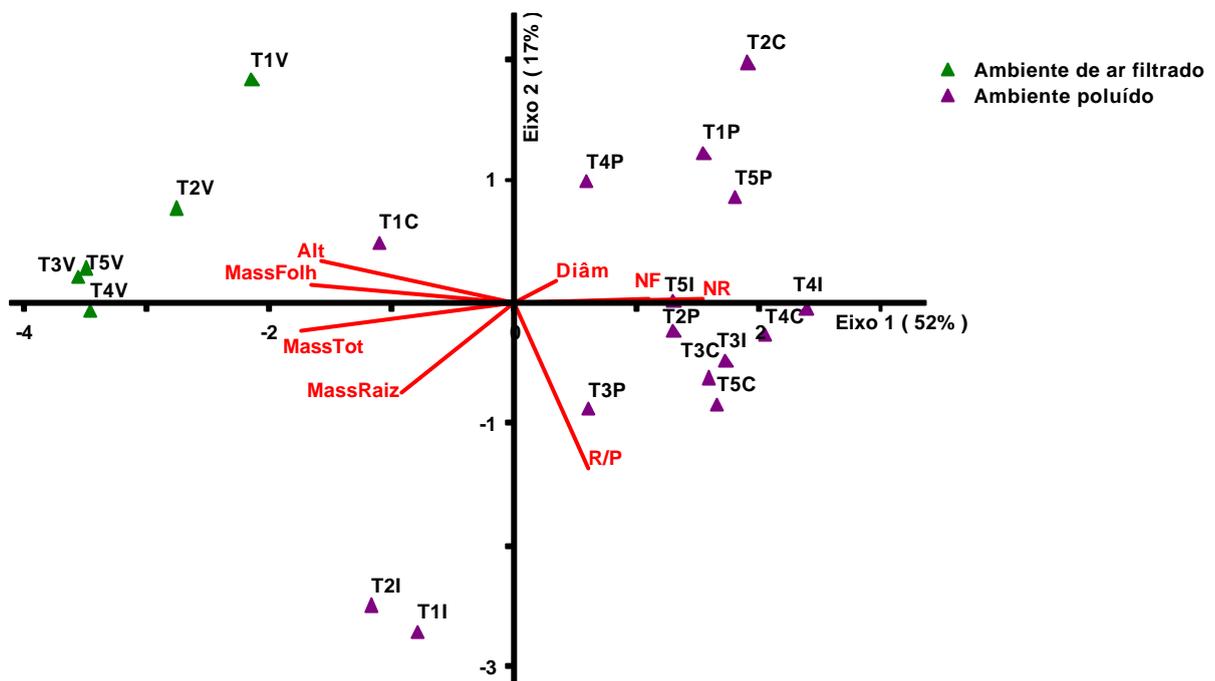


Figura 10. Análise de componentes principais (ACP) dos parâmetros de crescimento em plantas jovens de *Caesalpinia echinata* expostas em ambiente de ar filtrado e ambiente poluídos durante 15 meses de estudo. Legenda: **T1:** Abr.-Jul./02; **T2:** Jul.-Out./02; **T3:** Out./02-Jan./03; **T4:** Jan.-Abr./03; **T5:** Jul./03, **C:** Congonhas, **P:** Pinheiros, **I:** Ibirapuera, **V:** Casa de Vegetação, **Alt:** altura, **MassFolh:** massa de matéria seca de folhas, **MassTot:** massa de matéria seca total, **MassRaiz:** massa de matéria seca de raiz, **Diâm:** diâmetro, **NF:** número de folhas, **NR:** número de ramos, **R/P:** razão raiz/parte aérea. Valores dos eixos: 52% (eixo 1) e 17% (eixo 2).

Tabela 6. Correlação das variáveis biológicas com os componentes principais 1 e 2.

Variáveis	Componentes Principais	
	1	2
Número de folhas	0,699	0,116
Número de ramos	0,830	0,115
Altura	-0,833	0,386
Diâmetro	0,392	0,277
Massa de matéria seca de folhas	-0,857	0,251
Massa de matéria seca de raiz	-0,637	-0,577
Massa de matéria seca total	-0,875	-0,328
Razão raiz/parte aérea	0,519	-0,777
Variação explicada	52%	17%

4.4. Resultado da Correlação de Pearson e teste - t das variáveis ambientais com os escores da APC

Com a finalidade de avaliar a resposta das plantas *C. echinata* as condições ambientais foi realizado a correlação de Pearson entre os escores do eixo 1 e 2 da ACP das variáveis biológicas com os valores médios das variáveis ambientais (**Figura 4, Tabela 2 ambientais**). Especificamente, os escores utilizados foram obtidos a partir da ACP realizada com o conjunto de dados da casa de vegetação x Ibirapuera, da casa de vegetação x Congonhas e da casa de vegetação x Pinheiros. A correlação de Pearson entre variáveis ambientais e biológicas foi realizada separadamente a fim de contemplar todas as variáveis ambientais em todas as áreas de estudo. Para verificar o grau de significância entre valores das variáveis ambientais e dos escores foi realizado também o teste t.

Considerando a ACP realizada com as variáveis biológicas da Casa de Vegetação x Ibirapuera (Tabela 7), observou-se que O₃, UR e irradiância ($r = 0,8203$, $r = 0,8273$, $r =$

0,8652, respectivamente) foram as variáveis de maior correlação positiva com os escores do eixo 1.

Tabela 7. Correlação de Pearson e teste *t* entre a casa de vegetação x Ibirapuera das variáveis ambientais com os escores dos eixos 1 e 2 durante os 15 meses de estudo.

Variáveis Ambientais	r (eixo 1)	teste – t (<i>p</i>)
MP ₁₀ (µg/m ³)	0,6785	0,0001
O ₃ (µg/m ³)	0,8203	0,0013
SO ₂ (µg/m ³)	0,61657	0,0287
NO ₂ (µg/m ³)	0,6617	0,0046
Irradiância (mmol/m ² /s)	0,8652	0,0001
T (°C)	0,2982	0,0001
UR (%)	0,8273	0,0001

A correlação de Pearson realizada com os valores dos escores das variáveis biológicas da Casa de Vegetação x Pinheiros (Tabela 8) mostrou que MP₁₀, O₃ e irradiância (*r* = 0,96, 0,94 e 0,75 respectivamente) foram as variáveis ambientais que apresentaram maior correlação no eixo 1.

Tabela 8. Correlação de Pearson e teste *t* entre as variáveis ambientais das áreas casa de vegetação x Pinheiros com os escores dos eixos 1 e 2 durante os 15 meses de estudo.

Variáveis Ambientais	r (eixo 1)	teste – t (<i>p</i>)
MP ₁₀ (µg/m ³)	0,9655	0,0001
O ₃ (µg/m ³)	0,9451	0,0001
PAR (mmol/m ² /s)	0,7561	0,0001
T (°C)	0,3254	0,0001
UR (%)	0,5574	0,0001

As variáveis ambientais que apresentaram maior correlação de Pearson entre os ambientes Casa de Vegetação x Congonhas no eixo 1 (Tabela 9) foram MP₁₀, SO₂, NO₂ e irradiância ($r = 0,8206$, $r = 0,8767$, $r = 0,9058$ e $r = 0,9138$ respectivamente). Todas as correlações realizadas foram consideradas altamente significativas pelo teste t.

Tabela 9. Correlação de Pearson e teste *t* entre as variáveis ambientais das áreas casa de vegetação x Congonhas com os escores dos eixos 1 e 2 durante os 15 meses de estudo.

Variáveis Ambientais	r (eixo 1)	teste – t (p)
MP ₁₀ (µg/m ³)	0,8206	0,0001
SO ₂ (µg/m ³)	0,8767	0,0257
NO ₂ (µg/m ³)	0,9058	0,0046
PAR (mmol/m ² /s)	0,9138	0,0001
T (°C)	0,1889	0,0001
UR (%)	0,7849	0,0001

5. Discussão

Neste estudo verificou-se que indivíduos jovens de *Caesalpinia echinata* expostos às condições ambientais de regiões da cidade de São Paulo com diferentes tipos e níveis de poluição atmosférica sofreram restrições a seu crescimento em altura e à produção de biomassa. Apresentaram também alterações na arquitetura de suas copas, causadas pelo aumento do número de ramos.

O crescimento resulta da integração de vários processos fisiológicos e bioquímicos, os quais podem ser adversamente afetados pela poluição aérea. Ele sintetiza a história de vida de uma planta, pois compreende todas as suas respostas aos diversos fatores que a induziram ao estresse ao longo do tempo. Deste modo, alterações no crescimento são verificadas com frequência em plantas expostas a poluentes aéreos (Mooney & Winner 1988, Pandey & Agrawal 1994, Krupa *et al.* 2001, Bortier *et al.* 2000, Kolb & Matyssek 2003).

Neste estudo, foi verificada uma tendência às plantas das áreas poluídas apresentarem maior número de folhas do que as plantas que permaneceram sob ar filtrado. Pandey & Agrawal (1994) verificaram que indivíduos jovens de *Cássia carandas* expostos em áreas poluídas apresentavam maior número de folhas do que os expostos em áreas com melhor qualidade do ar. Resultado semelhante foi obtido por Szabo *et al.* (2003) em estudo realizado com *Tibouchina pulchra* em diversas regiões de Cubatão. Nesse caso, os autores observaram que o número de folhas aumentava linearmente com o aumento da concentração foliar de enxofre. Pompéia (1997), em estudo de biomonitoramento passivo, ou seja, em que são avaliadas plantas ocorrentes no próprio local de estudo, observou que na floresta da área mais severamente poluída de Cubatão, o vale do rio Mogi, ocorria uma

tendência das árvores apresentarem maior número de folhas do que as árvores da área mais abrigada da poluição (vale do rio Pilões).

O aumento da produção de folhas em plantas submetidas à poluição aérea pode ser considerado um mecanismo compensatório à antecipação da senescência foliar provocada pelos poluentes (Woodbury *et al.* 1994, Pell *et al.* 1997, Bortier *et al.* 2000, Oksanen 2001). Darral (1989) e Amthor & McCree (1990) sugerem que, como essas plantas têm sua fotossíntese reduzida, há um maior investimento na produção de novas folhas, ou seja, em repor o órgão capaz de adquirir o principal fator limitante, no caso, o carbono.

Além do aumento em número de folhas, o número de ramos laterais dos indivíduos jovens de *C. echinata* expostos no Ibirapuera e em Congonhas também foi superior ao das plantas mantidas sob ar filtrado. Grulke & Balduman (1999) constataram aumento em ramos laterais em *Pinus ponderosa* expostas em regiões poluídas. Pompéia (2000) verificou aumento da ramificação lateral em indivíduos adultos de diversas espécies arbóreas ocorrentes em regiões de Cubatão próximas a indústrias petroquímicas e de fertilizantes. Domingos *et al.* (1998) verificaram o mesmo em indivíduos jovens de *Tibouchina pulchra* nas mesmas regiões. De acordo com Pompéia (1997), o aumento na ramificação dos troncos de árvores das regiões mais poluídas de Cubatão, pode ser atribuído ao estresse provocado pela poluição sobre as gemas resultando em redução da dominância apical. A morte da gema apical em plantas das áreas poluídas também foi observada no presente estudo, principalmente em Pinheiros.

A redução do crescimento em altura somada ao aumento da ramificação lateral modificou a arquitetura das plantas, com muitas apresentando aspecto arbustivo no final do experimento. Esse resultado também foi observado em plantas sob poluição por Pompéia

(1997), Viveiros (1996) e Moraes (1999) e, no presente caso, desfavorece a utilização da espécie na arborização urbana.

Entre todos os parâmetros avaliados, os que apresentaram os resultados mais expressivos foram os referentes à produção de biomassa, apresentados como massa de matéria seca. Os indivíduos jovens de *C. echinata* Lam. expostos às condições ambientais de Congonhas, Pinheiros e Ibirapuera apresentaram severa restrição à produção de biomassa, principalmente da parte aérea, ou seja, de folhas, caules e ramos. A biomassa de raízes, entretanto, foi significativamente reduzida apenas nas plantas que permaneceram em Pinheiros.

Um dos primeiros efeitos dos poluentes aéreos sobre as plantas é a redução da fotossíntese. Ela é causada principalmente pela redução da síntese e da atividade da enzima ribulose bifostato carboxilase-oxigenase (Rubisco), mas a redução da condutância estomática e danos aos fotossistemas também podem estar envolvidos (Pell *et al.* 1994, Long & Naidu 2003).

Em estudo realizado em condições controladas (câmaras de topo aberto), Moraes *et al.* (2006) verificaram que plantas jovens de *C. echinata* expostas ao ozônio apresentaram severas reduções em suas trocas gasosas. A fotossíntese líquida e a condutância estomática dessas plantas foram reduzidas em 50 e 42%, respectivamente, quando comparadas com plantas expostas a ar filtrado. Em outro estudo de exposição ao ozônio em câmaras de topo aberto, este incluindo também *Psidium guajava* 'Paluma' e *Tibouchina pulchra*, verificou-se que *C. echinata* foi a espécie que apresentou a mais forte redução na fotossíntese, apesar de ter recebido efetivamente a menor concentração de ozônio, pois apresentou a menor condutância estomática dentre as três espécies (Moraes *et al.* 2004). É possível que a fotossíntese também tenha sido afetada nas plantas utilizadas no presente estudo.

Esses efeitos deletérios sobre a fotossíntese resultam do estresse oxidativo originado pelos poluentes no interior da folha. Dentre os principais poluentes na cidade de São Paulo, o ozônio é o agente oxidante mais forte, mas SO₂ e NO₂ também induzem ao estresse oxidativo. Nele são formadas espécies ativas do oxigênio que podem afetar membranas e organelas celulares, afetando diversos processos fisiológicos e metabólicos (Ashmore 2003, Long & Naidu 2003). A redução da fotossíntese é acompanhada do aumento da respiração, e de todo o metabolismo secundário para atender ao aumento da demanda por mecanismos de defesa e para reparos de danos (Dizengremel 2001).

Esses tipos de alterações foram verificadas nas plantas utilizadas neste estudo. Bulbovas (2005) verificou que as plantas de *C. echinata* utilizadas neste estudo mostraram aumentos significativos em suas defesas antioxidativas (ácido ascórbico e enzimas superóxido dismutase e peroxidases) e que estes aumentos estiveram relacionados às concentrações de materiais particulados e ozônio e também às condições climáticas, principalmente, umidade relativa e irradiância.

O aumento da atividade de componentes do sistema de defesas antioxidativas, entretanto, não foi suficiente para evitar que as plantas estiveram sob os efeitos danosos da poluição. E.S. Alves (com. pessoal) verificou por meio de análise de ultraestrutura foliar que essas mesmas plantas, quando comparadas às que permaneceram sob ar filtrado, apresentavam diferenças no aspecto geral das células, na quantidade de amido e de lipídeos, na organização de organelas como cloroplastos e mitocôndrias. Além disso, a autora observou hipertrofia e a hiperplasia nas células do parênquima lacunoso e aumento da densidade estomática. Todas essas respostas são freqüentemente verificadas em plantas expostas aos poluentes aéreos (Sanz *et al.* 2002b).

Além disso, o investimento de energia e produtos fotoassimilados em defesas, como já afirmado, tem um custo fisiológico para as plantas (Yamaji *et al.* 2003) implicando

diretamente na diminuição do acúmulo de biomassa e no crescimento da planta (Long & Naidu 2003).

Apesar das concentrações e dos poluentes serem distintas entre os ambientes poluídos, pode se dizer que, no geral, as respostas apresentadas pelas plantas expostas nestes ambientes foram semelhantes. Por exemplo, as plantas que permaneceram nas áreas poluídas apresentaram crescimento em altura geralmente similar. Uma análise mais detalhada permite observar, entretanto, que ao longo do tempo houve variações em alguns parâmetros: os incrementos em diâmetro do caule e em número de ramos ora foram maiores em Congonhas (aos 9 meses de exposição), ora no Ibirapuera (aos 12 e 15 meses). O mesmo ocorreu com a produção de biomassa. Esse padrão de crescimento que diferiu entre áreas fica evidente quando se observa os incrementos relativos e a taxa de crescimento relativo (TCR).

Essas flutuações eram esperadas, pois cada área apresenta uma dinâmica própria quanto à qualidade do ar, ditada pelos aspectos sazonais da poluição aérea. Assim, as condições mais adversas no Ibirapuera são previstas para período entre setembro e dezembro, quando a temperatura e a radiação são altas e há menos dias de chuva do que no verão. Essas condições fazem com que as maiores concentrações de ozônio sejam registradas nesse período. Já em Congonhas, o período de pior qualidade do ar compreende os meses de junho a agosto, quando as condições climáticas são desfavoráveis à dispersão de materiais particulados e óxidos de enxofre e nitrogênio. Isso pode ter atuado na baixa TCR apresentada pelas plantas de Congonhas aos seis meses, e pelas do Ibirapuera aos nove.

Mas além dos poluentes, as condições climáticas constituem um fator da maior importância em um estudo como este. O início do experimento coincidiu com os meses mais frios do ano e as plantas das áreas poluídas apresentaram TCR baixas, sendo que

muitas plantas perderam folhas. Foi no período de janeiro a abril (12 meses) que foram verificadas as condições mais favoráveis ao crescimento das plantas de pau-brasil em todas as áreas, principalmente naquelas sob poluição. Ficou evidente que as médias de temperatura e irradiância mais altas neste período resultaram em um grande estímulo ao crescimento das plantas neste período. Cabe lembrar que a cidade de São Paulo está fora da área de ocorrência natural de *C. echinata*, cujo limite sul fica no Rio de Janeiro (Rocha 2004). Deste modo, as condições climáticas às quais as plantas estiveram expostas não são as mais adequadas à espécie e devem ter influenciado seu crescimento. No período em que a temperatura foi mais alta, a diferença entre o clima de São Paulo e da área de ocorrência da espécie foi menor, favorecendo o crescimento das plantas. Além disso, sabe-se que a fotossíntese é maior nos períodos em que a temperatura e a irradiância são maiores e isso aumenta a capacidade de desintoxicação da planta uma vez que há um maior disponibilidade de produtos fotoassimilados que poderiam ser utilizados em defesa e reparos de danos em caso de estresse (Fangmeier *et al.* 2003).

Na análise de correlação entre variáveis biológicas e ambientais ficou claro que as primeiras foram associadas a um gradiente de qualidade do ar, com o crescimento sendo reduzido à medida que a poluição aumentava.

Em Congonhas e casa de vegetação foi verificado que MP₁₀, SO₂, NO₂, irradiância, temperatura e umidade relativa foram as variáveis que de maior importância na determinação dos resultados obtidos.

Segundo vários autores, óxidos de nitrogênio e enxofre, quando presentes na atmosfera em concentrações baixas podem ser utilizados como nutrientes e promover o crescimento vegetal (Rennenberg 1984, Wellburn 1990, Legge & Krupa 2003, Mansfield 2003). Contudo, quando a entrada destes compostos excede um determinado limiar, esse efeito benéfico é anulado e ocorrem danos às plantas. Foi o que foi verificado neste estudo,

pois o aumento das concentrações de SO₂ e NO₂ em Congonhas estiveram associados à redução do crescimento vegetal. Sabe-se atualmente que quando esses dois poluentes ocorrem conjuntamente, mesmo que em concentrações baixas, a resposta da planta é maior do que a soma dos efeitos de cada um separadamente. Há um efeito sinérgico causado tanto pela facilitação da entrada do SO₂ no interior da folha pelo NO₂ (Fowler 2003), quanto pela desregulação do metabolismo do nitrogênio pelo SO₂, que causa acúmulo do radical nitrito (Fangmeier *et al.* 2003). Cabe lembrar também que o enxofre, na forma de sulfatos, está presente em grande parte do material particulado na cidade de São Paulo.

Em Pinheiros a análise de correlação de Pearson indicou que O₃, MP₁₀, irradiância, temperatura e umidade relativa foram correlacionados significativamente às alterações em parâmetros de crescimento de *C. echinata*, o que evidencia que a área apresenta características intermediárias entre Congonhas e Ibirapuera quanto à qualidade do ar. Nesta última, O₃, irradiância e umidade relativa foram as variáveis que mais influenciaram o crescimento das plantas de *C. echinata*.

6. Conclusão

Evidenciou-se que as plantas jovens de *Caesalpinia echinata* apresentaram alterações em função das condições ambientais como: restrições em seu crescimento em altura e na massa de matéria seca, alterações na arquitetura de suas copas, causadas pelo aumento do número de ramos. Pode-se concluir, portanto que as plantas foram adversamente afetadas às condições ambientais da cidade de São Paulo, sendo assim sua utilização não é recomendável na arborização urbana.

7. Referências Bibliográficas

- ABNT.** 1993. Atmosfera – Determinação da concentração de dióxido de enxofre, pelo método do peróxido de hidrogênio. NBR 12979.
- ABNT.** 1997. Material particulado em suspensão no ar ambiente – Determinação da concentração total pelo método do amostrador de grande volume. NBR 9547.
- 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.
- Amthor, J.S. & McCree, K.** 1990. Carbon balance of stressed plants: a conceptual model for integrating research results. *In*: R.G. Alscher; J.R. Cumming, (eds.). *Stress responses in plants: adaptation and acclimation mechanisms*. Wiley-Liss, New York, pp. 1-15.
- Angyalossy, V., Amano, E. & Alves, E.S.** 2005. Madeiras utilizadas na fabricação de arcos de instrumentos de corda: aspectos anatômicos. *Acta Botânica Brasílica* 19(4): 819-834.
- Arndt, U. & Schweizer, B.** 1991. The use of bioindicators for environmental monitoring in tropical and subtropical countries. *In*: H. Ellenberg, U. Arndt, B. Ruthsatz & L. Steubing, (eds.). *Biological monitoring: signals from the environment* Vieweg & Sohn, Eschborn, pp. 199-260.
- Ashmore, M.R.** 2003. Effects of oxidants at the whole plant and community level. *In*: J.N.B. Bell & M. Treshow (eds.) *Air pollution and plant life*. John Wiley & Sons, Chichester. 2nd ed., pp. 89-118.

- Barbedo, C.J., Bilia, D.A.C. & Figueiredo-Ribeiro, R.C.L.** 2002. Tolerância à dessecação e armazenamento de sementes de *Caesalpinia echinata* Lam. (pau-brasil), espécie da Mata Atlântica. *Revista Brasileira de Botânica* 25 (4): 431-439.
- Benincasa, M.M.P.** 1988. Análise de crescimento de plantas (noções básicas). Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária Jaboticabal, FUNEP, 42 p.
- Bobbink, R.** 1998. Impacts of tropospheric ozone and airborne nitrogenous pollutants on natural and semi-natural ecosystems: a commentary. *New Phytology* 139: 161-168.
- Borges, I.F., Giudice Neto, J.D., Bilia, D.A.C., Figueiredo-Ribeiro, R.C.L. & Barbedo, C.J.** 2005. Maturation of seeds of *Caesalpinia echinata* Lam. (brazilwood), an endangered leguminous tree from the Brazilian Atlantic Forest. *Brazilian Archives of Biology and Biotechnology* 48 (6): 851-861.
- Bortier, K., Ceulemans, R. & De Temmerman, L.** 2000. Effects of ozone exposure on growth and photosynthesis of beech seedlings (*Fagus sylvatica*). *New Phytologist* 146: 271-280.
- Bourotte, C., Forti, M., Melfi, A.J. & Lucas, Y.** 2006. Morphology and solute content of atmospheric particles in an urban and a natural area of São Paulo, State, Brazil. *Water, Air and Soil Pollution* 170: 301-316.
- Bray, E.A., Bailey-Serres, J. & Weretilnyk, E.** 2000. Responses to abiotic stresses. *In*: Buchanan, B.B., Gruissen, W., Jones, R.L. (eds.). *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*. American Society of Plant Physiologists (USA), New York, pp. 1158-1203.
- Bulbovas, P.** 2005. Defesas antioxidativas em plantas jovens de *Caesalpinia echinata* Lam. (pau-brasil) como indicadoras de resistência da espécie à poluição atmosférica na cidade de São Paulo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 108 p.

- Castanho, A.D.A.** 1999. A determinação quantitativa de fontes de material particulado na atmosfera da cidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 126 p.
- CETESB.** 2002. Relatório anual da qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2001. Série Relatórios. Editora, São Paulo, 42 p.
- CETESB.** 2004. Relatório anual da qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2003. Série Relatórios. Editora, São Paulo, 122 p.
- Chang, L.W. & Cockerham, L.G.** 1994. Toxic metals in the environment. *In*: L.G. Cockerham & B.S. Shane (eds.). Basic environmental toxicology. CRC Press, pp. 109-132.
- Cooley, D.R. & Manning, W.J.** 1987. The impact of ozone on assimilate partitioning in plants: a review. *Environmental Pollution* 47: 95-113.
- Corrêa, A.M.S.** 2003. Morfologia polínica de *Caesalpinia echinata* Lam. (Leguminosae – Caesalpinioidea). *Revista Brasileira de Botânica* 26 (3): 355-359.
- Darral, N.M.** 1989. The effect of air pollutants on physiological processes in plants. *Plant, Cell and Environment* 12: 1-30.
- Del Giudice-Neto, J., Sebbenn, A.M. & Kageyama, P.Y.** 2004. Herança e ligação em locos isoenzimáticos de *Caesalpinia echinata* L. (pau-brasil). *Revista do Instituto Florestal* 16 (2): 101-110.
- Dizengremel, P.** 2001. Effects of ozone on the carbon metabolism of forest stress. *Plant Physiology Biochemistry* 39: 729-742.
- Domingos, M., Klumpp, A. & Klumpp, G.** 1998. Air pollution impact on the Atlantic forest in the Cubatão region, SP, Brazil. *Ciência e Cultura* 50 (4) 230-236.
- Domingos, M., Bourotte, C., Klumpp, A., Klumpp, G. & Forti, M.C.** 2002. Impactos de poluição atmosférica sobre remanescentes florestais. *In*: D.C. Bicudo, M.C. Forti,

- C.E.M. Bicudo (eds.). Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI): unidade de conservação que resiste à urbanização de São Paulo. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo, pp. 223-247.
- Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Murray, F., Kuylenstierna, J.C.I., Percy, K.E., Izuta, T., Zheng, Y., Shimizu, H., Sheu, B.H., Liu, C.P., Agrawal, M., Wahid, A., Abdel-Latif, N.M., Van Tienhoven, M., Bauer, de L.I. & Domingos, M.** 2001. Impacts of air pollutants on vegetation in developing countries. *Water, Air, and Soil Pollution* 130: 107-118.
- Emberson, L., Ashmore, M. & Murray, F.** 2003. Air pollution impacts on crops and forests: a global assessment. Imperial College Press, London, 372 p.
- Fangmeier, A., Bender, J., Weigel, H.J. & Jäger, H.J.** 2003. Effects of pollutants mixtures. *In: J.N.B. Bell & M. Treshow (eds.) Air pollution and plant life.* John Wiley & Sons, Chichester. 2nd ed., pp. 251-272.
- Farmer, A.** 2003. Effects of particulate. *In: N. Bell & M. Treshow (eds.) Air pollution and plant life.* John Wiley & Sons, Chichester. 2nd ed., pp. 187-200.
- Flower, D.** 2003. Pollutant deposition and uptake by vegetation. *In: N. Bell & M. Treshow (eds.) Air pollution and plant life.* John Wiley & Sons, Chichester. 2nd ed., pp. 43-67.
- Freedman, B.** 1995. Environmental ecology: the ecological effects of pollution, disturbance, and other stresses. Academic Press, San Diego, 606 p.
- Fuhrer, J., Skärby, L. & Ashmore, M.R.** 1997. Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environmental Pollution* 97 (1-2): 91-106.
- Furlan, C.M.** 2004. Efeitos de poluentes atmosféricos na composição química de indivíduos jovens de *Tibouchina pulchra* (Cham.) Cogn. e *Psidium guajava* L. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 117 p.

- Grulke, N.E. & Balduman, L.** 1999. Deciduous conifers: high N deposition and O₃, exposure effects on growth and biomass allocation in *Ponderosa pine*. *Water, Air and Soil Pollution* 116: 235-248.
- Guerra, J.C., Rodríguez, S., & Arencibia, M.T.** 2004. Study on the formation and transport of ozone in relation to the air quality management and vegetation protection in Tenerife (Canary Islands). *Chemosphere* 56: 1157-1167.
- Guimarães, E.T., Domingos, M., Alves, E.S., Caldini, Jr.N., Lobo, D.J.A., Lichtenfels, A.J.F.C. & Saldiva, P.H.N.** 2001. Detection of the genotoxicity of air pollutants in and around the city of São Paulo (Brazil) with the *Tradescantia*-micronucleus (Trad. MCN) assay. *Environmental and Experimental Botany* 44: 1-8.
- Guimarães, E.T., Macchione, M., Lobo, D.J.A., Domingos, M. & Saldiva, P.H.N.** 2004. Evaluation of the mutagenic potential of urban air pollution in São Paulo, SE Brazil, using the *Tradescantia* Stamen-Hair assay. *Environmental Toxicology*, v.19, 6: 578-584.
- Holland, M.R., Mueller, P.W.; Rutter, A.J. & Shaw, P.J.A.** 1995. Growth of coniferous trees exposed to SO₂ and O₃ using an open-air fumigation system. *Plant, Cell and Environment* 18: 227-236.
- Kangasjärvi, J., Talvinen, J., Utriainen, M. & Karjalainen, R.** 1994. Plant defence systems induced by ozone. *Plant, Cell and Environment* 17: 783-794.
- Karlsson, P.E., Uddling, J., Skärby, L., Wallin, G. & Selldén, G.** 2003. Impact of ozone on the growth of birch (*Betula pendula*) saplings. *Environmental Pollution* 124: 485-495.
- Karnosky, D.F., Percy, K.E., Thakur, R.C. & Honrath, R.E.** 2003. Air pollution and global change: a double challenge to forest ecosystems. *In*: D.F. Karnosky, K.E. Percy,

- A.H. Chappelka, C. Simpson, J. Pikkarainen (eds.) Air pollution, global change and forests in the new millennium. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-41.
- Klumpp, A., Klumpp, G. & Domingos, M.** 1994. Plants as bioindicators of air pollution at the Serra do Mar near the industrial Complex of Cubatão, Brazil. *Environmental Pollution* 85:109-116.
- Klumpp, A., Klumpp, G. Domingos, M. & Silva, M.D.** 1996. Fluoride impact on native tree species of the Atlantic Forest near Cubatão, Brazil. *Water, Air and Soil Pollution* 87:57-71.
- Klumpp, A., Domingos, M. & Klumpp, G.** 1998. Effects of complex air pollution on tree species of the Atlantic rain forest near Cubatão, Brazil. *Chemosphere* 36 (4-5): 989-994.
- Klumpp, G., Furlan, C.M., Domingos, M., & Klumpp, A.** 2000. Responses of stress indicators and growth parameters of *Tibouchina pulchra* Cogn. exposed to air and soil pollution near the industrial complex of Cubatão, Brazil. *The Science of the Total Environment* 246: 79-91.
- Kolb, T.E. & Matyssek, R.** 2003. Limitations and perspectives about scaling ozone impacts in trees. *In*: D.F. Karnosky, K.E. Pery, A.H. Chappelka, C. Simpson & J. Pikkarainen (eds.). Air pollution, global change and forests in the new millennium. Elsevier, pp. 141-173.
- Krupa, S.V. & Manning, W.J.** 1988. Atmospheric ozone: formation and effect on vegetation. *Environmental Pollution* 50: 101-137.
- Krupa, S.V.** 1997. Air pollution, people and plants: an introduction. APS PRESS, St. Paul, Minnesota, 197 p.

- Krupa, S.V., Mc Grath, M.T., Andersen, C.P., Booker, F.L., Burkey, K.O., Chappelka, A.H., Chevone, B.I., Pell, E.J. & Zilinskas, B.A.** 2001. Ambient ozone and plant health. *Plant Disease* 85: 4-12.
- Kupcinskiene, E.A., Ashenden, T.W., Bell, S.A., Williams, T.G., Edge, C.P. & Rafarel, C.R.** 1997. Responses of *Agrostis capillaris* to gaseous pollutants and wet nitrogen deposition. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 66: 89-99.
- Larcher, W.** 2000. *Ecofisiologia Vegetal*. RiMa, São Carlos, pp. 436-469.
- Legge, A.H. & Krupa, S.V.** 2003. Effects of sulphur dioxide. *In: J.N.B. Bell & M. Treshow* (eds.) *Air pollution and plant life*. John Wiley & Sons, Chichester. 2nd ed., pp. 135-162.
- Leitão, H.F., Pagano, S.N., César, O., Timoni, J.L. & Rueda, J.J.** 1993. *Ecologia da Mata Atlântica em Cubatão*. Ed. UEP, Rio Claro, 184 p
- Lyons, T., Plöchl, M., Turcsányi, E. & Barnes, J.** 1999. Extracellular antioxidants: a protection screen against ozone? *In: S.B. Agrawal and M. Agrawal* (eds). *Environmental Pollution and Plant Responses*. Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 183-201.
- Lodge, J.Jr.** 1989. *Methods of air sampling and analysis*. 3 ed. Intersociety Committee, Lewis Publishers, Inc.
- Long, S.P. & Naidu, S.L.** 2003. Effects of oxidants at the biochemical, cell and physiological levels, with particular reference to ozone. *In: N. Bell & M.Treshow* (eds.). *Air pollution and plant life*. John Wiley & Sons, Chichester. 2nd ed., pp. 69-88.
- Lorenzini, G., Panicucci, A. & Nali, C.** 1995. A gas-exchange study of the differential response of *Quercus* species to long-term fumigations with a gradient of sulphur dioxide. *Water, Air and Soil Pollution* (85): 1257-1262.

- Manning, W.L., Cooley, D.R., Tuttle, A.F., Frenke, M.A., Bergweiler, C.J.** 2004. Assessing plant response to ambient ozone: growth of young apple trees in open-top chambers and corresponding ambient air plots. *Environmental Pollution* 132: 503-508.
- Manning, W.L.** 2003. Detecting plants effects is necessary to give biological significance to ambient ozone monitoring data and predictive ozone standards. *Environmental Pollution* 126: 375-379.
- Mansfield, T.A.** 2003. Nitrogen oxides: old problems and new challenges. *In: J.N.B. Bell & M. Treshow (eds.). Air pollution and plant life.* John Wiley & Sons England, pp. 119-133.
- Mayer, R., Liess, S., Lopes, M.I.M.S. & Kreutzer, K.** 2000a. Atmospheric pollution in a tropical rain forest: effects of deposition upon biosphere and hydrosphere. I. Concentrations of chemicals. *Water, Air and Soil pollution* 121: 59-78.
- Mayer, R., Liess, S., Lopes, M.I.M.S. & Kreutzer, K.** 2000b. Atmospheric pollution in a tropical rain forest: effects of deposition upon biosphere and hydrosphere. II. Fluxes of chemicals and element budgets. *Water, Air and Soil pollution* 121: 79-92.
- Mooney, H.; Winner, W.E.** 1988. Carbon gain, allocation, and growth as affected by atmospheric pollutants. *In: S. Schulte-Hostede, N.M. Darral, L.W. Blank; A.R. Welburn, (eds.). Air pollution and plant metabolism.* Elsevier, London, pp. 272-287.
- Morgan, P.B., Ainsworth, E.A. & Long, S.P.** 2003. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield. *Plant, Cell and Environment* 26: 1317-1328.
- Moraes, R.M.** 1999. Fotossíntese líquida e respostas bioindicadoras da poluição aérea em indivíduos jovens de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae), em Cubatão, SP. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 93 p.

- Moraes, R.M., Delitti, W.B.C. & Moraes, J.A.P.V.** 2000. Fotossíntese líquida e crescimento de *Tibouchina pulchra* Cogn. nas proximidades de indústrias petroquímicas, em Cubatão, SP. *Hoehnea* 27 (1): 77-85.
- 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: 367-374.
- Moraes, R.M., Furlan, C.M., Bulbovas, P., Domingos, M., Meirelles, S.T., Delliti, W.B., Salatino, A. & Sanz, M.J.** 2004. Photosynthetic responses of tropical trees to short-term exposure to ozone. *Photosynthetica* 42: 291-293.
- Moraes, R.M., Bulbovas, P., Furlan, C.M., Domingos, M., Meirelles, S.T., Delliti, W.B. & Sanz, M.J.** 2006. Physiological responses of sapling of *Caesalpinia echinata* Lam., a Brazilian tree species, under ozone fumigation. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 63: 306-312.
- Oksanen, E.J.** 2001. Increasing tropospheric ozone level reduced birch (*Betula pendula*) dry mass within a five years period. *Water, Air and Soil Pollution* 130: 947-952.
- Ollerenshaw, J.H. & Lyons, T.** 1999. Impacts of ozone on the growth and yield of field-grown winter wheat. *Environmental Pollution* 106: 67-72.
- Ormrod, D.P.** 1984. Impact of trace element pollution on plants. *In: Michael Treshow* (ed.). *Air pollution and plant life*. John Wiley & Sons, pp. 291-319.
- Pandey, J. & Agrawal, M.** 1994. Evaluation of air pollution phytotoxicity in a seasonally dry tropical urban environmental using three woody perennials. *New Phytologist* 126: 53-61.
- Pell, E.J., Eckardt, N.A. & Glick, R.E.** 1994. Biochemical and molecular basis for impairment of photosynthetic potential. *Photosynthesis Research* 39: 453-462.

- Pensa, M., Liblik, V. & Jalkanen, R.** 2004. Temporal changes in the state of a pine stand in a bog affected by air pollution in Northeast Estonia. *Water, Air and Soil Pollution* 159: 87-99.
- Percy, K.** 2003. Air pollution impacts in North America. *In: L. Emberson, M. Ashmore & F. Murray (eds.). Air pollutions on crops and forests, a global assessment* Imperial College Press. Singapore, pp. 35-57.
- Pina, J.M.** 2005. Avaliação de *Psidium guajava* ‘Paluma’ como espécie bioindicadora de ozônio na cidade de São Paulo. Monografia, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 30 p.
- Pompéia, S.L.** 1997. Sucessão secundária da Mata Atlântica em áreas afetadas pela poluição atmosférica Cubatão. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 193 p.
- Pompéia, S.L.** 2000. Respostas das plantas nativas brasileiras à poluição. *In: W. Larher. Ecofisiologia Vegetal. RiMa, São Carlos*, pp. 449-454.
- Renenberg, H.** 1984. The fate of excess sulfur in higher plants. *Annual Reviews Plant Physiology* 35: 121-153.
- Rocha, Y.T.** 2004. Ibirapitanga: história, distribuição geográfica e conservação do Pau-brasil (*Caesalpinia echinata* LAM. LEGUMINOSAE) do descobrimento à atualidade. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 396 p.
- Saltzman, B.E.** 1960. Modified nitrogen dioxide reagent for recording air analysers. *Anal. Chem.* 32: 135.
- Sandrin, C.Z., Domingos, M. & Ribeiro, R.C.L.F.** 2004. Fructan changes in *Lolium multiflorum* ssp. *Italicum* “Lema” as an indicator of urban air pollution. *In: A. Klumpp, W. Ansel & G. Klumpp (eds.). Urban Air Pollution, Bioindication and Environmental Awareness. Cuvillier Verlag, Göttingen*, pp. 293-301.

- Sant'Anna, S.M.R., Rinaldi, M.C.S. & Domingos, M.** 2004. Biomonitoring of air pollution in São Paulo city (Brazil) with *Lolium multiflorum* ssp. *italicum* "Lema". In: A. Klumpp, W. Ansel & G. Klumpp (eds.). Urban Air Pollution, Bioindication and Environmental Awareness. Cuvillier Verlag, Göttingen, pp. 303-307.
- Sanz, M.J., Porcxuna, J.L., Calvo, E. & Martín, C.** 2002a. Artichoke cultivars (var. "Blanca de Tudela") under elevated ozone concentrations. The Scientific World Journal 2: 811-817.
- Sanz, M.J., Peñas, G.S., Calatayud, V., Gallego, M.T. & Cerveró, J.** 2002b. La contaminación atmosférica de los bosques: guía para la identificación de daños visibles causados por ozono. Ministerio Del medio Ambiente, Madrid.
- Schützendübel, A. & Polle, A.** 2002. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization. Journal of Experimental Botany, vol.53, no 372. Antioxidants and Reactive Oxygen Species in Plants Special Issue, pp. 1351-1365.
- Shan, Y., Izuta, T., Aoki, M. & Totsuka, T.** 1997. Effects of O₃ and soil acidification, alone and in combination, on growth, gas exchange rate and chlorophyll content of red pine seedlings. Water, Air and Soil Pollution 97: 355-366.
- Siegwolf, R.T.W., Matyssek, R., Saurer, M., Maurer, S., Guinhardt-Goerg, M.S., Schmutz, P. & Bucher, J.B.** 2001. Stable isotope analysis reveals differential effects of soil nitrogen and nitrogen dioxide on the water use efficiency of hybrid poplar leaves. New Phytologist 149: 233-246.
- Szabo, A.V., Domingos, M., Rinaldi, M.C.S. & Delitti, W.B.C.** 2003. Acúmulo foliar de enxofre e suas relações com alterações no crescimento de plantas jovens de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) expostas nas proximidades do polo industrial de Cubatão, SP. Revista Brasileira de Botânica, São Paulo 26 (3): 379-390.

- Struffaldi-De Vuono, Y. & Marzolla, M.C.** 1984. Decomposição da serapilheira nas proximidades de uma siderúrgica. *In: Anais do IV Congresso da Sociedade Botânica de São Paulo*. Taubaté, pp. 83-86.
- Sumita, N.M., Mendes, M.E., Macchione, M., Guimarães, E.T., Lichtenfels, A.J.F.C., Lobo, D.J.A. & Saldiva, P.H.N.** 2003. *Tradescantia pallida* cv. *purpurea* Boom in the characterization of air pollution by accumulation of trace elements. *Journal of the Air & Waste Management Association* 53: 574-579.
- Tavares, R.** 2005. Poluição atmosférica da cidade de São Paulo: periderme caulinar em plantas jovens de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam. – Leguminosae/Caesalpinoideae). Dissertação de Mestrado, Instituto de Botânica de São Paulo, São Paulo, 83 p.
- Taylor, G.E. & Ferris, R.** 1996. Influence of air pollution on root physiology and growth. *In: M. Yunus & M. Iqbal (eds). Plant Growth and Air Pollution*. Wiley, London, pp. 375-393.
- Viveiros, S.C.M.** 1996. Aspectos estruturais de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) sob o impacto de poluente atmosféricos provenientes do complexo industrial de Cubatão, SP – Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 244 p.
- Zeiger, E.** 2002. The effect of air pollution on plants. *Plant Physiology*.
- Zheng, Y., Lyons, T. & Barnes, J.** 2000. Effects of ozone on the production and utilization of assimilates in *Plantago major*. *Environmental and Experimental Botany* 43: 171-180.
- Yamaji, K., Julkunen-Tiitto, R., Rousi, M., Freiwald, V. & Oksanen, E.** 2003. Ozone exposure over two growing seasons alters root-to-shoot ratio and chemical composition of birch (*Betula pendula* Roth). *Global Change Biology* 9: 1363-1377.

Wellburn, A.R. 1990. Why are atmospheric oxides of nitrogen usually phytotoxic and not alternative fertilizers? *New Phytol.* 115: 395-429.

Woodbury, P.B., Laurence, J.A. & Hudler, G.W. 1994. Chronic ozone exposure alters the growth of leaves, stems and roots of hybrid *Populus*. *Environ. Pollut.* 85: 103- 111.

8. Resumo

Os poluentes aéreos mais importantes em centros urbanos como a cidade de São Paulo, são o dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e material particulado (MP₁₀), originados principalmente da queima de combustíveis fósseis. Eles podem causar diversos efeitos nas plantas, entre os quais, alterações nos padrões de crescimento e na produção de biomassa. As populações naturais de *Caesalpinia echinata* Lam. (pau-brasil), que foi abundante ao longo da costa brasileira no passado, estão extremamente reduzidas atualmente. O uso desta espécie em centros urbanos com finalidade ornamental poderia contribuir para sua conservação. Contudo, esta ação somente será bem sucedida se a espécie tolerar as condições de estresse impostas pela poluição aérea urbana. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o crescimento de plantas jovens de *C. echinata* mantidas por 15 meses em três regiões da cidade de São Paulo com características de contaminação do ar distintas: Ibirapuera (altos níveis de O₃), Congonhas (altos níveis de MP₁₀, NO₂ e SO₂) e Pinheiros (altos níveis de MP₁₀, NO₂, SO₂ e níveis intermediários de O₃). Uma Casa de Vegetação com ar filtrado simulou um ambiente de referência com baixos níveis de poluentes aéreos. Em abril de 2002, 130 mudas de *C. echinata* com dois anos de idade, altura média de 30 cm e 4 folhas no ramo principal, foram colocadas em cada área. A cada três meses, 15 mudas foram coletadas em cada área para determinação da biomassa de raízes, caules e folhas e o cálculo da taxa de crescimento relativo. A altura da planta, o diâmetro do caule à superfície do solo, o número de folhas e de ramos foram medidos em todas as plantas. Após quinze meses no campo, as plantas das áreas poluídas apresentaram redução no crescimento em altura, aumento do número de ramos, e redução da biomassa

de folhas, caules, raízes e planta inteira. A taxa de crescimento relativo indicou que o crescimento das plantas não foi uniforme em todas as áreas e períodos de exposição. Ele foi especialmente favorecido durante o período de janeiro a abril de 2003, quando a irradiância e a temperatura foram mais altas. Análises de correlação considerando os dados de plantas de cada área e no ambiente de referência, indicaram que o crescimento de *C. echinata* foi significativamente influenciado pelas variações de MP₁₀, SO₂, NO₂, irradiância, temperatura e umidade relativa em Congonhas, de O₃, irradiância e umidade relativa no Ibirapuera - e de O₃, MP₁₀, irradiância, temperatura e umidade relativa em Pinheiros. Assim, a utilização de *C. echinata* na ornamentação urbana em locais com características ambientais semelhantes à das áreas deste estudo pode não ser viável.

9. Abstract

The most important air pollutants in the urban centers, like São Paulo city, are sulphur dioxide (SO₂), nitrogen dioxide (NO₂), ozone (O₃), and particulate material (MP₁₀), originated mainly from the burning of fossil fuels. They may cause multiple effects on plants, among them alterations in growth pattern and in the production of biomass. The natural populations of *Caesalpinia echinata* Lam. (brazilwood), which was abundant along the Brazilian coast in the past, are extremely reduced at present time. The use of this tree species for ornamentation purposes in urban centers might contribute to its conservation. However, this action will only be well succeeded if the species tolerates the actual stressing conditions imposed by urban air pollution. So, we aimed at evaluating the growth of saplings of *C. echinata* maintained for 15 months at three sites of São Paulo city, with distinct characteristics of air contamination: Ibirapuera (high levels of O₃), Congonhas (high levels of MP₁₀, NO₂ and SO₂) and Pinheiros (high levels of MP₁₀, NO₂, SO₂ and intermediate levels of O₃). A greenhouse with filtered air simulated a reference environment with low levels of air pollutants. In April 2002, 130 2 year-old saplings of *C. echinata*, having in average 30 cm high, 4 leaves and no branches, were taken to each site. Every three months, 15 saplings of each site were sampled for determination of biomass of roots, stems and leaves and calculation of relative growth rate and plant height, stem diameter at soil surface, number of leaves and of branches were measured in all remaining plants. After fifteen months in the field, the plants from polluted sites presented reduced height, higher number of branches, as well as reduced biomass of leaves, branches, roots and of the whole-plant. The relative growth rates indicated that saplings in all sites did not grow uniformly during all the exposure period. The growth was especially favored during

January to April 2003, when irradiance and temperatures were higher. Correlation analysis, taking in account the data from plants exposed at each site and at the reference environment, indicated that the growth of *C. echinata* was significantly influenced by variations in MP10, SO₂, NO₂, irradiance, temperature and relative humidity at Congonhas, in O₃, irradiance and relative humidity at Ibirapuera - and in O₃, MP10, irradiance, temperature and relative humidity at Pinheiros. Thus, the urban ornamentation using *C. echinata* may not be viable in sites with similar environmental characteristics to those observed at the exposure sites.