

ISABELLA CRISTINA CANTELLES DE SOUZA

Análise do impacto de eventos extremos no fracionamento isotópico de árvores urbanas

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

SÃO PAULO

2024

Souza, Isabella Cristina
Cantelles de

Análise do impacto de eventos extremos no fracionamento
isotópico de árvores urbanas

DISS.
IPA
2024

Ficha Catalográfica elaborada pelo **NÚCLEO DE BIBLIOTECAS E MAPOTECAS**

S729a Souza, Isabella Cristina Cantelles de
Análise do impacto de eventos extremos no fracionamento isotópico de
árvores urbanas / Isabella Cristina Cantelles de Souza - - São Paulo, 2024.
56p.; il.

Dissertação (Mestrado) -- Instituto de Pesquisas Ambientais da Secretaria de
Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística, 2024.
Bibliografia.

1. Dendrocronologia. 2. Densidade da madeira. 3. Isótopos estáveis. I. Título.

CDU: 634.0.811

ISABELLA CRISTINA CANTELLES DE SOUZA

Análise do impacto de eventos extremos no fracionamento isotópico de árvores urbanas

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

SÃO PAULO

2024

ISABELLA CRISTINA
CANTELLES DE SOUZA

Análise do impacto de eventos extremos no fracionamento isotópico de árvores urbanas

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

ORIENTADOR: DR GIULIANO
MASELLI LOCOSSELLI

BANCA EXAMINADORA

Dr. Giuliano Maselli Locosselli (Orientador)

Dra. Marisa Domingos (Avaliadora Titular)

Dra. Claudia Fontana (Avaliadora Titular)

Dr. Mario Tommasiello Filho (Avaliador Suplente)

Dr. Eduardo Pereira Cabral Gomes (Avaliador Suplente)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar meu sincero agradecimento ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente e o projeto Jovem Pesquisador FAPESP 2019/08783-0 - “Florestas Funcionais: biodiversidade em benefício das cidades”. Ao projeto PIDP FAPESP do IPA (FAPESP 2017/50341-0) e ao projeto do processo nº 2022/00395-4, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de mestrado. Ao Prof. Giuliano por ter aceitado a responsabilidade de orientar este trabalho. À Larissa, obrigada pela assistência técnica de laboratório. Ao Prof. Francisco por ter cedido a balança durante as pesagens, e com muito carinho a Natália, que demonstrou uma paciência inestimável durante nossa colaboração no Instituto de Geociências da USP.

Gostaria de estender meu agradecimento a todos os membros do grupo Florestas Funcionais com destaque para Letícia, Denzel e Augusto. Agradeço ao Gregório C. por ceder equipamento e espaço na xiloteca, o que foi essencial para realização deste trabalho. À Milena, que carinhosamente me introduziu aos anéis de crescimento, meu mais profundo agradecimento.

Agradeço ao Prof. Mario da ESALQ/USP por ter me recebido em seu laboratório. Ao Aparecido por ter me auxiliado no corte das amostras. Ao Gabriel, Cláudia, Bruna, Victor, David, Michaelle, Giulia, Gabriela e Clóvis agradeço pela colaboração e apoio nessa jornada. À pessoa mais incrível que pude conhecer durante esses dois anos, David W., meu profundo agradecimento e estima, te amo muito.

Agradeço também ao meu companheiro Rafael, por seu apoio incansável desde o início. Aos meus filhos de quatro patas, Jova e Barney, e por último, mas não menos importante ao meu queridíssimo psicólogo, Paulo César.

Este trabalho é o resultado de uma colaboração significativa, e esses agradecimentos não capturam totalmente a gratidão. Estou ciente de que houve muitas outras contribuições valiosas, e a todos os que de alguma forma foram parte desta etapa, o meu mais profundo apreço.

RESUMO

As Mudanças Climáticas Globais representam uma ameaça crescente para as áreas urbanas, aumentando sua vulnerabilidade a eventos climáticos extremos, como a seca de 2013/2014 na cidade de São Paulo. A adaptação das cidades a eventos extremos como esta seca de verão, exige a implementação de políticas públicas baseadas em evidências científicas para a promoção de uma infraestrutura verde resiliente. A dendrocronologia é uma área da ciência que provê evidências precisas sobre a respostas das árvores às mudanças no clima, fornecendo informações valiosas para formulação de estratégias de adaptação urbana. Com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade climática de espécies arbóreas nativas da cidade de São Paulo, foram coletados indivíduos de *Cedrela fissilis* (Meliaceae) em dois micro-habitats distintos, um parque urbano recreativo com florestas plantadas (Parque Ibirapuera) e um fragmento urbano de Mata Atlântica (Parque Estadual Fontes do Ipiranga). As amostras obtidas com o uso de trados de incremento foram polidas e a sua superfície transversal foi escaneada para identificação, medição e posterior datação dos anéis de crescimento. Em seguida, a densidade da madeira foi determinada em alta resolução usando um densitômetro de raio X, e a composição de isótopos estáveis de carbono e oxigênio foi determinada em três porções intra-anuais dos anéis de crescimento. Os resultados apontam para uma taxa de crescimento 83% maior no parque urbano provavelmente não explicado por uma mudança significativa na taxa fotossintética e condutância estomática ou mesmo um investimento em um lenho mais seguro, mas apenas por uma menor competição por recursos neste parque de vegetação menos densa. Este ganho em crescimento no parque urbano vem ao custo de uma maior sensibilidade à variabilidade de precipitação e uma menor capacidade de recuperação das taxas de crescimento após o impacto negativo da seca de 2013/2014 observado no crescimento das árvores destas duas populações. A menor vulnerabilidade das árvores do fragmento urbano de Mata Atlântica parece resultar de um investimento em maior densidade da madeira ou segurança hidráulica durante o meio da estação de crescimento período correspondente à seca de 2013/2014. Estratégia esta não adotada pelas árvores do outro parque. A menor capacidade de recuperação das árvores no parque urbano recreativo acende um alerta sobre a vulnerabilidade de algumas infraestruturas verdes urbanas, possivelmente exigindo um planejamento que favoreçam estratégias de crescimento das árvores mais eficazes durante eventos de secas extremas.

Palavras-chave: Dendrocronologia, Densidade da Madeira, Isótopos Estáveis, Mudanças Climáticas, Serviços Ecossistêmicos.

ABSTRACT

Global Climate Change poses a growing threat to urban areas, increasing their vulnerability to extreme weather events, such as the 2013/2014 drought in the city of São Paulo. Adapting cities to extreme events such as this summer's drought requires the implementation of public policies based on scientific evidence to promote resilient green infrastructure. Dendrochronology is an area of science that provides precise evidence on the responses of trees to changes in climate, delivering valuable information for formulating urban adaptation strategies. In order to assess the climate vulnerability of tree species native to the city of São Paulo, individuals of *Cedrela fissilis* (Meliaceae) were collected in two different microhabitats, a recreational urban park with planted forests (Ibirapuera Park) and an urban fragment of Atlantic Forest (Fontes do Ipiranga State Park). The samples obtained using increment borers were polished and their transverse surface scanned for identification, measurement, and subsequent dating of the tree rings. The wood density was then determined in high resolution using an X-ray densitometer, and the composition of stable carbon and oxygen isotopes was determined in three intra-annual portions of the growth rings. The results point to an 83% higher growth rate in the urban park probably not explained by a significant change in photosynthetic rate and stomatal conductance or even an investment in a more secure wood, but only by less competition for resources in this park with less dense vegetation. This gain in growth in the urban park comes at the cost of greater sensitivity to rainfall variability and a lower ability to recover growth rates after the negative impact of the 2013/2014 drought observed in the growth of the trees in these two populations. The lower vulnerability of the trees in the urban Atlantic Forest fragment seems to result from an investment in greater wood density or hydraulic security during the middle of the growing season, the period corresponding to the 2013/2014 drought. This strategy was not adopted by the trees in the other park. The lower recovery capacity of the trees in the recreational urban park raises alarm bells about the vulnerability of some urban green infrastructures, possibly requiring planning that favors more effective tree growth strategies during extreme drought events.

Key words: Dendrochronology, Wood Density, Climate Change, Ecosystem Services, Stable Isotopes.

LISTA DE ABREVIATURAS

CAP= Circunferência na altura do peito.

CO₂= Dióxido de carbono

SBN = Soluções Baseadas na Natureza

ha= Hectare

δ¹³C = Isótopos estáveis de carbono

δ¹⁸O= Isótopos estáveis de oxigênio

dpi = *Dots per inch*

MDRS = *MultiFocus Digital Radiography System*

NaOH = Hidróxido de sódio

NaClO₂ = Clorito de sódio

pH = potencial Hidrogeniônico

rpm= Rotações por minuto

O₂ = Oxigênio

USP = Universidade de São Paulo

ESALQ= Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

CENA = Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo

mL= mililitro

PEFI = Parque Estadual das Fontes do Ipiranga

RuBisCO= ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase

C¹²= Carbono-12

C¹³ = Carbono-13

O¹⁸ = Oxigênio-18

O¹⁶= Oxigênio-16

O¹⁷ = Oxigênio-17

C¹⁴= Carbono-14

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Trado de incremento manual usado para coleta da espécie <i>Cedrela fissilis</i> .	26
Figura 2	Recorte de um fragmento adensado no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga.	27
Figura 3	Este estudo foi realizado no Estado de São Paulo (cinza), Brasil (A), nos Parques Ibirapuera e Estadual das Fontes do Ipiranga (verde) na cidade de São Paulo (B). Foi coletada a espécie nativa <i>Cedrela fissilis</i> no Parque Ibirapuera e no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (C e D, respectivamente). Nos painéis C e D, foram representados os tipos de vegetações presentes em tons de verde.	28
Figura 4	Exemplo de anel de crescimento de <i>Cedrela fissilis</i> , caracterizado pela semiporosidade dos vasos e delimitado por uma faixa de parênquima marginal.	29
Figura 5	Secção das amostras de <i>Cedrela fissilis</i> no equipamento.	30
Figura 6	Caixa de Teflon utilizada do Centro de Pesquisas em Geocronologia e Geoquímica.	31
Figura 7	Amostras de <i>Cedrela fissilis</i> após o banho-maria de 8/10h.	32
Figura 8	Média e erro padrão da largura dos anéis de crescimento (A). Densidade da madeira dos anéis de crescimento (B). Isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) (C) e isótopos estáveis de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) (D). As letras maiúsculas representam o resultado do teste t de comparação das médias. Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas entre os dois locais de estudo.	36
Figura 9	Cronologia de largura de anéis de crescimento das árvores no Parque Ibirapuera (<i>Urban park</i>) (A) e no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (<i>Urban forest patch</i>) (B). Precipitação durante a estação de crescimento (outubro a fevereiro) medida em mm no Mirante Santana (INMET, 2024) (C). A faixa marrom destaca o período da seca de 2013/2014 alvo deste estudo	38
Figura 10	Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis dendrocronológicas e climáticas em ambos os locais de estudo na cidade de São Paulo. * estatisticamente significativo para $\alpha = 0.05$.	39

Figura 11	Perfil intra-anual de densidade da madeira apresentado em posição intra-anual relativa (%) para o ano de 2013/2014 (marrom) e todos os outros anos em conjunto (azul) em cada local de coleta.	40
Figura 12	Média e erro padrão dos valores de individuais de resistência (A), resiliência (B) e recuperação (C). As letras maiúsculas representam o resultado do teste-t de comparação das médias. Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas entre os dois locais de estudo.	41
Figura A1	(C) Amostra 45B de <i>Cedrela fissilis</i> referente ao ano de 2010 retirada do scanner (D) e do raio-x.	54
Figura A2	Amostra 12B (<i>Cedrela fissilis</i>) pós extração de celulose, na qual é possível visualizar que os limites dos anéis de crescimento estão mais acentuados.	55
Figura A3	Relação entre a chuva (mm) e temperatura (°C) registrada na estação do IAG/CIENTEC no período de 2007 a 2022.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela A1	Espécimes identificados e coletados no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga – Região Metropolitana de São Paulo – SP.	52
Tabela A2	Espécimes coletados e identificados no Parque Ibirapuera – Região Metropolitana de São Paulo – SP.	52
Tabela A3	Amostragem da tabela referente a etapa de pesagem das amostras, que contém: o peso total, peso dividido e o peso intra anual medido (μg).	54

SUMÁRIO

1	Introdução.....	15
1.1	Mudanças Climáticas Globais.....	15
1.2	Vulnerabilidade urbana.....	17
1.3	Estratégias de adaptação.....	19
1.4	Dendrocronologia.....	20
2	Objetivos.....	24
2.1	Objetivos específicos.....	24
3	Material e Métodos.....	25
3.1	Locais de coleta e Espécies.....	25
3.2	Preparação das amostras.....	29
3.3	Densitometria.....	30
3.4	Extração de celulose, Pesagem, Homogeneização e Encapsulamento das amostras.....	31
3.5	Análises estatísticas.....	34
4	Resultados e discussão.....	35
	Conclusões Finais.....	42
	Referências Bibliográficas.....	43
	ANEXOS.....	52

1. Introdução

1.1 Mudanças Climáticas Globais

O Sexto Relatório do IPCC (IPCC, 2023) apresenta evidências de que as mudanças climáticas são capazes de causar impactos significativos no planeta, especialmente nos extremos climáticos e com maior severidade nos países menos desenvolvidos. De acordo com as principais conclusões desse relatório, com uma confiança de acima 90% e segundo Marengo et al. (2008), é indicado que o aquecimento global observado nas últimas décadas é atribuído principalmente às atividades humanas. A temperatura média global aumentou aproximadamente 1.1°C nos anos de 2010 – 2019 em comparação com 1850 – 1900.

O aumento observado na temperatura global ao longo do tempo é amplamente atribuído ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (IPCC, 2021). Esse aumento é predominantemente resultado das atividades humanas, tais como a queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e mudanças no uso e ocupação do solo que implicam diretamente na emissão de dióxido de carbono da biosfera para a atmosfera, contribuindo para o aquecimento global (Betts et al., 1997, 2000; Chase et al., 2000; Marengo, 2006; Weart, 2003; Mendonça, 2008; IPCC, 2001; IPCC, 2023; Maruyama, 2009; Nobre et al., 2016).

A aceleração das mudanças climáticas impõe uma pressão sem precedentes sobre todos os ecossistemas inclusive os urbanos, aumentando a frequência e a intensidade de eventos climáticos extremos (Arnell, 2004). As variações no volume global de precipitação durante a estação chuvosa podem resultar em riscos hidrometeorológicos associados a desastres naturais (Marengo et al. 2020). Esses eventos, como as inundações repentinas, deslizamentos de terras e secas extremas, têm impactos significativos na população (Locosselli e Buckeridge, 2023) prejudicando diretamente a economia local e o bem-estar

dos cidadãos (Gasparrini et. al. 2017).

As projeções apontam que se o crescimento urbano da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) seguir o padrão histórico, a área urbanizada será cerca de 38% maior até 2030. Isso aumentará os riscos de problemas como: enchentes, inundações e deslizamentos, afetando ainda mais a população em geral, especialmente os mais vulneráveis. Esses riscos serão agravados pelo aumento de temperatura e, conseqüentemente, pela maior incidência de chuvas intensas durante o verão. Estudos iniciais, indicam que, entre 2070 e 2100, um aumento médio de temperatura na região de 2°C a 3°C pode resultar em um aumento significativo no número de dias com chuvas intensas (acima de 10mm) na cidade de São Paulo – SP (Marengo et al. 2014; Nobre et al. 2016). A seca de 2013-2014 em São Paulo foi resultado de uma combinação de fatores climáticos (Nobre et al. 2016). Sistemas de alta pressão impediram a formação de nuvens e a ocorrência de chuvas na região Sudeste do Brasil, que causou um dos maiores desabastecimentos de água da história da cidade. Este evento se caracterizou por um bloqueio atmosférico que desviou as massas de ar úmido para além da região sudeste durante o verão entre o final de 2013 e início de 2014, seguida por uma estação seca prolongada em 2014 (Nobre et al, 2016).

O Sistema da Cantareira, principal sistema de abastecimento de água da Grande São Paulo, foi drasticamente afetado. Em novembro de 2014, seus níveis caíram para menos de 10% da capacidade total. Outros sistemas, como Alto Tietê e Guarapiranga, também foram impactos, aumentando a dependência dos reservatórios já comprometidos. A cidade de São Paulo registrou cerca de 60% da média histórica de chuvas neste período e houveram impactos em diversos setores, como: agricultura, indústria e comércio com perdas significativas em produção e aumento nos custos devido à escassez de água. Além de a

população ter enfrentado restrições no uso de água, impactando diretamente a qualidade de vida (Nobre et. al. 2016).

1.2. Vulnerabilidade urbana

A vulnerabilidade das cidades a eventos climáticos extremos depende de uma combinação e fatores sociais, econômicos e ambientais (Leal Filho et al., 2019). Entre os fatores ambientais se destaca a substituição de áreas verdes permeáveis por infraestrutura cinza urbana (Rosenberger et al. 2021). Essa mudança de cobertura do solo muda o balanço energético na cidade pelo uso de materiais com maior capacidade de retenção de calor (Bellinson, 2018).

As ilhas de calor são um dos resultados negativos desta conversão de cobertura do solo em áreas urbanas, as quais apresentam temperaturas mais elevadas do que as áreas circundantes, principalmente durante a noite. Essa disparidade térmica ocorre devido a uma série de fatores associados à urbanização, como a concentração de edifícios e ausência de áreas verdes. Esses elementos absorvem e retêm calor durante o dia, liberando-o gradualmente à noite, que resulta em um aumento da temperatura local. Como por exemplo, no extremo leste da cidade da cidade de São Paulo, a população vive sob temperaturas diurnas médias acima de 35°C (Ferreira e Duarte, 2019). Esta variação da temperatura não apenas afeta o conforto térmico, mas está ligada ao aumento do risco de doenças cardiovasculares e respiratórias, aumentando os números de casos de mortes prematuras (Gasparini, et al. 2017).

As ilhas de calor são capazes de agravar eventos climáticos extremos, como as chuvas e secas intensas (Manoli et al., 2019, Marengo et al, 2020), devido ao aumento da temperatura local (Folberth et al. 2015) e conseqüentemente há um impacto na atividade

convectiva, em que, o ar quente e úmido sobe, se esfria e se condensa, formando nuvens e, resulta em precipitação (Barros et al. 1987; Calheiros, 1982). A convecção é um fenômeno impulsionado principalmente por diferenças de temperatura nas massas de ar e desempenha um papel vital na formação de nuvens e na ocorrência de precipitação. Por este motivo, as ilhas de calor têm o potencial de perturbar os padrões normais de convecção, interferindo diretamente na interação entre atmosfera e a superfície terrestre (Barros et al. 1987; Calheiros, 1982). Essa interferência pode resultar em modificações na formação de nuvens e na distribuição de chuvas, influenciando assim os eventos meteorológicos extremos em áreas afetadas por esses “pontos quentes” urbanos (Cerne e Vera, 2010).

A substituição de áreas verdes por superfícies impermeáveis, como asfalto e concreto, reduz ainda mais a capacidade de percolação de água da chuva no solo (Nóbrega, et al. 2013). Ao invés de ser absorvida pelo solo ou ser utilizadas pelas plantas, essa água é escoada rapidamente para os sistemas de drenagem e esgoto das cidades, ou escorre superficialmente com uma velocidade relativamente alta, acumulando em locais baixos, ou em vales próximos aos rios. Estas mudanças no curso natural da água resultam em problemas de enchentes e inundações em áreas urbanizadas (Jones, 2001; Lee et al., 2003; Marengo, 2009) afetando diretamente a qualidade de vida dos cidadãos, (Nobre et al., 2010, Marengo et al. 2020; Gu et al., 2015) em especial, a população mais vulnerável.

Por outro lado, o aumento da temperatura média global e a consequente alteração dos padrões de precipitação levam a secas mais frequentes e intensas inclusive em regiões urbanas (Nóbrega, et al. 2013). As cidades são igualmente vulneráveis a essas mudanças, não apenas pela percolação de água no solo limitada resultante do uso extensivo de superfícies permeáveis, mas também pela alta demanda por água, colocando ainda mais pressão sobre os recursos hídricos durante as secas (Nóbrega, et al. 2013).

1.3 Estratégias de adaptação

Como uma forma de contornar estes problemas ambientais urbanos e tornar as cidades mais resilientes e adaptadas às mudanças climáticas, foram propostas as Soluções Baseadas na Natureza (SBN), termo cunhado em 2015 pela IUCN (*International Union for Conservation of Nature*) e pela rapidamente adotado pela Comissão Europeia. As SBN são ações “inspiradas, apoiadas ou copiadas da natureza para abordar problemas ambientais, sociais e econômicos” (ECDG, 2015). As SBN emergem como uma resposta à necessidade dos tomadores de decisão de encontrar alternativas confiáveis às soluções de engenharia monofuncionais convencionais, que se tornaram insuficientes para enfrentar os complexos desafios ambientais dentro das cidades (Alves et al., 2013). As árvores são uma das principais ferramentas de Solução Baseada na Natureza (SBN) disponíveis para enfrentar as adversidades inevitáveis das mudanças climáticas nas cidades (Ghafouri e Weber, 2020) por promoverem inúmeros serviços ecossistêmicos (Blanco et al. 2020), como a assimilação de carbono e a promoção do conforto térmico.

A assimilação de carbono e a fotossíntese são reguladas por uma variedade de complexos mecanismos metabólicos e fisiológicos, dos quais a condutância estomática se destaca como um componente crucial (Farquhar et. al. 1982). Durante a fotossíntese, o dióxido de carbono (CO_2) se difunde pelos estômatos das plantas e é capturado nos cloroplastos. Lá, a enzima RuBisCO desempenha um papel crucial ao fixar o carbono, iniciando assim, o processo de conversão em moléculas de glicose. Essas moléculas são essenciais, pois servem como os blocos de construção primários para a síntese de celulose, hemicelulose e pectinas, que por sua vez são os componentes fundamentais da parede celular das plantas (Locosselli e Buckeridge, 2017).

O CO_2 se difunde através do estômato para o mesofilo das folhas ao custo da perda

significativa de água devido à evapotranspiração (McCarroll e Loader, 2004). O processo de evapotranspiração das árvores varia consideravelmente entre as diferentes espécies, de acordo com suas estratégias ecológicas e morfológicas (Eviner 2004; Manes et al. 2014). Para tanto, a importância da condutância estomática transcende o âmbito do desenvolvimento das árvores e do serviço essencial relacionado ao sequestro de carbono. Ela desempenha um papel crucial no resfriamento ambiental por meio da evapotranspiração, convertendo calor sensível em calor latente. A evapotranspiração é essencial para o conforto térmico em áreas urbanas, como destacado por Moss et al. (2019). A promoção do conforto térmico também depende da capacidade das árvores em prover sombreamento, processo este que aumenta em magnitude conforme a árvore cresce em altura e diâmetro de copa (Locosselli e Buckeridge, 2023).

Em casos nos quais a assimilação de carbono e a condutância estomática são afetadas, o crescimento das árvores e a provisão de serviços ecossistêmicos são limitados, restringindo assim, o papel das árvores como ferramentas de SbN (Locosselli, 2020). A compreensão da interação entre processos biológicos e condições climáticas é crucial, não apenas para o desenvolvimento das árvores e a provisão de serviços ecossistêmicos, como também para o sequestro de carbono e mitigação do aumento de temperatura, visto que há uma relação positiva entre o tamanho das árvores e a provisão destes serviços (Locosselli e Buckeridge, 2023).

1.4 Dendrocronologia

Como há esta relação direta entre o desenvolvimento do indivíduo arbóreo e a magnitude dos serviços que este prove, é fundamental para a tomada de decisão uma ferramenta capaz de avaliar em detalhes o crescimento das árvores (Calquist, 1988; Stokes

e Smiley, 1968). A ciência da Dendrocronologia se destaca neste contexto como, o estudo das sequências cronológicas dos anéis de crescimento (Miyahara et al. 2022; Stokes e Smiley, 1968). Para poder ser analisado sob a ótica da Dendrocronologia, o anel de crescimento precisa ser visualmente distinto de acordo com variações na estrutura anatômica do lenho, e estas mudanças precisam ser formadas dentro de um período de um ano (Pilcher, 1990; Schweingruber, 1988). Além disso, os anéis de crescimento precisam ser sensíveis às variações nas condições ambientais para que possam ser informativos (Callado et. al. 2001; Fritts, 1976; Schweingruber, 1988). Por exemplo, em situações de extrema seca ou elevados níveis de precipitação, essas flutuações devem ser refletidas na formação de anéis de crescimento com dimensões distintas (Stokes e Smiley, 1968; Schweingruber, 1988). Essa capacidade de resposta, ou sensibilidade, não apenas enriquece a representação anual, mas também proporciona uma leitura detalhada das condições ambientais específicas que afetaram o desenvolvimento de indivíduos arbóreos (Botosso & Mattos, 2002; Pilcher, 1990).

O anel de crescimento é fruto da atividade sazonal do câmbio (tecido meristemático), e é constituído por dois componentes distintos: o lenho inicial formado no início da estação de crescimento e o lenho tardio formado durante o final da estação de crescimento (Calquist, 1988; Stokes e Smiley, 1968). O lenho inicial é produzido assim que as condições ambientais se tornam favoráveis ao crescimento, caracterizando por um período de taxa de crescimento mais alta que pode se refletir numa tonalidade mais clara da madeira. O lenho tardio é então formado quando as condições de crescimento começam a se tornar menos favoráveis, período no qual a atividade cambial e a taxa de crescimento são menores (Carlquist, 1988; Tomazello-Filho et, al. 2000). Esta mudança na atividade cambial pode resultar numa coloração mais escura devido à redução no tamanho das células e ao espessamento das paredes celulares (Stokes e Smiley, 1968). Existem variações de

anéis de crescimento, como: anéis porosos, semi-porosos, porosidade difusa, delimitados ou não por faixa de parênquima marginal e zona fibrosa (Tarelkin et. al. 2016).

A medida da largura do anel de crescimento representa uma estimativa de volume de madeira adicionado anualmente (Akachuku, 1985; Tomazello-Filho et. al. 2013). A largura do anel de crescimento é usada para avaliar o crescimento das árvores ao longo de sua vida por meio de padrões de crescimento de longo prazo, estimar as respostas das árvores às variabilidades climáticas em alta-frequência, ou escala interanual, e desvendar o quão vulnerável são as árvores a eventos climáticos extremos (Castagneri, et al. 2022). A vulnerabilidade das espécies arbóreas à eventos extremos pode ser avaliada por meio do cálculo de resistência, parâmetro este associado à capacidade de um sistema manter a integridade diante de desafios externos; além do cálculo da resiliência, que envolve a capacidade de enfrentar uma perturbação e voltar aos níveis de crescimento pré-perturbação; e a recuperação, que envolve a restauração das condições pré-existentes ou a adaptação frente a uma perturbação (Castagneri, et al. 2022; Clark et. al. 2016).

As informações obtidas com a largura do anel de crescimento podem então ser complementadas pela medida da densidade da madeira, a qual oferece informações significativas sobre a biomassa efetivamente alocada durante o crescimento, sendo uma característica intrinsecamente ligada à segurança. A maior densidade é resultado de fibras mais espessas, vasos de menor calibre e alterações na estrutura da madeira associadas à segurança hidráulica, conforme destacado por Polgue (1963). Existem muitos trabalhos que mostram uma relação negativa entre a taxa de crescimento e a densidade da madeira como Tomazello et al. 2008 e Brien et al, 2016. Este balanço bem retratado na literatura representa estratégias bem distintas, uma mais voltada ao investimento em aumento de dimensões, e a outra mais voltada à segurança (Kanieski, et al. 2017; Carlquist et. al. 1988).

Porém, tanto a largura do anel de crescimento quanto a densidade da madeira não permitem uma estimativa do status fisiológico das árvores durante o período de crescimento. A análise de isótopos permite avançar o conhecimento sobre as estratégias fisiológicas das plantas. Conforme apontado por Kennedy e Krouse (1990), os isótopos são considerados átomos do mesmo elemento com diferentes números de nêutrons, resultando em massas diferentes. Os isótopos estáveis são expressos em termos de razão isotópica, como por exemplo o $\delta^{13}\text{C}$ representa a razão entre C^{13} e C^{12} , e o $\delta^{18}\text{O}$ que é a razão entre O^{18} e O^{16} . A análise em pares isotópico é utilizada, pois, a diferença de peso entre os isótopos influencia nos processos fisiológicos responsáveis pelo fracionamento isotópico (Pereira, 2007) e na assinatura destes registrada nos anéis de crescimento das árvores (Cintra, 2021; McCarrow e Loader, 2004), como a assimilação e a evapotranspiração.

Sabe-se que a análise dos isótopos estáveis pode ser usada como um indicativo indireto de alguns parâmetros da fisiologia foliar (Farquhar et al. 1982; Locosselli et al. 2020). A variação de parâmetros fisiológicos, como a condutância estomática e a taxa fotossintética, fica registrada nos anéis de crescimento das árvores, sendo possível acessar este registro por meio da análise intra-anual de isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) e oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) (McCarrow e Loader, 2004).

Ao assimilar CO_2 da atmosfera, as plantas realizam o fracionamento, dando preferência para o carbono mais leve (C^{12}) durante o processo de difusão pelo estômato, devido à sua maior velocidade de difusão. A RuBisCO, ao realizar a assimilação, também demonstra maior afinidade pelo C^{12} em comparação ao C^{13} . Assim, tanto a condutância estomática, quanto a fotossíntese podem influenciar a assinatura isotópica das árvores (Cintra et. al. 2019; Farquhar et al. 1982).

Os isótopos estáveis de oxigênio também podem auxiliar na compreensão da

fisiologia foliar pois durante o processo de evapotranspiração ocorre a perda da água mais leve (O^{16}), resultando no acúmulo de água mais pesada no mesófilo foliar (O^{18}) (Fichtler et al. 2010; McCarrow e Loader, 2004). Essa mudança na assinatura isotópica do oxigênio na folha tem impacto direto nos açúcares responsáveis pela formação da parede celular nos anéis de crescimento, (Chapin 1990; Hoch et al. 2003) tal fato, pode ser considerado uma informação valiosa sobre a estratégia das árvores frente às condições ambientais favoráveis ou desfavoráveis (Ehleringer et al. 1993; Locosselli e Buckeridge, 2017).

2 Objetivos

Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto da seca de 2013/2014 no desenvolvimento de *Cedrela fissilis* presente nas florestas urbanas da cidade de São Paulo. Tal evento, é considerado de interesse pois ainda não está claro como as árvores urbanas respondem à eventos climáticos extremos e qual o nível de vulnerabilidade da espécie.

2.1. Objetivos específicos

- Comparar se a taxa de crescimento, densidade e teor isotópico diferem entre as áreas e se podem ser utilizados como indicativos da vulnerabilidade das árvores urbanas.
- Comparar a taxa de crescimento, a densidade da madeira e as assinaturas isotópicas do lenho das árvores de um parque urbano (Parque Ibirapuera) e um fragmento de Mata Atlântica urbano (PEFI), para entender como os dois locais se comportam perante a eventos climáticos extremos.
- Avaliar se o ano 2013/2014 afetou negativamente o crescimento destas árvores.
- Definir as estratégias de respostas à seca por meio da variabilidade inter-anual de crescimento, densidade da madeira e isótopos estáveis de carbono e oxigênio

para entender o comportamento desses indivíduos.

- Determinar a resistência, resiliência e capacidade de recuperação após o evento extremo.
- Propor recomendações para a seleção de espécies arbóreas e gestão de áreas verdes urbanas que promovam a resiliência de uma infraestrutura verde das cidades às mudanças climáticas e eventos extremos.

3 Material e Métodos

3.1. Locais de Coleta e Espécies

As árvores foram coletadas com o auxílio de um trado manual (ver Figura 1), nos Parques Ibirapuera, (23.5874° S, 46.6576° W, 158 ha) exemplo de vegetação heterogênea com espécies plantadas, sendo elas: espécies nativas e exóticas, e no Parque Estadual Fontes do Ipiranga (23.38'24.6" S, 46° 37' 03.1" W, 540 ha) como um fragmento de Mata Atlântica urbano como uma vegetação majoritariamente densa (ver Figura 2). Foram selecionados cinco indivíduos em cada parque e foi coletado dois raios por indivíduo de *Cedrela fissillis* (Anexo Tabela A1 e A2), espécie presente na Mata Atlântica e transições com o Cerrado (ver Figura 3) (Barros et. al. 2002; Kabashima et al. 2011).

A espécie *Cedrela fissilis* foi usada neste estudo devido à viabilidade para análises dendrocronológicas. Os anéis de crescimento são visualmente distintos (Tomazello Filho et al. 2000; Iwasaki-Marochi, 2007), e a faixa parenquimática apresenta uma delimitação nítida mesmo após o processo de extração de celulose (ver Figura A2 – Anexo). Além disso, a *Cedrela fissilis* é uma espécie comum em diversos parques da cidade de São Paulo (Gomes, 1992) , incluindo o Parque Ibirapuera e o PEFL. Optou-se por investigar dois parques distintos, visando o objetivo de avaliar a performance

de *C. fissilis* sob condições ambientais distintas. O PEFI apresenta uma floresta mais densa (Milanez et al., 1990) enquanto o Parque Ibirapuera exibe uma configuração mais aberta e urbanizada (Prefeitura do Município de São Paulo, 2016), ambos possuem diferentes níveis de interferência antrópica direta e impacto do entorno.



Figura 1: Trado de incremento manual usado para coleta da espécie *Cedrela fissilis*.

Autora: Letícia Figueiredo.



Figura 2: Recorte de um fragmento adensado no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga.

Autor: Giuliano Maselli

Após a coleta e a secagem do material ao ar livre, as amostras dos indivíduos coletados foram coladas com cola branca em suporte de madeira apropriado, orientando as fibras no sentido vertical para melhorar a visualização dos anéis de crescimento na superfície transversal.

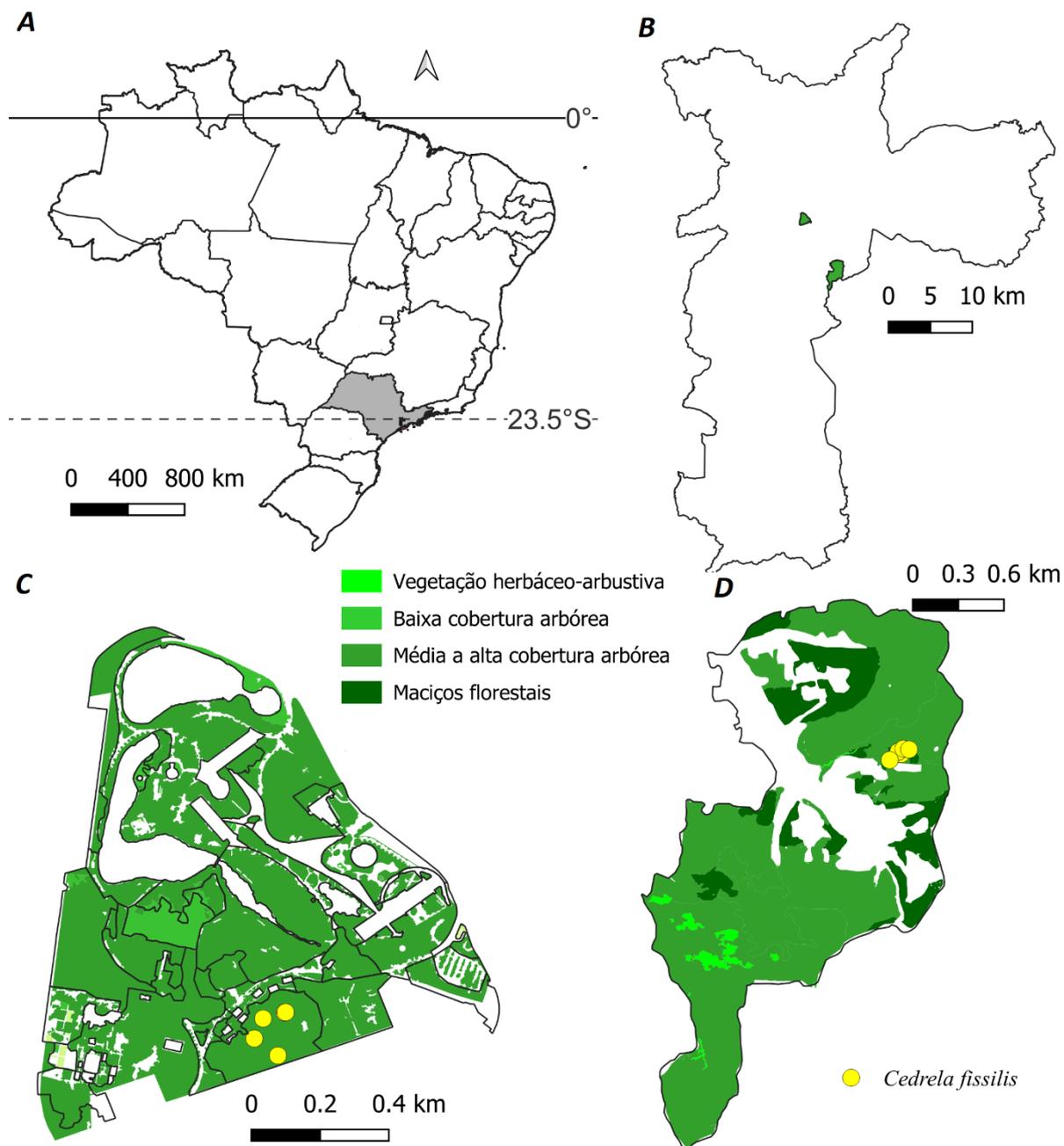


Figura 3: Este estudo foi realizado no Estado de São Paulo (cinza), Brasil (A), nos Parques Ibirapuera e Estadual das Fontes do Ipiranga (verde) na cidade de São Paulo (B). Foi coletada a espécie nativa *Cedrela fissilis* no Parque Ibirapuera e no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (C e D, respectivamente). Nos painéis C e D, foram representados os tipos de vegetações presentes em tons de verde.

3.2. Preparação das amostras

As amostras de madeira foram lixadas em lixas com granulometrias sucessivas (de 100 a 400) e escaneadas em alta resolução com 2400 dpi no equipamento Epson 11000xl.

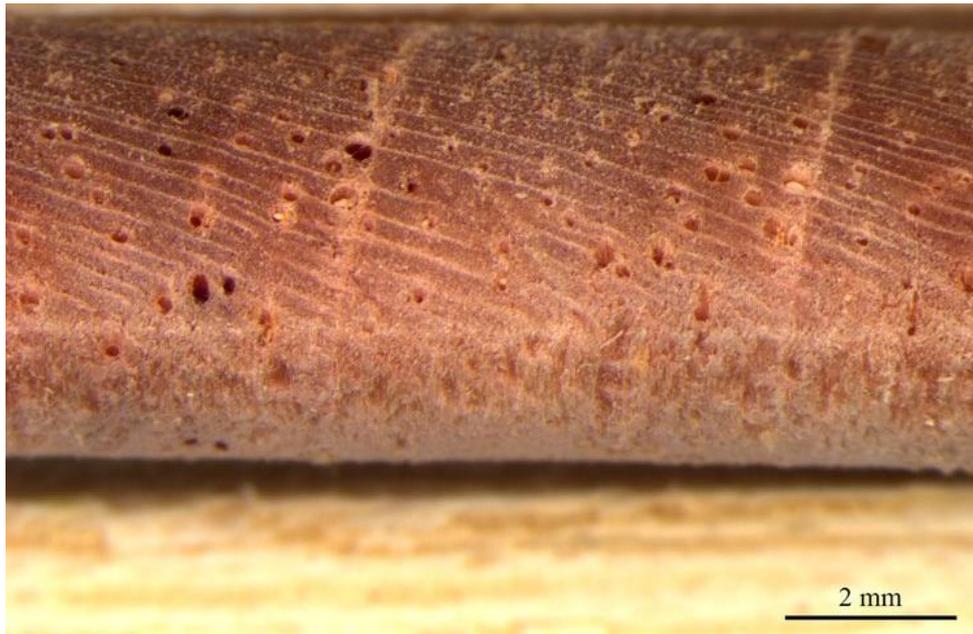


Figura 4: Exemplo de anel de crescimento de *Cedrela fissilis*, caracterizado pela semiporosidade dos vasos e delimitado por uma faixa de parênquima marginal.

Autora: Isabella Cantelles

Após o registro das imagens das amostras por meio de um scanner, estas foram cuidadosamente seccionadas utilizando micro serras circulares (ver Figura 5), resultando em secções finas de 1.7mm a 2mm de madeira no sentido câmbio-medula. As amostras foram então submetidas a um processo de climatização, por aproximadamente 12h.



Figura 5: Secção das amostras de *Cedrela fissilis* no equipamento Proxxon ks230.

Autora: Isabella Cantelles

3.3 Densitometria

Nesta etapa, foram obtidas imagens digitais de raios-x das amostras utilizando o equipamento MDRS (*MultiFocus Digital Radiography System*). As imagens foram obtidas juntamente com uma cunha de acetato para calibração de densidade de $1,274 \text{ g/cm}^3$. A densidade aparente (ρ_{apar}) foi mensurada no software WinDENDRO™ a partir dessas imagens digitais e processadas no programa ImageJ para dar contraste as imagens, que resultaram nos seguintes parâmetros: largura dos anéis de crescimento anuais (total, lenho inicial, lenho tardio) e densidade do anel de crescimento (total, lenho inicial, lenho tardio, mínima e máxima) (Tomazello-Filho et al., 2008).

Todos os procedimentos referentes a preparação e análise das amostras de madeira foram executados no Laboratório de Dendrocronologia, Anatomia e Identificação da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, na Xiloteca Nanuza Luiza de Menezes na USP/SP e no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (CENA).

3.4. Extração de celulose, Pesagem, Homogeneização e Encapsulamento das amostras

Na fase subsequente, as amostras foram seccionadas em segmentos com até 7,5cm de comprimento e devidamente identificadas em uma tabela do *Microsoft Excel* versão 2403. Posteriormente, foram dispostas em uma caixa de Teflon (ver Figura 6) para a etapa de extração de celulose. Em seguida, as amostras foram acondicionadas individualmente em caixas de teflon, com uma coluna de separação entre cada uma. Fez-se a preparação do banho-maria, que foi preenchido com água e ajustado para manter uma temperatura constante de 70°C durante todo o processo.

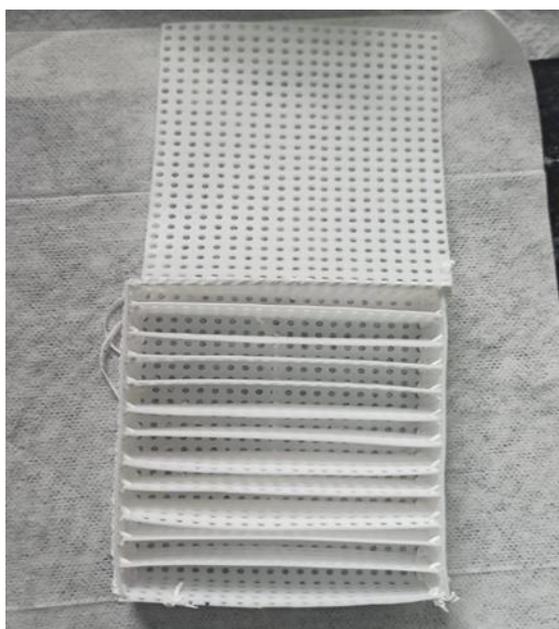


Figura 6: Caixa de Teflon utilizada do Centro de Pesquisas em Geocronologia e Geoquímica Isotópica - USP – SP para extração de celulose das amostras.

Autora: Natália Santos.

Na primeira solução de banho, visando remover resinas e compostos secundários, utiliza-se 80g de NaOH 5% e água destilada até atingir 1600g na balança, garantindo uma concentração mássica (m/m). O NaOH foi homogeneizado e na solução foram mergulhadas as caixas de teflon, contendo as amostras identificadas e lacradas. A solução foi deixada por

2h e o processo foi repetido, totalizando 4h de imersão em dois banhos de NaOH 5% cada. Após os banhos, lavagens com água quente e fria foram realizadas. Em seguida, a solução de 7,5% de NaClO₂ foi homogeneizada. Foram pesados 150g de NaClO₂ + 1600g de água destilada + 11,5mL de ácido acético glacial. A solução foi colocada em banho-maria e deixado agir por 8-10h (Figura 7). Foram realizados no total 4 repetições de banhos de NaClO₂. E por último, as amostras foram lavadas em água destilada e congeladas para serem submetidas à secagem em liofilizador por 48h seguindo o método Kagawa et al. (2015).



Figura 7: Amostras de *Cedrela fissilis* após o banho-maria de 8/10h.

Autora: Isabella Cantelles

Nesta etapa, precede-se à identificação precisa do início ao fim de cada anel de crescimento com o auxílio das imagens de scanner e raio-x, utilizando do método de convenção de Schulman (1956). Inicialmente, o anel foi individualizado e depois subdividido em três segmentos, resultando em três partes, cada uma contendo um terço da massa total do anel (Locosselli et al. 2020).

Esses segmentos são então registrados em uma tabela (Anexo Tabela A3) e subdivididos em início, meio e fim. Possivelmente, há uma coerência temporal maior entre

as amostras ao obtê-las por mesma massa do que por largura, pois a atividade cambial não é completamente constante durante a estação de crescimento e a densidade da madeira reflete mais de perto a atividade cambial durante a estação de crescimento (Locosselli et al. 2020).

As amostras foram então homogeneizadas, e foi adicionado 1,5mL de água destilada em cada tubo de Eppendorf. Em seguida, as amostras foram submetidas a agitação em um *Geno Grinder*[®] por duas vezes, durante 5 minutos cada, a uma velocidade de 1200 rpm. Após essa etapa, as amostras foram congeladas em um freezer com temperatura ajustada a -22°C e liofilizadas por em média 48h, para garantir a completa secagem das amostras (Cintra et. al. 2019).

Após a secagem, inicia-se o encapsulamento dos anéis de crescimento. Cada cápsula é cuidadosamente pesada, utilizando uma balança de precisão, capaz de garantir a exata pesagem de 100µg +- 10 µg por cápsula. Durante esse processo, as cápsulas de prata são utilizadas para amostras de oxigênio (O₂) devido à sua notável resistência/estabilidade, e ao elevado ponto de fusão que atingem no momento da análise. Em contrapartida, as cápsulas de estanho utilizadas em amostras de carbono (CO₂) emergem como uma opção viável, devido ao seu ponto de fusão mais baixo, tornando-as economicamente mais acessíveis.

Uma vez alcançado o peso desejado (100µg +- 10 µg) por cápsula, a extremidade cápsula é fechada e dobrada cuidadosamente. Em seguida, a cápsula é colocada na placa de Elisa, a fim de, manter a integridade das amostras para a análise subsequente e para não perder a referência da amostra.

Foram utilizados os padrões de: Trigo da SERCON, Cellulose-CH₃ e Benzoic Acid-601 da IAEA para ¹³C e Celulose 3.2 (padrão interno), Cellulose-CH₃ da IAEA e Benzoic-Acid da HEKAtech para ¹⁸O. O padrão consiste em uma substância com uma assinatura isotópica conhecida, permitindo-nos verificar a precisão do equipamento ao estimar o valor isotópico nas amostras. A organização cuidadosa dos dados nessa tabela é de extrema

importância, pois proporciona um controle sistemático dos experimentos e dos resultados obtidos.

3.5. Análises estatísticas

Com o intuito de avaliar o comportamento dos indivíduos entre os locais de coleta, calculamos as médias das variáveis para cada indivíduo, incluindo a densidade da madeira, δ^{13} e $\delta^{18}\text{O}$, e comparamos estas variáveis entre os locais utilizando o Teste-t (Zar, 1999). Em seguida, para compreender as tendências temporais dessas variáveis na população, construímos séries temporais representativas. Para isso, aplicamos uma técnica chamada *detrrending* para retirar as tendências ontogenéticas sobre o crescimento das árvores. Para isso, foi ajustada uma regressão linear às séries individuais de todas as variáveis, e calculou-se os resíduos destas regressões, ou seja, a diferença entre o valor observado e o valor previsto pela equação linear. Ao fim, foi calculada a série média de cada variável analisada (largura de anel de crescimento, densidade da madeira, isótopos estáveis de carbono e oxigênio em três posições de cada anel) nos dois locais de estudo.

Posteriormente, para explorar as relações entre as diferentes variáveis estudadas e o clima, construímos uma matriz de correlação, usando o *software* Rstudio (versão Rstudio Team, 2022). Foram utilizados dados precipitação e temperatura em escala anual (Figura A3), e correspondente à estação de crescimento compreendendo os meses de outubro a fevereiro (INMET, 2024). Essa análise nos permitiu identificar padrões de associação entre as variáveis climáticas e as características da população.

Por fim, utilizando a largura do anel de crescimento calculamos os valores de resiliência, resistência e recuperação para cada uma das populações. As equações utilizadas foram:

$$Resistance (Rt) = \frac{Dr}{Pre \ Dr}$$

$$Recovery (Rc) = \frac{Post \ Dr}{Dr}$$

$$Resilience (Rs) = \frac{Post \ Dr}{Pre \ Dr}$$

No qual, *Dr* refere-se ao crescimento radial de cada árvore no ano de seca, *Pre dr* refere-se ao crescimento radial médio de dois anos antes de cada evento de seca e *Post dr* refere-se ao crescimento radial médio de três anos após cada evento de seca (Lloret et al., 2011).

*As figuras apresentadas no corpo principal desta dissertação estão em inglês, tendo em vista a posterior redação do artigo científico.

4. Resultados e discussão

Com base nas variáveis medidas, incluindo taxa de crescimento, densidade da madeira, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$, observamos que as árvores no Parque Ibirapuera (Figura 8) crescem em média 83% mais rápido em comparação com as do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga. Esse resultado é considerado positivo, pois quanto maior é a taxa de crescimento de *Cedrela fissilis* (Santos, 2005), mais CO_2 é sequestrado, e mais serviços ecossistêmicos relacionados ao tamanho da árvore e a fisiologia foliar estão sendo produzidos (Locosselli e Buckeridge, 2023). Surpreendentemente, esta diferença na taxa de crescimento não reflete nos outros parâmetros analisados, como a densidade da madeira, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$. Tal fato, pode indicar que essas populações de *Cedrela fissilis* estão sob um status fisiológico semelhante (Xu et. al. 2022).

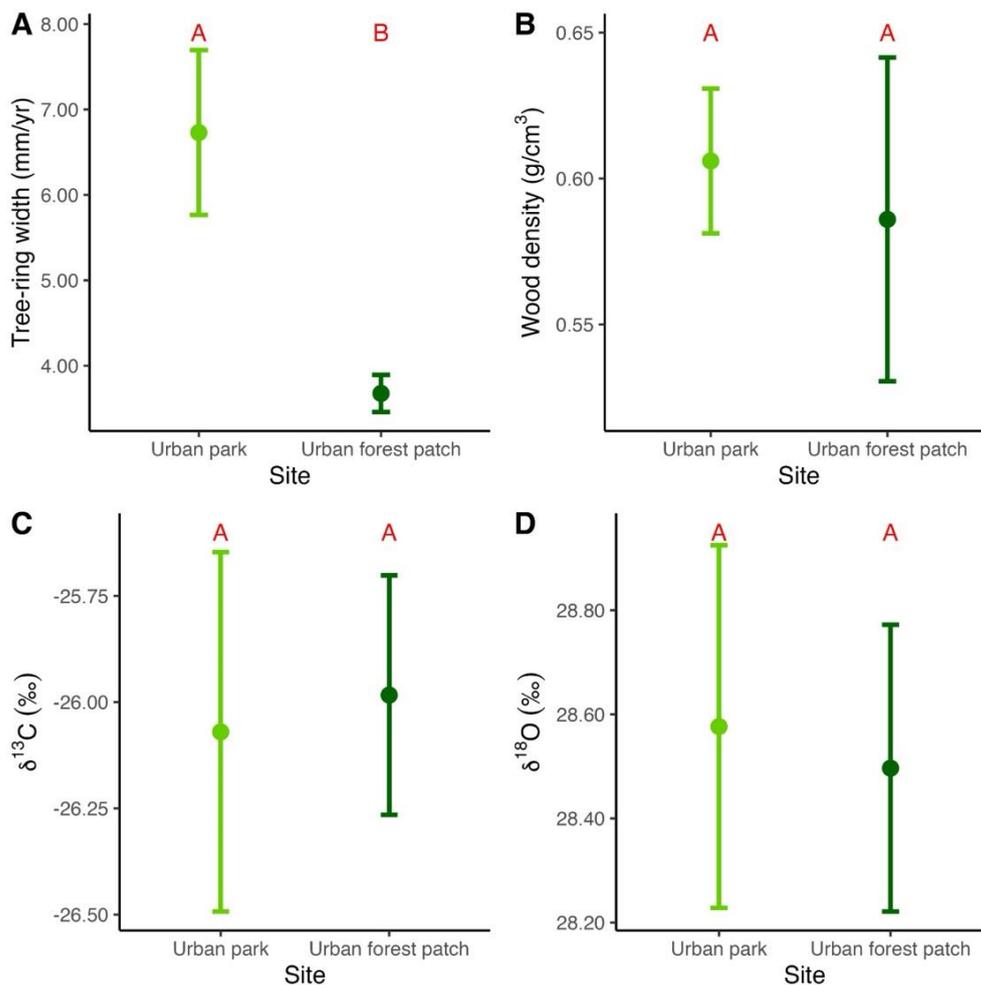


Figura 8: Média e erro padrão da largura dos anéis de crescimento (A). Densidade da madeira dos anéis de crescimento (B). Isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) (C) e isótopos estáveis de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) (D). As letras maiúsculas representam o resultado do teste-t de comparação das médias. Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas entre os dois locais de estudo.

Essa disparidade no crescimento das árvores entre os parques provavelmente está relacionada à menor competição por recursos no Parque Ibirapuera. A disponibilidade mais abundante de recursos, como luz solar, água e nutrientes, pode proporcionar um ambiente mais favorável para o crescimento das árvores nesse local, resultando em taxas de crescimento mais elevadas em comparação com o PEFI, onde a competição por recursos pode ser mais

intensa (Barros, et al. 2002, Milanez et al., 1990). Este último local é caracterizado por uma vegetação mais densa, o que resulta naturalmente em uma alta competição por luz solar e recursos do solo.

Apesar da diferença observada na taxa de crescimento média das duas populações, todos os indivíduos analisados apresentaram uma redução na taxa de crescimento durante a seca de 2013/2014 conforme observado na cronologia média apresentada na Figura 9. A redução da disponibilidade de água no solo durante períodos de seca pode levar as árvores ao estresse hídrico, impactando negativamente seu crescimento (Lloret et al. 2011). Esse estresse pode resultar na diminuição da taxa fotossintética, pois as árvores reduzem sua atividade metabólica para conservar água, limitando a produção de carboidratos e açúcares (Davies et al. 1981). Portanto, a seca prolongada leva a uma diminuição no crescimento radial, refletido nos anéis de crescimento (Paredes-Villanueva et. al. 2016).

Apesar de as duas populações terem respondido à seca de 2013/2014, que se caracteriza como um evento de precipitação extremo, nota-se que a cronologia do anel de crescimento tem uma relação significativa com a precipitação apenas no Parque Ibirapuera (Figura 10). Este resultado aponta para uma alta sensibilidade das árvores do Parque Ibirapuera à variabilidade interanual de precipitação, na qual as árvores crescem mais quando há maior volume de precipitação e menos quando o volume de água é menor. A falta de uma associação significativa entre o crescimento das árvores do PEFI e a precipitação, pode ser explicada por dois mecanismos concorrentes. A eventual falta de um sinal de precipitação no crescimento pode ser decorrente da maior competição por recursos no PEFI que pode sobrepor o sinal da precipitação no crescimento das árvores (Casper, 1996). De forma alternativa, a condição microambiental mais estável do PEFI pode reduzir a sensibilidade das árvores à precipitação.

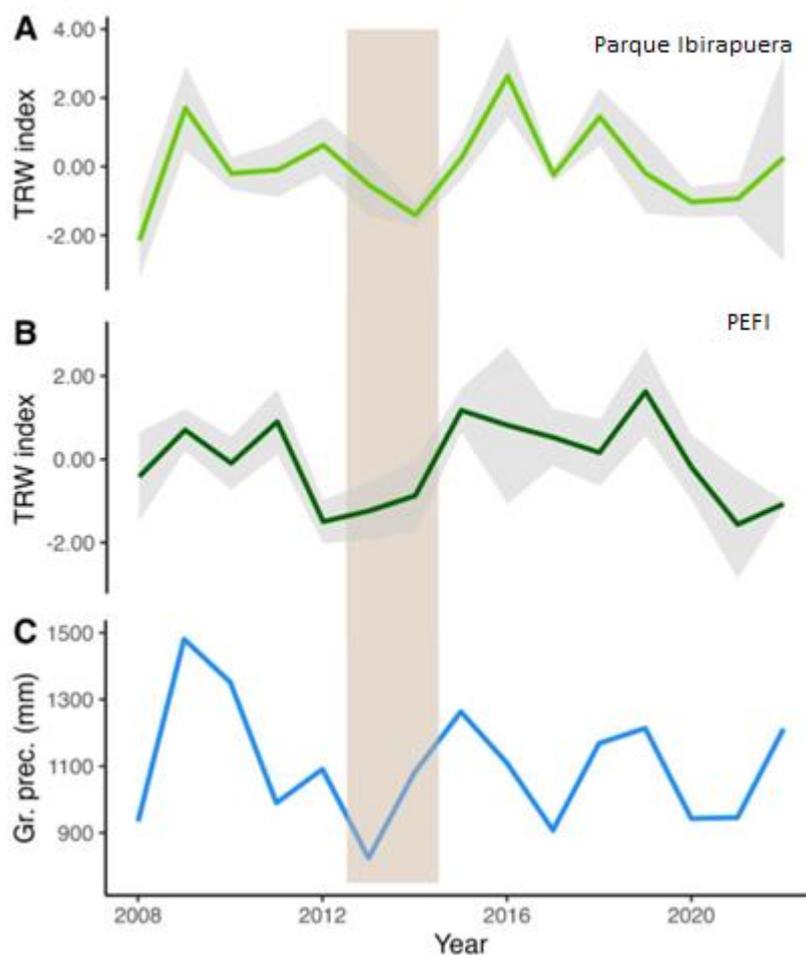


Figura 9: Cronologia de largura de anéis de crescimento das árvores no Parque Ibirapuera (*Urban park*) (A) e no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (*Urban forest patch*) (B). Precipitação durante a estação de crescimento (outubro a fevereiro) medida em mm no Mirante Santana (INMET, 2024) (C). A faixa marrom destaca o período da seca de 2013/2014 alvo deste estudo.

Quanto a densidade da madeira, não encontramos relação significativa com o clima no Parque Ibirapuera. Porém há uma relação significativa nas árvores do PEFI e há uma relação negativa entre a densidade e a precipitação. Isso sugere que durante períodos de menor precipitação, as árvores produzem uma madeira mais densa como um investimento em segurança hidráulica durante a seca (Fichtler et al. 2010). Em relação ao $\delta^{13}\text{C}$, observamos uma relação negativa com a densidade do meio do anel de crescimento e a

precipitação no Parque Ibirapuera, indicando uma possível modulação dos estômatos em resposta à disponibilidade de água (Nobre et al, 2016), mas essa mesma relação não pôde ser observada no PEFI. Por fim, identificamos uma relação negativa entre a densidade da madeira e a taxa de crescimento no PEFI, mas não no Ibirapuera. Isso sugere que, no Parque Ibirapuera, a taxa de crescimento pode ser menos influenciada pela competição por recursos, ao contrário do PEFI.

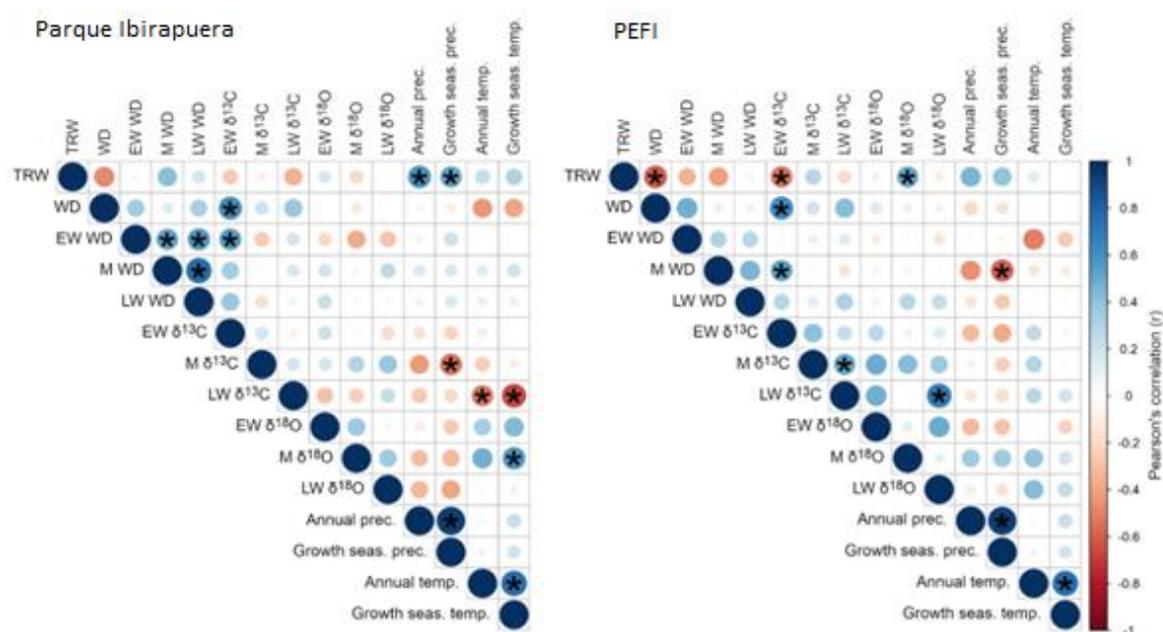


Figura 10: Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis dendrocronológicas e climáticas em ambos os locais de estudo na cidade de São Paulo. * estatisticamente significativo para $\alpha = 0.05$.

O possível investimento em segurança no meio do anel de crescimento durante períodos de menor disponibilidade hídrica é confirmado por meio do padrão da densidade da madeira (Figura 11) ao longo do anel de crescimento para todos os anos das árvores estudadas. Esta mudança no meio do anel de crescimento durante a seca que ocorreu no meio da estação chuvosa sugere que as árvores podem ter modulado sua densidade para garantir a segurança

hidráulica e minimizar os impactos da variabilidade climática no crescimento. Este não foi observado no Parque Ibirapuera, cuja a densidade da madeira mostra um padrão consistente longo dos anos, mesmo durante períodos de condições secas.

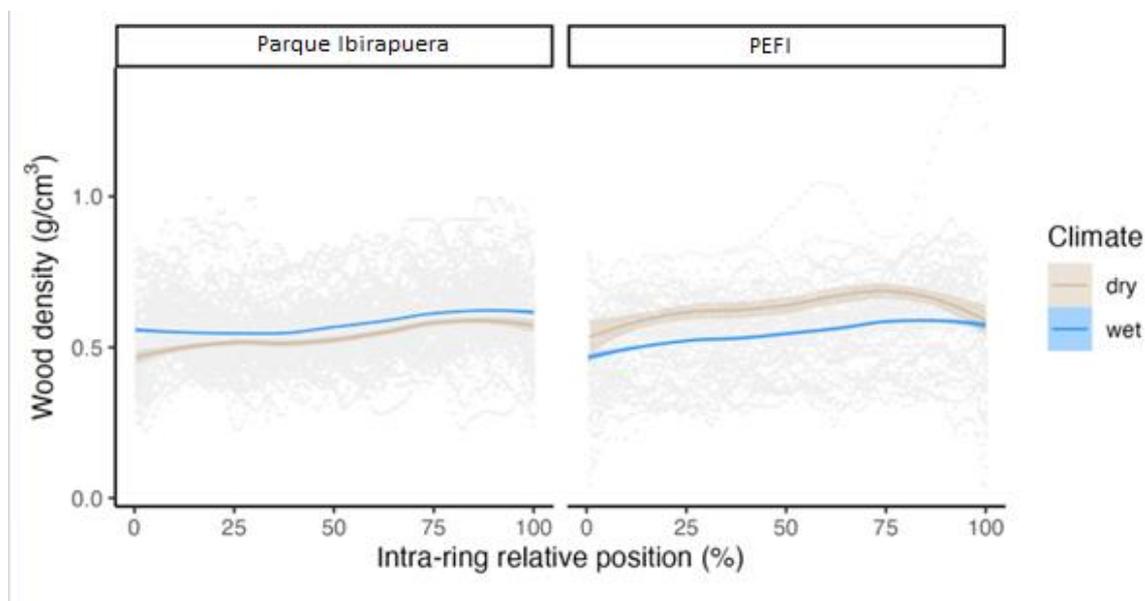


Figura 11: Perfil intra-anual de densidade da madeira apresentado em posição intra-anual relativa (%) para o ano de 2013/2014 (marrom) e todos os outros anos em conjunto (azul) em cada local de coleta.

Estas estratégias distintas para contornar os efeitos do evento de seca em estudo não resultaram em diferenças significativas em termos de resistência e resiliência das árvores dos dois locais de estudo (Figura 12). A média da resiliência foi ligeiramente maior no PEFI em comparação com o Parque Ibirapuera, mas essa diferença não alcançou significância estatística. No entanto, a maior recuperação observada no PEFI sugere uma capacidade maior de retomar as taxas de crescimento pré-seca, provavelmente pelo maior investimento destas árvores em segurança hídrica (Castagneri et. al. 2022).

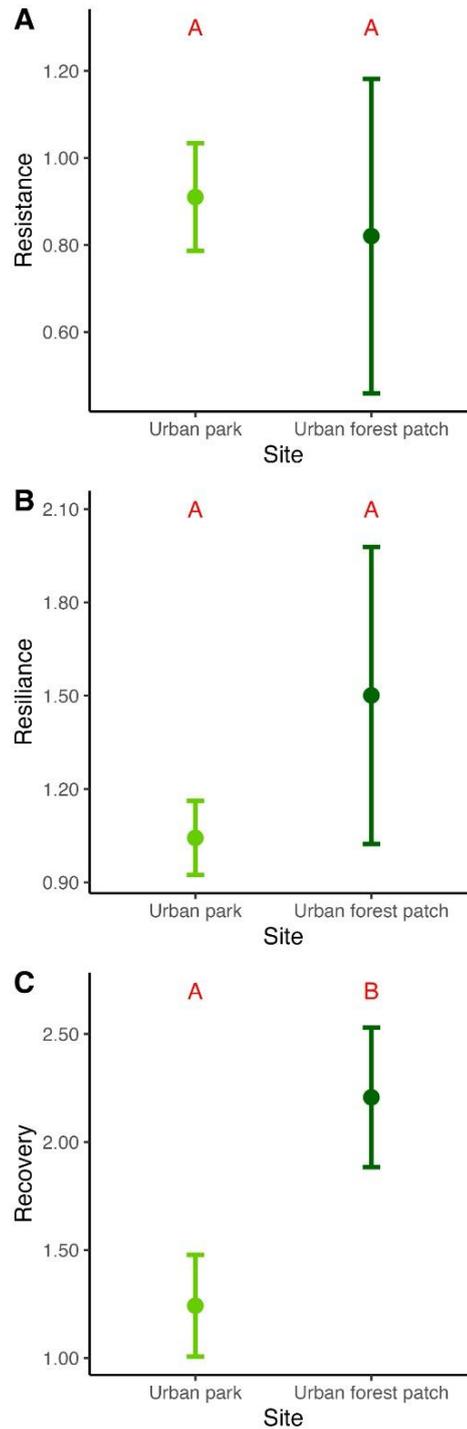


Figura 12: Média e erro padrão dos valores de individuais de resistência (A), resiliência (B) e recuperação (C). As letras maiúsculas representam o resultado do teste-t de comparação das médias. Letras diferentes representam diferenças estatisticamente significativas entre os dois locais de estudo.

As árvores nos parques demonstraram diferentes respostas à seca dos anos de 2013 e 2014, revelando estratégias distintas para lidar com a variabilidade climática. No Parque Ibirapuera, observa-se um controle estomático nas folhas, caracterizando uma possível estratégia de aquisição, enquanto no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, as árvores priorizaram a segurança hidráulica, adotando uma estratégia conservativa. Essa diferença pode sugerir que as árvores do PEFI podem ter uma maior capacidade de recuperação. Em um contexto de Mudanças Climáticas, é importante considerar estratégias conservativas, pois estas permitem que as árvores mantenham sua resistência e se recuperem de eventos extremos de maneira mais rápida e eficiente.

Conclusões Finais

As árvores no fragmento urbano de Mata Atlântica (PEFI) mostraram uma menor vulnerabilidade durante a seca de 2013/2014 em comparação com os indivíduos do parque urbano (Parque Ibirapuera). Isso pode ser atribuído a um investimento em características como maior densidade da madeira como uma medida para aumentar a segurança hidráulica em anos com menor disponibilidade de água. Por outro lado, as árvores no parque urbano mostraram uma menor capacidade de recuperação, o que levanta preocupações sobre a vulnerabilidade destas árvores em face a secas extremas. Isso sugere a necessidade replicar as condições de crescimento encontradas no PEFI, de maneira que, os indivíduos adotem uma estratégia voltada para segurança hidráulica. Portanto, promover uma maior competição por recursos dentro do Parque Ibirapuera pode influenciar as estratégias das árvores da espécie *Cedrela fissilis* tornando as mais voltadas à segurança e resilientes aos efeitos de eventos extremos de seca, medida essa, um claro exemplo de uma intervenção de Soluções Baseadas na Natureza. Outra iniciativa, seria sugerir a criação de políticas públicas para aumentar o número de áreas como o PEFI nos municípios para ampliação dos serviços ecossistêmicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKACHUKU, J. Intra-annual variation in wood density in *Gmelina arborea* from X-ray densitometry and its relations with rainfall. **Tree Ring Bulletin**, Tucson, v.45, p.43-45, 1985.
- ALVES, A.C.N.; DE ANDRADE, T.C.Q.; NERY, J.M.F.G. A influência da vegetação e da ocupação do solo no clima urbano: um exercício analítico sobre a Avenida Paralela. **Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável**, v.4, n. 1, 2013.
- AMARAL, A. C.. B. Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira. **Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
- ANALITIS A, KATSOUYANNI K, BIGGERI A, et al. (2008) Effects of cold weather on mortality: results from 15 European cities within the PHEWE Project. *Am J Epidemiol* 168(12):1397-408
- ARNELL, Nigel W. **Climate change and global water resources: SRES emissions**, 2004.
- BARROS, F., M. C. H. MAMEDE, M. M. R. F. MELO, E. A. LOPES, S. L. JUNG-MENDAÇOLLI, M. KIRIZAWA, C. F. S. MUNIZ, H. MAKINO-WATANABE, S. A. C. CHIEA & T. S. MELHEM, 2002. **A flora fanerogâmica do PEFI: composição, afinidades e conservação**. In: D. C. BICUDO, M. C. FORTI & C. E. M. BICUDO (Orgs.): Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (PEFI): unidade de conservação que resiste à urbanização de São Paulo: 93-110. Editora da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, São Paulo.
- BARROS, M.T.L., PEREIRA FILHO, A.J., BRAGA JR., B.P.F. **Climatologia da precipitação na área do radar meteorológico de São Paulo**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Hidrologia e Recursos Hídricos, 1987. V. 2, p. 1-17.
- BELLINSON, Ryan G. **Connecting the dots: the politics of governing urban climate adaptation innovations through transnational municipal networks**. In: HUGHES, Sara; CHU, Eric K.; MASON, Susan G (Eds.). *Climate change in cities: innovations in multi-level governance*. Suíça: Springer, 2018.
- BETTS, R.A.; Cox, P.M.; Lee, S.E. and Woodward, F.I. **“Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations”**. *Nature*, 387, 796-799.1997.
- BLANCO, J.; SOURDRIL, A.; DECONCHAT, M.; BARNAUD, C.; CRISTOBAL, M.S.; ANDRIEU, E. How farmers feel about trees: Perceptions of ecosystem services and disservices associated with rural forests in southwestern France. **Ecosystem Services**, v.42, p. 1-11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101066>.

BOTOSO, P. C.; MATTOS, P. P. Conhecer a Idade das Árvores: Importância e Aplicação. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2002, 25 p.

BRIENEN, R.J.; SCHÖNGART, J.; ZUIDEMA, P.A. **Tree Rings in the Tropics: Insights into the Ecology and Climate**, 2016.

BROWN, L.R. **Eco-Economic: building an economy for the earth**, Norton, New York, 2001.

BUCKERIDGE, M. **Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água**. Estudos Avançados, v. 29, n. 84, p. 85–101, ago. 2015.

CALLADO, C., DA SILVA NETO, S., SCARANO, F., COSTA, C., 2001. Periodicity of growth rings in some flood-prone trees of the Atlantic Rain Forest in Rio de Janeiro, Brazil. *Trees - Struct. Funct.* 15, 492–497. <https://doi.org/10.1007/s00468-001-0128-4>

CALHEIROS, R.V. Resolução espacial de estimativas de precipitação com radar hidrometeorológico. 1982. 229 f. **Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos**, 2001: Características de nuvens convectivas. Comunicação Pessoal.

CARLQUIST, S. 1988. Comparative wood anatomy: systematic, ecological and evolutionary aspects of dicotyledons wood. Springer Verlag, Berlin.

CASPER, B.B. Demographic consequences of drought in the herbaceous perennial *Cryptantha flava*: effects of density, associations with shrubs, and plant size. **Oecologia** 106, 144–152 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF00328593>.

CASTAGNERI, D., Vacchiano, G., Hacket-Pain, A., DeRose, R. J., Klein, T., & Bottero, A. (2021). **Meta-analysis Reveals Different Competition Effects on Tree Growth Resistance and Resilience to Drought**. *Ecosystems*. Doi:10.1007/s10021-021-00638-4

CERNE B.; VERA, C. S. Influence of the intraseasonal variability on heat waves in subtropical South America. **Climate Dynamics**, v. 26, p. 2265-2277, 2010. Doi: 10.1007/s00382-010-0812-4

CHAPIN FS (1990) **The ecology and economics of storage in plants**. *Annu Rev Ecol System* 21:423–447.

CHASE, T.N.; Pielke, R.A.; Kittel, T.G.F.; Nemani, R.R., and Running, S.W. “Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter”. **Clim. Dyn.**, 16, 93-106. 2000.

CINTRA, B. B. L., Gloor, M., Boom, A., Schöngart, J., Locosselli, G. M., & Brienen, R. Contrasting controls on tree ring isotope variation for Amazon floodplain and terra firme trees. **Tree Physiology**. 2019.

CINTRA, B. B. L. Isótopos estáveis em estudos de Ecofisiologia Vegetal e Dendroclimatologia. Em: **X Botânica no Inverno**. [s.l.] Instituto de Biociências – Universidade Federal de São Paulo, 2021. P. 139–152.

CLARK JS, IVERSON L, WOODALL CW, ALLEN CD, BELL DM, BRAGG DC, D'AMATO AW, DAVIS FW, HERSH MH, IBANEZ I, JACKSON ST, MATTHEWS S, PEDERSON N, PETERS M, SCHWARTZ MW, WARING KM, ZIMMERMANN NE. 2016. The impacts of increasing drought on forest dynamics, structure, and biodiversity in the United States. *Glob Change Biol* 22:2329–2352

Davies, W. J., J. A. Wilson, R. E. Sharp, and O. Osonubi 1981. Control of stomatal behaviour in water stressed plants. In: P. G. Jarvis and T. A. Mansfield, (Editors), *Stomatal Physiology*, Cambridge University Press, Cambridge (U. K.). pp. 163–185.

ECDG (2015) Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities final report of the Horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities. Luxembourg.

EHLERINGER JR, Hall AE, Farquhar. Stable isotopes and plant carbon-water relations. **Academic Press**, New York. 1993.

ESCOBEDO FJ, Kroeger T, e Wagner JE (2011) Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environ. Pollut.* 159:2078–2087.

Eviner V (2004) Plant traits that influence ecosystem processes vary independently among species. **Ecological Society of America** 85(8):2215–2229.

FARQUHAR GD, O'Leary MH, Berry JA (1982) On the relationship between carbon isotope discrimination and intercellular carbon dioxide concentration in leaves. **Australian Journal of Plant Physiology** 9, 121 – 137.

FERREIRA, L. S.; DUARTE, D. H. S. Exploring the relationship between urban form, land surface, temperature, and vegetation indices in a subtropical megacity. **Urban Climate**, v.27, p.105-23, 2019.

FICHTLER E, Helle G, Worbes M. Stable-carbon isotope time series from tropical tree rings indicate a precipitation signal. **Tree Ring Res** 66:35–49. 2010.

FRITTS, H.C. (1976) *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.

GASPARRINI A, Guo Y, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Huber V, Tong S, Coelho MSZS, Saldiva PHN, Lavigne E, Correa PM, Ortega NV, Kan H, Osorio S, Kysely J, Urban A, Jaakola JJK, Rytö NR, Pascal M, Goodman PG, Zeka A, Michelozzi P, Scortichini M, Hashizume M, Honda Y, Hurtado-Diaz M, Cruz JC, Sepose X, Kim H, Tobias A, Iñiguez C, Forsberg B, Aström DO, Ragetti MS, Guo YL, Wu C, Zanobetti A, Schwartz J, Bell ML, Dang TN, Van DDV, Heaviside C, Vardoulakis S, Hajat S, Haines S, Armstrong B (2017) Projeções de excesso de mortalidade relacionada à temperatura sob o clima mudar cenários. *Lancet Saúde Planetária* 1:e360-367.

GHAFOURI A, Weber C (2020). Multifunctional Urban Spaces a Solution to Increase the Quality of Urban Life in Dense Cities. *Manzar, The Iranian Academic Open Access Journal of Landscape*, 12(51), 34-45.

GOMES, E. P. C., 1992, Fitossociologia do componente arbóreo de um trecho de mata em São Paulo, SP **Dissertação de Mestrado**, IBUSP, São Paulo, 143p.

GU D, Gerland P, Pelletier F, Cohen B (2015) **Risks of exposure and vulnerability to natural disasters at the city level: a global overview. United Nations** (Technical Paper N 2015/2)7.

HELLE G. and Scheleser GH (2004) Beyond CO₂ fixation by Rubisco – an interpretation of 13C/12C variations in the tree rings from intra-seasonal studies on broad-leaf trees. **Plant Cell and Environment** 27: 367-380.

HOCH G, Richter A, Korner C (2003) Nonstructural carbon compounds in temperate forest trees. **Plant Cell Environ** 26:1067–1081. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27422-5_20

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Mapa das Estações – Mirante de Santana, 2024.

IPCC AR4/SPM, 2007. Contribution of Working Group I for the Fourth Assessment Report (AR4), Summary for Policy Makers (SPM), WMO/UNEP, Geneva, Suíça.

IPCC TAR, 2001 In SINGER, Fred S. Nature, Not Human Activity, Rules Climate: Summary for Policymakers of the Report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change. 1^a ed. Chicago: The Heartland Institute, 2008.

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. In Press.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647)

IWASAKI-MAROCHI, C. Anéis anuais de crescimento do cedro (*Cedrela fissilis* – Meliaceae) aplicados à avaliação da taxa de crescimento e dendroclimatologia. 2007. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba

KABASHIMA, Y., M. L. F. ANDRADE, F. B. GANDARA, F. L. TOMAS, J. L. POLIZEL, G. D. N. VELASCO, L. F. SILVA, A. D. P. DOZZO, R. G. MOURA & D. F. SILVA FILHO, 2011. Histórico da composição da vegetação arbórea do parque do Ibirapuera e sua contribuição para a conservação da biodiversidade. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**.

KAGAWA A, Sano M, Nakatsuka T, Ikeda T, Kubo S (2015) An optimized method for stable isotope analysis of tree rings by extracting cellulose directly from cross-section laths. *Chemical Geology* 393-394: 16-25.

KANIESKI, M. R.; GALVÃO, F.; ROIG, F. A.; BOTOSSO, P. C. Dendroecologia de *Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B.Sm. & Downs e *Hovenia dulcis* Thunb. Em uma área degradada na floresta ombrófila mista aluvial, sul do Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1201- 1215, 2017.

KENNEDY, B. V., & KROUSE, H. R. (1990). *Isotope fractionation by plants and animals: implications for nutrition research. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology*, 68(7), 960–972. doi:10.1139/y90-146

LANDSBERG, HE. 1981. The urban climate. International Geophysics Series, Vol.28, **Academic Press**, New York, 275 P.

LEAL FILHO, W., Tripathi, S. K., Andrade Guerra, J. B. S. O. D., Giné-Garriga, R., Orlovic Lovren, V., & Willats, J. (2018). Using the sustainable development goals towards a better understanding of sustainability challenges. **International Journal of Sustainable Development & World Ecology**, 1–12. Doi:10.1080/13504509.2018.150567

LEE, J. G.; HEANEY, J. P. Estimation of urban imperviousness and its impacts on storm water systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 129, n. 5, p. 419-426, 2003.

Lloret, F., Keeling, E.G., Sala, A., Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. **Oikos** 120, 1909–1920. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>. 2011.

LOCOSSELLI G.M. e BUCKERIDGE M.S. Dendrobiochemistry, a missing link to further understand carbon allocation during growth and decline of trees. **Trees, Structure and Function** 6:1745-1758, 2017.

LOCOSSELLI, G. M. et al. Intra-annual oxygen isotopes in the tree rings record precipitation extremes and water reservoir levels in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 743, p. 140798.

LOCOSSELLI, Giuliano Maselli e BUCKERIDGE, Marcos. **The science of urban trees to promote well-being**. *Trees*, v. 37, p. 1–7, 2023 Tradução . . Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02389-2>. Acesso em: 23 fev. 2024.

LOCOSSELLI, Giuliano Maselli e BUCKERIDGE, Marcos. **The science of urban trees to promote well-being**. *Trees*, v. 37, p. 1–7, 2023 Tradução . . Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-023-02389-2>. Acesso em: 12 mar. 2024.

LOCOSSELLI, G.M. Capítulo 4: Soluções Baseadas na Natureza para redução da poluição do ar nas cidades. In: **Günther WR, Philippi A** (Eds.) Planejamento urbano e políticas ambientais – métodos, instrumentos e experiências. Faculdade de Saúde Pública, 2020.

MANES F, Silli V, Salvatorie E, Incerti G, Galante G, Fusaro L, Perrino C. (2014) Urban ecosystem services: tree diversity and stability of PM10 removal in the metropolitan area of Rome, **Annali di Botanica**, 4: 19–26.

MANOLI, G., Fatichi, S., Schläpfer, M. *et al.* The magnitude of urban heat islands is largely explained by climate and population. *Nature* 573, 55–60 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-151>

MARENGO JA, Alves LM, Ambrizzi T, Young A, Barreto NJC, Ramos AM (2020) Trends in extreme rainfall and hydrometeorological disasters in the metropolitan area of São Paulo: a review. **Ann N Y Acad Sci** 1472:5–20.

MARENGO JA, Alves LM, Ambrizzi T, Young A, Barreto NJC, Ramos AM. Trends in extreme rainfall and hydrometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Ann N Y Acad Sci**. 2020 Jul;1472(1):5-20. Doi: 10.1111/nyas.14307. Epub 2020 Feb 13. PMID: 32052870.

MARENGO, J. A. (2014). O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, (103), 25-32.
<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i103p25-32>.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, **MMA**, 2006.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C.; OBREGON, G O. Observed and projected changes in rainfall extremes in the metropolitan area of São Paulo. **Climate Research**, v.57, p.61-72, 2013.

MARENGO, J.; LACERDA, F. F.; BARKER, L. L. Eventos Extremos Sazonais: Secas de 2005 a 2010 e Enchentes de 2009. In: BETTS, R. Riscos das Mudanças Climáticas no Brasil. São José dos Campos: INPE/MOHC, 2011. P. 55.
Marengo, J.A. **Água e mudanças climáticas. Estudos Avançados**, v. 22, n.63, p. 83-96, 2008.

MARUYAMA, S. **Aquecimento Global – São Paulo: Oficina de Textos**, 2009.

MCCARROW D and Loader NJ (2004) **Stable isotopes in tree rings**. Quaternary Science Reviews 23: 771-801.

MEEHL, G. A. et al. Global Climate Projections. In: SOLOMON, S. D. et al. (Ed.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2007..MILLER, G. Tyler. Ciência ambiental. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

MING, A., ROWELL, I., LEWIN, S., ROUSE, R., AUBRY, T., & BOLAND, E. (2021). Key messages from the IPCC AR6 climate science report. **Cambridge Open Engage**.

doi:10.33774/coe-2021-fj53b This content is a preprint and has not been peer-reviewed.

MILANEZ, A.I., Bicudo, C.E.M., Vital, D.M. & Grandi, R.A.P. 1990. Criptógamos do Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, São Paulo, SP: Planejamento. **Hoehnea** 17: 43-49

MIYAHARA, A. A. L. et al. Urban dendrochronology toolkit for evidence-based decision-making on climate risk, cultural heritage, environmental pollution, and tree management – A systematic review. **Environmental science & policy**, v. 137, p. 152–163, 2022.

MONSON RK, Szejner P, Belmecheri S, Morino KA, Wright WE (2018) Finding the seasons in the tree ring stable isotope ratios. **American Journal of Botany** 105(5): 819-821.

MOSS JL, Doick KJ, Smith S, Shahrestani M (2019) Influence of evaporative cooling by urban forests on cooling demand in cities. *Urban Forestry & Urban Greening* 37: 65-73. Município de Piracicaba, São Paulo. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento**

NOBRE CA, Marengo JÁ, Seluchi ME, Cuartas LA, Alves LM (2016) Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern 8 Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection** 8: 252- 262.

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D. O aquecimento global e o impacto na Amazônia e na agricultura brasileira. **Revista do INPE**, Sao José dos Campos, v. 1, p. 9-13, abr./ jun. 2005.

NÓBREGA, F. A. R.; VIEIRA FILHO, D. S.; DA SILVA, F. B.; VERAS, R. L. O. de M. Infraestrutura Urbana: infraestrutura e o crescimento populacional no Brasil. **Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 19–25, 2013. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/view/304>. Acesso em: 28 jun. 2023.

PAREDES-VILLANUEVA, K.; LÓPEZ, L.; NAVARRO CERRILLO, R. M. Regional chronologies of *Cedrela fissilis* and *Cedrela angustifolia* in three forest types and their relation to climate. **Trees (Berlin, Germany: West)**, v. 30, n. 5, p. 1581–1593, 2016.

PEREIRA, A. L. (ED.). **Isótopos estáveis em estudos ecológicos: métodos, aplicações e perspectivas**. [s.l.] Revista Biociências Taubaté, 2007. v. 16–27

PILCHER, J. R. Sample preparation, cross-dating, and measurement. In: COOK E.R. & KAIRIUKSTIS L.A. (Eds), *Methods of dendrochronology, applications in the environmental sciences*: **Kluwer Acad. Publ.**, Dordrecht, Boston, London, p.40-51, 1990.

PREFEITURA DO MUNÍCIPIO DE SÃO PAULO, 2016a.

POLGE, H. 1966. Utilization des spectres de diffraction des rayons pour les études de qualité de bois. Thesis. Nancy

ROSENBERGER, L.; Leandro, J.; Pauleit, S.; Erlwein, S. (2021). Sustainable stormwater management under the impact of climate change and urban densification. **Journal of Hydrology**, n. 596, p. 11, 1 maio 2021. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126137>.

RStudio Team (2022). RStudio: Integrated Development for R. RStudio. PBC.
<http://www.rstudio.com/>

Sensitivity of Tropical Trees. In: Tropical Tree Physiology, p. 439 - 461. Springer International Publishing, UK, 2016.

SANTOS, D.L.; TAKAKI, M. Fenologia de *Cedrela fissilis* Vell. (Meliaceae) na região rural de Itirapina, SP. Brasil **Acta Botânica**, Porto Alegre, v. 19, n.3, p.625-632, 2005.

SCHULMAN, E. Dendroclimatic Changes in Semiarid America. Tucson: University of Arizona Press, 1956

SCHWEINGRUBER, A. F. H. Tree rings - basics and applications of dendrochronology. Kluwer Academic Publishers. ISBN 90277244 58. 276 pages. *Journal of Tropical Ecology*. 1989;5(3):352-352. doi:10.1017/S026646740000376X. 1988.

STOKES, M. A., & Smiley, T. L. (1968). An Introduction to Tree-Ring Dating. Chicago, IL: **University of Chicago Press**.

TARELKIN, Y. *et al* Growth-ring distinctness and boundary anatomy variability in tropical trees. *IAWA Journal*, Leiden, v. 37, n. 2, p. 275-294, 2016.

TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C. S. Potencialidade da família Meliaceae para dendrocronologia em regiões tropicais e subtropicais. In: ROING, F. A. (Comp.). **Dendrocronología em América Latina**. EDIUNC: Mendoza, 2000. p. 381-431.

TOMAZELLO, M., Brazolin, S., Chagas, M. P., Oliveira, J. T. S., Ballarin, A. W., & Benjamin, C. A. (2008). APPLICATION OF X-RAY TECHNIQUE IN NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF EUCALYPT WOOD. **Maderas**. Ciencia y Tecnología, 10(2). doi:10.4067/s0718-221x2008000200006.

TOMAZELLO-FILHO, M., BARROS, C.F., CALLADO, C.H., ROIG, F.A., 2013. Cambial growth periodicity studies of South American woody species review. *IAWA J.* 34, 213–230. <https://doi.org/10.1163/22941932-00000019>.

TRENBERTH, K. E. et al. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: SOLOMON, S. D. et al. (Ed.) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom, New York: Cambridge University Press, 2007.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul/ ABRH, 1995. 428P.

WEART, S.R. (2003) The discovery of global warming. New histories of science, technology, and medicine. **Harvard University Press, Cambridge**.

XU, G.; LIU X, HU J, DORADO-LIÑÁN I, GAGEN M, SZEINER P, CHEN T, TROUET V, Intra-annual tree-ring $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ reveal a trade-off between isotopic source and humidity in moist environments, **Tree Physiology**, Volume 42, Issue 11, November 2022,

Pages 2203–2223, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpac076>

ZAR, J. H. **Biostatistical analysis**. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999. 931 p.

ANEXOS

LISTA DE TABELAS

Tabela A1 – Espécimes identificados e coletados no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga – Região Metropolitana de São Paulo – SP.

Espécie	Coletor	CAP (m)	Latitude	Longitude	Data
<i>Cedrela fissilis</i>	ICCS1	2,26	-23.383652	-46.365147	21/07/22
	ICCS2	1,09	-23.384091	-46.365001	21/07/22
	ICCS3	1,37	-23.646136	-46.616812	21/07/22
	ICCS4	1,62	-23.384606	-46.370350	21/07/22
	ICCS5	1,64	-23.384585	-46.370936	21/07/22
	ICCS6	2,2	-23.384570	-46.370900	21/07/22
	ICCS47	1,46	-23.642123	-46.618568	30/05/2023
	ICCS48	1,4	-23.646295	-46.616633	30/05/23
	ICCS49	58cm	-23.646295	-46.616633	30/05/23
	ICCS50	1,62	-23.384630	-46.365991	30/05/23
	ICCS52	1.7	-23.64185	-46.61455	16/03/23
	ICCS53	1.7	-23.64211	-46.61463	16/03/23

*Em negrito, refere-se aos indivíduos que fazem parte da análises de isótopos estáveis e densidade.

Tabela A2- Espécimes coletados e identificados no Parque Ibirapuera – Região Metropolitana de São Paulo – SP.

Espécie	Coletor	CAP (m)	Latitude	Longitude	Data
<i>Cedrela</i>	ICCS 7	1.37	-23.592097	-46.65808	17/08/2022
<i>Fissillis</i>	ICCS 8	0.74	-23.592097	-46.65808	17/08/2022
	ICCS 9	0.98	-23.592594	-46.657997	17/08/2022

ICCS 10	1.75	-23.591521	-46.658276	17/08/2022
ICCS 11	0.98	-23.591583	-46.657914	17/08/2022
ICCS 12	1.76	-23.591378	-46.657704	17/08/2022
ICCS 13	1.53	-23.591378	-46.657704	17/08/2022
ICCS 14	1.88	-23.591461	-46.661026	17/08/2022
ICCS 15	1.21	-23.589512	-46.662370	17/08/2022
ICCS 16	0.84	-23.588586	-46.662130	17/08/2022
ICCS 17	0.98	-23.584107	-46.662701	17/08/2022
ICCS 18	0.86	-23.591134	-46.662579	17/08/2022
ICCS 19	0.85	-23.591134	-46.662579	17/08/2022
ICCS 44	1.05	-23.592612	-46.657894	29/05/2023
ICCS 45	1.76	-23.591549	-46.658317	29/05/2023
ICCS 46	1.78	-23.591368	-46.657674	29/05/2023

*Em negrito, refere-se aos indivíduos que fazem parte da análises de isótopos estáveis e densidade.

Tabela A3: Amostragem da tabela referente a etapa de pesagem das amostras, que contém: o peso total, peso dividido e o peso intra anual medido (μg).

Indivíduo	Ano	Intra 1	Intra 2	Peso total (μg)	Peso dividido (μg)	Peso medido (μg)
14 A	2021	C	FIM	6728	2242	2107
14 A	2021	B	MEIO			2342
14 A	2021	A	INÍCIO			2279

LISTA DE FIGURAS

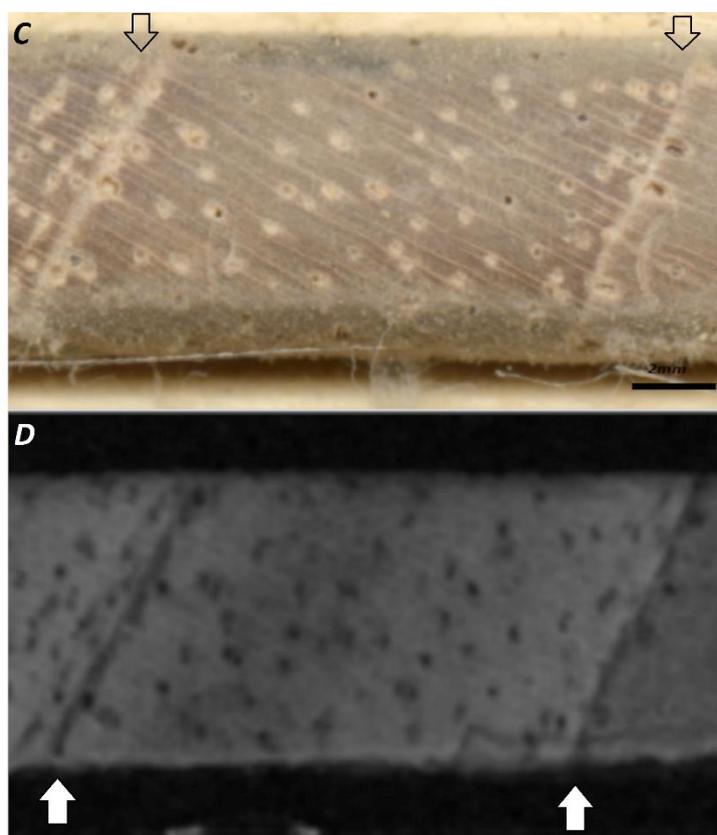


Figura A1: (C) Amostra 45B de *Cedrela fissilis* referente ao ano de 2010 retirada do scanner (D) e do raio-x.

Autor: Isabella Cantelles

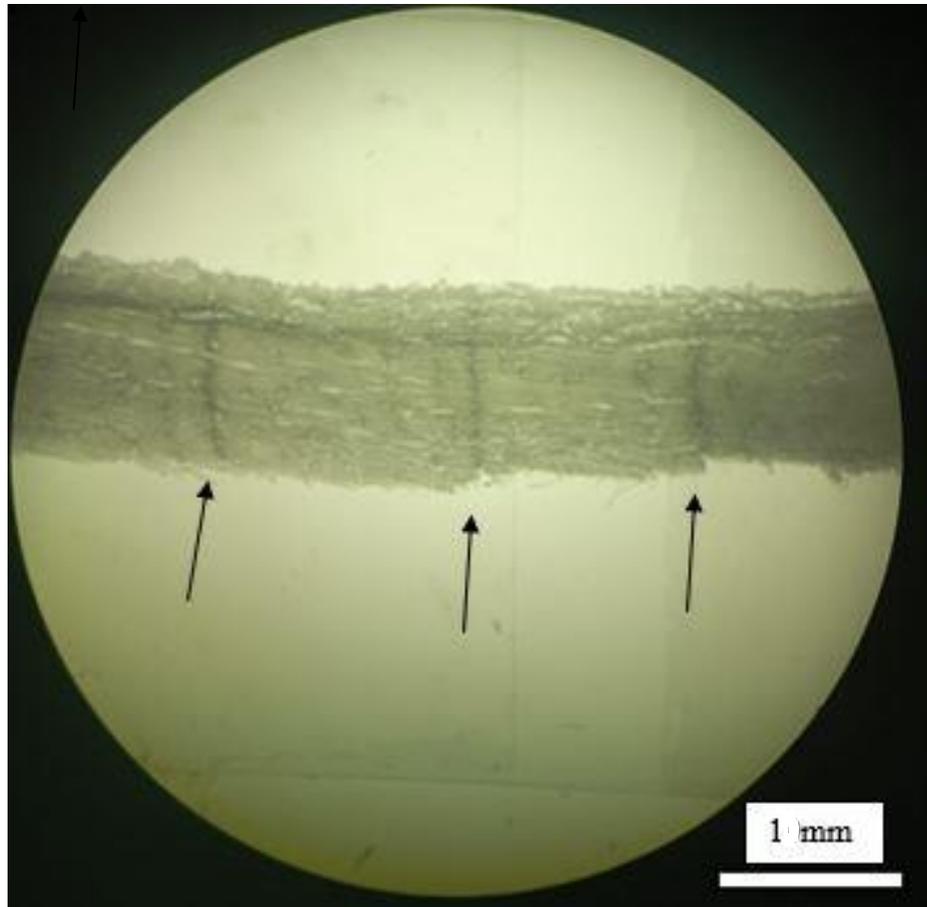


Figura A2: Amostra 12B (*Cedrela fissilis*) pós extração de celulose, na qual é possível visualizar que os limites dos anéis de crescimento estão mais acentuados.

Autor: Isabella Cantelles

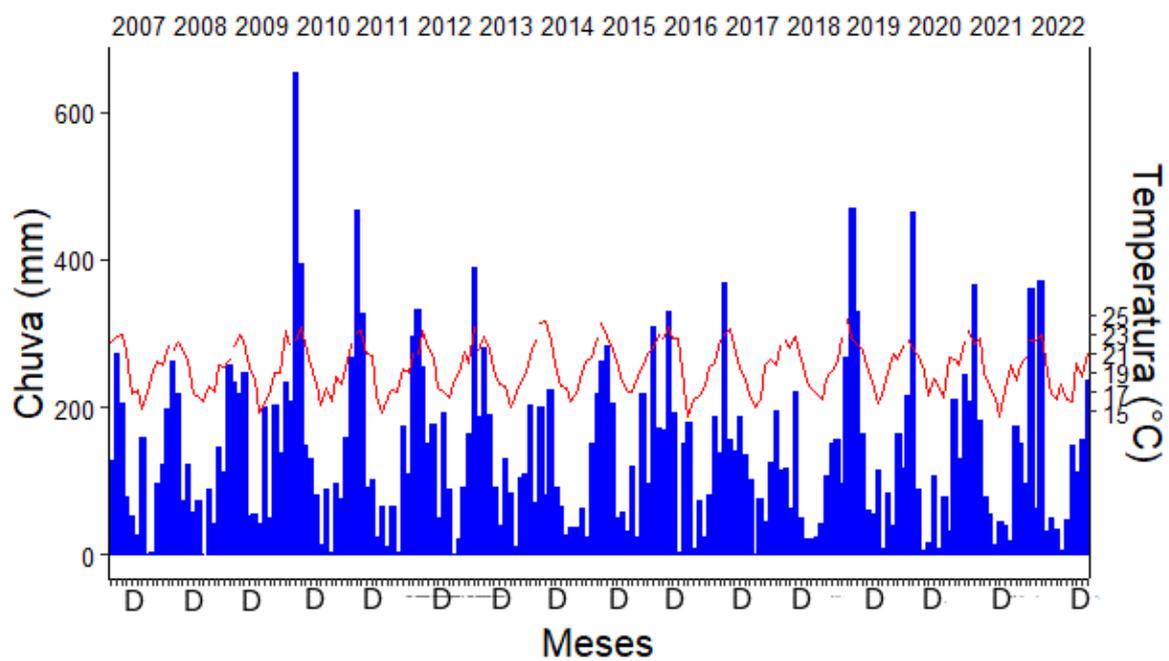


Figura A3: Relação entre a chuva (mm) e temperatura (°C) registrada na estação do IAG/CIENTEC nos meses de janeiro a dezembro de 2007 a 2022.