

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris* Hook.:
caracterização anatômica, densitométrica e aplicação no monitoramento
ambiental**

JEAN GABRIEL DA SILVA MEDEIROS

Dissertação apresentada para obtenção do
título de Mestre em Recursos Florestais com
opção em Tecnologia da Madeira.

Piracicaba
2005

JEAN GABRIEL DA SILVA MEDEIROS
Engenheiro Florestal

**Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris* Hook.: caracterização anatômica,
densitométrica e aplicação no monitoramento ambiental**

Orientador:
Prof. Dr. MARIO TOMAZELLO FILHO

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em
Recursos Florestais com opção em Tecnologia da Madeira.

Piracicaba
2005

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Medeiros, Jean Gabriel da Silva

Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris* Hook.: caracterização anatômica, densitométrica e aplicação no monitoramento ambiental / Jean Gabriel da Silva Medeiros. - - Piracicaba, 2005.
85 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Araucária 2. Árvore florestal 3. Chumbo – Teor 4. Dendrocronologia 5. Monitoramento
I. Título

CDD 634.975

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

*Dedico a todos os alunos que vêm até a universidade
em busca de seus ideais, deixando para trás o
carinho e a presença daqueles que os amam.*

Agradecimentos

Ao Prof. Mario Tomazello Filho, pelo empenho, orientação e disposição para o desenvolvimento da presente pesquisa.

A toda equipe do Laboratório de Anatomia da Madeira e Anéis de Crescimento da ESALQ, à Técnica de Laboratório Maria Aparecida R. Bermúdez, ao Dr. Cláudio Sergio Lisi, ao Biólogo Márcio A. Dalanesi, ao Dr. Roger Moya, à Dr. Sandra Bibiana, ao Dr. Percy Pollito, as Acadêmicas Daniela Popim Miqueloni e Natália Dias Rogovischi pela amizade e companheirismo ao longo de todo o trabalho.

Ao Dr. Francisco J. Krug, ao Doutorando Dario Santos Junior, à Técnica Superior em Química Iolanda Aparecida Rufini e ao Ms.Sc. Paulino Florêncio de Souza do Laboratório de Química Analítica do CENA pelo apoio e direcionamento nos estudos de determinação do chumbo.

Aos novos amigos que encontrei durante esta jornada: as Zootecnistas Vanessa Pilon e Marília Gabriela (Mãe do João), ao Alberto e ao Gregori pela amizade e dedicação.

À Professora Ana Elisa S. de Vives, à Ms.Sc. Liz Mary Bueno, ao Dr. Richard M. S. Cunha pelo apoio nos trabalhos e a amizade.

Ao Dr. Virgílio F. do Nascimento Filho e a Dr. Maria Emília Mattiazzo pelos conselhos e direcionamentos ao longo deste trabalho.

Ao Dr. Marcílio de Almeida e ao Dr. Antonio Natal Gonçalves pelo incentivo na realização deste projeto.

Ao Dr. Bernardino Ribeiro de Figueiredo do Instituto de Geociências da Unicamp pelo apoio na fase inicial do projeto de pesquisa.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura pela oportunidade para desenvolver este trabalho de pesquisa.

Ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron pela oportunidade de desenvolver parte deste projeto com a tecnologia de microfluorescência de raios X.

À FAPESP pelo oferecimento da Bolsa de Estudos que permitiu desenvolver a presente pesquisa.

“Uma taça de cristal cai no chão e se quebra. Momentos antes, era útil, podeis aproximá-la de vossos lábios e dela beber um licor agradável e fortificante.

Agora seus fragmentos cortantes podem apenas ensangüentar a mão”.

L.C.S.M.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
RESUMO	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 DESENVOLVIMENTO.....	17
2.1 Revisão Bibliográfica	17
2.1.1 A família Araucariaceae e as principais espécies.....	17
2.1.2 Dendrologia das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	18
2.1.3 Características do lenho de algumas Araucariaceae.....	18
2.1.4 Dendrocronologia.....	19
2.1.5 Métodos de estudo dos anéis de crescimento	21
2.1.6 Aspectos envolvidos no estudo da dendroquímica.....	22
2.1.7 O chumbo no ambiente terrestre.....	23
2.1.8 Mecanismos de absorção de metais pelas plantas	24
2.1.9 Efeito da poluição na anatomia do lenho e no crescimento das plantas.....	26
2.1.10 Anéis de crescimento aplicados no monitoramento ambiental	27
2.1.10 Métodos de determinação de elementos químicos nos anéis de crescimento	31
2.2 Material e Métodos.....	32
2.2.1 Caracterização das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	32
2.2.2 Caracterização dos sítios	32
2.2.3 Caracterização do clima.....	34
2.2.4 Caracterização do solo.....	35
2.2.5 Caracterização anatômica do lenho e dos anéis de crescimento	36
2.2.6 Densitometria de raios X dos anéis de crescimento	37
2.2.7 Determinação da largura dos anéis de crescimento.....	38
2.2.8 Crescimento radial das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	40

2.2.9 Análise do teor de Pb nos anéis de crescimento	42
2.3 Resultados e Discussão.....	45
2.3.1 Idade e características dendrométricas das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	45
2.3.2 Caracterização anatômica do lenho e dos anéis de crescimento	46
2.3.3 Caracterização do lenho por densitometria de raios X	50
2.3.4 Dendrocronologia das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	60
2.3.5 Crescimento do tronco das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	63
2.3.6 Dendroquímica das árvores de <i>Araucaria columnaris</i>	70
3 CONCLUSÕES.....	74
REFERÊNCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Sítios A e aspectos gerais das árvores de <i>A. columnaris</i>	33
Figura 2 – Disposição das árvores de <i>A. columnaris</i> no Sítio A com as 3 parcelas amostradas... 33	33
Figura 3 – Aspecto geral do Sítio B evidenciando as árvores de <i>A. columnaris</i>	34
Figura 4 – Médias mensais de temperatura (°C) e de precipitação (mm) para o Município de Piracicaba – SP. Fonte: EMBRAPA (2004).....	35
Figura 5 – Extrator motorizado e sonda metálica utilizada na coleta de amostras do lenho das árvores de <i>A. columnaris</i>	36
Figura 6 – Seção transversal do lenho das árvores de <i>A. columnaris</i> (100x). Setas indicam a transição dos lenhos inicial/tardio dos anéis de crescimento. Escala = 100 µm.	47
Figura 7 – Anatomia do lenho de <i>A. columnaris</i> . A: Corte longitudinal radial (200x); B: Corte longitudinal tangencial (100x). Escalas: A = 100 µm; B = 200 µm.....	47
Figura 8 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de <i>A. columnaris</i>	51
Figura 9 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de <i>A. columnaris</i>	52
Figura 10 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de <i>A. columnaris</i>	53
Figura 11 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de <i>A. columnaris</i>	54
Figura 12 – Relação entre a largura dos anéis de crescimento obtida na mesa de medição e por densitometria de raios X. R^2_{aj} : coeficiente de determinação ajustado.....	55
Figura 13 – Relação entre a densidade aparente média (g/cm^3) e a largura (cm) de cada anel de crescimento anual. A linha contínua mostra a tendência dos dados.....	55

Figura 14 – Modelos para densidade aparente média (g/cm^3) do lenho em função do ano para os dois sítios de árvores de <i>A. columnaris</i>	57
Figura 15 – Modelos para densidade aparente máxima (g/cm^3) do lenho em função do ano para os dois sítios de árvores de <i>A. columnaris</i>	59
Figura 16 – Série de índice de largura de anéis de crescimento das árvores de <i>A. columnaris</i> para os dois sítios (A e B).....	63
Figura 17 – Crescimento radial do tronco de árvores de <i>A. columnaris</i> , para os dois sítios no período de 1977-2003.....	66
Figura 18 – Incremento corrente anual do tronco de árvores de <i>A. columnaris</i> nos dois sítios no período 1973-2003.....	68
Figura 19 – Incremento médio anual do tronco de árvores de <i>A. columnaris</i> nos dois sítios no período 1978-2003.....	69
Figura 20 – Concentração de Pb ($\mu\text{g/g}$) nos anéis de crescimento de árvores de <i>A. columnaris</i> ..	70
Figura 21 - Concentração de Pb ($\mu\text{g/g}$) nos anéis de crescimento e índice de largura de anéis das árvores de <i>A. columnaris</i> no sítio A (média das três parcelas)	72
Figura 22 – Concentração de Pb ($\mu\text{g/g}$) nos anéis de crescimento e índice de largura de anéis das árvores de <i>A. columnaris</i> no sítio B	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental	28
Tabela 2 – Análise do solo dos sítios A (1, 2 e 3) e B (n=4).....	35
Tabela 3 – Rampa de aquecimento do forno de microondas para a digestão do lenho.....	43
Tabela 4 – Programa de aquecimento utilizado para determinação de chumbo no lenho em espectrômetro de absorção atômica com forno de grafite	44
Tabela 5 – Características dendrométricas das 13 árvores de <i>A. columnaris</i>	45
Tabela 6 – Dimensões das traqueídes do lenho de <i>A. columnaris</i> . n=25	48
Tabela 7 – Dimensões dos raios do lenho de <i>A. columnaris</i> . n=25.....	49
Tabela 8 – Análise de variância fatorial para a densidade aparente mínima (g/cm^3) de cada anel de crescimento em função do ano e do sítio para as 13 árvores de <i>A. columnaris</i>	56
Tabela 9 – Análise de variância fatorial para densidade aparente média (g/cm^3) de cada anel de crescimento em função do ano e do sítio para as 13 árvores de <i>A. columnaris</i>	57
Tabela 10 - Modelos para densidade aparente média (g/cm^3) em função do ano para os dois sítios de árvores de <i>A. columnaris</i>	57
Tabela 11 – Análise de variância fatorial para densidade aparente máxima (g/cm^3) de cada anel de crescimento em função do ano e do sítio para as 13 árvores de <i>A. columnaris</i>	58
Tabela 12 – Modelos para densidade aparente máxima (g/cm^3) dos anéis de crescimento em função do ano para os dois sítios de árvores de <i>A. columnaris</i>	58

Tabela 13 - Número de anéis de crescimento anuais nas amostras do lenho das árvores de <i>A. columnaris</i> extraídas a altura do DAP do tronco.....	60
Tabela 14 – Coeficientes da função utilizados para estimar a tendência de crescimento das séries cronológicas das 13 árvores de <i>A. columnaris</i>	61
Tabela 15 – Matriz de correlação entre as séries cronológicas para as árvores de <i>A. columnaris</i> do sítio A no intervalo de 1978 a 2003.....	62
Tabela 16 – Matriz de correlação entre as séries cronológicas para as árvores de <i>A. columnaris</i> no sítio B no intervalo de 1975 a 2003	62
Tabela 17 – Modelos de crescimento radial do tronco indicados como significativos pelo processo “stepwise” para as árvores de <i>A. columnaris</i> do sítio A.....	64
Tabela 18 – Modelos de crescimento radial indicados como significativos pelo processo “stepwise” para as árvores de <i>A. columnaris</i> do sítio B	65
Tabela 19 – Valores dos coeficientes do modelo n° 7 para os dois sítios de árvores de <i>A. columnaris</i>	65
Tabela 20 – Teste t para a hipótese de que os coeficientes do modelo n° 7 fossem iguais para os dois sítios de árvores de <i>A. columnaris</i>	66
Tabela 21 – ANOVA e teste F para comparar se os dois modelos estimam a mesma população	67
Tabela 22 – Modelos para o incremento corrente anual do tronco de árvores de <i>A. columnaris</i> ..	67
Tabela 23 – Modelos para o incremento médio anual do tronco de árvores de <i>A. columnaris</i>	69

RESUMO

Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris* Hook.: caracterização anatômica, densitométrica e aplicação no monitoramento ambiental

O presente trabalho tem como objetivos caracterizar os anéis de crescimento de árvores de *A. columnaris*, quanto a estrutura anatômica microscópica do lenho, a aplicação na determinação da idade, taxa de crescimento e o teor de Pb em uma seqüência de anéis de crescimento previamente datados. Visa, também, verificar o potencial da espécie no monitoramento ambiental, segundo as técnicas de dendroquímica, definida como a mensuração quanti e qualitativa dos micro e macronutrientes e de elementos traço nos anéis de crescimento das árvores, indicando mudanças retrospectivas na sua absorção e translocação. Foram selecionadas árvores de *A. columnaris* localizadas no “Campus Luiz de Queiroz” da ESALQ/USP, em dois sítios diferentes. O primeiro em área próxima à Avenida Centenário, caracterizado pelo intenso fluxo de veículos e constituindo-se em uma das principais vias de acesso aos bairros da cidade e às estradas estaduais. O segundo sítio localiza-se no interior do Campus da ESALQ, acerca de 150 m do primeiro sítio e em área de baixa pressão antrópica com as árvores consideradas como testemunha. Foram coletadas amostras do lenho das árvores, através de método não destrutível e feita a caracterização anatômica do lenho de acordo com as normas da AIWA e com o auxílio de um sistema de análise de imagens. Aplicou-se a densitometria de raios X para analisar as variações da densidade aparente dos anéis de crescimento das árvores. A taxa de crescimento e a idade das árvores foram determinadas por técnicas de dendrocronologia, permitindo a correspondência exata de cada anel de crescimento com os anos do calendário. Em cada sítio analisou-se com espectrômetro de absorção atômica com forno de grafite o teor de Pb nos anéis de crescimento. Os resultados obtidos com relação à dendroquímica mostraram que os teores de Pb detectados nos anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris* em um período de 30 anos, embora baixos, indicam a sua ocorrência de forma cíclica no ambiente, a taxa de crescimento do tronco das árvores de *A. columnaris* não foi afetada pela presença de Pb nos anéis de crescimento, a metodologia de análise dos anéis de crescimento e do teor de Pb no lenho das árvores de *A. columnaris* mostrou-se eficiente no monitoramento ambiental através da dendroquímica.

Palavras-chave: Dendrocronologia; Dendroquímica; *Araucaria columnaris*; Monitoramento Ambiental

ABSTRACT

Tree rings of *Araucaria columnaris* Hook: anatomical and densitometrical characterization and environmental monitoring applicability

The present work has the aim to characterize the micro anatomical features of the tree rings of the *A. columnaris*, determinate the age and the growth rate, analyze the lead concentration in a tree ring sequence previously dated and to verify the applicability of the this specie in the environmental monitoring using the dendrochemistry techniques. It is defined as the quantitative and qualitative measure of the micro and macronutrients and trace elements in the tree rings. It indicates retrospective changes in the uptake and translocation. These were selected trees of *A. columnaris* located in the “Campus Luiz de Queiroz” of the ESALQ/USP in two different sites. The first is an area near the Centenário Avenue that is characterized by the intense flux of vehicles and been one of the principal rote of access to the districts and state highways. The second site is located inside the Campus of the ESALQ, 150 m far from the first site. That is an area with low anthropogenic pressure. The trees in this site were considered to be testimonies. These were collected tree wood samples through the not destructive method. The anatomical characterizations were done considering the norms of AIWA and with the auxiliary of the images analyze system. The X ray densitometry was used to check the variations in the tree rings density. The growth rate and the age of the trees were determinate by the dendrochronology technique. It permitted an exact correspondence of the tree rings and the years in the calendar. The dated tree rings lead concentration of each site was analyzed with graphite furnace atomic absorption spectrometry. The dendrochemistry results show that the Pb concentrations in the *A. columnaris* tree rings during the last 30 years were low and with a cyclic pattern, the growth rate was not affected by the tree rings lead concentration, the tree rings and Pb concentration methodology of analyze was adequate to by used in the environmental monitoring.

Key-words: Dendrochronology; Dendrochemistry; *Araucaria columnaris*; Environmental Monitoring

1 INTRODUÇÃO

A intensa utilização dos recursos naturais pelo homem, principalmente no último século, gerou um passivo ambiental em escala cada vez maior, traduzindo-se, muitas vezes, pelo surgimento de áreas contaminadas ou de baixa qualidade ambiental.

Define-se área contaminada como sendo um “local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou, até mesmo, natural” (CETESB, 2003b).

Para melhor conhecer os processos de contaminação, muitos métodos de monitoramento ambiental foram desenvolvidos, utilizando equipamentos sofisticados ou organismos vivos, o biomonitoramento.

Desde a década de 60, vários pesquisadores como Furukawa (1961 apud HAGEMEYER, 1993), Sheppard e Funk (1975), Hagemeyer (1993), Fukuoka e Kishi (1995), Taniguchi et al. (1995), Watmough (1999) e Punshon et al. (2003) têm realizado estudos utilizando a análise dos teores de elementos traço em anéis de crescimento anuais das árvores de diversas espécies, como ferramenta de biomonitoramento ambiental desenvolvendo, assim, uma idéia já estabelecida no século XVIII.

Nas árvores, a contaminação ambiental pode alterar as taxas anuais de crescimento em altura e em diâmetro do tronco, a estrutura anatômica, as características físicas, como a densidade aparente, e incorporar elementos traço no interior do lenho. Desta forma, as árvores registram em seu lenho, ano após ano, as impressões do meio onde vivem, tornando possível o estudo e resgate das condições ambientais ao longo de sua vida.

No Brasil, desde a década de 70, já se detectavam áreas contaminadas próximas aos centros industriais, quando foram tomadas iniciativas para minimizar o impacto sobre o ambiente (CETESB, 2003a). Contudo, no monitoramento ambiental não foi incluída a aplicação dos anéis de crescimento das árvores devido a falta de uma metodologia adequada a realidade ecológica e ambiental do país.

Pelo exposto, o presente estudo visa a aplicação dos anéis de crescimento de espécies florestais no biomonitoramento ambiental através da caracterização anatômica dos anéis de crescimento e da dendroquímica na detecção da poluição por chumbo.

Como objetivos específicos visa (i) caracterizar os anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris*, quanto a sua estrutura anatômica microscópica, (ii) determinar a sua idade e a taxa de crescimento, (iii) analisar o teor de chumbo em uma seqüência de anéis de crescimento anuais previamente datados, (iv) estabelecer um mapeamento cronológico da poluição e (v) verificar o potencial da utilização da espécie no monitoramento ambiental do chumbo nos anéis de crescimento.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão Bibliográfica

2.1.1 A família Araucariaceae e as principais espécies

A família Araucariaceae apresenta dois gêneros principais, *Araucaria* e *Agathis*, com distribuição restrita ao hemisfério Sul (GREGUSS, 1955). Esses gêneros possuem diversas espécies florestais cuja madeira é amplamente utilizada em vários países para polpa, faqueados, laminados, etc. Além disso, alguns exemplares são utilizados em ornamentação e paisagismo.

O gênero *Agathis* ocorre na Indochina, Malásia, Indonésia e Filipinas, estendendo-se a Nova Guiné, Nova Zelândia e Fiji, em latitudes variadas e desde o nível do mar até as montanhas. As árvores podem atingir até 60 m de altura e de 1,5-2,0 m até mais do que 3 m de diâmetro, com os troncos retilíneos, cilíndricos e com poucos ramos (CHUDNOFF, 1984).

O gênero *Araucaria* encontra-se distribuído em parte da Oceania, sudoeste Asiático (CHUDNOFF, 1984) e na América do Sul com duas espécies, *Araucaria araucana* e *A. angustifolia* (NTIMA, 1968). A *Araucaria cunninghamii* é uma árvore de grande porte, simétrica e pode atingir 50-70 m de altura, com fuste reto, cilíndrico e com desrama natural produzindo tronco com 30 m livre de ramos (HOWCROFT, 1986). A árvore de *Araucaria hunsteinii*, nativa de Papua Nova Guiné, apresenta maior dimensão em relação a *A. cunninghamii*, com copa piramidal a arredondada, folhas glabras, verde-claro a verde, lanceoladas a estreitamente lanceoladas, casca vermelha a marrom-acinzentada, destacando-se em placas (HOWCROFT, 1978).

No Brasil, a *Araucaria angustifolia* constitui-se no único representante nativo do gênero, sendo árvore de grande porte, com importância ecológica e econômica nas regiões de ocorrência, principalmente no sul do País (SCHNEIDER et al., 1992). As árvores apresentam fuste retilíneo, cilíndrico, às vezes bifurcado, com 4-8 verticilos de inserção dos galhos, que destacando-se com a sua idade. É uma espécie dióica com microsporângio cilíndrico e macrosporângio em hélice multisseriada, formando um estróbilo solitário, folhas simples, perenes, alternadas, oblongo-lanceoladas, acuminadas com uma ponta aculeada (TOMAZELLO FILHO, 1986).

A *Araucaria araucana* é a segunda espécie de ocorrência natural na América do Sul (JOLY, 1975), ocorrendo nas florestas argentinas e chilenas de alta montanha onde, apesar das

condições climáticas, apresenta características favoráveis, como grande porte, excelente forma e produção de madeira de boa qualidade para movelaria, etc. (DONOSO; SCHMIDT, 1991).

2.1.2 Dendrologia das árvores de *Araucaria columnaris*

A *Araucaria columnaris* é originária da Nova Caledônia, possessão francesa no Pacífico Sul que inclui a Ilha da Nova Caledônia, Ilhas da Lealdade, Ilhas Chesterfield, grupos menores de ilhas e atóis, entre estas, a Ilha dos Pinheiros, com 158 Km² que apresenta a maior área de seu litoral coberta com árvores da espécie (CHERRIER, 1986). O território mais próximo à Nova Caledônia é Vanuatu, a nordeste, seguindo-se Fiji, a leste, e uma série de territórios australianos: o Território das Ilhas do Mar de Coral, a oeste, a ilha Norfolk, a sueste, e a ilha Lord Howe e recifes próximos, a sudoeste.

As árvores de *A. columnaris* são consideradas coníferas resinosas de grande porte, podendo alcançar até 1,20 m de diâmetro e 50 m de altura, na fase jovem a copa têm forma mais ou menos cônica pontiaguda e estreitamente colunar tabular quando adulta, com ramos secundários horizontais com até 2 m de comprimento e diâmetro de 5 cm e ramos terciários laterais e pendentes. As folhas jovens são lanceoladas, agudas e pungentes, com cerca de 1,2 cm de comprimento e as adultas, marcadamente ovaladas, com 5-6 mm de comprimento e 3 mm de largura; o microsporângio é ovóide com 3-4 cm de comprimento, o macrosporângio elíptico, com 11-15 cm e as escamas são aladas e providas de apêndices de 0,8 cm voltados para o ápice do cone (MARCHIORI, 1996; RODRIGUES, 1996; CHERRIER, 1986; SARRAILH et al., 2004).

A casca das árvores de *A. columnaris* geralmente é cinza, 15-20 mm de espessura destacando-se em placas horizontais (SARRAILH et al., 2004). A madeira é clara com características físicas e mecânicas médias e indicada para carpintaria interna pelo fácil entalhe e baixa durabilidade quando exposta ao tempo (CHERRIER, 1986).

2.1.3 Características do lenho de algumas Araucariaceae

A história filogenética das Araucariaceae é amplamente discutida por Greguss (1955), que considera as características botânicas e anatômicas do lenho. Em função da estrutura primitiva dos raios do lenho, a família Araucariaceae representa um tipo ancestral entre as coníferas vivas.

Além disso, os dois gêneros de Araucariaceae (*Araucaria* e *Agathis*) se distinguem anatomicamente dos demais gêneros de coníferas pelo arranjo alternado das pontoações areoladas na parede das traqueídes, sendo às vezes difícil a diferenciação entre *Araucaria* e *Agathis* (GREGUSS, 1955).

Agathis australis apresenta um lenho marrom avermelhado ou amarelo escuro e superfície lustrosa, geralmente sem distinção entre o cerne e o albarno. Possui importância econômica na Nova Zelândia, sua região de origem pela produção madeira e de goma para a indústria de verniz (CHUDNOFF, 1984). As árvores formam anéis de crescimento visíveis no lenho e as traqueídes de lenho inicial e tardio possuem parede celular com 3 e 5-6 μm de espessura, respectivamente (GREGUSS, 1955)

Por outro lado, *Araucaria angustifolia* apresenta lenho normalmente amarelo a quase branco; em algumas situações, com tonalidades róseas ou levemente pardacentas e manchas avermelhadas, provenientes de traumatismos (MAINIERI; PEREIRA, 1965). O lenho mostra sob aspectos microscópicos parênquima axial ausente, raios unisseriados, excepcionalmente bisseriados, traqueídes de secção poligonal a arredondada, pontoações areoladas na parede radial e em disposição alternada de 1-3 fileiras. Os anéis de crescimento são distintos a olho nu, com transição gradual entre o lenho tardio e o inicial, demarcados por fileiras de traqueídes de paredes ligeiramente mais espessas (MAINIERI; CHIMELO, 1989)

A descrição da anatomia do lenho de árvores de *Araucaria columnaris* apresentada na literatura especializada por Greguss (1955) com árvores de Numea – Nova Caledônia, indica anéis de crescimento indistintos, demarcados por leve redução do diâmetro do lume das traqueídes na região terminal do lenho tardio e por pontoações areoladas arranjadas irregularmente em 2-3 linhas alternadas.

2.1.4 Dendrocronologia

O estudo dos anéis de crescimento foi iniciado em 1901 com o astrônomo Andrew Ellicott Douglass que ao observar a relação entre os ciclos da atividade solar e o clima terrestre, vislumbrou que o tronco das árvores cresce como uma medida indireta e aproximada do clima. Douglass baseou na premissa de que os anéis de crescimento são resultado do suplemento de nutrientes e que dependem, amplamente, da quantidade de água disponível principalmente em clima seco e, portanto, são considerados medidas da precipitação pluviométrica. Ao aprofundar

as suas análises, observou o mesmo padrão de espessura dos anéis de crescimento (largo ou estreito) em diferentes árvores da mesma espécie crescendo no mesmo período (ROBINSON, 1989), possibilitando a datação cruzada (a coincidência da largura dos anéis de crescimento e/ou outras características, espessura do lenho tardio, falsos anéis de crescimento, etc.) entre diferentes árvores e povoamentos florestais. A datação cruzada de amostras do lenho de árvores vivas permite determinar o ano de formação dos anéis de crescimento, coincidindo-os com os anos do calendário (BROWN, 2003).

Assim, a dendrocronologia tornou-se uma técnica amplamente utilizada na datação das árvores, colaborando com a arqueologia (SCHWEINGRUBER, 1988), e com o estudo da relação entre a largura dos anéis de crescimento e as variáveis climáticas (FRITTS et al., 1963).

Os trabalhos de Douglass e de seus orientados, com destaque para Schulman, evidenciaram que a largura dos anéis de crescimento de espécies de coníferas em clima seco está intimamente relacionada com a precipitação da estação de crescimento (FRITTS, 1974). De fato, como as variações climáticas influenciam muitos parâmetros de crescimento das árvores (ex.: largura dos anéis de crescimento, densidade da madeira, dimensão das células do lenho), estas relações têm sido utilizadas para a reconstrução das condições ambientais ocorridas no passado de cada região (FORGET; ZAYED, 1995).

A especialização e o aprofundamento das pesquisas tornaram a dendrocronologia uma ciência pluridisciplinar surgindo, gradativamente, novas disciplinas como a dendroclimatologia, dendroecologia e dendroquímica (TOMAZELLO FILHO et al., 2001).

A dendroclimatologia visa a reconstrução do clima em determinada região através da cronologia da largura dos anéis de crescimento, sendo a densitometria de raios X um dos melhores métodos para a reconstrução da temperatura de verão no hemisfério norte (SCHWEINGRUBER et al., 1989).

A dendroecologia tem como objetivo determinar a relação que ocorre, ano após ano, entre o clima, as condições do sítio e o crescimento das árvores para avaliar os fatores exógenos e endógenos que influenciam o desenvolvimento da comunidade vegetal (SCHWEINGRUBER, 1996).

Lewis (1995) define a dendroquímica como a mensuração quanti e qualitativa dos níveis de micro e macro nutrientes e de elementos traço nos anéis de crescimento das árvores, indicando mudanças retrospectivas na sua absorção e translocação. Para a sua aplicação é

fundamental que a concentração dos elementos químicos nos anéis de crescimento do lenho das árvores indique a sua presença e disponibilidade no ambiente (HAGEMEYER, 1993).

Estas aplicações e resultados das pesquisas em dendrocronologia resultaram na sua indicação como ferramenta valiosa no estudo das alterações ambientais de longo prazo, permitindo um melhor entendimento das atuais mudanças climáticas globais (FRITTS et al., 1963).

2.1.5 Métodos de estudo dos anéis de crescimento

Segundo Tomazello Filho et al. (2001) as árvores mostram uma reação às variáveis ambientais (temperatura, precipitação, etc.) que afetam seus inúmeros processos fisiológicos (respiração, fluxo de seiva, transpiração, etc.) refletindo na atividade cambial e, conseqüentemente, na anatomia do lenho. Portanto, as variáveis ambientais são registradas nos anéis de crescimento, os quais expressam os eventos ocorridos no passado e no ano corrente.

Dentre essas variáveis ambientais, citam-se a luz, água, temperatura, fertilidade do solo, a composição da atmosfera, as características físicas e químicas do solo, os insetos e outros organismos que afetam a atividade cambial (KOZLOWSKI, 1971). A alteração das variáveis ambientais reflete no crescimento das árvores e na largura dos anéis de crescimento, que podem ser mais largos ou estreitos.

Rao e Rajput (1999) relacionaram a atividade cambial das árvores de *Tectona grandis* com os fatores climáticos (temperatura do ar e a precipitação), com o câmbio apresentando a maior taxa de divisão celular em elevados níveis de precipitação e temperatura (35 °C), com dormência na estação seca. A variação dos fatores climáticos e as alterações induzidas na estrutura anatômica do lenho, incluindo a formação dos anéis de crescimento, foram também verificadas em árvores de *Quercus sp* por Salvador et al. (1997).

Para a interpretação das constantes alterações do lenho e da largura e estrutura dos anéis de crescimento anuais das árvores são aplicados vários métodos como:

Medição da largura dos anéis de crescimento: pela mensuração da largura dos anéis de crescimento obtém-se a série cronológica das amostras do lenho das árvores e, em seguida, a sua sincronização (PILCHER, 1989). Posteriormente, baseando-se no conceito do modelo agregado linear procede-se a padronização das séries, direcionando o estudo conforme o objetivo

proposto. Os detalhes do método são apresentados por Fritts (1976), Cook e Kairiukstis (1989) e Schweingruber (1996).

Densitometria de raios X: método desenvolvido por Polge (1963) e que consiste na radiografia das amostras do lenho em equipamento de raios X e leitura dos filmes radiográficos em microdensitômetro, com os valores de densidade ótica transformados em densidade aparente. Os detalhes desse método são apresentados por Amaral (1994), Amaral e Tomazello Filho (1998) e Schweingruber (1989);

Teores dos elementos químicos: a determinação dos elementos traço nos anéis de crescimento pode fornecer informações valiosas sobre as variações ambientais (FORGET; ZAYED, 1995) sendo conhecidos, até a presente data, mais de 70 elementos químicos que podem ser absorvidos pelos vegetais. Entretanto, para os estudos de dendroquímica não deve ocorrer a migração do elemento químico entre os anéis de crescimento, podendo distorcer ou alterar a interpretação dos resultados das análises ambientais (KAIRIUKSTIS; KOCHAROV, 1989). Os detalhes da metodologia são apresentados por Lewis (1995) e Hagemeyer (1993).

2.1.6 Aspectos envolvidos no estudo da dendroquímica

O estudo da dendroquímica direcionado ao monitoramento ambiental deve atender a algumas premissas de acordo com a literatura (FORGET; ZAYED, 1995; SCHWEINGRUBER, 1996; HAGEMEYER, 2000) sendo que (i) os elementos químicos encontrados nos anéis de crescimento devem ser diretamente proporcionais em quantidade às encontradas no ambiente, (ii) a distribuição radial dos elementos químicos nos anéis de crescimento deve ser estável ao longo dos anos ou, ao menos, que não ocorra a mobilização dos elementos nos sentidos vertical e horizontal na região do cerne e (iii) o lenho das árvores deve ser procedente de locais com comprovado histórico de poluição para a sustentação teórica da pesquisa.

Para o atendimento destas premissas e o entendimento do potencial das árvores no monitoramento ambiental, Forget e Zayed (1995) afirmaram da necessidade de explorar os mecanismos fisiológicos envolvidos com a (i) interação química e a mobilização dos elementos no ambiente, (ii) absorção dos metais e os (iii) diferentes fatores que controlam a disponibilidade e a mobilidade de cada elemento químico no tecido vegetal.

A escolha da espécie arbórea constitui-se em um dos principais aspectos da dendroquímica (CUTTER; GUYETTE, 1993) tendo sido demonstrado que as plantas possuem

diferentes mecanismos genéticos responsáveis pela absorção e translocação dos metais (CHEN, 2004). Os fatores envolvidos na seleção das espécies para os estudos de dendroquímica são fundamentados no (i) habitat (amplitude ecológica, formação e datação dos anéis de crescimento, folhagem, profundidade do solo), (ii) xilema (mudanças químicas, alterações anatômicas e físicas) e no (iii) elemento químico de interesse (absorção, mobilidade e método de análise) (CUTTER; GUYETTE, 1993).

2.1.7 O chumbo no ambiente terrestre

O chumbo é relativamente abundante na crosta terrestre, com uma concentração média de 10 a 20 µg/g, sendo as emissões vulcânicas, o intemperismo geoquímico e as névoas aquáticas as suas maiores fontes naturais (WHO, 1995).

O chumbo encontra-se na atmosfera na forma de partículas e quando em suspensão no ar podem ser transferidas para compartimentos ambientais (solo, plantas, lagos, rios, sedimentos, etc.) por deposição seca ou úmida. A remoção do chumbo é rápida quando comparada com a de outros elementos principalmente pela via úmida (precipitação). O tamanho das partículas de chumbo é o principal fator no transporte aéreo, quando grandes (diâmetro > 2 µm) a sua deposição ocorre próxima à fonte emissora, caso contrário podem deslocar-se por vários quilômetros (PAOLIELLO; CHASIN, 2001).

O chumbo é geralmente encontrado no solo nas formas de Pb orgânico e PbHCO_3 , em solos ácidos na forma de Pb^{+2} e PbSO_4 e em alcalinos como PbCO_3 , $\text{Pb}(\text{CO}_3)_2^{-2}$ e PbOH (GREGER, 1999). Há um consenso de que apenas uma pequena fração do chumbo presente no solo está disponível para ser absorvida pelas plantas (DAVIES, 1990). Sua concentração varia entre 10-70 µg/g influenciadas, principalmente, pela atividade antropogênica e pelo seu transporte através do ar uma vez que seu acúmulo ocorre em geral por deposição (WHO, 1995).

Na sua maior parte, o chumbo é fortemente retido e pouco mobilizado, principalmente por lixiviação, em solos de pH neutro a alcalino. São vários os fatores que interferem na sua mobilização e absorção como o pH do solo, composição mineral, quantidade e tipo de matéria orgânica, presença de colóides e óxidos férricos, características de troca iônica e sua quantidade (PAOLIELLO; CHASIN, 2001; GREGER, 1999).

Os metais para serem absorvidos devem estar em formas específicas ou os vegetais devem possuir mecanismos adaptados à sua absorção. Segundo Ross (1994) um aumento do pH

do solo eleva a retenção do Pb, pois este se precipita como carbonato; em solos ricos em matéria orgânica o chumbo apresenta-se fortemente fixado, na forma de complexos húmicos e fúlvicos (SILVEIRA et al., 2003).

O chumbo é retido na camada superficial (2–5 cm) de solos com $\text{pH} > 5$ e com até 5% de matéria orgânica. Nos solos com alto teor de matéria orgânica e pH entre 6-8, o chumbo pode formar complexos orgânicos insolúveis (condição rara nos solos brasileiros). Em solo com pH entre 4-6, os complexos formados tornam-se solúveis podendo sofrer lixiviação ou ser absorvidos pelos vegetais (WHO, 1995; ZHU et al., 2004). De maneira geral, o chumbo é pouco móvel no solo (CHEN et al., 2004).

A quantidade de Pb e de outros metais presentes na solução do solo e disponíveis para a absorção pelas plantas tem sido avaliada por inúmeros pesquisadores. Segundo Mattiazzo et al. (2001) esta determinação é complexa e depende das características do solo, metal avaliado, espécie de planta e dos outros elementos. Alguns extratores químicos como as soluções de DTPA, ácidas (0,1 M de HCl e Mehlich-1), de quelantes e ácidos (Mehlich-3), neutras de sais (CaCl_2 , MgCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e de acetato de amônio têm sido utilizadas sem mostrar eficiência.

Como exemplo, Zhu et al. (2004) sugerem que as formas de chumbo trocáveis são geralmente as disponíveis para as plantas sendo que o pH do solo influencia na sua transformação de uma forma em outra. Ao discutir os resultados para *Brassica oleracea* os autores detectaram que 95% das variações nas concentrações de chumbo encontradas na parte aérea das plantas estão relacionadas às alterações das suas formas trocáveis e no pH do solo; para as plantas de *Brassica campestris* esse valor é de 50%.

2.1.8 Mecanismos de absorção de metais pelas plantas

Forget e Zayed (1995) estabelecem que as rotas de absorção de elementos químicos pelas plantas são as raízes, folhas e a casca. A complexibilidade desses mecanismos de absorção e os fatores envolvidos tornam difícil definir precisamente qual a proporção de cada elemento encontrado nos anéis de crescimento é proveniente de cada das três vias de absorção.

O sistema radicular é o principal órgão de contato das plantas com os elementos químicos presentes no solo e quando interceptados pelas raízes entram no apoplasto e podem ser transportados para o interior da célula (i) via apoplasto ou (ii) ligados permanentemente a substâncias de carga negativa da parede celular (GREGER, 1999).

O movimento do metal da solução externa do solo para o apoplasto da raiz é um processo passivo, não metabólico e caracterizado por fluxo de massa ou difusão resultado de um gradiente de concentração (TAIZ; ZEIGER, 2004). Os elementos de carga positiva ficam retidos nos poros da rede de celulose da parede celular e, dependendo da densidade de cargas negativas, estes podem ser concentrados e através do gradiente criado na membrana ocorre o seu transporte (Ex.: Pb^{2+}) para o interior da célula. Contudo, ainda não está perfeitamente definido o mecanismo pelo qual os elementos tóxicos atravessam a membrana plasmática, sendo os diferentes canais de íons considerados como hipóteses, por exemplo, o canal de Ca^{2+} pode ser uma importante via de acesso para Cd^{2+} (GREGER, 1999).

A corrente transpiratória dos vegetais é o principal caminho pela qual os elementos químicos absorvidos percorrem o apoplasto passivamente e são levados aos órgãos superiores. Os íons podem ser distribuídos por translocação lateral passiva do fluxo de seiva orgânica para o xilema em formação, sendo o elemento químico depositado e complexado no tecido lenhoso (FORGET; ZAYED, 1995).

Existem vários fatores que interferem nos mecanismos de absorção dos elementos químicos pelas plantas, conferindo evitância ou tolerância. Os principais mecanismos de tolerância das plantas são (i) fixação do íon na parede celular, (ii) redução do seu transporte através da membrana, (iii) efluxo ativo, (iv) compartimentalização e (v) complexação com fitoquelatinas (PRASAD, 1995). Ross (1994) definiu as fitoquelatinas como metabólitos secundários das plantas do grupo das metalotioninas, capazes de reduzir as concentrações citotóxicas de íons livres, formando quelatos no citoplasma das células, com sua síntese ligada à presença do próprio metal.

Os mecanismos de exsudação das fitoquelatinas estão relacionados ao transporte dos elementos químicos para o interior da célula ou a sua exclusão do tecido vegetal. Segundo Prasad (1995) as fitoquelatinas complexam-se diretamente com o Cd e se ligam com Pb e Hg por competição com esses elementos. Os complexos “fitoquelatinas-íons livres” são menos tóxicos para as plantas que o íon livre, podendo estar em concentrações de 10-100 vezes maior que o tolerável para a forma Cd^{+2} , por exemplo, no interior da célula vegetal sem causar danos graves,

O pH da rizosfera é um fator importante na absorção de elementos: algumas espécies de plantas podem sintetizar e exsudar ácidos orgânicos, alterando o pH da sua rizosfera, deixam o chumbo em formas de difícil absorção ou formando complexos. Yang et al. (2000) verificaram

que as raízes de variedades de arroz tolerantes a Pb exudam ácido oxálico, formando um precipitado rico em Pb, demonstrando que esses ácidos orgânicos têm importante papel na tolerância ao Pb, que é absorvido em menor quantidade.

A segunda rota de absorção de elementos químicos pelas plantas é via folha, tendo sido detectadas altas concentrações de íons na sua superfície concentrações de íons na sua superfície, principalmente em áreas poluídas. Praticamente todos os elementos traço podem ser encontrados na água da chuva sendo, entretanto, difícil estabelecer a relação entre a sua deposição e os níveis existentes nas folhas ou em outras partes dos vegetais, como o lenho, sendo esta rota de absorção em dendroquímica ainda incerta (FORGET; ZAYED, 1995).

Alguns elementos químicos, provenientes da atmosfera, podem também ser absorvidos pela casca das árvores através de deposição seca ou úmida, sendo aplicados no monitoramento ambiental de poluentes como sulfatos, nitratos e compostos orgânicos. Estes elementos acumulam-se nas camadas mais externas da casca das árvores e seu teor decresce exponencialmente para o interior do lenho, indicando uma limitada difusão (BELLIS et al., 2002). Desta forma, como na absorção foliar, é difícil avaliar a importância desta rota de entrada de elementos minerais no interior da planta e a sua aplicação no monitoramento ambiental através dos anéis de crescimento (FORGET; ZAYED, 1995).

Os elementos químicos absorvidos pela raiz, folha ou casca são translocados até o xilema onde ficam incorporados, entretanto, muitas vezes estes elementos podem ser deslocados e ultrapassam os limites do anel de crescimento (BELLIS et al., 2002), constituindo-se em variável a ser considerada nas análises (FORGET; ZAYED, 1995). Neste sentido, Cutter e Guyette (1993) referem-se à mobilidade dos elementos no interior do lenho e os classificaram com base na solubilidade e na razão carga iônica/raio iônico em (i) altamente móveis (As, K, Na, Mg, N, S, Cl, B), (ii) moderadamente móveis (Ca, Sr, Mn, Zn, Rb, Cu, Mo) e (iii) de baixa mobilidade (Fe, Mo, Ni, Sn, Ba, Al, Pb, Cd).

2.1.9 Efeito da poluição na anatomia do lenho e no crescimento das plantas

Barceló e Poschenrieder (1999) resumiram os principais efeitos da toxidez por Zn, Cd, Al, Cu e Pb na estrutura interna e morfologia das raízes de plantas indicando a (i) redução do seu alongamento, (ii) danos nas suas extremidades, (iii) redução do número de raízes absorventes, (iv) redução na biomassa radicular, (v) aumento ou redução das raízes laterais, (vi) aumento da

suberização e lignificação, (vii) redução no diâmetro dos vasos e (viii) alterações estruturais da hipoderme e endoderme.

A anatomia do lenho de árvores de *Tibouchina pulchra* expostas à poluição atmosférica demonstra a existência de pressão de seleção sobre as plantas para superar as limitações nutricionais e fluxo hídrico, corroborando com o diagnóstico de diminuição da taxa de crescimento de plantas em áreas poluídas (MAZZONI-VIVEIROS et al., 1995).

Em regiões da Serra do Mar – SP, Segala Alves (1995) observou alterações na dimensão e frequência dos vasos e fibras do lenho de árvores de *Cecropia glazioui*, como resultado da contaminação dos solos pobres e ácidos por poluentes das indústrias de fertilizantes.

Segundo Barceló e Poschenrieder (1999) o efeito tóxico dos íons no sistema vascular (xilema e floema) das plantas foi pouco estudado, com indicações da redução do diâmetro dos vasos do xilema em concentrações tóxicas de Cd, Zn, Al e Cr e como o Pb induzindo o aumento da frequência dos vasos no protoxilema de raízes jovens de milho.

A redução da taxa de crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Pinus densiflora* parece ser resultado da reação à deposição dos poluentes sobre a superfície das acículas e não dos teores desses elementos químicos no lenho (FUKUOKA; KISHI, 1995).

Fritts (apud KOZLOWSKI, 1971) observou que as condições ambientais do ano anterior em relação à do ano corrente têm igual ou maior efeito na variação da largura dos anéis de crescimento das árvores de *Fagus grandifolia*.

Kurczynska et al. (1997) observaram a redução do número de células do floema de árvores de *Pinus sylvestris* em sítios com elevada concentração de SO₂, NO_x, e NO₃ em comparação com os de baixa concentração desses poluentes.

2.1.10 Anéis de crescimento aplicados no monitoramento ambiental

Segundo Amato (1988 apud THOMAS et al., 1996) a proposta da utilização de árvores como biomonitores ambientais data de 1737. A análise dos anéis de crescimento poderá contribuir para a resposta de importantes questões como (i) o ambiente atual é mais poluído do que o passado ou os dados analíticos são resultados do avanço das técnicas de análise? e (ii) as séries cronológicas dos anéis de crescimento podem fornecer informação para estudos de épocas passadas? Neste aspecto, a dendroquímica tem como vantagem a facilidade da coleta de amostras

do lenho das árvores e a execução de análises químicas com métodos laboratoriais rotineiros (HAGEMEYER, 2000).

Com esse enfoque, a partir da década de 60, vários trabalhos, contribuíram para o entendimento da detecção de elementos químicos nos anéis de crescimento do lenho das árvores e sua relação com a qualidade ambiental do passado.

Os exemplos da aplicação da dendroquímica como ferramenta de monitoramento ambiental nas últimas quatro décadas são inúmeros, com alguns autores expressando sua reserva e críticas nesta aplicação dos anéis de crescimento (HAGEMEYER, 1993). Uma relação de referências bibliográficas com os autores, data da publicação, gêneros florestais, elementos químicos analisados e sua aplicação no monitoramento ambiental é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

(continua)

Autores	Ano	Gêneros	Elementos químicos	Monitoramento**
Wright e Will*	1957	Pinus	Ca, K, Mg, N, Na, P	n.m.
Orman e Will*	1960	Pinus	Ca, K, N, P	n.m.
Furukawa*	1961	Cedrus, Chamaecyparis, Cryptomeria, Gingko, Larix, Pinus, Taxodium	Ca, K, N, P	n.m.
Schroeder e Balassa*	1961	Ulmus Ailanthus, Alnus, Cercidiphyllum, Cinnamomum, Fagus,	Cd, Pb	+
Furukawa*	1963	Fraxinus, Idesia, Lithocarpus, Phellodendron, Prunus, Quercus, Robinia	Ca, K, N, P	n.m.
Furukawa*	1964	Cryptomeria, Pinus	Ca, K, N, P	n.m.
Galligan et al.*	1965	Pseudotsuga	Mn	n.m.
Ault et al.*	1970	Quercus	Pb	?
Holtzman*	1970	Carya, Quercus, Ulmus	Pb	+
Spoza et al.*	1973	Pinus, Quercus	Pb	-
Hampp e Holl*	1974	Acer, Robinia, Tilia	Pb	-
Rolfe	1974	Acer, Pinus, Quercus	Pb	?
Ward et al.*	1974	Acer, Aesculus, Fraxinus, Platanus, Quercus, Ulmus	Pb	+
Sheppard e Funk	1975	Pinus	Ag, Au, Co, Cr, Fe, Hg, K, La, Mn, Na, Rb, Sb, Zn	+
Suzuki*	1975	Cryptomeria	Cd, Pb, Zn	+
Gilboy et al.*	1976	Ulmus	K	?

Tabela 1 – Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

(continuação)				
Autores	Ano	Gêneros	Elementos químicos	Monitoramento**
Lepp*	1976	Acer, Fagus, Populus, Tilia, Ulmus	Cu, Pb	+
Tian e Lepp*	1977	Acer, Larix	Pb, Zn	?
Ward et al.*	1977	Beilschmiedia	Ag	?
Hermann et al.*	1978	Quercus	Cu, Fe, Mn, Pb, Zn	+
Kardell e Larson*	1978	Quercus	Cd, Pb	?
Gilboy et al.*	1979	Quercus	Cd	+
Symeonides*	1979	Pinus	Cd, Cu, Pb, Zn	-Zn, Cd +Cu, Pb
Ferguson et al.*	1980	Tilia	Pb	-
Schrimpff*	1980	Abies	Cd, Cu, Mn, Pb, Zn	+
Baes e Ragsdale*	1981	Carya, Liriodendron	Pb	+
Suzuki*	1981	Cryptomeria	Cd	+
Isermann*	1983	Picea, Prunus, Quercus	Al, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn	+
Baes e McLaughlin	1984	Pinus	Al, Fe, Mo, Ti, Zn	+
Baes et al.*	1984	Pinus	Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mn	+
Kazmierczakowa et al.*	1984	Fagus	Cd, Cr, Fe, Pb, Zn	-
Legge et al.*	1984	Pinus	Al, As, Cl, Cu, Mn, P, Si, Zn	?
Berish e Ragsdale	1985	Carya	Al, Cd, Cu, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn	+
Kosmus e Grill*	1985	Aesculus	Cd, Cu, Pb, Zn	?
McLaughlin e Braker*	1985	Picea	Fe	+
Hagemeyer e Breckler*	1986	Quercus	Cd	-
Taneda et al.*	1986	Castanea, Cryptomeria, Kalopunax, Prunus, Thujopsis	Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Zn	-
Okada et al.*	1987	Cryptomeria	Al, Br, Ca, Cl, Cr, K, Mg, Mn, Na, Rb	-
MacLauchlan et al.*	1987	Alnus	Ca, Cu, Fe, Pb, Sr, Zn	+
Okada et al.*	1988	Cryptomeria	Cl, K, Mg, Mn	-
Truby*	1988	Abies, Pseudotsuga, Quercus	Pb	-
Hagemeyer et al.*	1989	Fagus	Ca, Cd, K, Mg, Na, Ni, Pb, Zn	-
Long e Davis*	1989	Quercus	Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr	-
Queirolo*	1989	Quercus	Cd, Cu, Pb, Zn	?
Hall et al.*	1990	Pseudotsuga	Ce, La, Nd, Sm	+
Okada et al.*	1990	Cryptomeria	Ca, Cl, K, Mg, Mn, Na, Rb	-
Zech et al.*	1990	Fagus	Mg, S	+
Gilfrich et al.*	1991	Quercus, Sassafras	Ca, Cl, Co, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Ti, Zn	?
Guyette et al.	1991	Juniperus	Cd, Pb	+
Ohmann e Grigal*	1991	Abies, Acer, Pinus, Populus	Al, B, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, N, Ni, P, Pb, S, Zn	?
Zayed et al.*	1991	Picea	Al	?

Tabela 1 – Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

					(conclusão)
Autores	Ano	Gêneros	Elementos químicos	Monitoramento**	
Oliveira et al.	1994	Pinus	Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, S		?
Martins	1995	Aspidosperma	Al, C, Ca, Cl, Co, Cr, Fe, H, K, Mn, Ni, O, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Ti, Zn, W		?
Zhang et al.	1995	Picea	Hg		-
Abadei	1995	Picea	Ca, Cr, Fe, Mn, P		+
Harju et al.	1996	Pinus, Picea	Ca, Cu, Fe, K, Mn, Zn		+
Watmough e Hutchinson	1996	Acer	Ca, Cd, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sr, Zn		+
Oliveira	1996	Pinus	Br, Co, Cs, Fe, K, Mn, Na, Rb, Zn		n.m.
Larsson e Helmisaari	1998	Pinus	Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Rb, Sr, Zn		+
Watmough et al.	1998	Acer	Ca, K, Mg, Pb		n.m.
Aoki et al.	1998	Diospros, Cryptomeria	Ca, Cu, Mn, Rb, Zn		n.m.
Prohaska et al.	1998	Picea	Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Pb, Sr, Zn		?
Watmough et al.	1999	Acer	Pb		+
Penninckx et al.	1999	Fagus	Al, Ca, K, Mg, Mn, N, P		?
Martin et al.	2001	Pinus	Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn		n.m.
Yanosky et al.	2001	Quercus	Hidrocarbonetos clorados		-
Bellis et al.	2002	Quercus	Pb		+
Fisher et al.	2002	Fagus	Ca, Pb		+
Orlandi et al.	2002	Larix	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb		+
Thiry et al.	2002	Pinus	Cs		?
Punshon et al.	2003	Salix	Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, U		+
Watmough e Hutchinson	2003	Acer, Tilia, Fagus, Fraxinus	Cu, Cd, Pb, Zn		-

* citado por Hagemeyer (1993)

** Dendroquímica como ferramenta no monitoramento ambiental, sendo (+) possível; (?) questionável; (-) não aplicável; (n.m) não mencionado ou não estudado. Adaptado e ampliado de Hagemeyer (1993).

A aplicação dos anéis de crescimento no monitoramento ambiental envolve aspectos relacionados ao (i) comportamento do elemento químico no lenho; (ii) correlação entre os níveis do íon na atmosfera e no lenho das árvores; (iii) absorção do elemento químico e sua deposição no lenho e (iv) detecção dos elementos químicos (WATMOUGH, 1999).

Segundo Cutter e Guyette (1993) o processo fisiológico da transformação do alburno em cerne provoca mudanças de natureza anatômica, química e física no lenho das árvores e a movimentação radial dos elementos químicos móveis como o As, K, Na, Mg, P, N, S, Cl, B.

Hagemeyer (1995) analisando a concentração de Cd no lenho de árvores de *Quercus robur* em 2 idades em um período de 10 anos, verificou o deslocamento do pico de concentração do elemento químico em 10 anéis de crescimento no limite cerne/alburno.

Os estudos relacionados à alteração na concentração de íons nos anéis de crescimento das árvores em função das fontes de poluição são escassos. Watmough e Hutchinson (1996) confirmaram a relação entre a composição química da atmosfera e a dos anéis de crescimento de árvores de uma plantação de *Acer pseudoplatanus*, em Liverpool, Inglaterra, distante de 0,5 km de uma refinaria de Cu e Cd, submetida ao monitoramento ambiental e coleta de dados de deposição seca e úmida desde 1975.

Ecklund (1995 apud SCHWEINGRUBER, 1996) determinou uma estreita relação do teor de Cd e Pb nos anéis de crescimento de árvores de *Quercus robur*, Suíça, em relação à (i) distância de uma indústria de baterias e (ii) a quantidade de Cd e Pb emitida no ar/ano.

2.1.10 Métodos de determinação de elementos químicos nos anéis de crescimento

Schweingruber (1996) destaca a (i) espectrometria de absorção atômica, (ii) ativação de neutrônica instrumental (INAA), (iii) os métodos de voltagem, (iv) a emissão de raios X induzida por partículas (PIXE), (v) a emissão de raios gama induzida por partículas (PIGE), (vi) a espectrometria de plasma (ICP) e (vii) a fluorescência de raios X (XRF) nas análises dos elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies arbóreas.

Sheppard e Funk (1975), analisaram os anéis de crescimento de árvores de *Pinus ponderosa* no monitoramento ambiental de íons tóxicos no rio Spokane – EUA por ativação neutrônica, obtendo resultados relacionados aos detectados na análise de sedimentos e demonstrando a aplicação dos anéis de crescimento na dendroquímica.

Aoki et al., (1998) determinando a concentração de Mn, Zn, Ca e Rb no lenho das árvores de *Diospros kaki* e de *Cryptomeria japonica* utilizaram a emissão de raios X induzida por partículas (PIXE) e a ativação de neutrônica instrumental (INAA). Os teores de Mn, Zn e Ca no lenho das árvores foram praticamente os mesmos nos dois métodos de análise, com pequena diferença para o Rb.

Prohaska et al. (1998) utilizaram a espectrometria de massas com fonte de plasma (LA-ICPMS) para obter a variação dos elementos químicos dos anéis de crescimento de árvores de *Picea abies*, de 20 anos, próximas a uma usina de alumínio. Os elementos químicos com mobilidade e comportamento similares apresentaram padrões de distribuição próximos. A determinação circular nos anéis de crescimento mostra uma variação de 60% na concentração dos

elementos químicos em relação à posição geográfica, seguida das alterações na densidade da madeira.

O método de espectrometria de massas com fonte de plasma (ICP-MS) foi utilizado por Watmough et al. (1999) para determinar a concentração de ^{206}Pb e ^{207}Pb em amostras dos anéis de crescimento do lenho de árvores de *Quercus rubra*.

Martin et al. (2001) aplicaram a técnica de microfluorescência de raios X (μ -XRF) na análise do teor de íons nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *Pinus resinosa* em regiões afetadas por chuva ácida e por poluição.

Recentemente no Brasil, Simabuco (2002) utilizou a metodologia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) e por reflexão total (TXRF) para quantificar o nível de poluição do ar pela análise dos tecidos vegetais distribuídos em áreas de grande concentração de indústrias e de intenso tráfego de veículos: os métodos de análise têm a vantagem de preservar as amostras, permitindo a realização de análises de comprovação.

O uso de técnicas mais sofisticadas na análise de elementos traço nos anéis de crescimento, principalmente nas duas últimas décadas, tem demonstrado que os limites de detecção estão em constante queda e a interpretação dos resultados mais precisa (WATMOUGH, 1999).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização das árvores de *Araucaria columnaris*

No presente estudo, foram selecionadas árvores de *Araucaria columnaris* localizadas no “Campus Luiz de Queiroz” da ESALQ/USP, plantadas em 1970¹ com o objetivo de compor o ambiente paisagístico do parque. As araucárias são pinheiros elegantes e ornamentais com típico padrão colunar, caule tortuoso, copa bem desenvolvida e ramos verdes de 2 m de comprimento, características comuns da espécie (RODRIGUES, 1996).

2.2.2 Caracterização dos sítios

Foram selecionados dois sítios de estudo, denominados Sítios A e B. O Sítio A corresponde à área próxima à Avenida Centenário, uma das principais vias de acesso aos bairros da cidade e às estradas estaduais, e se caracteriza pelo intenso fluxo de veículos. Neste sítio, as

¹ Comunicação oral do Sr. Airton Bonato, funcionário do Departamento de Zootecnia e responsável pelo plantio.

árvores de *Araucaria columnaris*, durante longo período do seu crescimento e desenvolvimento, ficaram expostas à influência antrópica, como a carga poluidora resultante da queima de combustíveis fósseis dos veículos automotores (Figura 1). As 12 árvores de *A. columnaris* foram agrupadas em 3 parcelas denominadas A1, A2 e A3, pela sua proximidade e para a análise dendroquímica, sendo excluídas as árvores com ferimentos e/ou bifurcação do tronco no DAP (Figura 2).

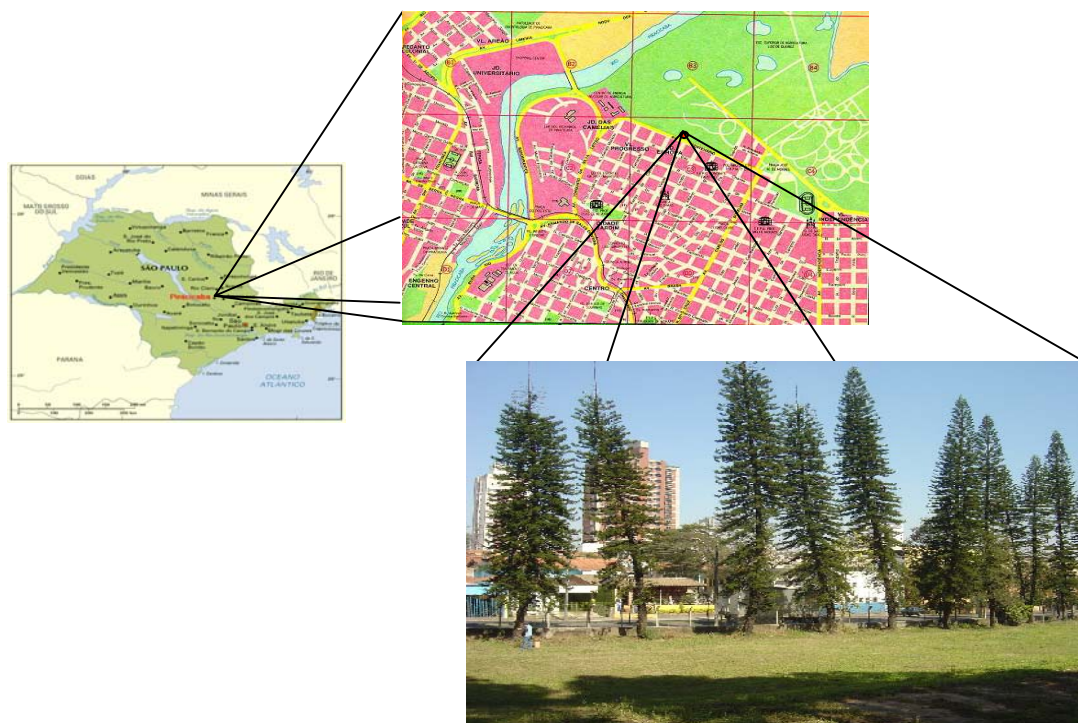


Figura 1 – Localização do Sítios A e aspectos gerais das árvores de *A. columnaris*

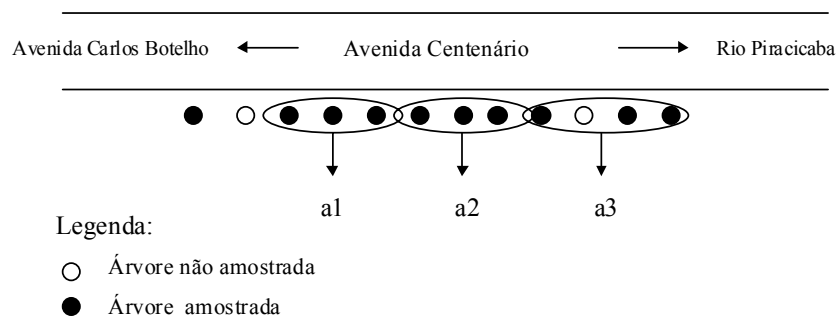


Figura 2 – Disposição das árvores de *A. columnaris* no Sítio A com as 3 parcelas amostradas.

O sítio B (Figura 3) localiza-se no interior do Campus da ESALQ, acerca de 150 m do sítio A e próximo ao Setor de Equoterapia, caracterizado pelo reduzido fluxo de veículos e baixa pressão antrópica, com as árvores de *A. columnaris* consideradas como testemunha.



Figura 3 – Aspecto geral do Sítio B evidenciando as árvores de *A. columnaris*.

2.2.3 Caracterização do clima

O clima é classificado como subtropical úmido, tipo Cwa segundo Köppen, com verão úmido e inverno seco. O período de outubro-março contribui com 977 mm do total de 1257 mm de precipitação média anual. A temperatura média oscila de 17,9°C no mês mais frio (julho) a 24,5°C no mais quente (janeiro) (SENTELHAS; PEREIRA, 2000). O balanço hídrico mostra o período de abril-outubro com déficit hídrico e de novembro-março com excesso de água no solo (Figura 4).

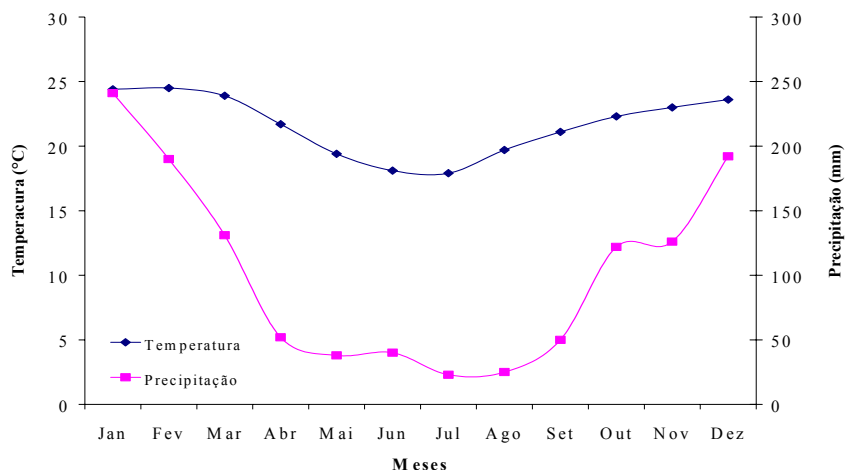


Figura 4 – Médias mensais de temperatura (°C) e de precipitação (mm) para o Município de Piracicaba – SP. Fonte: EMBRAPA (2004)

2.2.4 Caracterização do solo

O solo é classificado como litossolo vermelho, com horizonte A moderado, textura argilosa a muito argilosa, fértil, boa drenagem, coloração arroxeadada, com estrutura em blocos subangulares no horizonte B e formado a partir de rochas básicas (VIDAL-TORRADO; SPAROVEK, 1993). Uma pequena variação de cor e de textura ao longo do perfil do solo indica vários sub-horizontes medianamente individualizados com transição variando de clara a difusa (BRASIL, 1960). Amostras de solo foram coletadas nos sítios A (1, 2, 3) e B, com resultados apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise do solo dos sítios A (1, 2 e 3) e B (n=4)

Sítio	pH	M.O.	Pb	P	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V%
	CaCl ₂	g/dm ³	µg/g	mg/dm ³	cmol _c /dm ³						
A1	5,7 ^{A*}	43,5 ^A	14,6	97,8 ^A	6,9 ^A	87,8 ^A	33,8 ^A	28,0 ^B	128,4 ^A	156,4 ^A	81,5 ^A
A2	5,8 ^A	37,0 ^B	17,1	91,5 ^A	5,1 ^B	82,5 ^A	36,5 ^A	25,0 ^B	124,1 ^A	149,1 ^A	83,0 ^A
A3	4,2 ^B	35,8 ^B	16,2	8,8 ^C	1,2 ^C	39,3 ^B	14,5 ^B	64,8 ^A	54,7 ^B	119,4 ^B	45,8 ^B
B	5,6 ^A	34,0 ^B	327	65,0 ^B	4,6 ^B	76,0 ^A	33,0 ^A	28,0 ^B	113,6 ^A	141,6 ^{AB}	80,0 ^A

* Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05;

2.2.5 Caracterização anatômica do lenho e dos anéis de crescimento

Para a caracterização da estrutura anatômica microscópica do lenho e dos anéis de crescimento foram coletadas amostras do lenho na altura do DAP (orientação NO para evitar a madeira de compressão) de 6 árvores de *A. columnaris*, sendo 3 do sítio A (1 árvore/parcela) e 3 do sítio B.

As amostras do lenho (cilindro de 6 cm de comprimento) foram extraídas do tronco das árvores pelo método não destrutivo, em novembro/2004, utilizando um extrator motorizado Tanaka TED 262R (Figura 5) acoplado a uma sonda metálica (20 mm de diâmetro). As amostras foram identificadas e armazenadas em sacos plásticos para as análises no Laboratório de Anatomia da Madeira e Anéis de Crescimento do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.



Figura 5 – Extrator motorizado e sonda metálica utilizada na coleta de amostras do lenho das árvores de *A. columnaris*.

Das amostras do lenho recém-coletadas foram cortados corpos de prova (1x1x1,5 cm) nos planos transversal e longitudinais radial e tangencial, imersos em solução de água+glicerina e levados a ebulição para o amolecimento. Em seguida, foram fixados no micrótomo de deslize e obtidos cortes histológicos finos (15-20 μm de espessura) dos três planos e transferidos para vidros de relógio, clarificados (hipoclorito de sódio, 20%), lavados (ácido acético, 1%), desidratados (série alcoólica, 20-100%), lavados (acetato de N-Butila), corados (safranina) e montados em lâminas de vidro (bálsamo do Canadá) (JOHANSEN, 1940; SASS, 1951).

A estrutura anatômica do lenho das árvores e dos anéis de crescimento foi descrita de acordo com as “Normas e Procedimentos aplicados na Anatomia da Madeira” do IBAMA (1992) e da “List of Microscopic Features for Softwood Identification” da IAWA (IAWA COMMITTEE, 2004). Amostras do lenho contíguas às utilizadas no preparo das lâminas histológicas foram cortadas e transferidas para tubos de ensaios com ácido acético + peróxido de hidrogênio (1:1); fechados e transferidos para estufa (60°C, 48 h.) para a maceração e dissociação dos elementos celulares (FRANKLIN, 1937).

2.2.6 Densitometria de raios X dos anéis de crescimento

Para a determinação por densitometria de raios X da densidade do lenho, largura dos anéis de crescimento e da idade das árvores foram extraídas amostras radiais do lenho das 13 árvores de *A. columnaris* dos 2 sítios em abril/2004 com sonda de Pressler (10 mm de diâmetro). As amostras do lenho foram identificadas e acondicionadas em sacos plásticos e em laboratório foram seccionadas para a avaliação por densitometria de raios X e para a mensuração da largura dos anéis de crescimento.

A análise densitométrica dos anéis de crescimento do lenho das árvores foi conduzida pela: (i) secagem das amostras a temperatura ambiente; (ii) fixação das amostras em suporte de madeira e corte de seções transversais (1 mm de espessura) em equipamento de dupla serra paralela; (iii) identificação dos cortes transversais com tinta nanquim por não interferir nas radiografias; (iv) extração da resina do lenho em solução álcool-tolueno (1:1) por 8 h em equipamento Soxhlet; (v) acondicionamento das amostras em câmara de climatização (18° C, 50%UR, 12 h) até atingir a umidade de equilíbrio de 12%; (vi) disposição das amostras e cunha-padrão de acetato de celulose sobre filme de raios X Kodak modelo T Mat – G/RA (18 x 24 cm); (vii) exposição das amostras e filme em equipamento de Raios X Hewlett Packad, modelo Faxitron 43805N por 5 minutos e (viii) revelação do filme radiográfico em equipamento automático Macrotec modelo MX-2 (AMARAL, 1994; AMARAL; TOMAZELLO FILHO, 1998). As imagens radiográficas das amostras do lenho das árvores e da cunha-padrão foram analisadas utilizando-se o software CERD versão 2.08 (MOTHE et al., 1998). Essas etapas das análises foram conduzidas no Laboratório de Anéis de Crescimento do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

2.2.7 Determinação da largura dos anéis de crescimento

A largura dos anéis de crescimento foi determinada na seção transversal das amostras do lenho resultante do corte em equipamento de dupla serra. As amostras do lenho foram coladas em suporte de madeira e o plano transversal foi polido com lixas abrasivas de diferentes granulometrias (80 a 600 grãos/mm²) para destacar e demarcar os limites dos anéis de crescimento. A largura dos anéis de crescimento foi determinada em uma mesa de medição linear modelo Velmex, com deslocamento horizontal (precisão 0,01 mm) acoplada a um microscópio estereoscópico Leica modelo KL e sistema de iluminação de fibra ótica (FERGUSON, 1970; ASHTON, 1981; FERREIRA, 2002).

Os valores da largura dos anéis de crescimento de cada árvore de *A. columnaris* foram considerados como uma série cronológica procedendo-se, desta forma, a sincronização de 10 séries cronológicas do Sítio A e das 3 séries do Sítio B. O controle de qualidade e a verificação da sincronização foram feitos com o programa COFECHA (HOLMES et al., 1986), o qual correlaciona segmentos de cada série com a média das demais, indicando em qual posição (ano) esta é maior, o que possibilita identificar a existência dos falsos anéis de crescimento. Para os estudos de dendrocronologia, utilizaram-se os conceitos estabelecidos por Cook e Kairiukstis (1989), o qual considera as séries de anéis de crescimento como um agregado linear de subséries não observadas, expressa da seguinte forma:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad (1)$$

Onde:

R_t : série de largura de anéis de crescimento observada;

A_t : tendência da largura dos anéis de crescimento relacionada com o tamanho e idade das árvores;

C_t : sinal climaticamente relacionado com o ambiente;

δ : indicador binário relacionado com a presença ($\delta=1$) ou ausência ($\delta=0$);

$D1_t$: distúrbios causados por perturbações endógenas e de ação localizada;

$D2_t$: distúrbios causados por perturbações exógenas que atuam em nível de população;

E_t : variabilidade ano a ano não relacionada com os demais fatores;

t : ano relacionado com cada fator.

Cada série cronológica foi padronizada, retirando-se as tendências de crescimento dos dados de largura dos anéis de crescimento, assumindo que estas são funções das dimensões e da idade das árvores e das perturbações endógenas e exógenas, conforme modelo abaixo:

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t) \quad (2)$$

Onde:

G_t : tendência de crescimento estimada como uma função apenas da idade;

δ : indicador binário relacionado com a presença ($\delta=1$) ou ausência ($\delta=0$);

$D1_t$: distúrbios causados por perturbações endógenas e de ação localizada;

$D2_t$: distúrbios causados por perturbações exógenas que atuam em nível de população.

A tendência de crescimento foi estimada com o programa ARSTAN (HOLMES et al., 1986), o qual ajusta uma função de regressão aos dados de largura dos anéis de crescimento.

$$G_t = b_1 \exp^{-b_2 t} + b_3 t + b_0 \quad (3)$$

Onde:

t : ano de formação de cada anel de crescimento;

b_0 ; b_1 ; b_2 e b_3 : são os coeficientes da equação.

A remoção das tendências foi realizada conforme metodologia indicada por Fritts (1976), cujos dados são transformados em índice de largura dos anéis de crescimento ou em simplesmente “índice”.

$$I_t = \frac{R_t}{G_t} \quad (4)$$

Onde:

I_t : índice de largura dos anéis de crescimento ou índice;

R_t : série de largura dos anéis de crescimento observada;

G_t : tendência de crescimento estimada como função apenas da idade.

A padronização tem dois objetivos (i) remover as tendências não climáticas relacionadas com a idade e (ii) permitir que os valores padronizados de árvores individuais, com diferentes taxas anuais de crescimento, sejam calculados juntos em uma função média. Este processo de padronização tem, também, a vantagem de corrigir a heterogeneidade da variância dos dados de largura do anel de crescimento, uma vez que o desvio padrão dos índices deixa de ser função da média, como ocorria antes da padronização.

Com os dados padronizados (índices) procedeu-se ao cálculo das cronologias médias para cada sítio de estudo, através da média aritmética entre as séries.

2.2.8 Crescimento radial das árvores de *Araucaria columnaris*

Com os valores de largura dos anéis de crescimento devidamente sincronizados foi realizado o estudo do crescimento radial do tronco das árvores de *A. columnaris* em função da idade, do incremento médio anual (IMA) e do incremento corrente anual (ICA) para os 2 sítios.

O crescimento radial do tronco foi determinado pela soma dos valores de largura dos anéis de crescimento de cada série, mensurados a partir de 1978, em cujo ano os dados eram comuns a todas as árvores de *A. columnaris*. Em seguida, realizou-se o cálculo de modelos através de regressão linear múltipla, considerando-se a largura do raio como variável dependente e as variáveis: i ; i^2 ; i^3 ; $1/i$; $\ln(i)$; $\log(i)$; $\log^2(i)$; $\log^3(i)$ e $\ln^2(i)$ como independentes, sendo i a idade contada a partir de 1978.

Através do procedimento estatístico “stepwise”, foi possível determinar quais variáveis eram mais significantes para compor um modelo. Os modelos indicados pelo programa Statistica (STATSOFT, 1999) foram analisados quanto ao coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$); ao erro padrão da estimativa (S_{yx}) e ao valor de F da análise de variância (SCHNEIDER, 1998). Além disso, foram verificados quais modelos atendiam às condições de normalidade, homogeneidade de variância e independência dos dados.

Os modelos que melhor descreveram o crescimento das árvores para cada sítio foram comparados conforme metodologia indicada por Zar (1984), a qual permite determinar se dois modelos iguais, apenas com coeficientes diferentes, estimam uma mesma população através do teste F , conforme cálculo a seguir.

$$F = \frac{\frac{SQr_{total} - SQr_{interação}}{(m+1)(k-1)}}{\frac{SQr_{interação}}{gl_{interação}}} \quad (5)$$

Onde:

SQr_{total} : Soma dos Quadrados dos resíduos do modelo com os dados do dois sítios;

$SQr_{interação}$: Soma dos Quadrados dos resíduos do modelo do Sítio A mais o modelo do Sítio B;

m: número de variáveis independentes;

k: número de modelos testados;

$gl_{interação}$: graus de liberdade dos resíduos do modelo do Sítio A mais do modelo do Sítio B.

Para o estudo do ICA utilizaram-se os dados da largura do anel de crescimento para cada ano, desde 1973. Em seguida, determinou-se o modelo que melhor descreve o comportamento do ICA com o aumento da idade das árvores para os dois sítios através de regressão linear múltipla, tendo por variável dependente o próprio ICA e independente a idade (i) e as demais variáveis utilizadas para o estudo do crescimento radial.

O cálculo do IMA foi realizado pela seguinte equação:

$$IMA = \frac{Raio_t}{n} \quad (6)$$

Onde:

IMA: incremento médio anual;

$Raio_t$: comprimento do raio (mm) no ano t;

n: número de anéis de crescimento no raio;

t: ano.

Dessa forma, optou-se por iniciar os cálculos do IMA no ano de 1978 para que os dados de todas as séries fossem obtidos pelo mesmo valor de n e não houvesse superestimativa dos

valores nos primeiros anos das séries. A determinação dos modelos de IMA, em função da idade das árvores, seguiu os mesmos passos aplicados para o ICA.

2.2.9 Análise do teor de Pb nos anéis de crescimento

Para a determinação do teor de Pb nos anéis de crescimento foram extraídas amostras do lenho de 12 árvores de *A. columnaris*; sendo 9 das parcelas do sítio A e 3 do sítio B. A amostra do lenho de uma árvore do sítio A foi excluída por apresentar coloração anormal indicativo de alteração de natureza química.

As amostras do lenho foram coletadas no DAP (1,3 m) das árvores em junho/2004 pelo método não destrutivo adotando-se o procedimento preconizado na literatura (HALL, 1990; WATMOUGH; HUTCHINSON, 1996) para evitar a sua contaminação por resíduos de metais dos instrumentos. A sonda de Pressler (10 mm de diâmetro) foi lavada em acetona Analar, água destilada e água deionizada e após a coleta das amostras do lenho, novamente lavada com água destilada e deionizada.

Com os anéis de crescimento anuais datados e sincronizados foram determinados os teores de Pb nos anéis de crescimento previamente selecionados. Cada anel de crescimento foi seccionado com lâmina cortante previamente limpa e descontaminada com acetona. Após o corte, as amostras do lenho foram armazenadas em frascos polipropileno (15 ml). Para obter-se a massa mínima de lenho exigida pelo método analítico agruparam-se os anéis de crescimento de 3 árvores de cada sítio, constituindo uma amostra composta, originando 4 parcelas (sítio A1, A2, A3 e B) de 30 anéis de crescimento cada, os quais foram analisados em duplicatas, totalizando 240 determinações de Pb. Todas as etapas analíticas do teor de chumbo no lenho foram realizadas no Laboratório de Química Analítica do CENA/USP.

O material plástico e a vidraria foram limpos pela imersão em banho 50% v/v HNO₃ por 24 h e, posteriormente, enxaguados por cinco vezes com água deionizada. O material descontaminado foi seco em capela de fluxo laminar horizontal Veco e com filtro Hepa, em sala limpa com o ar constantemente recirculado por um sistema de filtração externo. Esse sistema permite que a pressão interna da sala permaneça positiva, limitando a entrada de partículas externas.

Nos processos analíticos foi utilizada água destilada-deionizada, purificada (resistividade de 18 MΩ cm) em sistema Milli-Q[®] (Millipore, Bedford, MA). O ácido nítrico das

soluções foi destilado a temperatura inferior à da ebulição (sub-ebulição), através de destilador de quartzo (H. Kürner, Rosenheim). As soluções-padrão foram preparadas em meio 4,8% v/v HNO₃ a partir de diluições adequadas da solução estoque 1000 mg l⁻¹ de Pb. Curvas analíticas de calibração foram preparadas na faixa de 0,00 a 20,0 µg l⁻¹ de Pb por sucessivas diluições da solução estoque. Utilizou-se o modificador químico convencional 0,05% v/v Pd + 0,03% v/v Mg(NO₃)₂, preparado por diluição a partir de uma solução de PdCl₃ contendo 10,0 g l⁻¹ Pd e de uma solução 10,0 g l⁻¹ Mg(NO₃)₂ da Merck.

Para a determinação do Pb utilizou-se o espectrômetro de absorção atômica Varian SpectrAA-220 com lâmpada de cátodo oco, com corretor de absorção de fundo com lâmpada de deutério e equipado com forno de grafite GTA 110. Foram empregados tubos de grafite pirolítico com plataforma integrada modelo Universal e lâmpada de catodo oco de chumbo da Varian. Todas as medidas foram realizadas em duplicatas e baseadas em absorbância integrada a 283,3 nm (integral da absorbância em função do tempo). O gás de proteção foi o argônio (Air liquide) e para pesagem das amostras utilizou-se balança Mettler modelo AE 100.

Para a análise dos teores de Pb não houve necessidade da moagem prévia das amostras de lenho em moinho de faca. Essas amostras do lenho foram decompostas em duplicatas, transferindo-se alíquotas de 250 mg do material seco para os vasos de digestão, seguindo-se a adição de 6,0 mL de HNO₃ 20% v/v e 2,0 mL H₂O₂ 30% v/v e aplicação de radiação microondas (Tabela 3). Após a digestão das amostras do lenho, os vasos de digestão foram resfriados e o material digerido foi transferido para frascos volumétricos de 50 ml e o volume completado para 25 ml com água ultrapura.

Tabela 3 – Rampa de aquecimento do forno de microondas para a digestão do lenho

Passo	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Potência (w)
1	5	160	1000
2	8	200	1000
3	7	200	1000
4	60	Resfriamento	-

Na leitura das amostras do lenho no espectrômetro de absorção atômica, utilizou-se um programa de aquecimento (Tabela 4), obtendo-se a temperatura da pirólise pela fixação da temperatura de atomização em 1700°C e variação da temperatura de pirólise de 700 até 1100°C. O mesmo procedimento foi feito para a determinação da temperatura de atomização, fixando-se a

temperatura de pirólise em 700 °C e variando-se a temperatura de atomização de 1700 até 2100°C. Estas medidas foram feitas injetando-se 20 µl da solução padrão de 20µg/L em 4,8 % v/v HNO₃.

Tabela 4 – Programa de aquecimento utilizado para determinação de chumbo no lenho em espectrômetro de absorção atômica com forno de grafite

Etapa	Temp.(°C)	Rampa(s)	Vazão de argônio (L.min ⁻¹)
1	85	5,0	3
2	130	20,0	3
3	150	10,0	3
4	1000	10,0	3
5	1000	5,0	3
6	1000	2,0	0
7	2100	0,5	0
8	2100	4,0	0
9	2100	2,0	3

A amostra certificada Rye Grass CRM 281 da National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA com teor de $2,38 \pm 0,11$ µg/g de Pb foi utilizada como referência.

O limite de detecção (LD) foi calculado a partir do desvio padrão de 20 medidas do branco analítico (solução 4,8 % v/v HNO₃) de acordo a equação:

$$LD = \frac{3\sigma}{\alpha} \quad (7)$$

Onde:

LD: limite de detecção;

σ : estimativa do desvio padrão das 20 medidas do branco;

α : coeficiente angular da curva de calibração.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Idade e características dendrométricas das árvores de *Araucaria columnaris*

As árvores de *A. columnaris* possuíam 33 anos de idade na época da coleta das amostras do lenho e apresentavam diâmetro médio de 52,9 e 52,3 cm e altura média de 21,9 e 22 m nos sítios A e B, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 – Características dendrométricas das 13 árvores de *A. columnaris*

Sítio	Árvore (nº)	DAP (cm)	Altura (m)
A	0	44,9	16,0
	2	40,4	19,0
	3	50,6	18,5
	4	61,8	24,5
	5	62,7	20,8
	6	59,8	23,0
	7	55,7	24,0
	8	52,8	23,0
	10	52,5	26,0
	11	48,1	24,5
	B	B1	51,2
B2		55,4	22,0
B3		50,3	22,0

O diâmetro da projeção da copa das árvores era de aproximadamente 6 m para os dois sítios e com a presença de ramos verdes a partir de 2 m de altura do tronco. Algumas árvores apresentaram queima do ápice porém, com novos ramos assumindo o crescimento apical. A produção de cones e sementes ocorreu entre os meses de outubro-dezembro, com a formação de estróbilos por toda a extensão da copa. As árvores exsudam grande quantidade de resina dos ferimentos ou injúrias no seu tronco, exigindo que a coleta das amostras do lenho seja feita com precisão e rapidez, para evitar que a sonda de Pressler fique retida ao tronco em função do endurecimento da resina. A idade das árvores foi determinada pela contagem do número de anéis de crescimento aplicando-se as técnicas de dendrocronologia e comprovada pela data de plantio (1970).

2.3.2 Caracterização anatômica do lenho e dos anéis de crescimento

As árvores de *A. columnaris* apresentaram *Parênquima axial* ausente. *Raios* homocelulares, de células de seção ovóide; geralmente 12 células (3-37 células) (5,7)² de altura, unisseriados, às vezes localmente bisseriados, excepcionalmente acima de 30 células; frequência média de 6,7 raios/mm (5,8-7,3 raios/mm) (0,6); com 321,4 µm (11,7-881,6 µm) (139,4) de altura. *Traqueídes longitudinais* com cerca de 4300 µm (3033,3-6759,0 µm) (627,8) de comprimento e 45,3 µm (30,2-60,7 µm) (7,5) de largura, diâmetro do lume e espessura da parede em média de 7,0 µm (3,4-11,1 µm) (1,3) e 31,3 µm (19,2-5,4 µm) (7,0), respectivamente; no lenho inicial mostram contorno arredondado de seção poligonal, parede menos espessa e lume de maior diâmetro; no lenho tardio mostram contorno quase sempre achatado, com parede ligeiramente espessa e menor lume; poucos espaços intercelulares presentes em ambos os lenhos; pontoações areoladas em disposição alterna de 1 a 3 arranjos verticais, predominando de 2 arranjos, forma hexagonal nas paredes radiais; o contato retilíneo entre pontoações e lado externo arredondado quando em mais de 1 fileira; pontoações do tipo araucarióide, com 2 a 5 pontoações nos campos de cruzamento. *Camadas de crescimento* com transição gradual entre os lenhos inicial e tardio, às vezes notada a olho nu; demarcação por fileiras de traqueídes com paredes mais espessas (Figura 6 e 7).

Os valores de espessura da parede celular indicados por Greguss (1955) para o lenho de *A. columnaris* são quase constantes (5–6 µm) inferiores aos das árvores analisadas (3,4–10,5 µm; média 7 µm) refletindo no contraste e visibilidade dos anéis de crescimento. O diâmetro do lume e a largura das traqueídes não diferiram estatisticamente nos dois sítios estudados. Os valores da largura (média de 45,3 µm, mínima 30,16 µm e máxima 60,74 µm) corroboram com os de Greguss (1955) (45 µm e acima de 50 µm) (Tabela 6).

As árvores de *A. columnaris* apresentam de acordo com a descrição de Greguss (1995) lenho com zonas de crescimento indistintas. No entanto as amostras do lenho das árvores analisadas evidenciaram zonas de crescimento distintas e transição gradual entre os lenhos inicial e tardio (Figura 6) (IAWA COMMITTEE, 2004). As condições climáticas do Município de Piracicaba, com inverno seco e déficit hídrico e com verão úmido e excesso de água no solo são fatores de indução da sazonalidade da atividade cambial e da formação de anéis de crescimento anuais. Os anéis de crescimento formados no xilema após 20 anos de idade das árvores são mais

² valor médio (valor mínimo-maximo) (desvio padrão).

distintos e característicos em função das menores taxa de crescimento do tronco. Em determinados períodos de desenvolvimento das árvores os anéis de crescimento anuais em largura acima de 10 mm apresentam transição pouco distinta entre os lenhos inicial/tardio sendo sua demarcação realizada pela técnica de datação e sincronização.

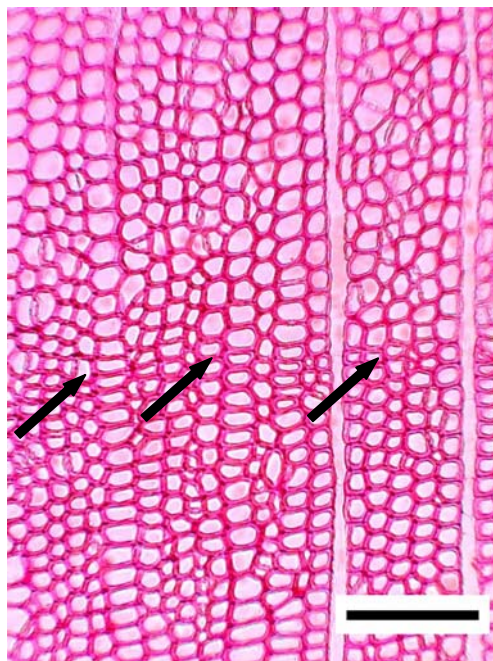


Figura 6 – Seção transversal do lenho das árvores de *A. columnaris* (100x). Setas indicam a transição dos lenhos inicial/tardio dos anéis de crescimento. Escala = 100 μ m.

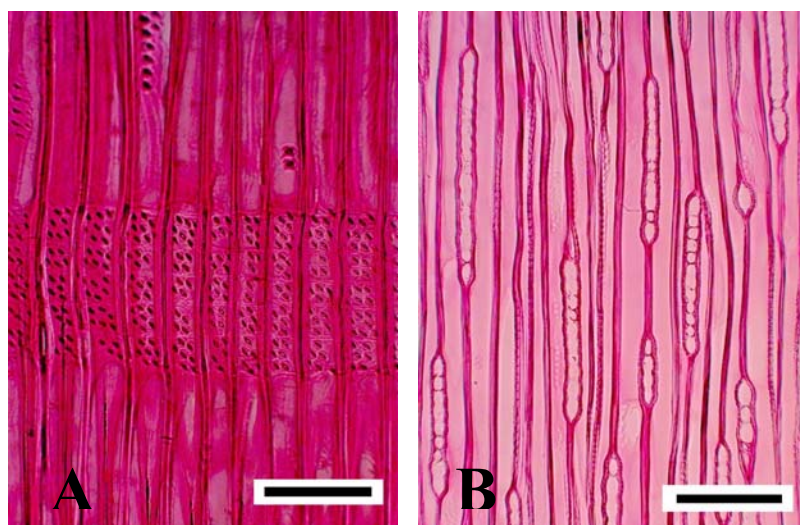


Figura 7 – Anatomia do lenho de *A. columnaris*. A: Corte longitudinal radial (200x); B: Corte longitudinal tangencial (100x). Escalas: A = 100 μ m; B = 200 μ m.

Tabela 6 – Dimensões das traqueídes do lenho de *A. columnaris*. n=25

Sítio	Árvore	Comprimento (µm)	Espessura da parede (µm)	Diâmetro do lume (µm)	Largura (µm)	
A	Ara3	Média	4421,81A*	7,04AB	31,37AB	45,44AB
		Mim.	3033,34	5,21	20,14	32,00
		Max.	6759,01	9,00	44,99	60,53
		Desv. Pad.	767,56	1,06	7,07	7,44
		Coef. Var.	17,36	15,04	22,55	16,38
	Ara6	Média	4309,70A	7,59A	30,38AB	45,57AB
		Mim.	3373,63	5,42	19,23	30,27
		Max.	6046,88	11,10	41,10	57,67
		Desv. Pad.	698,58	1,38	5,53	7,27
		Coef. Var.	16,21	18,20	18,20	15,95
	Ara8	Média	4233,47A	6,94AB	31,74AB	45,62AB
		Mim.	3484,98	3,37	20,45	30,16
		Max.	5095,10	10,53	50,41	58,59
		Desv. Pad.	473,83	1,56	7,85	8,40
		Coef. Var.	11,19	22,51	24,74	18,42
B	AraB1	Média	4370,59A	7,39AB	34,22A	49,00A
		Mim.	3313,77	4,86	22,70	35,69
		Max.	5280,40	10,48	43,76	59,10
		Desv. Pad.	568,72	1,25	6,54	7,04
		Coef. Var.	13,01	16,93	19,12	14,37
	AraB2	Média	4329,62A	6,53AB	28,18B	41,23B
		Mim.	3428,56	3,92	20,68	31,23
		Max.	5577,48	8,99	47,50	57,93
		Desv. Pad.	693,99	1,28	7,29	6,95
		Coef. Var.	16,03	19,54	25,86	16,86
	AraB3	Média	4333,32A	6,52B	31,90AB	44,94AB
		Mim.	3244,61	4,62	20,48	30,72
		Max.	5339,20	8,68	47,19	60,74
		Desv. Pad.	565,72	1,30	6,59	6,69
		Coef. Var.	13,06	19,95	20,67	14,88

* Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Tukey, com $\alpha = 0,05$.

Tabela 7 – Dimensões dos raios do lenho de *A. columnaris*. n=25

Sítio	Árvore	Número de células/raio	Largura do raio (µm)	Comprimento do raio (µm)	Número de raios/mm ²	
A	Ara3	Média	10,24A*	22,39C	290,87A	6,52AB
		Mim.	5,00	15,65	160,43	3,84
		Max.	17,00	28,31	512,73	8,78
		Desv. Pad.	3,55	3,45	90,39	1,34
		Coef. Var.	34,67	15,40	31,08	20,51
	Ara6	Média	10,44A	25,18BC	283,00A	6,21B
		Mim.	3,00	14,56	11,65	3,84
		Max.	24,00	40,82	531,18	8,78
		Desv. Pad.	5,55	6,91	119,99	1,44
		Coef. Var.	53,19	27,45	42,40	23,18
	Ara8	Média	14,12A	20,86C	391,86A	7,02A
		Mim.	4,00	9,76	127,22	4,94
		Max.	37,00	32,04	881,56	9,33
		Desv. Pad.	8,21	4,71	206,03	0,96
		Coef. Var.	58,16	22,60	52,58	13,69
B	AraB1	Média	10,92A	28,78AB	291,72A	6,74AB
		Mim.	3,00	20,41	116,54	3,84
		Max.	17,00	39,14	461,17	9,88
		Desv. Pad.	3,96	5,05	97,73	1,31
		Coef. Var.	36,24	17,55	33,50	19,44
	AraB2	Média	14,60A	23,04C	348,56A	5,82B
		Mim.	6,00	15,65	188,02	4,39
		Max.	27,00	30,16	690,68	7,13
		Desv. Pad.	5,27	3,51	118,34	0,74
		Coef. Var.	36,08	15,22	33,95	12,77
AraB3	Média	10,96A	32,53A	322,46A	7,11A	
	Mim.	4,00	15,65	125,78	4,94	
	Max.	19,00	43,79	600,91	9,88	
	Desv. Pad.	5,03	7,73	150,59	1,34	
	Coef. Var.	45,88	23,77	46,70	18,81	

* Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Tukey, com $\alpha = 0,05$

Para o parênquima radial - estrutura anatômica com função de armazenamento e transporte radial da seiva orgânica (BURGER; RICHTER, 1991) - não foram verificadas diferenças significativas entre os sítios (Tabela 7). Os raios são unisseriados, com ocorrência esporádica de raios bisseriados, com valores médios de 13,4 células/raio, classificados como

médios pela IAWA Committee (2004), de 25,5 μm de largura, 321,4 μm de comprimento e de 6,6 raios/ mm^2 de frequência.

2.3.3 Caracterização do lenho por densitometria de raios X

Os perfis densitométricos radiais do lenho das árvores de *A. columnaris* comprovam as variações da estrutura anatômica do lenho, evidenciando anéis de crescimento distintos, constituídos pelos lenhos inicial e tardio, este de maior densidade aparente. Contudo, o perfil densitométrico das amostras do lenho das árvores (Figuras 8-11) indica que a alternância entre os lenhos inicial e tardio não é característica como de outras coníferas e para as árvores das espécies do gênero (SCHWEINGRUBER, 1988). Para as árvores de *A. columnaris* a variação da densidade aparente do lenho foi de uniforme (árvore Ara 6) a irregular (árvore Ara 5), mesmo quando estas estão distantes de apenas 8 m. Outra particularidade das árvores da espécie, são os maiores valores de densidade aparente do lenho detectados próximo à região da medula, como resultado do processo inicial de formação de cerne, resultando no acúmulo de resina que escurece a madeira, deixando-a com coloração parda.

Ao se comparar os perfis densitométricos das árvores de *A. columnaris* com os de árvores de *A. angustifolia*, apresentados por Wehr e Tomazello Filho (2000) verifica-se que as variações na densidade aparente média do lenho são maiores na *A. Columnaris* (0,51-0,81 g/cm^3), em relação a *A. angustifolia* (0,40-0,60 g/cm^3).

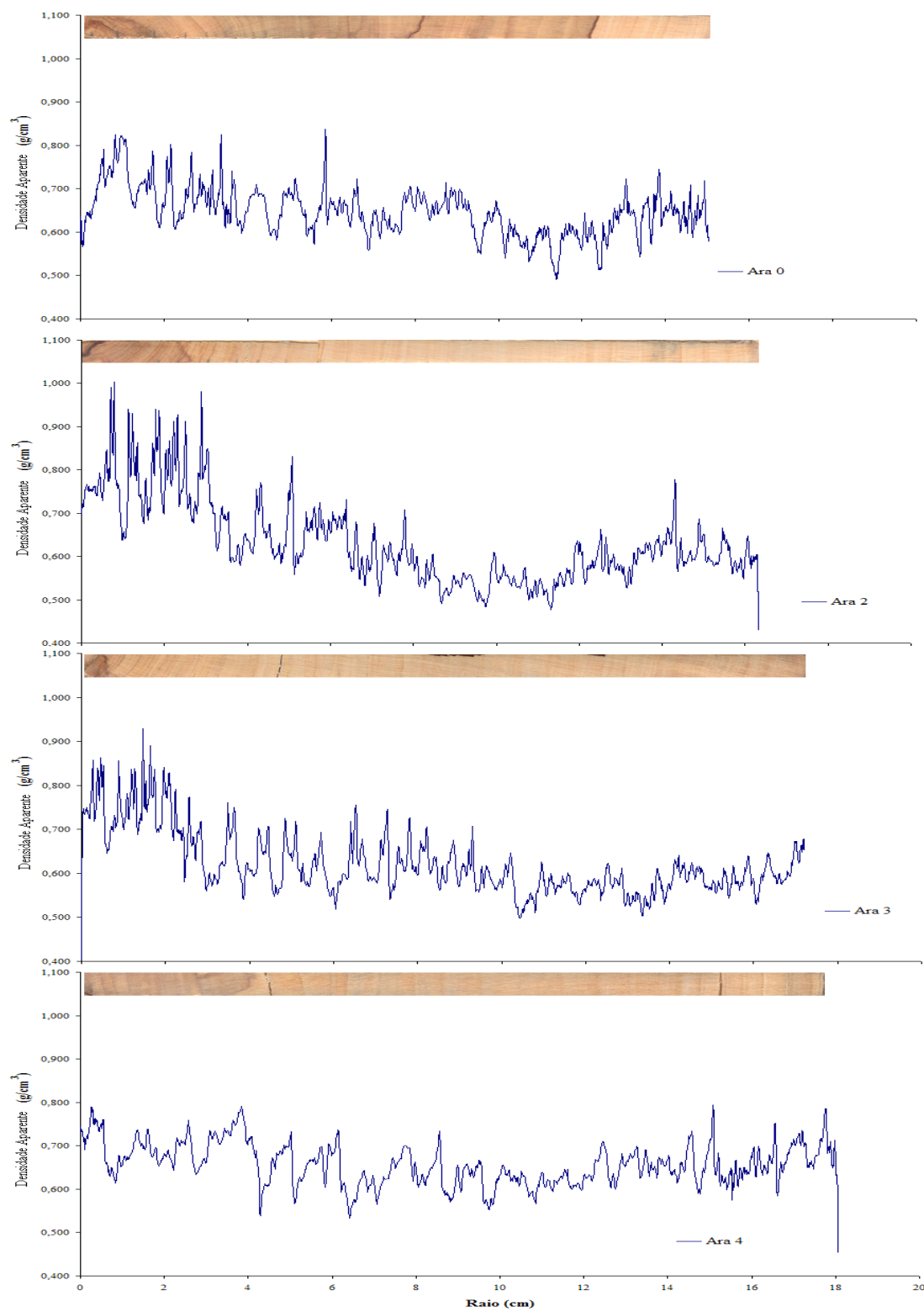


Figura 8 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de *A. columnaris*.

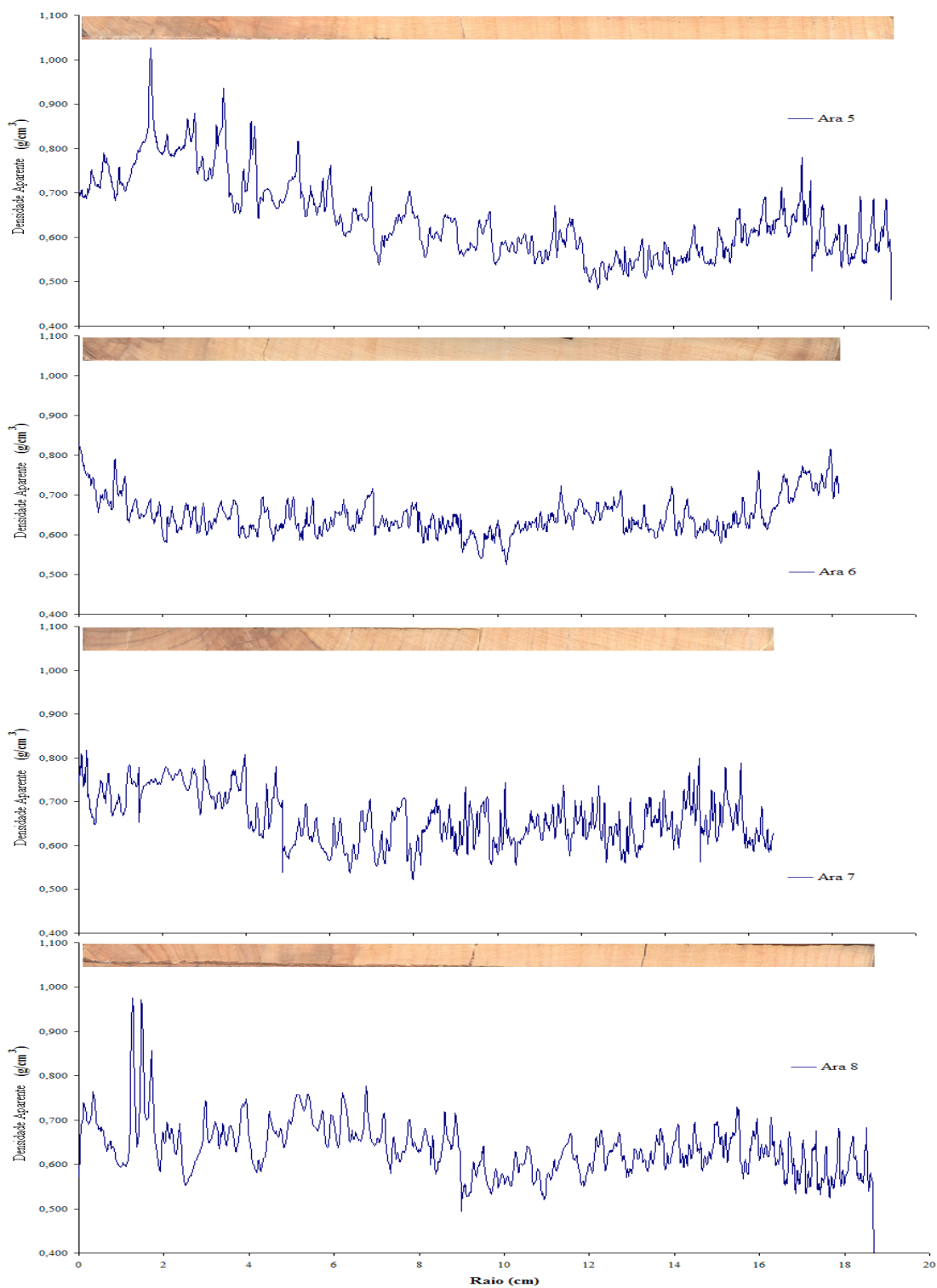


Figura 9 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de *A. columnaris*.

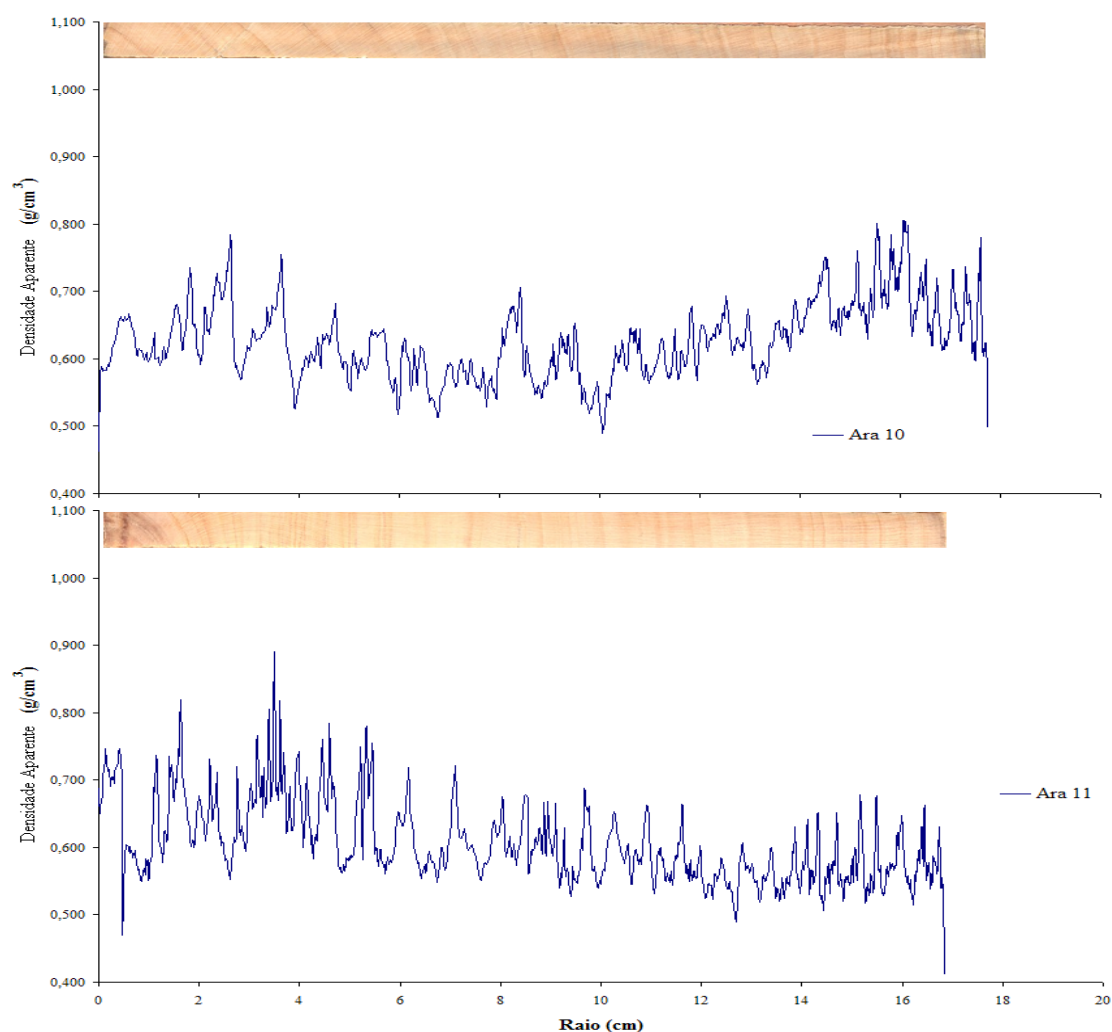


Figura 10 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de *A. columnaris*.

Além disso, a ocorrência de regiões traumáticas no lenho das árvores de *A. columnaris* induz o aumento dos valores da densidade aparente pelo preenchimento do lume das células por resina, abundante no seu lenho. A impregnação da resina interfere no valor da densidade aparente dos anéis de crescimento por atenuar os feixes de raios X, sendo identificada por regiões de picos irregulares nos perfis densitométricos dificultando a distinção dos anéis de crescimento verdadeiros (SCHWEINGRUBER, 1988). Nessas condições a observação da estrutura anatômica macroscópica da seção transversal do lenho polido proporciona a demarcação segura dos limites dos anéis de crescimento.

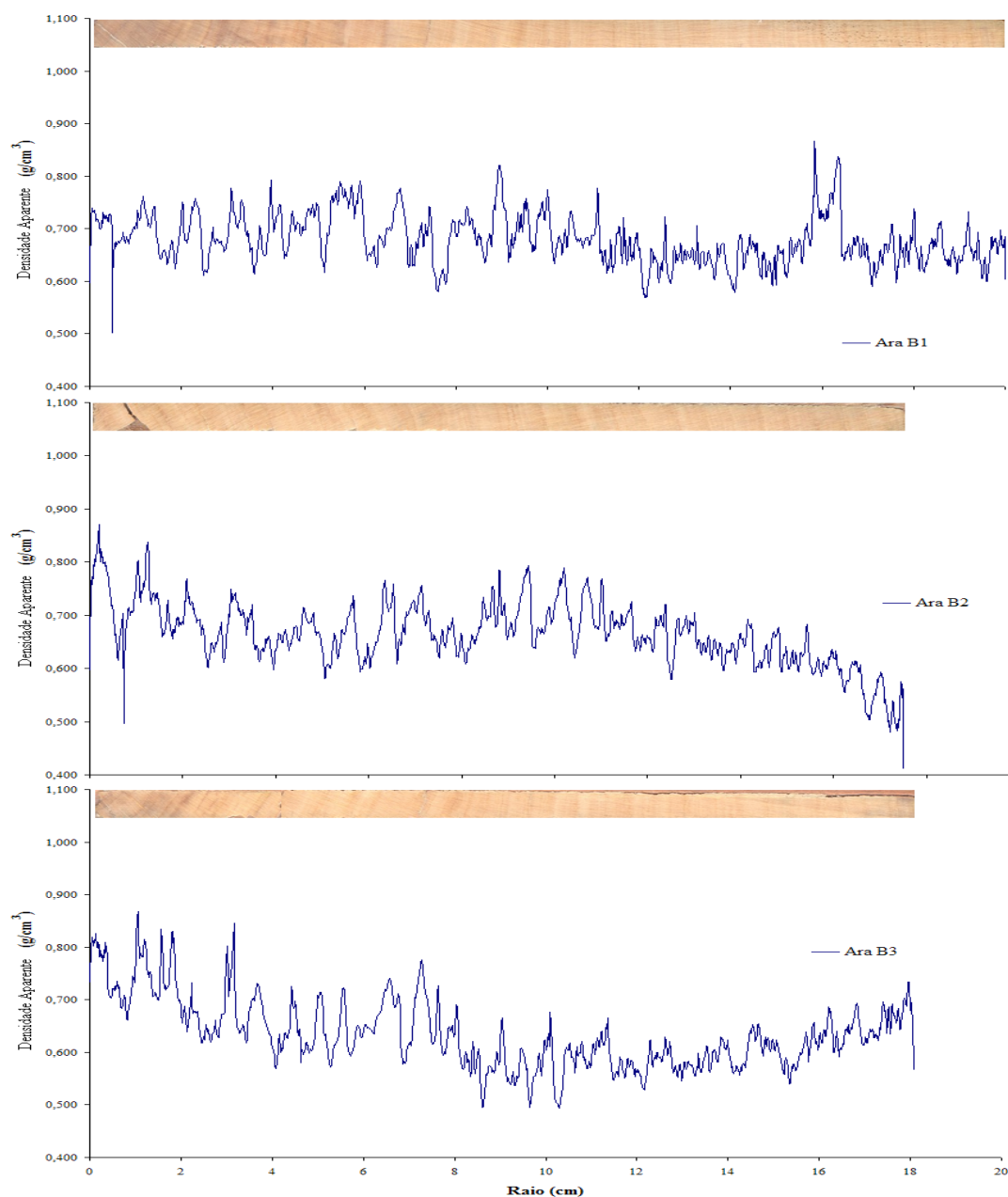


Figura 11 – Perfil densitométrico do lenho de árvores de *A. columnaris*.

A eficiência da demarcação dos limites dos anéis de crescimento por densitometria de raios X e na mesa de mensuração foi comprovada pelo cálculo da relação existente entre a largura dos anéis de crescimento determinada pelas duas metodologias.

O resultado da comparação dos métodos mostrou relação linear com coeficiente de determinação de 0,9480 (Figura 12), com o intercepto da equação determinado como zero, uma vez que os valores iniciam da origem do eixo cartesiano. Como variável dependente considerou-

se o valor da largura do anel de crescimento por densitometria de raios X com valor do coeficiente angular de 0,891441. Mesmo que o valor esperado seja =1 pode ser considerado adequado, pela grande precisão (0,01 mm) das medições no microscópio estereoscópico.

A dispersão dos pontos indica que os anéis de crescimento de menor largura mostraram uma relação mais estreita entre os dois métodos, por serem mais distintos (nítida transição entre os lenhos inicial-tardio) e, portanto, com melhor visualização anatômica e densitométrica. Os anéis de crescimento mais estreitos estão localizados mais próximos à casca, em relação aos mais largos, no centro das amostras.

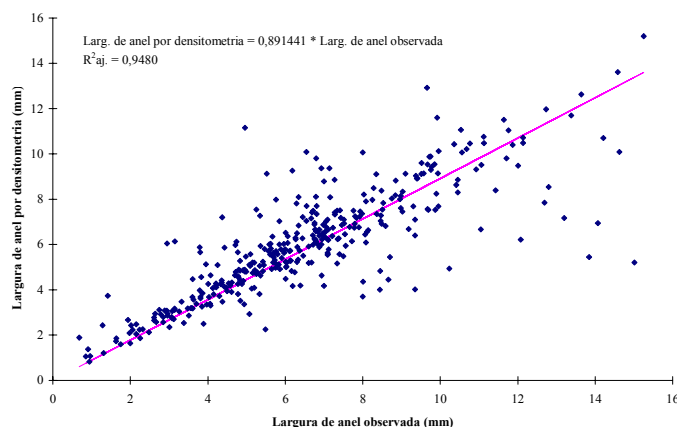


Figura 12 – Relação entre a largura dos anéis de crescimento obtida na mesa de medição e por densitometria de raios X. R^2_{aj} : coeficiente de determinação ajustado

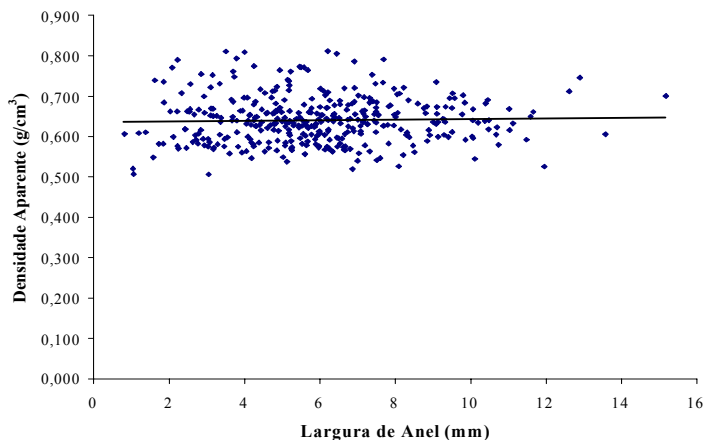


Figura 13 – Relação entre a densidade aparente média (g/cm^3) e a largura (mm) de cada anel de crescimento anual. A linha contínua mostra a tendência dos dados

Contudo, não se verificou relação entre os valores de densidade média aparente e os da largura (mensurada na mesa) de cada anel de crescimento, com a Figura 13 indicando que a densidade aparente é praticamente constante em função do aumento da largura do anel de crescimento.

As densidades aparente média, mínimas e máximas de cada anel de crescimento foram determinadas e aplicou-se uma análise de variância fatorial para verificar a influência do sítio (de cada árvore) e do ano de formação do lenho, sendo que na densidade aparente mínima nenhum dos dois fatores estudados mostrou influência, sugerindo outros mecanismos de controle (Tabela 8). Para as densidades aparente média e máxima dos anéis de crescimento a interação entre o ano e o sítio não foi significativa.

Tabela 8 – Análise de variância fatorial para a densidade aparente mínima (g/cm^3) de cada anel de crescimento em função do ano e do sítio para as 13 árvores de *A. columnaris*

	GL	SQ	QM	F	<i>p</i>
Sítio	1	0,0006	0,0006	0,09	0,7665
Ano	30	0,2058	0,0068	1,07	0,3727
Sítio*Ano	29	0,0719	0,0025	0,39	0,9985
Erro	315	2,0210	0,0064		
Total	375	2,3753			

gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrados médios; F: valor de F calculado; *p* probabilidade de F calculado ser maior que F tabelado.

Para a densidade aparente média do anel de crescimento, verifica-se que o sítio e o ano são influentes (Tabela 9). Neste caso, com o decorrer dos anos há uma alteração diferenciada na densidade média de cada anel de crescimento nos dois sítios, sem haver interação entre sítio e ano. Para determinar a tendência da densidade aparente média, obteve-se uma equação para cada sítio, sendo a densidade aparente a variável dependente e o ano a independente (Figura 14).

Nos dois sítios os valores de densidade aparente média dos anéis de crescimento mostram tendência de decréscimo na fase juvenil, em função dos maiores valores encontrados na região do cerne. Para o sítio A existe a tendência de decréscimo da densidade aparente mínima do lenho até 1993, seguida de aumento e tendência à estabilização dos seus valores nos anos posteriores. No sítio B a densidade aparente mínima mostrou tendência decrescente até o último anel de crescimento embora com padrão menos acentuado a partir de 1980. Os modelos de

variação da densidade aparente média dos anéis de crescimento para os dois sítios são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9 – Análise de variância fatorial para densidade aparente média (g/cm^3) de cada anel de crescimento em função do ano e do sítio para as 13 árvores de *A. columnaris*

	Gl	SQ	QM	F	P
Sítio	1	0,0204	0,0204	8,34	0,0041
Ano	30	0,3140	0,0105	4,28	<0,0001
Sítio*Ano	29	0,0292	0,0010	0,41	0,9973
Erro	315	0,7709	0,0024		
Total	375	1,2539			

gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrados médios; F: valor de F calculado; *p* probabilidade de F calculado ser maior que F tabelado.

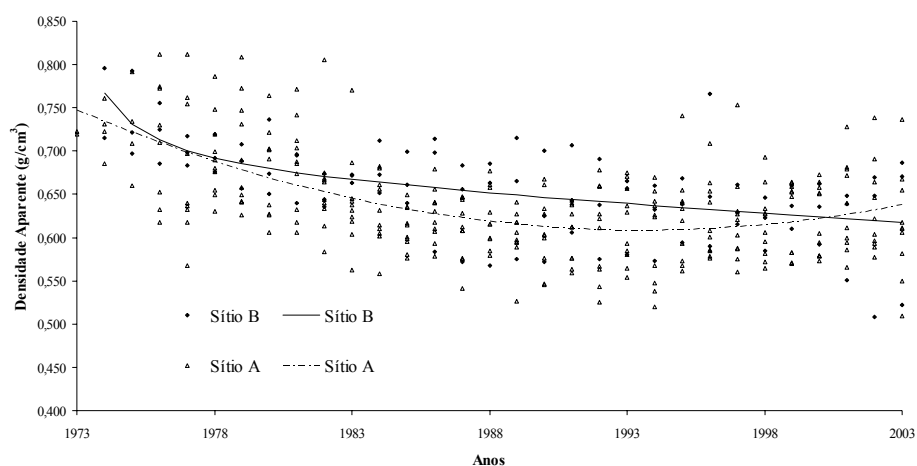


Figura 14 – Modelos para densidade aparente média (g/cm^3) do lenho em função do ano para os dois sítios de árvores de *A. columnaris*

Tabela 10 - Modelos para densidade aparente média (g/cm^3) em função do ano para os dois sítios de árvores de *A. columnaris*

Sítio	Equação	R²aj.	S_{yx}	S_{yx}%	F
A	$y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2$	0,3364	0,04809	7,54	67,19
B	$y = b_0 + b_1 \frac{1}{t} + b_2 t$	0,3584	0,04347	6,61	25,58

Onde: *y*: densidade aparente média (g/cm^3); *t*: ano; *b*₀, *b*₁ e *b*₂: coeficientes da regressão; R²aj.: Coeficiente de determinação ajustado para o número de coeficientes da equação; S_{yx}: Erro padrão da estimativa; S_{yx}%: Erro padrão da estimativa em percentagem; F: valor de F calculado.

A densidade aparente máxima dos anéis de crescimento mostrou-se influenciada pelo sítio e pelo ano (Tabela 11) para o sítio, sendo de 0,015 a probabilidade de $F_{\text{calculado}}$ ser maior que F_{tabelado} , com o fator ano apresentando com a maior influência sobre a densidade aparente máxima. Da mesma forma que para a densidade aparente média, determinou-se um modelo para descrever o comportamento da densidade aparente máxima (Tabela 12).

Tabela 11 – Análise de variância fatorial para densidade aparente máxima (g/cm^3) de cada anel de crescimento em função do ano e do sítio para as 13 árvores de *A. columnaris*

	gl	SQ	QM	F	p
Sítio	1	0,0329	0,0329	5,98	0,0150
Ano	30	0,6241	0,0208	3,79	<0,0001
Sítio*Ano	29	0,0927	0,0032	0,58	0,9599
Erro	315	1,7299	0,0055		
Total	375	2,6958			

gl: graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; QM: quadrados médios; F: valor de F calculado; p Probabilidade de F calculado ser maior que F tabelado.

Os modelos que melhor descreveram o comportamento da densidade aparente máxima em função do ano foram significativos para os dois sítios, apesar do baixo valor do coeficiente de determinação, evidenciando a grande variação desse parâmetro na espécie (Figura 15).

A variação dos três parâmetros de densidade aparente dos anéis de crescimento sugere uma influência do meio ambiente sobre a atividade cambial e a biologia da formação do lenho, com alterações micro-climáticas afetando o desenvolvimento e crescimento das árvores de *A. columnaris*.

Tabela 12 – Modelos para densidade aparente máxima (g/cm^3) dos anéis de crescimento em função do ano para os dois sítios de árvores de *A. columnaris*

Sítio	Equação	R²aj.	S_{yx}	S_{yx}%	F
A	$y = b_0 + b_1t + b_2t^3$	0,2499	0,07658	10,95	48,65
B	$y = b_0 + b_1t + b_2t^2$	0,4285	0,05154	7,10	33,99

Onde: massa específica máxima (g/cm^3); t: ano; b_0 , b_1 e b_2 : coeficientes da regressão; R²aj.: Coeficiente de determinação ajustado para o número de coeficientes da equação; S_{yx}: Erro padrão da estimativa; S_{yx}%: Erro padrão da estimativa em percentagem; F: valor de F calculado.

A densidade aparente máxima dos anéis de crescimento apresenta ao longo dos anos um padrão descendente até uma constante, os valores maiores localizados próximos à região da medula, semelhante ao observado para a densidade aparente média.

Com relação à variação radial dos valores de densidade dos anéis de crescimento verificou-se a influência da resina que apesar do processo de extração foram detectadas regiões de alta densidade aparente do lenho sem a correspondente presença de traqueídes de parede mais espessa. Regiões do lenho, com resina residual podem ser identificadas pelos pares de dados dispersos no período 1973-1983, próximo à região de formação do cerne.

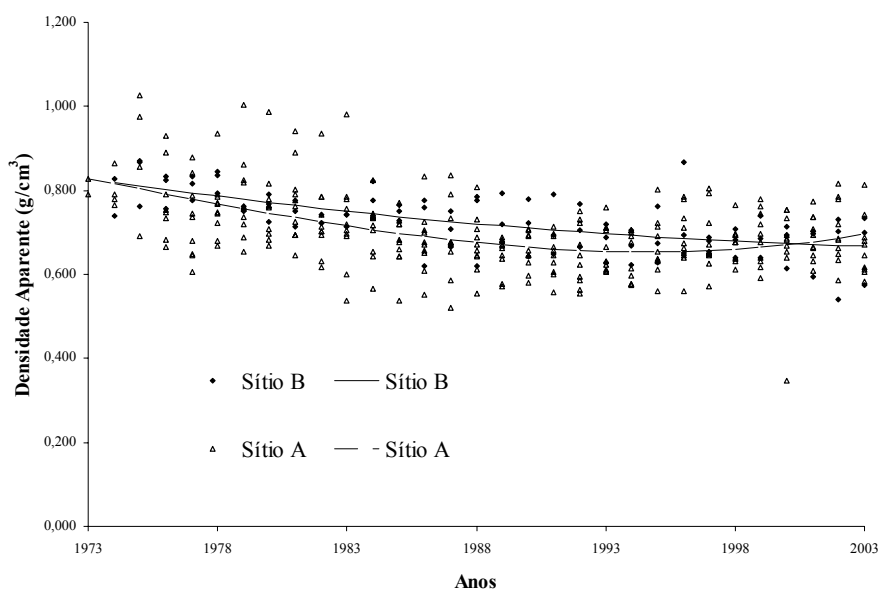


Figura 15 – Modelos para densidade aparente máxima (g/cm^3) do lenho em função do ano para os dois sítios de árvores de *A. columnaris*

A análise das variações radiais da densidade aparente dos anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris* é necessária como instrumento para a segura datação dos anéis de crescimento e posterior determinação dos teores de Pb. A análise da estrutura anatômica e da largura anéis de crescimento (lenhos inicial e tardio) com as suas características densitométricas confere a precisão exigida as pesquisas em dendrocronologia e dendroquímica.

2.3.4 Dendrocronologia das árvores de *Araucaria columnaris*

As amostras do lenho extraídas das árvores de *A. columnaris* mostraram variação no número de anéis de crescimento, devido à angulação da inserção da sonda. Nas árvores cujas amostras do lenho estão completas (a sonda de Pressler atingiu a região da medula) foram contados 30 a 31 anéis de crescimento, correspondentes aos anos de 1974 e 1973. A amostra do lenho da árvore 2 (sítio A) apresentou o menos número de anéis de crescimento (26 anéis de crescimento, ao ano de 1978) a partir da qual foi aplicado o estudo do crescimento e do IMA (Tabela 13). As árvores de *A. columnaris* foram plantadas (33 anos) coincidindo com os resultados da contagem dos anéis de crescimento das amostras do lenho extraídas na altura do DAP, indicando que as árvores atingiram a altura de 1,30 m com 1-2 anos de idade.

Tabela 13 - Número de anéis de crescimento anuais nas amostras do lenho das árvores de *A. columnaris* extraídas a altura do DAP do tronco

Sítio	Árvore	Anéis de crescimento (n ^o)
A	Ara0	27
	Ara2	26
	Ara3	30
	Ara4	28
	Ara5	31
	Ara6	31
	Ara7	28
	Ara8	30
	Ara10	28
	Ara11	28
	B	AraB1
AraB2		29
AraB3		30

Para a padronização das séries cronológicas foi ajustada uma função que expressa a tendência do crescimento de cada árvore, predominando o padrão de crescimento linear decrescente em 8 árvores, com somente 2 ajustando-se a um modelo exponencial negativo (Tabela 14). O modelo clássico (exponencial negativo) demonstra que as árvores de *A. columnaris* mostram maior taxa de crescimento do tronco nos primeiros anos e, ao atingirem a idade adulta, ocorre uma redução exponencial da largura dos anéis de crescimento, até valores mais ou menos constantes. O modelo linear decrescente indica que as árvores de *A. columnaris* encontram-se, ainda, na fase de crescimento juvenil, com redução da largura dos anéis de

crescimento, sem atingir valores constantes. Esta tendência é típica de árvores isoladas ou localizadas em dosséis mais abertos (COOK; KAIRIUKSTIS 1989).

Tabela 14 – Coeficientes da função utilizados para estimar a tendência de crescimento das séries cronológicas das 13 árvores de *A. columnaris*

Árvore	Tipo de função	b_1	B_2	b_3	b_0
ara0	Linear decrescente	0	0	-0.06796	6.709974
ara2	Linear decrescente	0	0	-0.06498	7.748063
ara3	Linear decrescente	0	0	-0.1309	8.254299
ara4	Linear decrescente	0	0	-0.06418	7.572465
ara5	Linear decrescente	0	0	-0.17588	9.253414
ara6	Linear decrescente	0	0	-0.04627	7.002256
ara7	Linear decrescente	0	0	-0.10668	8.018253
ara8	Linear decrescente	0	0	-0.31653	11.46088
ara10	Exponencial neg.	79.2377	0.006603	0	-64.8282
ara11	Linear decrescente	0	0	-0.19565	8.965796
araB1	Exponencial neg.	7.194263	0.0557814	0	3.679637
araB2	Linear decrescente	0	0	-0.0776748	7.360639
araB3	Linear decrescente	0	0	-0.0989077	7.961401

Após a remoção das tendências de crescimento das séries cronológicas (FRITTS, 1976) os valores de índice dos anéis de crescimento de cada série foram correlacionados entre si (Tabelas 15 e 16). Essas correlações são importantes para detectar se as condições micro-ambientais afetam igualmente todas as árvores: quando muitas árvores de uma mesma espécie de um mesmo sítio são correlacionadas, pode-se construir uma série média para o local para a referida espécie, que representa o ambiente (local, regional ou nacional) conforme as árvores se correlacionam. As árvores de *A. columnaris* do sítio A apresentaram em, sua grande maioria, correlações acima de 95% de confiança, demonstrando uma mesma uniformidade nas respostas aos estímulos do ambiente e justificando o seu agrupamento; a mesma correlação existe para as três árvores no sítio B.

Tabela 15 – Matriz de correlação entre as séries cronológicas para as árvores de *A. columnaris* do sítio A no intervalo de 1978 a 2003

Árvore	Ara0	Ara11	Ara4	Ara5	Ara2	Ara10	Ara7	Ara3	Ara6	Ara8
Ara0										
Ara11	0,628*									
Ara4	0,258	0,506*								
Ara5	0,663*	0,707*	0,434+							
Ara2	0,658*	0,424+	0,569*	0,570*						
Ara10	0,375+	0,798*	0,480*	0,758*	0,300					
Ara7	0,261	0,473*	0,557*	0,626*	0,507*	0,609*				
Ara3	0,513*	0,445+	0,248	0,663*	0,403+	0,625*	0,615*			
Ara6	0,548*	0,316	0,201	0,604*	0,633*	0,397+	0,423+	0,570*		
Ara8	0,435+	0,775*	0,512*	0,833*	0,382+	0,803*	0,715*	0,602*	0,386+	
Média	0,759	0,735	0,583	0,803	0,790	0,476	0,641	0,603	0,616	0,694

* nível de 99% de confiança; + nível de 95% de confiança.

Tabela 16 – Matriz de correlação entre as séries cronológicas para as árvores de *A. columnaris* no sítio B no intervalo de 1975 a 2003

Série	AraB1	AraB2	AraB3
AraB1			
AraB2	0,412+		
AraB3	0,634*	0,411+	
Média	0,771	0,784	0,801

* nível de 99% de confiança; + nível de 95% de confiança.

Como os valores de correlação entre as séries foram significativos, foi determinada uma série média para cada sítio (Figura 16) permitindo demonstrar o nível de resposta das árvores as variações das condições ambientais: qualquer alteração poderá ser detectada, com os resultados mostrando a não ocorrência de alterações, uma vez que os dados mostraram-se semelhante nas três décadas analisadas.

A confrontação da série média dos sítios A e B evidencia que nos períodos de 1974-1984 e 1995-2003 existiu uma sincronização, diferente da do período de 1985-1994. Essa possibilidade de sincronização dos dois sítios das árvores de *A. columnaris* para a construção de séries cronológicas mais abrangentes mostra-se viável pelo aumento do número de árvores e de amostras do lenho por árvore.

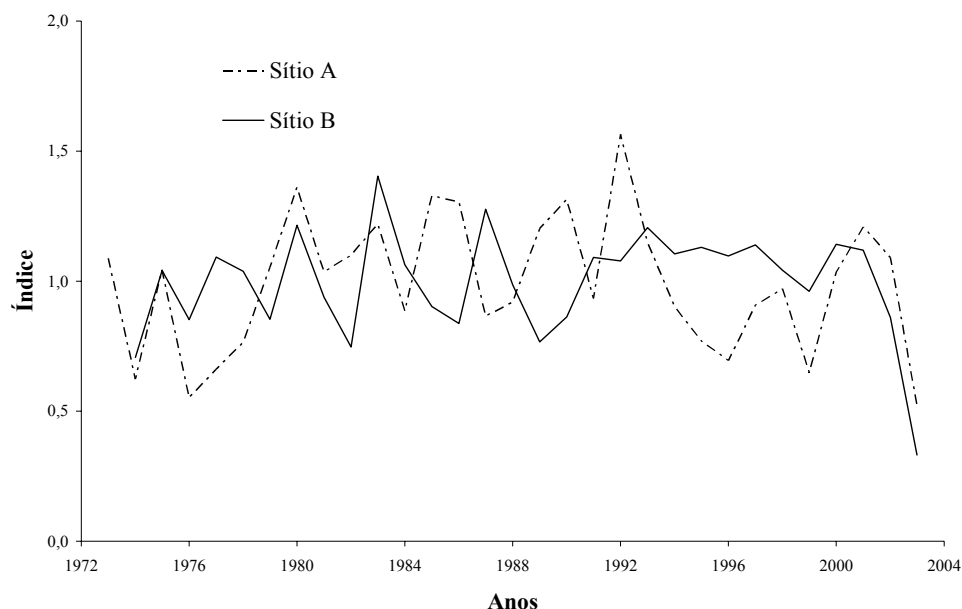


Figura 16 – Série de índice de largura de anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris* para os dois sítios (A e B)

A possibilidade de agrupar os dois sítios para as análises dendrocronológicas indica que as árvores de *A. columnaris* possuem ritmos diferentes de crescimento em diâmetro do tronco conforme apresentado nas funções de crescimento. No entanto, os estímulos induzidos pelo ambiente mostram padrões de resposta semelhantes, conforme apresentado nas séries médias de índices de largura de anéis de crescimento (Figura 16). Estas séries médias serão revistas na avaliação do teor de Pb nos anéis de crescimento para verificar o seu efeito no crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *A. columnaris*.

2.3.5 Crescimento do tronco das árvores de *Araucaria columnaris*

Os resultados da sincronização e da datação exata dos anéis de crescimento das 13 árvores de *A. columnaris* possibilitam determinar o crescimento radial anual do seu tronco a partir de 1977. O crescimento radial anual do tronco demonstra um mesmo ritmo de desenvolvimento cujas diferenças tornam-se mais evidentes pelo valor médio do crescimento do tronco das árvores obtidos para os dois sítios. Aplicando-se a técnica de regressão múltipla para o estudo de modelos de crescimento radial do tronco das árvores para cada um dos sítios (Tabelas

17 e 18) são identificados os modelos indicados pelo processo de stepwise, bem como suas estatísticas.

Tabela 17 – Modelos de crescimento radial do tronco indicados como significativos pelo processo “stepwise” para as árvores de *A. columnaris* do sítio A

Nº	Equação	R ² aj	S _{yx}	S _{yx} %	F
1	$y = b_0 + b_1 \log^2(i) + b_2 \log^3(i)$	0,9490	11,4668	11,43	2414,64
2	$y = b_0 + b_1 \log^2(i)$	0,9480	11,5822	11,54	4727,47
3	$y = b_0 + b_1 \ln^2(i)$	0,9480	11,5821	11,54	4727,55
4	$y = b_0 + b_1 \log^3(i)$	0,9372	12,7259	12,68	3871,64
5	$\log y = b_0 + b_1 \ln(i) + b_2 \ln^2(i)$	0,9491	0,0823	4,33	2416,32
6	$\sqrt{y} = b_0 + b_1 \log^2(i)$	0,9391	0,7357	7,69	3999,90
7	$\sqrt{y} = b_0 + b_1 \frac{1}{t} + b_2 \log^2(i)$	0,9549	0,6335	6,62	2742,98
8	$\ln y = b_0 + b_1 \ln(i) + b_2 \ln^2(i)$	0,9490	0,1897	4,33	2415,27

Onde: y: raio (mm); i: idade contada a partir de 1977; b₀, b₁ e b₂: coeficientes da regressão; R²aj.: Coeficiente de determinação ajustado para o número de coeficientes da equação; S_{yx}: Erro padrão da estimativa; S_{yx} %: Erro padrão da estimativa em percentagem; F: valor de F calculado.

Apesar de todos os modelos de crescimento serem significativos e com alto valor de coeficiente de determinação constatou-se que os de nº 1 a 4 não se ajustaram a pressuposição da regressão, seja pela distribuição normal dos resíduos e/ou homogeneidade da variância. Dessa forma, houve a necessidade da transformação dos dados, testando-se o logaritmo e o logaritmo neperiano, que não se mostraram adequadas (Equações nº 5 e 8).

A transformação selecionada foi a da raiz quadrada (Equações nº 6 e 7) e considerando-se a estatística dos modelos, selecionou-se a Equação nº 7. Devido a essa transformação, os dados de crescimento radial do tronco serão tratados na unidade Raiz Quadrada de mm, evitando-se as incoerências quando transportados para os gráficos.

O procedimento aplicado para o sítio B (Tabela 18) mostrou resultados semelhantes sendo selecionado o mesmo modelo que apresentou um erro padrão da estimativa menor decorrente do menor número de observações. Os coeficientes dos dois modelos escolhidos apresentaram valores muito próximos (Tabela 19), aplicando-se o teste *t* para analisar a hipótese de que sejam iguais.

Tabela 18 – Modelos de crescimento radial indicados como significativos pelo processo “stepwise” para as árvores de *A. columnaris* do sítio B

Nº	Equação	R ² aj	Syx	Syx%	F
1	$y = b_0 + b_1 \log^2(i) + b_2 \log^3(i)$	0,9934	3,949	4,23	5816,55
2	$y = b_0 + b_1 \log^2(i)$	0,9818	6,564	7,03	4162,39
3	$y = b_0 + b_1 \ln^2(i)$	0,9818	6,564	7,03	4162,39
4	$y = b_0 + b_1 \log^3(i)$	0,9918	4,390	4,70	9397,75
5	$\log y = b_0 + b_1 \ln(i) + b_2 \ln^2(i)$	0,9927	0,028	1,52	5267,41
6	$\sqrt{y} = b_0 + b_1 \log^2(i)$	0,9890	0,299	3,24	6973,94
7	$\sqrt{y} = b_0 + b_1 \frac{1}{t} + b_2 \log^2(i)$	0,9940	0,220	2,39	6455,91
8	$\ln y = b_0 + b_1 \ln(i) + b_2 \ln^2(i)$	0,9927	0,066	1,53	5267,41

Onde: y: raio (mm); i: idade contada a partir de 1977; b₀, b₁ e b₂: coeficientes da regressão; R²aj.: Coeficiente de determinação ajustado para o número de coeficientes da equação; S_{yx}: Erro padrão da estimativa; S_{yx}%: Erro padrão da estimativa em percentagem; F: valor de F calculado.

Tabela 19 – Valores dos coeficientes do modelo nº 7 para os dois sítios de árvores de *A. columnaris*

Sítios	Coeficientes					
	B ₀		B ₁		B ₂	
	Valor	Erro Padrão	Valor	Erro Padrão	Valor	Erro Padrão
A	5,13461	0,157072	-2,8270	0,296377	4,1280	0,099111
B	4,32778	0,099924	-1,5203	0,188575	4,3667	0,063050

Onde: B₀, B₁ e B₂: coeficientes da regressão.

O teste *t* mostrou que os três coeficientes são diferentes estatisticamente ao nível de 95% de confiança (Tabela 20). Para a confirmação se o crescimento radial do tronco das árvores nos dois sítios deveria ser descrito por modelos separados, utilizou-se o teste F (ZAR,1984) testando se os modelos de regressão estimam populações iguais.

Tabela 20 – Teste t para a hipótese de que os coeficientes do modelo n° 7 fossem iguais para os dois sítios de árvores de *A. columnaris*

Coeficiente	T	P
B ₀	4,3340	0,0000
B ₁	3,7197	0,0004
B ₂	2,0319	0,0457

Onde: t: valor de t calculado; b₀, b₁ e b₃: coeficientes da regressão; p probabilidade de aceitar-se a hipótese da igualdade dos coeficientes.

A Tabela 21 apresenta a análise da variância e do teste F (ZAR, 1984) verificando-se que o valor de F calculado é significativo e que os modelos testados descrevem o crescimento radial do tronco das árvores das duas populações distintas (Figura 17), confirmando o resultado obtido no estudo das séries cronológicas dos índices dos anéis de crescimento.

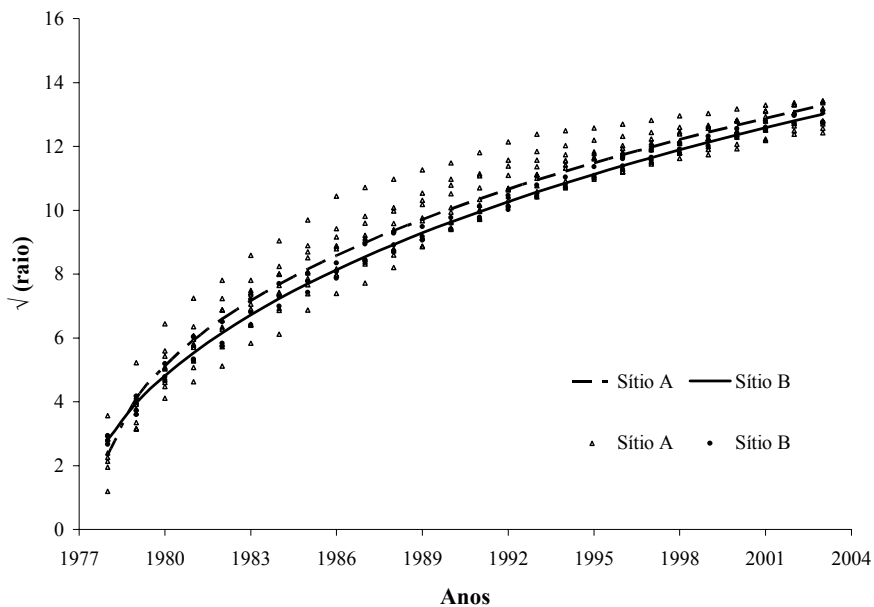


Figura 17 – Crescimento radial do tronco de árvores de *A. columnaris*, para os dois sítios no período de 1977-2003

Tabela 21 – ANOVA e teste F para comparar se os dois modelos estimam a mesma população

Fatores	N	gl resíduos	SQ resíduos	F	P
A	260	257	103,14	8,9538	0,00001
B	78	75	3,65		
Interação	338	332	106,79		
Total	338	335	115,43		

n: número de observações; gl resíduos: graus de liberdade dos resíduos; SQ resíduos: soma de quadrados dos resíduos; P: probabilidade de F calculado ser menor que F tabelado, indicando a probabilidade dos 2 modelos estimarem a mesma população.

O estudo do incremento corrente anual (ICA) e do incremento médio anual (IMA) para os dois sítios permitiu desenvolver modelos do comportamento médio das árvores evidenciando, uma vez mais, os diferentes padrões de crescimento do tronco para os sítios.

Os dados de ICA e IMA foram, também, transformados para raiz quadrada utilizando nas figuras a unidade raiz quadrada de mm, com os modelos selecionados para os sítios indicados na Tabela 22.

Tabela 22 – Modelos para o incremento corrente anual do tronco de árvores de *A. columnaris*

Sítio	Equação	R²aj.	S_{yx}	S_{yx}%	F
A	$\sqrt{y} = b_0 + b_1i + b_2i^2 + b_3i^3$	0,3284	0,4880	19,75	47,6289
B	$\sqrt{y} = b_0 + b_1i^3$	0,3063	0,3531	13,97	39,8688

Onde: y: ICA (mm); i: idade contada a partir de 1973; b₀, b₁ e b₃: coeficientes da regressão; R²aj.: Coeficiente de determinação ajustado para o número de coeficientes da equação; S_{yx}: Erro padrão da estimativa; S_{yx}%: Erro padrão da estimativa em percentagem; F: valor de F calculado.

A curva descrita pelos modelos possui um formato esperado para o incremento corrente do tronco: ascensão nos primeiros anos, seguindo-se um período de estabilização e, posteriormente, queda nos valores do incremento. Contudo, estas três etapas mostraram-se pouco distintas nas árvores de *A. columnaris*.

O incremento do tronco para as árvores no sítio B mostra-se mais constante ao longo dos anos em relação ao das árvores do sítio A. Estes resultados indicam que as árvores do sítio B encontram condições micro-ambientais mais favoráveis para o crescimento em diâmetro do tronco, como observado para o índice de largura de anéis de crescimento das árvores no sítio B com menor flutuação (Figura 18).

Os incrementos do tronco das árvores do sítio A indicam crescimento acelerado nos primeiros anos (1973-1980) com maiores valores em 1981 (as árvores com 11 anos), iniciando a redução do crescimento até atingir os menores valores de incremento nos últimos anos.

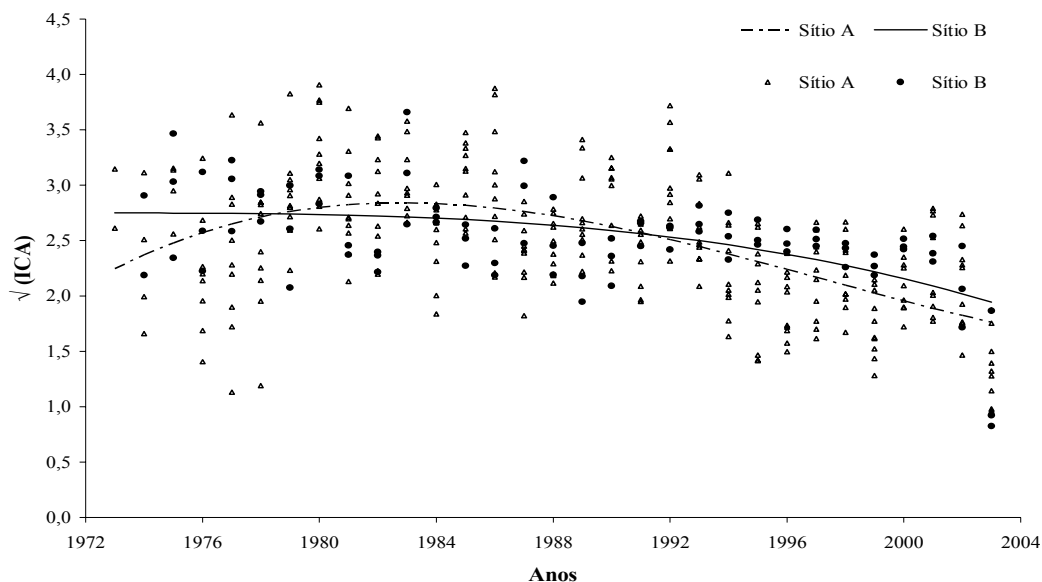


Figura 18 – Incremento corrente anual do tronco de árvores de *A. columnaris* nos dois sítios no período 1973-2003

O incremento médio anual do tronco para as árvores de *A. columnaris* foi descrito pelos modelos da Tabela 23. Para os dois sítios, o incremento médio do tronco sofreu uma redução ano após ano quase linear sendo, contudo pequena. Destaque-se que o valor de IMA para cada árvore de *A. columnaris* aproxima-se da média com o aumento da sua idade (Figura 19), indicando estão no final da fase juvenil e iniciando a fase adulta de crescimento, quando o incremento anual (largura dos anéis de crescimento) é influenciado mais pelo ambiente do que pelo potencial genético da planta.

Tabela 23 – Modelos para o incremento médio anual do tronco de árvores de *A. columnaris*

Sítio	Equação	R ² aj.	S _{yx}	S _{yx} %	F
A	$\sqrt{y} = b_0 + b_1 i^3 + b_2 \frac{1}{i} + b_3 \log^2(i)$	0,1858	0,2506	9,08	20,7030
B	$\sqrt{y} = b_0 + b_1 i^3$	0,4117	0,0902	3,38	54,8903

Onde: y: IMA (mm); i: idade contada a partir de 1978; b₀, b₁ e b₃: coeficientes da regressão; R²aj.: Coeficiente de determinação ajustado para o número de coeficientes da equação; S_{yx}: Erro padrão da estimativa; S_{yx}%: Erro padrão da estimativa em percentagem; F: valor de F calculado.

Analisando todos os resultados obtidos - crescimento radial, incremento médio anual e corrente anual - para o crescimento do tronco das árvores de *A. columnaris* com os das séries cronológicas, observa-se um comportamento típico da fase juvenil em transição para a fase adulta de crescimento. Estes aspectos ficam evidentes na análise da estrutura anatômica do lenho das árvores com anéis de crescimento formados nos últimos anos são mais distintos.

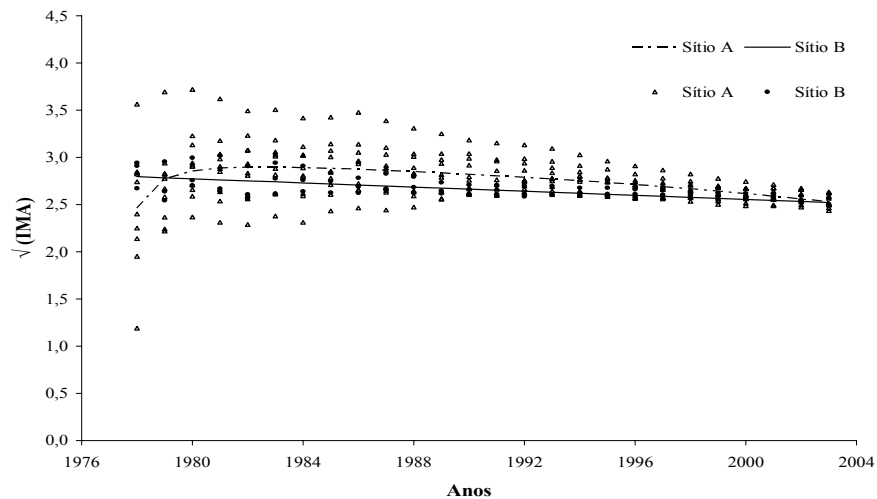


Figura 19 – Incremento médio anual do tronco de árvores de *A. columnaris* nos dois sítios no período 1978-2003

Em decorrência destas observações, os resultados indicam que a espécie *A. columnaris* é potencial para estudos de dendrocronologia principalmente com árvores que já atingiram a idade adulta, ou seja, acima de 40 anos.

2.3.6 Dendroquímica das árvores de *Araucaria columnaris*

Nas análises do teor de Pb nos anéis de crescimento de árvores de *A. columnaris* foram incluídos os sítios A e B, com o sítio A dividido em A1, A2 e A3 (conforme item 2.2.2) sendo considerado o valor de 0,22 $\mu\text{g/g}$ de Pb como o limite de detecção (LD) no lenho de *A. columnaris*.

A análise da concentração média de Pb em cada anel de crescimento anual das árvores de *A. columnaris* mostrou uma tendência semelhante nos quatro sítios estudados (Sítios A1, A2, A3 e B) com variação cíclica dos valores no período de 30 anos (1973-2003), sendo máximo entre 1991-1995, seguido de uma queda até o ano de 2003 (Figura 20). A maior concentração de Pb (0,67 $\mu\text{g/g}$) foi detectada nos anéis de crescimento formados em 1991 no lenho das árvores do sítio A1. Os teores de Pb detectados nos anéis de crescimento das árvores dos 4 sítios nos períodos de 1973-1977, 1981-1987 e 1991-2003 são os mais significativos por estarem acima do LD, o que mostra que as árvores de *A. columnaris* absorveram quantidades variadas de Pb ao longo de seu desenvolvimento.

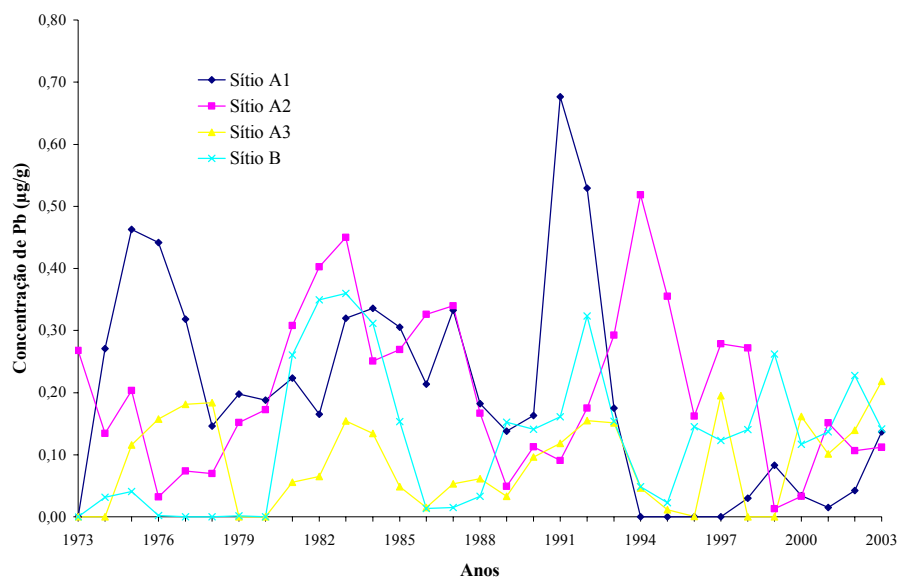


Figura 20 – Concentração de Pb ($\mu\text{g/g}$) nos anéis de crescimento de árvores de *A. columnaris*

O Pb detectado no lenho das árvores de *A. columnaris* pode ser procedente de várias fontes, sendo que as principais são as emissões das descargas de veículos automotores e as provenientes dos processos industriais. Estas duas fontes de emissão estão presentes pelas

características do parque industrial regional e pelo intenso fluxo de veículos próximo as árvores de *A. columnaris*, além da possibilidade do Pb pode ser transportado por vários quilômetros em suspensão nas correntes de vento da atmosfera (PAOLIELLO; CHASIN, 2001). A queima dos combustíveis fósseis nos veículos emite partículas de chumbo para o ambiente com foi mais intensidade no período anterior a 1990, ano em que a Petrobrás substituiu o chumbo tetraetila como aditivo na gasolina.

O chumbo foi detectado com maior frequência nas séries de anéis de crescimento formados na década de 80 (1981-1987), indicando uma maior quantidade deste elemento químico no ambiente durante o período, anterior a substituição do uso do chumbo tetraetila. Entretanto, o nível de Pb é relativamente baixo ao se comparar com o apresentado no lenho de árvores de *Quercus robur* (22 µg/g) (KARDELL; LARSON, 1978 apud WATMOUGH, 1999).

A análise da concentração de elementos químicos nos anéis de crescimento de árvores de *Acer sacharum* realizada por Watmough et al. (1998), indica teor de Pb com pico máximo de 1,5 µg/g, semelhante ao obtido para a *A. columnaris*, com uma concentração de Pb no solo de $12,4 \pm 3,3$ µg/g, considerada baixa pelos autores e próxima a detectada no solo do sítio A de $15,97 \pm 1,27$ µg/g.

Em outro trabalho, Watmough e Hutchinson (1999) encontraram concentrações de Pb abaixo de 1 µg/g no lenho de árvores de *Abies religiosa*, com o solo contendo menos de 12 µg/g de Pb. Estes valores são semelhantes aos obtidos para *A. columnaris*, onde as concentrações estão abaixo de 0,67 µg/g de Pb indicando que estas espécies podem apresentar níveis semelhantes de absorção de Pb.

A forma como o Pb é absorvido pelas árvores de *A. columnaris* não está perfeitamente estabelecida, indicando-se que as raízes e as folhas são as principais vias de absorção, sendo que pelas folhas o processo é afetado por diversos fatores (ROSS, 1994; PRASAD, 1995). Desta forma, sugere-se um estudo comparativo do teor de Pb em uma longa série de anéis de crescimento anuais concomitante ao monitoramento da concentração de Pb em suspensão na atmosfera.

Recentemente, Moreira et al. (2005) mostraram que os anéis de crescimento das árvores de *Caesalpinia peltophoroides* podem ser utilizadas no monitoramento ambiental, ao detectarem, em condições semelhantes as das árvores de *A. columnaris* teores de 12-46 µg/g de Pb evidenciando o efeito dos mecanismos fisiológicos de cada espécie na absorção do Pb.

O sítio B, inserido no trabalho como parcela referência, isenta de contaminação, apresentou concentração de Pb no solo acima dos valores normais e em comparação com os sítios A1, A2 e A3 (Tabela 2), embora os teores de Pb nos anéis de crescimento sejam próximos do padrão das árvores do sítio A. No entanto, não foi possível determinar por uma interpretação acurada dos resultados deste sítio o ano e a origem da contaminação do solo, bem como a espécie química de Pb presente no solo.

A correlação da concentração média de Pb nos anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris* do Sítio A com o índice de largura de anéis de crescimento para este sítio (Figura 21), mostrou um coeficiente de correlação de Pearson de 0,1984. Como o índice de largura de anéis de crescimento reflete o desenvolvimento das árvores pode-se inferir que nos períodos de maior taxa de crescimento em diâmetro do tronco detectou-se maior teor de Pb no lenho e que este não afeta o desenvolvimento das árvores.

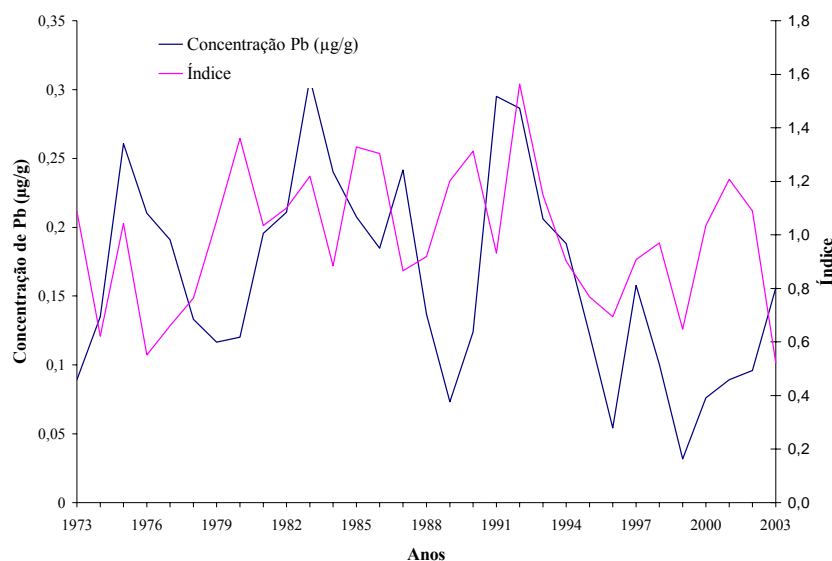


Figura 21 - Concentração de Pb ($\mu\text{g/g}$) nos anéis de crescimento e índice de largura de anéis das árvores de *A. columnaris* no sítio A (média das três parcelas)

A correlação da concentração média de Pb no lenho das árvores de *A. columnaris* do sítio B com o índice de largura dos anéis de crescimento (Figura 22) mostrou coeficiente de correlação de Pearson não significativo ($R = 0,0171$) ou seja, as taxas de crescimento do tronco não estão relacionadas com o teor de Pb no lenho e com o existente no solo ($327 \mu\text{g/g}$) como no sítio A.

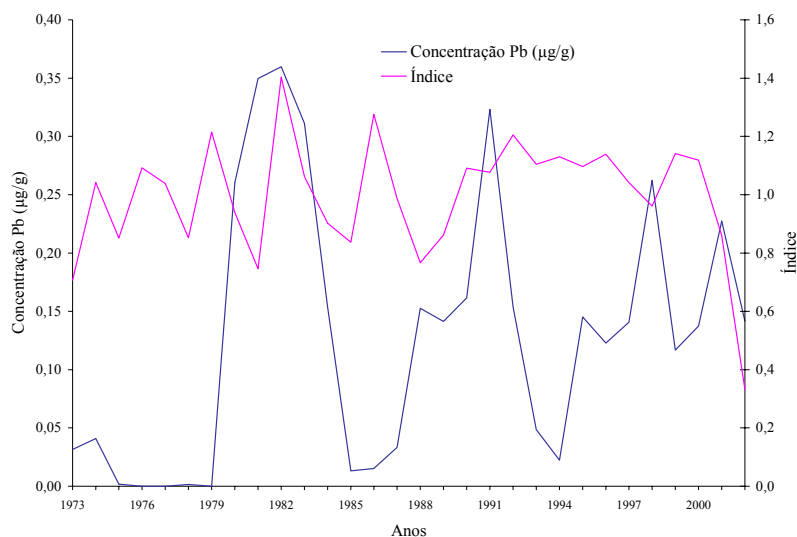


Figura 22 – Concentração de Pb ($\mu\text{g/g}$) nos anéis de crescimento e índice de largura de anéis das árvores de *A. columnaris* no sítio B

Segundo Hagemeyer (2000) o padrão de distribuição do teor dos elementos químicos nos anéis de crescimento ao longo do tempo deve mostrar a sua presença e disponibilidade no ambiente em que as árvores estão se desenvolvendo. Nos dois sítios estudados os resultados indicam a presença do Pb, ao longo dos anos, através da análise dos anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris*. De acordo com Davies (1990), a biodisponibilidade do Pb no ambiente pode explicar os resultados, evidenciando a necessidade do aprofundamento dos estudos sobre o comportamento dos elementos químicos tóxicos na interface atmosfera-solo-planta. Os elementos traço, não essenciais, não mostram uma tendência natural de distribuição nos anéis de crescimento do lenho, como verificado para Pb em árvores de *A. columnaris*, com variação da sua concentração de Pb ao longo dos anos, no período de 1973 a 2003 (WATMOUGH, 1999).

Os teores de Pb obtidos para os anéis de crescimento de árvores de *A. columnaris*, estão concordantes com os apresentados para diversas espécies florestais de acordo com a bibliografia especializada (BERISH; RAGSDALE, 1985; WATMOUGH et al., 1998; WATMOUGH, 1999; WATMOUGH; HUTCHINSON, 1999) indicando a eficácia do método analítico de determinação de Pb e sua importância no monitoramento ambiental pela aplicação dos anéis de crescimento, contribuindo para a ampliação dos estudos em dendroquímica.

3 CONCLUSÕES

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

Os anéis de crescimento formados nas árvores de *A. columnaris* são anuais e distintos com transição gradual dos lenhos inicial e tardio e possibilitam a determinação da idade das árvores;

As características anatômicas microscópicas do lenho não mostraram diferenças nas árvores de *A. columnaris* dos dois sítios estudados;

Os perfis densitométricos radiais permitiram delimitar os limites dos anéis de crescimento, constituindo-se em metodologia complementar a análise da estrutura macroscópica do lenho das árvores de *A. columnaris*;

Os valores de densidade aparente média e máxima dos anéis de crescimento de árvores *A. columnaris* mostraram tendência decrescente na região próxima à medula, seguindo-se de aumento e estabilização no lenho adulto;

A sincronização dos anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris* possibilitou a confecção de uma série média de índices de largura de anéis de crescimento, com potencial para a dendrocronologia;

O modelo $\sqrt{y} = b_0 + b_1 \frac{1}{t} + b_2 \log^2(i)$ foi o mais adequado para descrever o crescimento radial do tronco de árvores de *A. columnaris*;

As árvores de *A. columnaris* mostraram tendência de crescimento do tronco típico das espécies florestais, encontrando-se na fase de desenvolvimento caracterizada como juvenil e em transição para a adulta;

Os teores de Pb detectados nos anéis de crescimento das árvores de *A. columnaris* em um período de 30 anos, embora baixos, indicam a sua ocorrência de forma cíclica no ambiente;

A taxa de crescimento do tronco das árvores de *A. columnaris* não foi afetada pela presença de Pb nos anéis de crescimento;

A metodologia de análise dos anéis de crescimento e do teor de Pb no lenho das árvores de *A. columnaris* mostrou-se eficiente no monitoramento ambiental através da dendroquímica.

REFERÊNCIAS

ABADEI, S. **The analysis of trace element variation in defected tree rings with μ -beam XRF Spectroscopy**. 1995. 50 p. Dissertação (Master of Science in Physics) – Department of Physics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 1995.

AMARAL, A.C.B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira**. 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

AMARAL, A.C.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela técnica de microdensitometria de raios X. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 6, n. 11/12, p.17-23, 1998.

AOKI, T. et al. Measurement of trace elements in tree rings using the PIXE method. **Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B**, Amsterdam, v. 136-138, p. 919-922, 1998.

ASHTON, P.S. The need for information regarding tree age and growth in tropical forests. In: BORMANN, F.H.; BERLYN, G. (Ed.). **Age and growth rate of tropical trees: new directions for research**. New Haven: Yale University, 1981. p. 3-6. (Bulletin, 94).

BAES, C.F.; MCLAUGHLIN, S.B.; HAGA, T.A. Multielemental analysis of tree rings: temporal accumulation patterns and relationships with air pollution. In: SYMPOSIUM ON AIR POLLUTION AND THE PRODUCTIVITY OF THE FOREST, 1984, Arlington. **Proceedings...** Arlington: Isaac Walton League, 1984. p. 273-286.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, Ch. Structural and ultrastructural changes in heavy metal exposed plants. In: PRASAD, M.N.V; HAGEMEYER, J. (Ed.). **Heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystems**. Berlin: Springer, 1999. p. 183–206.

BELLIS, D.J. et al. Evaluation of the historical records of lead pollution in the annual growth rings and bark pockets of a 250-year-old *Quercus crispula* in Nikko, Japan. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 295, p. 91-100, 2002.

BERISH, C.W.; RAGSDALE, H.L. Chronological sequence of element concentrations in wood of *Carya* spp. in the southern Appalachian Mountains. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 15, p 477-483, 1985.

BRASIL. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agrônomicas. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: Comissão de Solos, 1960. 634 p.

BROWN, P.M. Introduction to dendrochronology lecture 1: Basic terminology and concepts. **Rocky Mountain Tree-ring Research**, Tucson, p. 21, 2003.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CETESB. **Relação de áreas contaminadas no Estado de São Paulo**. São Paulo: [s.n.], 2003a. 364 p.

CETESB. **O que são áreas contaminadas?** São Paulo, 2003b. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/areas_contaminadas/areas.asp>. Acesso em: 25 abril 2003.

CHEN, Y.; LI, X.; SHEN, Z. Leaching and uptake of heavy metals by ten different species of plants during an EDTA-assisted phytoextraction process. **Chemosphere**, Londres, v. 57, p. 187–196. 2004.

CHERRIER, J.F. La forêt de L'Île des Pins. **Bois et Forêts des Tropiques**, v. 1, n. 211, p. 35–46. 1986.

CHUDNOFF, M. Tropical timbers of the world. In: **Agriculture handbook**. [s.l.]: USDA (Forest Service, 607). 1984.

COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of dendrochronology**: applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. 394 p.

CUTTER, B.E.; GUYETTE, R.P. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 22, p.611–619, Jan-Mar. 1993.

DAVIES, B.E. Lead. In: ALLOWAY, B.J. **Heavy metals in soils**. [s.l.]: Blackie, 1990. p. 177–196.

DONOSO, S.C.; SCHMIDT, H. van M. Crecimiento de la regeneración de *Araucaria araucana* K. Koch con intervenciones silvícolas. **Ciencias Forestales**, Santiago, v. 7, n 1/2, p. 13–19, 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Banco de dados climáticos do Brasil**. Brasília: Embrapa – Monitoramento por Satélites, 2004. Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/>>. Acesso em: 13 fev. 2004.

FERGUSON, C.W. **Methods in medieval archaeology**: concepts and techniques of dendrochronology. Berkeley: University of California Press, 1970. p. 183-200

FERREIRA, L. **Periodicidade do crescimento e formação da madeira de algumas espécies arbóreas de florestas estacionais semidecíduas da região sudeste do Estado de São Paulo**. 2002. 103 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

FISHER, S.; NICHOLAS, N.S.; SCHEUERMAN, P.R. Dendrochemical analysis of lead and calcium in Southern Appalachian American Beech. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, p. 1137-1145, 2002.

FORGET, E.; ZAYED, J. Tree-ring analysis for monitoring pollution by metals. In: LEWIS, T. **Tree rings as indicators of ecosystem health**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 157–176.

FRANKLIN, G.L. Permanent preparation of macerated wood fibers. **Tropical Woods**, [s.l.], n. 9, p. 21-22, 1937.

FRITTS, H.C. Relationships of rings widths in arid-sites conifers to variations in monthly temperature and precipitation. **Ecological Monographs**, Tucson, v. 44, n. 4, p. 411–440, 1974.

FRITTS, H.C. **Tree rings and climate**. New York: Academic Press, 1976. 567 p.

FRITTS, H.C. et al. Tree-ring characteristics a long a vegetation gradient in northern Arizona. **Ecology**, v. 46, n 4, p. 393–401, 1963.

FUKUOKA, Y.; KISHI, Y. Influences of air quality on tree ring widths. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ASIAN AND PACIFIC DENDROCHRONOLOGY, 1995, Tsukuba. **Proceedings...** Tsukuba: FFPRI, 1995. p. 120-127.

GREGER, M. Metal availability and bioconcentration in plants. In: PRASAD, M.N.V.; HAGEMEYER, J. **Heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystems**. Berlin: Springer-Verlag, 1999. p 1–28.

GREGUSS, P. **Identification of living gymnosperms on the basis of xylotomy**. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1955. 360 p.

GUYETTE, R.P.; CUTTER, B.E.; HENDERSON, G.S. Long-term correlations between mining activity and levels of lead and cadmium in tree-rings of Eastern Red-Cedar. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 20, n. 1, p. 146-150, 1991.

HAAL, G.S. Sample preparation methods of tree-rings for PIXE-PIGE multielemental analysis. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Amsterdam, v. 49, p. 60–64, 1990.

- HAGEMEYER, J. Monitoring trace metal pollution with tree rings: a critical reassessment. In: MARKERT, B. **Plants as biomonitors: indicators for heavy metals in the terrestrial environment**. New York: VCH Weinheim, 1993. p. 541-563.
- HAGEMEYER, J. Radial distribution of Cd in stems of oak trees (*Quercus robur* L.) re-analyzed after 10 years. **Trees**, v. 9, p. 200-203, 1995.
- HAGEMEYER, J. Trace metals in tree rings: what do they tell us? In: MARKERT, B.; FRIESE, K. **Trace Elements: Their distribution and effects in the environment**. New York: Elsevier, 2000. chap. 13, p. 375–385.
- HARJU, L. et al. Study of seasonal variations of trace-element concentrations within tree rings by thick-target PIXE analyses. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Amsterdam, v. 109/110, p. 536-541, 1996.
- HOLMES, R.L.; ADAMS, R.K.; FRITTS, H.C. Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin, with procedures used in the chronology development work, including user`s manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN. **Chronology Series VI**. Tucson: University of Arizona, 1986. 1 disquete + user`s manual.
- HOWCROFT, N.H.S. Exploration and provenance seed collections in Papua New Guinea 1976/77: *Araucaria cunninghamii* e *Araucaria huestinii*. **Forest Genetic Resources Information**. Roma: FAO, n. 8, 1978.
- HOWCROFT, N.H.S. *Araucaria cunninghamii*. **Databook on endangered tree and shrub species and provenances**. Roma: FAO, 1986. p. 85-95. (FAO. Forestry Paper, 77).
- IAWA COMMITTEE. IAWA List of microscopic features for softwood identification. **IAWA Journal**, Leiden, v. 25, n. 1, p. 1-70, 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Normas e procedimentos em estudos de anatomia da madeira: angiospermae e gimnospermae**. Brasília, 1992. 17 p. (Série Técnica, 15).
- JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. New York: MacGraw-Hill, 1940. 533 p.
- JOLY, A.B. **Botânica: introdução à taxonomia vegetal**. 2.ed. São Paulo: Editora Nacional, EDUSP, 1975. 777 p.
- KAIRIUKSTIS, L.; KOCHAROV, G.E. Measuring the chemical ingredients in tree rings. In: COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of Dendrochronology: applications in the environmental sciences**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989. p. 229–239.

KOZLOWSKI, T.T., **Growth and development of trees**. [s.l.]: Academic press, 1971. 2v. 514 p.

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

LARSSON, C.; HELMISAARI, H.S. Accumulation of elements in the Annual Rings of Scots Pine trees in the vicinity of a copper-nickel smelter measured by scanning EDXRF. **X-Ray Spectrometry**, Nova York, v. 27, p. 133-139, 1998.

LEWIS, T. **Tree rings as indicators of ecosystem health**. Boca Raton: CRC Press, 1995. 210 p.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J.P. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. São Paulo: IPT, 1989. 343 p.

MAINIERI, C.; PEREIRA, J.A. Madeiras do Brasil: sua caracterização macroscópica, usos comuns e índices qualitativos físicos e mecânicos. Separata de: **Anuário Brasileiro de Economia Florestal**, Rio de Janeiro, [s.n.], 1965. p. 243–244.

MARCHIORI, J.N.C. **Dendrologia das gimnospermas**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1996. 158 p.

MARTIN, R.R. et al. Synchrontron X-ray fluorescence and secondary ion mass spectrometry in tree rings microanalysis: applications to dendroanalysis. **X-Ray Spectrometry**, Nova York, v. 30, p. 338-341, 2001.

MARTINS, J.V. **O desenvolvimento de técnicas analíticas nucleares aplicadas à análise de anéis de crescimento de árvores da amazonia e outros materiais**. 1994. 146 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MATTIAZZO, M.E.; BERTON, R.S.; CRUZ, M.C.P. da. Disponibilidade e Avaliação de metais pesados potencialmente tóxicos. In: FERREIRA, M.E. et al. **Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq, FAPESP, POTAFOS, 2001. p. 213–234.

MAZZONI-VIVEIROS, S.C., KAWABATA, C.M., AFONSO, V.A. Aspectos anatômicos do lenho de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) em áreas da Serra do Mar sob o impacto da poluição atmosférica proveniente do complexo industrial de Cubatão. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 1995, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: [s.n.], 1995. p. 39.

MOREIRA, S. et al. Monitoring environmental pollution of trace elements in tree-rings by synchrotron radiation total reflection x-ray fluorescence analysis (SR-TXRF). In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2005, Santos. **Anais...** Santos: [s.n.], 2005. 6p.

MOTHE, F. et al. Analyse microdensitométrique appliquée au bois: une méthode de traitement des données aboutissant à la description synthétique et homogène des profils de crenas (programme CERD). **Annales du Science Forest**, Nancy, v. 55, p. 301-315, 1998.

NTIMA, O.O. **The Araucarias fast growing timber trees of lowland tropics**. Oxford: Commonwealth Forestry Institute, 1968.

OLIVEIRA, H. **Análises multielementar por ativação neutrônica instrumental em madeira de anéis de crescimento de *Pinus***. 1996. 82 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

OLIVEIRA, H. et al. Distribucion de macro y microelementos em discos de *Pinus* por la técnica de PIXE. In: RIVEROS, J.A.; MORALES, J.R. (Ed.). **Avances em Analisis por Tecnicas em Rayos X**. Punta de Tralca: [s.n.], 1994. v. 8, p. 315-321.

ORLANDI, M. et al. Heavy metals variations in some conifers in Valle d'Aosta (Western Italian Alps) from 1930 to 2000. **Microchemical Journal**, v. 73, p. 237-244, 2002.

PAOLIELLO, M.M.B.; CHASIN, A.A.M. Ecotoxicologia do chumbo e seus compostos. **Série Cadernos de Referência Ambiental**. Salvador: CRA, v. 3, 144 p., 2001.

PENNINCKX, V. et al. Ring width element concentrations in beech (*Fagus sylvatica* L.) from a periurban forest in central Belgium. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 113, p. 23-33, 1999.

PILCHER, J.R. Sample preparation, cross-dating, and measurement. In: COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of Dendrochronology: applications in the environmental sciences**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989, p 40-51.

POLGE, H. L'Analyse densitométrique de clichés radiographiques: une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois. **Annales de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de la Station de Recherches et Experiences**, v. 20, p. 530-581, 1963.

PRASAD, M.N.V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 35, n. 4, p. 525-545, 1995.

PROHASKA, T. et al. Investigation of element variability in tree rings of young Norway spruce by laser – ablation - ICPMS. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 219, p. 29-39, 1998.

- PUNSHON, T. et al. Geochemical signature of contaminated sediment remobilization revealed by spatially resolve x-ray microanalysis of annual rings of *Salix nigra*. **Environmental Science and Technology**, Amsterdam, v. 37, p. 1766-1774, 2003.
- RAO, K.S.; RAJPUT, K.S. Seasonal behavior of vascular cambium in teak (*Tectona grandis*) growing in moist deciduous and dry deciduous forests. **IAWA Journal**, Leiden, v. 20, n. 1, p. 85–93, 1999.
- ROBINSON, W.J. Dendrochronology in Western North América: the Early years. In: COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of Dendrochronology**: applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989, p. 1-8.
- RODRIGUES, R.R. **Trilhas do parque da ESALQ**: Gimnospermas. Piracicaba: Esalq-Depto de Botanica, 1996. 16 p.
- ROSS, S.M. Retentions, transformation and mobility of toxic metals in soils. In: _____ **Toxic metals in soil-plant system**. Chichester: Wiley, 1994, p. 63–152.
- SALVADOR, P.V. et al. Stem xylem features in three *Quercus* (Fagaceae) species along a climatic gradient in NE Spain. **Trees**, v. 12, p. 90–96, 1997.
- SARRAILH, J.M. et al. *Araucaria columnaris* (Foster) Hooker: Les Araucariacées de Nouvelle-Calédonie. **Bois et Forêts des tropiques**, Montpellier, v. 1, n. 279, p. 79–80, 2004.
- SASS, J.E. **Botanical microtechnique**. 2.ed. Iowa: State College Press, 1951, 228 p.
- SCHNEIDER, P.R. **Análise de regressa aplicada à engenharia florestal**. Santa Maria: UFSM, CEPEF, 1998, 236 p.
- SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G.; HOPPE, J.M. Produção da *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. na região do planalto médio do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 99–118, 1992.
- SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings**: basics and applications of dendrochronology. Dordrecht: Reidel, 1988, 276 p.
- SCHWEINGRUBER, F.H. Radiodensitometry. In: COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of Dendrochronology**: applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989, p 55–63.
- SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings and environment**: Dendroecology. Berna: Paul Haupt Publishers, 1996, 609 p.

SCHWEINGRUBER, F.H.; KAIRIUKSTIS, L.; SHIYATOV, S. Sample Selection. In: COOK, E.; KAIRIUKSTIS, L. **Methods of Dendrochronology**: applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic, 1989, p 23-34.

SEGALA ALVES, E. The effects of the pollution on wood of *Cecropia glazioui* (Cecropiaceae). **IAWA Jornal**, Leiden, v. 16, n. 1, p. 69-80, 1995.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R. A maior estiagem do século? **Notícias Piracema**, Piracicaba, v. 6, n. 50, p. 1, 2000.

SHEPPARD, J.C.; FUNK, W.H. Trees as environmental sensors monitoring long-term heavy metal contaminations of Spokane River, Idaho. **Environmental Science and Technology**, Amsterdam, v. 9, n. 7, p. 638–642, 1975.

SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolids and heavy metals in solis. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, n. 4, p. 793–806, 2003.

SIMABUCO, S.M. Radiografia da poluição de Campinas. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo. Disponível em: <http://revistapesqui.../print.php?lang=pteid=revista1.fapesp1..20010710.20010362..SEC7_1>. Acesso em: 06 Ago. 2002.

STATSOFT. **Statistica for Windows**. Tulsa, 1999. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>. Acesso em: 4 abr. 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TANIGUCHI, N. et al. Effects of local air pollution on ring-width of sugi (*Cryptomeria japonica*) in Hokuriku area (Central Japan). In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ASIAN AND PACIFIC DENDROCHRONOLOGY, 1995, Tsukuba. **Proceedings ...** Tsukuba: FFPRI, 1995. p. 222-227.

THIRY, Y.; GOOR, F.; RIESEN, T. The true distribution and accumulation of radiocaesium in stem of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). **Journal of Environmental Radioactivity**, Manitoba, v. 58, p. 243-259, 2002.

THOMAS, C.E. et al. Dendrochemistry of loblolly pine and cypress cores: initial results for forest health monitoring. In: DEAN, J.S.; MEKO, D.M.; SWETNAM, T.W. (Ed.). **Tree rings, environment and humanity**. [s.n.], 1996. p. 647–658.

TOMAZELLO FILHO, M. *Araucaria angustifolia*. In: FAO. **Databook on endangered tree and shrub species and provenances**. Roma: FAO, 1986. p. 69-83.

TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P.C.; LISI, C.S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H.L.; BARRELLA, W. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: EDUC, COMPED, INEP, 2001. p. 117-143.

VIDAL-TORRADO, P.; SPAROVEK, G. **Mapa pedológico detalhado 1:10.000 do campus “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo**. Piracicaba: ESALQ, 1993. 1 mapa. Escala: 1:10.000.

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

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C. Analysis of tree rings using inductively coupled plasma mass spectrometry to record fluctuations in a metal pollution episode. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 93, n. 1, p. 93-102, 1996.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C. Change in the dendrochemistry of sacred fir close to Mexico City over the past 100 years. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 104, p. 79-88, 1999.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C. A comparison of temporal patterns in trace metal concentration in tree rings of four common European tree species adjacent to a Cu-Cd refinery. **Water, Air, and Soil Pollution**, Amsterdam, v. 146, p. 225-241, 2003.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C.; EVANS, R.D. The quantitative analysis of Sugar Maple tree rings by laser ablation in conjunction with ICP-MS. **Journal of Environmental Quality**, Amsterdam, v. 27, p. 1087-1094, 1998.

WATMOUGH, S.A.; HUGHES, R.J.; HUTCHINSON, T.C. $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ Ratios in tree rings as monitors of environmental change. **Environmental Science and Technology**, Amsterdam, v. 33, n. 5, p. 670-673, 1999.

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

WEHR, N.J.; TOMAZELLO FILHO, M. Caracterização dos anéis de crescimento de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, através da microdensitometria de raios X. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 58, p. 161-170, 2000.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Environmental health criteria 165 – inorganic lead**. Geneva: WHO, 1995. 300 p.

YANG, Y.Y. et al. Identificatio of rice varieties with high tolerance or sensitivity to lead and characterization of the mechanism of tolerance. **Plant Physiology**, Amsterdam, v. 124, p. 1019 – 1026, 2000.

YANOSKY, T.M.; HANSEN, B.P.; SCHENING, M.R. Use of tree rings to investigate the onset of contamination of a shallow aquifer by chlorinated hydrocarbons. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 50, p. 159-173, 2001.

ZAR, J.H. **Biostatisticalanalysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 1984. 718 p.

ZHANG, L.; QIAN, J.L.; PLANAS, D. Mercury concentration in tree rings of Black Spruce (*Picea mariana* Mill. B.S.P.) in boreal Quebec, Canada. **Water, Air and Soil Pollution**, Amsterdam, v. 81, p. 163-173, 1995.

ZHU, Y.G.; CHEN, S.B.; YANG, J.C. Effects of soil amendments on lead uptake by two vegetable crops from a lead-contaminated soil from Anhui, China. **Environment International**, Amsterdam, v. 30, p. 351–356, 2004.