



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro Biomédico
Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes

Thaís Jorge de Vasconcellos

Dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna em ambientes florestal e urbano no estado do Rio de Janeiro, Brasil: estrutura anatômica do câmbio e do lenho, dendrocronologia e dendroquímica

Rio de Janeiro
2016

Thaís Jorge de Vasconcellos

Dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna em ambientes florestal e urbano no estado do Rio de Janeiro, Brasil: estrutura anatômica do câmbio e do lenho, dendrocronologia e dendroquímica

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Biologia Vegetal.
Área de Concentração: Conservação e Utilização da Biodiversidade

Orientadora: Profa. Dra. Cátia Henriques Callado

Rio de Janeiro

2016

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC-A

V331 Vasconcellos, Thais Jorge de.
Dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.)
Ravenna em ambientes florestal e urbano no estado do Rio de Janeiro,
Brasil: estrutura anatômica do câmbio e do lenho, dendrocronologia e
dendroquímica / Thais Jorge de Vasconcellos – 2016.

163 f.

Orientadora: Cátia Henriques Callado.

Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade do Estado do
Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.

1. Madeira – Rio de Janeiro (RJ) – Teses. 2. Poluição – Rio de
Janeiro (RJ) – Teses.. I. Callado, Cátia Henriques. II. Universidade do
Estado do Rio de Janeiro. Instituto de Biologia Roberto Alcântara
Gomes. III. Título.

CDU 630.24(861)

Autorizo apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta tese,
desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Thaís Jorge de Vasconcellos

Dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna em ambientes florestal e urbano no estado do Rio de Janeiro, Brasil: estrutura anatômica do câmbio e do lenho, dendrocronologia e dendroquímica

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Biologia Vegetal. Área de Concentração: Conservação e Utilização da Biodiversidade.

Aprovada em:
Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Cátia Henriques Callado
Instituto de Biologia – UERJ

Prof^a. Dra. Maura Da Cunha
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

Prof^a. Dra. Helena Regina Pinto Lima
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Prof^a. Dra. Norma Albarello
Instituto de Biologia – UERJ

Prof^o. Dr. Gustavo Caldeirucio Duque Estrada
Faculdade de Oceanografia - UERJ

Rio de Janeiro

2016

DEDICATÓRIA

À minha família linda e abençoada.

AGRADECIMENTOS

Parafrazeando Clarice Lispector, quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado com certeza vai mais longe. Esta tese só pôde ser concluída graças às companhias incríveis que tive ao longo destes quatro anos e que não pouparam esforços para me ajudar. Agradeço-lhes de todo o meu coração.

À Dra. Cátia Henriques Callado, por toda dedicação em me orientar nestes quase 10 anos de laboratório. Pela paciência, companheirismo e confiança depositados em mim. Tenho muito orgulho de fazer parte de sua equipe!

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação Oswaldo Cruz pela acolhida e permissão em realizar este estudo em seu *Campus*. Agradecimento especial a Victor Zanon, Miguel Brück e Jorge Tardan, pela atenção e disposição em todas as coletas.

A Walter da Silva, por seus valiosos conhecimentos de vida e pelo auxílio nos trabalhos de campo. Ao Carlos, João e Warlen pela disponibilidade e ajuda nas coletas. À Nattacha, Vanessa, Daiane e Lucas pelo auxílio nas coletas, na organização dos dados e na confecção de lâminas histológicas.

Aos Drs. Gustavo Estrada, Maura Da Cunha, Arno Brandes, Luiz Fernando de Moraes, Tahysa Macedo e Cláudia Barros pelas discussões valiosas. À Msc Brunna Tomaino pela amizade e auxílio nas análises climáticas e dendrocronológicas.

A todos do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz pela acolhida durante o processamento das amostras para a Dendrocronologia.

A todos do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas da UERJ, principalmente ao Professor Marcelino dos Anjos e Ramon, Raysa e Francis, pelas análises de concentração química elementar do solo e dos anéis de crescimento e também pela companhia memorável durante a “fase radioativa” da minha vida.

Aos meus amigos do LAV - UERJ, em especial Maxmira, Monique, Jeanne, Silvana e Nattacha por acompanharem toda minha jornada, por torcerem por cada vitória desta tese e por alegrarem os meus dias.

Aos queridos amigos não-botânicos, que discutiram resultados mesmo não compreendendo totalmente e que me dão forças para continuar pesquisando. Em especial à amiga Isabela Lima, que os representa muito bem.

Aos meus pais e irmãos, por compreenderem minhas ausências, por darem o melhor amor e aconchego nas horas difíceis e por me aguentarem falando desta tese por tantos anos! Ao meu esposo André, pelo amor e carinho durante todos os 12 anos juntos. Por acreditar e incentivar os meus sonhos, ajudando a torná-los possíveis.

A Deus e à Nossa Senhora, que me guardaram e guiaram!

Nunca houve noite que pudesse impedir
O nascer do sol e a esperança
E não há problema que possa impedir
As mãos de Jesus pra me ajudar.
“Sou um milagre”. Carlos A. Moysés

RESUMO

VASCONCELLOS, T.J. Dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna em ambientes florestal e urbano no estado do Rio de Janeiro, Brasil: estrutura anatômica do câmbio e do lenho, dendrocronologia e dendroquímica. 2016. 163 f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes.

A poluição urbana é um dos problemas ambientais mais significativos do mundo atual, que ameaça a saúde humana e ambiental. Estudos que avaliaram o impacto da poluição ambiental em espécies arbóreas verificaram modificações na estrutura e na duração da atividade do câmbio, na xilogênese e, conseqüentemente, na produção e na qualidade da madeira. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da poluição urbana sobre a estrutura do câmbio de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) e seu reflexo na estrutura e periodicidade de formação da madeira. Foram avaliadas ainda, as concentrações químicas elementares de amostras de lenho e de solo dos sítios de estudo. Dois sítios de estudo foram selecionados: um florestal e outro sob poluição urbana. As amostras de caule foram coletadas com o auxílio de sonda de Pressler, processadas e analisadas segundo técnicas usuais de anatomia vegetal e dendrocronologia. Os elementos químicos presentes nos anéis de crescimento e em amostras de solo foram determinados a partir da técnica de fluorescência de Raios X por dispersão de energia (EDXRF). Os resultados obtidos evidenciaram diferenças significativas na estrutura do câmbio e do lenho das árvores localizadas nos dois sítios de estudo. No sítio urbano, o câmbio apresentou células iniciais fusiformes menores e alargamento dos agrupamentos de iniciais radiais, futuros raios parenquimáticos. Os resultados observados no câmbio se refletiram na anatomia do lenho. No sítio urbano, as árvores apresentaram elementos de vaso e fibras mais curtas e raios vasculares em maior frequência e maior largura. Quanto à dinâmica de crescimento radial, as árvores do sítio urbano apresentaram taxas de incremento maiores desde o crescimento inicial e, conseqüentemente, idades inferiores quando comparados diâmetros similares. Assim, as árvores de ambos os sítios alcançaram valores semelhantes de incremento acumulado com diferença de aproximadamente 20 anos de idade. A correlação entre as cronologias construídas em cada sítio e os fatores climáticos mostrou uma associação positiva entre períodos quentes e chuvosos e o crescimento. No entanto, observou-se uma resposta imediata das árvores urbanas em relação a esses fatores. No solo de ambos os sítios foram observados 16 elementos químicos, incluindo metais pesados altamente tóxicos, como cobre, níquel e chumbo. O sítio urbano apresentou no solo menor concentração de elementos essenciais para a nutrição das plantas, como potássio e manganês, e níveis mais altos de metais pesados: cromo, cobre e chumbo. A análise química dos anéis de crescimento revelou a presença de 11 elementos químicos fixados no lenho de ambos os sítios, dentre estes estão bromo e metais pesados como zinco e rubídio. O acúmulo de poluentes atmosféricos provenientes da urbanização e a dinâmica climática urbana, como aumento da temperatura e diminuição das chuvas, influenciam diretamente a fisiologia vegetal. Estas características urbanas são as principais causas das diferenças observadas na dinâmica de crescimento e no acúmulo de elementos químicos no lenho de *C. speciosa*.

Palavras-chave: Produção de madeira, Poluição urbana, Plasticidade fenotípica, Floresta Tropical

ABSTRACT

VASCONCELLOS, T.J. Radial growth dynamics of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna in forest and urban environments in the state of Rio de Janeiro, Brazil: cambial and wood anatomical structure, dendrochronology and dendrochemistry. 2016. 163f. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Biologia Roberto Alcantara Gomes. 2016.

Urban pollution is one of the most significant environmental problems of world, that threatens human and environmental health. Studies evaluating the impact of environmental pollution on tree species found changes in the structure and duration of cambium activity, in xylogenesis and consequently in the production and quality of the wood. In this context, the aim of this study was evaluate the impact of urban pollution on the cambial structure of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) and effect in the wood structure and wood formation. The elementary chemical concentrations wood samples and soil samples of the study sites were also evaluated. Two study sites were selected: a forest and another under urban pollution. The stem samples were collected with the Pressler probe and processed and analyzed according to the usual techniques of plant anatomy and dendrochronology. The chemicals present in the growth rings and soil samples were determined from the Energy Dispersive X-ray Fluorescence technique (EDXRF). The results showed significant differences in the cambium and the wood structure of trees located in the two study sites. In urban area, the cambium showed lower fusiform initial cells and enlargement of the radial initial clusters, future parenchyma rays. The results observed in the cambium were reflected in wood anatomy. In urban area, the trees showed the shorter vessels and fibers, and rays more frequent and with larger width. Regarding dynamics of radial growth, the trees of the urban site had higher growth rates since the early growth and showed lower ages. The trees of both sites reaching values similar accumulated increment with a difference of about 20 years of age. The correlation between the chronologies and climatic factors showed a positive association between radial growth and hot and rainy periods. However, it was observed an immediate response of urban trees in relation to these factors. On the soil of both sites were observed 16 chemical elements, including highly toxic heavy metals such as copper, nickel and lead. The urban site showed the ground lower concentration of essential elements for plant nutrition, such as potassium and manganese, and higher levels of heavy metals: chromium, copper and lead. Chemical analysis of growth rings revealed the presence of 11 chemical elements fixed in the wood of both sites, among which are brome and heavy metals, such as zinc, and rubidium. The accumulation of air pollutants from urbanization and urban climate dynamics, as rising temperatures and decreasing rainfall, directly influence plant physiology. These urban features are the main causes of the observed differences in growth dynamics and the accumulation of chemicals in the *C. speciosa* wood.

Keywords: Wood production, urban pollution, phenotypical plasticity, Tropical Rainforest

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Aspecto geral das características morfológicas de <i>Ceiba speciosa</i> | 26 |
| Figura 2 - Mapa contendo os pontos de distribuição geográfica de <i>Ceiba speciosa</i> , construído a partir de Gibbs; Semir (2003)..... | 27 |
| Figura 3 - Mapas mostrando a localização dos sítios de estudo no estado do Rio de Janeiro.. | 29 |
| Figura 4 - Índices climáticos e de balanço hídrico dos sítios florestal e urbano. | 30 |
| Figura 5 - Coleta não destrutiva de amostras do caule de <i>Ceiba speciosa</i> para análise da estrutura anatômica da zona cambial. | 35 |
| Figura 6 - Seções transversal (A) e longitudinal tangencial (B) da zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> , indicando os locais onde foram realizadas as contagens e mensurações dos parâmetros selecionados para análise da zona cambial..... | 36 |
| Figura 7 - Fase de dormência cambial de <i>Ceiba speciosa</i> nos sítios florestal (A-C) e urbano (D-F). | 38 |
| Figura 8 - Fase de atividade cambial de <i>Ceiba speciosa</i> nos sítios florestal (A-B) e urbano (C-D). | 39 |
| Figura 9 - Seções longitudinais tangenciais da zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo no sítio urbano, durante a fase de dormência..... | 41 |
| Figura 10 - Resultados obtidos no teste ANOVA fatorial para os parâmetros aferidos em seções transversais à zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> | 43 |
| Figura 11 - Resultados obtidos no teste ANOVA fatorial para os parâmetros aferidos em seções tangenciais à zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> | 45 |
| Figura 12 - Seções histológicas do lenho de <i>Ceiba speciosa</i> provenientes do sítio florestal (A-F) e do sítio urbano (G)..... | 57 |
| Figura 13 - Células do lenho de <i>Ceiba speciosa</i> desenvolvendo-se nos sítios florestal (A-C) e urbano (D-F). | 58 |
| Figura 14 - Seções longitudinais radiais do lenho <i>Ceiba speciosa</i> desenvolvendo-se no sítio florestal (A) e no sítio urbano (B)..... | 59 |
| Figura 15 - Box-plots dos parâmetros anatômicos quantitativos, aferidos no lenho de <i>Ceiba speciosa</i> nos sítios florestal e urbano, referentes aos elementos de vaso e às pontoações associadas a estes. | 62 |

| | |
|--|-----|
| Figura 16 - Box-plots dos parâmetros anatômicos quantitativos, aferidos no lenho de <i>Ceiba speciosa</i> nos sítios florestal e urbano, referentes às fibras e às pontoações associadas a estas. | 63 |
| Figura 17 - Box-plots dos parâmetros anatômicos quantitativos, aferidos no lenho de <i>Ceiba speciosa</i> nos sítios florestal e urbano, referentes às células parenquimáticas, axiais e radiais | 64 |
| Figura 18 - Obtenção de amostras de lenho de <i>Ceiba speciosa</i> para análise dendrocronológica | 73 |
| Figura 19 - Taxas de incremento radial acumulado de árvores de <i>Ceiba speciosa</i> em ambiente florestal (A) e sob poluição urbana (B)..... | 77 |
| Figura 20 - Cronologias construídas com base na largura dos anéis de crescimento do caule de <i>Ceiba speciosa</i> em ambiente florestal (A) e sob poluição urbana (B)..... | 78 |
| Figura 21 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo no sítio urbano e os índices de precipitação. | 79 |
| Figura 22 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo no sítio florestal e os índices de precipitação. | 80 |
| Figura 23 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo no sítio urbano e os índices de temperatura..... | 81 |
| Figura 24 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo no sítio florestal e os índices de temperatura..... | 82 |
| Figura 25 - Processamento e análise de amostras de solo dos dois sítios de estudo. | 91 |
| Figura 26 - Concentração química elementar ($\mu\text{g/g}$) observada em amostras de solo dos sítios de estudo. | 93 |
| Figura 27 - Avaliação da composição química elementar dos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> com o uso do sistema comercial ARTAX 200..... | 101 |
| Figura 28 - Concentrações de potássio nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 105 |
| Figura 29 - Concentrações de cálcio nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| Figura 30 - Concentrações de cloro nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 107 |
| Figura 31 - Concentrações de manganês nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 108 |
| Figura 32 - Concentrações de estrôncio nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 109 |
| Figura 33 - Concentrações de ferro nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 110 |
| Figura 34 - Concentrações de enxofre nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 111 |
| Figura 35 - Concentrações de bromo nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 112 |
| Figura 36 - Concentrações de rubídio nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 113 |
| Figura 37 - Concentrações de titânio nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 114 |
| Figura 38 - Concentrações de zinco nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> em sítios florestal e urbano..... | 115 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Valores de precipitação acumulada e de temperaturas anuais máxima, média e mínima das cidades de Nova Iguaçu (sítio florestal) e do Rio de Janeiro (sítio urbano)..... | 30 |
| Tabela 2 - Características dendrológicas das árvores de <i>Ceiba speciosa</i> utilizadas para a avaliação do comportamento foliar e da estrutura anatômica do câmbio nos sítios de estudo..... | 34 |
| Tabela 3 - Parâmetros quantitativos (media e desvio padrão) aferidos na zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> nas fases de crescimento e aos sítios de estudo..... | 40 |
| Tabela 4 - Resultados do teste ANOVA (F) para os parâmetros aferidos nas amostras da zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> em relação à fase do crescimento e aos sítios de estudo..... | 47 |
| Tabela 5 - Índices de plasticidade fenotípica calculados para cada parâmetro aferido a partir de amostras da zona cambial de <i>Ceiba speciosa</i> . Os índices foram calculados para cada fase de crescimento nos sítios estudados e para cada sítio, desconsiderando os períodos de crescimento..... | 48 |
| Tabela 6 - Características dendrológicas das árvores de <i>Ceiba speciosa</i> utilizadas para a avaliação da estrutura anatômica do lenho nos sítios de estudo..... | 55 |
| Tabela 7 - Análise dos parâmetros quantitativos aferidos na estrutura do lenho de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo nos sítios de estudo e os resultados estatísticos dos testes t-Student e Mann-Whitney..... | 60 |
| Tabela 8 - Índices de vulnerabilidade, mesomorfia e condutividade hidráulica do xilema secundário de <i>Ceiba speciosa</i> crescendo nos sítios de estudo..... | 61 |
| Tabela 9 - Índices de plasticidade fenotípica calculados para cada parâmetro anatômico aferido no lenho de <i>Ceiba speciosa</i> | 61 |
| Tabela 10 - Análise dendrocronológica das árvores de <i>Ceiba speciosa</i> nos sítios de estudo .. | 74 |
| Tabela 11 -Valores de concentração (mg/kg) dos elementos químicos encontrados em amostras de solo de cada sítio de estudo, e os valores estatísticos de comparação (t e Z) e de significância (p) entre os sítios..... | 92 |
| Tabela 12 - Teste ANOVA para medidas repetidas realizado entre os elementos químicos detectados nos anéis de crescimento de <i>Ceiba speciosa</i> e as variáveis: sítios de estudo (florestal e urbano) e anos de crescimento..... | 103 |

Tabela 13 - Teste de correlação de Pearson entre os valores anuais de concentração de cada elemento químico e as cronologias residuais construídas para cada sítio. 104

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO GERAL | 16 |
| 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 18 |
| 1.1 Dinâmica de crescimento radial | 18 |
| 1.2 Principais poluentes urbanos..... | 20 |
| 1.3 Vias de absorção e fixação de elementos químicos em plantas..... | 22 |
| 1.4 Impacto da poluição ambiental na estrutura das plantas..... | 23 |
| 1.5 Espécie estudada | 24 |
| 1.6 Sítios de estudo..... | 27 |
| 2 OBJETIVOS | 31 |
| 2.1 Objetivo geral..... | 31 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 31 |
| 3 ESTRUTURA ANATÔMICA DO CÂMBIO | 32 |
| 3.1 Introdução | 32 |
| 3.2 Material e Métodos..... | 33 |
| 3.3 Resultados | 37 |
| 3.4 Discussão | 49 |
| 4 ESTRUTURA ANATÔMICA DO LENHO | 52 |
| 4.1 Introdução | 52 |
| 4.2 Material e métodos | 53 |
| 4.3 Resultados | 55 |
| 4.4 Discussão | 65 |
| 5 DENDROCRONOLOGIA E DENDROCLIMATOLOGIA..... | 70 |
| 5.1 Introdução | 70 |
| 5.2 Material e Métodos..... | 71 |
| 5.3 Resultados | 73 |
| 5.4 Discussão | 83 |
| 6 ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR DO SOLO..... | 89 |
| 6.1 Introdução | 89 |
| 6.2 Material e métodos | 90 |
| 6.3 Resultados | 91 |
| 6.4 Discussão | 94 |

| | |
|--|------------|
| 7 ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO..... | 98 |
| 7.1 Introdução | 98 |
| 7.2 Material e métodos | 99 |
| 7.3 Resultados | 101 |
| 7.4 Discussão | 116 |
| 8 CONCLUSÕES..... | 120 |
| REFERÊNCIAS | 122 |
| APÊNDICE - Teste de Tukey | 148 |
| APÊNDICE - Primeiro artigo da tese publicado..... | 150 |

INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas, a poluição se tornou um dos principais problemas ambientais. A ampliação dos grandes centros urbanos e a queima de combustíveis fósseis para a geração de energia nas indústrias e para veículos automotores estão entre as principais causas do aumento da poluição ambiental (FREEDMAN 1995; SMITH et al. 1999; MARTINS 2009). Além disso, a expansão do uso da terra para os interesses humanos tem sido considerada a principal responsável pela perda de biodiversidade em ecossistemas terrestres (DOMINGOS et al. 2015). É nesse contexto, que destacamos a Mata Atlântica, bioma no qual estão localizados os maiores centros urbanos brasileiros e que atualmente apresenta-se sensivelmente fragmentada e com pouco mais de 10% de sua cobertura original (por exemplo: RIBEIRO et al. 2009; FREITAS et al. 2010; LIRA et al. 2012, LIMA et al. 2015; SCARANO; CEOTTO 2015). Apesar disso, até o momento, apenas um estudo, desenvolvido no estado de São Paulo, avaliou os impactos da urbanização na dinâmica de crescimento radial de duas espécies nativas deste bioma (CHAGAS 2013).

O presente estudo propõe investigar a dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* em duas áreas no domínio do bioma Mata Atlântica no Brasil: um remanescente florestal sob preservação ambiental e uma área sob intenso impacto antrópico. A partir da hipótese que a estrutura anatômica do câmbio e da madeira, assim como a composição química elementar do solo e da madeira ao longo dos anos são influenciadas pelas condições de crescimento nas cidades.

Esta tese está organizada em oito seções. As duas primeiras apresentam a fundamentação teórica dos temas abordados, as características gerais da espécie avaliada e dos sítios de estudo e os objetivos deste trabalho. A terceira seção apresenta os resultados relativos à estrutura anatômica do câmbio de *Ceiba speciosa* e sua relação com o comportamento foliar e a sazonalidade climática em ambiente florestal e sob poluição urbana. Esses dados foram publicados na revista *Environmental Science and Pollution Research*, intitulado: “A comparative study of cambium histology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) under urban pollution”, em 7 de janeiro de 2016. Na quarta seção, a estrutura do lenho de árvores de *Ceiba speciosa* crescendo em ambiente florestal e sob poluição urbana é comparada e os índices ecológicos de mesomorfia, vulnerabilidade e condutividade hidráulica são avaliados. Esses dados estão sendo organizados e serão

submetidos ao *IAWA Journal*. Na quinta seção, são investigadas as idades e as taxas de crescimento das árvores de *Ceiba speciosa*, em cada sítio de estudo, por meio dos anéis de crescimento (dendrocronologia) e a relação dos anéis de crescimento com a sazonalidade climática (dendroclimatologia). Esses dados estão sendo organizados e serão submetidos à revista *Dendrochronologia*. Na sexta sessão, é analisada a concentração química de amostras do solo de cada sítio de estudo. Esses resultados estão sendo organizados e serão submetidos para publicação à revista *Geoderma*. A sétima sessão analisa a presença e a concentração de elementos químicos armazenados nos anéis de crescimento ao longo dos anos de vida das árvores de cada sítio de estudo. Esses resultados estão sendo organizados e serão submetidos à revista *Science of the Total Environment*. A oitava e última seção apresenta a conclusão dos resultados obtidos neste estudo.

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Dinâmica de crescimento radial

Nas plantas, a produção de novas células se dá, principalmente, pela divisão e diferenciação de tecidos que permanecem com características embrionárias, localizados nos ápices e nas laterais de raízes e caules. Esses tecidos são denominados meristemas e, de modo geral, apresentam períodos de atividade e dormência na produção de células. Os meristemas apicais, de raiz e caule, são responsáveis pelo crescimento em altura do vegetal, enquanto que os meristemas laterais, câmbio e felogênio, são responsáveis pelo crescimento em diâmetro (KOZLOWISKI; PALLARDY 1997; EVERT 2013). Apesar dos avanços no conhecimento acerca dos meristemas laterais, principalmente quanto ao câmbio, a compreensão de sua estrutura e desenvolvimento, sobretudo nos trópicos, ainda é incipiente (ELO et al. 2009; PRISLAN et al. 2013; CALLADO et al. 2013, 2014).

O câmbio consiste de camadas de células que possuem dimensões radiais pequenas e não apresentam espaços intercelulares. Este difere dos outros meristemas por apresentar dois tipos de células meristemáticas: as iniciais radiais, que são isodiamétricas e se diferenciam basicamente em células de raios, e as iniciais fusiformes, que são alongadas em forma de fuso e que, de modo geral, se diferenciam nos elementos axiais (GRICAR et al. 2012). O câmbio é responsável por formar os tecidos vasculares secundários no corpo da planta: xilema e floema. Sua atividade é controlada geneticamente e seu ritmo, determinado por fatores evolutivos sob limitações nutricionais, hormonais e ambientais diversas, incluindo, por exemplo, competição, poluição e ataques de patógenos (CALLADO 2001). Os requisitos mais importantes para a atividade do câmbio são: luz, temperatura apropriada para um alto nível de síntese metabólica, suprimento adequado de carboidratos, de substâncias nitrogenadas e minerais e água suficientes para manter as células em condições de turgescência. Sob condições específicas, cada um desses fatores pode prevalecer sobre os outros e influenciar o crescimento de forma determinante. As flutuações regulares de um ou mais desses fatores estabelecem condições favoráveis e desfavoráveis para o crescimento das plantas, condicionando um ritmo periódico de desenvolvimento (KOZLOWISKI; PALLARD 1997; SAVIDGE 2001; GROOVER; ROBISCHON 2006; ELO et al. 2009; CALLADO et al. 2001b,2010; GRICAR et al. 2012; CALLADO et al. 2013, 2014).

A atividade do câmbio é determinante para a quantidade e a qualidade da madeira produzida (BEGUM et al. 2012) e seu entendimento se torna essencial para elucidar aspectos da anatomia do lenho e da periodicidade de formação dos anéis de crescimento. Diversos estudos analisaram o crescimento radial de espécies tropicais visando compreender a fisiologia, a periodicidade e as respostas do câmbio aos fatores ambientais. Esses estudos destacam que, apesar da falta de estações climáticas definidas, a sazonalidade das chuvas e do fotoperíodo têm importante papel na divisão e diferenciação das células cambiais de espécies tropicais. Relatam ainda, que durante o período de atividade, a zona cambial tende a apresentar maior número de camadas celulares e são formadas por células mais estreitas e com paredes mais delgadas. Ao contrário, no período de dormência, o câmbio apresenta menor número de camadas celulares, células com maior diâmetro e paredes mais espessas, e os tecidos secundários adjacentes ao câmbio apresentam-se diferenciados. Os períodos de atividade normalmente ocorrem em meses mais quentes, chuvosos e que apresentam maior duração dos dias, enquanto que, os períodos de dormência normalmente são observados em meses secos, frios e dias mais curtos (por exemplo: BORCHERT 1999; MARCATI et al. 2006; 2008; CALLADO et al. 2013, 2014; COSTA et al. 2013; BRANDES et al. 2015).

O crescimento periódico, decorrente da atividade sazonal do câmbio, pode ficar registrado no xilema secundário e ser avaliado a partir das diferentes camadas celulares formadas. O conjunto de camadas celulares, que inclui as células formadas durante a fase de crescimento ativo e as que se formam antes da parada da atividade do câmbio, denomina-se anel de crescimento (SCHWEINGRUBER 2007). Essas camadas são denominadas lenho inicial e lenho tardio, respectivamente, e constituem um anel de crescimento típico. O lenho inicial, porção do anel produzida durante a estação de crescimento, em condições mais favoráveis ao crescimento, apresenta células com lumens maiores e paredes delgadas. O lenho tardio, formado ao final da estação de crescimento, em condições ambientais menos favoráveis ao crescimento, possui células com lumens menores e paredes mais espessas (FRITZ 1972; COSTA et al. 2012).

A dendrocronologia (*dendron* = madeira, *chronos* = tempo e *logus* = estudo) é definida como a ciência que analisa e interpreta o crescimento anual das árvores, a partir da análise dos anéis de crescimento presentes na madeira. Por meio desta ciência, é possível determinar a idade, as taxas e o histórico (recente e pretérito) de crescimento das plantas lenhosas (KAENNEL; SCHWEINGRUBER 1995; GONÇALVES 2007). As oscilações de temperatura, umidade, radiação solar e outros fatores ambientais são capazes de ficar armazenados nos anéis de crescimento (GONÇALVES 2007; CALLADO et al. 2001b;

CALLADO 2010). Assim, esses anéis refletem as condições ambientais e as alterações ocorridas ao longo do tempo de vida de uma planta, podendo ser utilizados como um arquivo ambiental em estudos de dendrocronologia (SPIECKER 2002; OLIVEIRA et al. 2009; CALLADO 2010). Apesar da gama diferenciada de aplicação desses estudos, a maioria das investigações está voltada à análise dos aspectos climáticos. Poucas cronologias são desenvolvidas para outras aplicações ecológicas, como, por exemplo, para compreensão da dinâmica de remanescentes florestais, determinação dos padrões de crescimento das espécies arbóreas e localização temporal de distúrbios ambientais ou outros eventos ecológicos (WORBES et al. 2003; GRAU et al. 2003; OLIVEIRA et al. 2009; CALLADO 2010; CALLADO; GUIMARÃES 2010). Da mesma forma, são poucos os estudos que visam estabelecer uma relação entre as alterações no crescimento das árvores e as mudanças ambientais recentes, como por exemplo, os impactos da poluição ambiental (SCHMITT 2000; SPIECKER 2002; SILVA et al. 2010; KHAN et al. 2007; WANI; KHAN 2010).

1.2 Principais poluentes urbanos

O ambiente urbano apresenta uma mistura complexa de poluentes atmosféricos. A composição exata dessa mistura varia de cidade para cidade, ao longo do tempo e de acordo com as fontes de emissão (HONOUR et al. 2009). Até meados da década de 80, a poluição atmosférica urbana era atribuída basicamente às emissões industriais. Nas décadas seguintes, com a expansão dos centros urbanos, a frota veicular aumentou significativamente a poluição e a, conseqüente, degradação da qualidade do ar, principalmente nas regiões metropolitanas do Brasil (VIVES et al. 2007; MEDEIROS et al. 2008; INEA 2011). Segundo o Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, as fontes móveis são responsáveis por 77% do total de poluentes emitidos para a atmosfera, enquanto as fontes fixas contribuem com 22% (FEEMA 2004; OLIVEIRA 2008). A degradação da qualidade do ar tornou-se um problema ambiental dos mais significativos tanto nos países desenvolvidos como naqueles em desenvolvimento. A qualidade do ar urbano, em algumas regiões, tem-se tornado uma ameaça à saúde e bem-estar das pessoas e do ambiente em geral (SMITH et al. 1999; ROSENFELD 2000; OSTRO 2004; FEEMA 2004; MARTINS 2009; DARGAH et al. 2007).

A queima de biomassa, utilizada desde a pré-história para produção de energia, tem sido uma fonte antropogênica de poluição atmosférica importante (FREEDMAN 1995; CANÇADO et al. 2006). Foi a partir da Revolução Industrial que surgiram as mais preocupantes fontes de poluição do ar devido à queima de combustíveis fósseis nos motores de máquina sem indústrias e, posteriormente, de veículos automotivos (FREEDMAN 1995; SMITH et al. 1999; MARTINS 2009). Toda essa transformação ocorreu gradativamente sem uma avaliação a respeito da toxicidade dos resíduos produzidos e seu impacto sobre o ambiente e saúde dos seres vivos (ROSENFELD 2000; CASTRO et al. 2003; CANÇADO et al. 2006; STEINLE et al. 2013).

Os poluentes atmosféricos podem ser divididos em duas categorias: poluentes primários, quando emitidos diretamente pelas fontes de emissão; e poluentes secundários, formados por reações químicas entre poluentes primários e outros constituintes da atmosfera (FREEDMAN 1995; KAMPAS; CASTANAS 2008). Entre os poluentes primários destacam-se: dióxido de enxofre (SO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), óxidos de nitrogênio (NO_x), amônia (NH_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Entre os poluentes secundários, são mais frequentes: peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ácido sulfúrico (H_2SO_4), ácido nítrico (HNO_3), trióxido de enxofre (SO_3), nitratos (NO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}) e ozônio (O_3) (FREEDMAN 1995; MARTINS 2009).

Os poluentes atmosféricos que mais afetam os organismos vivos são chamados de elementos-traço e ocorrem em concentrações de parte por milhão (ppm) ou bilhão (ppb) (CHAGAS 2013). Estes elementos podem ser componentes naturais da crosta terrestre, mas também são emitidos através da queima de combustíveis e atividades industriais (BAKER et al. 1994; PIERANGELI et al. 2004; KAMPAS; CASTANAS 2008). Alguns desses elementos são denominados micronutrientes ou elementos-traço essenciais, requeridos pela maioria dos organismos vivos em pequenas concentrações, mas que podem causar toxicidade quando em excesso, tais como cobre, manganês, ferro e zinco, essenciais às plantas e animais, e boro, molibdênio, níquel, essenciais principalmente às plantas (FREEDMAN 1995; PIERANGELI et al. 2004; CHAGAS 2013). Os elementos que não apresentam funções biogeoquímicas essenciais são chamados de elementos não-essenciais ou elementos tóxicos (arsênio, cádmio, mercúrio, chumbo, plutônio, antimônio, tálio, urânio) e causam efeitos deletérios sobre vários componentes da biosfera (FREEDMAN 1995; PIERANGELI et al. 2004).

1.3 Vias de absorção e fixação de elementos químicos em plantas

As plantas que conseguem sobreviver em ambientes contaminados têm a capacidade de evitar a entrada de elementos tóxicos ou mesmo a de assimilar, sem se intoxicar de forma letal, elementos não essenciais ao seu metabolismo, tais como: arsênio, cádmio, cromo e chumbo (HALL 2002; SALT et al. 2006). Algumas espécies, inclusive chamadas de hiperacumuladoras, são tolerantes à contaminação e podem extrair e armazenar concentrações extremamente elevadas de contaminantes, sendo muitas vezes utilizadas em sistemas de fitorremediação (GRATÃO et al. 2005; PAZ-ALBERTO;SIGUA 2013). A maioria das plantas cultivadas em solos com a presença de metais tem mecanismos que excluem esses elementos potencialmente tóxicos de formas variadas, como por exemplo, usando suas raízes como bombas de metais de volta para o solo, produzindo proteínas antidanos no citosol ou, ainda, armazenando de forma inerte nos vacúolos celulares (VAN HOOFF et al. 2001; HALL 2002; SALT et al. 2006). As respostas das plantas, sejam estas tolerantes ou não, ao excesso de elementos químicos podem ser observadas tanto em nível macroscópico, pela menor capacidade de germinação das sementes, pelo aparecimento de cloroses e necroses, pela queda de folhas ou diminuição no crescimento, como em níveis genético, anatômico, fisiológico ou bioquímico (ELLENBERG et al. 1991; GRATÃO et al. 2005; TAIZ; ZEIGER 2013; LEMOS 2015).

As rotas de absorção e de fixação de nutrientes têm início a partir das raízes, folhas e casca e de forma subsequente são transportados pelo xilema e floema (por exemplo: LEPP 1975; TAIZ; ZEIGER 2013). O sistema radicular se destaca como principal acesso dos elementos químicos nas plantas (por exemplo: RASKIN et al. 1994; TAIZ; ZEIGER 2013). Os nutrientes se movem em direção à raiz tanto por fluxo de massa, resultante da transpiração, quanto por difusão, a favor de gradiente de concentração. A partir do fluxo de massa, os nutrientes são carregados pela água, que se move do solo até as raízes, e a quantidade de nutrientes depende da taxa de fluxo de água, que por sua vez depende das taxas de transpiração e dos níveis de nutrientes na solução do solo (por exemplo: LEPP 1975; TAIZ; ZEIGER 2013).

A maioria das plantas também pode absorver nutrientes pelas folhas (TAIZ; ZEIGER 2013). Praticamente, todos os elementos-traço podem ser encontrados na água da chuva e grande parte deles tem sido detectada em altas concentrações na superfície de folhas expostas à poluição (BLAGOJEVIĆ et al. 2009; ECHEM; KABARI 2013). A entrada desses elementos

químicos ocorre por difusão através da cutícula e absorção pelas células da epiderme ou, mesmo, pelos estômatos, quando na forma gasosa (TAIZ; ZEIGER 2013). Alguns poluentes atmosféricos, como sulfatos e nitratos, também podem ficar retidos no caule, em função de uma deposição seca ou úmida sobre a cascadas árvores, por onde são absorvidos. Por este motivo, a casca tem sido frequentemente utilizada no monitoramento passivo da poluição atmosférica (LEPP 1975; BELLIS et al. 2002; ABERG et al. 2004; GUÉGUEN et al. 2012).

Todos os elementos químicos absorvidos e translocados pelas plantas, sejam estes essenciais ou não, podem se manter móveis pelo tecido vascular ou serem incorporados às organelas e paredes celulares de diferentes órgãos e tecidos vegetais (LEPP 1975; ELLENBERG et al. 1991; KABATA-PENDIAS 2004; TAIZ; ZEIGER 2013). Assim, o monitoramento dos elementos tóxicos nas plantas tem recebido considerável atenção por parte de ecólogos e toxicologistas, constituindo-se em poderoso instrumento de avaliação da saúde ambiental (MORAES et al. 2002, 2014; ECHER; KABARI 2013; BARIMA et al. 2014; BULBOVAS et al. 2015; DIJK et al. 2015; NOOR et al. 2015). O acúmulo desses elementos na madeira foi avaliado em espécies arbóreas crescendo sob clima tropical e algumas delas, como por exemplo, *Caesalpinia peltophoroides* Benth. (Caesalpinioideae) (VIVES et al. 2006, 2007), *Tabebuia rosea* (Bertol.) A. DC. (Bignoneaceae) (CHAGAS 2013) e *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze (Fabaceae) (GERALDO et al. 2014), estão sendo consideradas bioindicadoras de poluição ambiental. Apesar dos avanços no monitoramento de espécies vegetais bioindicadoras, nas regiões tropicais e subtropicais, esses estudos ainda são escassos nestes ambientes (BARIMA et al. 2014).

1.4 Impacto da poluição ambiental na estrutura das plantas

As alterações mais frequentemente descritas para as plantas em relação aos efeitos da poluição ambiental estão associadas às respostas fisiológicas, como produção de metabólitos especiais e distúrbios na fotossíntese e no tempo de abertura e fechamento dos estômatos (ALVES et al. 1990; INOUE; REISSMANN 1993; MORAES et al. 2002; BUJOKAS 2009). Essas alterações têm sido citadas como as principais responsáveis pelas modificações morfológicas observadas em folhas (SILVA et al. 2000; ALVES et al. 2001; SHAFIQ; IQBAL 2003; ALVES et al. 2008), raízes (MAZZONI-VIVEIROS; TRUFEN 2004) e caules,

em especial no xilema secundário (ALVES 1995; SCHMITT et al. 2000; GUPTAA; IQBAL 2005; SUKUMARAN 2014).

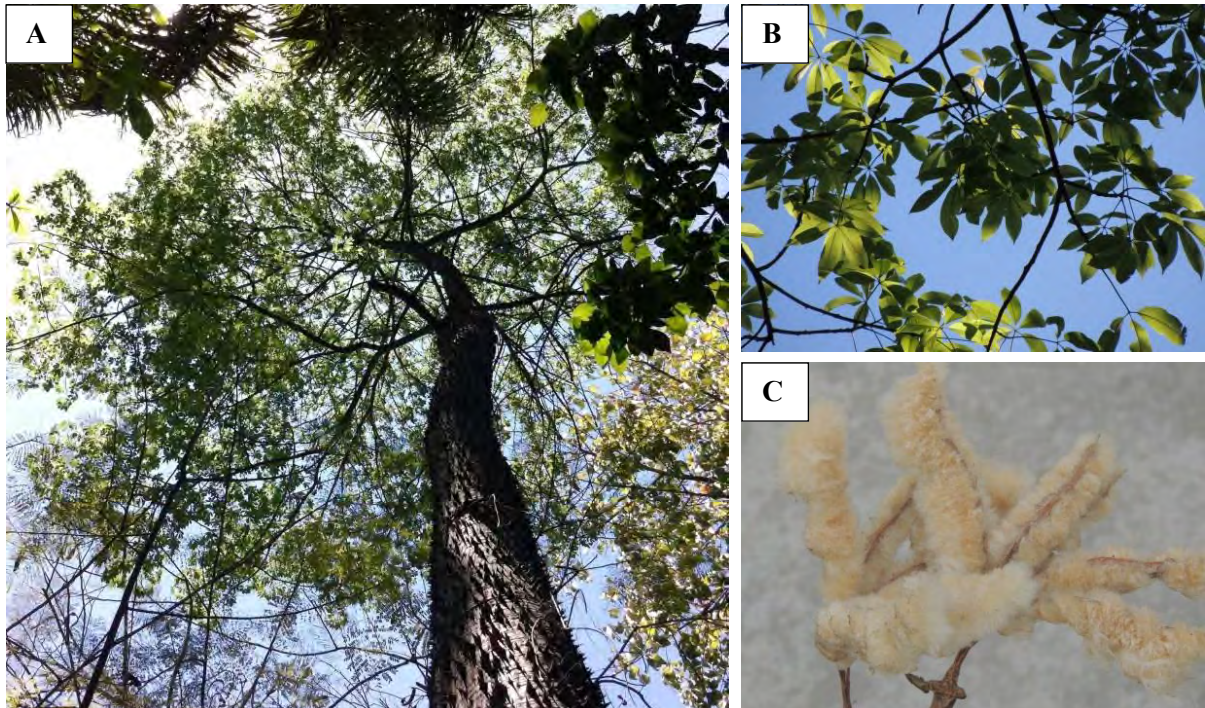
No que se refere à estrutura da madeira, as alterações do xilema secundário em resposta a poluição têm sido principalmente observadas nas células condutoras e nos raios parenquimáticos (ALVES 1995; SANTOS 2005; CHAVE et al. 2009; CHAGAS 2013; SUKUMARAN 2014). As árvores expostas a ambientes poluídos apresentam em geral maior frequência de vasos e raios e redução do diâmetro e comprimento dos elementos de vaso. Os raios, de modo geral, se apresentam mais largos quando comparados aos que se desenvolvem em ambientes livres de poluição (CARLQUIST 1975; ALVES 1995; CHAVE et al. 2009; SANTOS 2005, CHAGAS 2013; SUKUMARAN 2014). A poluição tem sido associada a respostas diversas na xilogênese, envolvendo desde alterações na duração da atividade cambial até no número de células produzidas pelo câmbio. As respostas mais comuns observadas nas espécies lenhosas, quando expostas a concentrações elevadas de elementos tóxicos, são o decréscimo do número de células no câmbio, no xilema e no floema e a formação de falsos anéis de crescimento no lenho (WAHLMANN et al. 1986; KURCZYNSKA et al. 1997; SCHMITT et al. 2000; ERLICKYTE; VITAS 2008; BECK 2009; LEONELLI et al. 2012; RAJPUT et al. 2008; CHAGAS 2013). No entanto, Medeiros et al. (2008), avaliando o impacto da poluição causada pelo intenso tráfego veicular no estado de São Paulo (Brasil), não observaram variações significativas no crescimento radial do caule de árvores de *Araucaria columnaris* (G. Forst.) Hook. (Araucariaceae), uma espécie exótica à flora brasileira, porém cultivada devido ao seu rápido crescimento e uso econômico (FINGER; FARJADO 1995). Apesar da importância na formação da madeira e na resposta ecológica aos fatores ambientais, as investigações em espécies tropicais desenvolvendo-se em ambientes poluídos ainda são escassas, principalmente considerando a alta riqueza de espécies e ambientes, que promovem a diversidade biológica dessa região.

1.5 Espécie estudada

Ceiba speciosa (A. St.-Hil.) Ravenna, originalmente incluída na família Bombacaceae, está atualmente subordinada às Malvaceae, na subfamília Bombacoideae (APG II 2003) e é sinônimo de *Chorisia speciosa* A. St.-Hil (GIBBS; SEMIR 2003).

Esta espécie foi selecionada para este estudo por ser uma das poucas espécies nativas da Mata Atlântica do estado do Rio de Janeiro que ocorre simultaneamente em sítios florestais e urbanos e, ainda, apresentar árvores de diâmetros semelhantes nesses dois tipos de sítios. *Ceiba speciosa* é de grande importância na recuperação de áreas degradadas da Mata Atlântica e utilizada, com frequência, em projetos urbanísticos (CARVALHO 2003). Suas árvores são popularmente conhecidas como paineiras e apresentam de 10 a 30 m de altura, exibindo caules com inúmeros acúleos e que variam de 30 a 120 cm de diâmetro a 1,30 m acima do solo (Diâmetro à Altura do Peito – DAP) (CARVALHO 2003; GIBBS; SEMIR 2003) (Figura 1). É uma espécie decídua, com período de floração de dezembro a abril e frutificação, de agosto a setembro (LORENZI 1998). Ocorre naturalmente em florestas semidecíduas e florestas úmidas no Brasil, Argentina, Bolívia, Peru e Paraguai (GIBBS; SEMIR 2003) (Figura 2). Amadeira é pouco utilizada comercialmente, sendo aplicada apenas para a fabricação de aeromodelos, flutuadores, forros de móveis e como material isolante. Os tricomas presentes na epiderme interna dos frutos são conhecidos como paina e apresentam grande valor comercial, sendo também utilizados como isolante térmico e acústico e, ainda, para preenchimento de travesseiros, colchões e equipamentos de flutuação, como salva-vidas. A resina presente no lenho e na casca apresenta potencial medicinal no tratamento de hérnias, ínguas e queimaduras (CARVALHO 2003).

Figura 1 - Aspecto geral das características morfológicas de *Ceiba speciosa*.



Legenda: (A) Aspecto geral de uma das árvores estudadas no sítio urbano. Note a copa ampla e os acúleos presentes no caule. (B) Detalhe das folhas compostas. (C) Detalhe do fruto aberto, com os tricomas expostos, que são denominados paina. Fonte: própria

Figura 2- Mapa contendo os pontos de distribuição geográfica de *Ceiba speciosa*, adaptado a partir de Gibbs; Semir (2003).



1.6 Sítios de estudo

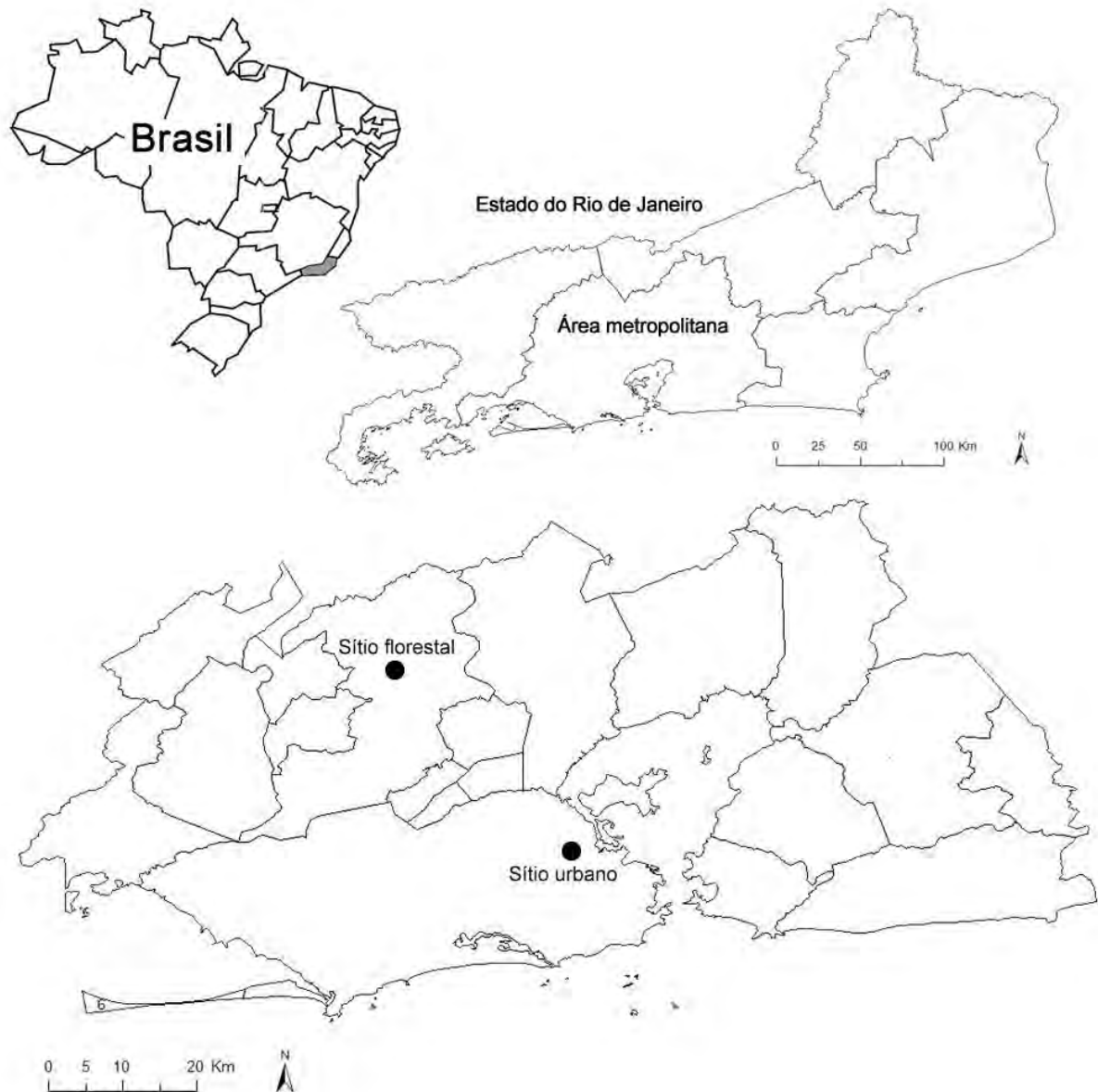
O estudo foi desenvolvido em duas áreas de Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro (Figura 3), uma florestal e preservada como Unidade de Conservação pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, a Reserva Biológica do Tinguá (sítio florestal), e outra modificada por intensa urbanização, o *campus* da Fundação Oswaldo Cruz (sítio urbano).

A Reserva Biológica do Tinguá é um dos mais importantes remanescentes de Mata Atlântica do estado do Rio de Janeiro (BRAZ et al. 2004). Foi incorporada à categoria Reserva da Biosfera da Mata Atlântica (RBMA) em 1991, pela UNESCO, quando esse bioma

foi classificado como Patrimônio Natural da Humanidade pela Organização das Nações Unidas (SOUZA 2003; JESUS 2009). A Reserva Biológica do Tinguá se localiza na região fitoecológica da Floresta Ombrófila Densa e suas variações (segundo a classificação de VELOSO et al.1991), com a exceção de formações campestres localizadas no topo do Pico do Tinguá, onde predominam afloramentos rochosos e solos muito secos (JESUS 2009). A vegetação encontra-se em bom estado de preservação devido, principalmente, à proteção das nascentes que abastecem o sistema de águas do Estado, correspondendo a uma das únicas porções ainda florestadas da Baixada Fluminense (JBRJ 2002). Embora situado próximo a uma área com alta densidade populacional, sua cobertura nativa apresenta-se praticamente intacta (BRAZ et al. 2004; JESUS 2009). O clima local é definido pela literatura como quente e úmido (SOUZA 2003), correspondendo à classificação Aw, segundo a chave climática de Köppen, modificada por Alvares et al. (2014). As coletas neste sítio foram realizadas em um trecho de Floresta Ombrófila Densa, no município de Nova Iguaçu (22° 34,951' S 043° 26,248' W).

A Fundação Oswaldo Cruz, inaugurada em 1900 como Instituto Seropédico Federal na Fazenda de Manguinhos e, posteriormente, denominada como Instituto Oswaldo Cruz (FIOCRUZ) em 1908, representa, nos dias de hoje, um dos maiores centros de pesquisa e saúde do Brasil (FIOCRUZ 2014). O *campus* da FIOCRUZ tem seus limites definidos pelas Avenidas Brasil e Leopoldo Bulhões, pela Rua Sizenando Nabuco e pelo Rio Faria Timbó. As árvores selecionadas neste sítio de estudo se desenvolvem na área do *campus* da FIOCRUZ direcionada à Avenida Brasil (22° 52,335' S 043° 14,704' W). A construção desta Avenida data de 1937-1945 e desde essa época está diretamente vinculada ao processo de expansão da cidade do Rio de Janeiro e sua área suburbana (COSTA 2006). A progressiva e intensa urbanização da região e o ininterrupto fluxo de automóveis tornaram a Avenida Brasil uma das vias mais poluídas da cidade do Rio de Janeiro. Esta área é caracterizada por apresentar partículas transportadas pelo ar com um diâmetro aerodinâmico inferior a 2,5 µm e de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos: fenatreno, fluorateno, pireno, benzo (a) antraceno, criseno, benzo (a) pireno (RAINHO et al. 2013a). Estes dois últimos são comprovadamente de alta citotoxicidade (RAINHO et al. 2013b). Esses dados de poluentes da Avenida Brasil foram obtidos a partir de um equipamento instalado no CIEP Leonel Moura Brizola, no Bairro de Ramos, próximo à passarela 13, a cerca de 4 km do *campus* da FIOCRUZ. A extensa área urbanizada, o grande fluxo de veículos presentes em seu entorno e o valor histórico que esta Instituição apresenta, foram os principais motivadores para a escolha deste local para a realização do estudo.

Figura 3 - Mapas mostrando a localização dos sítios de estudo no estado do Rio de Janeiro.



Legenda: O sítio florestal está localizado na cidade de Nova Iguaçu (Reserva Biológica do Tinguá) e o sítio urbano está localizado na cidade do Rio de Janeiro (*Campus* da Fundação Oswaldo Cruz). Fonte: própria.

Os índices médios de precipitação e temperatura nos últimos 30 anos foram obtidos a partir da empresa SOMAR Meteorologia para ambos os sítios de estudo (Tabela 1). No sítio florestal, os índices de precipitação são maiores do que os observados no sítio urbano, principalmente durante o período chuvoso (Figura 4A). Enquanto que o sítio urbano apresenta temperaturas mais elevadas, principalmente durante os meses mais secos (Figura 4B). Valores

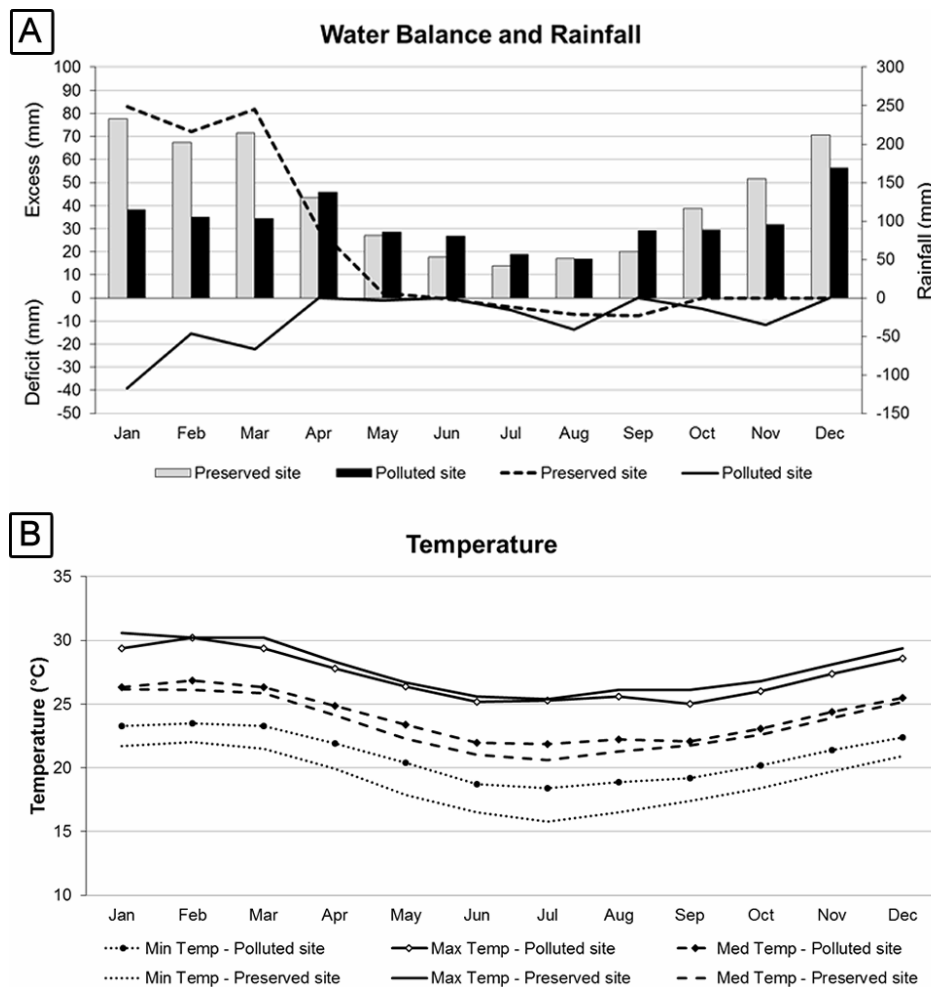
de déficit e de excesso de água (balanço hídrico) foram calculados de acordo com estimativas da evapotranspiração usando o Método de Thornthwaite e seguindo as recomendações de Pereira et al. (1997) (Figura 4A).

Tabela 1 - Valores de precipitação acumulada e de temperaturas anuais máxima, média e mínima das cidades de Nova Iguaçu (sítio florestal) e do Rio de Janeiro (sítio urbano).

| Sítios/Fatores climáticos | Precipitação anual acumulada (mm) | Temperatura máxima (média°C) | Temperatura média (média°C) | Temperatura mínima (média°C) |
|---------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Florestal | 1551 | 28 | 23 | 19 |
| Urbano | 1173 | 27 | 24 | 21 |

Fonte: SOMAR Meteorologia

Figura 4 - Índices climáticos e de balanço hídrico dos sítios florestal e urbano.



Legenda: (A) Índices calculados de balanço hídrico (linhas) e valores de precipitação média mensal (barras) para cada sítio de estudo. (B) Valores de temperaturas máxima, média e mínima nos sítios de estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da urbanização sobre a dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-hil.) Ravenna (Malvaceae), uma espécie lenhosa nativa da Mata Atlântica.

2.2 Objetivos específicos

- Descrever e comparar a estrutura anatômica do câmbio de árvores crescendo em sítios florestal e urbano, durante períodos de atividade e dormência;
- Descrever e comparar a estrutura anatômica do lenho dessas árvores;
- Determinar e comparar a idade e a taxa de crescimento radial dessas árvores;
- Investigar a influência de fatores ambientais sobre o crescimento radial dessas árvores;
- Avaliar a concentração química elementar de amostras de solo nos sítios de estudo;
- Avaliar a concentração química elementar ao longo dos anos, por meio dos anéis de crescimento das árvores em cada sítio de estudo.

3 ESTRUTURA ANATÔMICA DO CÂMBIO

3.1 Introdução

A dinâmica de crescimento de espécies arbóreas é um dos aspectos das plantas mais influenciados pelas variações do ambiente. Essas variações, quando sazonais, podem definir períodos de crescimento e dormência e determinar um ritmo de crescimento anual nas plantas (KOZLOWISKI; PALLARD 1997; SAVIDGE 2001; GRICAR et al. 2012). O câmbio é o tecido responsável pelo crescimento em diâmetro das plantas e sua dinâmica de divisão e diferenciação celular é controlada geneticamente e seu ritmo, determinado por fatores evolutivos sob limitações ambientais (KOZLOWISKI; PALLARD 1997; CALLADO 2001; SAVIDGE 2001). Esse tecido meristemático é responsável não somente pela produtividade de madeira, mas também pela qualidade e eficiência de transporte do xilema e do floema secundários por ele formados (CARLQUIST, 1975). Portanto, a funcionalidade e as propriedades tecnológicas desses tecidos estão diretamente relacionadas à estrutura e diferenciação do câmbio.

A adição e diferenciação de novas células pelo câmbio ocorrem de maneira diferenciada durante o início e o final dos períodos favoráveis ao crescimento radial. O resultado desta variação pode ser visto, por exemplo, nos anéis de crescimento formados no xilema secundário (SCHWEINGRUBER 2007). Por essa razão, a estrutura do câmbio pode ser considerada altamente plástica, uma vez que responde às variações ambientais.

A poluição ambiental é considerada uma das mais danosas variações ambientais provocadas pelas ações do homem (SMITH et al. 1999; ROSENFELD 2000; OSTRO 2004; KAMPA; CASTANAS 2008). Sobre o câmbio, os poluentes são capazes de alterar sua estrutura, atividade, xilogênese e, conseqüentemente, a produção e a qualidade da madeira (por exemplo: WAHLMANN et al. 1986; RAO et al. 2004; KHAN et al. 2007; GUPTA; IQBAL 2005; RAJPUT; RAO 2005; RAJPUT et al. 2008; IQBAL et al. 2010a; IQBAL et al. 2010b; WANI; KHAN 2010). Apesar da estrutura anatômica do câmbio ter grande importância para a compreensão da estrutura de madeira e das respostas ecológicas das plantas, poucos estudos foram realizados em espécies tropicais que crescem em ambientes poluídos, o que é ainda mais significativo, dada a elevada biodiversidade dessa região (KHAN et al. 2007; WANI; KHAN 2010).

Neste contexto, esta seção teve como objetivo avaliar a estrutura anatômica do câmbio de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) de árvores crescendo em sítios florestal e urbano, durante períodos de atividade e dormência, a fim de responder às seguintes questões: (1) Existem diferenças na histologia do câmbio de plantas crescendo sob poluição urbana quando comparadas àquelas crescendo em ambiente florestal? (2) Em caso afirmativo, essas diferenças variam entre os períodos favoráveis e desfavoráveis para o crescimento radial? e (3) É possível relacionar as diferenças encontradas àquelas descritas na literatura como indicadores de tolerância ao estresse?

3.2 Material e Métodos

O comportamento fenológico foliar e a estrutura anatômica do câmbio foram avaliados em 10 árvores de *Ceiba speciosa* desenvolvendo-se em cada um dos sítios de estudo (Tabela 2). A fenologia foliar foi monitorada mensalmente de julho a outubro de 2012, sendo as fenofases: brotamento e folhas jovens, adultas e senescentes (BENCKE; MORELLATO 2002). Foi ainda estimado o percentual total de folhas presente na copa das árvores em cada fenofase. O material botânico em estado reprodutivo será registrado no Herbário HBRJ/UERJ.

Tabela 2 - Características dendrológicas das árvores de *Ceiba speciosa* utilizadas para a avaliação do comportamento foliar e da estrutura anatômica do câmbio nos sítios de estudo

| Árvores | Sítios | DAP (cm) | Altura (cm) |
|---------|-----------|----------|-------------|
| 1 | Florestal | 20 | 204 |
| 2 | Florestal | 18 | 182 |
| 3 | Florestal | 18 | 162 |
| 4 | Florestal | 22 | 153 |
| 5 | Florestal | 24 | 178 |
| 6 | Florestal | 17 | 87 |
| 7 | Florestal | 18 | 174 |
| 8 | Florestal | 20 | 145 |
| 9 | Florestal | 22 | 165 |
| 10 | Florestal | 21 | 158 |
| 11 | Urbano | 16 | 171 |
| 12 | Urbano | 14 | 150 |
| 13 | Urbano | 14 | 142 |
| 14 | Urbano | 17 | 190 |
| 15 | Urbano | 14 | 140 |
| 16 | Urbano | 16 | 137 |
| 17 | Urbano | 14 | 126 |
| 18 | Urbano | 20 | 254 |
| 19 | Urbano | 17 | 216 |
| 20 | Urbano | 20 | 204 |

Nota: DAP: Diâmetro das árvores à uma altura de 1,30 m.

De cada árvore selecionada foram obtidas duas amostras do caule, contendo a zona cambial que compreende o câmbio e o xilema e floema secundários recém-formados, a uma distância de 1,30 m acima do solo, por método não destrutivo, com auxílio de sonda de Pressler (Figura 5). As amostras foram coletadas na quarta semana de agosto e outubro de 2012, em ambos os sítios de estudo. Esses meses foram selecionados com base em estudos prévios realizados na área florestal, que indicaram que estes meses apresentam condições desfavoráveis e favoráveis, respectivamente, para o crescimento radial em relação à temperatura, precipitação e fotoperíodo (CALLADO et al. 2013, 2014; COSTA et al. 2013; VASCONCELLOS et al. submetido). As amostras foram fixadas em solução aquosa de 2,5% de glutaraldeído, 4,0% de formaldeído e tampão de cacodilato de sódio a 0,05 M e pH 7,2 (DA CUNHA et al. 2000), desidratados numa série ascendente de álcool (JOHANSEN 1940)

e incluído no Historessin® (FEDER;O'BRIEN 1968). As amostras foram seccionadas em micrótomo rotativo, a uma espessura de 2 a 5 μm , nos planos transversal e longitudinal tangencial. Os cortes histológicos foram corados com 0,05% de Azul de Toluidina O (O'BRIEN et al. 1964) e observados em microscopia de luz. A análise foi realizada com o auxílio do microscópio óptico Olympus BX 41 e as imagens foram obtidas por uma câmera de vídeo Q Collor R3.

Figura 5 - Coleta não destrutiva de amostras do caule de *Ceiba speciosa* para análise da estrutura anatômica da zona cambial.

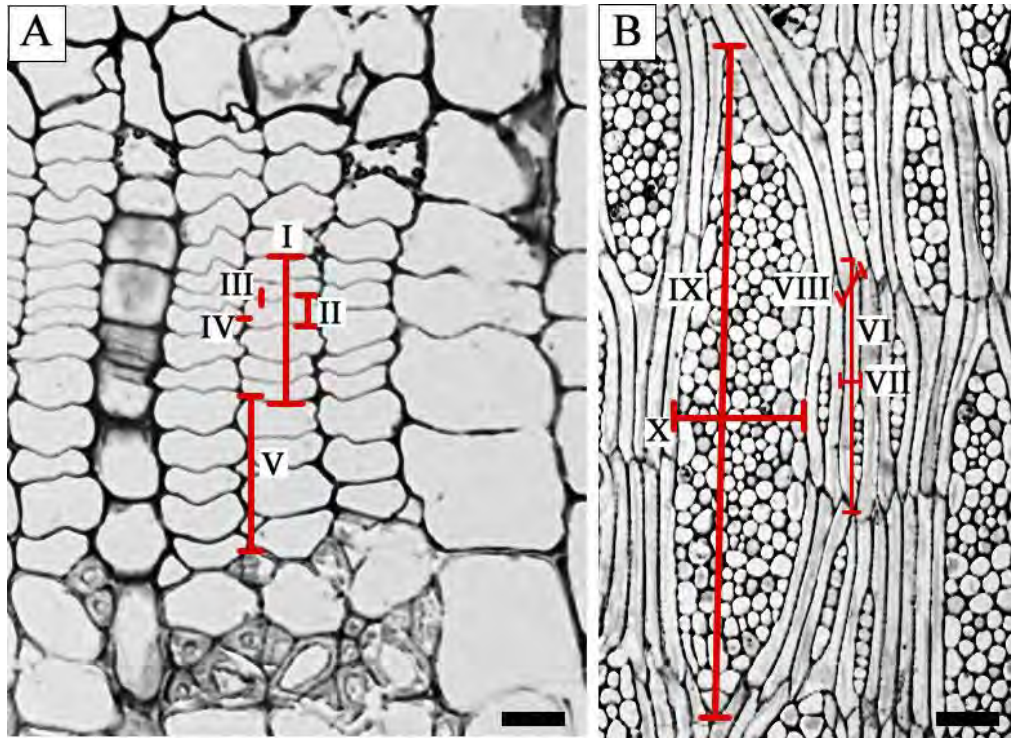


Legenda: Retirada da amostra de caule contendo periderme, zona cambial e xilema e floema secundários, com auxílio de sonda de Pressler (A e B). Fonte: própria

As mensurações e contagens foram realizadas em seções transversais e longitudinais tangenciais com auxílio do software Image-Pro Express 6.0. Nas seções transversais (Figura 6A), foram selecionados 15 pontos de amostragem aleatórios da zona cambial de cada árvore amostrada. De cada ponto foram aferidos, de forma pareada, os seguintes parâmetros: largura em micrômetros e em número de camadas celulares da zona cambial, diâmetro radial e espessura das paredes periclinais e anticlinais em micrômetros de uma célula cambial, e a largura em micrômetros da camada celular em processo de diferenciação. Nas seções longitudinais tangenciais (Figura 6B), foram aferidos o comprimento e a largura em micrômetros de 15 células fusiformes e, ainda, o comprimento da parede terminal inclinada destas células (ponta fusiforme). Nestas seções foram selecionados ainda, 15 agrupamentos de

iniciais radiais (raios cambiais), futuros raios parenquimáticos, para aferição do comprimento e da largura em micrômetros e em número de células.

Figura 6 - Seções transversal (A) e longitudinal tangencial (B) da zona cambial de *Ceiba speciosa*, indicando os locais onde foram realizadas as contagens e mensurações dos parâmetros selecionados para análise da zona cambial.



Legenda: Nas seções transversais (A), foram aferidos de forma pareada: largura da zona cambial (I), em micrômetros e número de camadas celulares; diâmetro radial (II) e espessura das paredes periclinais (III) e anticlinalis (IV) de uma célula cambial em micrômetros, e a largura da camada celular em processo de diferenciação (V) em micrômetros. Nas seções longitudinais tangenciais (B), foram aferidos de forma pareada: o comprimento (VI) e a largura (VII) das células fusiformes, o comprimento da ponta fusiforme (VIII) e o comprimento (IX) e a largura (X) dos raios cambiais. Barra = 50 µm.

As análises estatísticas foram realizadas com o software *Statistica 7*. Os testes de Shapiro-Wilk We de Levene foram usados para testar a normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente (ZAR 2010). O teste ANOVA Fatorial foi utilizado para comparar as características avaliadas durante os períodos de atividade e dormência cambial e observadas nos sítios florestale urbano (ZAR 2010).

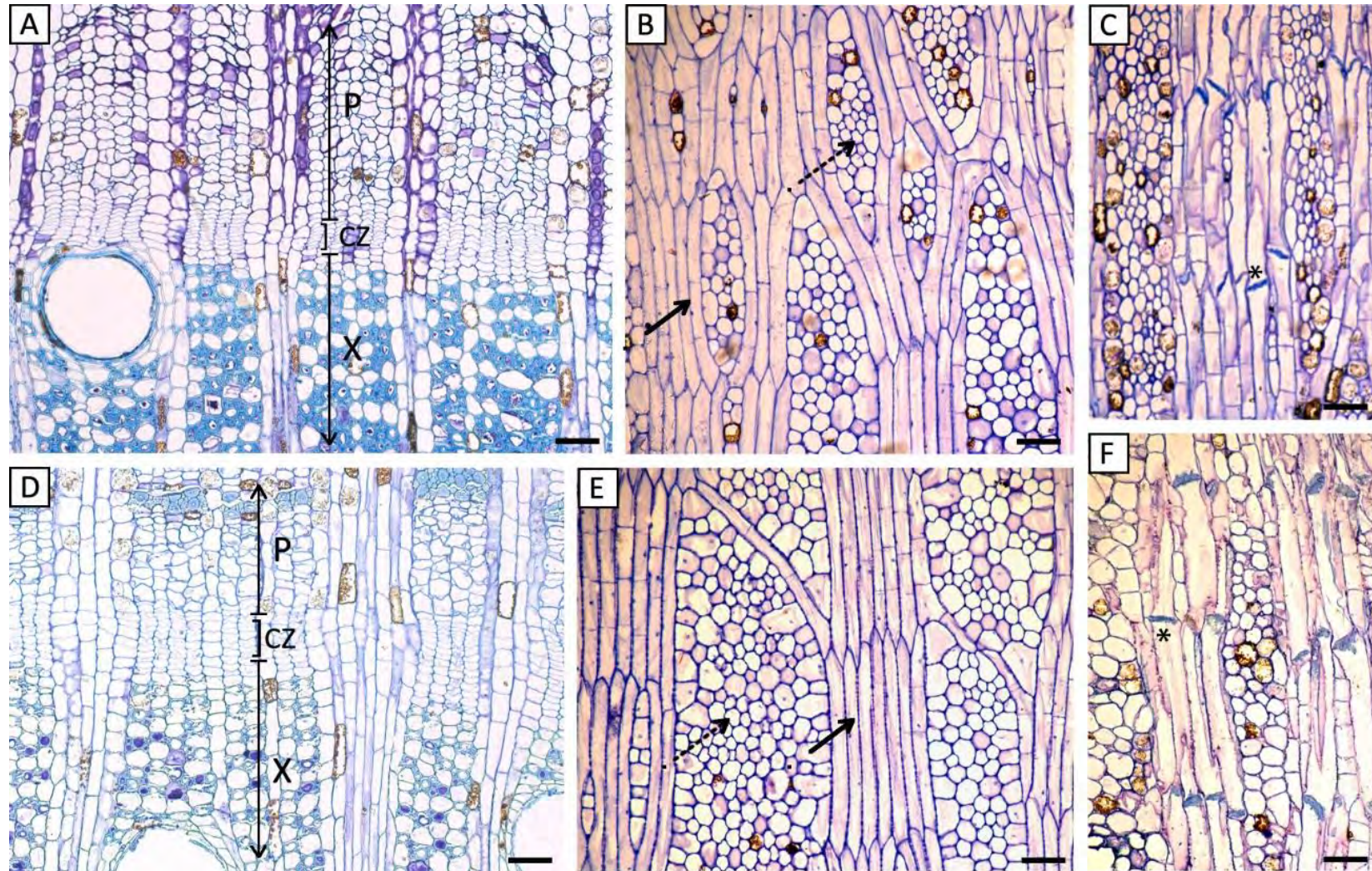
Os índices de plasticidade fenotípica (PIV) (VALLADARES et al. 2006) foram calculados para cada parâmetro anatômico aferido. Esses índices foram calculados para cada período de crescimento separadamente (atividade e dormência) e para os dois períodos de crescimento simultaneamente (sítios).

3.3 Resultados

Todas as árvores avaliadas apresentaram comportamento fenológico decíduo. Em agosto, na primeira avaliação do câmbio, todas as árvores, tanto no ambiente urbano quanto no florestal, apresentavam-se sem folhas ou com folhas senescentes. No sítio florestal, oito das dez árvores apresentavam-se completamente sem folhas e duas com menos de 10% de sua copa preenchida por folhas senescentes. No sítio exposto à poluição urbana, quatro árvores apresentavam-se completamente sem folhas, três estavam com menos de 30% de folhas senescentes e outras três com mais de 60% de folhas senescentes. Em outubro, quando o câmbio foi novamente amostrado, todas as árvores apresentavam folhas completamente expandidas, com exceção de uma árvore no sítio florestal, que apresentava 80% de folhas jovens.

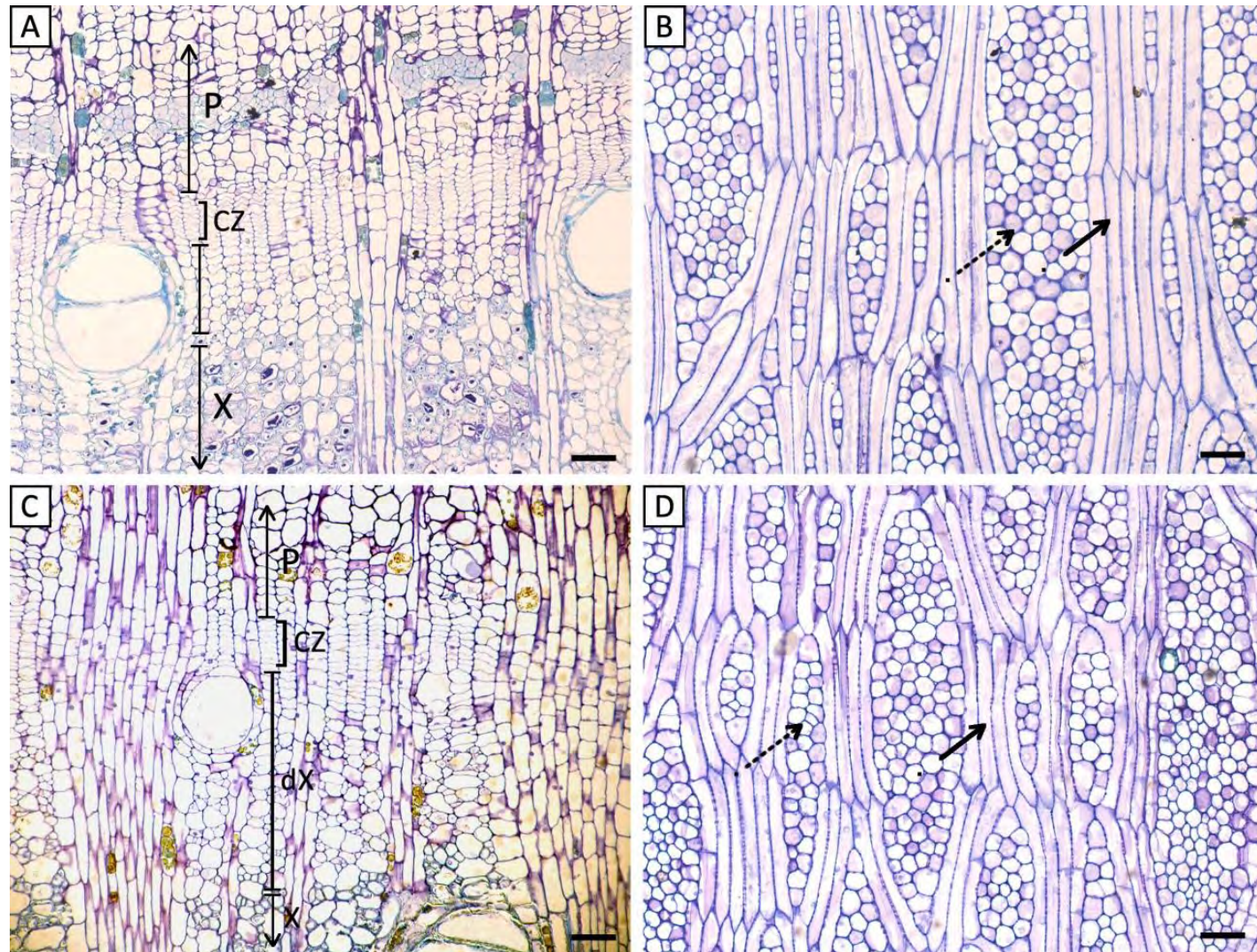
A estrutura anatômica do câmbio, em ambos os sítios, apresentou iniciais fusiformes estratificadas e agrupamento de iniciais radiais (raios cambiais) de tamanhos diferentes e não estratificados. Também em ambos os sítios, a histologia cambial apresentou características típicas de um período de dormência em agosto e de um período de atividade em outubro. No período de atividade, a zona cambial apresentava maior número de camadas celulares e maior largura em micrômetros, e o xilema secundário adjacente à esta apresentava maior largura de camadas sem diferenciação (Figura 7A e 7C). Os raios cambiais foram mais altos e mais largos durante a atividade do que durante o período de dormência (Figuras 7 e 8, Tabela 3). A zona cambial apresentou menor número de camadas celulares e menor largura em micrômetros durante o período de dormência (Tabela 3). Além disso, os tecidos vasculares adjacentes ao câmbio apresentavam-se diferenciados. No xilema, as fibras e o parênquima apotraqueal difuso estavam completamente formados (Figura 7A) e no floema, os elementos de tubo crivado apresentavam calose obliterando a placa crivada (Figuras 7C e 7F).

Figura 7 - Fase de dormência cambial de *Ceiba speciosa* nos sítios florestal (A-C) e urbano (D-F).



Legenda: (A) e (D) evidenciam a zona cambial e os tecidos adjacentes em seções transversais. (B) e (E) evidenciam as iniciais fusiformes e radiais em seções tangenciais da zona cambial. (C) e (F) evidenciam o floema adjacente à zona cambial em seções tangenciais, revelando a presença de calose nos elementos de tubo crivado. Floema (P), Xilema (X), Zona cambial (CZ), Iniciais fusiformes (seta reta), Iniciais radiais (seta tracejada), Calose de dormência (*). Barra = 100 μ m.

Figura 8 - Fase de atividade cambial de *Ceiba speciosa* nos sítios florestal (A-B) e urbano (C-D).



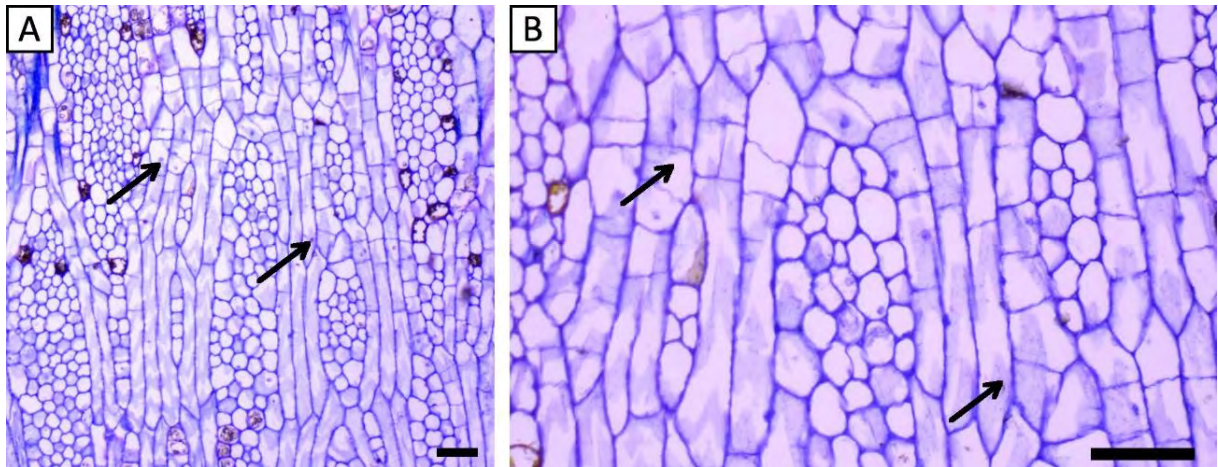
Legenda: (A) e (C) evidenciam a zona cambial e os tecidos adjacentes em seções transversais. (B) e (D) evidenciam as iniciais fusiformes e radiais em seções tangenciais da zona cambial. Floema (P), Xilema em diferenciação (dX), Xilema (X), Zona cambial (CZ), Iniciais fusiformes (seta reta), Iniciais radiais (seta tracejada). Barra = 100 µm.

Tabela 3 - Parâmetros quantitativos (média e desvio padrão) aferidos na zona cambial de *Ceiba speciosa* nas fases de crescimento e nos sítios de estudo.

| Parâmetros aferidos | Crescimento | | Sítios | | Sítio florestal | | Sítio urbano | | | |
|--|---|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Atividade | Dormência | Florestal | Urbano | Atividade | Dormência | Atividade | Dormência | | |
| Seção transversal | Número de camadas celulares na zona cambial | 6.913 ± 2.020 | 5.790 ± 1.788 | 6.310 ± 2.205 | 6.393 ± 1.754 | 6.953 ± 1.821 | 5.667 ± 2.455 | 6.873 ± 2.302 | 5.913 ± 0.830 | |
| | Largura da zona cambial (µm) | 74.261 ± 19.898 | 61.423 ± 21.377 | 67.593 ± 23.171 | 68.091 ± 20.065 | 76.057 ± 16.280 | 59.129 ± 26.632 | 72.466 ± 23.741 | 63.717 ± 15.614 | |
| | Diâmetro radial das células iniciais fusiformes (µm) | 10.047 ± 1.728 | 9.667 ± 1.291 | 9.963 ± 1.455 | 9.751 ± 1.609 | 10.158 ± 1.891 | 9.767 ± 0.900 | 9.935 ± 1.643 | 9.566 ± 1.639 | |
| | Espessamento das paredes periclinais das células iniciais fusiformes (µm) | 1.163 ± 0.242 | 0.985 ± 0.270 | 1.015 ± 0.246 | 1.133 ± 0.282 | 1.074 ± 0.252 | 0.956 ± 0.239 | 1.253 ± 0.205 | 1.014 ± 0.307 | |
| | Espessamento das paredes anticlinais das células iniciais fusiformes (µm) | 1.450 ± 0.239 | 1.400 ± 0.262 | 1.330 ± 0.243 | 1.519 ± 0.222 | 1.337 ± 0.215 | 1.324 ± 0.279 | 1.563 ± 0.214 | 1.476 ± 0.232 | |
| | Largura da camada de células em diferenciação (µm) | 168.957 ± 108.379 | 137.908 ± 61.495 | 143.307 ± 57.912 | 163.558 ± 111.648 | 149.515 ± 65.715 | 137.098 ± 51.732 | 188.399 ± 140.138 | 138.717 ± 72.840 | |
| | Seção longitudinal tangencial | Altura das células iniciais fusiformes (µm) | 400.890 ± 45.416 | 396.061 ± 47.812 | 415.566 ± 37.216 | 381.386 ± 48.589 | 411.046 ± 49.322 | 420.086 ± 21.117 | 390.735 ± 41.140 | 372.036 ± 55.654 |
| | | Diâmetro tangencial das células iniciais fusiformes (µm) | 33.215 ± 4.188 | 32.093 ± 3.626 | 31.759 ± 3.480 | 33.548 ± 4.190 | 31.198 ± 4.194 | 32.320 ± 2.697 | 35.231 ± 3.226 | 31.865 ± 4.513 |
| | | Comprimento da ponta fusiforme (µm) | 44.302 ± 5.443 | 40.782 ± 4.327 | 43.832 ± 5.985 | 41.253 ± 3.942 | 46.101 ± 7.053 | 41.563 ± 3.801 | 42.504 ± 2.366 | 40.001 ± 4.871 |
| | | Altura dos raios cambiais (µm) | 591.312 ± 151.813 | 422.021 ± 143.655 | 520.903 ± 212.056 | 492.430 ± 115.643 | 661.058 ± 175.206 | 380.748 ± 143.467 | 521.567 ± 84.546 | 463.294 ± 138.557 |
| Altura dos raios cambiais (número de células) | | 15.278 ± 4.045 | 10.443 ± 3.369 | 13.142 ± 5.727 | 12.579 ± 2.654 | 17.150 ± 4.944 | 9.134 ± 3.017 | 13.406 ± 1.518 | 11.752 ± 3.323 | |
| Largura dos raios cambiais (µm) | | 97.781 ± 21.031 | 73.226 ± 26.948 | 72.776 ± 26.677 | 98.232 ± 20.811 | 90.263 ± 21.952 | 55.288 ± 18.465 | 105.300 ± 18.063 | 91.164 ± 21.842 | |
| Largura dos raios cambiais (número de células) | | 3.718 ± 0.801 | 3.190 ± 0.774 | 3.052 ± 0.750 | 3.856 ± 0.696 | 3.388 ± 0.829 | 2.716 ± 0.501 | 4.048 ± 0.652 | 3.664 ± 0.718 | |

Divisões anticlinais foram observadas em algumas células derivadas das células iniciais fusiformes em ambos os sítios durante a atividade cambial e apenas em árvores do sítio urbano durante a dormência cambial (Figura 9). Estas células derivadas foram localizadas próximas aos raios cambiais. Estas divisões transformaram essas células do sistema axial em novas células radiais, como foi observado na região de diferenciação floema, por exemplo (Figura 9).

Figura 9 - Seções longitudinais tangenciais da zona cambial de *Ceiba speciosa* crescendo no sítio urbano, durante a fase de dormência.



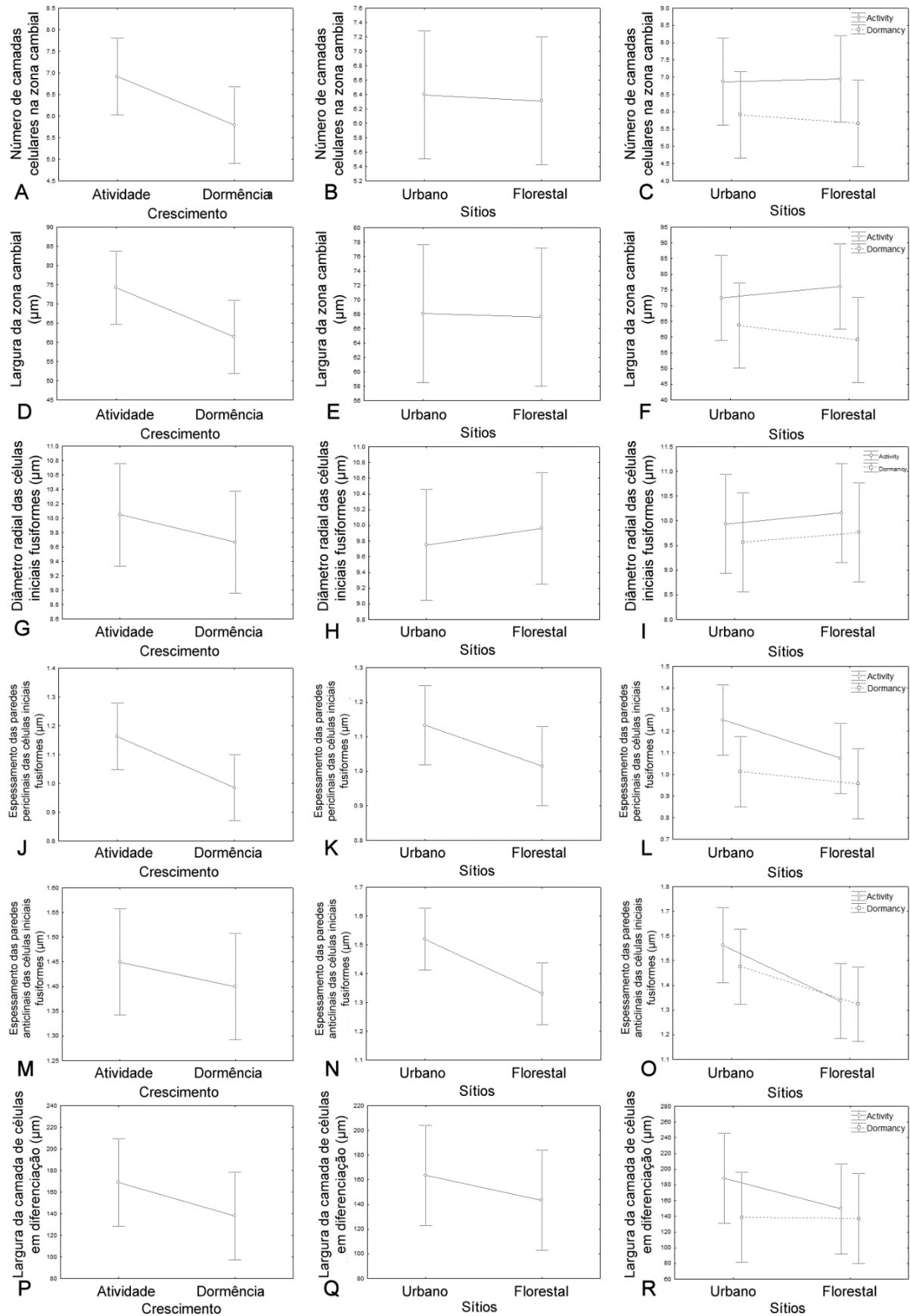
Legenda: (A) e (B) destacam divisões em células derivadas das células iniciais fusiformes (setas). (B) apresenta estas divisões em detalhe. Barra de escala = 100 μ m.

O teste ANOVA Fatorial avaliou as variáveis que influenciaram os parâmetros aferidos: período de crescimento (atividade e dormênciacambial) e local de estudo (florestal e urbano). O comprimento da ponta fusiforme (Figura 11G) e o comprimento dos raios cambiais (Figuras 11J e 11M) foram significativamente diferentes somente entre os períodos de crescimento. Em contraste, o comprimento de células iniciais fusiformes (Figura 11B) foi significativamente diferente apenas entre os sítios de estudo. A largura dos raios cambiais foi significativamente diferente entre os períodos de crescimento (considerando os dois sítios) e entre os sítios de estudo (considerando os dois períodos de crescimento) (Figuras 11P-U e Tabela 4), sendo significativamente maiores durante o período de atividade (Figuras 11P e 11S; Tabela 2) e no sítio urbano, em ambos os períodos de crescimento (Figuras 11Q e 11T; Tabela 4).

A análise realizada levando-se em consideração os períodos de crescimento e os sítios de estudo revelaram que o câmbio de *C. speciosa* apresentou parâmetros anatômicos que diferiram tanto entre os sítios de estudo (florestal e urbano), quanto entre os períodos de crescimento (ativo e dormente) (Figuras 10-11 e Tabela 4). Durante o período de atividade, o diâmetro tangencial das iniciais fusiformes foi maior no sítio urbano, enquanto que este parâmetro não foi significativamente diferente entre os sítios durante o período de dormência (Figura 10G e Tabela 4). Também durante a dormência, os raios cambiais mostraram maior comprimento no sítio urbano, no entanto, durante o período ativo, mostraram maior comprimento no sítio florestal (Figura 11L e Tabela 2). Estes resultados também revelaram que, no sítio urbano, os raios cambiais tinham comprimentos e larguras semelhantes em ambos os períodos de crescimento. Contudo, no sítio florestal, estes raios mostraram diferenças significativas em comprimento e largura durante os períodos de atividade e de dormência (Figura 11L e Tabela 2).

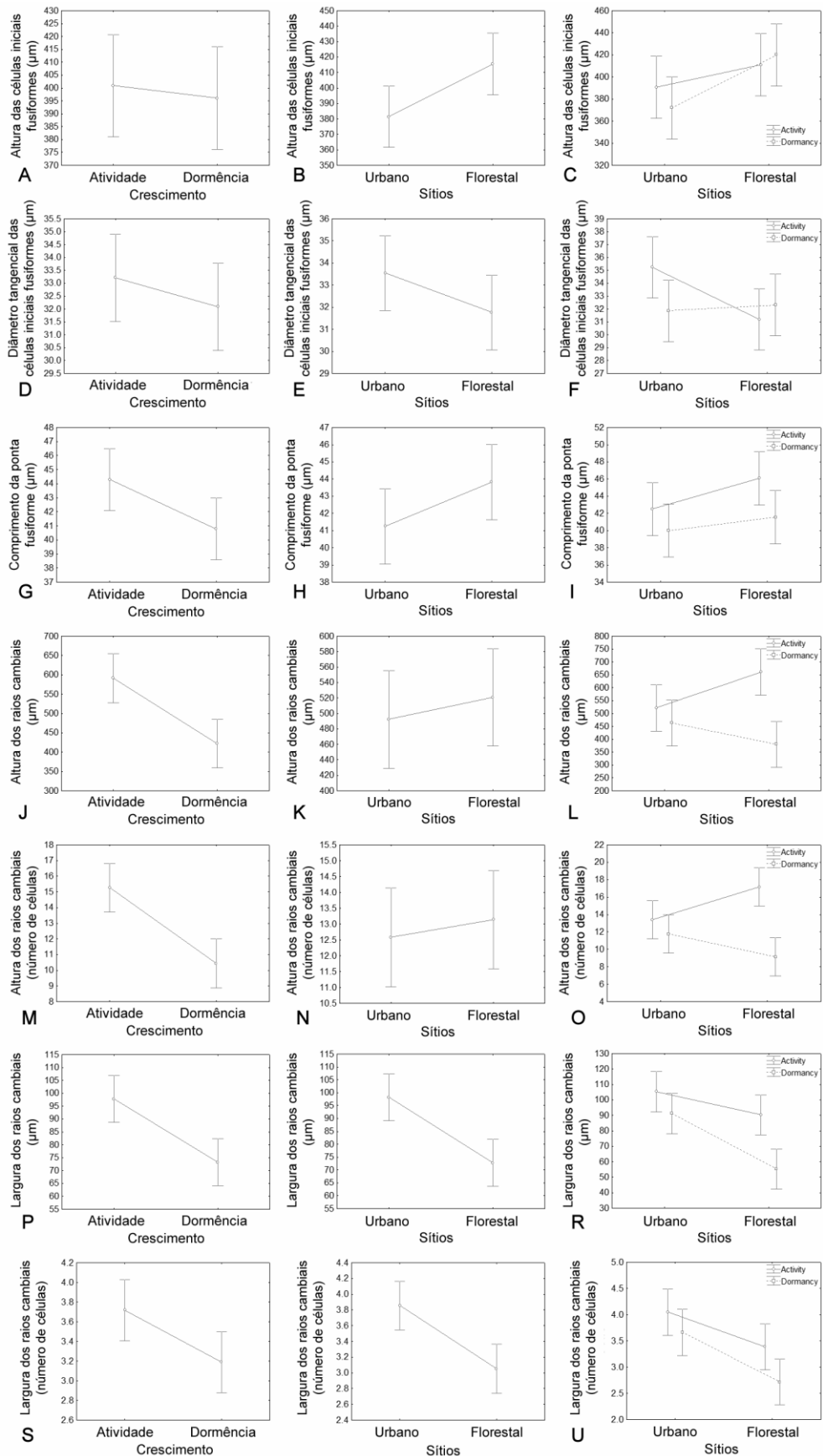
Os parâmetros mais plásticos observados na estrutura anatômica do câmbio foram: largura da zona cambial, tanto em micrômetros quanto em número de células, largura da faixa de xilema em diferenciação e comprimento e largura dos raios cambiais em micrômetros (Tabela 5). A plasticidade desses parâmetros anatômicos diferiu entre os períodos de atividade e dormência. Os maiores índices de plasticidade fenotípica foram observados especialmente para aqueles relacionados aos raios cambiais (Tabela 5).

Figura 10 - Resultados obtidos no teste ANOVA Fatorial para os parâmetros aferidos em seções transversais à zona cambial de *Ceiba speciosa*.



Legenda: (A) Número de camadas celulares na zona cambial durante as fases de atividade e dormência. (B) Número de camadas celulares na zona cambial nos sítios de estudo. (C) Número de camadas celulares na zona cambial nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (D) Largura da zona cambial (μm) durante as fases de atividade e dormência. (E) Largura da zona cambial (μm) nos sítios de estudo. (F) Largura da zona cambial (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (G) Diâmetro radial das iniciais fusiformes (μm) durante as fases de atividade e dormência. (H) Diâmetro radial das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo. (I) Diâmetro radial das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (J) Largura da camada celular em diferenciação no xilema (μm) durante as fases de atividade e dormência. (K) Largura da camada celular em diferenciação no xilema (μm) nos sítios de estudo. (L) Largura da camada celular em diferenciação no xilema (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência.

Figura 11 - Resultados obtidos no teste ANOVA Fatorial para os parâmetros aferidos em seções tangenciais à zona cambial de *Ceiba speciosa*.



Legenda: (A) Comprimento das iniciais fusiformes (μm) durante as fases de atividade e dormência. (B) Comprimento das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo. (C) Comprimento das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (D) Diâmetro tangencial das iniciais fusiformes (μm) durante as fases de atividade e dormência. (E) Diâmetro tangencial das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo. (F) Diâmetro tangencial das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (G) Comprimento da ponta das iniciais fusiformes (μm) durante as fases de atividade e dormência. (H) Comprimento da ponta das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo. (I) Comprimento da ponta das iniciais fusiformes (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (J) Comprimento dos raios cambiais (μm) durante as fases de atividade e dormência. (K) Comprimento dos raios cambiais (μm) nos sítios de estudo. (L) Comprimento dos raios cambiais (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (M) Comprimento dos raios cambiais (em número de células) durante as fases de atividade e dormência. (N) Comprimento dos raios cambiais (em número de células) nos sítios de estudo. (O) Comprimento dos raios cambiais (em número de células) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (P) Largura dos raios cambiais (μm) durante as fases de atividade e dormência. (Q) Largura dos raios cambiais (μm) nos sítios de estudo. (R) Largura dos raios cambiais (μm) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência. (S) Largura de raios em cambiais (em número de células) durante as fases de atividade e dormência. (T) Largura de raios em cambiais (em número de células) nos sítios de estudo. (U) Largura de raios em cambiais (em número de células) nos sítios de estudo durante as fases de atividade e dormência.

Tabela 4 - Resultados do teste ANOVA Fatorial (F) para os parâmetros aferidos nas amostras da zona cambial de *Ceiba speciosa* em relação à fase do crescimento e aos sítios de estudo.

| | Parâmetros aferidos | Crescimento (Todas) | | Sítios (Todas) | | Crescimento x Sítios | |
|-------------------------------|--|---------------------|---------|----------------|---------|----------------------|---------|
| | | F | p | F | p | F | p |
| Seção transversal | Número de camadas celulares na zona cambial | 3,2930 | 0,0779 | 0,0181 | 0,8936 | 0,0696 | 0,7933 |
| | Largura da zona cambial (μm) | 3,7003 | 0,0623 | 0,0056 | 0,9409 | 0,3754 | 0,5439 |
| | Diâmetro radial das células iniciais fusiformes (μm) | 0,590 | 0,4473 | 0,184 | 0,6703 | 0,000 | 0,9824 |
| | Espessamento das paredes periclinais das células iniciais fusiformes (μm) | 4,9485 | 0,0324* | 2,1767 | 0,1488 | 0,5755 | 0,4530 |
| | Espessamento das paredes anticlinais das células iniciais fusiformes (μm) | 0,439 | 0,5117 | 6,379 | 0,0160* | 0,240 | 0,6271 |
| | Largura da camada de células em diferenciação (μm) | 1,2074 | 0,2791 | 0,5136 | 0,4781 | 0,4348 | 0,5138 |
| Seção longitudinal tangencial | Altura das células iniciais fusiformes (μm) | 0,122 | 0,7292 | 6,094 | 0,0184* | 1,003 | 0,3231 |
| | Diâmetro tangencial das células iniciais fusiformes (μm) | 0,905 | 0,3476 | 2,301 | 0,1380 | 3,620 | 0,0650 |
| | Comprimento da ponta fusiforme (μm) | 5,300 | 0,0272* | 2,846 | 0,1002 | 0,442 | 0,5101 |
| | Altura dos raios cambiais (μm) | 14,7679 | 0,0004* | 0,4177 | 0,5221 | 6,3510 | 0,0163* |
| | Altura dos raios cambiais (número de células) | 19,9361 | 0,0000* | 0,2701 | 0,6064 | 8,6319 | 0,0057* |
| | Largura dos raios cambiais (μm) | 14,8313 | 0,0004* | 15,9396 | 0,0003* | 2,6703 | 0,1109 |
| | Largura dos raios cambiais (número de células) | 13,759 | 0,0006* | 13,759 | 0,0006* | 0,440 | 0,5112 |

Nota: * Representa uma diferença significativa com um intervalo de confiança de 95% (p).

Tabela 5 - Índices de plasticidade fenotípica calculados para cada parâmetro aferido a partir de amostras da zona cambial de *Ceiba speciosa*. Os índices foram calculados para cada fase de crescimento e considerando os períodos de crescimento juntos.

| | Parâmetros aferidos | Atividade | Dormência | Atividade + Dormência |
|--------------------------------------|--|------------------|------------------|------------------------------|
| | Número de camadas celulares na zona cambial | 0,614 | 0,770 | 0,777 |
| Plano transversal | Largura da zona cambial (μm) | 0,647 | 0,777 | 0,777 |
| | Diâmetro radial das células iniciais fusiformes (μm) | 0,490 | 0,411 | 0,532 |
| | Espessamento das paredes periclinais das células iniciais fusiformes (μm) | 0,526 | 0,588 | 0,618 |
| | Espessamento das paredes anticlinais das células iniciais fusiformes (μm) | 0,464 | 0,470 | 0,488 |
| | Largura da camada de células em diferenciação (μm) | 0,844 | 0,769 | 0,859 |
| Plano longitudinal tangencial | Altura das células iniciais fusiformes (μm) | 0,349 | 0,437 | 0,437 |
| | Diâmetro tangencial das células iniciais fusiformes (μm) | 0,392 | 0,437 | 0,445 |
| | Comprimento da ponta fusiforme (μm) | 0,468 | 0,336 | 0,468 |
| | Altura dos raios cambiais (μm) | 0,574 | 0,801 | 0,847 |
| | Altura dos raios cambiais(número de células) | 0,619 | 0,806 | 0,806 |
| | Largura dos raios cambiais (μm) | 0,620 | 0,686 | 0,781 |
| | Largura dos raios cambiais (número de células) | 0,310 | 0,386 | 0,310 |

Nota: Plasticidade máxima = 1,0 (VALLADARES et al. 2006)

3.4 Discussão

A análise da estrutura do câmbio e do comportamento fenológico foliar de *C. speciosa* constatou o crescimento sazonal descrito para essa espécie nativa da Mata Atlântica (LORENZI 1998; CARVALHO 2003; SANTOS; FISCH 2013). Os resultados obtidos evidenciaram maior número de camadas celulares na zona cambial dessa espécie durante o período de atividade e menor número, no período de dormência, em ambos os sítios de estudo. Além disso, o número de camadas celulares em diferenciação, que formaram o xilema secundário, também coincidiu com o esperado para os períodos de atividade e dormência cambial. Essas são características que corroboram os estudos de atividade cambial realizados com outras espécies tropicais (por exemplo: MARCATI et al. 2006; MARCATI et al. 2008; RAO; RAJPUT 1999; YÁÑEZ-ESPINOSA et al. 2010; CALLADO et al. 2013, 2014; COSTA et al. 2013; BRANDES et al. 2015) e que definem a sazonalidade da dinâmica cambial.

Em geral, os grandes centros urbanos são caracterizados por apresentar uma dinâmica climática específica, que envolve a redução dos índices de precipitação e o aumento dos índices de temperatura, além de uma vasta gama de poluentes atmosféricos associados (TOON 2000; ROSENFELD 2000; QIAN et al. 2009; MIRZAEI; HAGHIGHAT 2010; SANTOS et al. 2013a). Embora os sítios de estudo estejam separados por apenas 55 Km, essa característica comum para as áreas urbanas foi observada no sítio urbano, em que os índices de precipitação são menores no verão e as temperaturas são mais elevadas durante o inverno. Apesar dessa diferença, a oscilação climática anual foi similar entre os sítios investigados, apresentando os mesmos meses favoráveis e desfavoráveis para o desenvolvimento do câmbio em ambos os sítios.

Os períodos de atividade e dormência cambial constatado sem *C. Speciosa* nos dois sítios de estudo também foram semelhantes aos observados em outras espécies nativas, como *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze (Lecythidaceae), *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) e *Centropium robustum* (Vell.) Mart. ex Benth. (Fabaceae) (CALLADO et al. 2013, 2014; COSTA et al. 2013; VASCONCELLOS et al. submetido), que crescem no mesmo sítio florestal estudado neste trabalho.

Os estudos que avaliaram o impacto da poluição sobre a sazonalidade do câmbio observaram mudanças na sua estrutura e na duração de sua atividade (TULIK 2001; RAO et

al. 2004; RAJPUT; RAO 2005; RAJPUT et al. 2008; IQBAL et al. 2010a; 2010b; MAHMOODUZZAFAR et al. 2010). Árvores afetadas pela poluição mostraram um atraso ou redução no período de atividade cambial quando comparado com árvores que cresciam em áreas não poluídas (RAO et al. 2004; RAJPUT; RAO 2005; RAJPUT et al. 2008; IQBAL et al. 2010a, 2010b). Rajput; Rao (2005) também relataram que árvores de *Ailanthus excelsa* Roxb. (Simaroubaceae) crescendo em um local relativamente não poluído tiveram um pico de atividade cambial a partir da chegada das chuvas e que essas árvores apresentavam reduzida atividade cambial durante a maturação das folhas. No entanto, esses autores relataram que árvores da mesma espécie que cresciam em um sítio evidentemente poluído mostravam dois picos de atividade cambial; o primeiro pico após a abscisão das folhas e o segundo pico, quando as gemas florais e os frutos estavam em desenvolvimento. No presente estudo, a sazonalidade do câmbio de *C. speciosa* não foi avaliada, contudo, a histologia do câmbio apresentou características típicas de períodos de atividade e dormência, como citado previamente (por exemplo: MARCATI et al. 2006; MARCATI et al. 2008; CALLADO 2010; COSTA et al. 2013; BRANDES et al. 2015).

Rainho et al. (2013a) observaram as maiores concentrações de poluentes durante o período mais seco do ano no sítio urbano deste estudo, o que corresponde ao período de dormência cambial. Apesar disso, os resultados deste estudo revelaram respostas diferentes das árvores entre os sítios em ambos os períodos de crescimento. De modo geral, é possível caracterizar que sob poluição urbana, as iniciais fusiformes mostraram-se mais curtas com menor diâmetro. Estas características corroboram os resultados de Khan et al. (2007) e Wani; Khan (2010), que estudaram a histologia cambial de *Citrus reticulata* Blanco (Rutaceae) e *Juglans regia* L. (Juglandaceae), respectivamente, em áreas poluídas na Índia.

Os raios cambiais foram os componentes estruturais que mais diferiram entre os sítios de estudo. As relações ecológicas e funcionais dos raios parenquimáticos sob condições ambientais diferentes são pouco exploradas na literatura (LEV-YADUN 1994; LEV-YADUN; ALONI 1995; BARNETT 2006). Entretanto, os raios parenquimáticos são componentes importantes do corpo secundário das plantas, sendo responsável pelo transporte lateral de água, gases e substâncias de reserva (BARNETT 2006). Em geral, esses raios se originam a partir da diferenciação de células iniciais radiais do câmbio. Contudo, as iniciais fusiformes do câmbio também podem se diferenciar em iniciais radiais e vice-versa (EVERT 2013; PRAMOD et al. 2013). A formação de septos nas células iniciais fusiformes adjacentes às células iniciais radiais típicas contribui, portanto, para ampliar o sistema radial (SWAMY; KRISHNAMURTHY 1980; LEV-YADUN; ALONI 1995; PRAMOD et al. 2013). A

diferenciação de células iniciais fusiformes em células iniciais radiais foi observada em *C. speciosa* em ambos os sítios de estudo durante o período de atividade cambial. Entretanto, esta diferenciação também ocorreu em árvores do sítio urbano durante o período menos favorável ao crescimento e contribuindo para ampliar ainda mais o sistema radial dessas árvores. Assim, no sítio urbano a diferença da largura dos raios cambiais entre os períodos de crescimento não foi significativa. Vale ressaltar que as árvores crescendo no sítio urbano mostraram raios cambiais mais largos em ambos os períodos, mas principalmente durante a dormência.

A divisão e a diferenciação de células iniciais radiais podem ser induzidas com a administração de etileno em caules (YAMAMOTO; KOZLOWISKI 1987; LEV-YADUN; ALONI 1993; PRAMOD et al. 2013). Lev-Yadun; Aloni (1995) e Pramod et al. (2013) relataram que a administração de etileno promove a divisão anticlinal de células iniciais fusiformes, aumentando a frequência e/ou o tamanho dos raios. Entre outras funções, a produção de etileno nas plantas está associada principalmente com situações de estresse, como seca, inundações, geadas e exposição ao ozônio (SALISBURY; ROSS 2012; TAIZ; ZEIGER 2013). O período de dormência, no qual foram observadas as maiores diferenças na largura dos raios cambiais entre os sítios, coincide com o período em que as substâncias mutagênicas atingem suas maiores concentrações no sítio de estudo urbano, devido à diminuição das chuvas (RAINHO et al. 2013a, 2013b). Estudos realizados em áreas tropicais na Índia revelaram o impacto da poluição na estrutura e atividade do câmbio de espécies lenhosas, promovendo também um aumento no tamanho dos raios cambiais (KHAN et al. 2007; WANI & KHAN 2010). Assim, a presença de poluentes atmosféricos de ação citotóxica (RAINHO et al. 2013b), somada às condições mais secas e quentes do sítio urbano, podem ter sido responsáveis por promover uma maior produção de etileno em resposta ao estresse (YAMAMOTO; KOZLOWISKI 1987; LEV-YADUN; ALONI 1993; PRAMOD et al. 2013), conduzindo ao aumento do número de iniciais radiais em *C. speciosa*.

4 ESTRUTURA ANATÔMICA DO LENHO

4.1 Introdução

Um indivíduo ou uma população não podem ser desvinculados de seu ambiente; a maneira como reagem a diferentes condições ambientais é tão parte de suas características quanto sua aparência e habilidades (BRADSHAW 1965). Neste sentido, a plasticidade fenotípica, ou melhor, como as espécies reagem frente às variações ambientais, tem despertado cada vez mais o interesse de pesquisadores (por exemplo: VALLADARES et al. 2000, 2007, 2008; MINER et al. 2005; PIGLIUCCI 2005; FONTI et al. 2010; BÄCHTOLD; MELO-JÚNIOR 2015; SCARANO et al. 2015). Tradicionalmente, o termo plasticidade fenotípica é definido como a capacidade de um dado genótipo tornar possível fenótipos alternativos sob diferentes condições ambientais, ou seja, é um fenômeno propriamente ecológico (GIANOLI; VALLADARES 2012). A compreensão desse aspecto da diversidade de plantas tem sido considerada de grande importância nos cenários atuais de mudança climática (NICOTRA et al. 2010; WAY; OREN 2011; MAGRIN et al. 2014).

As previsões do clima futuro indicam não somente o aumento da temperatura média global, associado ao aumento de CO₂ atmosférico, mas também mudanças na proporção de chuvas e um aumento da frequência de eventos climáticos extremos, como El Niño e La Niña (GRIMM et al. 2000; JUMP; PENUELAS 2005; MARENGO 2007; WAY; OREN 2011). Essas mudanças climáticas estão transformando os ambientes, gerando cascatas de sinais epigenéticos e alterando fenotipicamente os organismos que se desenvolvem nesses ambientes (JUMP; PENUELAS 2005; NICOTRA et al. 2010). Neste contexto, as plantas perenes se destacam pela capacidade de suportarem diferentes variações ambientais ao longo de suas vidas (BRADSHAW 1965). Por serem organismos sésseis e, portanto, terem que resistir às variações ambientais impostas ao longo de muitos anos de vida, essas plantas tornam-se importantes objetos de estudo na avaliação da capacidade de adaptação e ajustes biológicos (SUTAN 2000; BARALOTO et al. 2010; FONTI et al. 2010; MORI; NIINEMETS 2010).

Inúmeros estudos têm sido realizados no sentido de compreender como a poluição ambiental tem influenciado as alterações climáticas globais e os organismos vivos (por exemplo: FIORE et al. 2002; BYTNEROWICZ et al. 2007; BLAGOJEVIĆ et al. 2009; HONOUR et al. 2009; SEINFELD; PANDIS 2012; RAINHO et al. 2013b; YAQUB et al.

2015). Ademais, grandes avanços foram feitos na compreensão das estratégias ecológicas das plantas quanto às características foliares, contudo, pouca atenção tem sido atribuída às características e propriedades estruturais da madeira em ambientes tropicais (ALVES 1995; CHAVE et al 2009; SANTOS 2005, CHAGAS 2013; SUKUMARAN 2014). Por este motivo e para complementar o estudo desenvolvido sobre o câmbio de *C. speciosa* (Seção 3), o objetivo desta seção foi avaliar de forma comparada a estrutura anatômica do xilema secundário dessa espécie, em resposta à urbanização no estado do Rio de Janeiro.

4.2 Material e métodos

Para a caracterização do lenho, as amostras foram coletadas em setembro de 2015 com o auxílio de sonda de Pressler, a uma distância de 1,30 m do solo, de 6 árvores em cada uma das áreas de estudo (Tabela 6). Para esta análise, foram consideradas as últimas 8 camadas de crescimento em todas as amostras analisadas, a fim de: minimizar a influência de diferenças nas tendências naturais de crescimento; de eventos estocásticos ocorridos nos sítios de estudo e de padronizar a análise da estrutura do lenho. As amostras frescas foram seccionadas ao micrótomo rotativo Leica RM2025 com espessura entre 20 e 30 μm , orientadas nos sentidos, transversal e longitudinal tangencial e radial. As seções histológicas foram clarificadas por hipoclorito de sódio em solução aquosa 50% e submetidas ao processo de coloração dupla pela mistura Azul de Astra e Safranina (BURGER; RICHTER 1991). As seções obtidas foram desidratadas em série etílica ascendente e transferidas para Xilol P.A. (JOHANSEN 1940; SASS 1958) emontadas em lâminas permanentes utilizando Entelan®. Amostras de madeira e lâminas com seções histológicas serão registradas na Xiloteca do Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro (RBw).

As fibras e os elementos de vaso foram individualizados a partir de amostras do lenho dissociadas pela mistura de Franklin (JANE 1956), com alterações no modo de uso (FEDALTO 1982). Em seguida, o material foi corado por Safranina hidroalcoólica 50% (SASS 1958) e montado com água e glicerina a 50% em lâminas semipermanentes.

Testes histoquímicos foram realizados em seções de lenho seccionadas a fresco, submetidas aos reagentes: Sudan III para indicar a presença de lipídios (SASS 1951); Vanilina

clorídrica (JOHANSEN 1940) para taninos e Cloreto férrico (JOHANSEN 1940) para compostos fenólicos.

A classificação e descrição do lenho das espécies estudadas, bem como as mensurações e contagens dos elementos celulares seguiram em linhas gerais as recomendações do International Association of Wood Anatomists Committee (1989) e Coradin; Muñiz (1991). A porcentagem dos tipos celulares no lenho foi calculada seguindo recomendações de Luchi (2004). Os índices de plasticidade fenotípica (PIV) foram calculados para todos os parâmetros anatômicos avaliados no lenho de *Ceiba speciosa*, tal como sugerido por Valladares et al. (2006). Os índices de mesomorfia e vulnerabilidade foram calculados seguindo recomendações de Calrquist (1977). A condutividade hidráulica foi estimada pela equação de Zimmermann (1983), modificada por Fahn et al. (1986).

Todas as análises estatísticas seguiram recomendações de Zar (2010) e foram realizadas com o Software *Statistica 7*. O teste de Shapiro-Wilk W foi utilizado para testar a normalidade dos dados e o teste de Levene para testar a homocedasticidade das variâncias em todas as variáveis analisadas neste estudo, permitindo selecionar os testes apropriados para cada distribuição dos dados. Os testes *t* de Student e Mann-Whitney foram utilizados para avaliar a similaridade dos caracteres observados no lenho em cada sítio, de acordo com a distribuição dos dados.

Tabela 6 - Características dendrológicas das árvores de *Ceiba speciosa* utilizadas para a avaliação da estrutura anatômica do lenho nos sítios de estudo.

| Árvores | Sítios | Registro xiloteca | DAP (cm) | Altura (m) |
|---------|-----------|-------------------|----------|------------|
| 1F | Florestal | Em andamento | 53.50 | 18 |
| 2F | Florestal | Em andamento | 42.99 | 15 |
| 3F | Florestal | Em andamento | 59.87 | 20 |
| 4F | Florestal | Em andamento | 27.71 | 15 |
| 5F | Florestal | Em andamento | 55.73 | 22 |
| 6F | Florestal | Em andamento | 71.66 | 20 |
| 1U | Urbano | Em andamento | 60.51 | 17 |
| 2U | Urbano | Em andamento | 43.63 | 16 |
| 3U | Urbano | Em andamento | 80.89 | 20 |
| 4U | Urbano | Em andamento | 68.79 | 17 |
| 5U | Urbano | Em andamento | 43.31 | 18 |
| 6U | Urbano | Em andamento | 45.86 | 15 |

Nota: DAP: Diâmetro das árvores a uma altura de 1,30 m.

4.3 Resultados

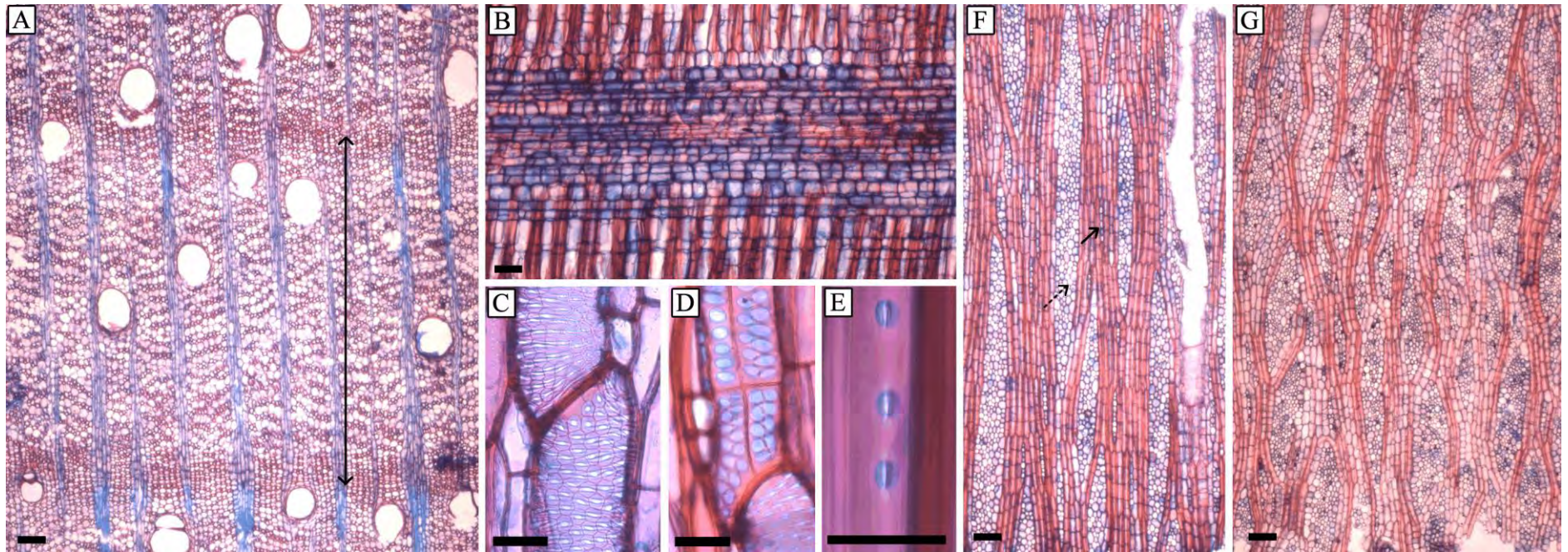
De modo geral, os caracteres anatômicos qualitativos avaliados no lenho de *Ceiba speciosa* foram similares nos dois sítios de estudo. O lenho da espécie se caracteriza por apresentar: anéis de crescimento distintos, demarcados por faixa de parênquima, maior espessamento e achatamento radial das paredes das fibras e distensão dos raios no limite entre anéis de crescimento consecutivos (Figura 12A); elementos de vaso em distribuição difusa, em arranjo radial e predominantemente solitários, podendo ocorrer, no entanto, em arranjos de 2-3 vasos; placas de perfuração simples, transversais e ocorrendo nas paredes terminais dos elementos de vaso, ou, em alguns casos, nas paredes laterais de elementos de vaso de menor calibre (Figura 13B e D); pontoações intervasculares areoladas, poligonais, com bordas distintas e em disposição alterna(Figura 12C); pontoações parênquimo-vasculares e raio-vasculares com aréolas de bordas reduzidas, de formato circular a oval (Figura 12D); fibras estratificadas, libriformes e não septadas, com diminutas pontoações areoladas nas paredes radiais e tangenciais, suas câmaras apresentam diâmetros menores que 3 μm (Figura 12E); parênquima axial abundante, estratificado, predominantemente apotraqueal, com arranjo difuso e difuso-em-agregado (Figura 12A) ou vasicêntrico; raios uniseriados e pluriseriados

(Figura 12F-G), heterogêneos e muitas vezes compostos por uma mistura de células quadradas e procumbentes (Figura 12B). Apesar das árvores de ambos os sítios apresentarem estes caracteres supracitados de maneira similar, a organização das células xilemáticas apresentou maior irregularidade nas amostras obtidas do sítio urbano, o que dificultou muitas vezes a análise de alguns parâmetros qualitativos, como por exemplo, as estratificações das fibras e do parênquima axial (Figura 12G). No sítio florestal, os raios apresentaram uma organização tipicamente mais linear, enquanto que no sítio urbano, apresentaram formatos mais irregulares e sinuosidades (Figura 12F-G). No sítio urbano, também foram encontrados elementos de vaso com formatos irregulares (Figura 13F) e células do parênquima radial portadoras de conteúdo marrom-avermelhado de natureza fenólica (Figura 14). Além disso, vale ressaltar que a distensão dos raios parenquimáticos nos limites dos anéis foi mais evidente nas amostras do sítio florestal do que nas amostras do sítio urbano.

Oito caracteres quantitativos variaram significativamente entre os sítios de estudo, sendo quatro deles associados ao parênquima radial (Tabela 7. Figuras 15, 16 e 17). As árvores que se desenvolveram no sítio urbano apresentaram elementos de vaso, fibras e raios vasculares mais curtos quando comparadas às árvores do sítio florestal. No sítio urbano, observou-se menor proporção de fibras e maiores proporções de parênquima axial e radial (Tabela 7). Além disso, neste sítio, os raios vasculares, apesar de serem mais curtos, apresentaram aproximadamente 58% a mais em largura do que os raios das árvores do sítio florestal (Figura 17E. Tabela 7).

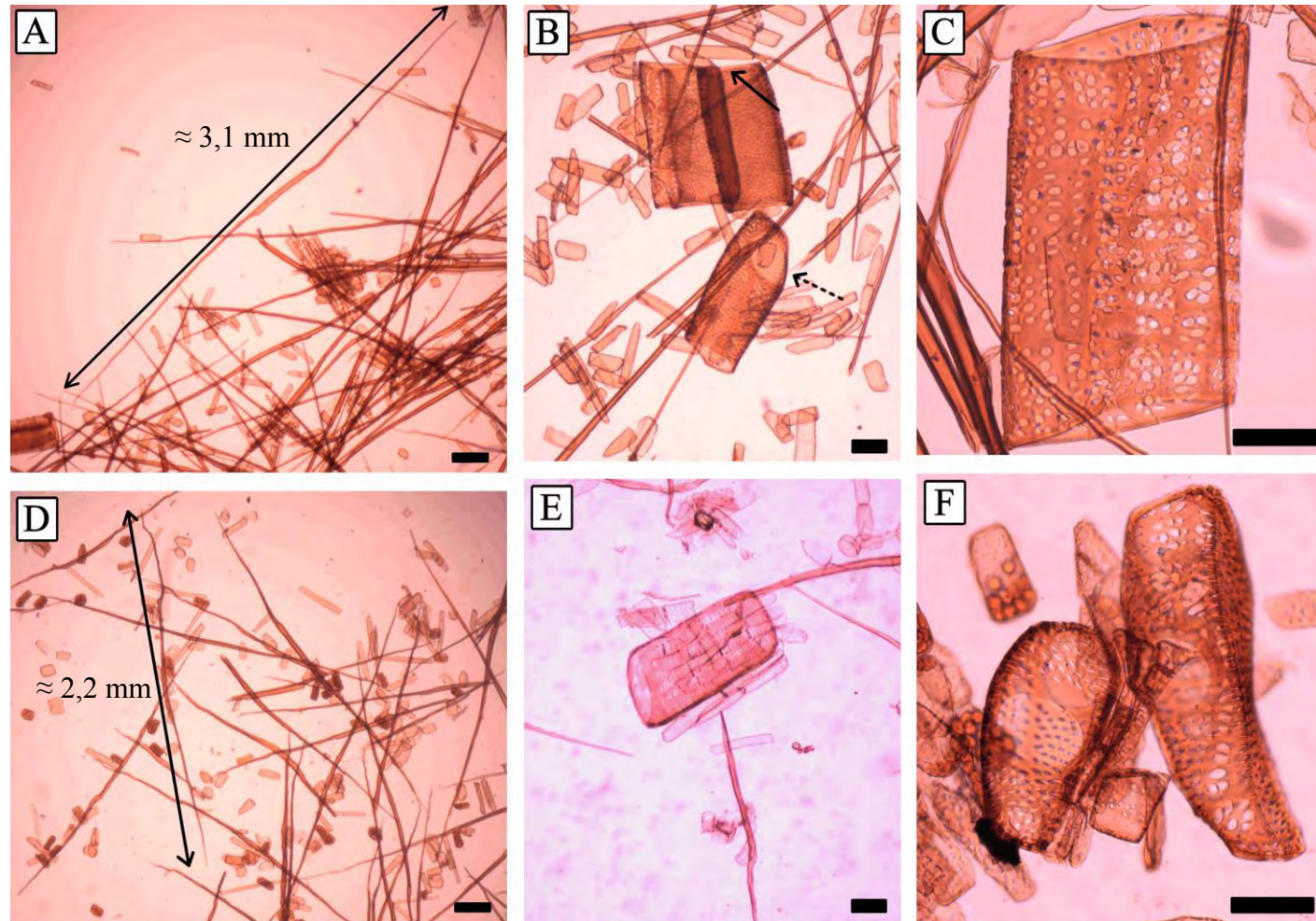
Os índices de vulnerabilidade, mesomorfia e condutividade hidráulica do xilema secundário de *C. speciosa* apresentaram valores inferiores nas árvores do sítio urbano (Tabela 8). A Tabela 9 evidencia que a frequência dos elementos de vaso e de fibras e a porcentagem de elementos de vaso e de parênquimas axial e radial são parâmetros plásticos ($PIV \geq 0,6$), sendo a largura dos raios vasculares o parâmetro de maior índice de plasticidade fenotípica ($PIV = 0,75$).

Figura 12 - Seções histológicas do lenho de *Ceiba speciosa* provenientes do sítio florestal (A-F) e do sítio urbano (G).



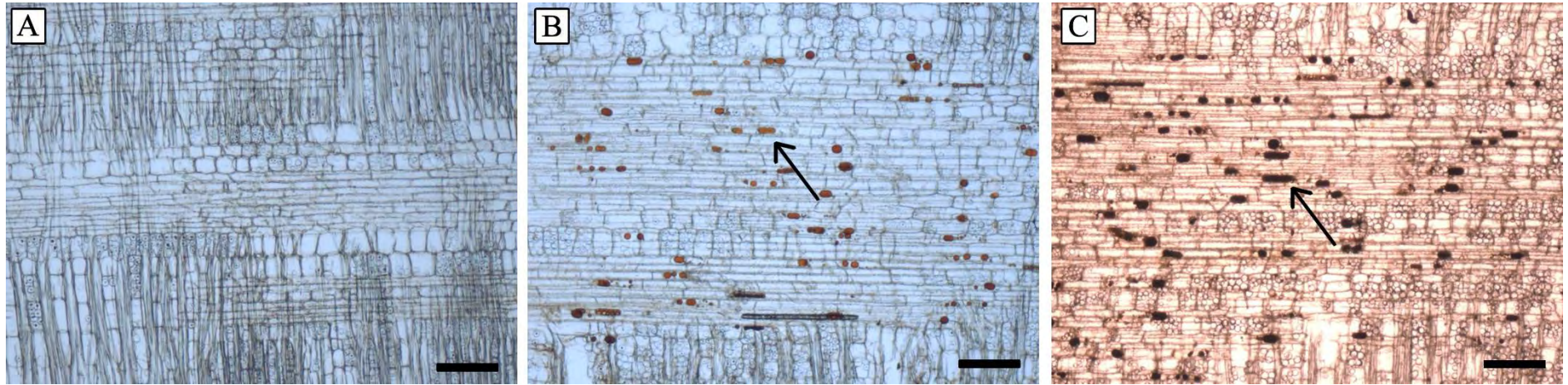
Legenda: (A) Seção transversal do lenho de *Ceiba speciosa* evidenciando os limites de um anel de crescimento (pontas da seta). (B) Seção longitudinal radial do lenho de *C. speciosa* evidenciando um raio heterogêneo, composto por uma mistura de células quadradas e procumbentes. (C-G) Seções longitudinais tangenciais do lenho de *C. speciosa*. (C) Pontoações intervasculares areoladas e poligonais. (D) Pontoações parênquimo-vasculares areoladas com bordas reduzidas. (E) Pontoações areoladas de uma fibra libriforme. (F) Raios uniseriados (seta contínua) e múltiplos (seta tracejada). (G) Raios vasculares do lenho de árvores sob poluição urbana. (A, F, G) Barra= 200 μm . (B) Barra= 100 μm . (C-D) Barra= 50 μm . (E) Barra= 20 μm .

Figura 13 - Células dissociadas do lenho de *Ceiba speciosa* desenvolvendo-se nos sítios florestal (A-C) e urbano (D-F).



Legenda: (A e D) Fibras presentes no lenho de *C. speciosa*, evidenciando células de maior comprimento no lenho de árvores se desenvolvendo no sítio florestal (em A). Setas indicam o comprimento das fibras em cada sítio. Barra= 200 μm . (B-C e E-F) Elementos de vaso presentes no lenho de *C. speciosa*, evidenciando placas de perfuração simples ocorrendo na extremidade terminal (seta contínua) e na lateral das células (seta tracejada). (F) Elementos de vaso de tamanhos irregulares presentes apenas no lenho de *C. speciosa* desenvolvendo-se no sítio urbano (B e E) Barra= 100 μm . (C e F) Barra= 50 μm .

Figura 14 - Seções longitudinais radiais do lenho *Ceiba speciosa* desenvolvendo-se no sítio florestal (A) e no sítio urbano (B-C).



Legenda: Conteúdo de natureza fenólica observado apenas no interior das células dos raios parenquimáticos do lenho de árvores desenvolvendo-se no sítio urbano (setas). (A-B) Seções de lenho sem coloração. (C) Seção de lenho submetida ao cloreto férrico. Barras= 200µm.

Tabela 7 - Análise dos parâmetros quantitativos aferidos na estrutura do lenho de *Ceiba speciosa* crescendo nos sítios de estudo e os resultados estatísticos dos testes t-Student (t) e Mann-Whitney (Z).

| Parâmetros anatômicos | Sítio florestal | Sítio urbano | t | Z | p |
|--|--|--|----------|----------|----------|
| Elementos de vaso | | | | | |
| Comprimento (μm) | 413.7 - (445.4) - 471.8 \pm 19.3 | 361.5 (385.5) - 432.8 \pm 29.9 | 4.121 | | 0.002* |
| Diâmetro (μm) | 140.3 - (187.8) - 250.8 \pm 41.6 | 114.1 - (159.9) - 205.1 \pm 32.4 | 1.296 | | 0.224 |
| Espessura da parede (μm) | 4.1 - (5.6) - 8.5 \pm 1.5 | 5.3 - (6.4) - 7.5 \pm 0.9 | -1.141 | | 0.280 |
| Frequência (vasos / mm^2) | 1.1 - (1.8) - 2.8 \pm 0.6 | 1.3 - (2.4) - 3.3 \pm 0.8 | -1.398 | | 0.192 |
| Porcentagem no tecido (%) | 5.0 - (8.3) - 14.0 \pm 3.3 | 4.0 - (7.5) - 11.0 \pm 2.9 | 0.464 | | 0.653 |
| Pontoações intervasculares (μm) | 10.0 - (11.3) - 13.2 \pm 1.2 | 10.5 - (12.2) - 14.4 \pm 1.3 | -1.388 | | 0.195 |
| Pontoações parênquimo-vasculares (μm) | 10.2 - (11.9) - 14.2 \pm 1.4 | 9.4 - (11.0) - 12.8 \pm 1.2 | 1.205 | | 0.256 |
| Pontoações raio-vasculares (μm) | 10.3 - (13.5) - 16.8 \pm 2.6 | 11.1 - (11.8) - 14.0 \pm 1.1 | | 1.441 | 0.150 |
| Fibras | | | | | |
| Comprimento (μm) | 1902.0 - (2623.4) - 2933.2 \pm 376.2 | 1767.3 - (1911.8) - 2342.0 \pm 218.8 | | 2.562 | 0.010* |
| Diâmetro (μm) | 30.4 - (33.0) - 36.0 \pm 2.2 | 30.7 - (32.8) - 37.7 \pm 2.6 | 0.127 | | 0.901 |
| Lúmen (μm) | 19.5 - (21.8) - 24.2 \pm 2.0 | 17.3 - (21.2) - 27.8 \pm 3.5 | 0.404 | | 0.695 |
| Espessura da parede (μm) | 5.0 - (5.6) - 6.5 \pm 0.6 | 5.0 - (5.8) - 7.0 \pm 0.9 | -0.585 | | 0.572 |
| Frequência (fibras / mm^2) | 266.5 - (368.4) - 588.0 \pm 119.9 | 183.4 - (252.5) - 287.8 \pm 39.1 | 2.250 | | 0.048* |
| Porcentagem no tecido (%) | 29.0 - (39.8) - 53.0 \pm 8.6 | 19.0 - (27.5) - 38.0 \pm 6.9 | 2.743 | | 0.021* |
| Pontoações das fibras (μm) | 1.7 - (2.0) - 2.5 \pm 0.3 | 1.5 - (2.0) - 2.5 \pm 0.3 | 0.256 | | 0.803 |
| Parênquima axial | | | | | |
| Frequência (parênquima / mm^2) | 211.8 - (262.6) - 322.6 \pm 36.2 | 205.6 - (267.5) - 323.6 \pm 41.4 | -0.221 | | 0.829 |
| Porcentagem no tecido (%) | 20.0 - (32.2) - 44.0 \pm 8.4 | 32.0 - (41.7) - 50.0 \pm 6.8 | -2.146 | | 0.057 |
| Parênquima radial | | | | | |
| Comprimento (μm) | 618.4 - (892.3) - 1136.8 \pm 183.3 | 464.6 - (619.6) - 709.4 \pm 86.9 | 3.292 | | 0.008* |
| Comprimento (número de células) | 16.7 - (22.6) - 26.8 \pm 3.9 | 16.4 - (18.3) - 20.9 \pm 1.5 | | 1.922 | 0.055 |
| Largura (μm) | 60.7 - (80.9) - 99.7 \pm 14.9 | 95.7 - (127.6) - 243.1 \pm 56.8 | | -2.722 | 0.006* |
| Largura (número de células) | 2.6 - (3.1) - 4.4 \pm 0.7 | 3.2 - (3.9) - 4.6 \pm 0.6 | | -2.082 | 0.037* |
| Frequência (raios / mm^2) | 2.9 - (3.2) - 3.7 \pm 0.3 | 3.9 - (4.1) - 5.1 \pm 0.5 | | -2.882 | 0.004* |
| Porcentagem no tecido (%) | 11.0 - (19.7) - 28.0 \pm 6.3 | 11.0 - (23.3) - 33.0 \pm 9.7 | -0.779 | | 0.454 |

Nota: valores referentes ao valor mínimo - (valor médio) - valor máximo \pm desvio padrão. * Representa uma diferença significativa com um intervalo de confiança de 95% (p).

Tabela 8 - Índices de vulnerabilidade, mesomorfia e condutividade hidráulica do xilema secundário de *Ceiba speciosa* crescendo nos sítios de estudo.

| Índices ecológicos | Sítio florestal | Sítio urbano |
|---------------------------|-----------------|--------------|
| Vulnerabilidade (D/F) | 101,95 | 66,63 |
| Mesomorfia (V*L) | 45.411 | 25.682 |
| Condutividade (r^4/F) | 42.203.162 | 17.029.898 |

Nota: D: Diâmetro médio dos elementos de vaso; F: Frequência média dos elementos de vaso; V: Índice de vulnerabilidade; L: Comprimento médio dos elementos de vaso; r^4 – Média dos raios dos elementos de vaso elevada à quarta potência

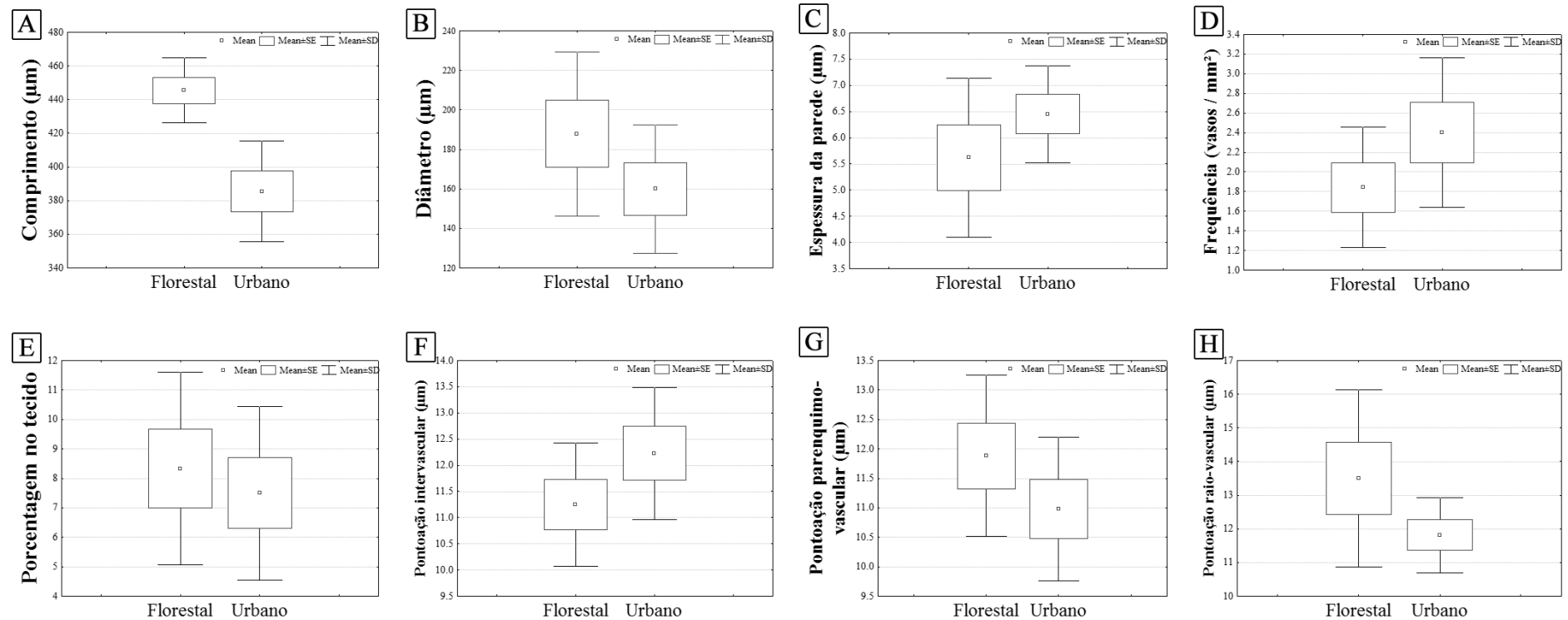
Tabela 9 - Índices de plasticidade fenotípica calculados para cada parâmetro anatômico aferido no lenho de *Ceiba speciosa*.

| Parâmetros anatômicos | Plasticidade fenotípica |
|--|-------------------------|
| Elementos de vaso | |
| Comprimento (μm) | 0,234 |
| Diâmetro (μm) | 0,545 |
| Espessura da parede (μm) | 0,516 |
| Frequência (vasos / mm^2) | 0,677 |
| Porcentagem no tecido (%) | 0,714 |
| Pontoações intervasculares (μm) | 0,304 |
| Pontoações parênquimo-vasculares (μm) | 0,337 |
| Pontoações raio-vasculares (μm) | 0,384 |
| Fibras | |
| Comprimento (μm) | 0,397 |
| Diâmetro (μm) | 0,196 |
| Lúmen (μm) | 0,377 |
| Espessura da parede (μm) | 0,290 |
| Frequência (fibras / mm^2) | 0,688 |
| Porcentagem no tecido (%) | 0,578 |
| Pontoações das fibras (μm) | 0,392 |
| Parênquima axial | |
| Frequência (parênquima / mm^2) | 0,365 |
| Porcentagem no tecido (%) | 0,600 |
| Parênquima radial | |
| Comprimento (μm) | 0,591 |
| Comprimento (número de células) | 0,379 |
| Largura (μm) | 0,750 |
| Largura (número de células) | 0,435 |
| Frequência (raios / mm^2) | 0,431 |
| Porcentagem no tecido (%) | 0,667 |

Nota: Plasticidade máxima = 1,0 (VALLADARES et al. 2006)

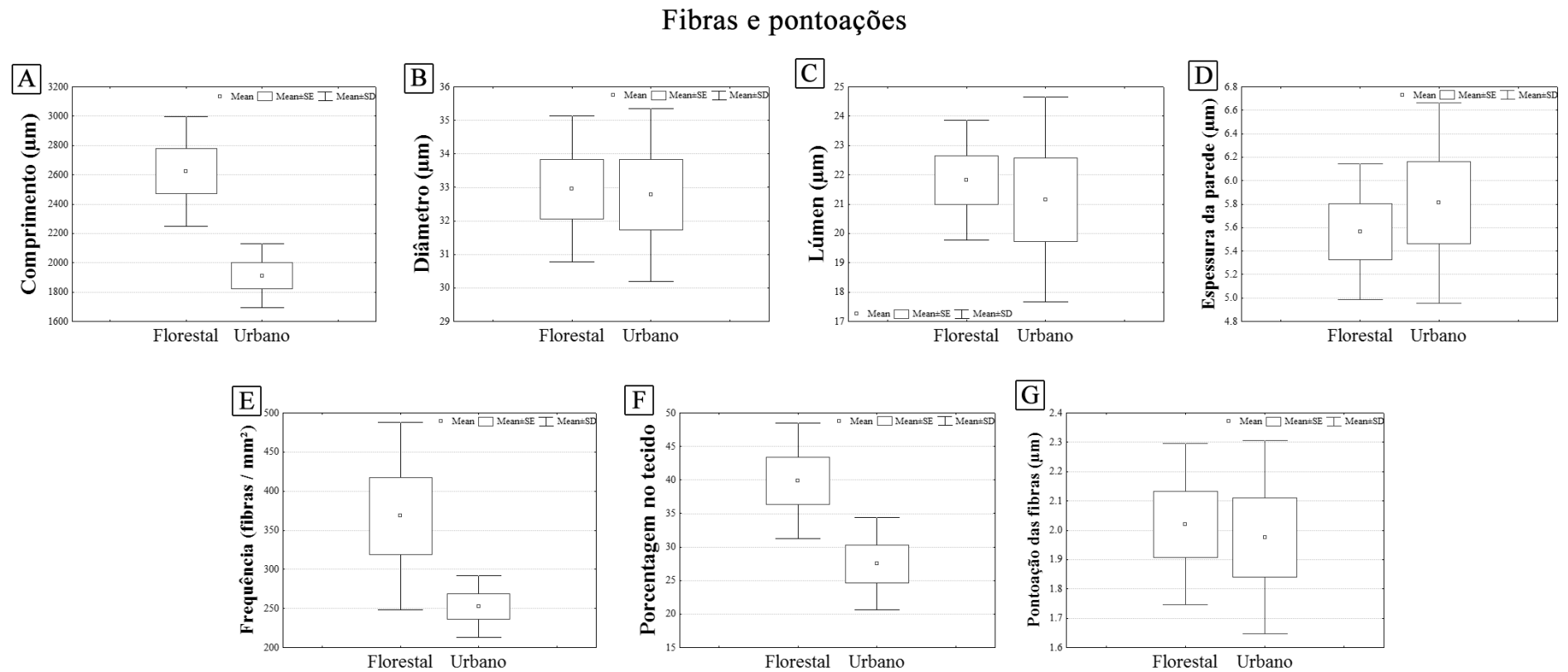
Figura 15 - Box-plots dos parâmetros anatômicos quantitativos, aferidos no lenho de *Ceiba speciosa* nos sítios florestal e urbano, referentes aos elementos de vaso e às pontoações associadas a estes.

Elementos de vaso e pontoações



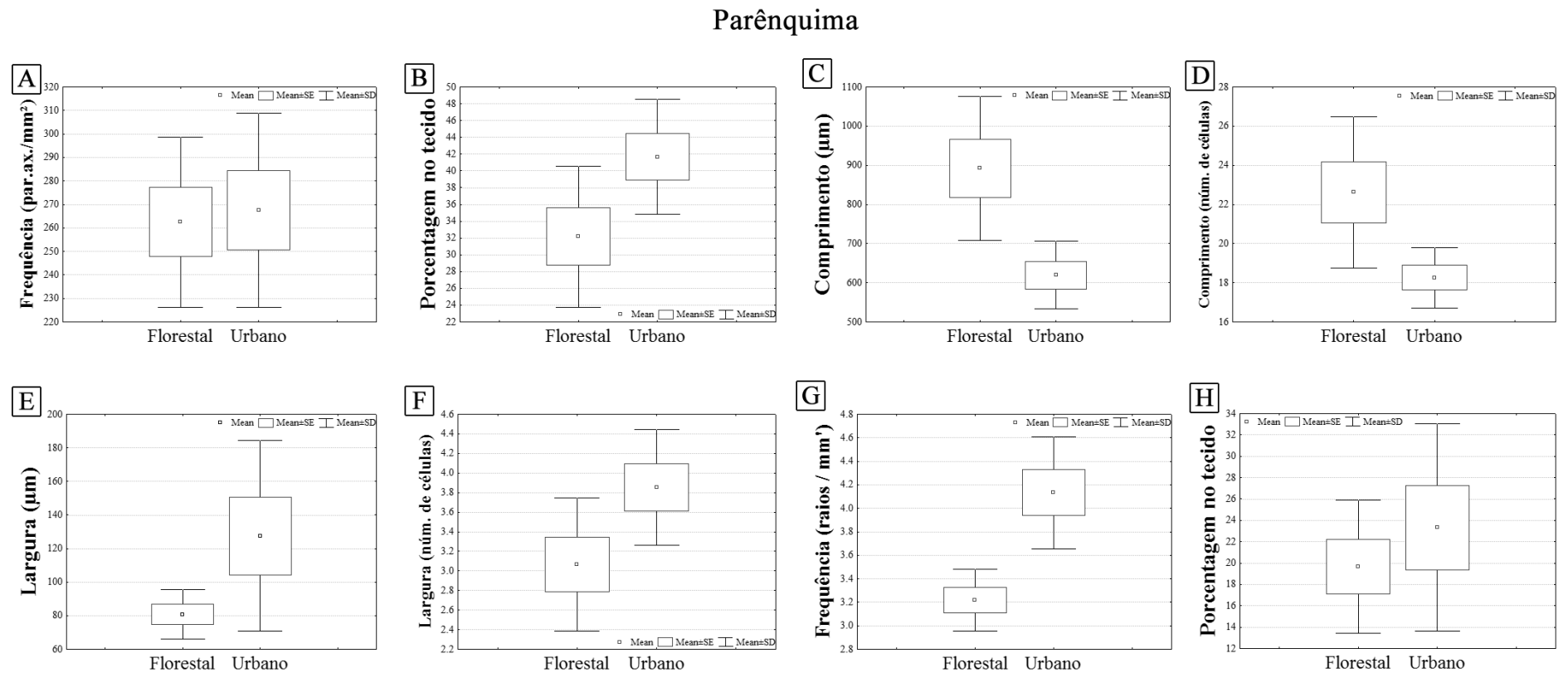
Legenda: (A) Comprimento dos elementos de vaso (μm). (B) Diâmetro dos elementos de vaso (μm). (C) Espessura da parede dos elementos de vaso (μm). (D) Frequência dos elementos de vaso (vasos / mm^2). (E) Porcentagem dos elementos de vaso no tecido (%). (F) Diâmetro das pontoações intervasculares (μm). (G) Diâmetro das pontoações parênquimo-vasculares (μm). (H) Diâmetro das pontoações raio-vasculares (μm).

Figura 16 - Box-plots dos parâmetros anatômicos quantitativos, aferidos no lenho de *Ceiba speciosa* nos sítios florestal e urbano, referentes às fibras e às pontoações associadas a estas.



Legenda: (A) Comprimento das fibras (μm). (B) Diâmetro das fibras (μm). (C) Lúmen das fibras (μm). (D) Espessura da parede das fibras (μm). (E) Frequência das fibras (fibras / mm²). (F) Porcentagem das fibras no tecido (%). (G) Pontoações das fibras (μm).

Figura 17 - Box-plots dos parâmetros anatômicos quantitativos, aferidos no lenho de *Ceiba speciosa* nos sítios florestal e urbano, referentes às células parenquimáticas, axiais e radiais.



Legenda: (A) Frequência de parênquima axial (parênquima / mm²). (B) Porcentagem de parênquima axial no tecido (%). (C) Comprimento dos raios parenquimáticos (μm). (D) Comprimento dos raios parenquimáticos (número de células). (E) Largura dos raios parenquimáticos (μm). (F) Largura dos raios parenquimáticos (número de células). (G) Frequência de raios parenquimáticos (raios / mm²). (H) Porcentagem de raios parenquimáticos no tecido (%).

4.4 Discussão

As diferenças observadas na estrutura do xilema secundário de *C. speciosa* refletiram as características observadas na estrutura do câmbio da espécie crescendo em sítio florestal e urbano, descritas na seção 3 desta tese. Carlquist (1975) já havia relatado esta relação direta entre a forma das células iniciais do câmbio e o resultado observado nas células do xilema e floema secundários, que somados aos processos subsequentes de alongamento e diferenciação inerentes a esses tecidos, determinaram sua estrutura adulta.

Apesar da plasticidade observada em muitos parâmetros quantitativos do lenho sob condições ambientais diferentes (por exemplo: LUCHI 2004; RIBEIRO; BARROS 2006; MELO-JÚNIOR et al. 2011; MARQUES et al. 2012; FICHTLER; WORBES 2012), a anatomia do xilema secundário é considerada, qualitativamente, um caráter conservativo em muitas espécies, sendo por isso bastante utilizada como um dos parâmetros distintivos em estudos taxonômicos (por exemplo: GASSON; WEBLEY 1999; PERNÍIA; MELANDRI 2006; MARCHIORI; OLIVEIRA-DEBLE 2007; REIS et al. 2011; CARLQUIST 2012; MACEDO et al. 2014; SILVA et al. 2014; MARQUES et al. 2015). O lenho de *C. speciosa* apresentou diferenças qualitativas no sítio urbano quando comparado ao sítio florestal, tais como: arranjo irregular e sinuosidade dos raios parenquimáticos e presença de elementos de vaso com formatos irregulares. Enquanto que no sítio florestal, as características do lenho de *C. speciosa* estão de acordo com as descrições qualitativas apresentadas na literatura para esta espécie e para outras do mesmo gênero (METCALFE; CHALK 1950; BONINSEGNA 1989; TOMAZELLO-FILHO et al. 2004). Além disso, a distensão dos raios parenquimáticos, citada como uma das características estruturais que demarcam os limites dos anéis de crescimento na madeira de *C. speciosa* (TOMAZELLO-FILHO et al. 2004) foi mais evidente no sítio florestal. Vale destacar que para as árvores da espécie crescendo neste sítio, esta característica pode ser classificada como do lenho inicial, visto a maior largura dos raios cambiais durante o período de atividade (Seção 3 da tese). Todavia, no sítio urbano não foram observadas diferenças significativas entre a largura dos raios cambiais nos períodos de atividade e dormência (Seção 3). Este fato pode justificar a menor evidência da distensão dos raios nos anéis de crescimento das árvores neste sítio de estudo. Assim, essas características qualitativamente diferentes presentes nas árvores crescendo no sítio impactado pela

urbanização sugerem que as descrições anatômicas do lenho devam ser preferencialmente realizadas em árvores sob condição natural.

As estratégias hidráulicas observadas no lenho de *Ceiba speciosa*, como baixa densidade da madeira (0,34) (CARVALHO 2003; LORENZI 1998; MENDES 2013), elementos de vaso com grandes diâmetros e altos índices de condutividade, podem estar relacionada com o padrão fenológico foliar decíduo observado na espécie, tendo em vista que espécies tropicais decíduas tendem a perder suas folhas durante períodos de déficit hídrico (por exemplo: REICH; BORCHERT 1984; BORCHERT 1999; COSTA et al. 2013). Ao perder suas folhas durante os períodos mais secos do ano, as espécies decíduas diminuem os riscos de cavitação decorrentes da seca. Assim, essas espécies tendem a apresentar elementos de vaso com maior diâmetro e maior eficiência no transporte de água. Por outro lado, as espécies caducifólias apresentam estrutura do xilema associada com a tolerância à seca, ou seja, vasos estreitos e em maior número (CHOAT et al. 2003, 2005; MARKESTEIJN et al. 2011; MÉNDEZ-ALONZO et al. 2012; SCHOLZ et al. 2014). As propriedades hidráulicas, que variam entre as espécies, correspondem a um clássico *trade-off* entre eficiência e segurança no transporte de água e sais minerais (CHOAT 2005; MARKESTEIJN et al. 2011). Cabe destacar, no entanto, que a ocorrência de espécies caducifólias e decíduas em uma mesma floresta revela estratégias diferentes para lidar com as mesmas condições ambientais, e conseqüentemente, a perda de folhas não pode ser vista como essencial para a sobrevivência durante as secas sazonais.

A tendência observada nas iniciais fusiformes do câmbio (Seção 3) foi mantida na estrutura do xilema secundário de *C. speciosa*. As árvores do sítio urbano apresentaram fibras e elementos de vaso mais curtos e com menor diâmetro, quando comparadas às árvores do sítio florestal. Alves (1995) e Gupta & Iqbal (2005) também observaram que árvores de *Cecropia glaziovii* Snethl. (Urticaceae) e *Mangifera indica* L. cv Deshi (Anacardiaceae), respectivamente, apresentaram elementos condutores mais curtos quando se desenvolviam em sítios poluídos. Sukumaran (2014), avaliando o efeito da poluição ambiental na morfologia e na anatomia foliar e do lenho de três espécies tropicais na Índia, observou diferentes respostas adaptativas dessas espécies à mesma condição de estresse, e destacou a influência genética nessas adaptações. Um estudo recente, realizado em casa de vegetação, avaliou a influência de CO₂ e de fertilizantes em caracteres estruturais do lenho de *Fagus sylvatica* L. (Fagaceae) e *Populus × canescens* (Aiton) Sm. (Salicaceae) (LOTFIOMRAN et al. 2015). Nesse estudo, os autores também constataram que as respostas da formação da madeira em relação ao aumento dos níveis de CO₂ e fertilizantes variam dependendo da espécie. Contudo, reforçam

que os caracteres relacionados aos vasos, como tamanho e frequência, são mais fortemente influenciados pelo aumento dos níveis de CO₂ do que pelos níveis de fertilizantes (LOTFIOMRAN et al. 2015). Destacam ainda que, sob níveis maiores de CO₂, observa-se redução do tamanho dos elementos de vaso e que este resultado independe do efeito de fertilização.

Além dos poluentes ambientais genotóxicos presentes no sítio urbano (RAINHO et al. 2013a, 2013b), a diminuição das chuvas e o aumento da temperatura neste sítio foram relacionados às características observadas no lenho de *C. speciosa*. Baas; Wheeler (2011) relataram uma relação direta entre as características climáticas e a anatomia do lenho. Esses autores reforçaram que as demandas de água pela planta variam em diferentes condições climáticas ao longo de gradientes de temperatura, umidade e sazonalidade. Este fato explica porque existem tendências ecológicas significativas ao longo destes três gradientes para muitos atributos da anatomia lenho. Nesse sentido, as propriedades hidráulicas do xilema fornecem informações sobre a capacidade de abastecimento que uma planta dispõe para a fotossíntese e o desenvolvimento dos tecidos (TYREE; YANG 1992; MELCHER et al. 2012). A condutância do lenho refere-se à habilidade de um tubo capilar de transportar água, e, é baseada e afetada por inúmeros fatores, incluindo diâmetro e altura do tubo e gradiente de coesão das moléculas de água (CARLQUIST 1975). A quebra da coluna de água é chamada de cavitação e está relacionada à falta de água (CARLQUIST 1975; DICKSON 2000). Estratégias relacionadas a ambientes mais secos foram observadas nas árvores do sítio urbano. Células condutoras mais curtas e com menor diâmetro, como as observadas neste sítio, estão relacionadas à maior segurança do transporte de água e nutrientes e, normalmente estão presentes em ambientes sob déficit hídrico (CHAVE et al. 2009; MARQUES et al. 2012; FERNANDEZ et al. 2012; FICHTLER; WORBES 2012).

Os índices ecológicos do xilema secundário de *Ceiba speciosa* observados no sítio urbano também seguiram o esperado para espécies de climas mais secos (CARLQUIST 1977; BAAS; WHEELER 2011). Neste sítio, as árvores apresentaram menores valores de vulnerabilidade, mesomorfia e condutividade do que as árvores do sítio florestal. Apesar da relação direta com o ambiente, valores menores de vulnerabilidade e mesomorfia também foram relatados para árvores expostas à poluição (GUPTA; IQBAL 2005).

Os raios xilemáticos, assim como os raios cambiais (Seção 3), foram os parâmetros que apresentaram a maior plasticidade em *C. speciosa*. Alves (1995), estudando a madeira de *Cecropia glaziovii* Snethl. (Urticaceae) sob diferentes níveis de poluição industrial, também constatou que as maiores diferenças foram relacionadas ao parênquima radial. A autora relata

que, assim como observado em *C. speciosa*, *Cecropia glaziovii* também apresenta raios parenquimáticos mais curtos e em maior frequência em árvores sob poluição industrial. O alargamento dos raios parenquimáticos de *C. speciosa* representa um dos reflexos do impacto da poluição urbana sobre a estrutura do câmbio da espécie, discutida na seção 3 desta tese.

A menor proporção de fibras e a maior proporção de parênquima axial observadas no lenho das árvores *C. speciosa* do sítio urbano também podem estar associadas à situação mais seca neste sítio. Carlquist (2015) destaca que as funções de estoque de água e amido provavelmente correspondem ao extenso tamanho das células do parênquima axial de *C. speciosa*. Fichtler; Worbes (2012) avaliaram a relação entre características do lenho de 111 espécies tropicais e relacionaram com condições ambientais e com a morfologia individual das árvores. Estes autores observaram forte correlação negativa entre as porcentagens de fibras e de parênquima no lenho dessas espécies. Além disso, foram observadas correlações positivas entre a porcentagem de fibras e os índices de precipitação, e entre a porcentagem de parênquima e os períodos de estresse hídrico (FICHTLER; WORBES 2012). As células de parênquima atuam no transporte, no carregamento e como fonte de reserva de água e metabólitos nos períodos de seca, e assim, evitam as tensões existentes nos vasos de xilema neste período (FAHN 1982; DÜNISCH; MORAES 2002; DÜNISCH; PULS 2003; CARLQUIST 2015; GRIČAR; ELER 2015). De tal modo, que investir na diferenciação de células parenquimáticas em locais sob estresse pode refletir uma estratégia para o fornecimento mais rápido e melhor de suas reservas (DÜNISCH; PULS 2003; FICHTLER; WORBES 2012). As fibras, por sua vez, são células especializadas em proporcionar sustentação e maior resistência aos tecidos vegetais (EVERT 2013). Essas células requerem maior investimento em carbono para a formação de suas paredes espessas e, por necessitarem de grande investimento metabólico, são em geral produzidas em maior proporção nos ambientes menos estressantes. As árvores que se desenvolvem em ambientes sob estresse tendem a investir em células parenquimáticas, assegurando um maior crescimento decorrente do mais rápido fornecimento das reservas armazenadas nessas células (FICHTLER; WORBES 2012). Contudo, além da relação direta com o diâmetro dos vasos, a vulnerabilidade à cavitação nas Angiospermas depende também da resistência mecânica proporcionada pelas fibras, pois, plantas com maior proporção dessas células podem tolerar pressões negativas maiores nos elementos de vaso (HACKE et al. 2001; CHAVE et al. 2009). Portanto, além de proporcionar uma madeira mais macia, frágil e vulnerável a pragas e a distúrbios ambientais (CHAVE et al. 2009), a menor proporção de fibras e um maior

investimento em células parenquimáticas, também, pode influenciar a condutividade hidráulica das árvores de *C. speciosa* no sítio urbano.

5 DENDROCRONOLOGIA E DENDROCLIMATOLOGIA

5.1 Introdução

A dinâmica de crescimento de uma planta lenhosa fica, de modo geral, registrada na madeira, por meio dos anéis de crescimento presentes nos caules e raízes. Examinar a estrutura desses anéis fornece a oportunidade de adicionar o componente *tempo* no estudo das respostas das plantas às variações ambientais. Os anéis de crescimento são, portanto, valiosos na identificação de como os processos de crescimento ocorrem e são sensíveis a essas variações ao longo de muitas décadas (KOZLOWSKI et al. 1991; SCHWEINGRUBER 2007; KITZBERGER et al. 2000; CALLADO 2010; FONTI et al. 2010; ZUIDEMA et al. 2013).

O estudo dos anéis de crescimento presentes no xilema secundário das plantas recebe o nome de Dendrocronologia e visa analisar e interpretar o crescimento radial das árvores. Esta ciência atribui uma data do calendário a esses anéis, conferindo, desta maneira, uma sequência temporal aos eventos ambientais que influenciam a formação da madeira (SCHWEINGRUBER 2007). Isto é possível porque as mudanças ambientais induzem reações fisiológicas e metabólicas nas plantas lenhosas e, resultam em anéis de crescimento com diferentes larguras e características anatômicas (FICHTLER; FORBES 2012). Assim, oscilações de fatores ambientais, como por exemplo, temperatura, umidade e radiação solar, são capazes de ficar armazenadas nos anéis de crescimento (GONÇALVES 2007; CALLADO et al. 2001b; CALLADO 2010), servindo de instrumento de monitoramento ambiental (SPIECKER 2002; OLIVEIRA et al. 2009; CALLADO 2010; GRIČAR et al. 2011; ZUIDEMA et al. 2012).

Os anéis de crescimento têm sido utilizados com sucesso em inúmeros estudos para datar atividades antropogênicas, reconstruir climas passados, estudar as dinâmicas de crescimento florestal, investigar distúrbios naturais (avalanches, erupções vulcânicas, incêndios, pragas, entre outros), processos geomorfológicos, entre outros (WORBES et al. 2003; GRAU et al. 2003; ESTRADA et al. 2008; OLIVEIRA et al. 2009; CALLADO 2010; CALLADO; GUIMARÃES 2010; BRANDES et al. 2011; GRIČAR et al. 2011; SOUZA et al. 2016). Cabe destacar que no cenário atual de preocupação com as mudanças globais, compreender as respostas das plantas ao ambiente pretérito representa uma possibilidade de projetar como serão suas respostas futuras (WAY; OREN 2011).

Após a avaliação da estrutura anatômica do câmbio sob poluição urbana e seu reflexo na estrutura anatômica do xilema secundário formado neste ambiente (Seções 3 e 4, respectivamente), esta seção tem por objetivo avaliar o impacto do ambiente urbano sobre a dinâmica de crescimento radial de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravennae visa responder as seguintes questões: (1) qual a idade das árvores em cada condição de crescimento? (2) quais as taxas de incremento radial da espécie em cada um desses sítios? (3) as respostas do crescimento radial ao clima variam em cada situação? (4) existem aspectos, negativos ou positivos, relacionados à dinâmica de crescimento radial da espécie que possam ser atribuídos à poluição urbana?

5.2 Material e Métodos

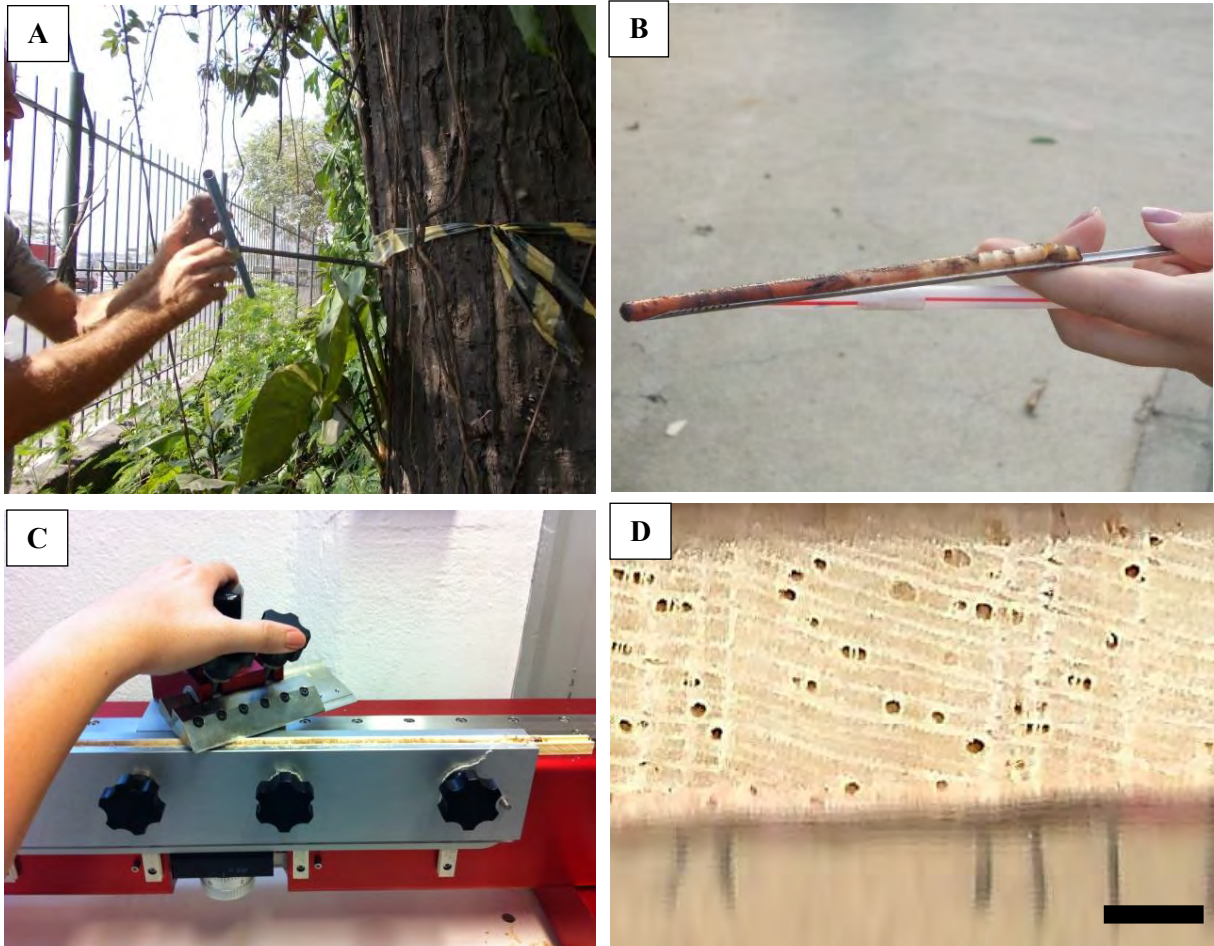
Quarenta e uma árvores de *Ceiba speciosa* foram selecionadas para este estudo, sendo 15 no sítio florestal e 26 no sítio urbano. De cada árvore foram obtidas de 2 a 4 amostras de madeira, com o auxílio de sonda de Pressler, a uma distância de 1,30 m do solo (Figura 18A-B). As amostras foram mantidas em temperatura ambiente até completa desidratação. As amostras foram polidas por secção em micrótomo WSL-core (Figura 18C-D), desenvolvido para amostras longas como as obtidas por sonda de Pressler (GÄRTNER; NIEVERGELT 2010). A demarcação dos limites das camadas de crescimento foi realizada sob microscópio estereoscópico e, em seguida, cada amostra foi digitalizada em 1200 dpi, utilizando scanner de mesa HP Deskjet 2540. Por meio das imagens obtidas, as larguras das camadas de crescimento foram mensuradas com o auxílio do software de análise de imagens Image-Pro Plus 4.5. As séries de medidas, por e entre indivíduos (datação-cruzada), foram correlacionadas utilizando o software COFECHA (HOLMES et al. 1983). Foram calculadas as idades e as taxas de incremento médio anual (IMA) e de incremento médio corrente (IMC) das árvores presentes nos dois sítios. As séries de medidas com melhor correlação entre si foram utilizadas para a construção da cronologia de cada sítio de estudo, a partir software ARSTAN (COOK; KAIRIUKSTIS 1990; COOK; HOLMES 1996). Afim de diminuir a influência das altas taxas de crescimento observadas nos anos iniciais (FRITTS 1972) e ressaltar melhor a variabilidade entre as larguras das camadas de crescimento em todos os

anos, foi adotada a curva exponencial como forma de ajuste no processo de construção das cronologias (COOK; HOLMES 1996).

Apesar das diferenças de intensidade, os índices de precipitação e temperatura dos sítios, florestal e urbano, apresentaram uma sincronia na oscilação dos períodos secos e chuvosos (Seção 1.6. Figura 4). Apesar das diferenças constatadas no sítio urbano, que apresenta elevação de até 3 °C nos meses de junho a agosto e que é cerca de 40% mais seco nos meses de janeiro e fevereiro, foi possível considerar um padrão climático único para as duas áreas (Seção 1.6). Este dado permitiu a utilização das mesmas séries climáticas nas análises do crescimento das árvores de cada sítio de estudo, visto a ausência de dados mensais completos para cada área. Desta maneira, as séries temporais mensais de temperatura e precipitação, relativas ao período de 1948 a 2012, foram obtidas do banco de dados meteorológicos do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a partir de médias interpoladas de dados de estações climáticas localizadas em coordenadas geográficas próximas aos sítios de estudo. As séries climáticas mensais são consideradas de alta resolução e fazem parte do projeto criado e analisado pelo National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NCAR Global, KALNAY et al. 1996).

A correlação de Pearson (ZAR 2010) foi aplicada entre as cronologias residuais construídas para cada sítio e as séries climáticas de temperatura e precipitação. As cronologias residuais foram correlacionadas com índices mensais do ano corrente (Janeiro-Dezembro), com índices mensais do ano corrente passado (Janeiro-Dezembro do ano anterior), com o total de precipitação e média de temperatura do ano de crescimento (Setembro-Agosto), com o total de precipitação e média de temperatura do período de crescimento ativo (Setembro-Março), com o total de precipitação e média de temperatura do período chuvoso (Dezembro-Março) e com o total de precipitação e média de temperatura do período seco (Junho-Agosto). Também foram avaliados o grau de semelhança das idades e das taxas de incremento radial entre os sítios e a correlação entre idade e diâmetro das árvores para cada um dos sítios estudados. Todas as análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software *Statistica* 7.

Figura 18 - Obtenção de amostras de lenho de *Ceiba speciosa* para análise dendrocronológica



Legenda: (A) e (B) Coleta e amostra obtida com auxílio de Sonda de Pressler. (C) Polimento da amostra realizado com micrótomo de deslize WLS. (D) Amostra de lenho polida e com os limites dos anéis de crescimento demarcados. Barra = 1,2 mm.

5.3 Resultados

As árvores de *Ceiba speciosa* em ambos os sítios de estudo apresentaram anéis de crescimento distintos, demarcados por faixa de parênquima, maior espessamento e achatamento radial das paredes das fibras e distensão dos raios no limite entre anéis de crescimento consecutivos (Figura 12A e 18D). Os maiores índices de intercorrelação e sensibilidade obtidos pelo software COFECHA foram observados para 10 árvores no sítio

florestal (0,40 de intercorrelação e 0,466 de sensibilidade) e entre 15 árvores no sítio urbano (0,51 de intercorrelação e 0,624 de sensibilidade). As idades, as taxas de crescimento e as cronologias residuais foram calculadas com estas 25 árvores (Tabela 10).

Tabela 10 - Análise dendrocronológica das árvores de *Ceiba speciosa* nos sítios de estudo

| Sítios | Árvore | IRMA (mm) | IRA (mm) | Idade (Anos) | Diâmetro (cm) |
|---|--------|-----------|----------|--------------|---------------|
| Florestal | 1 | 4.32 | 224.47 | 52 | 182 |
| Florestal | 2 | 4.94 | 187.72 | 38 | 153 |
| Florestal | 3 | 3.31 | 89.28 | 27 | 87 |
| Florestal | 4 | 4.39 | 114.05 | 26 | 145 |
| Florestal | 5 | 2.45 | 134.66 | 55 | 165 |
| Florestal | 6 | 4.04 | 137.35 | 34 | 121 |
| Florestal | 7 | 5.25 | 189.11 | 36 | 177 |
| Florestal | 8 | 3.99 | 231.29 | 58 | 171 |
| Florestal | 9 | 3.80 | 243.48 | 64 | 222 |
| Florestal | 10 | 3.81 | 179.26 | 47 | 183 |
| Valores médios de <i>C. speciosa</i> no sítio florestal | | 4,03 | 173,07 | 43,7 | 160,6 |
| Urbano | 1 | 4,63 | 134,31 | 29 | 106 |
| Urbano | 2 | 5,65 | 152,48 | 27 | 186 |
| Urbano | 3 | 6,30 | 69,34 | 11 | 76 |
| Urbano | 4 | 5,90 | 135,66 | 23 | 163 |
| Urbano | 5 | 6,07 | 151,64 | 25 | 140 |
| Urbano | 6 | 5,71 | 234,23 | 41 | 254 |
| Urbano | 7 | 3,97 | 71,43 | 18 | 70 |
| Urbano | 8 | 4,69 | 117,28 | 25 | 103 |
| Urbano | 9 | 6,46 | 168,09 | 25 | 144 |
| Urbano | 10 | 7,04 | 197,27 | 28 | 110 |
| Urbano | 11 | 5,35 | 112,32 | 22 | 100 |
| Urbano | 12 | 5,53 | 138,35 | 25 | 142 |
| Urbano | 13 | 10,40 | 239,11 | 23 | 208 |
| Urbano | 14 | 8,50 | 118,97 | 14 | 171 |
| Urbano | 15 | 4,49 | 98,838 | 22 | 204 |
| Valores médios de <i>C. speciosa</i> no sítio urbano | | 6,05 | 142,62 | 23,9 | 145,1 |

Nota: IRMA: Incremento radial médio anual. IRA: Incremento radial acumulado. Diâmetro mensurado em árvores vivas incluindo a periderme

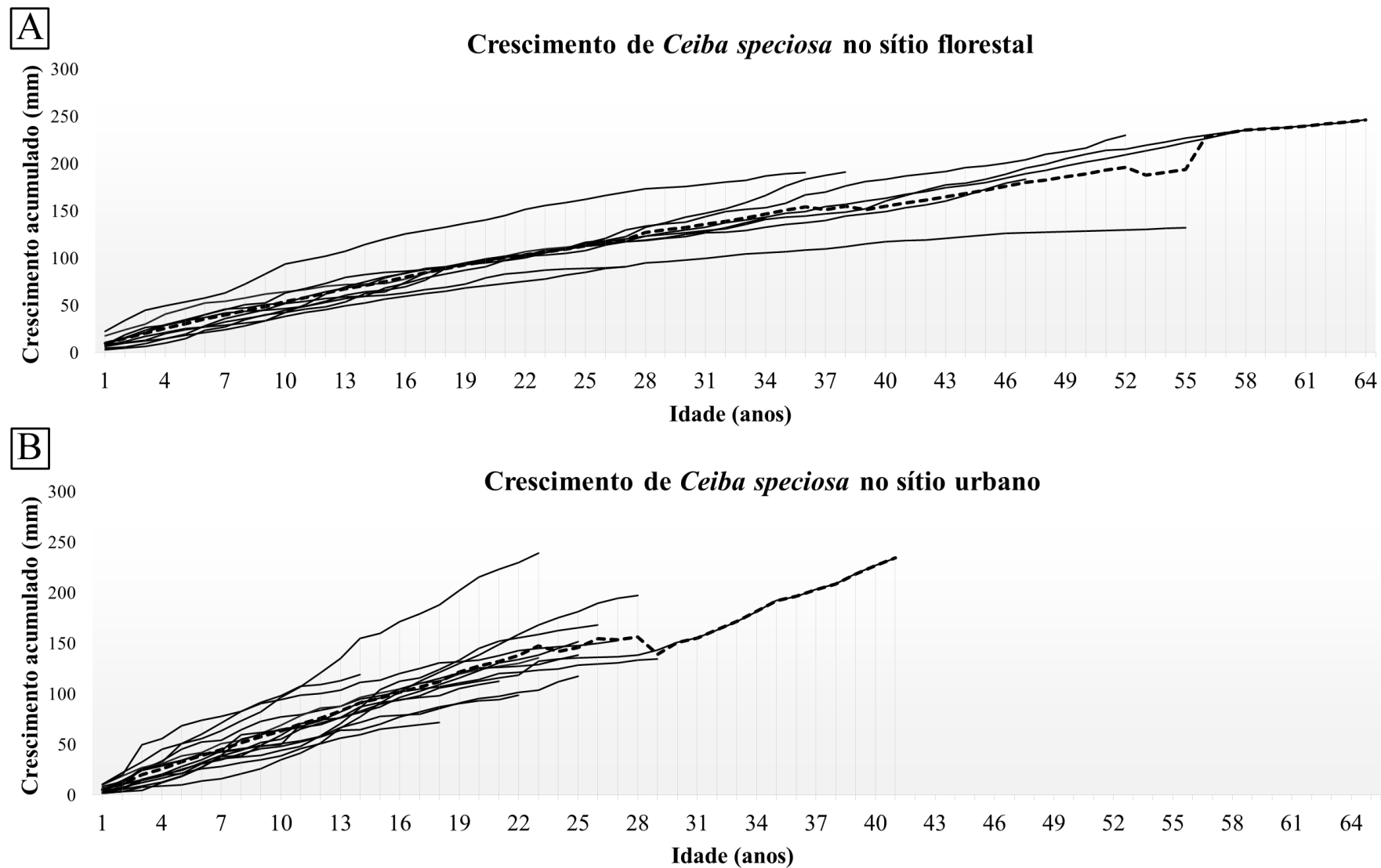
No sítio florestal, as árvores apresentaram idades entre 27 e 64 anos, enquanto que no sítio urbano, as idades variaram entre 11 e 41 anos (Figura 19). No sítio florestal, as taxas de incremento médio anual e de incremento médio acumulado foram de 4 mm/ano e 173,07 mm, respectivamente. No sítio urbano, estas taxas foram de 6mm/ano e 142,62 mm, respectivamente. As análises estatísticas revelam diferenças significativas entre as idades e as taxas de incremento radial anual das árvores de cada sítio (idades – $t = 5,15$, $p = 0,000$ e taxas de incremento médio anual – $t = -3,65$, $p = 0,0013$). No sítio urbano, as árvores apresentaram valores mais elevados de taxas de incremento desde o início de desenvolvimento das árvores (Figura 19), com incremento acumulado médio de 62,87 mm aos 10 anos e de 226,95 mm, aos 40 anos. No entanto, no sítio florestal, as árvores apresentaram valores de incremento acumulado de 48,57 mm aos 10 anos e 151,10 mm aos 40 anos. As árvores de ambos os sítios alcançaram valores semelhantes de incremento acumulado com diferença de aproximadamente 20 anos de idade (Figura 19). Correlações positivas significativas entre idade e diâmetro foram observadas apenas para as árvores do sítio florestal (florestal: $r^2 = 0,617$, $p = 0,007$; urbano: $r^2 = 0,257$, $p = 0,054$).

As cronologias residuais construídas para cada sítio apresentaram variação no número de amostras utilizadas no decorrer dos anos. O número de amostras utilizadas nos últimos anos de ambas as cronologias foi maior do que o número de amostras utilizadas no início de cada uma. A cronologia construída para o sítio florestal apresentou ao todo 20 amostras e a cronologia do sítio urbano foi construída com 26 amostras (Figura 20).

As correlações entre as cronologias e os fatores climáticos evidenciaram uma associação positiva entre os períodos quentes e chuvosos e o crescimento, em ambos os sítios de estudo (Figuras 21-24). No entanto, observa-se uma resposta imediata das árvores urbanas em relação às chuvas e, uma resposta tardia das árvores do sítio florestal ao mesmo fator. Em ambos os sítios, as árvores apresentaram crescimento correlacionado positivamente com as chuvas ocorridas no período mais seco (Figuras 21 e 22). No sítio urbano, observamos correlação positiva entre o crescimento das árvores e os índices de precipitação dos meses de julho do ano anterior ($r = 0,3138$, $p = 0,046$) e de agosto do ano corrente ($r = 0,5969$, $p = 0,000$) (Figura 21). No sítio florestal, observamos correlação significativa apenas entre a cronologia e os índices de precipitação do mês de junho do ano anterior ($r = 0,3366$, $p = 0,006$) (Figura 22). Neste sítio, não observamos correlação entre o crescimento e as chuvas do ano corrente. Em relação aos índices de temperatura, observamos correlação significativa apenas entre esta variável climática e o crescimento das árvores no sítio urbano. Neste sítio, o crescimento apresentou correlação positiva significativa com os índices de temperatura de

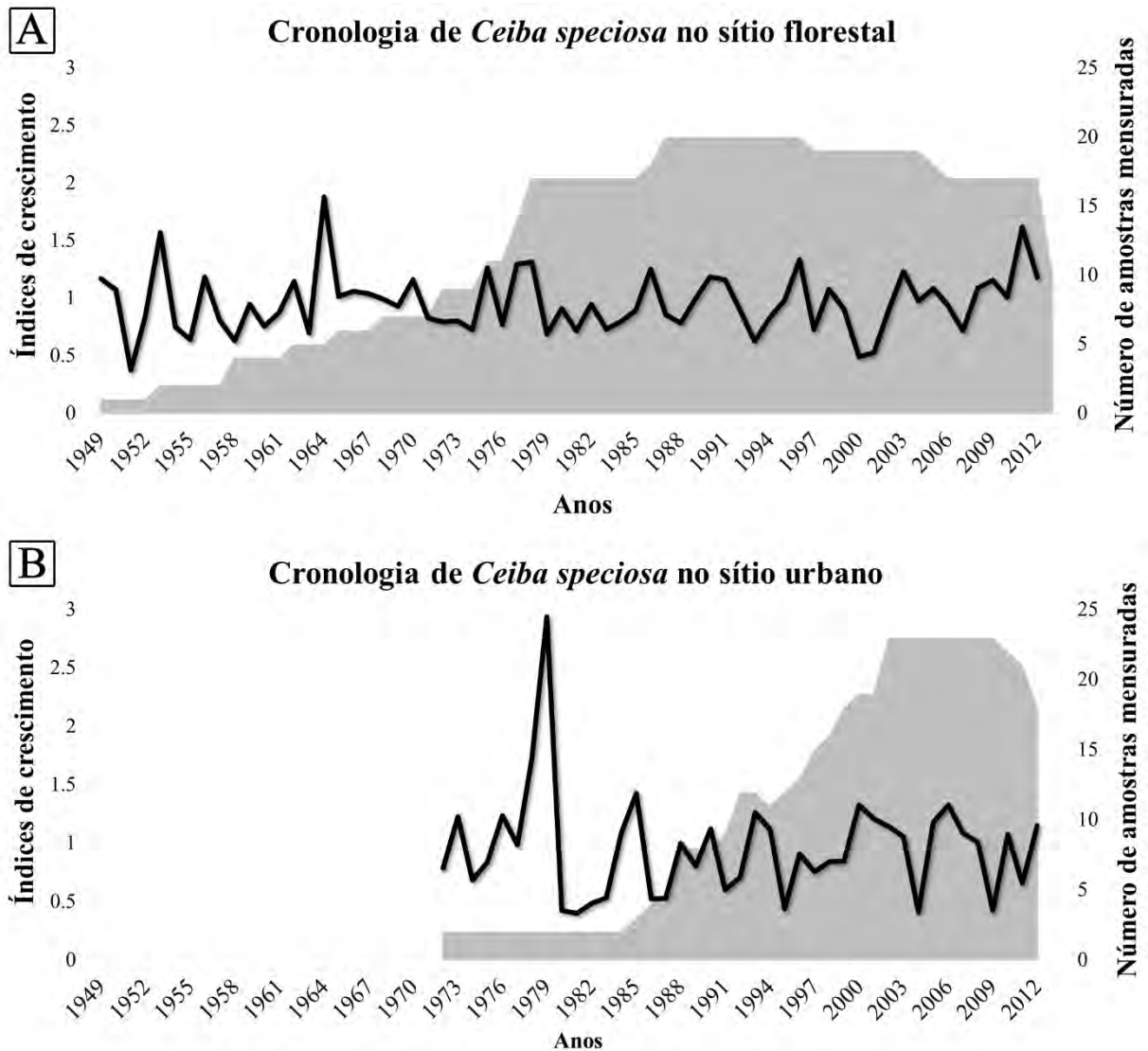
outubro do ano corrente ($r = 0,3275$, $p = 0,037$) (Figura 22). Apesar das correlações não serem significativas com os índices de temperatura no sítio florestal, observa-se uma tendência entre o aumento das temperaturas no período mais seco do ano corrente e a diminuição das taxas de crescimento radial (julho, $r = -0,2380$, $p = 0,056$) (Figura 23).

Figura 19 - Taxas de incremento radial acumulado de árvores de *Ceiba speciosa* em ambiente florestal (A) e sob poluição urbana (B).



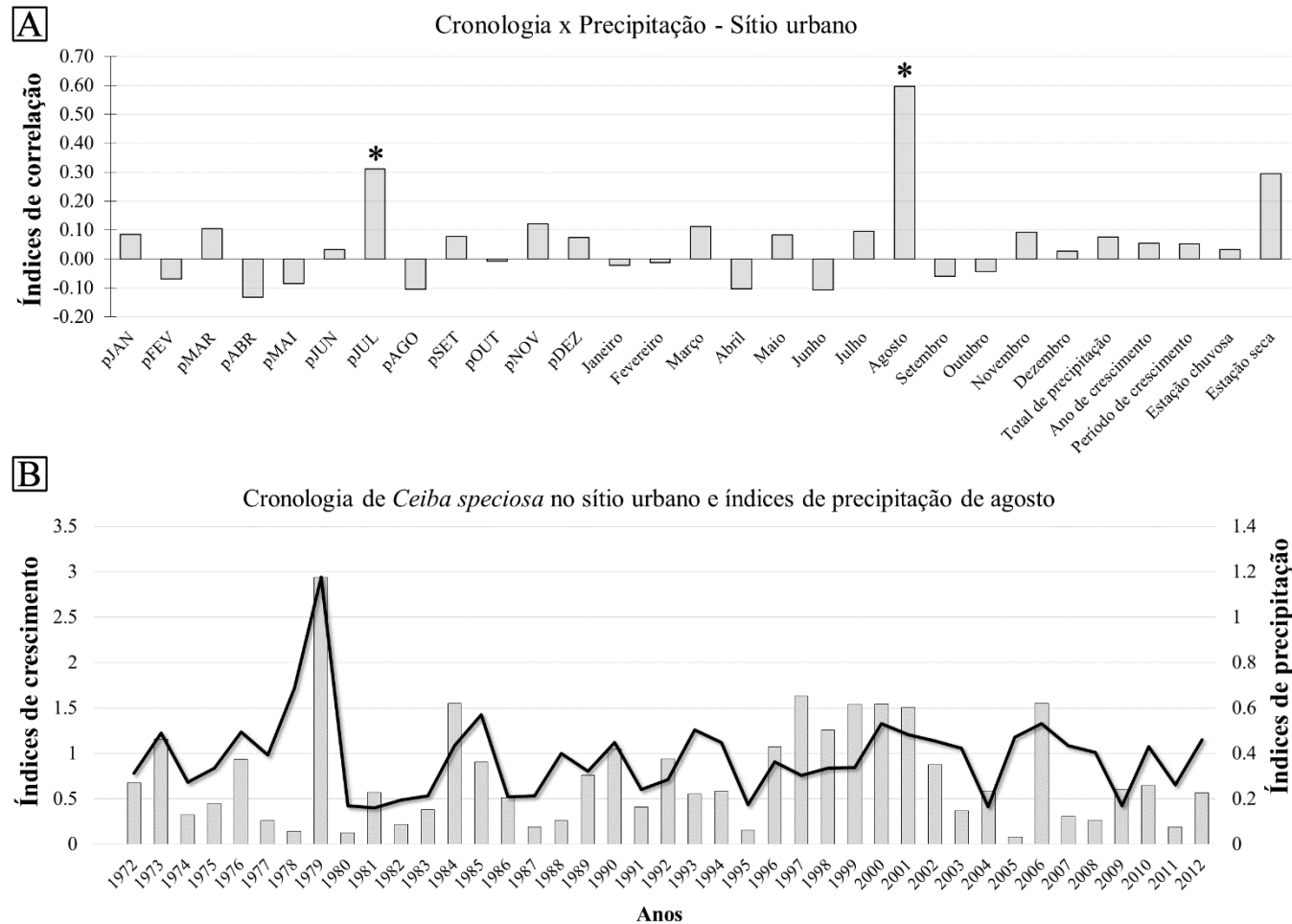
Legenda: Linhas tracejadas representam os valores médios de incremento acumulado nos sítios de estudo.

Figura 20 - Cronologias construídas com base na largura dos anéis de crescimento do caule de *Ceiba speciosa* em ambiente florestal (A) e sob poluição urbana (B).



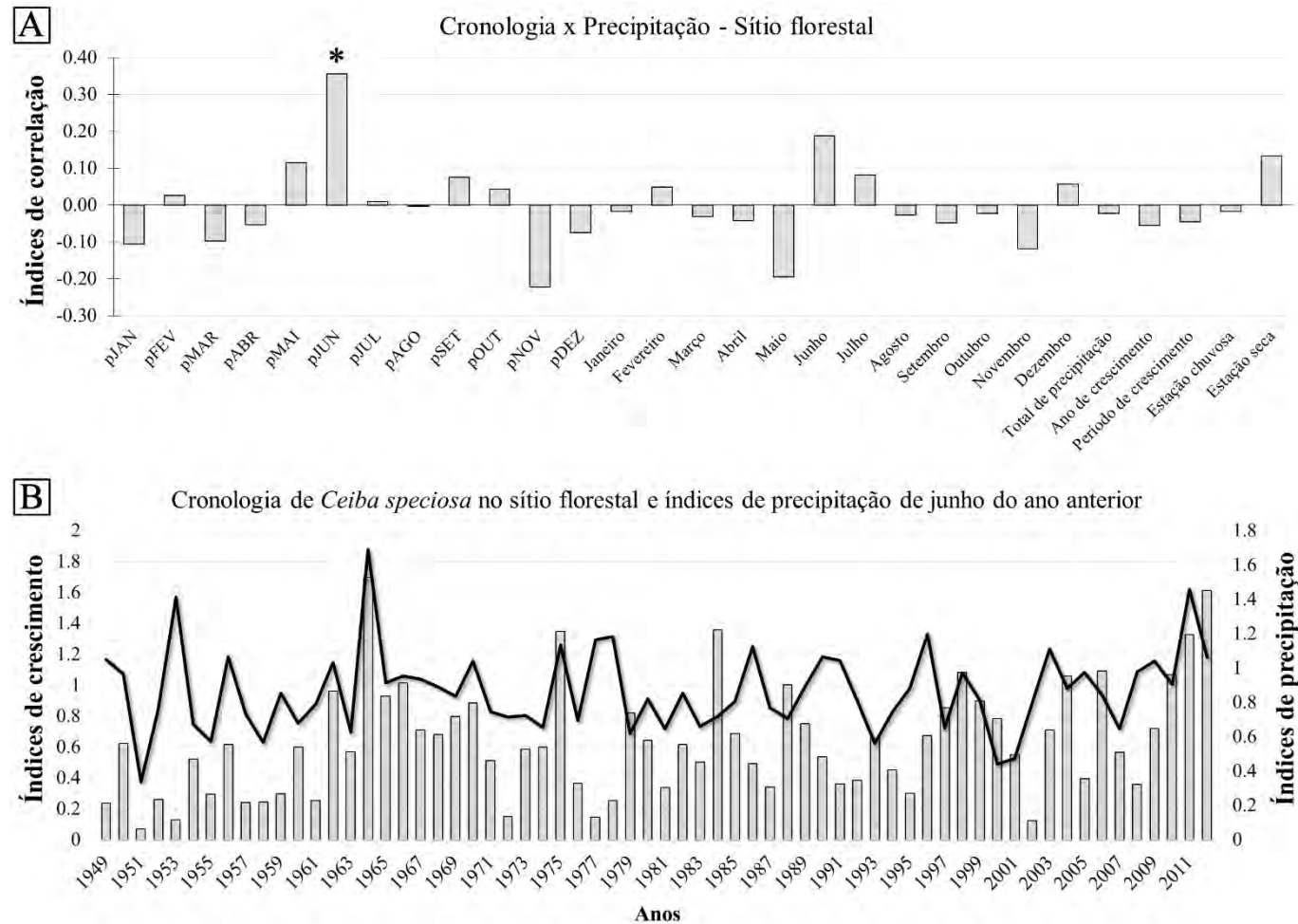
Legenda: As áreas em cinza referem-se à quantidade de amostras de madeira utilizadas na construção das cronologias em cada sítio.

Figura 21 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de *Ceiba speciosa* crescendo no sítio urbano e os índices de precipitação.



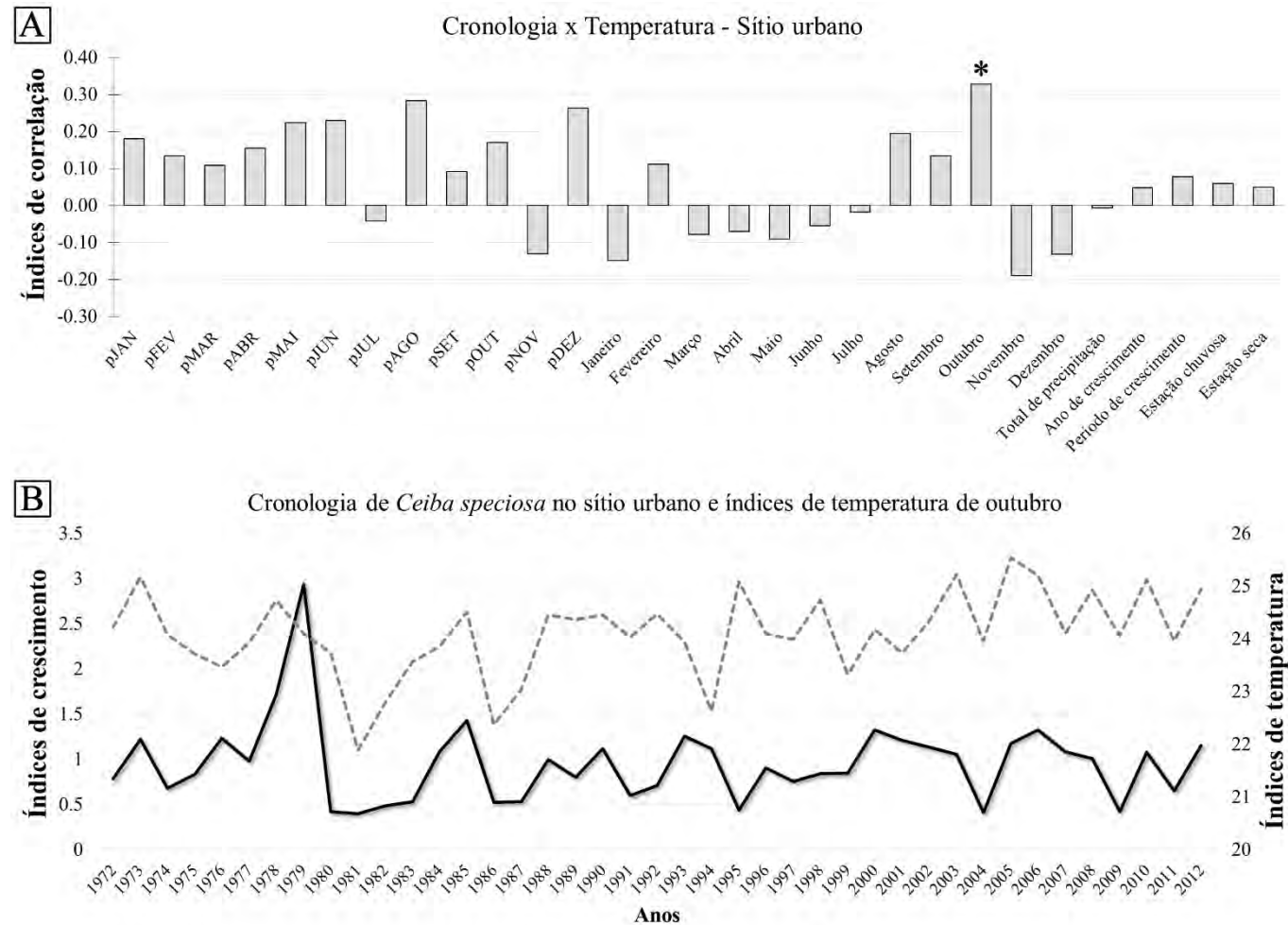
Legenda: (A) Barras representam os índices de correlação entre crescimento de *Ceiba speciosa* no sítio urbano e os índices de precipitação. * Representam valores significativos de correlação, valor crítico de correlação = 0.304, para $p < 0,05$. (B) Cronologia de *C. speciosa* no sítio urbano (linha) e os índices de precipitação do mês de agosto do ano corrente (barras).

Figura 22 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de *Ceiba speciosa* crescendo no sítio florestal e os índices de precipitação.



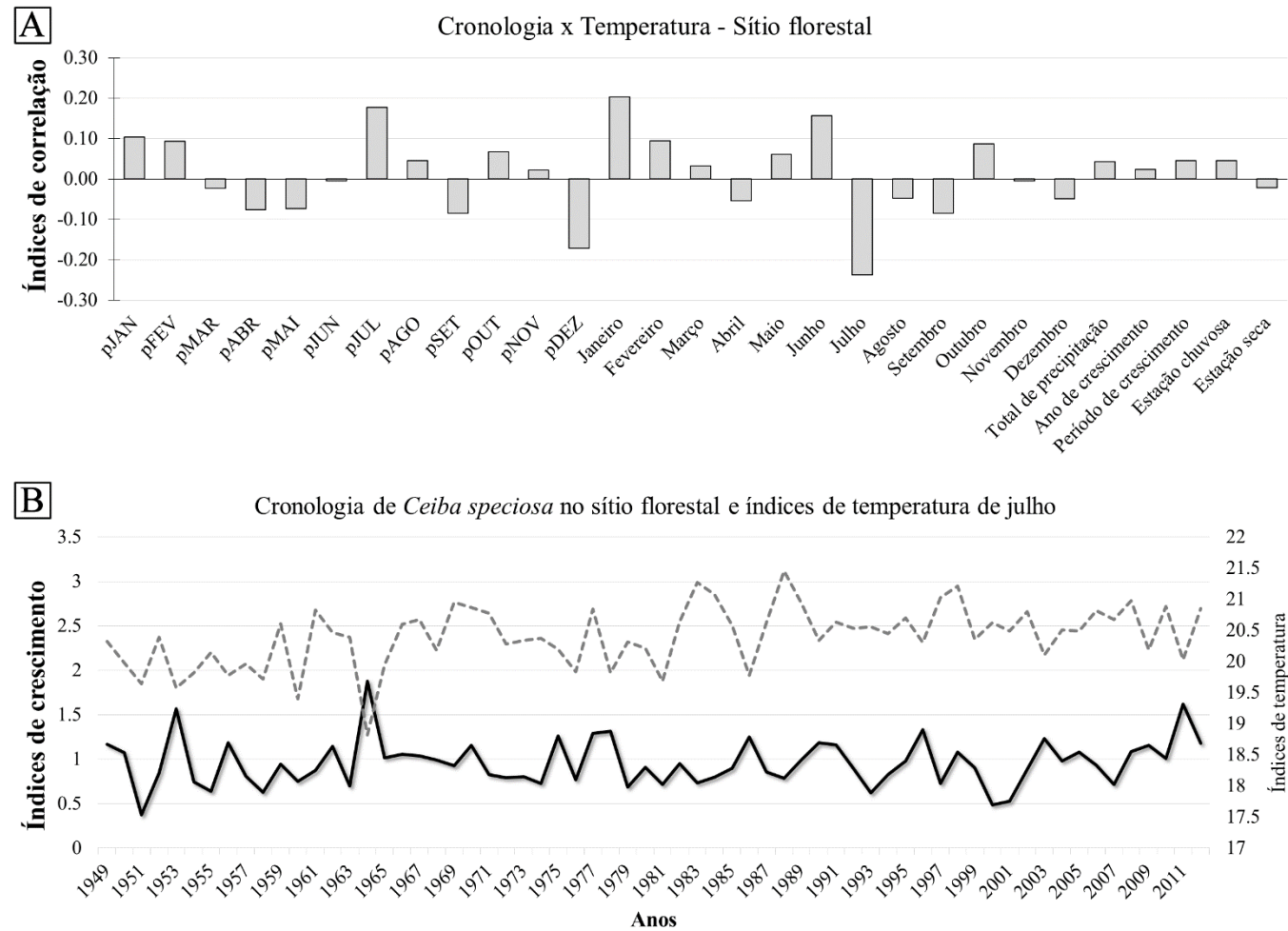
Legenda: (A) Barras representam os índices de correlação entre crescimento de *Ceiba speciosa* no sítio florestal e os índices de precipitação (barras). *Representa valor significativo de correlação, valor crítico de correlação = 0.242, para $p < 0,05$. (B) Cronologia de *C. speciosa* no sítio florestal (linha) e os índices de precipitação do mês de junho do ano anterior ao crescimento (barras).

Figura 23 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de *Ceiba speciosa* crescendo no sítio urbano e os índices de temperatura.



Legenda: (A) Barras representam os índices de correlação entre crescimento de *Ceiba speciosa* no sítio urbano e os índices de temperatura (barras). * Representa valor significativo de correlação, valor crítico de correlação = 0.308, para $p < 0,05$. (B) Cronologia de *C. speciosa* no sítio urbano (linha contínua) e os índices de temperatura do mês de outubro do ano corrente (linha tracejada).

Figura 24 - Índices de correlação entre a cronologia construída com base na largura dos anéis de crescimento do caule de *Ceiba speciosa* crescendo no sítio florestal e os índices de temperatura.



Legenda: (A) Barras representam índices de correlação entre crescimento de *Ceiba speciosa* no sítio florestal e os índices de temperatura (barras). Não foi observado nenhum valor significativo de correlação, valor crítico de correlação = 0.244, para $p < 0,05$. Contudo, no mês de julho o índice de correlação entre as variáveis foi de -0.238. (B) Cronologia de *C. speciosa* no sítio florestal (linha contínua) e os índices de temperatura do mês de julho do ano corrente (linha tracejada).

5.4 Discussão

As características estruturais dos anéis de crescimento são determinadas filogeneticamente e associadas à fatores ecológicos (por exemplo: SCHWEINGRUBER 2007; CALLADO et al. 2001a; WIMMER 2002; TOMAZELLO-FILHO et al. 2004; LISI et al. 2008). Os anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* são distintos macroscopicamente tanto em árvores se desenvolvendo em ambiente florestal, quanto em ambiente urbano. As características anatômicas observadas nos limites dos anéis de crescimento são semelhantes entre os sítios de estudo e corroboram as descrições realizadas para a espécie em ambientes florestais (BONINSEGNA et al. 1989; TOMAZELLO-FILHO et al. 2004).

A relação entre idade e diâmetro continua sendo um dos pontos frequentemente investigados em estudos de estrutura etária de populações florestais. Em *Ceiba speciosa*, foi observada correlação positiva significativa entre o diâmetro do caule e a idade apenas nas árvores se desenvolvendo no sítio florestal. No sítio urbano, não foi observada correlação significativa, visto que árvores com idades próximas apresentaram diâmetros diferentes. Este resultado corrobora os relatos de que a relação entre a idade e o diâmetro das árvores pode ser altamente variável e dependente do táxon e do local de crescimento das árvores, inclusive em ambientes com condições nutricionais e de espaçamento padronizadas, como em plantios (SCHONGART et al. 2005, 2015; BRIENEN; ZUIDEMA 2006; FONSECA-JÚNIOR et al. 2009; SHIMAMOTO et al. 2014; CHAGAS 2013; COSTA et al. 2015).

Fichtler; Worbes (2012) avaliando diferentes parâmetros da estrutura do lenho de espécies tropicais, encontraram correlação altamente significativa entre a densidade da madeira e a largura dos anéis de crescimento. Esses autores associaram este resultado à estratégia de vida das espécies avaliadas, onde espécies pioneiras investiriam em altas taxas de crescimento em detrimento da resistência da madeira, enquanto que espécies de crescimento lento investiriam em maior densidade de madeira, conferindo maior resistência mecânica e longevidade. Assim como ocorre na arquitetura hidráulica das plantas (CHOAT 2005; MARKESTEIJN et al. 2011), esta relação entre crescimento e longevidade seria mais um *trade-off* vegetal, onde o investimento em biomassa em madeiras densas acarretaria em baixas taxas de incremento, contudo em maior longevidade (SANTIAGO et al. 2004; CHAVE et al. 2009; KRAFT et al. 2010; BARALOTO et al. 2010). Chave et al. (2009) relacionam ainda a maior densidade da madeira a uma menor fração de elementos condutores

e maior fração de fibras, que assim, resultariam em menores taxas de transpiração, de fotossíntese e de investimento em biomassa. Contudo, esses autores reforçam que espécies que apresentam madeira mais densa tendem a ter maiores taxas de sobrevivência, por tolerarem o estresse de fatores abióticos, como sombra, vento e seca, e bióticos, como o ataque de herbívoros. Espécies com madeiras menos densas tendem a apresentar maior porcentagem de parênquima e, conseqüentemente maior aporte hídrico (DÜNISCH; PULS 2003; POORTER et al 2008; FICHTLER; WORBES 2012; MENDIVELSO et al. 2013), tornando-as assim, mais sensíveis a disponibilidade de água (MENDIVELSO et al 2013). De modo geral, observa-se que as árvores de *C. speciosa*, crescendo em ambos os sítios, apresentam altas taxas de crescimento quando comparadas a outras espécies nativas da Mata Atlântica no sudeste do Brasil, como por exemplo, *Tabebuia umbellata* (Sond.) Sandwith (Bignoneaceae), *Centrolobium tomentosum* Guillemain ex Benth. (Fabaceae) e *Caesalpinia echinata* Lam. (Fabaceae), analisadas por meio dos anéis de crescimento ou dendrômetros (CARVALHO 2003; CALLADO et al. 2004; LISI et al. 2008; COSTA 2011; VASCONCELLOS 2012; MACEDO 2015). Esse alto crescimento observado pode então estar diretamente relacionado à baixa densidade (0,34) relatada para a madeira da espécie (CARVALHO 2003; LORENZI 1998; MENDES 2013).

Sánchez-Salguero et al. (2015) relataram que em geral, a competição entre árvores vizinhas apresenta uma influência maior ao crescimento do que as variações observadas no clima. Esses autores observaram que altos níveis de competição afetaram negativamente o crescimento radial de espécies em uma floresta de *Pinus* (Pinaceae) na região central da Espanha (Valsain Forest) e que a sensibilidade do crescimento das árvores ao clima aumentou com a diminuição da competição. De fato, no sítio florestal, por ser um ambiente natural, onde a distância entre as árvores é menor e aparentemente a concorrência entre elas é maior, as taxas de crescimento e a sensibilidade ao clima foram menores. Vale destacar, contudo, que *Ceiba speciosa* é uma espécie secundária inicial, sendo considerada oportunista e especialista de pequenas clareiras, com sementes que podem germinar a sombra, mas requerem sol para seu desenvolvimento inicial (MACEDO 1993; SÁ et al. 2012). Sendo assim, em ambos os sítios, seu crescimento inicial não é necessariamente influenciado pela competição. A avaliação do crescimento de *C. speciosa* revelou, desde os primeiros anos de estabelecimento, o padrão observado em todos os outros anos analisados: maiores taxas de crescimento no sítio urbano. Este não é um resultado tipicamente encontrado em outras espécies crescendo sob diferentes tipos de poluição ambiental, que normalmente apresentam diminuição do crescimento radial (por exemplo: RAO et al. 2004; GUPTA; IQBAL 2005; RAJPUT; RAO

2005; ERLICKYTE; VITAS 2008; CHAGAS 2013).

As respostas das plantas a situações de estresse podem variar de espécie para espécie e de acordo com a natureza do fator estressante (NIU et al. 2014). Callado et al. (2004) relataram maior crescimento radial em árvores de *Tabebuia umbellata* (Sond.) Sandwith (Bignoniaceae) em altos níveis de alagamento, quando esperava-se uma diminuição do crescimento nesta situação (KOZLOWSKI 1984; ANGELOV et al. 1996; WORBES 1997). A tolerância ao alagamento também foi encontrada em outras espécies (VOESENEK et al. 1996; CATTANIO et al. 2004; CARTER; GRACE 2010). Um maior crescimento radial observado em árvores crescendo sob poluição urbana ainda não foi encontrado. Este dado revela uma estratégia diferente de *Ceiba speciosa* e sugere que a espécie seja tolerante ao estresse promovido pela poluição urbana.

O maior crescimento radial observado para as árvores de *Ceiba speciosa* no sítio urbano pode ter relação com o maior aporte de CO₂ observado tipicamente em ambientes urbanos (ESQUIVEL-HERNÁNDEZ et al. 2015) e também pelo fato de seu período ativo de crescimento coincidir com o período mais chuvoso e com menor índice de poluentes atmosféricos no sítio urbano (Seção 3). Diversos estudos associaram a elevação de CO₂ ao aumento das taxas fotossintéticas e o, conseqüente aumento de assimilados de carbono para produção de biomassa vegetal, enquanto as demais condições ambientais estiverem favoráveis ao crescimento (BAZZAZ 1990; JACH; CEULEMANSVAN 1998; PRITCHARD et al. 1999; YAZAKI et al. 2005; HEIJDEN et al. 2013; DYBZINSKI et al. 2015; SCHYMANSKI et al. 2015; CASTANHO et al. 2016). Alguns estudos, contudo, encontraram diminuição do incremento radial em espécies crescendo em ambiente urbano ou sob maior aporte de CO₂ e associaram à mudança observada em outros fatores ambientais relacionados ao aumento de CO₂, como a elevação da temperatura (WAHLMANN et al. 1986; SILVA et al. 2010; CHAGAS 2013; SILVA; ANAND 2013; BATTIPAGLIA et al. 2015). Sleen et al. (2014), mensurando isótopos estáveis de carbono na madeira de árvores tropicais, não encontraram relação direta entre o incremento de carbono atmosférico fixado na madeira e o aumento do crescimento radial dessas espécies ao longo de 150 anos. Contudo, estes autores observaram melhor uso e eficiência da água nessas espécies no decorrer dos anos avaliados. E relacionam esses resultados a três possíveis causas que impediriam o aumento do crescimento radial: 1: fatores climáticos estressantes e limitadores do crescimento associados à elevação de CO₂; 2: limitação de outros recursos básicos, como água e nutrientes; 3: investimento dos fotoassimilados adicionais gerados pelo aumento de CO₂ em outros atributos vegetais, como aumento da produção de frutos e investimento em biomassa radicular, e não sido investidos

em crescimento radial nessas espécies. Em *C. speciosa*, o aumento de CO₂ e suas consequências fisiológicas poderiam ser responsáveis pelo aumento observado até então na produção de madeira no sítio urbano. Contudo, é preciso destacar que neste sítio a densidade do lenho, revelada pela proporção de fibras, vasos e parênquima, foi significativamente menor, assim como o índice de condutividade hidráulica (Seção 4) e ainda apresenta mais períodos com déficit hídrico quando comparado ao sítio florestal (Seção 1.6. Figura 4). Esses resultados adicionais acerca da densidade do lenho e da arquitetura hidráulica revelam que, apesar das maiores taxas de crescimento, *C. speciosa* pode apresentar maior susceptibilidade ao ataque de pragas e a danos estruturais e fisiológicos causados por distúrbios ambientais quando exposta à poluição urbana, segundo revisão de Chave et al. (2009) para espécies com as mesmas propriedades do lenho.

As variações observadas na largura e na estrutura dos anéis de crescimento podem ser resultado de um ou mais fatores ambientais (SHIYATOV et al. 1989). Assim, deve-se encontrar uma relação estatística entre o crescimento e as condições ambientais que possa ser utilizada para deduzir ou reconstruir as variações passadas do ambiente e o crescimento dos anéis das árvores (COOK; KAIRIUKSTIS 1990). No presente estudo foi possível encontrar uma relação direta entre o crescimento de *Ceiba speciosa* e os índices de precipitação e temperatura. Em ambos os sítios, as altas correlações entre o crescimento da espécie e os índices de precipitação confirmaram o esperado para espécies tropicais (por exemplo: WORBES 1995; BORCHERT 1999; BRANDES et al. 2015). Kozłowski; Pallardy (1997) relatam que a disponibilidade hídrica do ambiente atua diretamente no ritmo de crescimento radial administrado pela atividade dos meristemas laterais, principalmente o câmbio. A água, além de atuar na manutenção da turgescência celular nos tecidos meristemáticos, tem participação direta nos principais requisitos internos para o crescimento de plantas, como a translocação de minerais, fotoassimilados e reguladores hormonais de crescimento para as regiões meristemáticas (KOZŁOWSKI; PALLARDY 1997; TAIZ; ZIEGER 2013). Wagner et al. (2016) confirmaram a associação entre precipitação e produtividade de madeira, em uma extensa revisão realizada com base em dados de 68 florestas pantropicais. Estes autores reforçam que esse fator climático é o responsável pela diminuição global na produtividade da floresta tropical em períodos com clima mais seco.

As condições microclimáticas podem influenciar as relações com o crescimento (FANG et al. 2015). Apesar de termos utilizado a mesma série climática de precipitação e temperatura para ambos os sítios, foi possível perceber respostas diferentes das árvores de cada sítio às modulações climáticas apresentadas. Em ambos os sítios, observamos correlação

positiva entre o crescimento e os índices de precipitação dos meses mais secos do ano (junho a agosto). Maiores índices de chuva nesses períodos em anos anteriores ao crescimento acarretaram em maiores taxas de incremento radial em ambos os sítios. Contudo, apenas as árvores crescendo no sítio urbano apresentaram correlação positiva significativa com as chuvas do final da estação de crescimento imediatamente anterior a formação do anel de crescimento (agosto do ano corrente), revelando uma resposta imediata a este fator. A Reserva Biológica do Tinguá, onde está localizado o sítio florestal deste estudo, é um dos remanescentes florestais de Mata Atlântica mais bem preservados do estado do Rio de Janeiro e onde se encontram as nascentes de diversos córregos e rios que formam o sistema de águas do Estado (MMA/IBAMA 2006). A reserva natural de água encontrada neste sítio pode explicar a falta de correlação entre as chuvas recentes e o anel de crescimento em formação. Enquanto que por estarem em ambiente urbano e sem reservas hídricas, as árvores do sítio urbano são mais influenciadas pelos índices recentes de chuva.

A mesma resposta imediata das árvores do sítio urbano observada para os índices de chuva foi encontrada em relação aos índices de temperatura. Neste sítio, altas temperaturas observadas durante a estação de crescimento (outubro do ano corrente) acarretaram em anéis de crescimento mais largos. Ou seja, sob ambiente urbano, *Ceiba speciosa* responde imediatamente de maneira positiva aos índices de chuva e de temperatura. Neste ambiente, quanto mais quente e úmido for o período de crescimento (setembro-outubro), maiores serão as taxas de crescimento do anel em formação. Além disso, ainda neste período mais chuvoso do ano quando se encontram as menores taxas de poluentes no sítio urbano (RAINHO et al. 2013a). Em contrapartida, não observamos correlação significativa entre os índices de temperatura e o crescimento radial das árvores do sítio florestal. Apesar disto, percebe-se uma tendência negativa entre os índices de temperatura do mês de julho e o crescimento das árvores neste sítio. A união dos dados obtidos revela que para *Ceiba speciosa*, tanto em ambientes florestais quanto em ambientes urbanos, períodos úmidos e quentes são favoráveis ao crescimento, enquanto que climas frios e secos são desfavoráveis.

A resposta de árvores crescendo sob poluição às variações climáticas varia de espécie para espécie. Chagas (2013) estudando *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) G. P. Lewis e *Tabebuia pentaphylla* (L.) Hemsl. (Bignoniaceae) em diferentes níveis de poluição ambiental em São Paulo (Brasil), percebeu respostas diferentes entre às espécies para os mesmos fatores climáticos. O autor observou que o crescimento de *C. pluviosa* nos sítios, urbano e periurbano, não foi influenciado pelos índices de precipitação e de temperatura, enquanto que esses fatores apresentaram correlação significativa com o crescimento das

árvores do sítio considerado florestal (rural). Já em *T. pentaphylla*, o autor encontrou correlações significativas entre os índices de precipitação e de temperatura e o crescimento das árvores dos sítios urbano e rural, e somente com a temperatura no sítio periurbano. Ridder et al. (2007) avaliaram o impacto da poluição industrial no crescimento de *Quercus robur* L. (Fagaceae), *Fagus sylvatica* L. (Fagaceae) e *Pinus sylvestris* L. (Pinaceae) e também observaram diferenças na influência do clima sobre o desenvolvimento de cada espécie. Mas de modo geral, foram encontrados valores de correlação mais altos entre a precipitação e a largura dos anéis, em comparação com a temperatura. Diferente dos demais, Leonelli et al. (2012) não encontraram correlação significativa entre as variáveis climáticas e a largura dos anéis de crescimento de *Larix decidua* Mill. (Pinaceae) crescendo em diferentes gradientes de poluição ambiental ao longo do Mont Blanc Tunnel na Itália.

6 ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR DO SOLO

6.1 Introdução

Os solos são o principal destino de metais liberados no ambiente por atividades antrópicas e, diferente do que ocorre com contaminantes orgânicos, que são oxidados por ação microbiana, a maioria dos metais não sofre degradação química ou biológica e sua concentração persiste durante um longo período após a sua exposição (WUANA; OKIEIMEN 2011; ROMERO-FEIRE et al. 2016; STOLTE et al. 2016). Assim, apesar da composição do solo ser influenciada pela geologia local, a camada superficial pode ser significativamente afetada pela entrada de diferentes elementos, entre estes os metais tóxicos, vindos de fontes antropogênicas (STEINNES et al. 1997).

Embora os metais pesados sejam constituintes naturais da crosta terrestre (FREEDMAN 1995; KABATA-PENDIAS 2011) e alguns ainda apresentem funções biológicas nos organismos vivos, como cobre, níquel, ferro, manganês e zinco (SALISBURY; ROSS 2012; TAIZ; ZEIGER 2013), quando ocorrem em elevadas concentrações, se tornam tóxicos e, portanto, poluentes ambientais (ZEITOUNI 2003). Os metais pesados mais comumente encontrados em locais contaminados são chumbo, cromo, arsênio, zinco, cádmio e cobre (FREEDMAN 1995; KAMPAS; CASTANAS 2008). Esses metais são capazes de diminuir a produção agrícola devido ao risco de bioacumulação e biomagnificação na cadeia alimentar, representando riscos para os seres humanos e para o ecossistema (WUANA; OKIEIMEN 2011; ELNAZER et al. 2015).

O transporte de um poluente de sua fonte de origem até o solo, sua concentração e biodisponibilidade dependem significativamente da forma química do elemento, da interação com os demais constituintes do solo e da proximidade com a fonte (PIERANGELI et al. 2004; GUILHERME et al. 2005; APPEL et al. 2008). No Brasil, o fato de os maiores centros urbanos estarem localizados no bioma Mata Atlântica (SCARANO; CEOTTO 2015) faz com que os remanescentes deste bioma se tornem mais suscetíveis ao impacto da poluição urbana. Assim, esta seção propõe investigar a presença e a concentração química elementar de amostras de solo das duas áreas selecionadas para este estudo (Seção 1, item 1.6).

6.2 Material e métodos

Amostras superficiais de solo, até 3,0 cm de profundidade (FARIAS et al. 2007), foram coletadas em cinco pontos de cada sítio investigado (florestal e urbano). Cabe destacar que os pontos de amostragem do solo foram selecionados com base na proximidade das árvores de *Ceiba speciosa* utilizadas nesta tese. Em cada ponto foram retiradas cinco réplicas com distâncias de um metro entre si e totalizando 25 amostras. Cada amostra de solo foi homogeneizada por uma amostragem em fileiras (HORWITZ 1990) (Figura 25A) e colocadas em estufa a 60 °C por 24 h para completa secagem. Posteriormente, as amostras foram trituradas e peneiradas em malha de nylon (Figura 25B), a fim de se obter uma granulometria de 325 de malha (44 µm). Após esse processo foram retiradas porções de 500 mg de massa, colocadas no interior de um compactador (Figura 25C) e prensada a uma pressão de $2,32 \times 10^8$ Pa por 15 minutos (Figura 25D), de forma a se obter pastilhas finas (Figura 25E) com diâmetro de 2,5 cm e densidade superficial de 100 mg/cm², sendo uma pastilha por amostra (SANTOS 2014).

Cada pastilha de solo foi analisada em um sistema de fluorescência de Raios X por dispersão em energia (EDXRF), com ânodo de Ag e operado em 15 kV/100 µA e 35 kV/100 µA, desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Técnicas Analíticas (LIETA), do Instituto de Física Armando Dias Tavares, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Figura 25F). Os espectros obtidos foram analisados no software Analysis of X-ray Spectra by Iterative Least Squares Fitting (AXIL) e as concentrações elementares foram obtidas no software Micro XRF4, a partir da fórmula abaixo, seguindo valores de sensibilidade e absorção recomendados por Anjos et al. (2000):

$$W_i = \frac{I_i}{S_i} \cdot \frac{1}{A(E_0, E_1)}$$

Onde:

W_i = concentração de um elemento i na amostra;

I_i = intensidade da radiação fluorescente de um elemento i medida experimentalmente;

S_i = sensibilidade do sistema, obtida a partir de padrões para cada elemento químico;

$A(E_0, E_1)$ = absorção da radiação em padrão certificado (SL-1/AIEA).

As concentrações dos elementos químicos observados em cada sítio foram avaliadas estatisticamente por meio do software *Statistica 7*. Os dados foram testados quanto à

normalidade e homocedasticidade por meio dos testes Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente (ZAR 2010). A comparação dos resultados obtidos em cada sítio foi feita através do teste t de Student, para dados paramétricos, e através do teste Mann-Whitney, para dados não-paramétricos. Todos os testes foram avaliados usando um intervalo de confiança de 95%.

Figura 25 - Processamento e análise de amostras de solo dos dois sítios de estudo.



Legenda: (A) Homogeneização da amostra. (B) Manutenção da granulometria das amostras a 325 mesh (44µm). (C) Confeção de pastilhas de solo em molde. (D) Prensa hidráulica. (E) Pastilha de solo depois da retirada da prensa. (F) Sistema EDXRF, seta contínua indica o tubo emissor de Raios X e seta pontilhada indica detector de fluorescência elementar.

6.3 Resultados

A concentração de 16 elementos químicos foi determinada nos dois sítios de estudo: potássio (K), cálcio(Ca), titânio (Ti), cromo (Cr), manganês (Mn), ferro (Fe), níquel (Ni), cobre (Cu), zinco (Zn), gálio (Ga), bromo (Br), rubídio (Rb), estrôncio (Sr), zircônio (Zr), nióbio(Nb) e chumbo (Pb). A Tabela 10 apresenta as concentrações dos elementos em cada sítio e o resultado da análise estatística realizada para a comparação dos sítios. A análise estatística revelou que as maiores diferenças observadas entre os sítios foram com elementos cobre, zinco, nióbio e chumbo (Figura 26).

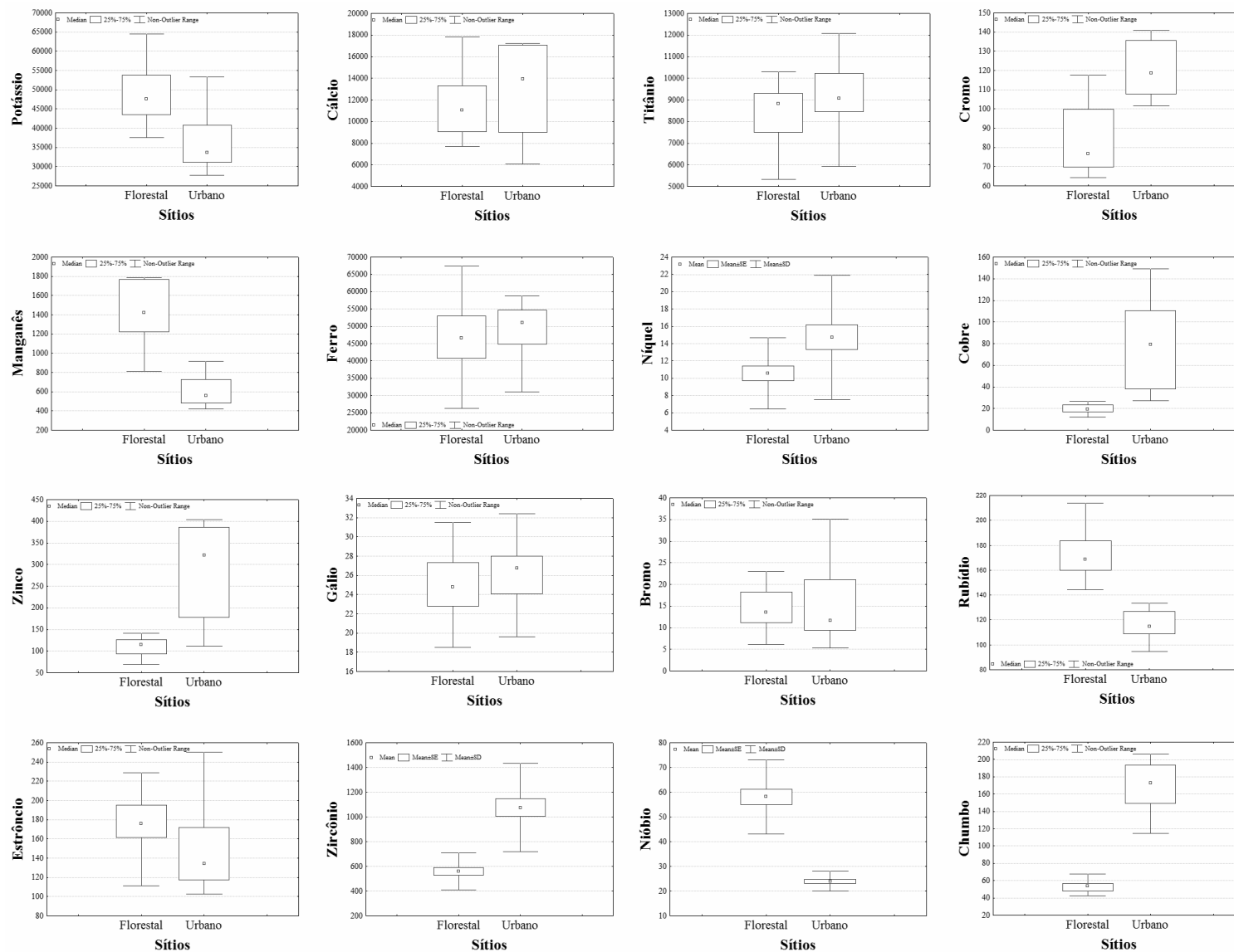
As concentrações observadas nos elementos potássio e manganês foram maiores entre as amostras obtidas no sítio florestal do que no urbano. Enquanto que as concentrações dos metais níquel, cobre, zinco e chumbo foram significativamente maiores no sítio urbano (Tabela 11. Figura 26). Contudo, foi observado que o sítio florestal apresentou maior concentração dos metais pesados rubídio e estrôncio.

Tabela 11 - Valores de concentração (mg/kg) dos elementos químicos encontrados em amostras de solo de cada sítio de estudo, e os valores estatísticos de comparação (t e Z) e de significância (p) entre os sítios.

| Elementos | Sítio florestal | | | Sítio urbano | | | Estatística | |
|-----------|-----------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-------------|--------|
| | Média | Mínima | Máxima | Média | Mínima | Máxima | t/Z | p |
| Potássio | 47550,13 | 37546,54 | 64548,56 | 33736,63 | 27806,38 | 58027,78 | 4.29 | 0,000* |
| Cálcio | 11049,01 | 7719,50 | 21862,22 | 13915,02 | 6091,16 | 68584,81 | -1.60 | 0,109 |
| Titânio | 8830,27 | 5335,80 | 12102,59 | 9074,52 | 5926,39 | 12079,4 | -1.17 | 0,240 |
| Cromo | 76,67 | 64,19 | 117,68 | 118,57 | 53,49 | 224,76 | -3.16 | 0,001* |
| Manganês | 1421,39 | 813,01 | 3534,40 | 558,12 | 422,14 | 1343,09 | 5.73 | 0,000* |
| Ferro | 46587,13 | 26387,44 | 67433,17 | 51048,54 | 25360,18 | 58710,25 | -0.73 | 0,466 |
| Níquel | 9,97 | 4,13 | 20,89 | 13,77 | 4,04 | 29,44 | -2.52 | 0,015* |
| Cobre | 19,59 | 12,13 | 35,48 | 79,47 | 27,29 | 149,12 | -5.98 | 0,000* |
| Zinco | 114,15 | 69,54 | 141,06 | 321,57 | 111,59 | 1542,81 | -5.34 | 0,000* |
| Gálio | 24,80 | 18,54 | 31,50 | 26,73 | 19,6 | 36,74 | -1.45 | 0,145 |
| Bromo | 13,55 | 6,07 | 23,03 | 11,59 | 5,33 | 35,05 | 0.17 | 0,865 |
| Rubídio | 168,66 | 144,38 | 213,85 | 115,03 | 94,92 | 176,81 | 5.13 | 0,000* |
| Estrôncio | 175,57 | 111,35 | 261,75 | 134,27 | 102,57 | 250,01 | 2.90 | 0,004* |
| Zircônio | 561,06 | 251,45 | 1031,94 | 1031,02 | 420,4 | 1705,66 | -6.68 | 0,000* |
| Nióbio | 56,1 | 27,2 | 101,09 | 23,65 | 18,71 | 35,9 | 10.96 | 0,000* |
| Chumbo | 53,43 | 42,34 | 75,92 | 172,53 | 114,77 | 363,18 | -6.06 | 0,000* |

Nota: * Diferença significativa em um intervalo de confiança de 95% (p).

Figura 26 - Concentração química elementar ($\mu\text{g/g}$) observada em amostras de solo dos sítios de estudo.



6.4 Discussão

O solo é a principal fonte de elementos-traço para as plantas e animais, tanto para micronutrientes como para poluentes (KABATA-PENDIAS 2004). Assim sendo, altas concentrações de metais traços no solo representam riscos para a saúde dos organismos vivos e, conseqüentemente, para a conservação da biodiversidade (GILLER et al. 1989; DAI et al. 2004; FREITAS et al. 2015). A presença e as maiores concentrações de elementos químicos essenciais para a nutrição das plantas no sítio florestal e de elementos químicos potencialmente tóxicos no sítio urbano neste trabalho indicam o potencial negativo das atividades antrópicas relacionadas ao processo de urbanização.

O sítio florestal apresentou maiores concentrações de potássio e manganês, elementos químicos considerados essenciais para a nutrição das plantas (TAIZ; ZEIGER 2013). A ciclagem da maioria dos nutrientes encontrados em ecossistemas florestais ocorre via decomposição da serapilheira (ANDRADE et al. 2003; OLIVEIRA et al. 2003; BISPO 2007; BÄCHTOLD; MELO-JÚNIOR 2015). Desta forma, as concentrações mais elevadas de nutrientes no solo dos remanescentes florestais, provavelmente, devem-se a maior produção e estoque de serapilheira observados no sítio florestal, enquanto que no sítio urbano, a serapilheira é ausente ou escassa.

A análise da composição química do solo também foi realizada em outros sítios urbanizados no estado do Rio de Janeiro (BAPTISTA-NETO et al. 1999, 2000; SISINNO & MOREIRA 2006; SILVA et al. 2008; MCALISTER et al. 1998; 2000; 2005). Nesses estudos, a relação da concentração de elementos químicos tóxicos e o processo de urbanização foi destacada. Amostras de solos próximos a avenidas de intenso tráfego de veículos nos bairros de Copacabana, Botafogo e Flamengo apresentaram concentrações equivalentes de ferro, manganês e cromo às observadas no sítio urbano deste estudo, contudo as concentrações de zinco, de cobre, de chumbo e de níquel apresentaram níveis superiores nos bairros supracitados (MCALISTER et al. 2005). As concentrações desses elementos nos solos avaliados por McAlister et al. (2005) foram fortemente associadas a proximidade de vias de intenso fluxo de veículos e a emissões industriais. No presente estudo, a concentração desses elementos foi maior no sítio urbano quando comparado ao sítio florestal. O intenso fluxo de veículos na Avenida Brasil e a proximidade com Refinaria de Petróleos de Manguinhos S.A.

podem ser os responsáveis pelo maior aporte destes elementos no solo do sítio urbano deste estudo.

Além do aporte de elementos químicos advindos de atividades antrópicas, a constituição natural de cada solo representa importante influência nas concentrações químicas observadas (FREEDMAN 1995; KABATA-PENDIAS 2011). O solo da Reserva Biológica do Tinguá, na região onde foram realizadas as coletas, apresenta solo com teores médios a elevados de argila, compondo classes de solo Cambissolos e Latossolos (MMA/IBAMA 2006). Estas classes de solo são naturalmente ricas em metais traços (FADIGAS et al. 2006). Neste sítio, nós observamos maiores concentrações de rubídio e estrôncio, dois elementos comuns na crosta terrestre, controlados principalmente pelas rochas-mãe, e que se apresentam concentrações mais altas em solos argilosos pesados (SARAIVA et al. 2007; KABATA-PENDIAS 2011). A presença de rubídio também já foi relatada em plantas de outros remanescentes florestais de Mata Atlântica na região sudeste do Brasil (FRANÇA et al. 2004; ELIAS et al. 2006; CARMO et al. 2013), revelando a existência desse elemento nestes ambientes e, desta maneira, provavelmente nos solos.

As altas concentrações nióbio observadas no sítio florestal deste trabalho também podem ser associadas a fatores naturais da área de estudo ou ainda a atividades antrópicas observadas neste sítio. O Brasil é o detentor das maiores reservas mundiais de nióbio e possui 98% das reservas mundiais conhecidas (PEREIRA 2006; SANTOS 2013; ALVES; COUTINHO 2015). Este elemento nunca ocorre na natureza na sua forma livre de metal, e sim como umamistura de óxidos metálicos como as columbitas ((Fe/Mn) (Nb/Ta)₂O₆) e o pirocloro (NaCaNb₂O₆F), e são observados em solos dos tipos cambissolos e latossolo, especialmente aqueles derivados de rochas enriquecidas deste metal (MELFI et al. 1991; SANTOS 2013; KABATA-PENDIAS 2011). Além disso, o nióbio é muito utilizado na siderurgia e em setores intensivos em tecnologia (ALVES; COUTINHO 2015; TARSELLI 2015). Para aumentar a resistência mecânica do aço sem prejudicar outras propriedades desejáveis, como soldabilidade, tenacidade e conformabilidade, a indústria siderúrgica utiliza proporções de elementos químicos como nióbio, titânio e vanádio na fabricação dos aços microligados, visto a alta afinidade destes elementos com o carbono. A vantagem do nióbio em relação ao vanádio e ao titânio é sua maior resistência mecânica (PEREIRA 2006; SANTOS 2013). Na siderurgia, estes aços especiais podem ser utilizados na construção de oleodutos, gasodutos e plataformas para exploração de petróleo em águas profundas (PEREIRA 2006; ALVES; COUTINHO 2015; DESTRO 2015). Existem instalações de oleodutos e gasodutos ligados a empresa Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) na Reserva

Biológica do Tinguá (MMA/IBAMA 2006; ARAÚJO et al. 2014). Neste sítio, as tubulações são encontradas abaixo do nível do solo, no nível do solo e em alguns trechos de rios e grotas, por via suspensa (MMA/IBAMA 2006). Assim, as maiores concentrações de nióbio observadas no sítio florestal em relação ao sítio urbano, podem ser resultado da composição natural das rochas-mãe ou ainda do contato do solo com as tubulações presentes no sítio.

Diferente do observado no sítio florestal, o sítio urbano avaliado não apresenta sua constituição original e sofre forte impacto do intenso fluxo de veículos e da poluição ambiental provocada por esgoto doméstico e dejetos industriais (LTM 2016). O *campus* do Instituto Oswaldo Cruz, onde está localizado o sítio urbano, foi construído em uma antiga fazenda (Fazenda de Manguinhos) situada à beira-mar (ARAGÃO 1950), em uma área originalmente formada por manguezal (EMOP 2012). A região do terreno original não atingida pelas marés apresentava solo com composição sílico-argilosa (ARAGÃO 1950). Contudo, a área onde estão localizados os pontos de coleta neste sítio sofreu diversos aterramentos ao longo dos anos de construção da Avenida Brasil (COSTA 2006) e, portanto, sua constituição natural é desconhecida. A presença de metais traços em maiores concentrações neste sítio é relacionada na literatura como um resultado dos processos de industrialização e urbanização (por exemplo: GUILHERME et al. 2005; HASSAN; BASAHI 2013; ASSIREY; EL-SHAHAWI 2015; ELNAZER et al. 2015).

Dos elementos químicos que apresentaram maiores concentrações no sítio urbano, os elementos o cromo, o cobre, o zinco e o chumbo se destacam pelos valores observados e pela grande toxicidade comprovada (FREEDMAN 1995; NAGAJYOTI et al. 2010). Estes quatro elementos químicos foram também destacados em outras análises realizadas em solos urbanos da China, da Arábia Saudita, do Egito e do Brasil, nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro (por exemplo: DUARTE; PASQUAL 2000; LI et al. 2001; MCALISTER et al. 2005; ASSIREY; EL-SHAHAWI 2015; ELNAZER et al. 2015; LOPES et al. 2015).

A principal fonte de poluição de cromosão as estações de tratamento de águas residuais provenientes de fontes industriais e residenciais (KABATA-PENDIAS 2011). A Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (CEDAE) apresenta uma grande estação de tratamento de esgoto doméstico no sítio urbano, com adutoras situadas próximas à região avaliada (LTM 2016). Quanto ao cobre, este elemento é normalmente acumulado nos centímetros superiores do solo e é bastante imóvel, apresentando pouca variação no conteúdo total de perfis de solo (KABATA-PENDIAS 2011). A contaminação do solo por compostos de cobre tem fontes variadas, tais como fertilizantes, esgoto, resíduos industriais, e a partir da

corrosão de ligas contendo cobre, como por exemplo, tubos e fios elétricos (MELO et al. 2004; KABATA-PENDIAS 2011). Todos esses fatores, incluindo torres de alta tensão da Companhia de Energia Elétrica Light, encontram-se presentes no sítio urbano (EMOP 2012) e justificam as altas concentrações de cobre observadas.

O chumbo é um metal genotóxico, não-essencial, capaz de causar sérios efeitos deletérios as plantas, aos animais e aos micro-organismos (GILLER et al. 1989; HERNANDEZ et al. 2003; MALAR et al. 2014; SALAZAR; PIGNATA 2014; FANG et al. 2014). Já o zinco é considerado um micronutriente essencial no metabolismo de plantas e animais, no entanto, em elevadas concentrações torna-se extremamente prejudicial (PEAKALL; BURGER 2003; LUKKARI et al. 2004; 2005; CARMONA et al. 2015; YAQUB et al. 2015). Apesar disso, esses elementos são amplamente utilizados na indústria, na fabricação de ligas metálicas e de diferentes materiais como borracha, plásticos, pigmentos, lubrificantes e pesticidas. O uso de zinco e de chumbo na fabricação de peças de automóveis (baterias, freios, pneus, radiadores e motor) e como catalisadores na queima de combustíveis fósseis fez com que a concentração desses elementos fosse aumentada com a expansão dos centros urbanos e da frota de veículos (MELO et al. 2004; KABATA-PENDIAS 2011; ELNAZER et al. 2015). Devido à sua toxicidade, o chumbo foi retirado da gasolina nos últimos anos (CETESB 2015). Os valores de concentração observados para zinco e chumbo nos dois sítios avaliados estão acima dos valores considerados normais para solos brasileiros. Contudo, no solo do sítio urbano, os valores dos dois elementos estão acima das concentrações máximas toleráveis para solos no Brasil (FADIGAS et al. 2006).

7 ANÁLISE QUÍMICA ELEMENTAR DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO

7.1 Introdução

Nas últimas décadas, as emissões de elementos-traço potencialmente tóxicos associados ao processo de urbanização têm sido consideravelmente aceleradas (STANKOVIC et al. 2014; VIEIRA-FILHO et al. 2015). Os elementos tóxicos, uma vez libertados no ambiente, não desaparecem por completo e podem se acumular nos solos, sedimentos e nos organismos vivos (WUANA;OKIEIMEN 2011; STANKOVIC et al. 2014; KIM et al. 2016).

Os anéis de crescimento contribuem muito para a compreensão das respostas dos ecossistemas florestais às variações ambientais, visto que além de serem sensíveis às estas variações, ainda permitem a avaliação de longos períodos temporais por meio destes (KAENNEL; SCHWEINGRUBER 1995; SPIECKER 2002). A partir de estudos de dendrocronologia, a dendroquímica surgiu como uma valiosa possibilidade de reconstrução dos elementos químicos presentes nos anéis de crescimento em resposta às mudanças ambientais (LEPP 1975; WATMOUGH et al. 1998; FERRETI et al. 2002; MCLAUGHLIN et al. 2002). Diferente da análise tradicional da química da madeira, na dendroquímica as amostras são obtidas de séries cronológicas previamente datadas e os resultados refletem as alterações químicas no ambiente ao longo dos anos de crescimento da planta (MCLAUGHLIN et al. 2002; WATMOUGH; HUTCHINSON 2002; SMITH et al. 2008). A dendroquímica representa, assim, uma aplicação especial da dendroecologia, que aborda a relação da química da madeira com a química ambiental e com os processos biológicos internos, que influenciam a absorção e incorporação dos elementos químicos nos anéis de crescimento (MCLAUGHLIN et al. 2002; BALOUET et al. 2009; 2012).

Os estudos em dendroquímica assumem que após o lançamento de um produto químico no ambiente, que normalmente seja ausente ou presente em pequenas quantidades, este seja assimilado pelas raízes ou penetre pelos estômatos e/ou lenticelas das plantas, chegue até o xilema secundário (MARTINS 2009; SMITH et al. 2008). Uma vez dentro das plantas, estes não ficam restritos necessariamente aos anéis formados durante o ano em curso (LEPP 1975). Parte destes elementos químicos pode ficar móvel entre as camadas de crescimento consecutivas por meio dos raios parenquimáticos presentes (WATMOUGH 1997; FERRETTI

et al. 2002). Outra parte pode ser incorporada às paredes das células do xilema e, então, servir como um registro das características químicas ambientais (LEPP 1975; SMITH et al. 2008; BALOUET et al. 2009).

Apesar do comprovado potencial dendrocronológico das espécies tropicais, poucos estudos analisaram o histórico de acumulação química nos anéis de crescimento destas espécies (VIVES 2006, 2007; MOREIRA et al. 2006; CHAGAS 2013; GERALDO et al. 2014). Além disso, até o momento, nenhum estudo dendroquímico foi realizado com espécies tropicais utilizando-se a avaliação por EDXRF. Diante disso, o objetivo desta seção foi avaliar e comparar o histórico de acumulação de elementos químicos nos anéis de crescimento, previamente datados (Seção 5), de árvores de *Ceiba speciosa*.

7.2 Material e métodos

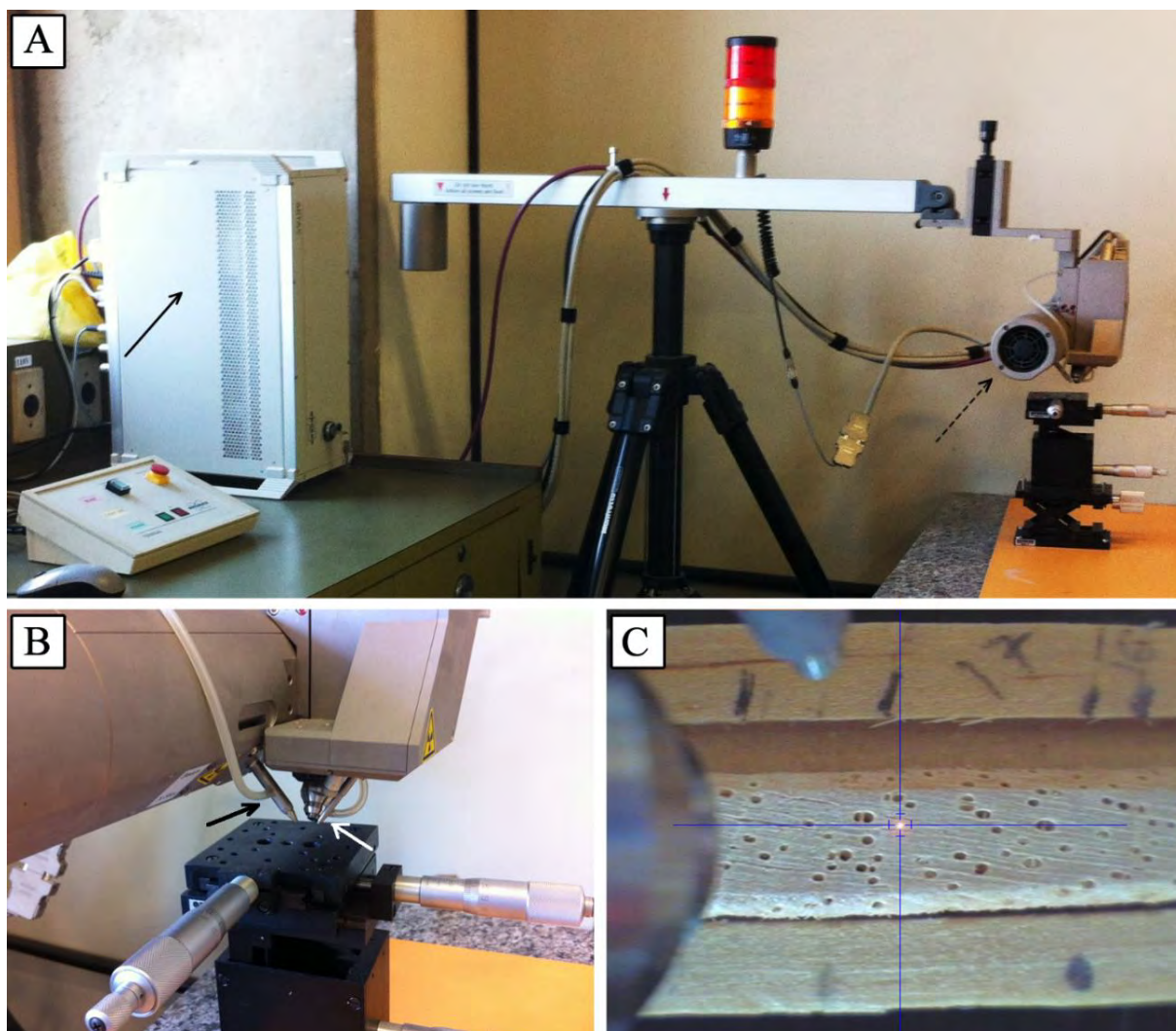
Após o estudo dendrocronológico (Seção 5), foram selecionadas amostras de 10 árvores de *Ceiba speciosa* em cada sítio de estudo. De cada árvore foi selecionada a amostra mais íntegra e que contivesse a sessão completa da medula até a casca. Não houve nenhum tipo de intervenção com produtos químicos para limpeza da superfície das amostras, sendo a mesma feita apenas com uso de um pincel seco. Cada amostra foi submetida à fluorescência de Raios X por dispersão de energia (EDXRF) com o auxílio do equipamento comercial ARTAX 200 (Figura 27). Este sistema permite a detecção de elementos químicos com números atômicos superiores ao sódio e inferiores ao urânio ($11 \leq Z \leq 92$).

Neste estudo, o sistema de Raios X foi calibrado com corrente de 200 μA , tensão de 35 kV e o tempo de contagem do valor energético de fluorescência em cada anel foi de 500 segundos. Para o cálculo da concentração de cada elemento, foi utilizada a mesma fórmula da avaliação dos elementos químicos presentes no solo dos sítios de estudo (Seção 6). Padrões certificados de celulose (v-10, obtidos do *National Institute of Standards and Technology* - NIST) foram utilizados para a obtenção dos valores de absorção de Raios X requeridos no cálculo das concentrações. A aferição foi realizada no lenho tardio de cada anel de crescimento demarcado, visto que as modificações mais significativas observadas na estrutura cambial sob poluição foram observadas no período de dormência cambial, ou seja, no final da estação de crescimento (Seção 3). É também na região do lenho tardio onde se encontra a

maior proporção de células com paredes mais espessadas na madeira de *C. speciosa* (Seção 4), permitindo neste período observar maior concentração de elementos químicos fixados nas paredes celulares. Além disso, a maior concentração de elementos tóxicos presentes no sítio poluído coincide com o período de menor precipitação (RAINHO et al. 2013a;2013b), período onde é formado o lenho tardio de *C. speciosa* (Seção 3). A composição e a concentração dos elementos químicos presentes em cada ano foram obtidas a partir da média dos valores obtidos em cada anel para as 10 árvores avaliadas em cada sítio. A série cronológica máxima aferida nas amostras do sítio florestal foi de 64 anos e estendeu-se de 1949 a 2012. No sítio urbano, a série cronológica máxima aferida foi de 42 anos e estendeu-se de 1971 a 2012.

As concentrações médias de cada elemento químico observadas nos anéis de crescimento foram submetidas a tratamento estatístico utilizando-se o software *Statistica 7* seguindo recomendações de Zar (2010). A distribuição paramétrica do conjunto de dados foi confirmada pelos testes Shapiro-Wilk e Levene. Uma análise de regressão entre os valores de concentração média de cada elemento e os anos avaliados foi realizada, para os resultados de cada sítio. O teste ANOVA para medidas repetidas foi utilizado para comparar as concentrações encontradas em cada sítio ao longo dos anos. Para este teste, foram considerados apenas os anos que apresentaram contribuição de dados de três ou mais árvores dos dois sítios de estudo. Assim, esta análise foi realizada entre os anos de 1984 e 2012. O teste de Tukey foi utilizado como post-hoc do teste ANOVA para medidas repetidas. O teste de correlação de Pearson (ZAR 2010) foi aplicado entre os valores anuais de concentração de cada elemento químico e as cronologias residuais construídas para cada sítio (Seção 5). Para todos os testes realizados, foram utilizados um intervalo de confiança de 95% (ZAR 2010).

Figura 27 - Avaliação da composição química elementar dos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* com o uso do sistema comercial ARTAX 200.



Legenda: (A) Sistema integrado do equipamento ARTAX 2000. Seta contínua indica o gerador de energia e seta tracejada indica o tubo emissor de Raios X. (B) Detalhe do emissor de feixe de Raios X incidentes (seta preta) e do emissor de feixe laser (seta branca). (C) Aspecto geral de uma amostra de lenho sendo analisada. Destaque para o ponto vermelho produzido pelo feixe laser, no qual indica o ponto exato que o feixe de excitação está atingindo na amostra.

7.3 Resultados

Nos anos avaliados foi possível detectar a concentração de 11 elementos químicos fixados nos anéis de crescimento das árvores de *Ceiba speciosa* em ambos os sítios de estudo, todavia, as concentrações dos elementos químicos variaram entre os anos e entre os sítios (Figuras 28-38). Cloro, potássio, cálcio, manganês, ferro e estrôncio foram os elementos químicos mais frequentemente detectados nas amostras e anos avaliados. Os demais

elementos: enxofre, titânio, zinco, bromo e rubídio, apresentaram grande heterogeneidade entre as árvores, entre os anos e entre os sítios. O teste ANOVA para medidas repetidas foi conclusivo apenas para os seis elementos químicos mais frequentes (Tabela 12). O teste de Pearson revelou a falta de correlação significativa entre a largura dos anéis de crescimento e as concentrações dos elementos químicos detectados neles (Tabela 13).

Dos elementos químicos avaliados no teste ANOVA para medidas repetidas, as concentrações de potássio foram as que mais diferiram entre os anos avaliados nos dois sítios de estudo e quando consideradas as modificações temporais ocorridas em cada sítio (Tabela 12. Figura 28. Apêndice A). A concentração deste elemento no sítio florestal diminuiu significativamente nos últimos cinco anos de crescimento das árvores estudadas, quando comparados aos valores observados no final da década de 1980. No sítio urbano, também se observou uma queda das concentrações deste elemento, porém, a diferença foi mais pronunciada do decorrer dos anos 2000 (Figura 28). O teste estatístico revelou a mesma redução para a concentração de cálcio nos últimos anos de crescimento das árvores estudadas, em ambos os sítios (Tabela 12. Figura 29). O teste de Tukey revelou que esse decréscimo nas concentrações de cálcio nos últimos anos foi mais pronunciado nas árvores do sítio florestal (Apêndice B).

Os elementos cloro, manganês e estrôncio apresentaram concentrações bastante diferentes entre as árvores avaliadas em cada sítio (Figuras 30-32). Apesar dos desvios elevados, as árvores do sítio urbano apresentaram maior frequência e maiores concentrações médias de cloro nos anéis de crescimento. A análise de regressão evidenciou que a concentração deste elemento aumentou nos últimos 25 anos no sítio urbano e diminuiu no sítio florestal (Figura 30). As maiores concentrações médias de manganês e estrôncio foram detectadas nas árvores do sítio florestal, quando comparadas as árvores do sítio urbano (Figuras 31 e 32). As concentrações médias de manganês aumentaram nos últimos anos em ambos os sítios (Figura 31), enquanto que as concentrações de estrôncio diminuíram (Figura 32).

As concentrações de ferro não foram diferentes estatisticamente entre os sítios de estudo (Tabela 12). Contudo, as concentrações deste elemento ao longo dos anos avaliados variaram entre os sítios de estudo (Figura 33). A análise de regressão revelou que as concentrações de ferro não variaram entre os anos no sítio florestal, enquanto que as concentrações detectadas nas árvores do sítio urbano sofreram aumentos gradativos no decorrer dos anos de crescimento avaliados.

Apesar da impossibilidade de aplicação do teste ANOVA devido à heterogeneidade dos dados, foi possível observar maiores concentrações dos elementos enxofre e bromo nas árvores do sítio urbano (Figura 34 e 35) e de rubídio no sítio florestal (Figura 36). As concentrações de enxofre no sítio florestal e de rubídio em ambos os sítios não variaram ao longo dos anos avaliados (Figuras 34 e 36). Contudo, as concentrações de bromo em ambos os sítios e enxofre no sítio urbano apresentaram aumento significativo no decorrer dos anos de crescimento, principalmente a partir dos últimos anos da década de 1990 (Figura 35).

Os elementos titânio e zinco apresentaram concentrações semelhantes entre os sítios de estudo (Figuras 37 e 38). As concentrações destes elementos não variaram entre os anos avaliados no sítio florestal. Contudo, observa-se que as concentrações de zinco diminuíram ao longo dos anos no sítio urbano.

Tabela 12 - Teste ANOVA para medidas repetidas realizado entre os elementos químicos detectados nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* e as variáveis: sítios de estudo (florestal e urbano) e anos de crescimento.

| Elementos | Sítios | | Anos | | Sítios x Anos | |
|-----------|--------|----------|-------|----------|---------------|----------|
| | F | <i>p</i> | F | <i>p</i> | F | <i>p</i> |
| Cloro | 0,829 | 0,459 | 0,640 | 0,900 | 1,340 | 0,174 |
| Potássio | 2,128 | 0,179 | 4,659 | 0,000* | 1,945 | 0,004* |
| Cálcio | 0,053 | 0,823 | 2,93 | 0,000* | 1,410 | 0,089 |
| Manganês | 3,833 | 0,086 | 0,745 | 0,822 | 0,912 | 0,598 |
| Ferro | 0,040 | 0,847 | 0,707 | 0,859 | 1,282 | 0,170 |
| Estrôncio | 3,312 | 0,143 | 0,861 | 0,666 | 0,763 | 0,793 |

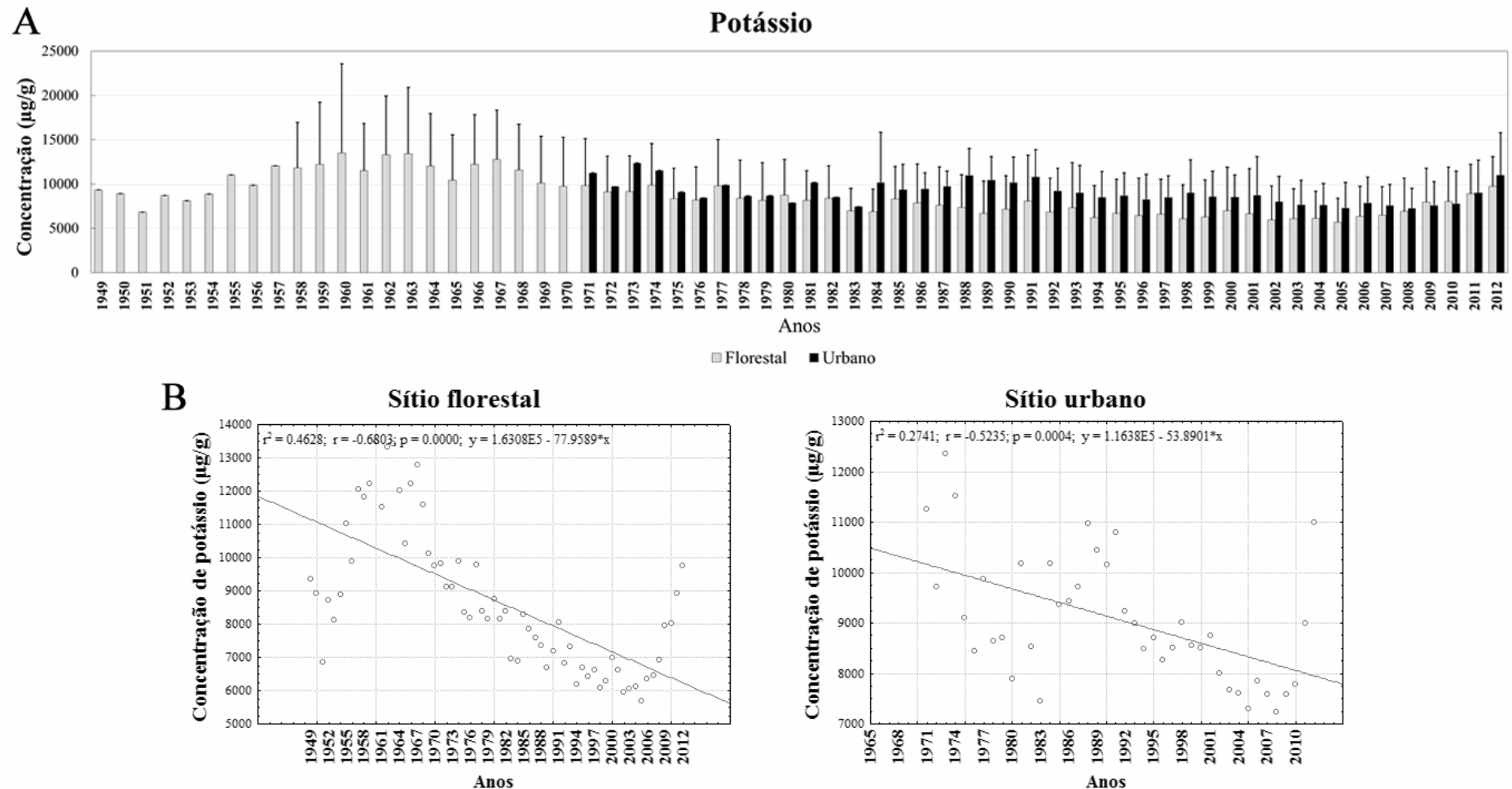
Nota: * Diferença significativa em um intervalo de confiança de 95% (*p*)

Tabela 13 - Teste de correlação de Pearson entre os valores anuais de concentração de cada elemento químico e as cronologias residuais construídas para cada sítio.

| Elementos | Sítio florestal | | Sítio urbano | |
|-----------|-----------------|----------|--------------|----------|
| | <i>r</i> | <i>p</i> | <i>r</i> | <i>p</i> |
| Enxofre | 0,0577 | 0,651 | -0,1617 | 0,312 |
| Cloro | 0,1158 | 0,362 | -0,1194 | 0,457 |
| Potássio | 0,0894 | 0,482 | -0,0227 | 0,888 |
| Cálcio | 0,0381 | 0,765 | -0,1668 | 0,297 |
| Titânio | 0,0145 | 0,909 | -0,0900 | 0,576 |
| Manganês | -0,1794 | 0,156 | -0,1241 | 0,440 |
| Ferro | -0,0751 | 0,555 | -0,0396 | 0,806 |
| Zinco | -0,1003 | 0,430 | -0,1275 | 0,427 |
| Bromo | -0,0439 | 0,730 | -0,1958 | 0,220 |
| Rubídio | 0,1409 | 0,267 | 0,1179 | 0,463 |
| Estrôncio | 0,0072 | 0,955 | 0,0888 | 0,581 |

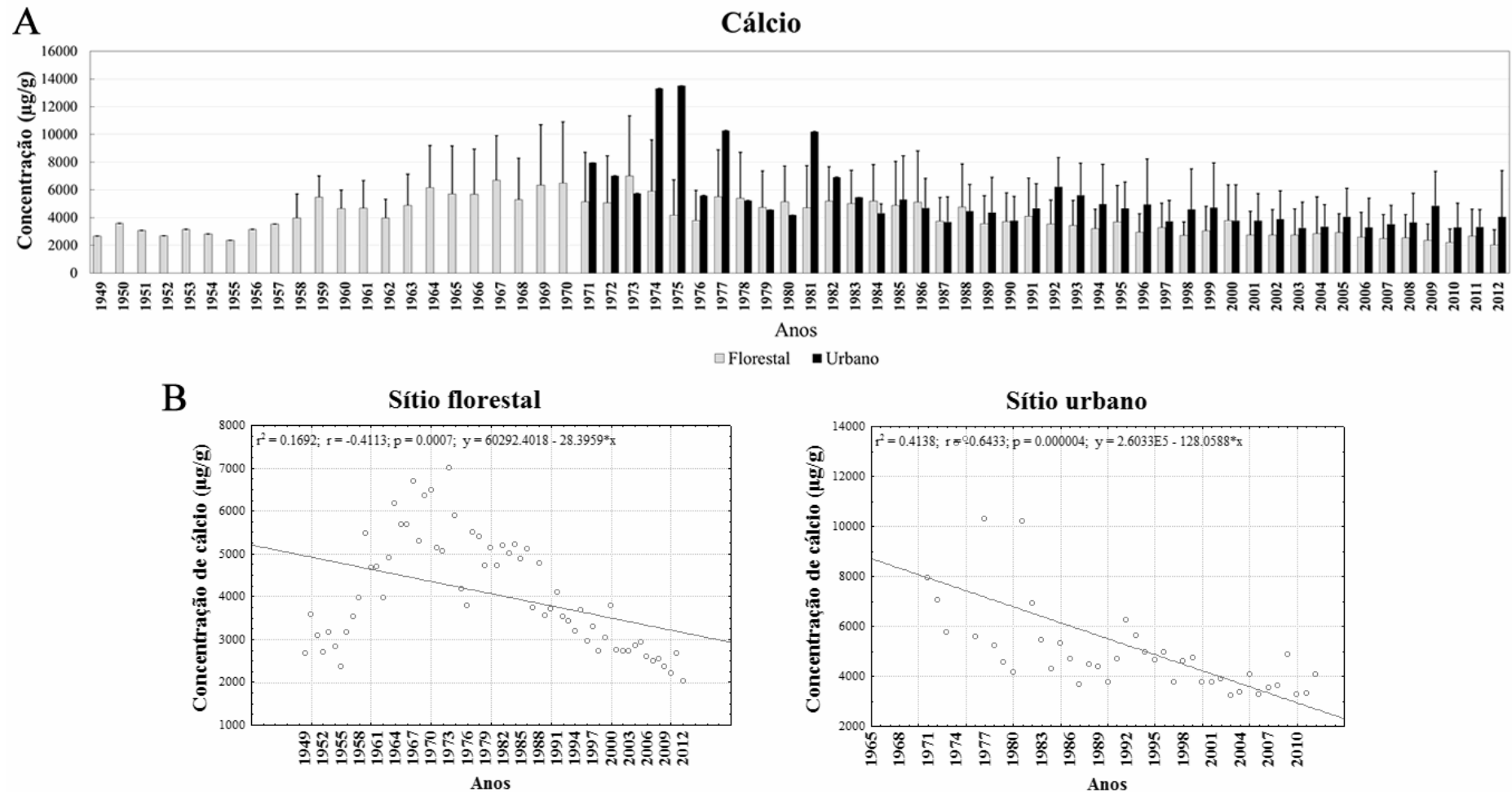
Nota: Não foi observada diferença significativa com um intervalo de confiança de 95% (p).

Figura 28 - Concentrações de potássio nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



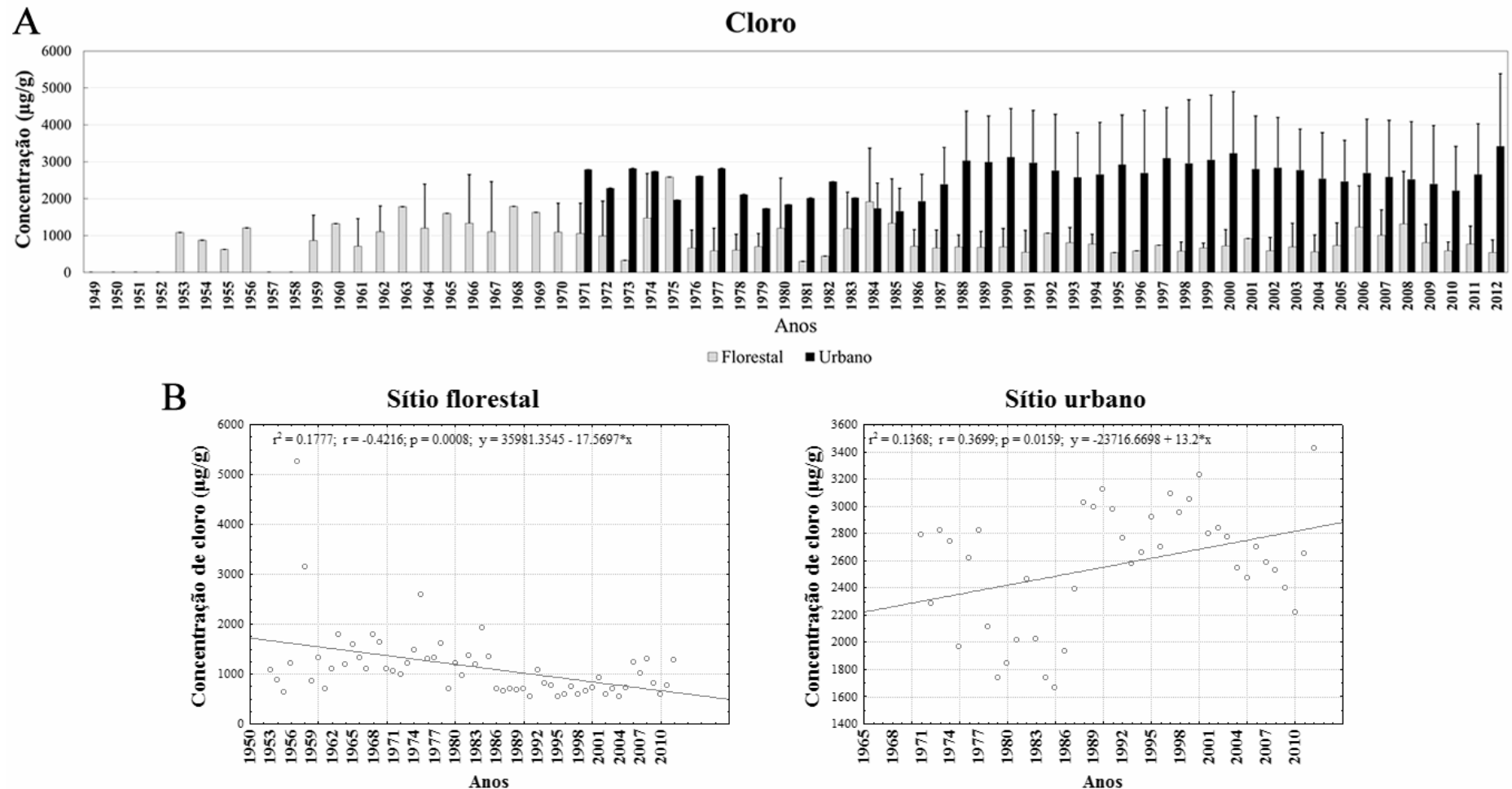
Legenda: (A) As barras representam a concentração de potássio detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de potássio nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 29 - Concentrações de cálcio nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano



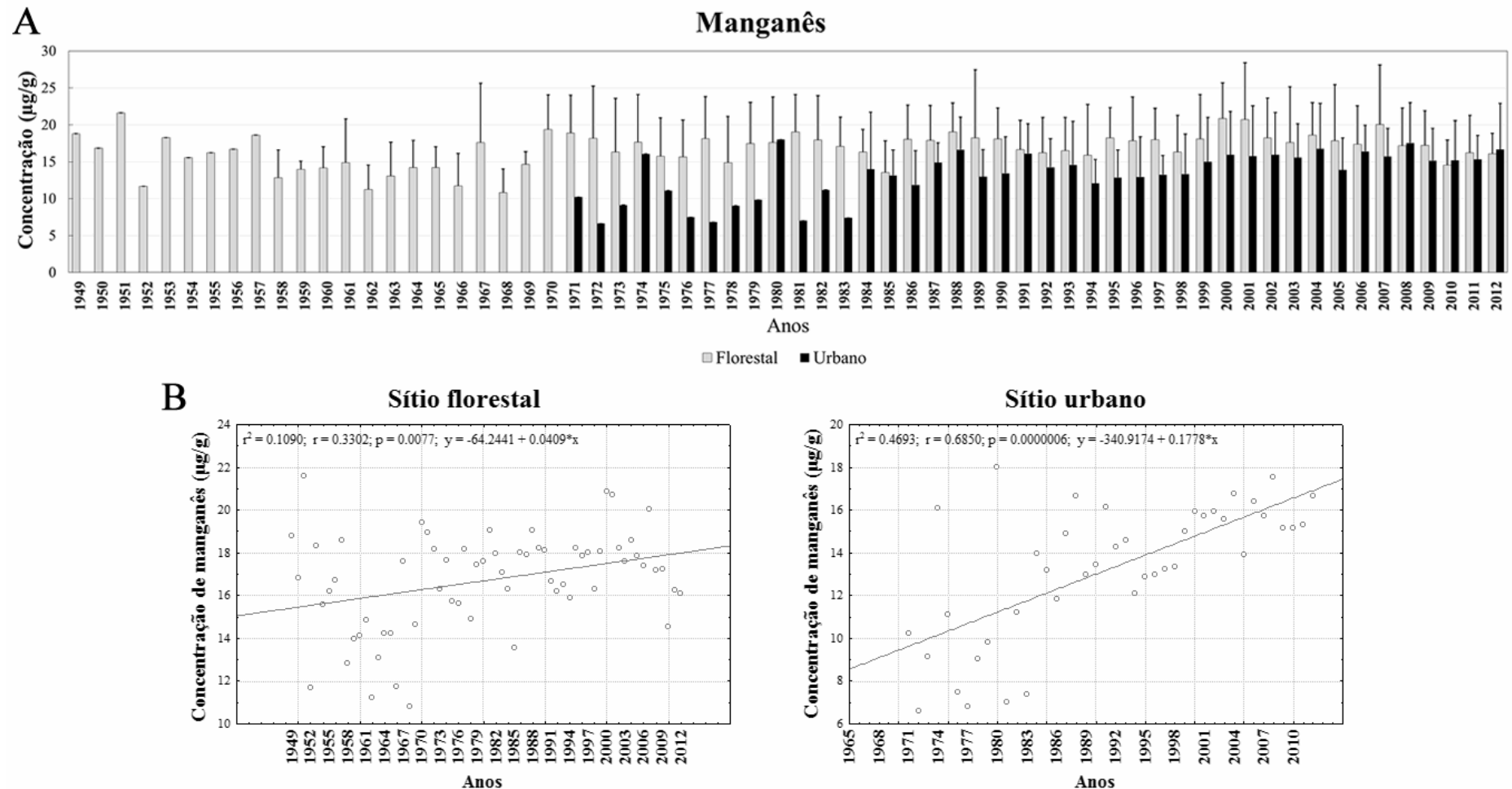
Legenda: (A) As barras representam a concentração de cálcio detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de cálcio nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 30 - Concentrações de cloro nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



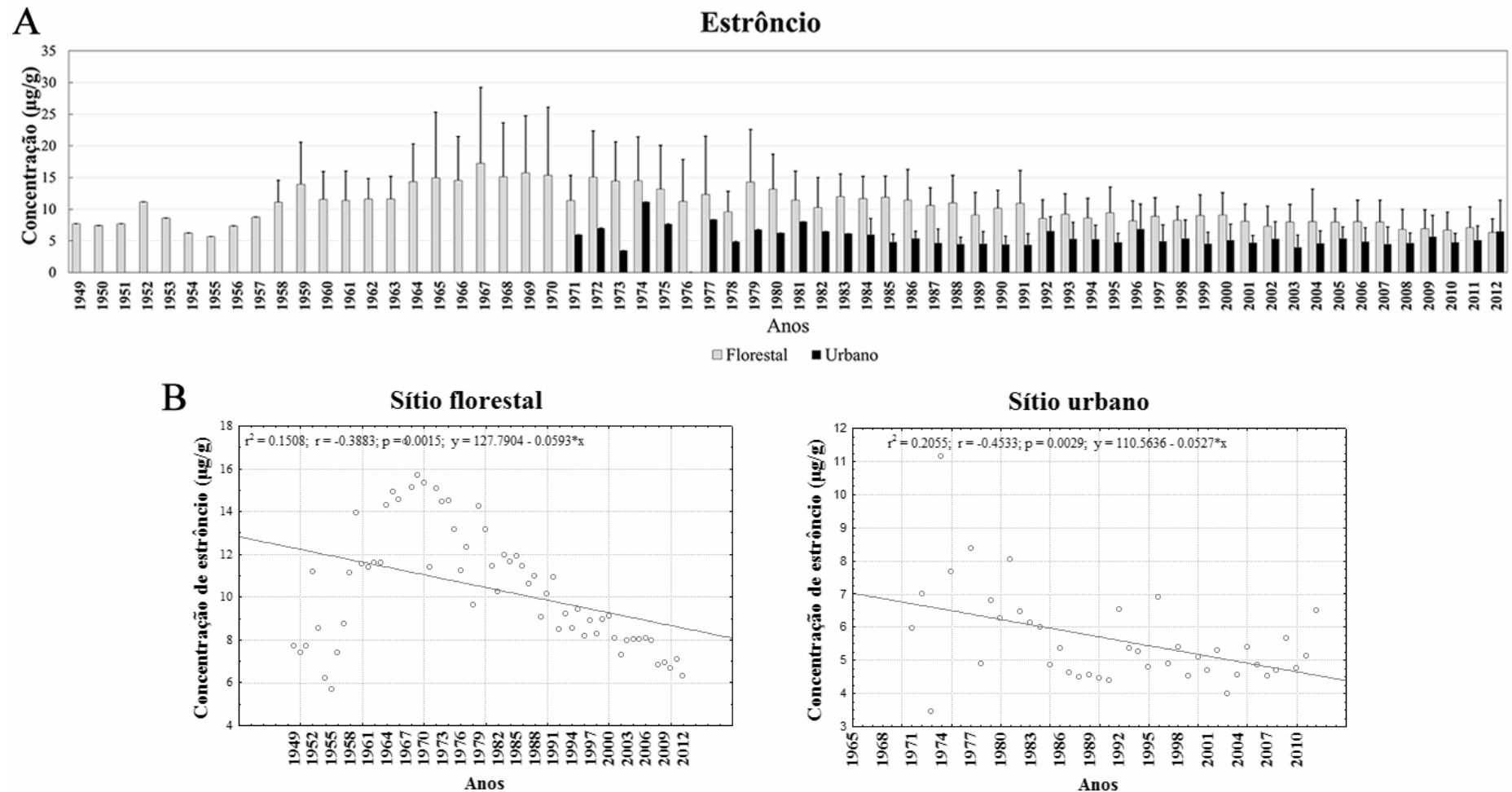
Legenda: (A) As barras representam a concentração de cloro detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de cloro nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 31 - Concentrações de manganês nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



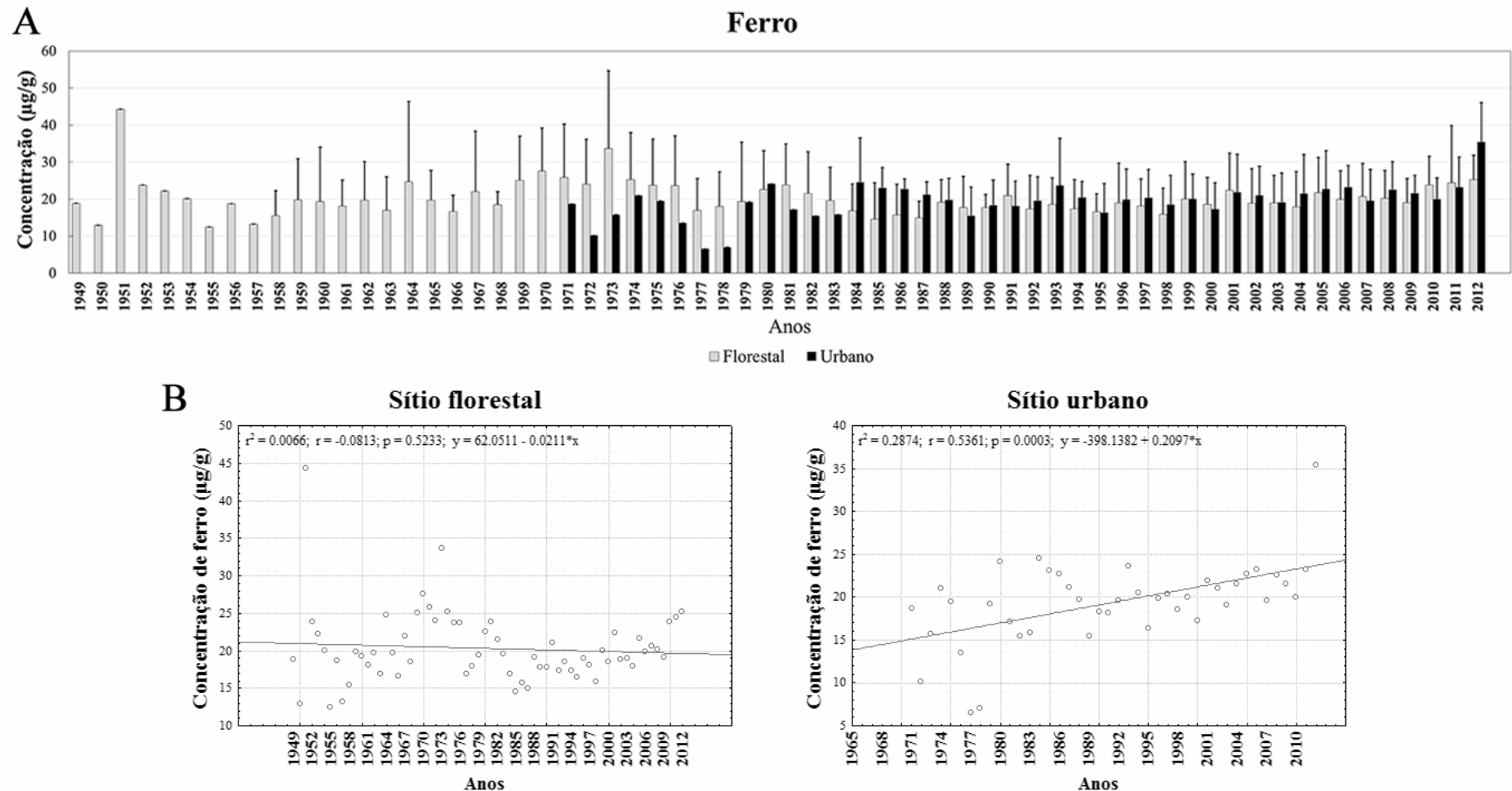
Legenda: (A) As barras representam a concentração de manganês detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de manganês nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 32 - Concentrações de estrôncio nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



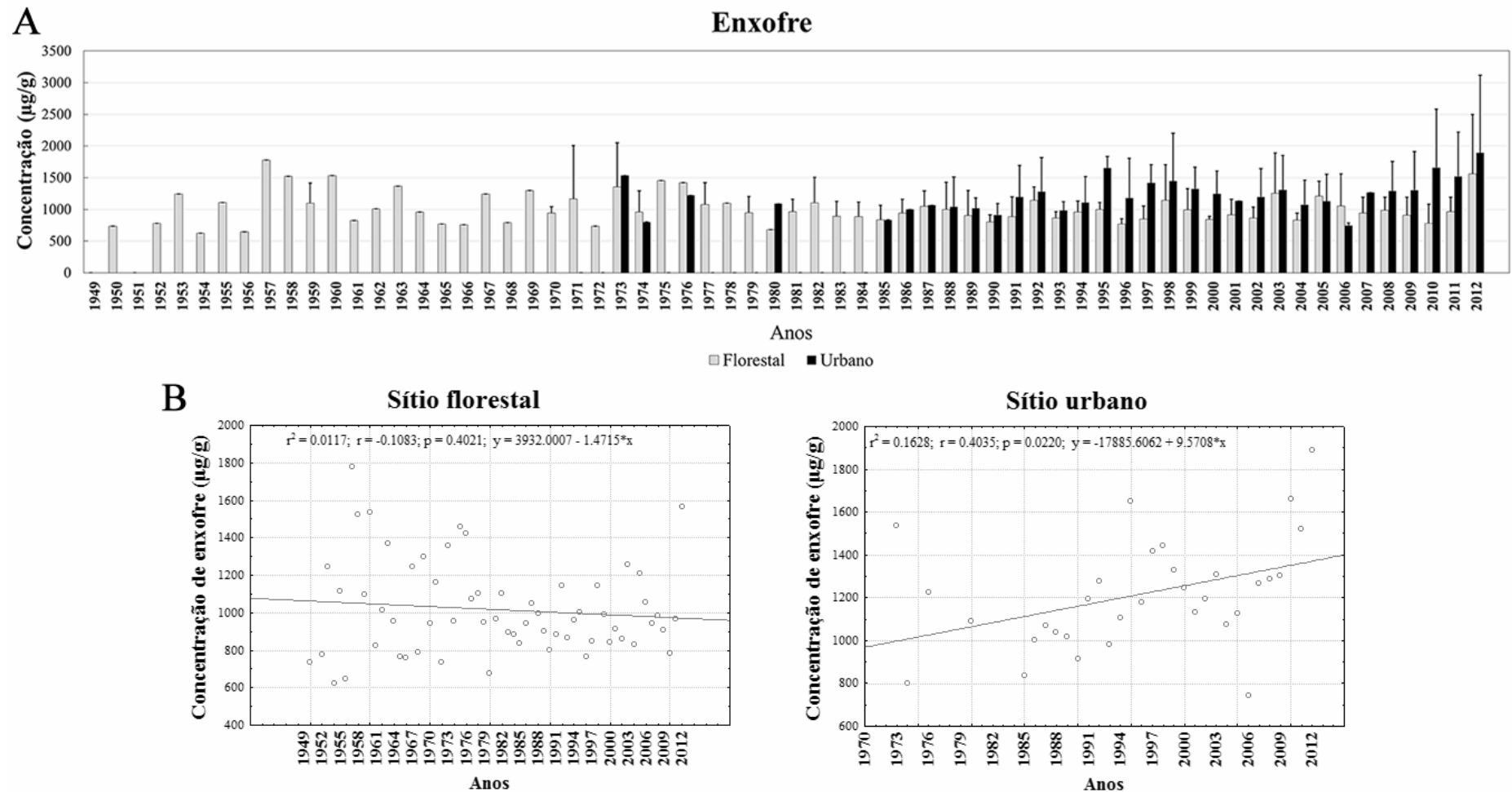
Legenda: (A) As barras representam a concentração de estrôncio detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de estrôncio nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 33 - Concentrações de ferro nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



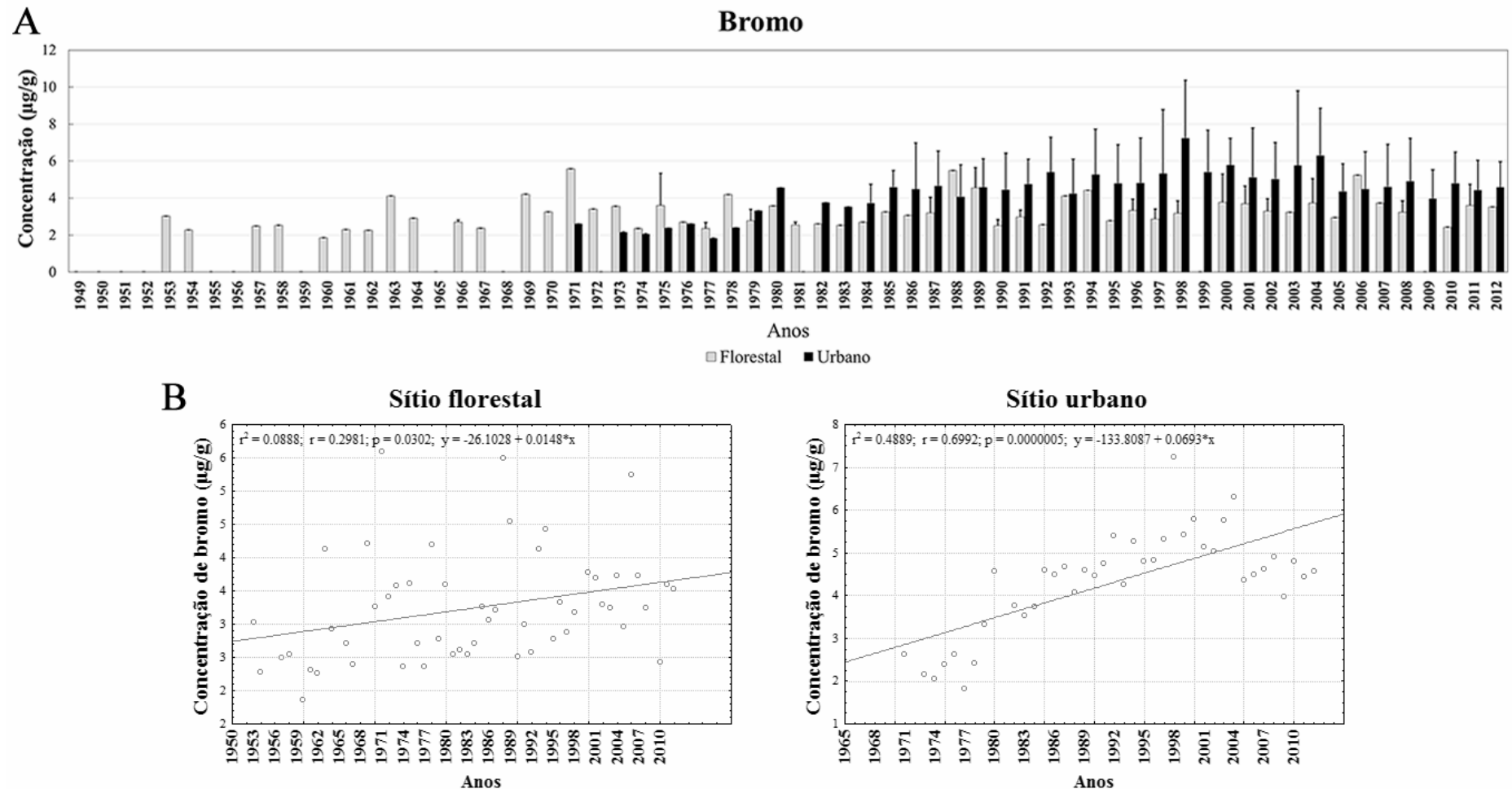
Legenda: (A) As barras representam a concentração de ferro detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de ferro nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 34 - Concentrações de enxofre nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



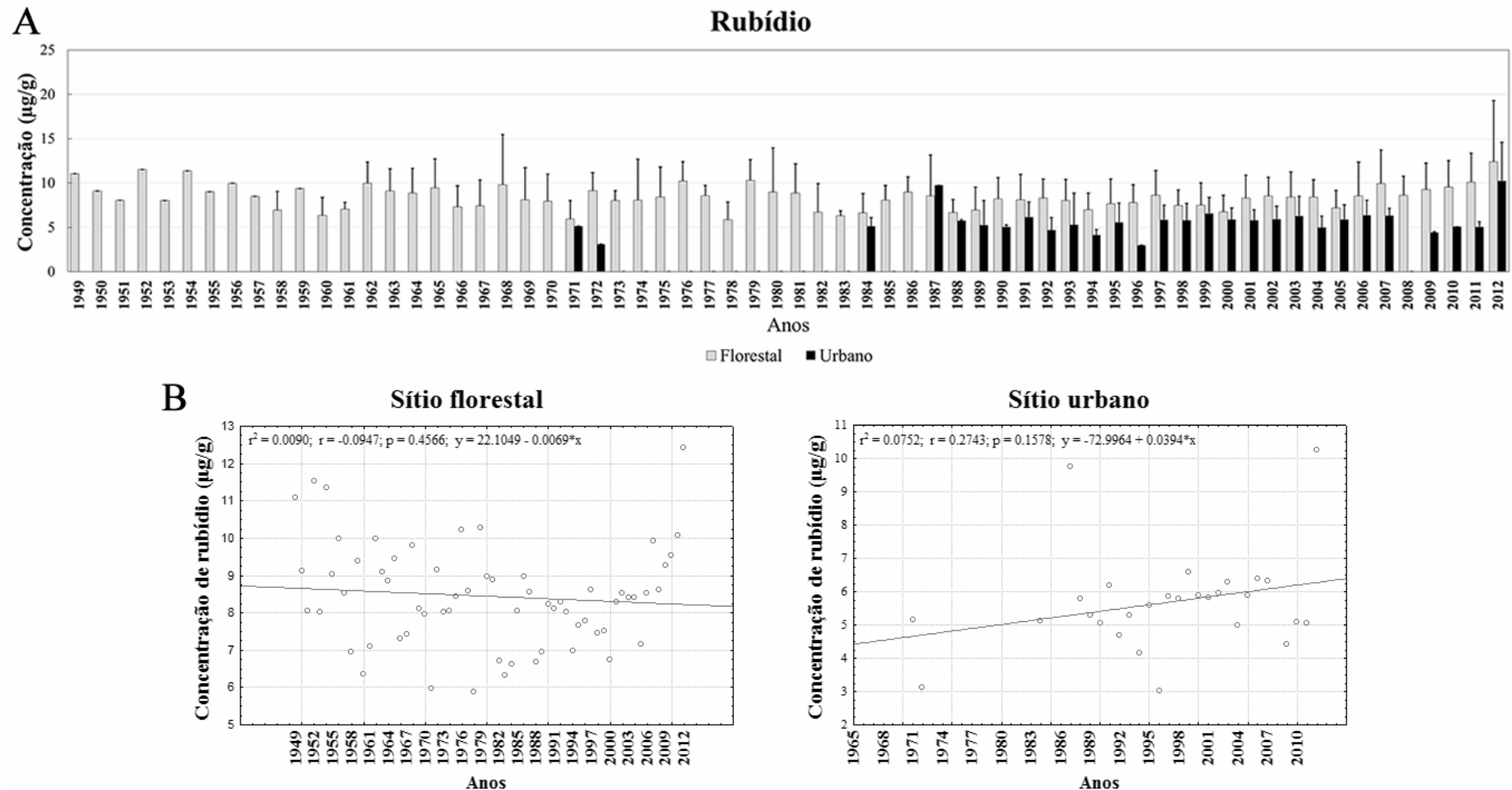
Legenda: (A) As barras representam a concentração de enxofre detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de enxofre nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 35 - Concentrações de bromo nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



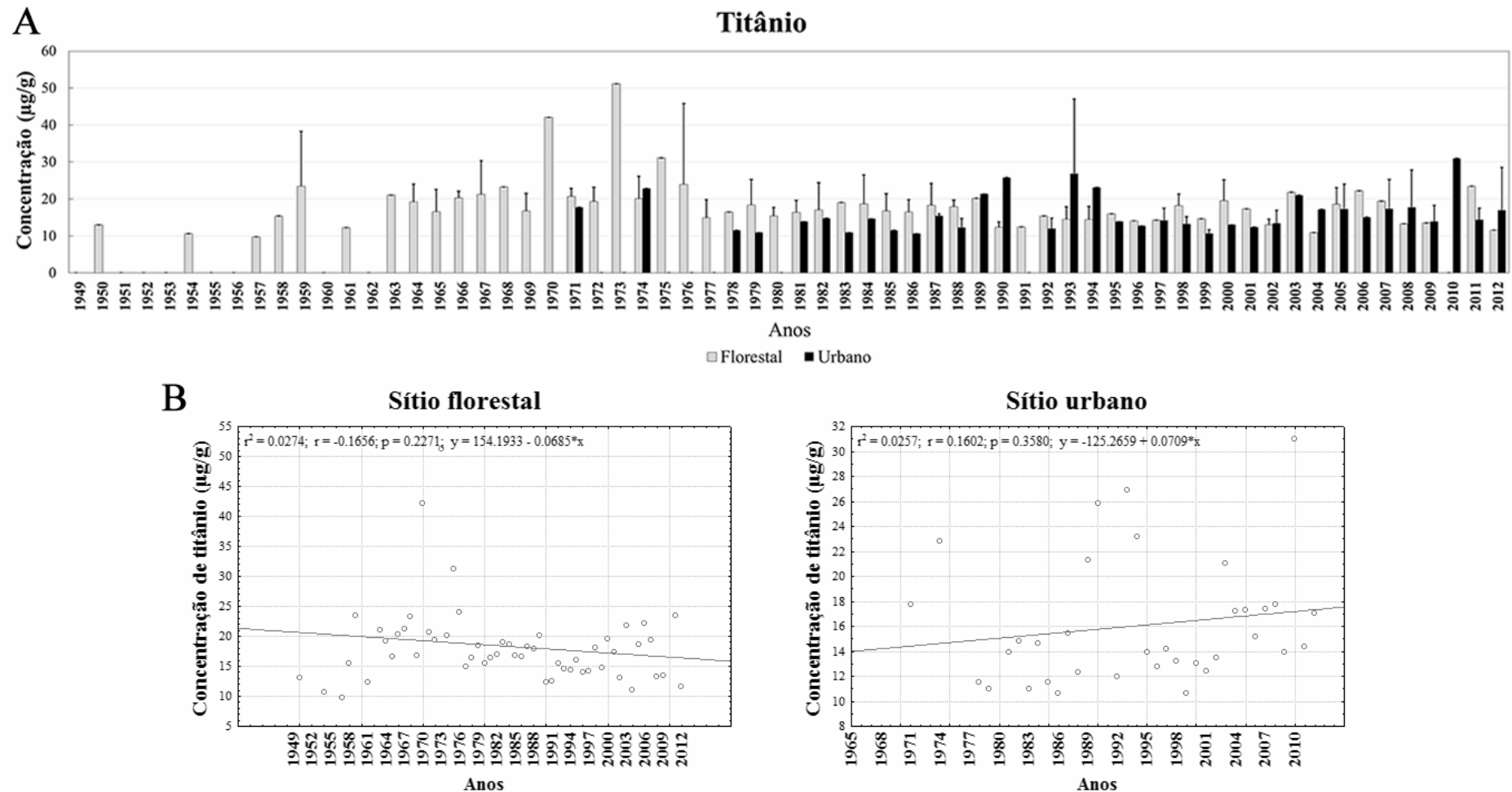
Legenda: (A) As barras representam a concentração de bromo detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de bromo nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 36 - Concentrações de rubídio nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



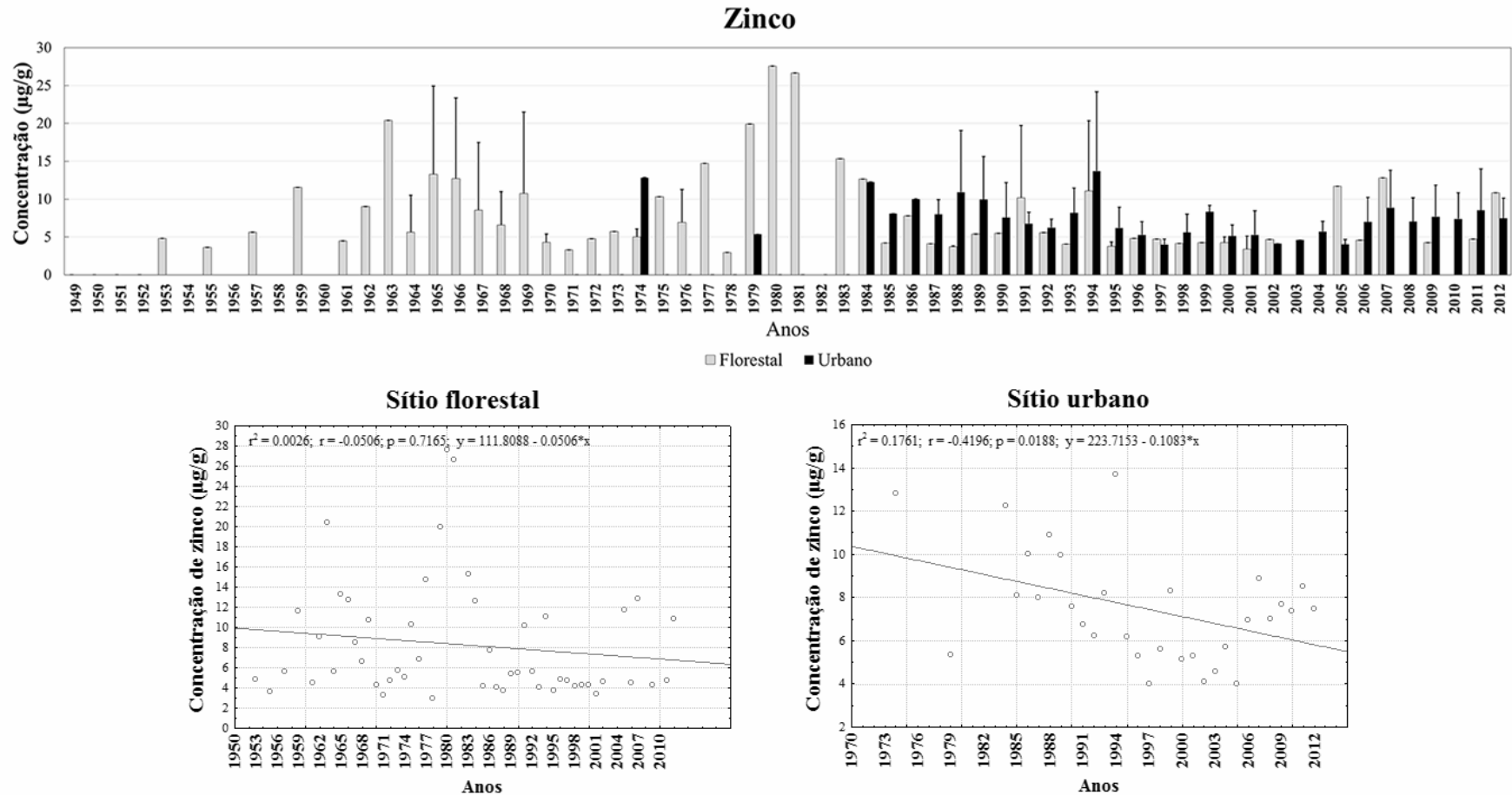
Legenda: (A) As barras representam a concentração de rubídio detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de rubídio nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 37 - Concentrações de titânio nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



Legenda: (A) As barras representam a concentração de titânio detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de titânio nos sítios de estudo e os anos avaliados.

Figura 38 - Concentrações de zinco nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* em sítios florestal e urbano.



Legenda: (A) As barras representam a concentração de zinco detectada em µg/g nos anéis de crescimento das árvores dos sítios florestal (barras cinza) e urbano (barras pretas). As linhas acima das barras representam valores calculados de desvios padrões para anos em que o elemento foi detectado em no mínimo três árvores. (B) Gráficos de dispersão com análise de regressão entre a concentração de zinco nos sítios de estudo e os anos avaliados.

7.4 Discussão

A dependência de técnicas analíticas que exijam a digestão completa do tecido vegetal para a avaliação dos elementos químicos acumulados na madeira é um dos principais empecilhos à realização de estudos dendroquímicos. Análises deste tipo normalmente avaliam distâncias arbitrárias e sinais oriundos de mais de um anel de crescimento e não fornecem informações sobre as heterogeneidades espaciais dentro do xilema, por exemplo, entre o lenho inicial e lenho tardio (BRABANDER et al. 1999). A técnica de fluorescência de Raios X por dispersão de energia (EDXRF), utilizada em *Ceiba speciosa*, é uma metodologia que fornece informações sobre a intensidade e a distribuição dos elementos químicos em um determinado tecido ou célula, sem a necessidade de digestão das amostras ou extração por solvente (por exemplo: SMITH et al. 2008; PEREIRA et al. 2012; LEITÃO et al. 2014, 2015a, 2015b; CANELLAS et al. 2015). Assim, foi possível detectar em *C. speciosa* uma gama de elementos químicos diretamente das amostras obtidas para a dendrocronologia, sem a necessidade da confecção de seções ou digestão química.

A utilização da fluorescência de raios X para a avaliação de elementos químicos acumulados em anéis de crescimento foi realizada em espécies se desenvolvendo no Brasil, como *Copaifera langsdorffii* L. (Fabaceae) (MOREIRA et al. 2006), *Caesalpinia peltophoroides* Benth. (Fabaceae) (VIVES et al. 2006; 2007) e *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze (Fabaceae) (GERALDO et al. 2014). Contudo, estes estudos utilizaram uma variante da técnica de EDXRF, a fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF). Nesta técnica, a radiação emitida é detectada perpendicularmente e bem próxima à amostra, maximizando o número de fótons coletados pelo detector. Contudo, exige que a amostra seja líquida ou solubilizada e se apresente na forma de um filme depositado sobre um suporte estéril e opticamente plano, geralmente de quartzo (NASCIMENTO-FILHO 1999; SANTOS et al. 2013b). Assim, os estudos citados não puderam ser realizados com base em uma cronologia estabelecida pelos anéis de crescimento, como procedido neste estudo em *C. speciosa*. Apesar das diferentes técnicas empregadas para a avaliação química dos anéis de crescimento em espécies arbóreas, é possível comparar os resultados obtidos neste trabalho com os de outras espécies arbóreas crescendo sob poluição ambiental. A falta de correlação entre a largura dos anéis de crescimento e os elementos químicos acumulados no lenho também foi observada para duas espécies nativas da Mata Atlântica se desenvolvendo sob poluição urbana no estado

de São Paulo: *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) G.P. Lewis (Fabaceae) e *Tabebuia pentaphylla* (L.) Hemsl. (Bignoniaceae) (CHAGAS 2013). Assim como observado no estudo dendrocronológico (seção 5) que o ambiente urbano não influencia negativamente as taxas de crescimento de *C. speciosa*, a composição química fixada nas paredes celulares do xilema também não apresenta relação com a largura dos anéis de crescimento da espécie. Apesar da ausência de relação com o crescimento, a dendroquímica realizada em *C. speciosa* evidenciou o registro de elementos potencialmente tóxicos, como enxofre, cloro e bromo, em maior frequência e distribuição nos anéis de crescimento das árvores do sítio urbano. Maiores concentrações destes elementos são associadas na literatura como indicadoras de poluição ambiental (por exemplo: MCLAUGHLIN et al. 2002; KABATA-PENDIAS 2011; CHAGAS 2013; NUHOGLU et al. 2006; SAHIN 2012).

O solo é a principal fonte da maioria dos elementos químicos absorvidos pelas plantas (KABATA-PENDIAS 2004; 2011). Em *Ceiba speciosa*, as concentrações dos elementos químicos detectados nos anéis de crescimento estão de acordo com as concentrações dos mesmos elementos químicos detectados em amostras de solo dos sítios de estudo (Seção 6). As maiores concentrações de manganês, rubídio e estrôncio nos anéis de crescimento das árvores do sítio florestal apresentam relação direta com o maior aporte destes elementos no solo deste sítio. Do mesmo modo, as maiores concentrações médias de bromo e cálcio no solo do sítio urbano, apesar de não diferirem estatisticamente, podem refletir o maior aporte desses elementos nos anéis das árvores crescendo sob poluição urbana. A relação positiva entre os elementos acumulados nos anéis de crescimento e as concentrações químicas elementares observadas no solo no qual as plantas se desenvolviam, foi descrita, por exemplo, para *Acer saccharum* Marshall (Sapindaceae) (WATMOUGH 1999) e *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. (Anacardiaceae) (MIHALJEVIČ et al. 2015).

Embora tenham sido detectados no solo de ambos os sítios e em elevadas concentrações no sítio urbano (Seção 6), os teores de zinco foram muito baixos na madeira e não diferiram entre as árvores de cada sítio e os teores de chumbo não foram detectados em nenhum anel de crescimento das árvores estudadas. As plantas necessitam de zinco para processos bioquímicos fundamentais, como a síntese de clorofila e a atividade de muitas enzimas, porém, o requerem em pequenas concentrações (cerca de 20 ppm) e o chumbo não apresenta função biológica definida nas plantas (TAIZ; ZIEGER 2013). Os estudos que detectaram chumbo em anéis de crescimento de espécies arbóreas por outras técnicas analíticas, revelaram teores variados de chumbo. Medeiros et al. (2008), detectaram em média

0,67 $\mu\text{g/g}$ nos anéis de *Araucaria columnaris* (Araucariaceae), Vives et al. (2006) detectaram de 9,89 a 46,54 $\mu\text{g/g}$ em *Caesalpinia peltophoroides* Benth. (Fabaceae) e Geraldo et al. (2014) detectaram de 5,0 a 123.54 $\mu\text{g/g}$ em *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze (Fabaceae), todos esses valores em árvores se desenvolvendo sob poluição urbana no Brasil. As concentrações de isótopos estáveis de chumbo também são amplamente utilizadas em dendroquímica como um arquivo da poluição ambiental (por exemplo: BINDLER et al. 2004; PATRICK; FARMER 2006; NOVAK et al. 2010; DOUCET et al. 2012; DINIS et al. 2016). Pourrut et al (2013) destacam que ao contrário de outros metais, pouco se conhece sobre os mecanismos envolvidos na absorção de chumbo, sobre sua toxicidade e sobre o potencial de desintoxicação das plantas a este. Estes autores relatam, contudo, que plantas superiores têm evoluído complexos mecanismos bioquímicos de desintoxicação de chumbo e de como lidar com a toxicidade do metal, que incluem a captação seletiva, a excreção, a quelatação por ligantes e a compartimentalização em locais específicos dentro da planta. A falta de detecção de chumbo nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa* pode significar um primeiro indício de que a espécie tolera ou apresenta mecanismos de defesa contra este metal.

A despeito de não termos detectado concentrações de enxofre e cloro nas amostras de solo dos sítios avaliados (Seção 6), estes elementos foram detectados nos anéis de crescimento de *C. speciosa*. O enxofre é um elemento pouco móvel dentro do corpo da planta e essencial ao metabolismo das plantas, encontrado em aminoácidos e em várias coenzimas e vitaminas (HELL 1997; LEUSTEK&SAITO 1999;TAIZ; ZIEGER 2013). O cloro também exerce importante papel na fisiologia das plantas, participa de etapas do processo fotossintético e, é necessário para a divisão celular (WHITE&BROADLEY 2001; TAIZ; ZIEGER 2013). A variação dos teores desses elementos tem sido bastante utilizada como marcadora da poluição ambiental (BALOUET et al. 2009; RIEDEL et al. 2013; WANG et al. 2015). A queima de combustíveis fósseis libera várias formas de enxofre gasoso, como o dióxido de enxofre (SO_2) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), que são absorvidos pelos estômatos e metabolizados pelas plantas (BALOUET et al. 2009; TAIZ; ZIEGER 2013). O cloro é um dos principais resíduos tóxicos gasosos liberados em processos industriais, e é altamente volátil (WANG et al. 2015; KIM et al. 2016; NEG HAB et al. 2016). A presença e a maior concentração desses elementos foram confirmadas em anéis de crescimento de árvores expostas à poluição ambiental (MCLAUGHLIN et al. 2002; NUHOGLU et al. 2006; BALOUET et al. 2012; SAHIN 2012). Em *Ceiba speciosa*, além dos valores de enxofre e

cloro terem sido maiores no sítio urbano, os níveis destes elementos aumentaram significativamente apenas neste sítio.

8 CONCLUSÕES

Este estudo confirmou o impacto da urbanização na formação, na estrutura, na dinâmica de crescimento e no acúmulo de elementos químicos do xilema secundário de *Ceiba speciosa*. A maior concentração de elementos químicos potencialmente tóxicos no sítio urbano foi confirmada com a avaliação química do solo de ambos os sítios.

Compreender a dinâmica de crescimento e a formação da madeira de plantas em situações de estresse, como em um ambiente urbano, é fundamental para a avaliação dos efeitos antrópicos sobre as florestas e o potencial de tolerância e adaptação das espécies às mudanças ambientais (GRIČAR et al. 2012; O'BRIEN et al. 2012). Nosso estudo constatou que árvores de *Ceiba speciosa* expostas à urbanização apresentam diferenças significativas na estrutura do câmbio e, conseqüentemente, do lenho, quando comparados a árvores crescendo em ambiente florestal. As diferenças observadas no câmbio variaram em relação aos períodos de atividade e dormência e, assim como as observadas no lenho, corresponderam a modificações estruturais descritas na literatura como indicadores de estresse ambiental.

O reflexo das modificações da estrutura do câmbio na anatomia do lenho de *Ceiba speciosa* reforça a importância deste meristema na compreensão da produtividade e da qualidade da madeira formada. Sob poluição urbana, as células iniciais fusiformes apresentaram-se mais curtas e os raios cambiais mais largos. Estes resultados influenciaram diretamente a estrutura anatômica do lenho da espécie, que sob poluição urbana apresentou elementos de vaso e fibras com menor comprimento e raios vasculares mais frequentes e com maior largura. Além disso, sob esta condição de estresse, *C. speciosa* apresentou menores índices ecológicos de mesomorfia, de vulnerabilidade e de condutividade hidráulica e, maior proporção de parênquima axial em detrimento ao número de fibras por mm². Este resultado representa um *trade-off* entre baixa resistência do lenho sobre uma maior produção de tecido xilemático, visto que as maiores taxas de crescimento radial foram observadas nas árvores se desenvolvendo sob poluição urbana. O clima mais seco e quente, típico de ambientes urbanos (TOON 2000; ROSENFELD 2000; QIAN et al. 2009; MIRZAEI; HAGHIGHAT 2010; SANTOS et al. 2013a), e a ausência de reservas hídricas naturais no solo, influenciaram o aparecimento de respostas mais imediatas do crescimento das árvores aos índices de precipitação e temperatura. Variações como estas representam estratégias estruturais de adaptação adotadas pelas árvores com o objetivo de alcançar um equilíbrio entre as

necessidades de transporte, armazenamento e resistência mecânica, sob condições ambientais variáveis e restrições genéticas (CHAVE et al.2009).

Finalmente, a maior produção de células xilemáticas que permanecem vivas por mais tempo (células parenquimáticas) em árvores se desenvolvendo em ambiente comprovadamente mais poluído pode ter contribuído para a maior concentração de elementos químicos potencialmente tóxicos acumulados no lenho das mesmas. A relação entre os elementos químicos encontrados nas amostras de solo e aqueles fixados nas paredes celulares do xilema secundário de *Ceiba speciosa* permitiram concluir que os anéis de crescimento da espécie podem ser utilizados como um arquivo ambiental desses elementos.

Este trabalho possibilitou a compreensão de respostas de uma espécie arbórea nativa da Mata Atlântica às modificações cada vez mais frequentes neste bioma: urbanização. Nossos resultados revelaram que *Ceiba speciosa* é uma espécie plástica e tolerante ao estresse, capaz de sobreviver e se adaptar a condições de poluição urbana. Essa característica, juntamente com sua ampla distribuição natural e seu plantio frequente no paisagismo das cidades, fazem desta espécie um importante biomarcador para estudos de monitoramento ambiental.

Este estudo é o primeiro a demonstrar que os poluentes e a dinâmica climática associada ao elevado grau de urbanização apresentam impacto sobre a estrutura do câmbio de *Ceiba speciosa*, uma espécie arbórea da América do Sul e, o reflexo disto na arquitetura hidráulica e nas taxas de crescimento radial desta espécie. É ainda, o primeiro a relatar as concentrações químicas elementares anuais fixadas no lenho baseadas em uma cronologia estabelecida pelos anéis de crescimento. Esses resultados alertam para questões que precisam ser discutidas como: Até quando as plantas das cidades irão resistir ao estresse desses ambientes? Como serão as respostas de espécies nativas crescendo sob poluição urbana ao aumento da frequência de eventos climáticos estocásticos, visto as modificações observadas no lenho de *Ceiba speciosa* crescendo sob esta condição? Será que as árvores hoje sob preservação ambiental irão ajustar seu crescimento diante do avanço da urbanização em direção aos remanescentes florestais e das consequências climáticas associadas?

REFERÊNCIAS

- ABERG, G. et al. Utilization of bark pockets as time capsules of atmospheric-lead pollution in Norway. **Atmospheric Environment**, v. 38, p. 6231-6237, 2004.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2014.
- ALVES, E.S. The effects of the pollution on wood of *Cecropia glazioui* (Cecropiaceae). **IAWA Journal** v. 16, p. 69-80, 1995.
- ALVES, A.R.; COUTINHO, A.R. The evolution of the niobium production in Brazil. **Material Research**, v.18, n.1, p. 106-112, 2015.
- ALVES, E.S. et al. Estudo anatômico foliar do Clone híbrido 4430 de *Tradescantia*: alterações decorrentes da poluição aérea urbana. **Revista Brasileira de Botânica**, V4 (suplemento), p. 567-576, 2001.
- ALVES, E.S.; TRESMONDI, F.; LONGUI, E. L. Análise estrutural de folhas de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) coletadas em ambientes rural e urbano, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, vol.22, n.1, p. 241-248, 2008.
- ALVES, P.L.C.A. et al. Efeitos da chuva ácida simulada e de um solo de Cubatão (SP) sobre parâmetros relacionados com a fotossíntese e a transpiração de plantas de soja. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 2, p. 7-14, 1990.
- ANDRADE, A. G. de; TAVARES, S. R. de L.; COUTINHO; H. L. da C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe Agropecuário**, v. 24, n. 220, p.55-63, 2003.
- ANGELOV, M.N. et al. Long- and short-term flooding effects on survival and sink – source relationships of swamp-adapted tree species. **Tree Physiology**, v.16, p. 477-484 1996.
- ANJOS, M. J. et al. Quantitative Analysis of Metals in Soil Using X-ray Fluorescence. **Spectrochimica Acta**, Part B, v. 55, p. 1189-1194, 2000.
- APPEL, C.; MA, L.Q.; RHUE, R.D.; REVE, W. Sequential sorption of lead and cadmium in three tropical soils. **Environmental Pollution**, v. 155, n. 132-140, 2008.
- ARAGÃO, H.B. Notícia histórica sobre a fundação do Instituto Oswaldo Cruz (Instituto de Manguinhos). **Memórias do Instituto Oswaldo Cruz**, v. 48. Rio de Janeiro. 1950. <http://dx.doi.org/10.1590/S0074-02761950000100001>.
- ARAÚJO, J. P. C. et al. Previsão de escorregamentos translacionais rasos e área de dutos: estudo de caso do maciço do Tinguá na Reserva Biológica Federal do Tinguá (RJ). **Revista Geonorte**, Edição Especial 4, V.10, N.1, p.224-229, 2014.

ASSIREY, E.; EL-SHAHAWI, M.S. Assessment of Roadside Soil Pollution by Heavy Metal Ions and Correlation to Traffic Activities in Madina City, Saudi Arabia. **Asian Journal of Chemistry**, v. 27, n. 2, 2015.

BÄCHTOLD, B.A.& MELO-JÚNIOR, J.C.F. Morphological plasticity of the *Calophyllum brasiliense* Camb.(Calophyllaceae) in resting vegetation in southern Brazil. **Acta Biológica Catarinense**, v.2, n. 2, p. 21-32. 2015.

BAKER A.J.M.; McGRATH S.P.; SIDOLI C.M.D.; REEVES R.D. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal accumulating plants. **Resource, Conservation and Recycling** v. 11, p. 41-49, 1994.

BALOUET, J.C. et al. Use of Dendrochronology and Dendrochemistry in Environmental Forensics: Does It Meet the Daubert Criteria? **Environmental Forensics**, v.10, p. 268–276, 2009.

BALOUET, J.C. et al. Dendrochemistry of Multiple Releases of Chlorinated Solvents at a Former Industrial Site. **Environmental Science; Technology**, v. 46, p. 9541–9547, 2012.

BAPTISTA-NETO, J.A.; SMITH, B.J.; MCALLISTER, J.J. Sedimentological evidence of human impact on a nearshore environment: Jurujuba Sound, Rio de Janeiro State, Brazil. **Applied Geography**, v.19, p. 153–177, 1999.

BAPTISTA-NETO, J.A.; SMITH, B.J.; MCALLISTER, J.J. Heavy metal concentrations in surface sediments in a nearshore environment, Jurujuba Sound, Southeast Brazil. **Environmental Pollution**, v.109, p. 1-9, 2000.

BARALOTO, C. et al. Decoupled leaf and stem economics in rain forest trees. **Ecology Letters**, v. 13, p. 1338–1347, 2010.

BARIMA, Y.S.S. et al. Assessing atmospheric particulate matter distribution based on Saturation Isothermal Remanent Magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. **Science of the Total Environment**, v.470–471, p. 975–982, 2014.

BARNETT, J. Cell-cell communication in wood. In: Baluska F, Volkmann D, Barlow P, eds. Cell-cell channels. Georgetown, TX, USA: **Landes Bioscience**, 135–147p, 2006

BAAS, P.; WHEELER, E.A. Wood anatomy and climate change. In: Climate Change, Ecology and Systematics Edited by Trevor R. Hodkinson; Michael B. Jones; Stephen Waldren; John A. N. Parnell. **Cambridge University Press**. pp. 141-155. 2011

BATTIPAGLIA, G. et al. Long tree-ring chronologies provide evidence of recent tree growth decrease in a Central African Tropical Forest. **PLoS ONE**, v. 10, n. 3. doi:10.1371/journal.pone.0120962, 2015.

BAZZAZ F.A. The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 21 pp. 167-196, 1990.

BECK, W. Growth patterns of forest stands - the response towards pollutants and climatic impact [online]. **iForest** v. 2, p. 4-6; 2009.

<http://www.sisef.it/iforest/search.php?action=displayFULL&type=search&n=0&abstr=on&start=0&k=1&id=472>, acessado em 24 de fevereiro de 2014.

BEGUM S. et al. Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees. **Physiologia Plantarum** v. 147, p. 46-54. 2012.

BELLIS, D.B.; MCLEOD, C.W.; SATAKE, K. Pb and $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ isotopic analysis of a tree bark pocket near Sheffield, UK recording historical change in airborne pollution during the 20th Century. **The Science of the Total Environment**, v. 289, p. 169-176, 2002.

BENCKE, C.S.C.; MORELLATO, L. P. C. Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia de plantas, sua interpretação e representação. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 269-275, 2002.

BINDLER, R. et al. Tree rings as Pb pollution archives? A comparison of Pb 206 207 y Pb isotope ratios in pine and other environmental media. **The Science of the Total Environment**, v. 319, p. 173–183. 2004.

BISPO, K. C. **Influência da serapilheira na água do solo na bacia hidrográfica do rio Salomé-Sul da Bahia**. 2007. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia, 2007.

BLAGOJEVIĆ N.; DAMJANOVIĆ-VRATNICA B.; VUKAŠINOVIĆ-PEŠIĆ V.; UROVIC D. Heavy Metals Content in Leaves and Extracts of Wild-Growing *Salvia Officinalis* from Montenegro. **Polish Journal of Environmental Studies**. v. 18, n. 2, p. 167-73, 2009

BONINSEGNA, J. A; VILLAUBA, R; AMARRILA, L., OCAMPO, J. Studies on tree rings, growth rates and age-size relationships of tropical tree species in Misiones, Argentina. **IAWA Bulletin**, Leiden, v. 10, n. 2, p.161-169, 1989.

BORCHERT, R. Climatic Periodicity, Phenology, and Cambium Activity in Tropical Dry Forest Trees. **IAWA Journal**, v. 20, n. 3, p. 239-247, 1999.

BRABANDER, D. J.; KEON, N.; STANLEY, R. H. R.; HEMOND, H. F. Intra-ring variability of Cr, As, Cd, and Pb in red oak revealed by secondary ion mass spectrometry: Implications for environmental biomonitoring. **PNAS**, v. 96, n. 25, p. 14635–14640, 1999.

BRADSHAW, A.D. Evolutionary significance of phenotypic plasticity in plants. **Advances in Genetics**, v. 13, p. 115-155, 1965.

BRANDES, A.F.N.; LISI, C.S.; BARROS, C.F. Dendrochronology of lianas of the Leguminosae family from the Atlantic Forest, Brazil. **Trees**, Berlin/Heidelberg, v. 25, p. 133-144, 2011.

BRANDES, A.F.N. et al. Seasonal cambial activity and wood formation in trees and lianas of Leguminosae growing in the Atlantic Forest: a comparative study. **Botany**, v. 93, p. 211-220. 2015. [dx.doi.org/10.1139/cjb-2014-0198](https://doi.org/10.1139/cjb-2014-0198)

BRAZ, D.M.; MOURA, M.V.L.P.; ROSA, M.M.T. Chave de identificação para as espécies de Dicotiledôneas arbóreas da Reserva Biológica do Tinguá, RJ, com base em caracteres vegetativos. **Acta Botanica Brasilica**, v. 18, n. 2, p. 225-240. 2004.

BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P.A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. **Journal of Ecology**, Londres, v. 94, p. 481-493, 2006.

BUJOKAS, W.M. **Influência da poeira de fábrica de cimento nas características químicas da precipitação e no crescimento, nos teores de clorofila e na nutrição de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae)**. 2009. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) Universidade Federal do Paraná, Paraná, Curitiba, 2009.

BULBOVAS, P.; CAMARGO, C.Z.S.; DOMINGOS, M. Ryegrass cv. Lema and guava cv. Paluma biomonitoring suitability for estimating nutritional contamination risks under seasonal climate in Southeastern Brazil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 118, p. 149–157, 2015.

BURGER, L.M.; RICHTER, H. G. Anatomia da Madeira. Nobel. SP. 154 p. 1991.

BYTNEROWICZ, A.; OMASA, K.; PAOLETTI, H. Integrated effects of air pollution and climate change on forests: A northern hemisphere perspective. **Environmental Pollution**, v.147, p. 438-445, 2007.

CALLADO, C. H. Os anéis de crescimento no estudo da dinâmica populacional na Floresta Atlântica. In Absy, M.L.; Matos, F.D. de A.; Amaral, I.L. do. **Diversidade Vegetal Brasileira: conhecimento, conservação e uso**. 1ed. Manaus:Sociedade Botânica do Brasil, v. 1, p. 227-231, 2010.

_____; GUIMARÃES, R.C. Estudo dos anéis de crescimento de *Schizolobium parahyba* (Leguminosae: Caesalpinioideae) após episódio de mortalidade em Ilha Grande, Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 85-91, 2010.

_____; et al. Anatomical features of growth rings in flood-prone trees of the Atlantic Rain Forest in Rio de Janeiro, Brazil. **IAWA Journal**, v. 22, n. 1, p 29–42. 2001.

_____; et al. Periodicity of growth rings in some flood-prone trees of the Atlantic Rain Forest in Rio de Janeiro, Brazil. **Trees**, Berlin/Heidelberg, v. 15, p. 492-497, 2001b.

_____; et al. Radial growth dynamics of *Tabebuia umbellata* (Sond.) Sandwith (Bignoniaceae), a flood-tolerant tree from the Atlantic Forest swamps in Brazil. **IAWA Journal**, Leiden, v. 25, n. 2, p. 175-183, 2004.

_____; et al. Cambial growth periodicity studies of South American woody species – A review. **IAWA Journal**, v. 34, p. 213-230. 2013. doi:10.1163/22941932-00000019.

_____; et al. Studies in cambial activity: advances and challenges in knowledge of Brazilian species growth dynamics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 1, p. 277-283, 2014. doi.org/10.1590/0001-3765201320130033

CANÇADO, J. E. D. et al. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, vol.32, n.1, pp.S5-S11, 2006.

CANELLAS, C.G.L. et al. Multielement analysis in serum of healthy population of the metropolitan region of Rio de Janeiro in Brazil by SRTXRF. **X-Ray Spectrometry**, 2015. doi 10.1002/xrs.2631

CARLQUIST, S. Ecological strategies of xylem evolution. Berkeley: **University of California Press**; 1975.

_____. Ecological factors in woodevolution: a floristic approach. **American Journal of Botany** 64: 887-896. 1977. <http://dx.doi.org/10.2307/2442382>

_____. Wood anatomy of Gnetales in a functional, ecological, and evolutionary context. **Aliso**, v. 30, pp. 33–47, 2012

CARLQUIST, S. Living cells in wood. 1. Absence, scarcity and histology of axial parenchyma as keys to function. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 177, p. 291–321. 2015.

CARMO, A. M. J. do et al. Uso de elementos químicos da família 1a por espécies arbóreas tropicais. **International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2013**. Associação Brasileira De Energia Nuclear - ABEN. ISBN: 978-85-99141-05-2 2013.

CARMONA, E. R. et al. Genotoxic and oxidative stress potential of nanosized and bulk zinc oxide particles in *Drosophila melanogaster*. **Toxicology and Industrial Health**, 1–15. 2015. doi: 10.1177/0748233715599472

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003, v. 1, 1039 p.

CASTANHO, A.D. de A. et al. Changing Amazon biomass and the role of atmospheric CO₂ concentration, climate, and land use. **Global Biogeochemical Cycles**, 30, 2016. doi:10.1002/2015GB005135.

CASTRO, H. A. de; GOUVEIA, N.; ESCAMILLA-CEJUDO, J. A. Questões metodológicas para a investigação dos efeitos da poluição do ar na saúde. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, São Paulo, v. 6, n. 2, 2003.

CATTANIO, J.H. et al. Phenology, litterfall, growth, and root biomass in a tidal floodplain forest in the Amazon estuary. **Revista Brasileira de Botânica.**, v.27, n.4, p.703-712, 2004.

CETESB. Relatório do ar no Estado de São Paulo 2015. Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo, 2015. 74p.

CHAGAS, M.P. **Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo**. 2013. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, São Paulo, 2013.

CHAVE, J. et al. Towards a worldwide wood economics spectrum. **Ecology Letters**, v. 12, p. 351–366, 2009.

CHOAT, B. et al. Hydraulic architecture of deciduous and evergreen dry rainforest tree species from north-eastern Australia. **Trees**, v. 19, p. 305–311, 2005.

_____; et al. Pit membrane porosity and water stress-induced cavitation in four co-existing dry rainforest tree species. **Plant Physiology**, v. 131, p. 41–48, 2003.

COOK, E. R.; HOLMES, R. L. Guide for computer program ARSTAN. In H.D. GRISSINO-MAYER, R. L. HOLMES AND H. C. FRITTS (Ed.) **The international tree-ring Data Bank Program Library version 2.0 user's manual**. pp 75–87. University of Arizona. Tucson. 1996.

COOK, E. R.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of dendrochronology**: applications in the environmental sciences. 1 ed. Berlin: **Springer**, 1990

CORADIN, V. T. R.; MUÑIZ, G. M. B. Normas de Procedimentos em Estudos de Anatomia de Madeira: I. Angiospermae. II. Gimnospermae. **LPF**. v. 15, p. 1–19, 1991.

COSTA, R. da G.-R. Entre "Avenida" e "Rodovia": a história da Avenida Brasil (1906–1954) / Renato da Gama-Rosa Costa. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. Disponível em: http://teses.ufrj.br/FAU_D/RenatoDaGama-RosaCosta.pdf, acessado em 24 de fevereiro de 2014.

COSTA, M.S. **Dinâmica de crescimento de *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) na Floresta Atlântica do estado do Rio de Janeiro: Fenologia, Atividade cambial e Dendrocronologia**. 2011. 56p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal). Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2011.

COSTA, C.G. et al. Xilema. In APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B.; CARMELLO-GUERREIRO, S.M., editoras. **Anatomia Vegetal**. Viçosa: UFV; p. 129–154, 2012.

COSTA, M.S. et al. Does growth rhythm of a wide-spread species change in distinct growth sites? **IAWA Journal**. v. 34, p. 498–509, 2013.

_____; et al. Growth analysis of five Leguminosae native tree species from a seasonal semideciduous lowland forest in Brazil. **Dendrochronologia**, v. 36, p. 23–32, 2015.

DAI, J. et al. Influence of heavy metals on C and N mineralisation and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils. **Applied Soil Ecology**, v. 25, p. 99–109, 2004.

DA CUNHA M, GOMES VM, XAVIER-FILHO J, ATTÍAS M, SOUZA W, MIGUENS FC. Laticifer system of *Chamaesyce thymifolia*: a closed host environment for Trypanosomatids. **Biocell**. v. 24, n. 2, p. 123–132, 2000.

DARBAH, J.N.T.; KUBISKE, M.E.; NELSON, N. OKSANEN, E.; VAAPAVUORI, E.; KARNOSKY, D.F. Impacts of Elevated Atmospheric CO₂ and O₃ on Paper Birch (*Betula papyrifera*): Reproductive Fitness. Short Communication Proceedings: **Impacts of Air**

Pollution and Climate Change on Forest Ecosystems *The Scientific World Journal*, v. 7(S1), p. 240–246, 2007.

DESTRO, F.B. Desenvolvimento de recobrimento submicrométrico de óxido de níbio para aplicação em tubos de prospecção de petróleo. **Dissertação de Mestrado**–Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Guaratinguetá, 2015. 88p

DICKINSON, W.C. Integrative Plant Anatomy. San Diego, **Academic Press**. 2000, 533p

DIJK, C van.; DOORN, W. van; ALFEN, B. van. Long term plant biomonitoring in the vicinity of waste incinerators in The Netherlands. **Chemosphere**, v. 122, p. 45–51, 2015.

DINIS, L.; SAVARD, M.M.; GAMMON, P.; BÉGIN, C.; VAIVE, J. Influence of climatic conditions and industrial emissions on spruce tree-ring Pb isotopes analyzed at ppb concentrations in the Athabasca oil sands region. **Dendrochronologia**, v. 37, p. 96–106, 2016.

DOMINGOS, M. et al. Searching for native tree species and respective potential biomarkers for future assessment of pollution effects on the highly diverse Atlantic Forest in SE-Brazil. **Environmental Pollution** 202, 85-95, 2015.

DOUCET, A. et al. Combining tree-ring metal concentrations and lead, carbon and oxygen isotopes to reconstruct peri-urban atmospheric pollution. **Tellus B** 2012, 64, 19005, <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.19005>

DUARTE, R.P.S.; PASQUAL, A. Avaliação do cádmio (cd), chumbo (pb), níquel (ni) e zinco (zn) em solos, plantas e cabelos humanos. **Energia na Agricultura**, vol. 15, n. 1, 2000.

DÜNISCH, O.; MORAES, R. Regulation of xylem sap flow in an evergreen, a semi-deciduous, and a deciduous Meliaceae species from the Amazon. **Trees**, v. 16, p. 404–416, 2002. doi 10.1007/s00468-002-0182-6.

DÜNISCH, J.; PULS, J. Changes in content of reserve materials in an evergreen, a semi-deciduous, and a deciduous Meliaceae species from the Amazon. **Journal of Applied Botany and Food Quality**, v. 77, p. 10-16, 2003.

DYBZINSKI R., FARRIOR C.E., PACALA S.W. Increased forest carbon storage with increased atmospheric CO₂ despite nitrogen limitation: a game-theoretic allocation model for trees in competition for nitrogen and light. **Global Change Biology**, v. 21, p. 1182–1196, 2015. doi: 10.1111/gcb.12783.

ECHEM, O.G.; L.G. KABARI. Heavy Metal Content In Bitter Leaf (*Vernonia amygdalina*) Grown Along Heavy Traffic Routes in Port Harcourt. **International Journal of Agricultural Chemistry** v. 1, n. 2, p. 1-6, 2013. doi: 10.5772/50455

ELLENBERG, H. et al. **Biological monitoring: Signals from the environment**. 1 ed. Braunschweig: Vieweg. 1991.

ELIAS, C. et al. Seleção de epífitas acumuladoras de elementos químicos na Mata Atlântica. **Biota Neotropica**, v. 6, n. 1, 2006.

ELNAZER, H.A.; SALMAN, S.A.; SELEEM, E.M; ELLA, E.M.A.E. Assessment of Some Heavy Metals Pollution and Bioavailability in Roadside Soil of Alexandria-Marsa Matruh Highway, Egypt. **International Journal of Ecology**, vol. 2015, Article ID 689420, 7 p., 2015. doi:10.1155/2015/689420

ELO A. et al. Stem cell function during plant vascular development. **Seminars in Cell; Developmental Biology**, v. 20, p. 1097–110, 2009.

EMOP. EMPRESA DE OBRAS PÚBLICAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO. 2012. Manguinhos - Plano de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <http://www.emop.rj.gov.br/trabalho-tecnico-social/plano-de-desenvolvimento-sustentavel-pds/>

ERLICKYTÈ, R.; VITAS, A. Influence of climatic and anthropogenic factors on the radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **Baltic Forestry**, v. 14, n. 2, p. 103-109, 2008.

ESQUIVEL-HERNÁNDEZ, G. et al. Near Surface Carbon Dioxide and Methane in Urban Areas of Costa Rica. **Open Journal of Air Pollution**, v. 4, p. 208-223, 2015.

ESTRADA, G.C.D. et al. Annual growth rings in the mangrove *Laguncularia racemosa* (Combretaceae). **Trees**, Berlin/Heidelberg, v. 22, p. 663-670, 2008.

EVERT, R.F. **Anatomia das plantas de Esau: meristemas, célula e tecidos do corpo da planta: sua estrutura e função e desenvolvimento**. 1 ed. São Paulo: Blucher, 2013.

FADIGAS, F. S. et al. Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 699-705, 2006.

FAHN, A. El xilema secundario. In **Anatomia Vegetal**. Madri: Ediciones Pirámide S. A, 1982, 350–391.

FANG, Y. et al. Concentrations and health risks of lead, cadmium, arsenic, and mercury in rice and edible mushrooms in China. **Food Chemistry**, v. 147, p. 147–151. 2014

FANG, K.; CHEN, D.; GOU, X.; D'ARRIGO, R.; DAVI, N. Influence of non-climatic factors on the relationships between tree growth and climate over the Chinese Loess Plateau. **Global and Planetary Change**, v. 132, 54–63. 2015.

FARIAS, C. O. et al. Trace metal contamination in mangrove sediments, Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 18, n. 6, p. 1194-1206, 2007.

FEDALTO, L.C. Estudo anatômico do lenho de *Bixa arborea* Huber. **Acta Amazonica**, v. 12, n. (2): 389-399, 1982.

FEDER N.; O'BRIEN, T.P. Plant microtechnique: some principles and new methods. **American Journal of Botany**, Saint Louis, v. 55, p. 123-142, 1968.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. 2004. Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro. Governo do Rio de Janeiro.

FERNANDEZ, M. E. et al. Adaptability to climate change in forestry species: drought effects on growth and wood anatomy of ponderosa pines growing at different competition levels. **Forest Systems**, v. 21, n. 1, p. 162-173, 2012.

FERRETTI, M. et al. Air pollution and environmental chemistry ± what role for tree-ring studies? **Dendrochronologia** 20/1-2, 159-174 2002.

FICHTLER, E.; FORBES, M. Wood anatomical variables in tropical trees and their relation to site conditions and individual tree morphology. **IAWA Journal**, v. 33, n. 2, 119–140 2012

FIOCRUZ, Fundação Oswaldo Cruz. Linha do tempo em texto. 2014, Disponível em <https://portal.fiocruz.br/pt-br/content/linha-do-tempo-em-texto>, acessado em 26 de fevereiro de 2014.

FIORE, A.M.; JACOB, D.J.; FIELD, B.D. Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling methane. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 19, 1919, doi:10.1029/2002GL015601, 2002

FONSECA-JÚNIOR, S.F.; PIEDADE, M.T.F; SCHÖNGART, J. Wood growth of *Tabebuia barbata* (E.Mey.) Sandwith (Bignoniaceae) and *Vatairea guianensis* Aubl. (Fabaceae) in Central Amazonian black-water (igapó) and white-water (várzea) floodplain forests. **Trees**, v.23, p. 127–134, 2009.

FONTI, P. et al. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. **New Phytologist**, v. 185, p. 42–53. 2010. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.03030.x 2010

FRANÇA, E. J.; Native trees as biomonitors of chemical elements in the biodiversity conservations of the Atlantic Forest. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 49, p. 579-592, 2004.

FREEDMAN, B. Environmental Ecology: The Ecological Effects of Pollution, Disturbance, and other Stresses. **Academic Press**, 606 p. 1995

FREITAS, S.R.; HAWBAKER, T.J.; METZGER, J.P. Effects of roads, topography, and land use on forest cover dynamics in the Brazilian Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 3, p. 410–417, 2010.

FREITAS, T.A. et al. Morphology, ultrastructure and mineral uptake is affected by copper toxicity in young plants of *Inga subnuda* subs. *luschnathiana* (Benth.) T.D. Penn. **Environmental Science and Pollution Research**, 2015. doi 10.1007/s11356-015-4610-8 2015

FRITTS, H.C. Tree rings and climate. New York: **Academic Press**, 1972. 567p

GALINDO-LEAL, C.; CÂMARA, I.B. (Eds.). The Atlantic Forest of South America: Biodiversity Status, Threats, and Outlook. (Center for Applied Biodiversity Science at Conservation International State of the Hotspots series). Washington, DC: Island Press, 2003. 488 pp. ISBN 1-55963-988-1

GÄRTNER, H.; NIEVERGELT, D. The core-microtome: A new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. **Dendrochronologia**, v. 28, p. 85–92, 2010.

GASSON, P.; WEBLEY, P. Wood anatomy of **Exostyles venusta** (Swartzieae, Papilionoideae, Leguminosae). **IAWA Journal**, v. 20, n.1, p. 59-66, 1999.

GERALDO, S.M.; CANTERAS, F.B; MOREIRA, S. Biomonitoring of environmental pollution using growth tree rings of *Tipuana tipu*: Quantification by synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence. *Radiation Physics and Chemistry*. 95, p. 346–348, 2014.

GIANOLI, E.; VALLADARES, F. Studying phenotypic plasticity: the advantages of a broad approach. **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 105, p. 1–7. 2012

GIBBS, P.; J. SEMIR. A taxonomic revision of the genus *Ceiba* Mill. (Bombacaceae). **Anales del Jardín Botánico de Madrid**, v. 60, n. 2, p. 259-300, 2003.

GILLER, K.E.; MCGRATH, S. P.; HIRSCH, P. R. Absence of nitrogen fixation in clover grown on soil subject to long-term contamination with heavy metals is due to survival of only ineffective rhizobium. **Soil Biology; Biochemistry**, v. 21, n. 6, p. 841-838. 1989.

GONÇALVES, G.V. **Dendrocronologia: princípios teóricos, problemas práticos e aplicabilidade**. Conferência. CIDEHUS – Universidade de Évora, Évora, Portugal, 2007.

GRATÃO, P. L. et al. Phytoremediation: green technology for the cleanup of toxic metals in the environment. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 53-64, 2005.

GRAU, H.R.; EASDALE, T.A.; PAOLINI, L. Subtropical dendroecology – dating disturbances and Forest dynamics in northwestern Argentina montane ecosystems. **Forest Ecology and Management**, v. 177, p. 131-143, 2003.

GRIČAR, J.; ELER, K. The frequency of ray and axial parenchyma versus tree-ring width in silver fir (*Abies alba* Mill.). **Trees**, 2015. doi 10.1007/s00468-015-1181-8

GRIČAR, J.; RATHGEBER, C.K.B.; FONTI, P. Monitoring seasonal dynamics of wood formation. **Dendrochronologia**, v. 29, p. 123-125, 2011

GRIČAR, J. 2012. Cambial Cell Production and Structure of Xylem and Phloem as an Indicator of Tree Vitality: A Review, Sustainable Forest Management - Current Research, Dr. Julio J. Diez (Ed.), ISBN: 978-953-51-0621-0, **InTech**, disponível em: <http://www.intechopen.com/books/sustainable-forest-management-current-research/cambial-cell-production-and-structure-of-xylem-and-phloem-as-an-indicator-of-tree-vitality-a-review>.

GRIMM, A.M.; BARROS, V.R.; DOYLE, M.E. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. **American Meteorological Society**, v. 13, p. 35-58, 2000

GROOVER, A.; ROBISCHON, M. Developmental mechanisms regulating secondary growth in woody plants. **Current Opinion in Plant Biology**, 9:55–58, 2006.

GUÉGUEN, F. et al. Atmospheric pollution in an urban environment by tree bark biomonitoring – Part I: Trace element analysis. **Chemosphere**, v. 86, p. 1013-1019, 2012.

GUILHERME, L.R.G. et al. Elementos-traço em solos e sistemas aquáticos. In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.4. p.345-390, 2005.

GUPTA, MC; IQBAL, M. Ontogenetic histological changes in the wood of mango (*Mangifera indica* L. cv Deshi) exposed to coal-smoke pollution. **Environmental and Experimental Botany**, v. 54, p. 248–255, 2005.

HACKE, U.G. et al. Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. **Oecologia**, v.126, p. 457-461, 2001. doi 10.1007/s004420100628.

HALL, J.L. Cellular Mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, p. 1-11, 2002.

HASSAN, I.A.; BASAHI, J.M. Assessing Roadside Conditions and Vehicular Emissions Using Roadside Lettuce Plants. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 22, n. 2, p. 387-393, 2013.

HEIJDEN, G.M.V.D. et al. Liana Impacts on Carbon Cycling, Storage and Sequestration in Tropical Forests. **Biotropica** 45(6): 682–692, 2013

HELL, R. Molecular physiology of plant sulfur metabolism. **Planta**, v. 202, p. 138-148, 1997.

HERNANDEZ, L. et al. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. **The Science of the Total Environment**, v. 312, p. 195–219, 2003.

HOLMES, R.L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. **Tree-ring Bulletin**, Arizona, v. 43, p. 69-78, 1983.

HONOUR, S.L.; BELL, J.N.B.; ASHENDEN, T.A.; CAPE, J.N.; POWER, S.A. Responses of herbaceous plants to urban air pollution: Effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. **Environmental Pollution**, v. 157, n. 4, p. 1279-1286, 2009. 10.1016/j.envpol.2008.11.049.

HORWITZ, W. Nomenclature for sampling in analytical chemistry. **Pure and Applied Chemistry**, v. 62, n. 6, p. 1193-1208, 1990.

IAWA Committee. IAWA list of microscopic features for hardwood Identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, 219-332p.1989.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Qualidade do ar. 2011. Disponível em <http://www.inea.rj.gov.br>, acessado em 08 de novembro de 2011.

INOUE, M.T.; REISSMANN, C.B. Efeitos da poluição na fotossíntese, dimensões da folha, deposição de particulados e conteúdo de ferro e cobre em alfeneiro (*Ugustrum lucidum*) da arborização de Curitiba, PR. *Floresta* v.21, n1/2, p. 3-11. 1993 <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/floresta/article/download/6420/4612>

IQBAL, M. et al. Foliar characteristics, cambial activity and wood formation in *Azadirachta indica* A. Juss. as affected by coal–smoke pollution. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 205, n.1, p. 61-71. 2010a.

_____;et al. Behavioural responses of leaves and vascular cambium of *Prosopis cineraria* (L.) Druce to different regimes of coal-smoke pollution. **Journal of Plant Interactions** v. 5, n. 2, p.117-133, 2010b. <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/17429140903438084>

JACH, M.E.; CEULEMANSVAN, R.Effects of elevated atmospheric CO₂ on phenology, growth and crown structure of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings after two years of exposure in the field, **Tree Physiology**, v. 19, p. 289-300,1998.

JANE, F.W. **The Structure of Wood**. A.; C. Black: London. 478 p.1956.

JBRJ.. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Relatório técnico científico - Projeto Tinguá. Disponível em <http://www.jbrj.gov.br/>, acessado em 18 de nov. de 2011.2002

JESUS, M.F.S. de. **Análise dos efeitos de borda sobre a composição, dinâmica e estrutura da comunidade arbórea na Mata Atlântica da Reserva Biológica do Tinguá - RJ**. 2009. 149f. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro/Escola Nacional de Botânica Tropical, Rio de Janeiro, 2009.

JOHANSEN D.A. Plant microtechnique. **McGraw-Hill**, New York.1940.

JUMP, A; PENUELAS, J. Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. **Ecology Letters**, v. 8, p. 1010–1020, 2005.

KABATA-PENDIAS, A. Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. **Geoderma**, v. 122, p.143–149 2004.

_____. Trace elements in soils and plants. 4. ed. Nova York: **CCR Press**, 2011.

KAENNEL; M.; SCHWEINGRUBER, F. H. **Multilingual glossary of dendrochronology: terms and definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian**. Birmensdorf: Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research; Berne: Paul Haupt Publ., 1995. 467 p.

KALNAY, E., et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bull. Amer. Meteor. Soc.** v. 77, p. 437-471, 1996.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution Amherst**, v.151, p. 362-367, 2008.

KHAN, M.A.; SIDDIQUI, M.B.; BHAT, S.; SHAHAB, D. 2007. Pollution effect on the cambial structure of *Citrus reticulata* var. tangelos. **International Journal of Botany** 3 (4): 342-350.

KIM, Y. S.; PARK, B. D.; SHIM, K. Wood anatomical characteristics of Pine tree (*Pinus densiflora* S. et Z.) damaged by air pollution. **Wood Science; Technology**, v. 15, n. 2, p.105-112, 1987.

KITZBERGER, T.; VEBLEN, T.T.; VILLALBA, R. Métodos dendroecológicos y sus aplicaciones en estudios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. In **Dendrocronología en América Latina** (F.A. Roig, ed.). Ediunc, Mendoza, p.17-78. 2000.

KOZLOWSKI, T.T. Plant Responses to Flooding of Soil. **BioScience**, v. 34, n. 3, pp. 162-167, 1984

_____; KRAMER, P.J.; PALLARDY, S. G. 1991. The Physiological Ecology of Woody Plants. Academic Press, San Diego.

_____; PALLARDY, S.G. Growth control in woody plants. San Diego, California: **Academic Press**, 1997.

KRAFT, N.J.B.; METZ, M.R.; CONDIT, R.S.; CHAVE, J. The relationship between wood density and mortality in a global tropical forest data set. **New Phytologist**, v. 188, p.1124–1136, 2010.

KURCZYNSKA, E. U. et al. The influence of air pollutants on needles and stems of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 98, n. 3, p. 325–334, 1997.

LACHAUD S.; CATESSON A. M.; BONNEMAIN J.L. Structure and functions of the vascular cambium. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 322, p. 633–650, 1999.

LEITÃO, R.G. et al. Elemental concentration analysis in prostate tissues using total reflection X-ray fluorescence. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 62–64, 2014.

LEITÃO, R.G. et al. Study of the differential response to zinc of prostate cell spheroids using the synchrotron radiation X-ray microfluorescence technique. **X-Ray Spectrometry**, v. 44, p. 204–208, 2015a.

LEITÃO, R.G. et al. Study of Response to Zinc in Human Prostate Spheroids Using X-Ray Microfluorescence. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 64, n. 8, 2015.

LEMOS, S.D.daC. **Desenvolvimento e produção de metabólitos de arruda (*Ruta graveolens* L.) exposta a substratos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo**. 2015. 150 f. Tese (Doutorado em Ciências)- Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

LEONELLI, G. et al. Climatic isotope signals in tree rings masked by air pollution: A case study conducted along the Mont Blanc Tunnel access road (Western Alps, Italy). **Atmospheric Environment**, v. 61, p. 169-179, 2012.

LEPP, N.W. The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. **Environmental Pollution**, v. 9, 1975.

LEUSTEK, T.; SAITO, K. Sulfate Transport and Assimilation in Plants. **Plant Physiology**, v. 120, pp. 637-643, 1999.

LEV-YADUN, S. Experimental evidence for the autonomy of ray differentiation in *Ficus sycamoros* L. **New Phytology** v. 126, p. 499-504, 1994. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.1994.tb04247.x/pdf>

LEV-YADUN, S; ALONI R. Effect of wounding on the relations between vascular rays and vessels in *Melia azedarach* L. **New Phytology**, v. 124, p. 339-344, 1993. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03824.x/pdf>

LEV-YADUN, S; ALONI, R. Differentiation of the ray system in woody plants. **The Botanical Review**, v. 61, p. 45-84, 1995.

LI, X.; POON, C-S.; LIU, P. S. Heavy metal contamination of urban soils and streetdusts in Hong Kong. **Applied Geochemistry**, v. 16, p. 1361–1368, 2001.

LIMA et al. How much do we know about the endangered Atlantic Forest? Reviewing nearly 70 years of information on tree community surveys. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, p. 2135-2148, 2015.

LIRA, P.K. et al. Land-use and land-cover change in Atlantic Forest landscapes. **Forest Ecology and Management** v. 278, p. 80-89, 2012.

LISI, C.S. et al. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in Southeast Brazil. **IWA Journal**, Leiden, v. 29, n. 2, p. 189-207, 2008.

LOPES, M.I.M.S. et al. Soil chemical and physical status in semideciduous Atlantic Forest fragments affected by atmospheric deposition in central-eastern São Paulo State, Brazil. **iForest** (early view): e1-e11, 2015.

LORENZI, H. Árvores brasileiras - Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa, SP, **Editora Plantarum**, Vol. I, 1998.

LOTFIOMRANI, N.; FROMM, J.; LUINSTRA, G.A. Effects of elevated CO₂ and different nutrient supplies on wood structure of European beech (*Fagus sylvatica*) and Gray poplar (*Populus × Canescens*). **IWA Journal**, v. 36, n. 1, p. 84–97, 2015.

LTM. Laboratório Territorial de Manguinhos/Fundação Oswaldo Cruz. 2015. Disponível em: < <http://www.conhecendomanguinhos.fiocruz.br/?q=ambientenatural>>, Acessado em> 20 de agosto de 2015.

LUCHI AE. Anatomia do lenho de *Croton urucurana* Baill. (Euphorbiaceae) de solos com diferentes níveis de umidade. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 27, p. 271-280, 2004.

LUKKARI, T. et al. Biomarker responses of the earthworm *Aporrectodea tuberculata* to copper and zinc exposure: differences between populations with and without earlier metal exposure. **Environmental Pollution**, v. 129, p. 377–386, 2004.

_____ et al. Toxicity of copper and zinc assessed with threedifferent earthworm tests. **Applied Soil Ecology**, v. 30, p. 133-146, 2005.

MACEDO, A. C. Revegetação: matas ciliares e de proteção ambiental / A. C. Macedo; revisado e ampliado por Paulo Y. Kageyama, Luiz G. S. da Costa.- São Paulo: Fundação Florestal, 1993.

MACEDO, T.M. Variação intraespecífica do lenho e dendrocronologia de *Caesalpinia echinata* Lam. na Floresta Atlântica/Tahysa Mota Macedo. – Rio de Janeiro: UFRJ/Museu Nacional, 2015. **Tese de Doutorado** – UFRJ/Museu Nacional/Programa de Pós-graduação em Ciências Biológicas (Botânica), 2015.

_____ et al. Wood anatomy of seven species of *Tachigali* (Caesalpinioideae–Leguminosae). **IAWA Journal**, v. 35, n. 1, 19-30, 2014.

MAHMOODUZZAFAR et al. Anatomical changes in the wood of *Syzygium cumini* exposed to coal-smoke pollution. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 8, n. 3-4, p. 959-964, 2010.

MALAR, S. et al. Effect of lead on phytotoxicity, growth, biochemical alterations and its role on genomic template stability in *Sesbania grandiflora*: A potential plant for phytoremediation. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 108, p. 249–257, 2014.

MARCATI, C.R.; ANGYALOSSY, V.; EVERT, R.F. Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). **IAWA Journal**, Leiden, v. 27, n. 2, p. 199-211, 2006

_____; MILANEZ, C.R.D.; MACHADO, S.R. Seasonal development of secondary xylem and phloem in *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake Leguminosae: Caesalpinioideae). **Trees**, Berlin/Heidelberg, v. 22, p. 3-12, 2008.

MARCHIORI, J.C.; OLIVEIRA-DEBLE, A.S. Anatomia da madeira na subtribo *Baccharinae* less. tendências gerais de ordem taxonômica ecológica. **BALDUINIA**, v. 25, n. 11; p. 9-15, 2007.

MARKESTEIJN, L. et al. Hydraulics and life history of tropical dry forest tree species: coordination of species' drought and shade tolerance. **New Phytologist**, 2011. doi: 10.1111/j.1469-8137.2011.03708.x

MARQUES, P.A. et al. Variação Intraespecífica do Lenho de *Eugenia uniflora* L. em Duas Diferentes Fitofisionomias do Complexo Vegetacional Atlântico. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 483-496, 2012.

MARQUES, J.B.C. et al. Comparative wood anatomy of species of *Psychotria* L. (Rubiaceae) in Atlantic Rainforest remnants of Rio de Janeiro State, Brazil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 29, n. 3, p. 433-444, 2015.

MARTINS, A.P.G. 2009. Cascas de árvores como biomonitores da poluição atmosférica de origem veicular em parques urbanos da cidade de São Paulo. **Tese de Doutorado**. São Paulo: Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo.

MAZZONI-VIVEIROS, S.C.; TRUFEM, S.F.B. 2004. Efeitos da poluição aérea e edáfica no sistema radicular de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) em área de Mata Atlântica: associações micorrízicas e morfologia. **Revista Brasileira de Botânica**, V.27, n.2, p.337-348.

MCALISTER, J. J.; SMITH, B. J.; SANCHEZ, B. Forest clearance: impact of land use change on fertility status of soils from the São Francisco area of Niterói, Brazil. **Land Degradation Develop**, v. 9, p. 425–440, 1998.

_____; SMITH, BJ; BAPTISTA-NETO, JA. The presence of calcium oxalate dihydrate (weddellite) in street sediments from Niterói, Brazil, and its health implications. **Environ Geochem Health**, v. 22, n. 3, p. 195–210, 2000.

_____ et al. Geochemical distribution and bioavailability of heavy metals and oxalate in street sediments from Rio de Janeiro, Brazil: a preliminary investigation. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 27, p. 429–441, 2005.

MCLAUGHLIN, S.B.; SHORTLE, W.C.; SMITH, K.T. Dendroecological applications in air pollution and environmental chemistry: research needs. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1-2, p. 133-157, 2002.

MEDEIROS, J.G.S. et al. Tree-ring characterization of *Araucaria columnaris* Hook and its applicability as a lead indicator in environmental monitoring. **Dendrochronologia**, v. 26, p. 165–171, 2008.

MELCHER, P.J. et al. Measurements of stem xylem hydraulic conductivity in the laboratory and field. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 3, p. 685–694, 2012.

MELFI, A.J.; SOUBIÈS, F.; TOLEDO GROKKE, M.C. Comportamento do nióbio nas alterações das rochas do complexo alcalino-carbonatítico de Tapira, Minas Gerais. In: **SBGq, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA**, 3, São Paulo, Anais, I: 85-87p., 1991.

MELO, G.M.P.; MELO, V.P.; MELO, W.J. **Metais pesados no ambiente decorrente da aplicação de lodo de esgoto em solo agrícola**. Apresentado na 3ª reunião do GT Lodo de Esgoto, 2004. Disponível em: http://www.mma.gov.br/port/conama/reunalt.cfm?cod_reuniao=490. Acessado em: 03 de abril de 2016.

MELO-JÚNIOR, J. C. F.; CECCANTINI, G.; BONA, C. Anatomia ecológica do lenho de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae) distribuída em diferentes condições edáficas do cerrado sul-brasileiro. **Iheringia Série Botânica.**, vol. 66, no. 2, pp. 189–200, 2011.

MENDES, F. H., Densidade básica e velocidade de propagação de ondas tomográficas em árvores: uma relação interessante. **Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Florestal.** Piracicaba: SP. 19p, 2013.

MÉNDEZ-ALONZO, R. et al. Coordinated evolution of leaf and stem economics in tropical dry forest trees, **Ecology**, vol. 93, no. 11, pp. 2397–2406, 2012.

MENDIVELSO, H. A., CAMARERO, J. J., ROYO OBREGÓN, O., GUTIÉRREZ, E., and TOLEDO, M., Differential Growth Responses to Water Balance of Coexisting Deciduous Tree Species Are Linked to Wood Density in a Bolivian Tropical Dry Forest. **PLoS One**, vol. 8, no. 10, 2013.

MARENGO, J. A., **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI / José A. Marengo– Brasília: MMA, 2007. 2a edição.**

METCALFE, C.R., CHALK, L. **Anatomy of the dicotyledons leaves, stem, and wood in relation to taxonomy with notes on economic uses** 1950. First edition 1950. Reprinted lithographically in Great Britain at the University Press, Oxford by Charles Batey, printer to the University from corrected sheets of first edition. 1957.

MIHALJEVIČ, M., et al. Trace Elements and the Lead Isotopic Record in Marula (*Sclerocarya birrea*) Tree Rings and Soils Near the Tsumeb Smelter, Namibia, **Water, Air,; Soil Pollution**, vol. 226, no. 6, p. 177, 2015.

MINER, B. G. et al. Ecological consequences of phenotypic plasticity, **Trends in Ecology; Evolution**, vol. 20, no. 12, pp. 685–692, 2005.

MIRZAEI, P.A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study Urban Heat Island Abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 45, p. 2192-2201, 2010.

MMA/IBAMA. **Plano de Manejo da Reserva Biológica do Tingua, RJ.** 2006. [online] Disponível na internet via http://www.institutoterra.org.br/uploads/documentos/plano_de_manejo_rebio_tingua.pdf. Arquivo capturado em 11/12/2010

MORAES, R. M. et al. Leaf injury and gas exchange in *Ipomoea nil* cv. Scarlett O’Hara, an ozone bioindicator species, in São Paulo, Brazil, **Atmospheric Pollution Research**, vol. 5, no. 1, pp. 8–12, 2014.

_____ et al. Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil. **Environment International**, v. 28, p. 367–374, 2002.

MOREIRA, S. et al. Growth tree rings as bioindicator of environmental pollution Employing sr-txrf. Brazilian Synchrotron Light Laboratory. **LNLS Activity Report**, p. 1-2. 2006.

MORI, A.; NIINEMETS, L. Plant responses to heterogeneous environments: Scaling from shoot modules and whole-plant functions to ecosystem processes. **Ecological Research**, vol. 25, no. 4, pp. 691–692, 2010.

NAGAJYOTI, P. C., LEE, K. D.; SREEKANTH, T. V. M., Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: A review. **Environmental Chemistry Letters**, vol. 8, no. 3, pp. 199–216, 2010.

NASCIMENTO-FILHO, V.F. Técnicas analíticas nucleares de fluorescência de raiosX por dispersão de energia (ed-xrf) e por reflexão total (TXRF). **Departamento de Ciências Exatas/ESALQ, Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA**. 1999

NEGHAH, M. et al. The Effect of Exposure to Low Levels of Chlorine Gas on the Pulmonary Function and Symptoms in a Chloralkali Unit. **Journal of Research in Health Sciences**, v.16(X): XXX-XXX. 2016

NICOTRA, A. B., et al. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. **Trends in Plant Science**, vol. 15, no. 12, pp. 684–692, 2010.

NIU, S. et al. Plant growth and mortality under climatic extremes: An overview. **Environmental and Experimental Botany**, vol. 98, pp. 13–19, 2014.

NOOR, M. J., et al. Estimation of Anticipated Performance Index and Air Pollution Tolerance Index and of vegetation around the marble industrial areas of Potwar region: bioindicators of plant pollution response. **Environmental Geochemistry and Health**, vol. 37, no. 3, pp. 441–455, 2015.

NOVAK, M., et al. Radial distribution of lead and lead isotopes in stem wood of Norway spruce: A reliable archive of pollution trends in Central Europe, **Geochimica et Cosmochimica Acta**, vol. 74, no. 15, pp. 4207–4218, 2010.

NUHOGLU, Y., A new approach to air pollution determination using annual rings: Dendrochemical elemental analysis of annual rings by SEM-EDS, **Polish Journal of Environmental Studies**, vol. 15, no. 1, pp. 111–119, 2006.

O'BRIEN TP, FEDER M, MCCULLY ME Polyehromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. **Protoplasma**, v. 59, p. 367–373, 1964.

O'BRIEN, A. M., ETTINGER, A. K., HILLERISLAMBERS, J. Conifer growth and reproduction in urban forest fragments: Predictors of future responses to global change? **Urban Ecosystems**, vol. 15, no. 4, pp. 879–891, 2012.

OLIVEIRA, R. R. de et al. Ciclagem de metais pesados na serapilheira de uma floresta urbana no Rio de Janeiro. **Floresta e Ambiente**, v.1, p. 50–56, 2003.

OLIVEIRA, V. **A qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: a saúde pública como elo central de articulação e suas implicações na gestão integrada saúde e ambiente.**, 2008. 201 f. Tese (Doutorado em Ciências)– Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, J.M.; ROIG, F.A.; PILLAR, V.D.P. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlandsae. **Austral Ecology**, p. 1-15,2009.

OSTRO, B. Outdoor air pollution: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. Geneva, **World Health Organization**, 2004

PATRICK, G. J.; FARMER, J. G. A stable lead isotopic investigation of the use of sycamore tree rings as a historical biomonitor of environmental lead contamination. **Science of the Total Environment**, vol. 362, no. 1–3, pp. 278–291, 2006.

PAZ-ALBERTO, A. M.; SIGUA, G.C. Phytoremediation: A Green Technology to Remove Environmental Pollutants. **American Journal of Climate Change**, vol. 02, no. 01, pp. 71–86, 2013.

PEAKALL, D.; BURGER, J. Methodologies for assessing exposure to metals: Speciation, bioavailability of metals, and ecological host factors.**Ecotoxicology and Environmental Safety**, vol. 56, no. 1, pp. 110–121, 2003.

PEREIRA, P.H.F. **Estudo de intercalação de surfatantes na matriz fosfato de nióbio**. 2006, 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia de Lorena. São Paulo. 2006.

PEREIRA, G. R. et al. Elemental distribution images in prostate samples by X-ray fluorescence microtomography, **Applied Radiation and Isotopes**, vol. 70, no. 7, pp. 1379–1383, 2012.

PERNÍA, E.; MELANDRI, J.L. Wood anatomy of the tribe *Caesalpinieae* (Leguminosae, Caesalpinioideae) in Venezuela. **IAWA Journal**, v. 27, n. 1, p. 99–114, 2006.

PIERANGELI, M.A.P.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N.; ANDERSON, S.J.; LIMA J.M. Adsorção e desorção de cádmio, cobre e chumbo por amostras de latossolos pré-tratadas com fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:377-384, 2004

PIGLIUCCI, M., Evolution of phenotypic plasticity: Where are we going now? **Trends in Ecology; Evolution**, vol. 20, no. 9, pp. 481–486, 2005.

POORTER, L., The relationships of wood-, gas- and water fractions of tree stems to performance and life history variation in tropical trees, **Annals of Botany**, vol. 102, no. 3, pp. 367–375, 2008.

POURRUT, M. et al. Molecular Mechanisms Involved in Lead Uptake, Toxicityand Detoxification in Higher PlantsB. In: Gupta, D. K., Corpas, F. J., and Palma, J. M., **Heavy metal stress in plants**. 121-148 p., 2013.

PRAMOD, S., PATEL, P. B., AND RAO, K. S. Influence of exogenous ethylene on cambial activity, xylogenesis and ray initiation in young shoots of *Leucaena leucocephala* (lam.) de Wit. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, vol. 208, no. 10–12, pp. 549–555, 2013.

PRISLAN, P.; ČUFAR, K.; KOCH, G.; SCHMITT, U.; GRIČAR, J. Review of cellular and subcellular changes in the cambium. **IAWA Journal**, v. 34, p. 391-407, 2013.

PRITCHARD, S. G. et al. Review Elevated CO₂ and plant structure: a review, **Global Change Biology**, vol. 5, pp. 807–837, 1999.

QIAN, Y. et al. Heavy pollution suppresses light rain in China: Observations and modeling. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, vol. 114, no. 15, pp. 1–16, 2009.

RAINHO, C. R., et al. Prediction of health risk due to polycyclic aromatic hydrocarbons present in urban air in Rio de Janeiro, Brazil. **Genetics and Molecular Research**, vol. 12, no. 3, pp. 3992–4002, 2013.

_____ et al. Genotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-derived in respirable airborne particulate matter collected from urban areas of Rio de Janeiro (Brazil). **BioMed Research International**, vol. 2013. 2013.

RAJPUT KS, RAO KS. Cambial periodicity and formation of wood in *Ailanthus excelsa* growing under the influence of combined air pollutants. **Phyton**, v. 45, n. 1, p. 51–64, 2005.

RAJPUT, K.S.; RAO, K.S.; KIM, Y.S. Cambial activity and wood anatomy in *Prosopis spicigera* (Mimosaceae) affected by combined air pollutants. **IAWA Journal**, Leiden, v. 29, n. 2, p. 209-219, 2008.

RAO K.S.; RAJPUT K.S. Seasonal behaviour of vascular cambium in teak (*Tectona grandis*) growing in moist deciduous and dry deciduous forests. **IAWA Journal**, Leiden, v. 20, p.85-93, 1999.

RAO KS, RAJPUT KS, SRINIVAS T. Seasonal cambial anatomy and development of xylem in *Dalbergia sissoo* growing under the influence of combined air pollutants. **International Journal of Sustainable Future for Human Security**, v. 18, n. 1, p. 73–88. 2004 doi:10.1300/J091v18n01_05

RASKIN, I. et al. Bioconcentration of heavy metals by plants. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 5, p. 285-290, 1994.

REICH, P.B.; BORCHERT. B. Water Stress and Tree Phenology in a Tropical Dry Forest in the Lowlands of Costa Rica. **Journal of Ecology**, Londres, v. 72, n. 1, p. 61-74, 1984.

REIS, A. R. S. et al. Anatomia do xilema secundário de sete espécies do gênero *Tachigali* Aubl. (Fabaceae), disponíveis na Xiloteca Walter A. Egler, do Museu Paraense Emílio Goeldi, Pará, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, vol. 6, no. 3, pp. 319–333, 2011.

RIBEIRO, C. F., E BARROS, M. L. R. C. Variação intraespecífica do lenho de *Pseudopiptadenia contorta* (DC) G. P. Lewis e M. P. Lima (Leguminosae - Mimosoidae) ocorrentes em dois remanescentes de Mata Atlântica **Acta Botanica Brasilica**, vol. 20, no. 4, pp. 839–844, 2006.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation, **Biological Conservation.**, vol. 142, no. 6, pp. 1141–1153, 2009.

RIDDER, M. de et al. Dendrochronological monitoring of air pollution in the Ghent canal area (Belgium), **Science**, vol. 5, pp. 188 – 195, 2007.

RIEDEL, T. P. et al. Chlorine activation within urban or power plant plumes: Vertically resolved ClNO₂ and Cl₂ measurements from a tall tower in a polluted continental setting. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, vol. 118, no. 15, pp. 8702–8715, 2013.

ROMERO-FREIRE, A.; SIERRA ARAGÓN, M.; MARTÍNEZ GARZÓN, J.F.; MARTÍN PEINADO, F.J. Is soil basal respiration a good indicator of soil pollution? **Geoderma**, vol. 263, pp. 132–139, 2016.

ROSENFELD, D. Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. **Science**, v. 287, p. 1793. 2000.

SÁ, D., et al. Estrutura e grupos ecológicos de um fragmento de floresta estacional semidecidual no Triângulo Mineiro, Brasil. **Caminhos de geografia**, vol. 13, no. 44, pp. 89–101, 2012.

SAHIN, D., Tracing Footprints of Environmental Events in Tree Ring Chemistry using Neutron Activation Analysis. **Tese de Doutorado**. Nuclear Engineering, The Pennsylvania State University The Graduate School The Department of Mechanical and Nuclear Engineering. 2012.

SALAZAR, M. J.; PIGNATA, M. L. Lead accumulation in plants grown in polluted soils. Screening of native species for phytoremediation. **Journal of Geochemical Exploration.**, vol. 137, pp. 29–36, 2014.

SALISBURY FB; ROSS CW. **Fisiologia das plantas**, 4th edn. Cengage Learning, São Paulo. 2012

SALT, D. From Meals to Metals and Back. Center for Plant Environmental Stress Physiology, Purdue University. **In Plant Physiology**, disponível em <http://5e.plantphys.net/article.php?ch=e&id=84>, acessado em 26 de fevereiro de 2014.

SÁNCHEZ-SALGUERO, R. et al. Disentangling the effects of competition and climate on individual tree growth: A retrospective and dynamic approach in Scots pine. **Forest Ecology and Management** v. 358, p. 12–25, 2015.

SANTIAGO, L. S. et al. Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in Panamanian forest canopy trees. **Oecologia**, vol. 140, no. 4, pp. 543–550, 2004.

SANTOS, C. P. **Anatomia do lenho de *Tibouchina pulchra* Cogn. e *Miconia cinnamomifolia* (DC.) Naud (Melastomataceae) como registro temporal da poluição atmosférica proveniente do complexo industrial de Cubatão**. 2005. 117p. Dissertação

(Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente)- Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2005.

SANTOS CHV, FISCH STV. Phenology of urban tree species in the city of Taubaté, São Paulo State, Brazil. **REVSBAU**, Piracicaba – SP. v. 8, n. 3, p. 01–16, 2013. http://www.revsbau.esalq.usp.br/artigos_cientificos/artigo66sn-publicacao_ingles.pdf

SANTOS, W.H. **Estudo sobre o uso do pentacloreto de nióbio em reações multicomponentes para a síntese de derivados de 4-aryl-3,4- di-hidrocomarinas**. 2013. 159 f., Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais)– Universidade Estadual Paulista.Faculdade de Ciências, Bauru, São Paulo, 2013.

SANTOS, T.O. et al. Influence of urbanization on land surface temperature in Recife city. **Revista Engenharia Agrícola**, v.33, n.6, p.1234-1244, 2013.

SANTOS, E.S. et al. Espectrometria de fluorescência de raios-x na determinação de espécies químicas enciclopédia biosfera, **Centro Científico Conhecer** - Goiânia, v.9, n.17, p. 1-20. 2013

SANTOS, R.S. **Análise multielementar em folhas de *Nerium oleander* L. usando fluorescência de raios X por dispersão em energia**.2014. 139 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto de Física Armando Dias Tavares. 2014.

SARAIVA, M.A.M. **Metais Pesados em Amostras de Horizontes Superficiais de Solos como Indicadores Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Taquarizinho, – Campo Grande/MS**, 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Mato Grosso do Sul, 2007.

SASS, J.E. Botanical Microtechnique. 2 ed. Ames, **The Iowa State College Press**, 391 p. 1951.

SASS, J.E. Elements of Botanical Microtechnique. Vol. II. **McGraw-Hill Book Company**, New York, 222 p., 1958.

SAVIDGE, R., Intrinsic regulation of cambial growth. **Journal of Plant Growth Regulation**, vol. 20, no. 1, pp. 52–77, 2001.

SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, vol. 24, no. 9, pp. 2319–2331, 2015.

SCARANO, F. R., et al. Features of CAM-cycling expressed in the dry season by terrestrial and epiphytic plants of *Clusia arrudae* Planchon; Triana in two rupestrian savannas of southeastern Brazil in comparison to the C3-species *Eremanthus glomerulatus* Less. **Trees**, 2015. doi 10.1007/s00468-015-1331-z

SCHMITT, U.; GRÜNWARD, C., ECKSTEIN D. Xylem Structure In Pine Trees Grown Near The Chernobyl Nuclear Power Plant / Ukraine. **IAWA Journal**, v.21, n. 4, p. 379–387, 2000.

SCHOLZ, A., STEIN, A., CHOAT, B., JANSEN, S. How drought and deciduousness shape xylem plasticity in three Costa Rican woody plant species. **IAWA Journal**, vol. 35, no. 4, pp. 337–355, 2014.

SCHÖNGART, J.; PIEDADE, M.T.F.; WITTMANN, F.; JUNK, W.J.; WORBES, M. Wood growth patterns of *Macaranga acaciifolia* (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black water and white-water floodplain forests. **Oecologia**, Berlin/Heidelberg, v. 145, n. 3, p. 454–61, 2005.

SCHÖNGART, J., GRIBEL, R., FERREIRA DA FONSECA-JUNIOR, S., HAUGAASEN, T., Age and Growth Patterns of Brazil Nut Trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil, **Biotropica**, vol. 47, no. 5, pp. 550–558, 2015.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Wood structure and environment**. Berlin: Springer, 2007. 279p.

SCHYMANSKI, S. J., RODERICK, M. L., SIVAPALAN, M. Using an optimality model to understand medium- and long-term responses of vegetation water use to elevated atmospheric CO₂ concentrations. **AoB Plants**, vol. 7, no. 0, p. plv060–, 2015.

SHAFIQ, M; IQBAL, M.Z. Effects of automobile pollution on the phenology and periodicity of some roadside plants. **Pakistan Journal of Botany**, 35(5): 931-938, 2003

SHIMAMOTO, C.Y., BOTOSSO, P.C., MARQUES, M.C.M. How much carbon is sequestered during the restoration of tropical forests? Estimates from treespecies in the Brazilian Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, v. 329, p. 1–9, 2014.

SILVA, L. C. R.; ANAND, M. Probing for the influence of atmospheric CO₂ and climate change on forest ecosystems across biomes. **Global Ecology and Biogeography**, vol. 22, no. 1, pp. 83–92, 2013.

SILVA, L. I. D., et al. Traffic and catalytic converter - Related atmospheric contamination in the metropolitan region of the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Chemosphere**, vol. 71, no. 4, pp. 677–684, 2008.

SILVA, E.F.R. et al. Anatomia sistemática do lenho de espécies de Fabaceae. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer** - Goiânia, v.10, n.19; p. 1-28, 2014.

SILVA L.C.R., ANAND M., LEITHEAD M.D. 2010. Recent Widespread Tree Growth Decline Despite Increasing Atmospheric CO₂. **PLoS ONE**, 5(7): e11543. doi:10.1371/journal.pone.0011543

SILVA, L.C. DA, AZEVEDO, A.A.; SILVA, E.A.M DA S.; OLIVA, M.A. 2000. Flúor em chuva simulada: sintomatologia e efeitos sobre a estrutura foliar e o crescimento de plantas arbóreas. **Revista Brasileira de Botânica** São Paulo, V.23, n.4, p.385-393.

SISINNO, C. L. S.; MOREIRA, J. C. Avaliação da contaminação e poluição ambiental na área de influência do aterrocontrolado do Morro do Céu, Niterói, Brasil. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 12, n. 4, p. 515-523, 1996.

SLEEN, P., et al. No growth stimulation of tropical trees by 150 years of CO₂ fertilization but water-use efficiency increased. **Nature Geoscience**, v. 8, n. January, pp. 24–28, 2014.

SMITH, K. T., An organismal view of dendrochronology. **Dendrochronologia**, vol. 26, no. 3, pp. 185–193, 2008.

SMITH, V.H.; TILMAN, G.D.; NEKOLA, J.C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. **Environmental Pollution**, v. 100, p. 179-196, 1999.

SOUZA, J.C. **Reserva Biológica do Tinguá: Discutindo o processo de co-gestão a partir de uma iniciativa local**. 2003, 234p. Dissertação (Mestrado em Ciências Estatísticas) - ENCE – IBGE, Rio de Janeiro. 2003.

SOUZA, B. T. et al. Occurrence of annual growth rings in *Rhizophora mangle* in a region with low climate seasonality. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, pp. 1–9, 2016. <http://dx.doi.org/DOI>

SPIECKER, H. 2002. Tree rings and forest management in Europe. **Dendrochronologia**; 20/1-2: 191-202.

STANKOVIC, S.; KALABA, P.; STANKOVIC, A.R. Biota as toxic metal indicators. **Environmental Chemistry Letters**, v. 12, p. 63–84, 2014.

STEINLE, S.; REIS, S.; SABEL, C.E. Quantifying human exposure to air pollution - Moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment. **Science of the Total Environment**, v. 443, p. 184-193, 2013.

STEINNES, E.; ALLENB, R.O.; PETERSEN, H.M.; RAMBAEK, J.P.; VARSKOGD, P. Evidence of large scale heavy-metal contamination of natural surface soils in Norway from long-range atmospheric transport. **The Science of the Total Environment** v. 205, p. 255-266, 1997

STOLTE, J. et al. Soil threats in Europe; EUR 27607 EN; doi:10.2788/488054 (print); doi:10.2788/828742 (online)

Sukumaran, D., Effect of Air Pollution on the Anatomy Some Tropical Plants. **Applied Ecology and Environmental Sciences**, vol. 2, no. 1, pp. 32–36, 2014.

SUTAN, S.E. Phenotypic plasticity for plant development, function and life history. **Dept of Biology**, Wesleyan University, Middletown, CT 06459-0170, USA. 2000 doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S1360-1385\(00\)01797-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1360-1385(00)01797-0);

SWAMY, B. G. L.; KRISHNAMURTHY, K. V. On the origin of vascular cambium in dicotyledonous stems. **Plant Science**, vol. 89, no. 1, pp. 1–6, 1980.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 4 ed. **Porto Alegre: Artmed**, 2013. 679 p.

TARSELLI, M. A. Subtle niobium. **Nature Chemistry**, v. 7, n. 2, p. 180–180, 2015.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Anatomical features of increment zones in different tree species in the state of São Paulo, Brazil. **Scientia Forestalis**, v.66, p. 46-55, 2004.

TOON, B.O. How pollution suppresses rain. **Science** 287(5459):1763–1765. 2000. doi:10.1126/science.287.5459.1763

TULIK, M. Cambial history of Scots pine trees (*Pinus sylvestris*) prior and after the Chernobyl accident as encoded in the xylem. **Environmental and Experimental Botany**, v. 46, n. 1, p. 1–10, 2001.

TYREE, M. T.; YANG, S. Hydraulic Conductivity Recovery versus Water Pressure in Xylem of *Acer saccharum*. **Plant Physiology**, v. 100, n. 2, p. 669–676, 1992.

VALLADARES, F. et al. Plastic phenotypic response to light of 16 congeneric shrubs from a Panamanian Rainforest. **Ecology**, vol. 81, no. 7, pp. 1925–1936, 2000.

_____; SANCHEZ-GOMEZ, D.; ZAVALA, M. A. Quantitative estimation of phenotypic plasticity: Bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications. **Journal of Ecology**, vol. 94, no. 6, pp. 1103–1116, 2006.

_____; GIALONI, E.; GÓMEZ, J. M. Ecological limits to phenotypic plasticity. **New Phytologist**, vol. 176, pp. 749–763, 2007.

_____. et al. Functional traits and phylogeny: What is the main ecological process determining species assemblage in roadside plant communities? **Journal of Vegetation Science**, vol. 19, no. 3, pp. 381–392, 2008.

VAN HOOFF, N.A.L.M. et al. Enhanced ATP-dependent copper efflux across the root cell plasma membrane in copper-tolerant *Silene vulgaris*. **Physiologia Plantarum**, v. 113, p. 225–232, 2001.

VASCONCELLOS, T. J., DA CUNHA, M., CALLADO, C. H. A comparative study of cambium histology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) under urban pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, pp. 1–14, 2016.

VELOSO, H.P.; RANGEL-FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991

VIEIRA-FILHO, M.S.; LEHMANN, C.; FORNARO, A. Influence of local sources and topography on air quality and Rainwater composition in Cubatao and São Paulo, Brazil. **Atmospheric Environment**, v.101, p. 200-208, 2015.

VIVES, A. et al. Monitoring of the environmental pollution by trace element analysis in tree-rings using synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence. **Spectrochimica Acta Part B**, Oxford, v.61p.1170–1174, 2006.

VIVES, A.E.S. et al. Species arboreal as a bioindicator of the environmental pollution: Analysis by SR-TXRF. **Nuclear Instruments and Methods in Physics**, Amsterdam, v.579,p.494–498, 2007.

VOESENEK, L. A. C. J. et al. Hormone Sensitivity and Plant Adaptations to Flooding. *Folia Geobotanica; Phytotaxonomica*, v. 31, n. 1, pp. 47-56, 1996.

WAGNER, F.H. et al. Climate seasonality limits carbon assimilation and storage in tropical forests. *Biogeosciences Discuss.*, 2016. doi:10.5194/bg-2015-619.

WAHLMANN, B.; BRAUN, E.; LEWARK, S. Radial increment in different tree heights in beech stands affected by air pollution. *IAWA Bulletin*, v.7, n. 4, 1986.

WANG, J.H.C.; TSAI, C.T.; CHIANG, C.F. Screening procedure for airborne pollutants emitted from a high-tech industrial complex in Taiwan. *Chemosphere*, v.139, p. 268–275. 2015.

WANI, B.A.; KHAN, A. Effect of cement dust pollution on the vascular cambium of *Juglans regia* (L.) *Journal of Ecology and the Natural Environment*, v. 2, n. 10, pp. 225-229, 2010.

WATMOUGH, S.A., HUTCHINSON, T.C., EVANS, R.D. Application of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry in dendrochemical analysis. *Environmental Science; Technology*, v. 31, p. 114-118. 1997.

WATMOUGH, S.A., HUTCHINSON, T.C., SAGER, E.P.S. Changes in tree ring chemistry in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) along an urban-rural gradient in southern Ontario. *Environmental Pollution*, v. 101, p. 381–390. 1998.

WATMOUGH, S.A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis. *Environmental Pollution*, v. 106, p. 391-403. 1999.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C. Historical changes in lead concentrations in tree rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England. *The Science of the Total Environment*, v.293, p.85–96. 2002.

WAY, D.A.; OREN, R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree Physiology*, v.30, p. 669–688. 2011. doi:10.1093/treephys/tpq01.

WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Chloride in Soils and its Uptake and Movement within the Plant: A Review. *Annals of Botany*, v. 88, p. 967-988, 2001. doi: 10.1006/anbo.2001.1540.

WIMMER, R. Wood anatomical features in tree-rings as indicators of environmental change. *Dendrochronologia*, v. 20, p. 21–36, 2002.

WORBES, M. The forest ecosystem of the floodplains. In: W.J. Junk (ed.), *The Central Amazon Floodplains. Ecology of a Pulsing System*. p. 223–266. Springer-Verlag, New York. 1997.

_____. How to measure growth dynamics in tropical trees – A review. *IAWA Journal*, v. 16, n. 4, p. 337-351, 1995.

WORBES, M. et al. Tree ring analysis reveals age structure, dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. **Forest Ecology and Management**, v. 173, p. 105-123, 2003.

WUANA, R.A.; OKIEIMEN F.E. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. **International Scholarly Research Network**. v. 2011, p. 20. 2011. doi:10.5402/2011/402647.

YADAV S.; SINGH, M.M.; KUMAR V. Effect of Air Pollutants in Biochemical Parameters of Selected Plant Species of Jhansi City (Uttar Pradesh). **International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences**, v. 6, n. 2, p. 168-173. 2013.

YAMAMOTO, F.; KOZLOWSKI, T.T. Effect of ethrel on growth and stem anatomy of *Pinus halepensis* seedlings. **IAWA Bulletin**, v. 8, n.1, 1987.

YAÑEZ-ESPINOZA, L.; TERRAZAS, T.; LOPEZ-MATA, L. Phenology and radial stem growth periodicity in evergreen subtropical rainforest trees. **IAWA Journal**, v. 31, n. 3, p. 293-307, 2010.

YAQUB, M. et al. Effects of Road Side Pollution on Vegetation—A Mini-Review. **Journal of Bio-Molecular Sciences**, v. 3, n. 3, p. 97-106. 2015.

YAZAKI K, MARUYAMA Y, MORI S, KOIKE T, FUNADA R. Effects of elevated carbon dioxide concentration on wood structure and formation in trees. **Plant responses to air pollution and global change**. 89-97. 2005.

ZAR, J.H. Biostatistical Analysis. **Prentice Hall**, New Jersey, 2010. 947 p.

ZEITOUNI, C.F. **Eficiência de espécies vegetais como fitoextratoras de cádmio, chumbo, cobre, níquel e zinco de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico**. 2003. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical)— Instituto Agrônômico / Pós-Graduação. Campinas. São Paulo. 2003.

ZIMMERMANN, M.H. Xylem structure and the ascent of sap. **Springer-Verlag**, Berlin, 1983.

ZUIDEMA, P.A.; BRIENEN, R.J.W.; SCHÖNGART, J. Tropical forest warming: looking backwards for more insights. **Trends in Ecology and Evolution**. p. 1–2. 2012 doi:10.1016/j.tree.2011.12.007

_____ et al. Tropical forests and global change: filling knowledge gaps. **Trends in Plant Science**, v. 18, n. 8, p. 413-9. 2013. doi: 10.1016/j.tplants.2013.05.006.

APÊNDICE A - Teste de Tukey

(Documento a parte)

APÊNDICE B - Primeiro artigo da tese publicado

Author's personal copy

Environ Sci Pollut Res
DOI 10.1007/s11356-015-6012-3



BIOMONITORING OF ATMOSPHERIC POLLUTION: POSSIBILITIES AND FUTURE CHALLENGES

A comparative study of cambium histology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) under urban pollution

Thais Jorge de Vasconcellos¹ · Maura Da Cunha^{1,2} · Cátia Henriques Callado^{1,3}

Received: 29 June 2015 / Accepted: 22 December 2015
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract Air pollution is considered to be one of the main causes of forest decline. The cambium is responsible for increase in tree girth, and its functioning is determined by environmental pressures. This study compared cambium histology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) in polluted and preserved sites in the Atlantic Rainforest domain. Samples were obtained during periods of cambial activity and dormancy and were processed and examined according to standard light microscopy techniques. In addition to differences typically observed in cambium during periods of activity and dormancy, the fusiform initials were shorter in trees of the polluted site. Furthermore, cambial rays were shorter, but larger, in the polluted site. It should be noted that all parameters related to

cambial rays showed significant differences between the study sites. This is the first report of the effects of pollution on cambial activity in a South American species. The results suggest a tolerance of *C. speciosa* to pollution and reveal this species to be an important biomarker for environmental monitoring studies.

Keywords Environmental change · Cambial activity · Phenotypic plasticity · Xylogenesis · Tropical forest · Wood production · Plant radial growth · Urban vegetation

Responsible editor: Philippe Garrigues

✉ Cátia Henriques Callado
ccallado@uerj.br, catiacallado@terra.com.br

Thais Jorge de Vasconcellos
thaisjv@yahoo.com.br

Maura Da Cunha
mauracnf@gmail.com

¹ Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Laboratório de Anatomia Vegetal, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524—PHLC, sala 224, 20550-013 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

² Centro de Biociências e Biotecnologia, Laboratório de Biologia Celular e Tecidual, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Av. Alberto Lamego, 2000—Parque Califórnia, 28013-602 Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil

³ Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Laboratório de Anatomia Vegetal, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524—PHLC, sala 224, 20550-013 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

Introduction

The urban environment has a complex composition of atmospheric pollutants. The exact composition of the atmosphere varies from city to city and over time and depends on the sources of emission (Honour et al. 2009). Until the mid-1980s, urban air pollution was attributed essentially to industrial emissions. In subsequent decades, the expansion of urban centers led to rapid growth in the number of vehicles being used, which was responsible for a significant increase in degradation of air quality (Singh et al. 2003; Vives et al. 2007; Medeiros et al. 2008). Urban air quality is considered one of the most significant environmental problems (Smith et al. 1999; Rosenfeld 2000; Ostro 2004; Kampa and Castanas 2008).

The changes most frequently described in plants due to the influence of environmental pollution are related to physiological responses. Studies in Brazil have shown changes in the production of particular metabolites, in photosynthetic rates, and in the time of opening and closing of stomata (Alves et al. 1990; Inoue and Reissmann 1993; Moraes et al. 2002; Bujokas 2009). These changes have been cited as the main causes of structural modifications observed in leaves (Silva et

Published online: 07 January 2016

Springer

al. 2000; Alves et al. 2001, 2008), roots (Mazzoni-Viveiros and Trufem 2004), and stems and particularly in woody structure (Alves 1995; Santos 2005).

Studies of the cambium of plants exposed to pollution have shown that pollutants are able to influence the structure, activity, xylogenesis, and, consequently, the production and quality of wood (Wahlmann et al. 1986; Kurczynska et al. 1997; Tulik 2001; Rao et al. 2004; Khan et al. 2007; Gupta and Iqbal 2005; Rajput and Rao 2005; Rajput et al. 2008; Beck 2009; Iqbal et al. 2010a; Iqbal et al. 2010b; Wani and Khan 2010; Sukumaran 2014). Despite the importance of histological studies of the cambium for understanding wood structure and ecological responses of plants, such studies on tropical species growing in polluted environments are still scarce, which is even more significant given the high biodiversity of this region (Khan et al. 2007; Wani and Khan 2010).

Investigations on cambial activity and xylogenesis in South American species have shown that the cambium is controlled by abiotic and biotic factors. Among these factors, some of the most significant are temperature, drought, flooding, photoperiod, phenology, and endogenous rhythms (Aljaro et al. 1972; Avila et al. 1975; Silva et al. 1991; Dünisch et al. 2003; Marcati et al. 2006; Marcati et al. 2008; Bräuning et al. 2009; Volland-Voigt et al. 2011; Giantomasi et al. 2012; Costa et al. 2013). In general, these abiotic and biotic factors are seasonal and are related to favorable and unfavorable conditions for tree growth. Although the tropics do not experience well-defined climatic seasons such as temperate zones do, studies have shown a relationship between increase in rainfall and temperature and the period of cambial activity during spring and cambial dormancy period during winter (Costa et al. 2013; Callado et al. 2013; Callado et al. 2014; Brandes et al. 2015).

In this context, this study aimed to evaluate the plasticity of cambial histology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) in order to answer the following questions: (1) Are there any differences in cambium histology of plants grown in preserved versus polluted sites? (2) If so, do these differences vary among favorable and unfavorable periods for radial growth? and (3) Is it possible to relate these differences to those described in the literature as indicators of stress tolerance?

Material and methods

Study sites

The study was performed at two sites of the Atlantic Rainforest domain in Rio de Janeiro State, Brazil (Fig. 1). The polluted site is located in Fundação Oswaldo Cruz (22° 52,335' S 043° 14, 704' W), an area under strong anthropogenic pressures located on Avenida Brasil (Brazil Avenue), the main urban thoroughfare of the city of Rio de Janeiro. The area possesses airborne particulate matter of aerodynamic diameter of less than 2.5 μm

and polycyclic aromatic hydrocarbons including phenanthrene, fluoranthene, pyrene, benzo(a)anthracene, chrysene, and benzo(a)pyrene, that latter two having been confirmed to be of high cytotoxicity (Rainho et al. 2013a; Rainho et al. 2013b). The preserved site is the Reserva Biológica do Tinguá, in the city of Nova Iguaçu (22° 28'–22° 39' S and 43° 13'–43° 34' W), one of the last well-preserved remnants of the Brazilian Atlantic Rainforest (Braz et al. 2004).

Precipitation and temperature patterns over the last 30 years were constructed for both sites from data of the company SOMAR Meteorologia. The total mean annual rainfall is 1173 mm in the polluted site and 1551 mm in the preserved site (Fig. 2a). The annual mean temperature is 24.1 °C at the polluted site and 23.4 °C at the preserved site; the polluted site can be up to 3 °C warmer during the colder months. Values of water deficit and water excess (water balance) were calculated according to estimates of evapotranspiration using the Thornthwaite method and following the recommendations of Pereira et al. (1997) (Fig. 2a).

Botanical material

C. speciosa (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae), commonly called the silk floss tree, is an arboreous species of great importance in the recovery of degraded areas (Carvalho 2003). The trees often reach up to 30 m in height and have many spines on the trunk. It occurs in ombrophyllus and semideciduous forests in Argentina, Bolivia, Brazil, Peru, and Paraguay (Gibbs and Semir 2003). Due to its rapid growth, the species has been frequently planted in numerous regions outside their natural range. The wood has distinct growth rings marked by marginal parenchyma bands, thick-walled and radially flattened latewood versus thin-walled earlywood fibers, and distended rays in the limit of the consecutive growth rings (Boninsegna et al. 1989; Tomazello-Filho et al. 2004). We selected *C. speciosa* for this study because individuals with similar trunk diameters at breast height (DBH diameter measured at a height of 1.30 m above the ground) could be found at both sites. Despite the high level of atmospheric pollution documented at the polluted site (Rainho et al. 2013a; Rainho et al. 2013b), the trees selected for the study exhibited no damage to their leaves or stems.

We selected ten straight-boled adult trees without bifurcations or apparent deformities from each study site. The study trees at the polluted site had an average DBH of 45.6 cm (±6.9) and height of 15.6 m (±1.6), and those at the preserved site had an average DBH of 46.3 cm (±8.9) and height of 20.5 m (±2.5).

Leaf phenological analysis

Phenological behavior of the leaves was monitored monthly from July to October 2012 in both study sites. The total percentages of leaves present on the tree canopy in the leaf

Fig. 1 Map showing the location of study sites in Rio de Janeiro State. The *polluted site* is located in the city of Rio de Janeiro, and the *preserved site* in the city of Nova Iguaçu



phenophases of flushing, senescence, and abscission were estimated (Bencke and Morellato 2002; Costa et al. 2013).

Cambial analysis

Stem samples containing recently formed cambium, xylem, and phloem were collected in a non-destructive manner using a Pressler probe at DBH. Samples were collected in the fourth week of August and October 2012. These months were selected based on previous studies in the preserved area, which indicated these months to correspond to unfavorable and favorable conditions, respectively, for radial growth in relation to temperature, precipitation, and photoperiod (Callado et al. 2013, 2014; Costa et al. 2013). Samples were fixed in a solution of 2.5 % glutaraldehyde, 4.0 % formaldehyde, and 0.05 M sodium cacodylate buffer at pH 7.2 (Da Cunha et al. 2000), dehydrated in an ascending alcohol series (Johansen 1940), and embedded in Histo-resin® (Feder and O'Brien 1968). The samples were sectioned with a rotary microtome at a thickness of 2–5 μm along tangential longitudinal and transversal planes. Histological sections were stained with 0.05 % toluidine blue O (O'Brien et al. 1964) and observed

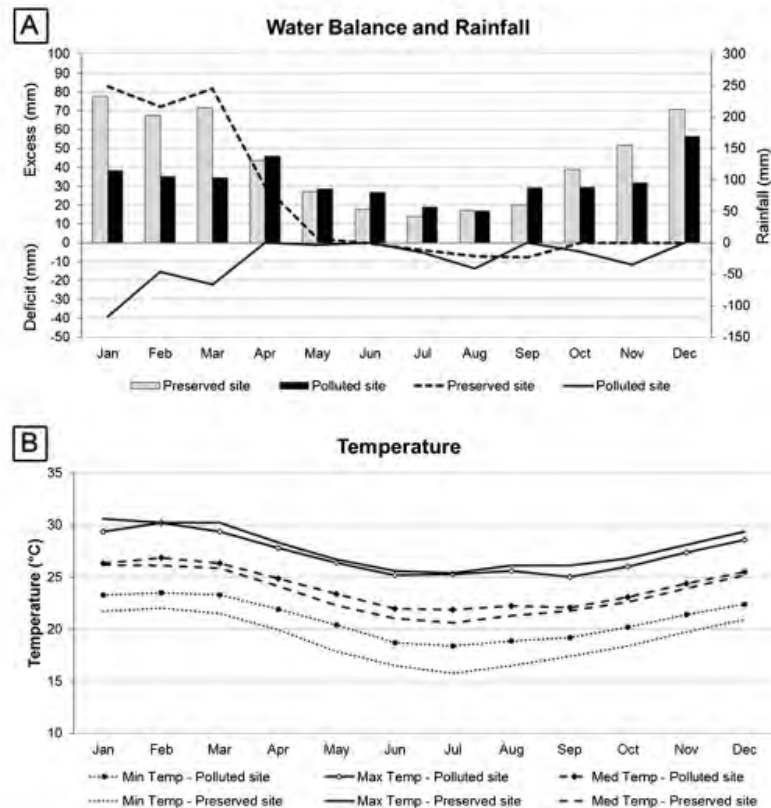
under light microscopy. Analysis was performed using an Olympus BX 41 light microscope, and images were taken by a Q Color R3 video camera.

Measurements were performed using Image-Pro Express 6.0 software. For the transverse sections, we analyzed 15 random layers of cells in the cambial zone where we measured the width of cambial zone in micrometers and in number of cells, radial diameter of a single fusiform initial cell, and width of the differentiating xylem layer (Table 1). For the tangential longitudinal sections, we measured in micrometers the length, tangential diameter, and tapering ends of 15 fusiform initials cells (Table 1) and the length and the width, both in micrometers and in number of cells, of 15 cambial rays, which consist of future parenchyma rays (Table 1).

Statistical analysis and index of phenotypic plasticity

Statistical analyses were conducted with STATISTICA 7 Software. Shapiro-Wilk W' and Levene's tests were used to test normality and homogeneity of variances, respectively (Zar 2010). Factorial ANOVA was used to compare the

Fig. 2 Water balance and mean monthly precipitation (a) and temperature (b) in polluted and preserved study sites



measured characteristics during cambial activity and dormancy in the polluted and preserved sites (Zar 2010).

The index of phenotypic plasticity (PI_i) was calculated for each anatomical character as indicated by Valladares et al. (2006). We calculated the index for each growth period and for the two growth periods together. In this study, anatomical characters with indexes of greater than 0.7 were considered highly plastic.

Results

The deciduous leaf pattern of *C. speciosa* was observed in the two study sites. In August, the trees from both sites lacked leaves or had only senescent leaves. In the preserved area, eight trees were completely leafless and two had only 10 % of senescent leaves. In the polluted area, four trees were completely leafless, three had less than 30 % of senescent leaves, and three had 60 % of senescent leaves only. In

October, all trees had fully adult leaves, except one tree in the preserved site, which had 80 % of young leaves.

In the cambium at both sites, the fusiform initials were storied and the ray initials were of different sizes and organized in different layers. Also in both sites, the cambial histology corresponded to a dormancy period in August and an activity period in October. In the period of activity, the cambial zone was wider and had a greater number of cellular layers and the secondary xylem adjacent to cambial zone had more layers in differentiation (Fig. 3a, c). We observed a tendency for the fusiform initials and cambial rays to be larger in during dormancy than during the period of activity (Figs. 3 and 4, Table 1). Furthermore, the sieve tube elements adjacent to the cambial zone had callose present only during dormancy (Fig. 4c, f).

At both sites during the cambial activity, and only in trees from the polluted site during cambial dormancy (Fig. 5), anticlinal divisions were observed in some cells derived from fusiform initials. These derivative cells were located near cambial rays. These divisions turned these cells of the axial system

Table 1 Quantitative parameters (mean and standard deviation) measured from samples of *Certhia speciosa* in regard to variables: growth period and studied site

| Measured parameters | Growth (all trees) | | | Site (all trees) | | | Polluted | | | Preserved | | |
|---|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--|-----------|----------|--|
| | Activity | Dormancy | | Polluted | Preserved | | Activity | Dormancy | | Activity | Dormancy | |
| Transversal plane | | | | | | | | | | | | |
| Number of cellular layers in the cambial zone (µm) | 6.913 ± 2.020 | 5.790 ± 1.788 | 6.393 ± 1.754 | 6.310 ± 2.205 | 6.873 ± 2.302 | 5.913 ± 0.830 | 6.953 ± 1.821 | 5.667 ± 2.455 | | | | |
| Width of cambial zone (µm) | 74.261 ± 19.898 | 61.423 ± 21.377 | 68.091 ± 20.065 | 67.593 ± 23.171 | 72.466 ± 23.741 | 63.717 ± 15.614 | 76.057 ± 16.280 | 59.129 ± 26.632 | | | | |
| Radial diameter of fusiform cells (µm) | 10.047 ± 1.728 | 9.667 ± 1.291 | 9.751 ± 1.609 | 9.963 ± 1.455 | 9.935 ± 1.643 | 9.566 ± 1.639 | 10.158 ± 1.891 | 9.767 ± 0.900 | | | | |
| Width of cellular layers of xylem in differentiation (µm) | 168.957 ± 108.379 | 137.908 ± 61.495 | 163.558 ± 111.648 | 143.307 ± 57.912 | 188.399 ± 140.138 | 138.717 ± 72.840 | 149.515 ± 65.715 | 137.098 ± 51.732 | | | | |
| Tangential plane | | | | | | | | | | | | |
| Length of fusiform initials (µm) | 400.890 ± 45.416 | 396.061 ± 47.812 | 381.386 ± 48.589 | 415.566 ± 37.216 | 390.735 ± 41.140 | 372.036 ± 55.654 | 411.046 ± 49.322 | 420.086 ± 21.117 | | | | |
| Tangential diameter of fusiform initials (µm) | 33.215 ± 4.188 | 32.093 ± 3.626 | 33.548 ± 4.190 | 31.759 ± 3.480 | 35.231 ± 3.226 | 31.865 ± 4.513 | 31.198 ± 4.194 | 32.320 ± 2.697 | | | | |
| Length of tapering of fusiform initials (µm) | 44.302 ± 5.443 | 40.782 ± 4.327 | 41.253 ± 3.942 | 43.832 ± 5.985 | 42.504 ± 2.366 | 40.001 ± 4.871 | 46.101 ± 7.053 | 41.563 ± 3.801 | | | | |
| Length of cambial rays (µm) | 591.312 ± 151.813 | 422.021 ± 143.655 | 492.430 ± 115.643 | 520.903 ± 212.056 | 521.567 ± 84.546 | 463.294 ± 138.557 | 661.058 ± 175.206 | 380.748 ± 143.467 | | | | |
| Length of groups of cambial rays in number of cells | 15.278 ± 4.045 | 10.443 ± 3.369 | 12.579 ± 2.654 | 13.142 ± 5.727 | 13.406 ± 1.518 | 11.752 ± 3.323 | 17.150 ± 4.944 | 9.134 ± 3.017 | | | | |
| Width of cambial rays (µm) | 97.781 ± 21.031 | 73.226 ± 26.948 | 98.232 ± 20.811 | 72.776 ± 26.677 | 105.300 ± 18.063 | 91.164 ± 21.842 | 90.263 ± 21.952 | 55.288 ± 18.465 | | | | |
| Width of groups of cambial rays in number of cells | 3.718 ± 0.801 | 3.190 ± 0.774 | 3.856 ± 0.696 | 3.052 ± 0.750 | 4.048 ± 0.652 | 3.664 ± 0.718 | 3.388 ± 0.829 | 2.716 ± 0.501 | | | | |

Fig. 3 Period of cambial activity at the study sites. Sections of the cambial zone of *Ceiba speciosa* from the preserved site (a and b), and polluted site (c and d). a and c show the cambial zone and adjacent tissues in transverse sections, b and d show fusiform and radial initials cells in tangential sections of the cambial zone. Phloem (P), xylem differentiation (dX), xylem (X), cambial zone (CZ), fusiform initials cells (straight arrow), and radial initials cells (dotted arrow). Scale bar = 100 μ m

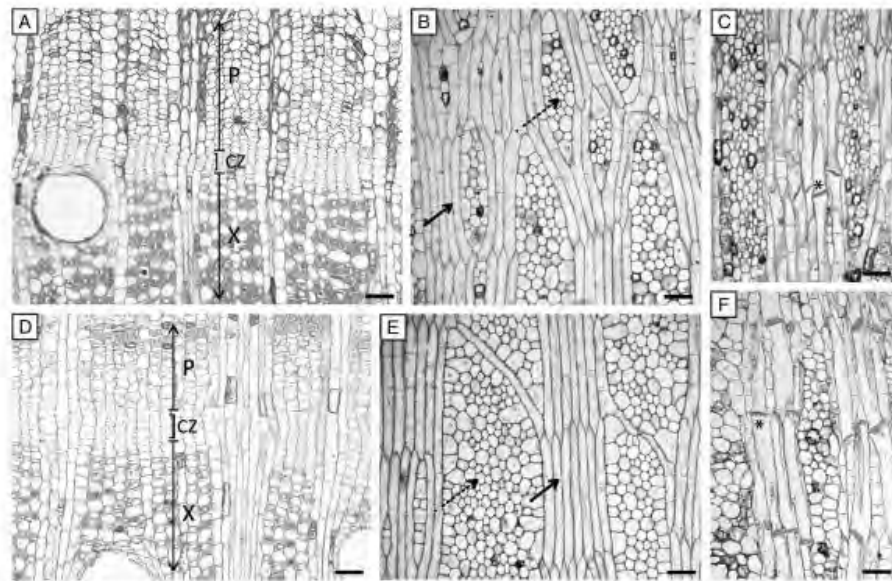
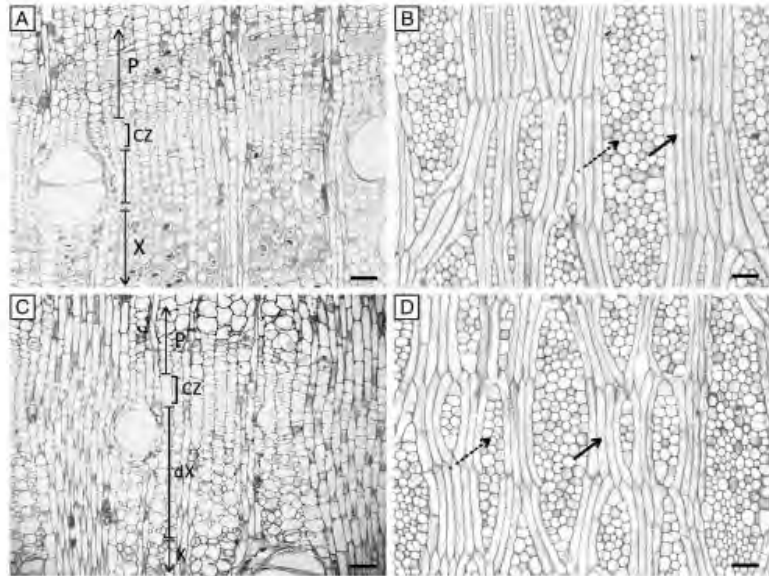
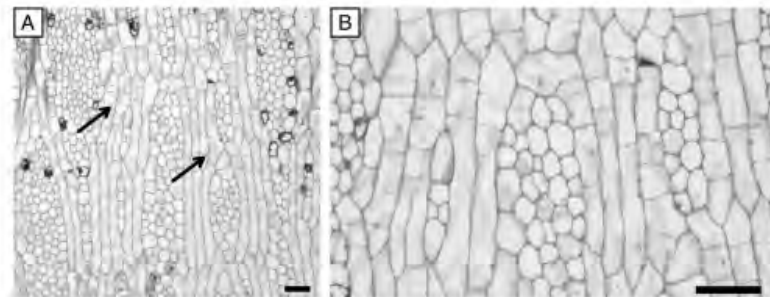


Fig. 4 Periods of dormancy at the study sites. a, b, and e correspond to sections of the cambial zone of *Ceiba speciosa* from the preserved site. d, e, and f correspond to sections of the cambial zone from the polluted site. a and d show the cambial zone and recently formed adjacent tissues in transverse sections. b and e show fusiform and radial initials cells in

tangential sections of the cambial zone. e and f show tangential sections of the phloem adjacent to the cambial zone, revealing the presence of callose in sieve plates of sieve elements. Phloem (P), xylem (X), cambial zone (CZ), fusiform initials cells (straight arrow), radial initials cells (dotted arrow), and dormancy callose (asterisk). Scale bar = 100 μ m

Fig. 5 Tangential longitudinal sections of the cambial zone of *Ceiba speciosa* from the polluted site during dormancy. **a** and **b** show anticlinal divisions in some cells derived from fusiform initials (arrows in **a**). **b** shows these divisions in detail. Scale bar = 100 μm



into new radial cells, as was observed in the region of phloem differentiation, for example (Fig. 5).

We performed a combined ANOVA of the variables that affected the measured parameters: growth period (cambial activity and dormancy) and study site (polluted and preserved). The length of the tapering of fusiform initials cells (Fig. 7g) and the length of the cambial rays (Fig. 7j, m) were significantly different only between growth period. In contrast, the length of fusiform initial cells (Fig. 7b) was significantly different only between study sites. The width of cambial rays was significantly different between growth periods and study sites (Fig. 7j–u and Table 2), with them being significantly larger during the activity period (Fig. 7p, s; Table 2) and at the polluted site (Figs. 7q, t; Table 2).

The most plastic parameters of cambium histology were the width of the cambial zone and of differentiating xylem, both in micrometers and in number of cells, and the length and width of cambial rays in micrometers (Table 3). The plasticity of these anatomical parameters differed between activity and dormancy periods and between polluted and preserved sites.

The highest phenotypic plasticity indexes, especially for those related to cambial rays, were observed during cambial dormancy.

The analysis of interaction between growth period and sites revealed that seasonal differences were different in the two study sites (Figs. 6 and 7 and Table 2). The cambium of *C. speciosa* showed histological parameters that differed both in between study sites (polluted and preserved) and between growth periods (active and dormant). During the period of activity, the tangential diameter of fusiform initials was greater in the polluted site, while this parameter was not significantly different during the dormancy period (Fig. 7f and Table 2). During dormancy, the cambial rays showed greater length at the polluted site; however, during the active period, the cambial rays showed greater length at the preserved site (Fig. 7l and Table 2). These results also revealed that at the polluted site, the cambial rays had similar lengths in both growth periods. On the other hand, in the preserved site, the cambial rays showed significant differences in length during periods of activity and dormancy (Fig. 7l and Table 2).

Table 2 ANOVA test (F) for the measured parameters from samples of *Ceiba speciosa* in regard to variables: growth period and studied site

| Measured parameters | Growth (all trees) | | Site (all trees) | | Growth \times Site | | |
|---------------------|--|---------|------------------|---------|----------------------|--------|-----------|
| | F ratio | P | F ratio | P | F ratio | P | |
| Transversal plane | Number of cell layers in the cambial zone (μm) | 3.2930 | 0.077915 | 0.0181 | 0.893663 | 0.0696 | 0.793397 |
| | Width of cambial zone (μm) | 3.7003 | 0.062339 | 0.0056 | 0.940908 | 0.3754 | 0.543908 |
| | Radial diameter of fusiform initials (μm) | 0.590 | 0.447340 | 0.184 | 0.670392 | 0.000 | 0.982416 |
| | Width of cellular layers of xylem in differentiation (μm) | 1.2074 | 0.279145 | 0.5136 | 0.478199 | 0.4348 | 0.513844 |
| Tangential plane | Length of fusiform initials (μm) | 0.122 | 0.729285 | 6.094 | 0.018446* | 1.003 | 0.323181 |
| | Tangential diameter of fusiform initials (μm) | 0.905 | 0.347666 | 2.301 | 0.138034 | 3.620 | 0.065097 |
| | Length of tapering of fusiform initials (μm) | 5.300 | 0.027218* | 2.846 | 0.100266 | 0.442 | 0.510191 |
| | Length of cambial rays (μm) | 14.7679 | 0.000476* | 0.4177 | 0.522164 | 6.3510 | 0.016307* |
| | Length of cambial rays in the number of cells | 19.9361 | 0.000076* | 0.2701 | 0.606472 | 8.6319 | 0.005732* |
| | Width of cambial rays (μm) | 14.8313 | 0.000464* | 15.9396 | 0.000308* | 2.6703 | 0.110956 |
| | Width of cambial rays in the number of cells | 13.759 | 0.000698* | 13.759 | 0.000697* | 0.440 | 0.511217 |

*A significant difference in a confidence interval of 95 % (p)

Table 3 Index of phenotypic plasticity calculated for each anatomical characters from samples of *Ceiba speciosa*. The index for each growth period and for the two growth periods together

| Measured parameters | | Activity | Dormancy | Activity+Dormancy |
|---------------------|--|----------|----------|-------------------|
| Transversal plane | Number of cell layers in the cambial zone (μm) | 0.614 | 0.770 | 0.777 |
| | Width of cambial zone (μm) | 0.647 | 0.777 | 0.777 |
| | Radial diameter of fusiform initials (μm) | 0.490 | 0.411 | 0.532 |
| | Width of cellular layers of xylem in differentiation (μm) | 0.844 | 0.769 | 0.859 |
| Tangential plane | Length of fusiform initials (μm) | 0.349 | 0.437 | 0.437 |
| | Tangential diameter of fusiform initials (μm) | 0.392 | 0.437 | 0.445 |
| | Length of tapering of fusiform initials (μm) | 0.468 | 0.336 | 0.468 |
| | Length of cambial rays (μm) | 0.574 | 0.801 | 0.847 |
| | Length of cambial rays in the number of cells | 0.619 | 0.806 | 0.806 |
| | Width of cambial rays (μm) | 0.620 | 0.686 | 0.781 |
| | Width of cambial rays in the number of cells | 0.310 | 0.386 | 0.310 |

Discussion

The cambium, like other plant meristems, has seasonal behavior marked by periods of activity and dormancy (Lachaud et al. 1999; Prislán et al. 2013). The cambial histology and leaf phenological behavior of *C. speciosa* corroborated the seasonal growth described for this native species of the Atlantic Rainforest (e.g., Lorenzi 1998; Carvalho 2003; Tomazello-Filho et al. 2004; Santos and Fisch 2013). The number of cell layers in the cambial zone of *C. speciosa* was greater during the activity period at both study sites. In addition, the number of cell layers of differentiating xylem also are typical of periods of cambial activity and dormancy. All these characteristics are in accordance with other studies of cambial dynamics of tropical species (e.g., Marcati et al. 2006; Marcati et al. 2008; Rao and Rajput 1999; Yáñez-Espinoza et al. 2010; Costa et al. 2013; Callado et al. 2013; Callado et al. 2014; Brandes et al. 2015).

It is noteworthy that the cambial rays were wider during the activity period at both study sites. Tomazello-Filho et al. (2004) included distended rays among the structural characteristics that mark the growth ring boundaries in *C. speciosa*. Based on our results, it is possible to conclude that these distended rays are formed in the earlywood of this species.

In general, large urban centers are characterized by a specific climatic dynamic, which involves reduction of rainfall and increase in temperature, which presents a wide range of associated atmospheric pollutants (Toon 2000; Rosenfeld 2000; Qian et al. 2009; Mirzaei and Haghighat 2010; Santos et al. 2013). Although the study sites are separated by only 55 km, a common tendency for urban areas was observed at the polluted site, where rainfall indexes were lower in the beginning of the year and temperatures are higher during the winter. Despite this difference, the annual climatic oscillation was similar at both sites. Thus, the histology of the cambium was evaluated in the same favorable and unfavorable months

for cambium activity at both sites. The activity and dormancy periods evaluated for *C. speciosa* were similar to the activity and dormancy periods of the native species, *Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze (Lecythidaceae) and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae), which grow at the same preserved site (Callado et al. 2013, 2014; Costa et al. 2013).

Studies that have assessed the impact of pollution on the seasonality of cambium observed changes in the duration of cambial activity and differences in xylem anatomy (Alves 1995; Tulik 2001; Rao et al. 2004; Gupta and Iqbal 2005; Rajput and Rao 2005; Rajput et al. 2008; Iqbal et al. 2010a; Iqbal et al. 2010b; Mahmooduzzafar et al. 2010; Sukumaran 2014). Trees affected by pollution showed a delayed or shortened period of cambial activity when compared with trees growing in unpolluted areas (Rao et al. 2004; Rajput and Rao 2005; Rajput et al. 2008; Iqbal et al. 2010a; Iqbal et al. 2010b). Rajput and Rao (2005) also reported that trees of *Ailanthus excels* Roxb. growing at a relatively unpolluted site had a peak of cambial activity with the arrival of rains and that these trees reduced cambial activity with the maturation of leaves. However, these authors also reported that trees of the same species growing at a polluted site showed two peaks of cambial activity; the first peak after the abscission of mature leaves and the second peak when the development of floral buds and fruit setting was in progress. In the present study, the seasonality of the cambium of *C. speciosa* was not evaluated, although the histology of the cambium was studied when it presented characteristics typical of activity and dormancy periods (e.g., Marcati et al. 2006; Marcati et al. 2008; Costa et al. 2013; Brandes et al. 2015).

Rainho et al. (2013a) observed that higher concentrations of urban pollutants were found during the drier period of the year at their polluted site. This period corresponds with the period of cambial dormancy, but our results revealed different responses between the sites during both activity and dormancy periods. Despite the differences observed during these

Author's personal copy

Environ Sci Pollut Res

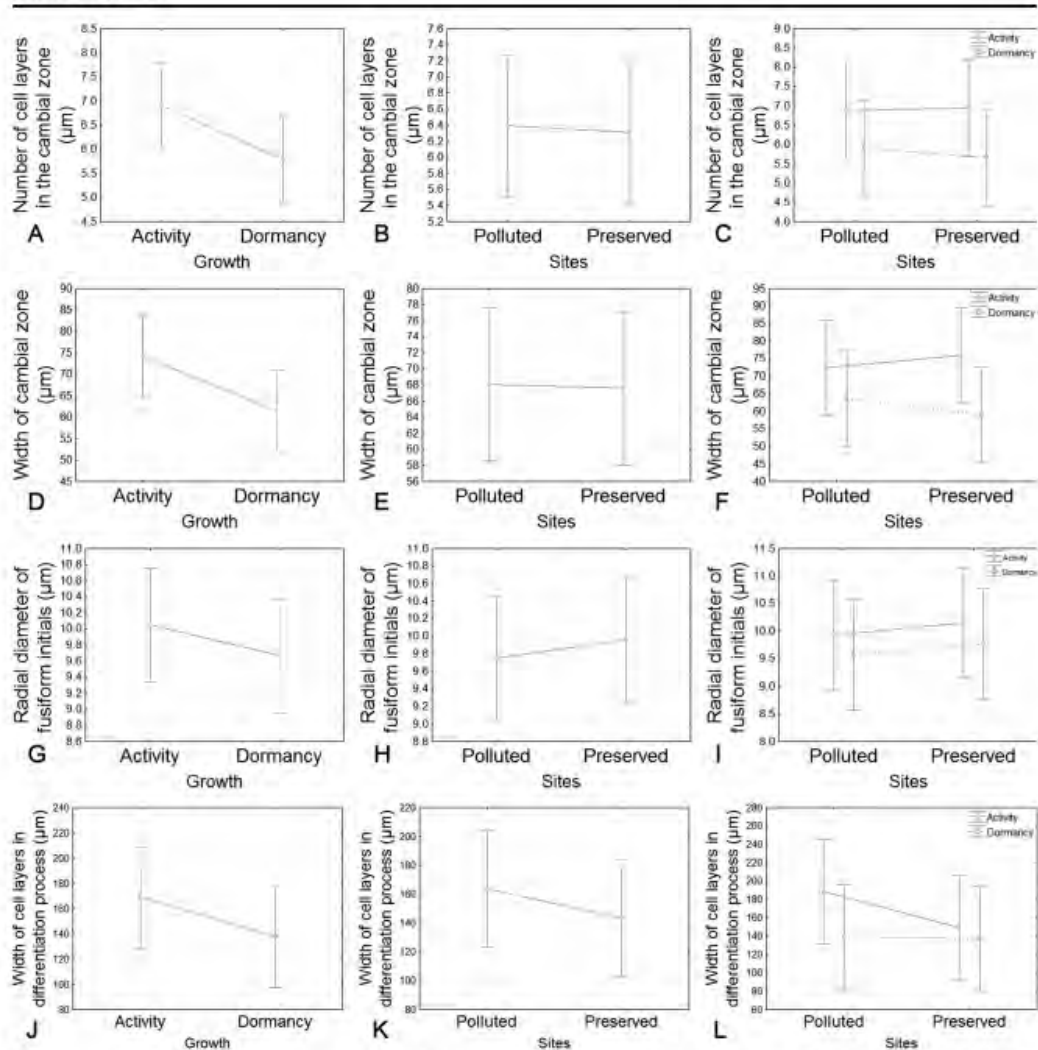


Fig. 6 ANOVA test for measured parameters of the cambial zone of *Ceiba speciosa* observed in transversal sections. **a** Number of cell layers in the cambial zone (μm) during the activity and dormancy periods. **b** Number of cell layers in the cambial zone (μm) in polluted and preserved sites. **c** Number of cell layers in the cambial zone (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **d** Width of cambial zone (μm) during the activity and dormancy periods. **e** Width of cambial zone (μm) in polluted and preserved sites. **f** Width of cambial zone (μm) in polluted and preserved sites during the activity and

dormancy periods. **g** Radial diameter of fusiform initials (μm) during the activity and dormancy periods. **h** Radial diameter of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites. **i** Radial diameter of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **j** Width of cellular layers of xylem in differentiation (μm) during the activity and dormancy periods. **k** Width of cellular layers of xylem in differentiation (μm) in polluted and preserved sites. **l** Width of cellular layers of xylem in differentiation (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods

periods, the fusiform initials were shorter in trees of the polluted site. These characteristics corroborate the results of Khan et al. (2007) and Wani and Khan (2010), who studied the cambial histology of *Citrus reticulata* Blanco (Rutaceae)

and *Juglans regia* L. (Juglandaceae), respectively, in polluted areas in India. Carlquist (1975) found that shorter, fusiform initials are due to the formation of conductive cells, with the same characteristics, in secondary xylem and phloem.

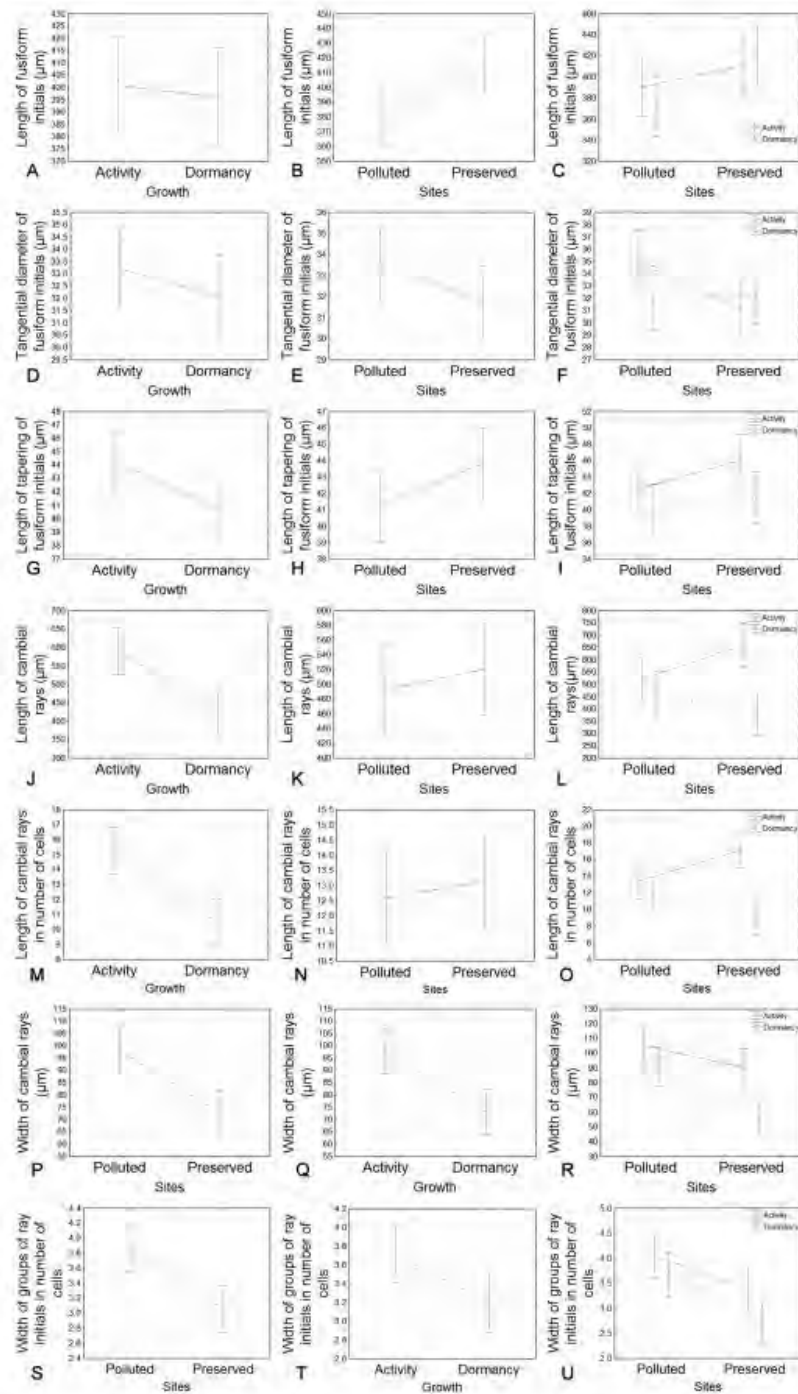


Fig. 7 ANOVA test for measured parameters of the cambial zone of *Ceiba speciosa* observed in tangential longitudinal sections. **a** Length of fusiform initials (μm) during the activity and dormancy periods. **b** Length of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites. **c** Length of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **d** Tangential diameter of fusiform initials (μm) during the activity and dormancy periods. **e** Tangential diameter of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites. **f** Tangential diameter of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **g** Length of tapering of fusiform initials (μm) during the activity and dormancy periods. **h** Length of tapering of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites. **i** Length of tapering of fusiform initials (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **j** Length of cambial rays (μm) during the activity and dormancy periods. **k** Length of cambial rays (μm) in polluted and preserved sites. **l** Length of cambial rays (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **m** Length of cambial rays in the number of cells during the activity and dormancy periods. **n** Length of cambial rays in the number of cells in polluted and preserved sites. **o** shows length of cambial rays in the number of cells in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **p** Width of cambial rays (μm) during the activity and dormancy periods. **q** Width of cambial rays (μm) in polluted and preserved sites. **r** Width of cambial rays (μm) in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods. **s** Width of cambial rays in the number of cells during the activity and dormancy periods. **t** Width of cambial rays in the number of cells in polluted and preserved sites. **u** Width of cambial rays in the number of cells in polluted and preserved sites during the activity and dormancy periods

The cambial rays were the structural components that differed the most between the study sites. The ecological and functional relationships of parenchyma rays in different environments are underexplored in the literature (Lev-Yadun 1994; Lev-Yadun and Aloni 1995; Barnett 2006). Parenchyma rays are important constituents of a plant's secondary body, being responsible for lateral transport of water, gases, and reserve substances (Barnett 2006). In general, these rays originate from the differentiation of cambial ray cells, but fusiform cambial initials can change into ray initials and vice versa (Evert 2013; Pramod et al. 2013). Septation of fusiform initials adjacent to rays enlarges the radial system (Swamy and Krishnamurthy 1980; Lev-Yadun and Aloni 1995; Pramod et al. 2013). It is worth noting that the differentiation of fusiform initial cells into radial cells was observed in *C. speciosa* at both study sites during cambial activity, but only in trees from the polluted site during the dormancy period.

The division and differentiation of ray cells can be induced by the administration of ethylene to stems (Yamamoto and Kozłowski 1987; Lev-Yadun and Aloni 1993; Pramod et al. 2013). Lev-Yadun and Aloni (1995) and Pramod et al. (2013) reported that the administration of ethylene promotes anticlinal division in fusiform initials, increasing the frequency and/or size of rays. Among other functions, the production of ethylene in plants is mainly associated with situations of stress, such as drought, inundation, frost, and exposure to ozone (Salisbury and Ross 2012; Taiz and Zeiger 2013). In comparison to the preserved site, *C. speciosa* from the polluted site showed wider rays in the cambial zone and in differentiating xylem and

phloem. This difference was more evident during the dormancy period (in dry season). This season coincides with the period in which mutagenic substances, such as nitro-derived polycyclic aromatic hydrocarbons, reach their highest concentrations at the polluted study site (Rainho et al. 2013a; Rainho et al. 2013b). Other studies on cambial activity of tropical species also observed an increase in size of cambial rays of trees at polluted sites in India (Khan et al. 2007; Wani and Khan 2010). Alves (1995), studying the wood of *Cecropia glaziovii* Snethl. (Urticaceae) under different levels of industrial pollution, also found that the greater differences were also related to radial parenchyma. It is possible that toxic atmospheric pollutants are inductors of plant stress, due to their cytotoxic action (Rainho et al. 2013b), and thus promote an increase in ethylene production and, consequently, an increase in the number of cambial rays and future parenchymatic rays.

Conclusions

Our study showed that individuals of *C. speciosa* exposed to urban pollution have significant differences in cambial histology from individuals grown in a preserved area. These differences vary in relation to periods of cambial activity and dormancy, and they correspond to structural modifications described in the literature as indicators of stress.

Our results showed that this species is stress tolerant and can survive and adapt to different environmental conditions. This characteristic, together with its wide distribution and frequent planting in cities, make this species an important biomarker for environmental monitoring studies.

This study is the first to report the effects of pollution on cambial histology of a South American tree species. It demonstrated that pollutants and climate dynamics related to the high degree of urbanization of the city of Rio de Janeiro has caused alterations to the cambium of *C. speciosa*.

Finally, studies of cambial structure and activity contribute not only to understanding the age of trees but also to identifying the factors that influence their growth (Kozłowski and Pallardy 1997; Savidge 2000). Understanding plant growth in stressful situations, such as in an urban environment, is key to the assessment of anthropogenic effects on forests and the adaptive potential of these forests to environmental changes (Gričar 2012; O'Brien et al. 2012). These studies broaden the knowledge about plant biodiversity and can contribute to defining global strategies of environmental conservation.

Acknowledgments The authors are grateful to Walter da Silva, Nattacha Moreira, and Vanessa Cunha for the valuable technical assistance. This work was supported by Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

References

- Aljaro ME, Avila G, Hoffmann A, Kummerow J (1972) The annual rhythm of cambial activity in two woody species of the Chilean "matorral". *Am J Bot* 59:879–885. <http://www.jstor.org/stable/2441114>
- Alves ES (1995) The effects of the pollution on wood of *Cecropia glaziovii* (Cecropiaceae). *IAWA J* 16(1):69–80
- Alves PLCA, Oliva MA, Cambraia J, Sant'anna R (1990) Efeitos da chuva ácida simulada e de um solo de Cubatão (SP) sobre parâmetros relacionados com a fotossíntese e a transpiração de plantas de soja. *Rev Bras Fisiol Veg* 2(1):7–14. <http://www.cnpdia.embrapa.br/rbfv/pdfs/v2n1p7.pdf>
- Alves ES, Giusti PM, Domingos M, Saldiva PHN, Guimarães ET, Lobo DJ (2001) Estudo anatômico foliar do Clone híbrido 4430 de *Tradescantia*: alterações decorrentes da poluição aérea urbana. *Revta bras Bot* 24(4):567–576. doi:10.1590/S0100-8402001000500012
- Alves ES, Tresmondi F, Longui EL (2008) Análise estrutural de folhas de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) coletadas em ambientes rural e urbano, SP, Brasil. *Acta Bot Bras* 22(1):241–248. doi:10.1590/S0102-33062008000100023
- Avila G, Aljaro ME, Araya S, Montenegro G, Kummerow J (1975) The seasonal cambium activity of Chilean and Californian shrubs. *Am J Bot* 62:473–478. <http://www.jstor.org/stable/2441954>
- Barnett J (2006) Cell-cell communication in wood. In: Baluska F, Volkmann D, Barlow P (eds) Cell-cell channels. Landes Bioscience, Georgetown, pp 135–147
- Beck W (2009) Growth patterns of forest stands—the response towards pollutants and climatic impact. *iForest* 2: 4–6 [online: 2009-01-21] URL: <http://www.sisef.it/forest/show.php?id=472>
- Bencke CSC, Morellato LPC (2002) Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia de plantas, sua interpretação e representação. *Revta bras Bot* 25(3):269–275. doi:10.1590/S0100-8402002000300003
- Boninssegna JA, Villalba R, Amarrila L, Ocampo J (1989) Studies on tree rings, growth rates and age-size relationships of tropical tree species in Misiones, Argentina. *IAWA Bull* 10(2):161–169
- Brandes AFN, Lisi CS, Silva LDSAB, Rajput KS, Barros CF (2015) Seasonal cambial activity and wood formation in trees and lianas of Leguminosae growing in the Atlantic Forest: a comparative study. *Botany* 93:211–220. doi:10.1139/cjb-2014-0198
- Bräuning A, Volland-Voigt F, Burchardt I, Ganzhi O, Naus T, Peters T (2009) Climatic control of radial growth of *Cedrela montana* in a humid mountain rain forest in southern Ecuador. *Erdkunde* 63: 337–345. doi:10.3112/erdkunde.2009.04.04
- Braz DM, Moura MVLP, Rosa MMT (2004) Chave de identificação para as espécies de Dicotiledôneas arbóreas da Reserva Biológica do Tingüá, RJ, com base em caracteres vegetativos. *Acta Bot Bras* 18(2):225–240. <http://www.scielo.br/pdf/abbb/v18n2/v18n02a03.pdf>
- Bujokas WM (2009) Influência da poeira de fábrica de cimento nas características químicas da precipitação e no crescimento, nos teores de clorofila e na nutrição de *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). Thesis, Universidade Federal do Paraná <http://hdl.handle.net/1884/20279>
- Callado CH, Roig FA, Tomazello-Filho M, Barros CF (2013) Cambial growth periodicity studies of South American woody species—a review. *IAWA J* 34:213–230. doi:10.1163/22941932-00000019
- Callado CH, Vasconcellos TJ, Costa MS, Barros CF, Roig FA, Tomazello-Filho M (2014) Studies in cambial activity: advances and challenges in knowledge of Brazilian species growth dynamics. *An Acad Bras Cienc* 86(1):277–283. doi:10.1590/0001-3765201320130033
- Carlquist S (1975) Ecological strategies of xylem evolution. University of California Press, Berkeley
- Carvalho PER (2003) Espécies Arbóreas Brasileiras. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília
- Costa MS, Vasconcellos TJ, Barros CF, Callado CH (2013) Does growth rhythm of a wide-spread species change in distinct growth sites? *IAWA J* 34(4):498–509. doi:10.1163/22941932-00000040
- Da Cunha M, Gomes VM, Xavier-Filho J, Attias M, Souza W, Miguens FC (2000) Laticifer system of *Chamaesyce thymifolia*: a closed host environment for Trypanosomatids. *BioCell* 24(2):123–132
- Dünisch O, Montóia VR, Bauch J (2003) Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. *Trees* 17:244–250. doi:10.1007/s00468-002-0230-2
- Evert RF (2013) Anatomia das plantas de Esau: meristemas, célula e tecidos do corpo da planta: sua estrutura e função e desenvolvimento. Ray F. Evert: coordenação e tradução de Carmem Regina Marcati. São Paulo: Blucher
- Feder N, O'Brien TP (1968) Plant microtechnique: some principles and new methods. *Am J Bot* 55:123–142. doi:10.2307/2440500
- Giantomasi MA, Roig-Juñent FA, Patón-Domínguez D, Massaccesi G (2012) Environmental modulation of the seasonal cambial activity in *Prosopis flexuosa* DC trees from the Monte woodlands of Argentina. *J Arid Environ* 76:17–22. doi:10.1016/j.jaridenv.2011.08.010
- Gibbs P, Semir J (2003) A taxonomic revision of the genus *Ceiba* Mill. (Bombacaceae). *An Jard Bot* 60(2):259–300. doi:10.3989/ajbm.2002.v60.i2.92
- Grčar J (2012) Cambial cell production and structure of xylem and phloem as an indicator of tree vitality: a review. In: Diez JJ (ed) Sustainable forest management - current research. InTech, Rijeka, pp 111–134. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/36970.pdf>
- Gupta MC, Iqbal M (2005) Ontogenetic histological changes in the wood of mango (*Mangifera indica* L. cv Deshi) exposed to coal-smoke pollution. *Environ Exp Bot* 54:248–255
- Honour SL, Bell JNB, Ashenden TA, Cape JN, Power SA (2009) Responses of herbaceous plants to urban air pollution: effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environ Pollut* 157(4):1279–1286. doi:10.1016/j.envpol.2008.11.049
- Inoue MT, Reissmann CB (1993) Efeitos da poluição na fotossíntese, dimensões da folha, deposição de particulados e conteúdo de ferro e cobre em alfeneiro (*Ugustrum lucidum*) da arborização de Curitiba, PR. *Floresta* 21(1/2):3–11. <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs/index.php/floresta/article/download/6420/4612>
- Iqbal M, Jura-Morawiec J, Włoch W, Mahmooduzzafar (2010a) Foliar characteristics, cambial activity and wood formation in *Azadirachta indica* A. Juss. as affected by coal-smoke pollution. *Flora - Morphol, Distrib, Funct Ecol Plants* 205(1):61–71
- Iqbal M, Mahmooduzzafar, Aref IM, Khan PR (2010b) Behavioural responses of leaves and vascular cambium of *Prosopis cineraria* (L.) Druce to different regimes of coal-smoke pollution. *J Plant Interact* 5(2):117–133. doi:10.1080/17429140903438084 (IF: 0.865)
- Johansen DA (1940) Plant microtechnique. McGraw-Hill, New York
- Kampa M, Castanas E (2008) Human health effects of air pollution. *Environ Pollut* 151:362–367. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012
- Khan MA, Siddiqui MB, Bhat S, Shahab D (2007) Pollution effect on the cambial structure of *Citrus reticulata* var. *tangelos*. *Int J Bot* 3(4): 342–350. doi:10.3923/ijb.2007.342.350
- Kozłowski TT, Pallardy SG (1997) Growth control in woody plants. Academic Press, California
- Kurczynska EU, Dmuchiński W, Włoch W, Bytnerowicz A (1997) The influence of air pollutants on needles and stems of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. *Environ Pollut* 98(3):325–334. doi:10.1016/S0269-7491(97)00141-3
- Lachaud S, Cateson AM, Bonnemain JL (1999) Structure and functions of the vascular cambium. *C R Acad Sci* 322:633–650. doi:10.1016/S0764-4469(99)80103-6
- Lev-Yadun S (1994) Experimental evidence for the autonomy of ray differentiation in *Ficus sycamorus* L. *New Phytol* 126:499–504.

- <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.1994.tb04247.x/pdf>
- Lev-Yadun S, Aloni R (1993) Effect of wounding on the relations between vascular rays and vessels in *Melia azedarach* L. *New Phytol* 124:339–344. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03824.x/pdf>
- Lev-Yadun S, Aloni R (1995) Differentiation of the ray system in woody plants. *Bot Rev* 61:45–84
- Lorenzi H (1998) Árvores brasileiras - Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa, SP, Editora Plantarum, Vol. I
- Mahmooduzzafar, Hegazy SS, Aref IM, Iqbal M (2010) Anatomical changes in the wood of *Syzygium cumini* exposed to coal-smoke pollution. *J Food, Agric Environ* 8(3–4):959–964
- Marcati CR, Angyalossy V, Evert RF (2006) Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). *IAWA J* 27(2):199–211
- Marcati CR, Milanez CRD, Machado SR (2008) Seasonal development of secondary xylem and phloem in *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake (Leguminosae: Caesalpinioideae). *Trees* 22:3–12. doi:10.1007/s00468-007-0173-8
- Mazzoni-Viveiros SC, Trufem SFB (2004) Efeitos da poluição aérea e edáfica no sistema radicular de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) em área de Mata Atlântica: associações micorrízicas e morfologia. *Revta Bras Bot* 27(2):337–348. doi:10.1590/S0100-84042004000200013
- Medeiros JGS, Tomazello-Filho MT, Krug FJ, Vives AE (2008) Tree-ring characterization of *Araucaria columnaris* Hook and its applicability as a lead indicator in environmental monitoring. *Dendrochronologia* 26:65–171. doi:10.1016/j.dendro.2008.07.002
- Mirzaei PA, Haghighat F (2010) Approaches to study urban heat island—abilities and limitations. *Build Environ* 45(10):2192–2201. doi:10.1016/j.buildenv.2010.04.001
- Moraes RM, Klumpp A, Furlan CM, Klumpp G, Domingos M, Rinaldia MCS, Modesto IF (2002) Tropical fruit trees as bioindicators of industrial air pollution in southeast Brazil. *Environ Int* 28:367–374
- O'Brien TP, Feder M, McCully ME (1964) Polyehromatic staining of plant cell walls by toluidine blue O. *Protoplasma* 59:367–373
- O'Brien AM, Ettinger AK, Hillerislambers J (2012) Conifer growth and reproduction in urban forest fragments: predictors of future responses to global change? *Urban Ecosyst* 15(4):879–891. doi:10.1007/s11252-012-0250-7
- Ostro B (2004) Outdoor air pollution: assessing the environmental burden of disease at national and local levels. WHO Environmental Burden of Disease. Geneva http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/ebds.pdf
- Pereira AR, Villa-Nova NA, Sedyama GC (1997) Evapotranspiração. FEALQ, Piracicaba
- Pramod S, Patel PB, Rao KS (2013) Influence of exogenous ethylene on cambial activity, xylogenesis and ray initiation in young shoots of *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. *Flora* 208:549–555. doi:10.1016/j.flora.2013.09.001
- Prislan P, Čufar K, Koch G, Schmitt U, Gričar J (2013) Review of cellular and subcellular changes in the cambium. *IAWA J* 34(4):391–407. doi:10.1163/22941932-00000032
- Qian Y, Gong D, Fan J, Leung RL, Bennartz R, Chen D, Wang W (2009) Heavy pollution suppresses light rain in China: observations and modeling. *J Geophys Res* 114:1–16. doi:10.1029/2008JD011575
- Rainho CR, Velho AMA, Corrêa SM, Mazzei JL, Aiub CAF, Felzenszwal I (2013a) Prediction of health risk due to polycyclic aromatic hydrocarbons present in urban air in Rio de Janeiro, Brazil. *Genet Mol Res* 12(3):3992–4002. doi:10.4238/2013.February.28.6
- Rainho CR, Corrêa SM, Mazzei JL, Aiub CAF, Felzenszwal I (2013b) Genotoxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitro-derived in respirable airborne particulate matter collected from urban areas of Rio de Janeiro (Brazil). *Biomed Res Int*. doi:10.1155/2013/765352
- Rajput KS, Rao KS (2005) Cambial periodicity and formation of wood in *Ailanthus excelsa* growing under the influence of combined air pollutants. *Phyton* 45(1):51–64
- Rajput KS, Rao KS, Kim YS (2008) Cambial activity and wood anatomy in *Prosopis spicigera* (Mimosaceae) affected by combined air pollutants. *IAWA J* 29(2):209–219
- Rao KS, Rajput KS (1999) Seasonal behaviour of vascular cambium in teak (*Tectona grandis*) growing in moist deciduous and dry deciduous forests. *IAWA J* 20(1):85–93
- Rao KS, Rajput KS, Srinivas T (2004) Seasonal cambial anatomy and development of xylem in *Dalbergia sissoo* growing under the influence of combined air pollutants. *J Sustain For* 18(1):73–88. doi:10.1300/J091v18n01_05
- Rosenfeld D (2000) Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. *Science* 287:1793–1796. <http://www.weatheranswer.com/public/pollution.pdf>
- Salisbury FB, Ross CW (2012) Fisiologia das plantas, 4th edn. Cengage Learning, São Paulo
- Santos CP (2005) Anatomia do lenho de *Tibouchina pulchra* Cogn. e *Miconia cinnamomifolia* (DC.) Naud (Melastomataceae) como registro temporal da poluição atmosférica proveniente do complexo industrial de Cubatão. Dissertation, Instituto de Botânica de São Paulo http://www.ambiente.sp.gov.br/pgibt/files/2013/09/Cristiane_Pereira_Santos_MS.pdf
- Santos CHV, Fisch STV (2013) Phenology of urban tree species in the city of Taubaté, São Paulo State, Brazil. *REVSBAU, Piracicaba – SP* 8(3):01–16. http://www.revsbau.esalq.usp.br/artigos_cientificos/artigo66sn-publicacao_ingles.pdf
- Santos TO, Moura GB, Silva BB, Oliveira LMM, Machado CCC (2013) Influence of urbanization on land surface temperature in Recife city. *Eng Agric* 33(6):1234–1244. doi:10.1590/S0100-69162013000600016
- Savidge RA (2000) Intrinsic regulation of cambial growth. *J Plant Growth Regul* 20:52–77. doi:10.1007/s003440010002
- Silva EAM, Pereira LAR, Pinheiro AL, Ramalho RS (1991) Variação sazonal na atividade cambial de três espécies florestais na região de Viçosa-MG. *Rev Seiva* 50:49–52
- Silva LC, Azevedo AA, Silva EAMS, Oliva MA (2000) Flúor em chuva simulada: sintomatologia e efeitos sobre a estrutura foliar e o crescimento de plantas arbóreas. *Revta Bras Bot* 23(4):385–393. doi:10.1590/S0100-84042000000400004
- Singh A, Agrawal SB, Rathore D (2003) Growth responses of wheat (*Triticum aestivum* L. var. HD 2329) exposed to ambient air pollution under varying fertility regimes. *Sci World J* 3:799–810. doi:10.1100/tsw.2003.64
- Smith VH, Tilman GD, Nekola JC (1999) Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environ Pollut* 100:179–196. <http://cedarcreek.umn.edu/biblio/fulltext/1758.pdf>
- Sukumaran D (2014) Effect of air pollution on the anatomy some tropical plants. *Appl Ecol Environ Sci* 2(1):32–36. <http://pubs.sciepub.com/aces/2/1/5doi:10.12691/aces-2-1-5>
- Swamy BGL, Krishnamurthy KV (1980) On the origin of vascular cambium in dicotyledonous stems. *Proc Indian Acad Sci (PI Sci)* 89(1):1–6
- Taiz L, Zeiger E (2013) Fisiologia vegetal, 4th edn. Artmed, Porto Alegre
- Tomazello-Filho M, Lisi CS, Hansen N, Cury G (2004) Anatomical features of increment zones in different tree species in the state of São Paulo, Brazil. *Sci Forestalis* 66:46–55. <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr66/cap04.pdf>
- Toon BO (2000) How pollution suppresses rain. *Science* 287(5459):1763–1765. doi:10.1126/science.287.5459.1763
- Tulik M (2001) Cambial history of Scots pine trees (*Pinus sylvestris*) prior and after the Chernobyl accident as encoded in the xylem. *Environ Exp Bot* 46:1–10

- Valladares F, Sanchez-Gomez D, Zavala MA (2006) Quantitative estimation of phenotypic plasticity: bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications. *J Ecol* 94:1103–1116. doi:10.1111/j.1365-2745.2006.01176.x
- Vives AES, Moreira S, Brienza SMB, Medeiros JGS, Tomazello-Filho M, Araújo OM, Zucchi D, Nascimento-Filho VF (2007) Species arboreal as a bioindicator of the environmental pollution: analysis by SR-TXRF. *Nucl Instrum Methods Phys* 579:494–498. doi:10.1016/j.nima.2007.04.109
- Volland-Voigt F, Bräuning A, Ganzhi O, Peters T, Mazzi H (2011) Radial stem variations of *Tabebuia chrysantha* (Bignoniaceae) in different tropical forest ecosystems of southern Ecuador. *Trees* 25:39–48. doi:10.1007/s00468-010-0461-6
- Wahlmann B, Braun E, Lewark S (1986) Radial increment in different tree heights in beech stands affected by air pollution. *IAWA Bull* 7(4):285–288
- Wani BA, Khan A (2010) Effect of cement dust pollution on the vascular cambium of *Juglans regia* (L.). *J Ecol Nat Environ* 2(10):225–229. <http://www.academicjournals.org/jene>
- Yamamoto F, Kozłowski TT (1987) Effect of ethrelon growth and stem anatomy of *Pinus halepensis* seedlings. *IAWA Bull* 8(1):11–19
- Yáñez -Espinoza L, Terrazas T, Lopez-Mata L (2010) Phenology and radial stem growth periodicity in evergreen subtropical rainforest trees. *IAWA J* 31(3):293–307
- Zar JH (2010) *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, New Jersey