



# VII PRÊMIO

Serviço Florestal Brasileiro  
em Estudos de Economia  
e Mercado Florestal

ECONOMIA E O MERCADO FLORESTAL

IMPACTO DE MODELOS DE RECUPERAÇÃO FLORESTAL EM ÁREAS DEGRADADAS,  
ALTERADAS OU DE PASSIVOS AMBIENTAIS

## POTENCIAL SILVICULTURAL DE ESPÉCIES NATIVAS PARA PRODUÇÃO DE MADEIRA EM PLANTIOS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL: ALIANDO PRODUÇÃO À CONSERVAÇÃO

JOÃO PAULO BISPO

Brasília - DF  
2023

Apoio:



Realização:



MINISTÉRIO DA  
GESTÃO E DA INOVAÇÃO  
EM SERVIÇOS PÚBLICOS

MINISTÉRIO DO  
MEIO AMBIENTE E  
MUDANÇA DO CLIMA



# RESUMO

Nas próximas décadas, a demanda global futura por produtos florestais tende a aumentar drasticamente devido ao crescimento populacional desordenado e ao esgotamento das fontes naturais desses recursos. Desse modo, a produção sustentável de produtos florestais, principalmente madeireiros, em plantios de restauração pode representar uma excelente oportunidade para propiciar o desenvolvimento de uma economia verde que alie produção e conservação. Com isso, esse trabalho teve como objetivo principal avaliar o potencial silvicultural de cinco espécies nativas da Mata Atlântica para a produção de madeira em um gradiente de condições edafoclimáticas. As cinco espécies nativas selecionados são comumente utilizadas em programas de restauração na Mata Atlântica, além de serem reconhecidas por seu alto potencial madeireiro. Foram coletados dados silviculturais das espécies nativas em 11 plantios espalhados ao longo da Mata Atlântica. Todas as espécies foram avaliadas quanto ao seu desempenho silvicultural (e.g., crescimento médio, qualidade e aproveitamento do fuste) visando a produção de madeira. Além disso, com os dados coletados foram ajustados modelos de crescimento (diâmetro, altura total e comercial) para cada espécie nativa em dois cenários: geral (todos indivíduos) e melhorado (apenas 25% melhores indivíduos). Em geral, todas espécies (*Cariniana legalis*, *Zeyheria tuberculosa*, *Paratecoma peroba*, *Hymaneae courbaril*) apresentaram comportamento silvicultural satisfatório com destaque para *C. legalis* e *Z. tuberculosa*, que demonstraram fustes com alto aproveitamento e ótima qualidade para uso em serraria. Todos os modelos alcançaram alto nível de significância e, portanto, estão aptos a prever o crescimento das espécies em uma variedade de condições edafoclimáticas. As previsões feitas a partir dos modelos ajustados para cada espécie revelaram que, mesmo com suas particularidades, todas as espécies apresentam alto potencial para produção de madeira podendo ainda ser melhorado caso seja aplicado manejo adaptativo. Em síntese, o presente estudo traz fortes implicações práticas para o mercado florestal e fornece evidências científicas sólidas que podem orientar a tomada de decisões relacionadas ao manejo florestal e à produção sustentável de madeira nativa em plantios de restauração florestal.

**Palavra-chave:** Manejo sustentável; Recursos florestais; Recuperação de áreas degradadas

# Sumário

1. INTRODUÇÃO	7
1.1. LEGISLAÇÃO FLORESTAL BRASILEIRA	7
1.2. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DE FLORESTAS TROPICAIS	8
1.3. BENEFÍCIOS DAS MUDANÇAS NA EXPLORAÇÃO E CONSUMO DE MADEIRA DE FLORESTAS NATIVAS PARA PLANTIOS DE RESTAURAÇÃO	10
1.4. BARREIRAS E DESAFIOS PARA CRIAÇÃO DE MODELO DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL MULTIFUNCIONAIS	10
2. OBJETIVOS	13
2.1. OBJETIVO GERAL	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. MATERIAL & MÉTODOS	13
3.1. ESPÉCIES SELECIONADAS	13
3.2. ÁREA DE ESTUDO	14
3.3. COLETA DE DADOS	15
3.4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS	16
3.4.1. DESEMPENHO SILVICULTURAL DE ESPÉCIES NATIVAS MADEIREIRAS DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA	16
3.4.2. MODELAGEM DE CRESCIMENTO EM DIÂMETRO, ALTURA TOTAL E COMERCIAL PARA CADA ESPÉCIE NATIVA	17
4. RESULTADOS	18
4.1. DESEMPENHO SILVICULTURAL DE ESPÉCIES NATIVAS MADEIREIRAS	18
4.2. MODELOS DE PRODUTIVIDADE PARA ESPÉCIES NATIVAS MADEIREIRAS	19
4.3. ESTIMATIVAS DE PRODUTIVIDADE PARA ESPÉCIES NATIVAS UTILIZANDO OS MODELOS AJUSTADOS	24
5. DISCUSSÃO	25
5.1. DESEMPENHO SILVICULTURAL DAS CINCO ESPÉCIES NATIVAS	25
5.2. IMPLICAÇÕES PARA PRÁTICA	26
6. CONCLUSÕES	28
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
APÊNDICES	33



# LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Lista de espécies nativas da Mata Atlântica com potencial para produção de madeira selecionadas para esse estudo. Fonte: autor. **13**
- Tabela 2.** Lista de modelos testados para estimar o diâmetro, altura total e comercial de cinco espécies nativas da Mata Atlântica.  $\beta$ = coeficientes; idade= idade da árvore. Fonte e formatação: autor. **16**
- Tabela 3.** Descritores silviculturais de cinco espécies nativas da Mata Atlântica. Valores correspondem às médias. Fonte: autor. **18**
- Tabela 4.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), e coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Cariniana legalis* (jequitibá-rosa). Fonte: autor. **20**
- Tabela 5.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), , altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Hymenaea courbaril* (jatobá). Fonte: autor. **20**
- Tabela 6.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Paratecoma peroba* (ipê-peroba). Fonte: autor. **21**
- Tabela 7.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Dalbergia nigra* (jacarandá-da-Bahia). Fonte: autor. **21**
- Tabela 8.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Zeyheria tuberculosa* (ipê-felpudo). Fonte: autor. **22**
- Tabela 9.** Estimativas de crescimento em diâmetro (Dap), altura total (Htot) e altura comercial (Hc) aos 18 anos de idade utilizando os modelos selecionados para cada espécie nativa estudada em dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado). Fonte: autor. **24**

# LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Resumo gráfico dos benefícios ecológicos e socioeconômicos de modelos de restauração multifuncionais que integrem diversos interesses. Fonte: autor **11**
- Figura 2.** Localização geográfica dos plantios amostrados (pontos vermelhos) ao longo da Mata Atlântica brasileira. Fonte: autor. Datum: Sirgas 2000. **14**
- Figura 3.** Descrição das variáveis que foram coletadas em cada plantio. Fonte: autor. **15**
- Figura 4.** Número de indivíduos por classe de qualidade do fuste para cada espécie nativa estudada. Q1 – fuste reto e sem ramificações ou tortuosidade; Q2 – fuste reto, pouco ramificado ou pouco tortuoso; Q3 – fuste torto e ramificado ou reto com ramificações; e Q4 – fuste torto e muito ramificado. Fonte: autor. **19**
- Figura 5.** Gráficos dos modelos de crescimento selecionados para estimar produtividade em diâmetro, altura total e comercial de cinco espécies nativas: *Cariniana legalis* (A-C), *Dalbergia nigra* (D-F), *Hymaneae courbaril* (G-I), *Zeyheria tuberculosa* (J-L), e *Paratecoma peroba* (M-O). Fonte: autor. **23**

## LISTA DE SIGLAS

<b>AIC</b>	Critério de Informação de Akaike
<b>BIC</b>	Critério de Informação Bayesiano
<b>BPBES</b>	Brazilian Platform for Biodiversity and Ecosystem Services
<b>DAP</b>	Diâmetro ao nível do peito
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization
<b>Hc</b>	Altura comercial
<b>Htot</b>	Altura total
<b>IBGE</b>	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
<b>ITTO</b>	International Tropical Timber Organization
<b>IUCN</b>	International Union for Conservation of Nature
<b>Mha</b>	milhões de hectares
<b>ONU</b>	Organização das Nações Unidas
<b>RL</b>	Reserva Legal
<b>SE</b>	serviços ecossistêmicos
<b>SFB</b>	Serviço Florestal Brasileiro
<b>SIMA</b>	Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo

# 01 INTRODUÇÃO

## 11. LEGISLAÇÃO FLORESTAL BRASILEIRA

Historicamente, a legislação florestal brasileira estava centrada em restringir o avanço da fronteira agrícola sobre áreas de vegetação nativa, restringindo o uso não sustentável de recursos naturais para conter as taxas alarmantes de desmatamento (DO VALLE et al., 2020). Porém, nas últimas décadas, um movimento contrário tem se fortalecido, principalmente, devido às pressões socioambientais e econômicas impostas pela crise por recursos naturais (FAO, 2020). Em muitas partes do mundo, devido a exploração desenfreada de recursos naturais e, conseqüentemente, o esgotamento desses recursos, a crise por produtos florestais já é uma realidade (FAO, 2020). Junto a isso, o crescente aumento populacional tem aumentado drasticamente a demanda por recursos naturais criando, assim, um desequilíbrio entre oferta e demanda existentes. A partir disso, inúmeras nações perceberam o valor e importância econômica, social e ambiental que as florestas naturais podem deter (FAO, 2020).

O Brasil, possui cerca de 850 milhões de hectares (Mha), sendo 537 Mha de vegetação nativa (SPAROVEK et al., 2012). Além disso, o Brasil possui cerca de 14,5% de todas as espécies arbóreas já identificadas em todo o mundo (ROLIM et al., 2019). Ao menos uma centena dessas espécies já são reconhecidas por fornecer madeira de alta qualidade, além de outros produtos florestais, como óleos, resinas e fármacos (ROLIM et al., 2019). Dado isso, o Brasil naturalmente tem um alto potencial para alavancar uma economia verde que promova o desenvolvimento econômico e social do país de maneira sustentável, além de contribuir com as demandas globais futuras por recursos naturais.

Nas últimas duas décadas, devido a demanda crescente por recursos naturais inúmeros países, principalmente o Brasil, tem se esforçado para criar um arcabouço jurídico que atenda e sustente essa demanda de forma sustentável. Apesar disso, a legislação brasileira no que tange sobre o manejo sustentável de florestas nativas ainda é bem recente no Brasil, tendo surgido apenas no final da última década. Nesse contexto, o conceito de Reserva Legal (RL) surgiu pela primeira vez no ano de 1934 e estava associado primordialmente a conservação da biodiversidade e recursos hídricos (BRASIL, 1965). Mas foi somente a partir de 2012, com o novo Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.651/2012), que passou a ser permitido a exploração econômica sustentável da RL (BRASIL, 2012).

Em geral, a legislação florestal brasileira relacionada à exploração de recursos naturais, como a madeira nativa, visa promover a gestão sustentável dos recursos florestais, a conservação da biodiversidade e a redução da exploração ilegal. Diante disso, ultimamente, o Brasil tem se esforçado em promover a exploração sustentável de seus recursos naturais através de uma estrutura jurídica que as-

segure todos essas questões citadas acima (BRASIL, 2012). Outros exemplos de instrumentos legais criados nessa linha foi a Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei nº 11.284/2006), que determina como as áreas florestais de domínio público podem ser exploradas e estabelece critérios para a concessão de áreas para a exploração de madeira nativa e a coleta de produtos não madeireiros (BRASIL, 2006).

## 1.2. DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DE FLORESTAS TROPICAIS

A partir do reconhecimento das florestas nativas como fonte sustentável de produtos florestais e a criação de um arcabouço legal que permitiu a exploração desses recursos, abriu-se um leque de oportunidades dentro do setor florestal brasileiro. Nesse contexto, a restauração de florestas tropicais tem emergido como uma estratégia capaz de suprir produtos florestais, enquanto promove a recuperação de florestas nativas degradadas (BRANCALION et al., 2012; VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009).

As florestas tropicais são peças fundamentais para o bem-estar humano, atuando como repositórios de biodiversidade (REZENDE et al., 2018), além de representar uma fonte insubstituível de bens e serviços ecossistêmicos (SE) (AZNAR-SÁNCHEZ et al., 2018; PIRES et al., 2021; SHIMAMOTO et al., 2018). Ainda assim, apesar de sua relevância, os remanescentes de florestas tropicais têm diminuído a taxas alarmantes por conta do desmatamento e mudanças no uso do solo em favor da agricultura e pecuária (ROSA et al., 2021). Desse modo, estima-se que somente nos trópicos entre 1990 e 2020, o desmatamento tenha destruído 378 Mha de floresta nativa primária (FAO, 2020).

Nesse contexto, a Mata Atlântica brasileira, umas das maiores florestas tropicais do mundo, além de ser um dos hotspot para conservação da biodiversidade (REZENDE et al., 2018), tem provido diversos SE como, por exemplo, sequestro de carbono, regulação climática, conservação de recursos hídricos e do solo, dentre outros (LOZANO-BAEZ et al., 2019; MATOS et al., 2020). Além disso, a Floresta Atlântica, desde o período colonial brasileiro, tem assumido um papel primordial no desenvolvimento socioeconômico do país através da produção de alimentos e de uma série de produtos florestais madeireiros e não-madeireiros, como óleos, borracha, cosméticos, fármacos e fibras (AKINDELE; ONYEKWELU, 2011; ZAMBIAZI et al., 2021). Contudo, apesar de sua relevância socioambiental e econômica, esse bioma tem sido historicamente destruído pelo desmatamento, para exploração ilegal de madeira e para conversão de suas florestas em áreas agrícolas, o que reduziu sua cobertura florestal para cerca de 12%, com fortes prejuízos à biodiversidade e ao suprimento desses produtos (RIBEIRO et al., 2009).



Nesse sentido, devido a esse panorama de perdas e degradação, a restauração ecológica tem se tornado uma forte aliada e uma ferramenta necessária para aumentar a cobertura florestal e reestabelecer a multifuncionalidade de florestas tropicais degradadas (ROMANELLI et al., 2022). Sendo assim, nos últimos anos, têm sido frequente a criação de políticas que visam restaurar florestas em todo o mundo, como o Pacto pela Restauração da Mata Atlântica e o *The Bonn Challenge*, por exemplo (ONU, 2019; RIBEIRO et al., 2009). Recentemente, a ONU (Organização das Nações Unidas) declarou a restauração de ecossistemas degradados como principal foco para essa década (2021-2030), ampliando a visibilidade e aumentando o engajamento de diversos setores em iniciativas de restauração em todo o mundo (ONU, 2019).

No entanto, ainda que as políticas e ações de restauração tenham proliferado e recebido bastante atenção na última década, os aspectos socioeconômicos ainda impedem que ela ocorra em larga escala. Uma das principais causas disso é o fato da restauração ecológica ser vista pela maioria como uma atividade onerosa, sem valor ou retorno econômico, o que faz com que os donos de terras optem por não substituir suas atividades com retorno financeiro conhecido, tais como, a pecuária e agricultura (PLATH et al., 2011). Todavia, apesar dessa visão pessimista, alguns estudos recentes tem demonstrado que o retorno econômico obtido através do pagamento por serviços ambientais (BUSTAMANTE et al., 2019) e da exploração sustentável de produtos madeireiros e não-madeireiros de áreas em restauração (BRANCALION et al., 2012; BRANCALION et al., 2022; ZAMBIASI et al., 2021), são capazes de superar o custo de oportunidade de uso do solo, quando comparado com pecuária extensiva, cobrindo os custos de implementação e manutenção, e ainda gerando lucro (ALOUNSAVATH MASTER; KIM, 2021). Em face disso, a restauração florestal tem sido notada nos últimos anos, como uma oportunidade de fonte sustentável de produtos madeireiros e não-madeireiros (PASCHKE; PERKINS; VEBLEN, 2019).

Ainda mais, outro problema carregado pela restauração florestal é a sua falta de alinhamento com interesses do setor público e privado, como indústria, governo, e até mesmo proprietários locais, dificultando sua adoção em larga escala (BRANCALION et al., 2022). Isso porque os principais tomadores de decisão estão muito mais interessados nos resultados sociais e econômicos advindos da restauração, tais como, geração de renda e emprego (BRANCALION et al., 2022). Portanto, para quebrar esse paradigma é preciso demonstrar que projetos de restauração florestal que conciliem múltiplos objetivos são capazes de gerar benefícios ecológicos e socioeconômicos ao mesmo tempo (PONTES; ENGEL; PARROTTA, 2019).

### 1.3. BENEFÍCIOS DAS MUDANÇAS NA EXPLORAÇÃO E CONSUMO DE MADEIRA DE FLORESTAS NATIVAS PARA PLANTIOS DE RESTAURAÇÃO

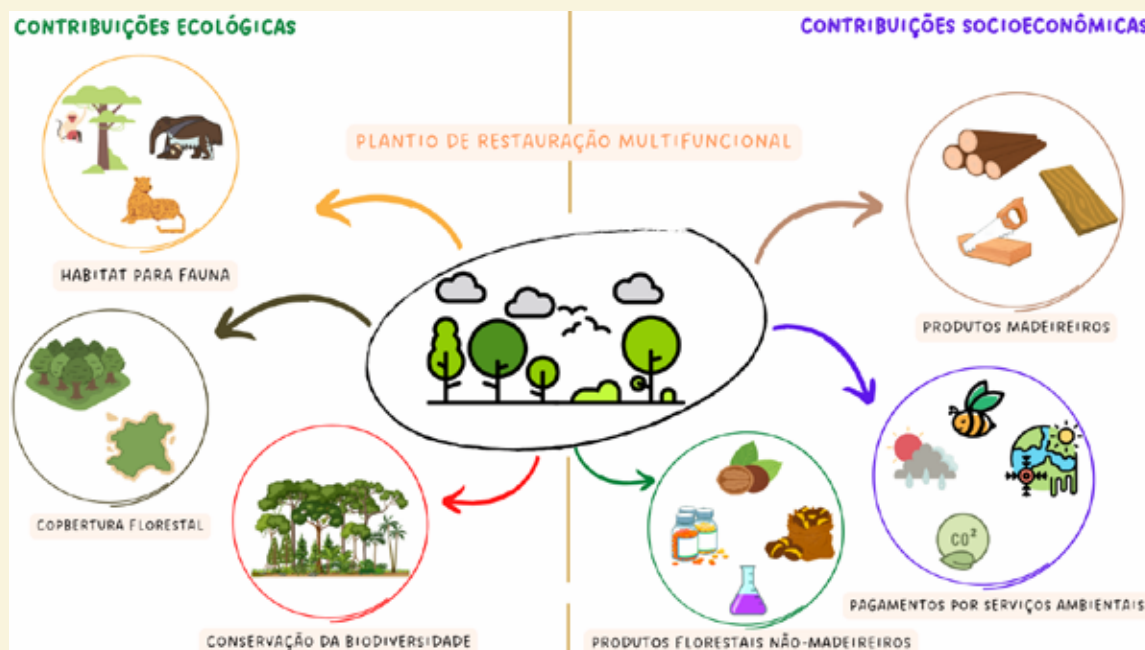
Historicamente, a produção e consumo de madeira nativa em todo o mundo, principalmente no Brasil, tem se sustentado a partir do desmatamento e da extração ilegal (SIMA, 2020). Só na Amazônia, a extração ilegal corresponde a cerca de 80% da produção total de madeira nativa (SIMA, 2020). No entanto, essa perspectiva tende a mudar devido às restrições impostas pelas leis de proteção ambiental brasileira e um possível fortalecimento de políticas públicas conservacionistas no Brasil e em todo o mundo (ITTO, 2022).

Tendo isso em consideração, espera-se que haja uma crise de suprimento no mercado de madeira por conta da redução da oferta de madeira tropical oriunda dessas atividades ilegais (FAO, 2022). Essa crescente escassez de madeira tropical nativa no mercado tem cada vez mais valorizado seu preço, criando assim uma valiosa oportunidade na indústria madeireira para a silvicultura de espécies nativas em plantios de restauração, substituindo o extrativismo em florestas nativas pela madeira certificada e com valor agregado oriunda da restauração florestal (PIOTTO; CALMON; ROLIM, 2020).

### 1.4. BARREIRAS E DESAFIOS PARA CRIAÇÃO DE MODELO DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL MULTIFUNCIONAIS

Há uma necessidade crescente por dados científicos que sustentem a proposição de modelos de restauração baseados na silvicultura de nativas (e.g., espécies potenciais, modelos e projeções de crescimento, ciclos de colheita, etc.), que sejam capazes de atingir objetivos econômicos, mas também conservacionistas (LAMB; ERSKINE; PARROTTA, 2005). Os plantios de restauração ecológica multifuncionais têm um alto potencial de escalarem, se forem planejados e implementados como um sistema de produção sustentável, que gere renda, supra as demandas populacionais por produtos florestais e também diminua a pressão do desmatamento sobre remanescentes de florestas nativa (**Figura 1**) (BRANCALION et al., 2012). Além de constituir uma ótima oportunidade para expandir o mercado legal de produtos florestais, a restauração com fins econômicos pode proporcionar benefícios ecológicos, através da conservação da biodiversidade e do provimento de SE (PONTES; ENGEL; PARROTTA, 2019; ONU, 2019; FAO, 2020). Nessa perspectiva, futuramente os plantios de restauração ecológica devem contribuir com cerca de 46,3% da produção global de madeira (TRUJILLO-MIRANDA et al., 2021). Sendo essa quantidade aumentada para 65% nos trópicos devido às condições edafoclimáticas dessas regiões que maximiza a produtividade vegetal nessas áreas beneficiando os plantios (PAYN et al., 2015).

**Figura 1.** Resumo gráfico dos benefícios ecológicos e socioeconômicos de modelos de restauração multifuncionais que integrem diversos interesses. Fonte: autor



Apesar dessas previsões otimistas para restaurações com fins econômicos, ainda há uma escassez enorme de conhecimento científico sobre modelos e metodologias que visam a exploração econômica de áreas em processo de restauração ecológica. Emerge, assim, uma necessidade urgente de conhecimento científico no campo da silvicultura de espécies nativas, que possam subsidiar essa política pública (PIOTTO; CALMON; ROLIM, 2020). Algumas limitações básicas desse tema são a falta de estudos sobre os ciclos de produção comercial das espécies nativas (BRANCALION et al., 2012; PONTES; ENGEL; PARROTTA, 2019). Ainda pouco se sabe sobre o crescimento e comportamento silvicultural de espécies nativas em diferentes qualidades dos sítios (*e.g.*, clima, solo, etc.) e diferentes manejos (fertilização, desbastes, etc.). Essa falta de embasamento científico dificulta a elaboração de planos de manejo silvicultural viáveis, bem como a criação de modelos econômicos sustentáveis.

Em razão dessa enorme lacuna de conhecimento, atualmente a produção comercial de madeira legalizada nos trópicos é suportada por plantios monoespecíficos de espécies exóticas (SFB, 2009). Essa conjuntura provavelmente é reflexo de uma maior quantidade de informações científicas sobre os aspectos silviculturais dessas espécies, que facilitam o manejo florestal e seu uso comercial (PLATH et al., 2011). Essa maior disponibilidade de dados sobre a silvicultura e a viabilidade econômica do cultivo de espécies exóticas torna o risco do investimento menor, influenciando os donos de terras a escolherem essas monoculturas ao invés de plantios de espécies nativas (BRANCALION, BRANCALION al., 2020; PLATH et al., 2011). Portanto, conhecer o potencial silvicultural de espécies nativas é imprescindível para mudar tal conjuntura.

Alguns estudos já têm demonstrado que plantios mistos de espécies nativas podem ser tão ou até mais produtivos que plantios monoespecíficos de exóticas (TRUJILLO-MIRANDA et al., 2021; ZAMBIAZI et al., 2021). Isso se deve ao fato que plantações biodiversificadas possuem uma complementaridade de nicho maior, otimizando a exploração de recursos limitantes (Brooks et al. 1994). Em virtude disso, plantios mistos

têm uma produtividade primária líquida elevada, que resulta em maior crescimento e volume da madeira (ERSKINE; LAMB; BRISTOW, 2006). Tendo isso em vista, é possível afirmar que a restauração ecológica multifuncional pode ser capaz de catalisar o processo de sucessão ecológica, recuperando a biodiversidade e as funções ecossistêmicas, e ainda beneficiar e maximizar a produção comercial de madeira e outros bens (PAYN et al., 2015). Assim, a restauração de ecossistemas degradados, além de ecologicamente justificável, pode ser também economicamente viável, gerando de forma sinérgica benefícios ambientais e econômicos (BRANCALION et al., 2022).

Apesar das evidentes vantagens relacionadas à restauração com fins econômicos, a maioria dos estudos sobre os benefícios da restauração ecológica ainda focam na recuperação da biodiversidade, da estrutura florestal e da biomassa (ROMANELLI et al., 2022; ZANINI et al., 2021). Apenas nos últimos anos a restauração ecológica tem sido um pouco mais investigada como possível fonte de produtos florestais madeireiros e não-madeireiros (BRITTO et al., 2019; TRUJILLO-MIRANDA et al., 2021; ZAMBIAZI et al., 2021). Só muito recentemente os modelos de produtividade para espécies nativas, que levem em consideração uma enorme gama de condições climáticas e de solo, tem começado a ser testados e parametrizados (NÖLTE et al., 2022). Sendo que no Brasil, ainda poucos estudos se propuseram a validar modelos de produtividade e descrever o comportamento silvicultural de espécies nativas visando a produção de madeira.

## 02 OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o potencial silvicultural de cinco espécies nativas da Mata Atlântica, considerando a produção de madeira, em um gradiente de condições edafoclimáticas.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Descrever o desempenho silvicultural de cinco espécies nativas quanto ao crescimento, qualidade e aproveitamento do fuste;
- Ajustar e comparar modelos de crescimento em diâmetro, altura total e comercial para cinco espécies nativas da Mata Atlântica em diferentes condições de sítio (*e.g.*, clima e solo);
- Predizer o crescimento em diâmetro, altura total e comercial para cinco espécies nativas da Mata Atlântica, considerando um ciclo de colheita comercial aos 18 anos de idade.

## 03 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1. ESPÉCIES SELECIONADAS

Foram selecionadas cinco espécies nativas da Mata Atlântica brasileira reconhecidas pelo seu alto potencial madeireiro (**Tabela 1**). Essa seleção foi baseada em características silviculturais das espécies, como taxas de crescimento, qualidade do fuste e da madeira, assim como também levando-se em consideração sua alta ocorrência em plantios de restauração florestal em uma enorme variedade de condições edafoclimáticas, de modo que se tivesse a maior representação possível do desenvolvimento silvicultural dessas espécies em diferentes condições de sítio. A seleção foi realizada através de consultas a especialistas da área, pesquisadores e empresários do setor florestal.

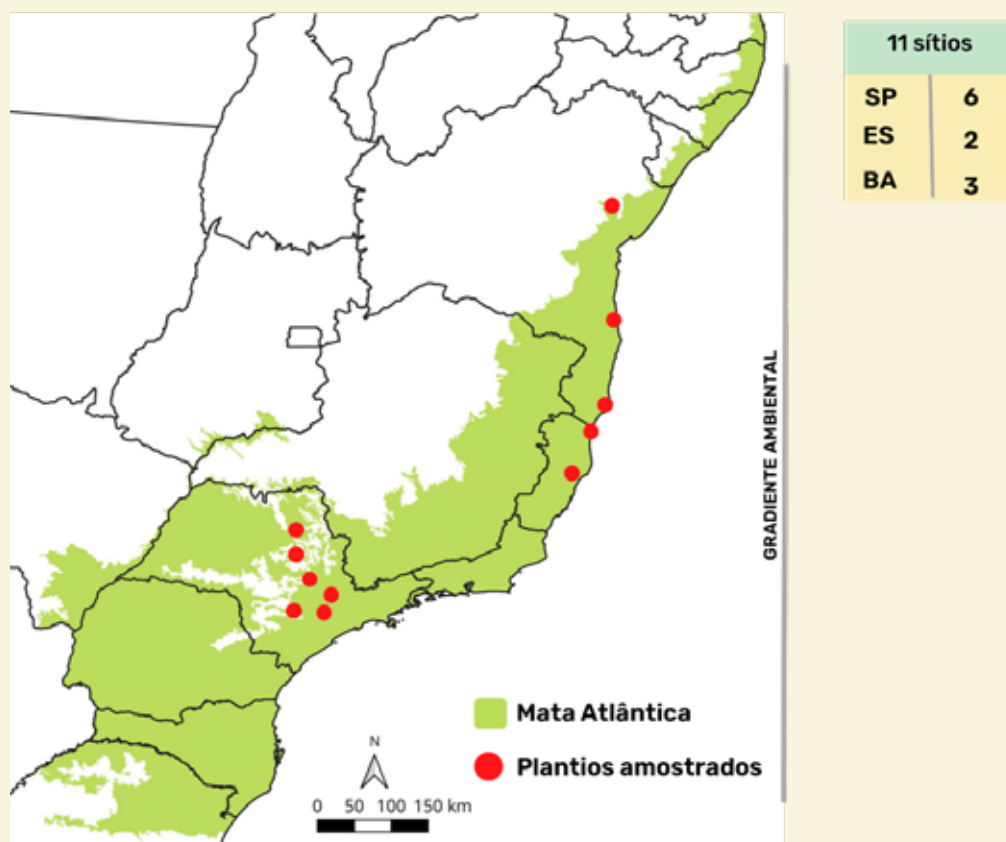
**Tabela 1.** Lista de espécies nativas da Mata Atlântica com potencial para produção de madeira selecionadas para esse estudo. Fonte: autor.

Familia	Espécie	Nome popular
Bignoniaceae	<i>Paratecoma peroba</i> (Record) Kuhl.	Ipê-peroba
	<i>Zeyheria tuberculosa</i> (Vell.) Bureau ex Verl.	Ipê-felpudo
Fabaceae	<i>Dalbergia nigra</i> (Vell.) Allemão ex Benth.	Jacarandá-da-Bahia
	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jatobá
Lecythidaceae	<i>Cariniana legalis</i> (Mart.) Kuntze	Jequitibá-rosa

## 3.2. ESPÉCIES SELECIONADAS

Para fins desse estudo foram amostrados plantios de restauração em uma ampla faixa de idade (~1 a 40 anos) que utilizaram as espécies listadas na **Tabela 1**. Esses plantios estão distribuídos em uma ampla escala geográfica que representa um imenso gradiente ambiental marcado pela heterogeneidade de condições de clima e de solo (**Figura 1**) (ALVARES et al., 2014; SANTOS et al., 2011). A maioria dessas áreas compreendem experimentos de campo distribuídos ao longo da Mata Atlântica que foram implantados através de iniciativas do setor público e/ou privado com objetivo de testar o potencial silvicultural de espécies nativas da Mata Atlântica para produção de madeira. Todos os locais de estudos estão inseridos no domínio fitofisionômico da Mata Atlântica (IBGE, 2012). Para mais informações sobre os locais de estudo consultar **Apêndice A**.

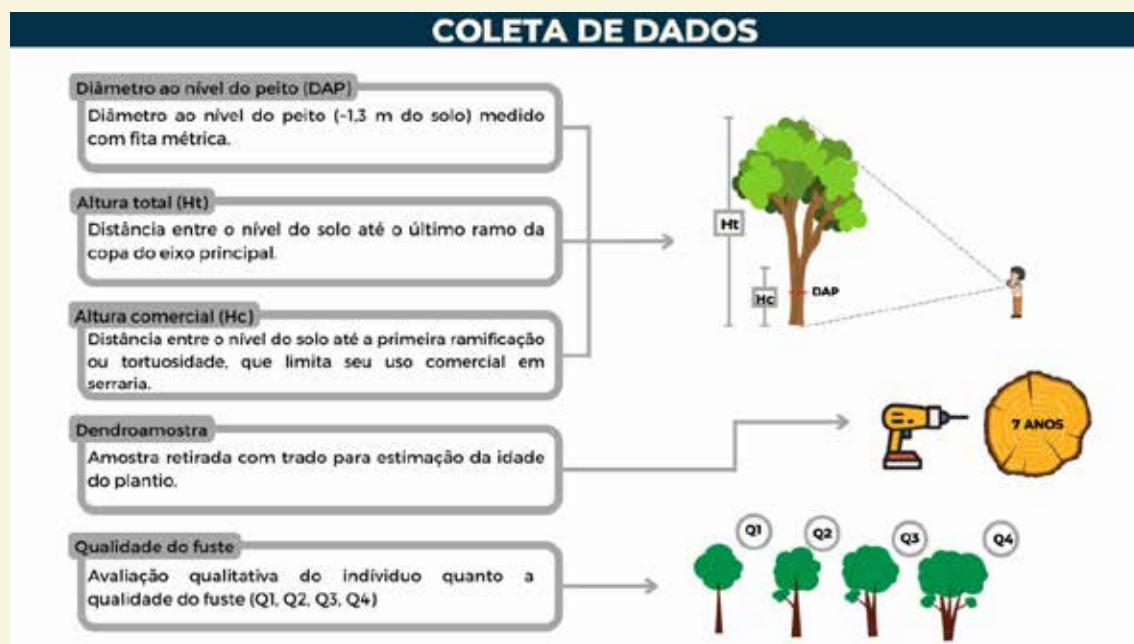
**Figura 2.** Localização geográfica dos plantios amostrados (pontos vermelhos) ao longo da Mata Atlântica brasileira. Fonte: autor. Datum: Sirgas 2000.



### 3.3. COLETA DE DADOS

Para efeito de amostragem foram mensurados somente indivíduos saudáveis com boas condições fitossanitárias e afastados das bordas do plantio. Em cada plantio foram realizadas caminhadas seguindo as linhas do plantio (busca ativa), realizando a identificação dos indivíduos das espécies de interesse (**Tabela 1**), até atingir uma amostra mínima de 30 indivíduos por espécie. A amostragem dos indivíduos de cada espécie nos plantios foi realizada com auxílio de GPS de navegação (Garmin eTrex 30) para facilitar geolocalização e evitar erros de amostragem. Os indivíduos identificados na busca ativa foram georreferenciados e tiveram mensurados a altura total, altura comercial, diâmetro ao nível do peito (DAP), e qualidade do fuste (**Figura 3**). Foram utilizados fita métrica e hipsômetro digital vertex para mensurar o diâmetro e altura (total e comercial) das árvores, respectivamente.

**Figura 3.** Descrição das variáveis que foram coletadas em cada plantio. Fonte: autor.



Para confirmar a idade dos plantios foram coletadas dendroamostras. Posteriormente, analisadas em laboratório para determinação da idade. Os fustes foram classificados visualmente quanto a sua qualidade para uso em serraria da seguinte forma: Q1 - fuste reto e sem ramificações ou tortuosidade; Q2 - fuste reto, pouco ramificado ou pouco tortuoso; Q3 - fuste torto e ramificado ou reto com ramificações; e Q4 - fuste torto e muito ramificado. Outras informações sobre as características dos sítios e descrição dos projetos de silvicultura, tais como, idade, manejo ou trato silvicultural empregado, solo e clima dominante, dentre outras informações, foram coletadas através de entrevistas com gestores/proprietários dos plantios.

### 3.4. PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Para efeito de amostragem foram mensurados somente indivíduos saudáveis com boas condições fitossanitárias e afastados das bordas do plantio. Em cada plantio foram realizadas caminhadas seguindo as linhas do plantio (busca ativa), realizando a identificação dos indivíduos das espécies de interesse (**Tabela 1**), até atingir uma amostra mínima de 30 indivíduos por espécie. A amostragem dos indivíduos de cada espécie nos plantios foi realizada com auxílio de GPS de navegação (Garmin eTrex 30) para facilitar geolocalização e evitar erros de amostragem. Os indivíduos identificados na busca ativa foram georreferenciados e tiveram mensurados a altura total, altura comercial, diâmetro ao nível do peito (DAP), e qualidade do fuste (**Figura 3**). Foram utilizados fita métrica e hipsômetro digital vertex para mensurar o diâmetro e altura (total e comercial) das árvores, respectivamente.

#### 3.4.1. DESEMPENHO SILVICULTURAL DE ESPÉCIES NATIVAS MADEIREIRAS DA MATA ATLÂNTICA BRASILEIRA

As espécies madeireiras foram avaliadas quanto a seu desempenho silvicultural visando a produção de madeira. Dessa forma, foi avaliada a qualidade do fuste comercial para uso em serraria, aproveitamento do fuste (i.e., percentagem do fuste total que pode ser utilizado pela indústria madeireira). Além disso, outras análises descritivas quanto ao crescimento das espécies também foram realizadas. Todos os gráficos e estatística descritiva foram realizadas no *software R* (R CORE TEAM DEVELOPMENT, 2021).

#### 3.4.2. MODELAGEM DE CRESCIMENTO EM DIÂMETRO, ALTURA TOTAL E COMERCIAL PARA CADA ESPÉCIE NATIVA

Em sua maioria, os plantios amostrados não empregaram nenhum trato silvicultural comumente aplicado em plantações comerciais, tais como fertilização, poda, desbaste, condução de fuste, e controle de competidores. Com isso, as predições dos modelos provavelmente subestimam o real potencial silvicultural das espécies para produção de madeira. Assim, para contornar esses problemas foram ajustados modelos de crescimento em diâmetro, altura total, e comercial, para as espécies nativas considerando dois cenários de produtividade, a saber: **(I)** Cenário Geral – utilizando todos os indivíduos amostrados de cada espécie em cada plantio; e **(II)** Cenário Melhorado – utilizando apenas os 25% melhores indivíduos amostrados de cada espécie em cada plantio, o que corresponde ao quartil superior. A partir dessa estratégia tentou-se, mesmo que de forma indireta, inferir sobre o crescimento de cada espécie em um cenário mais real possível que simule seu crescimento em plantações comerciais, como de eucalipto e teca, onde são aplicados os tratamentos silviculturais adequados para o desenvolvimento de espécies florestais.



Para cada variável dependente (i.e., DAP, altura total e comercial) foram ajustados 12 modelos tradicionalmente utilizados para estimar o crescimento de espécies florestais (**Tabela 2**). Dentre esses 12 modelos foi escolhido o modelo com melhor ajuste e qualidade para cada variável dependente em cada um dos cenários hipotéticos (Cenário Geral e Melhorado). Para avaliar a qualidade de ajuste e acurácia de cada modelo gerado foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos: **(i)** coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup>); **(ii)** critério de informação de Akaike (AIC); e **(iii)** critério de informação bayesiano (BIC). Todos os pressupostos dos modelos foram assegurados. Por fim, a partir do melhor modelo selecionado foram feitas previsões de crescimento em diâmetro, altura total e comercial para cada espécie nativa nos dois cenários hipotéticos considerando um ciclo de corte comercial aos 18 anos. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando pacotes do *Software R* (R CORE TEAM DEVELOPMENT, 2021).

**Tabela 2.** Lista de modelos testados para estimar o diâmetro, altura total e comercial de cinco espécies nativas da Mata Atlântica.  $\beta$ = coeficientes; idade= idade da árvore. Fonte e formatação: autor.

Número	Equação	Modelo
1	$\hat{y} = \beta_0 / (1 + \beta_1 * \exp(\beta_1 - \beta_2 * idade))$	Exponencial I
2	$\hat{y} = \beta_0 * \exp(\beta_1 * idade)$	Exponencial II
3	$\hat{y} = \beta_0 / (1 + \beta_3 * \exp(\beta_1 * \beta_2 - idade))^{(1/\beta_3)}$	Schnute
4	$\hat{y} = \beta_0 * (1 - \exp(\beta_2 * \beta_1 - \beta_2 * idade))$	<u>Michierlich</u>
5	$\hat{y} = \beta_0 / (1 + \exp(\beta_1 - \beta_2 * idade))^{(1/\beta_3)}$	Richards
6	$\hat{y} = \beta_0 * \exp(- \exp(\beta_1 - \beta_2 * idade))$	Gompertz
7	$\hat{y} = \beta_0 / (1 + \exp(\beta_1 - \beta_2 * idade))$	<u>Logístico</u>
8	$\hat{y} = \beta_0 - \beta_1 * \exp(- \beta_2 * idade)$	Meloun I
9	$\hat{y} = \beta_0 - \exp(- \beta_1 - \beta_2 * idade)$	Meloun II
10	$\hat{y} = \beta_0 * (1 - \beta_1 * \exp(- \beta_2 * idade))$	Brody
11	$\hat{y} = \beta_0 * (1 - \beta_1 * \exp(- \beta_2 * idade))^3$	Von Bertalanffy
12	$\hat{y} = (\beta_0 * idade) / (idade + \beta_1)$	<u>Michaelis-Menten</u>

## 04 RESULTADOS

### 4.1. DESEMPENHO SILVICULTURAL DE ESPÉCIES NATIVAS MADEIREIRAS

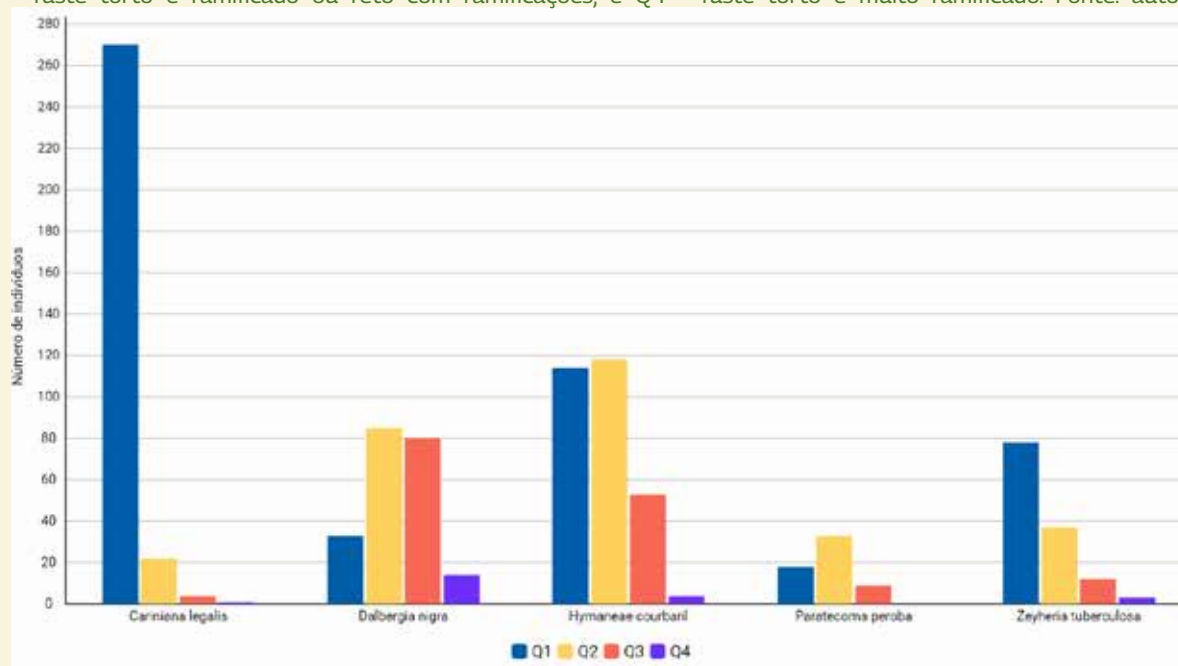
Na **tabela 3** estão apresentados os descritores silviculturais para cada espécie estudada. As espécies que apresentaram os maiores diâmetros foram a *D. nigra* (25,8 cm), seguido por *C. legalis* (22,8 cm). Outras espécies (*P. peroba*, *Z. tuberculosa*, e *H. courbaril*) demonstraram um crescimento em diâmetro bastante semelhante (Tabela 3). Em relação à altura total, *P. peroba* obteve a maior altura total média (16,3 m), seguido pela *D. nigra* (14 m). Apesar de não alcançar os maiores valores, *C. legalis* também alcançou uma altura total média satisfatória (12,6 m). No que diz respeito à altura comercial, em média o jequitibá-rosa (7,7 m) e o ipê-peroba (10,2 m) possuem fuste comercial maior que as demais espécies. Em termos de aproveitamento do fuste para uso comercial, foi visto que *P. peroba* (63,1%) e *Z. tuberculosa* (63,6%) são as espécies com melhor aproveitamento do fuste. Mas *C. legalis* também apresentou um aproveitamento do fuste satisfatório alcançando 60,2%. Ao contrário das demais espécies, *D. nigra* apresentou em média um aproveitamento do fuste bem inferior (36,3%)

**Tabela 3.** Descritores silviculturais de cinco espécies nativas da Mata Atlântica. Valores correspondem às médias. Fonte: autor.

Espécie	Dap (cm)	Htot (m)	Hc (m)	Aproveitamento (%)
<i>Cariniana legalis</i>	22,8	12,6	7,7	60,2
<i>Dalbergia nigra</i>	25,8	14	5,5	39,3
<i>Hymenaea courbaril</i>	15,2	10,5	5,5	53,9
<i>Paratecoma peroba</i>	16,9	16,3	10,2	63,1
<i>Zeyheria tuberculosa</i>	16,9	10,1	6,3	63,6

Em relação a qualidade do fuste (**Figura 4**), *C. legalis* foi a espécie com fustes de melhor qualidade, sendo cerca de 90% dos indivíduos amostrados dessa espécie pertencentes a classe Q1 - ótima qualidade. Já a *D. nigra* apresentou uma alta variabilidade na qualidade do fuste. Tanto *H. courbaril* quanto *P. peroba* apresentaram fustes com melhor qualidade em comparação a *D. nigra*, mas ainda assim também demonstraram grande variação, sendo que a maioria dos indivíduos dessas espécies pertenciam a classe Q1 e Q2. O ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) apresentou fustes em sua maioria de classe Q1 (~60%) e Q2 (28%).

**Figura 4.** Número de indivíduos por classe de qualidade do fuste para cada espécie nativa estudada. Q1 - fuste reto e sem ramificações ou tortuosidade; Q2 - fuste reto, pouco ramificado ou pouco tortuoso; Q3 - fuste torto e ramificado ou reto com ramificações; e Q4 - fuste torto e muito ramificado. Fonte: autor.



## 4.2. MODELOS DE PRODUTIVIDADE PARA ESPÉCIES NATIVAS MADEIREIRAS

Em geral, todos os modelos selecionados alcançaram alto nível de significância estatística e, portanto, são plausíveis e adequados para prever o crescimento em diâmetro, altura total e comercial das espécies estudadas nos dois cenários estipulados. Dentre os modelos testados (**Tabela 2**), os modelos selecionados para prever o crescimento/produtividade para cada espécie estudada estão detalhados na **Tabela 4 a 8**. Nessas tabelas é possível observar todas as estatísticas utilizadas para avaliar a performance e ajuste do modelo selecionado, assim como os coeficientes de regressão estimados para cada um deles.

Os modelos apresentados aqui correspondem aos modelos mais complexos e com melhor ajuste para estimar o diâmetro, altura total e comercial de cada espécie. Isto é, os modelos que apresentaram os menores AIC e BIC, além de um R<sup>2</sup> ajustado satisfatório. Todas as curvas de crescimento construídas a partir dos modelos selecionados para cada espécie demonstraram uma tendência de crescimento em diâmetro e altura (total e comercial) ao longo do tempo apontando um alto potencial de produtividade dessas espécies. Na **Figura 5** é mostrado graficamente os modelos de crescimento para cada espécie nos dois cenários hipotéticos, o geral (linha laranja) e melhorado (linha verde).

**Tabela 4.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), e coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Cariniana legalis* (jequitibá-rosa). Fonte: autor.

Cenário	Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	R <sup>2</sup>	AIC	BIC	<i>p-value</i>
Geral	Dap	Gompertz	40,126054	0,900999	0,088136	0,78	6011,07	6030,6	0,0001
	Htot	Gompertz	24,46055	0,92401	0,08383	0,76	2693,3	2980,7	0,0001
	Hc	Gompertz	13,376903	0,941921	0,108058	0,55	3215,2	3233,2	0,0001
Melhores	Dap	Gompertz	59,091983	0,715736	0,060301	0,78	6013,4	6032,9	0,0001
	Htot	Gompertz	36,46152	0,78730	0,0586	0,84	222,2	229,3	0,0001
	Hc	Michaelis-menten	26,261	21,785	-	0,64	3225,5	3239,5	0,001

**Tabela 5.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Hymenaea courbaril* (jatobá). Fonte: autor.

Cenário	Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	R <sup>2</sup>	AIC	BIC	<i>p-value</i>
Geral	Dap	Gompertz	137,82415	1,32073	0,03566	0,61	3888,5	3906,4	0,0001
	Htot	Exponencial 2	1,779513	0,106198	-	0,54	2064,3	2076,3	0,001
	Hc	Exponencial 2	1,151204	0,093358	-	0,4	1443,4	1454,9	0,0001
Melhores	Dap	Gompertz	76,2974	0,92971	0,04565	0,81	887,17	899,79	0,0001
	Htot	Exponencial 2	2,75596	0,09702	-	0,67	533,8	541,8	0,0001
	Hc	Exponencial 2	1,500961	0,100108	-	0,66	364,9	372,4	0,001

**Tabela 6.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de Paratecoma peroba (ipê-peroba). Fonte: autor.

Cenário	Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	R <sup>2</sup>	AIC	BIC	<i>p-value</i>
Geral	Dap	Meloun I	25,89131	31,578356	0,069130	0,7	3046,1	3063,3	0,0001
	Htot	Exponencial 1	19,64061	2,17905	0,30150	0,76	1444,4	1459,2	0,0001
	Hc	Gompertz	10,55250	0,80050	0,13034	0,68	1213,3	1227,6	0,001
Melhores	Dap	Michaelis-Menten	49,726	17,659	-	0,82	737,6	749,6	0,001
	Htot	Gompertz	23,79360	1,58876	0,22361	0,94	288,4	297,8	0,001
	Hc	Gompertz	15,13209	2,07218	0,24328	0,82	318,3	327,6	0,001

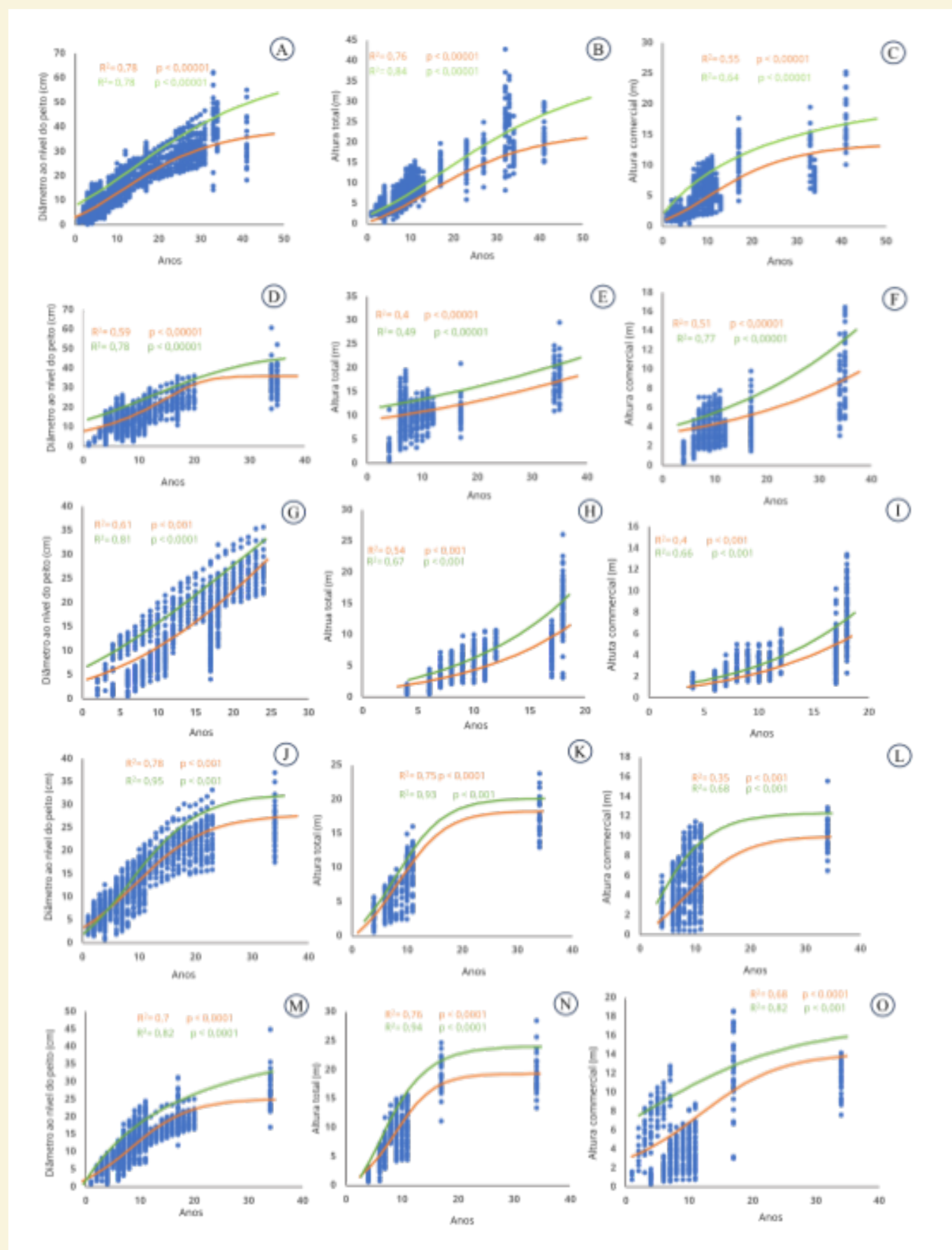
**Tabela 7.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de Dalbergia nigra (jacarandá-da-Bahia). Fonte: autor.

Cenário	Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	R <sup>2</sup>	AIC	BIC	<i>p-value</i>
Geral	Dap	Richards	33,7401	7,2231	0,3462	4,5073	0,59	7605,6	7626,2	0,0001
	Htot	Exponencial 2	8,040827	0,021606	-	-	0,4	2322,9	2335,2	0,001
	Hc	Exponencial 2	2,434506	0,037045	-	-	0,51	1493,3	1504,9	0,0001
Melhores	Dap	Exponencial 1	46,47750	1,131029	0,105560	-	0,78	1733,9	1749,1	0,001
	Htot	Exponencial 2	11,211167	0,018186	-	-	0,49	581,4	589,7	0,0001
	Hc	Exponencial 2	3,84546	0,03460	-	-	0,77	339,8	347,3	0,0001

**Tabela 8.** Modelos de crescimento para dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação bayesiano (BIC), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), coeficientes ajustados ( $\beta$ ) para estimar o diâmetro (DAP), altura total (Htot), e altura comercial (Hc) de *Zeyheria tuberculosa* (ipê-felpudo). Fonte: autor.

Cenário	Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	R <sup>2</sup>	AIC	BIC	<i>p-value</i>
<b>Geral</b>	Dap	Exponencial 1	25,064897	1,521374	0,210114	-	0,78	3649,2	3667,3	0,0001
	Htot	Exponencial 1	17,42644	2,00261	0,25648	-	0,75	1172,4	1186,7	0,0001
	Hc	Exponencial 1	10,34307	1,38544	0,19462	-	0,35	1535	1550,2	0,0001
<b>Melhores</b>	Dap	Exponencial 1	31,463049	1,301655	0,178303	-	0,95	693,3	706,1	0,0001
	Htot	Exponencial 1	20,77637	1,73035	0,24620	-	0,93	226,69	235,63	0,0001
	Hc	Gompertz	12,3912	0,7326	0,1939	-	0,68	293,9	303,9	0,0001

**Figura 5.** Gráficos dos modelos de crescimento selecionados para estimar produtividade em diâmetro, altura total e comercial de cinco espécies nativas: *Cariniana legalis* (A-C), *Dalbergia nigra* (D-F), *Hymenaea courbaril* (G-I), *Zeyheria tuberculosa* (J-L), e *Paratecoma peroba* (M-O). Fonte: autor.



### 4.3. ESTIMATIVAS DE PRODUTIVIDADE PARA ESPÉCIES NATIVAS UTILIZANDO OS MODELOS AJUSTADOS

Os resultados das predições dos modelos comparando as condições geral e melhorada demonstraram insights valiosos sobre o potencial das espécies nativas estudadas para produção de madeira (**Tabela 9**). Em geral, todas as espécies avaliadas demonstraram alto potencial silvicultural para produção de madeira. As estimativas dos modelos aos 18 anos de idade (**Tabela 9**) apontou que se forem dadas condições ideais de crescimento para as espécies estudadas é possível atingir valores de diâmetros muito próximos ao diâmetro mínimo de corte (35 cm) utilizado como referência em serrarias para processamento e desdobro da madeira.

As cinco espécies estudadas, principalmente, a *C. legalis*, *Z. tuberculosa*, *P. peroba*, e *H. courbaril*, mostraram que naturalmente possuem alta aptidão para produção de madeira nobre, pois frequentemente apresentam características silviculturais valorizadas pela indústria madeireira, como longos fustes comerciais. Apesar da maioria das espécies estudadas serem consideradas como madeiras finais, isto é, espécies de crescimento lento com ciclos de colheita maiores que 35 anos. Nossos resultados indicam que é possível adiantar drasticamente esses ciclos de colheita comercial, a depender do tipo de produto almejado (e.g., mobília, piso, cercas, telhado, pisos, etc.), através da aplicação de manejos personalizados para cada espécie.

**Tabela 9.** Estimativas de crescimento em diâmetro (Dap), altura total (Htot) e altura comercial (Hc) aos 18 anos de idade utilizando os modelos selecionados para cada espécie nativa estudada em dois cenários de produtividade (Geral e Melhorado). Fonte: autor.

Espécie	Variável	Predições	
		Geral	Melhorado
<i>Cariniana legalis</i>	Dap (cm)	24,5	29,61
	Htot (m)	14	16,9
	Hc (m)	9,2	11,9
<i>Dalbergia nigra</i>	Dap (cm)	25,2	30,4
	Htot (m)	11,9	15,5
	Hc (m)	4,7	7,1
<i>Hymenaea courbaril</i>	Dap (cm)	19,2	25
	Htot (m)	12	15,8
	Hc (m)	6,2	9,1
<i>Paratecoma peroba</i>	Dap (cm)	16,8	25,1
	Htot (m)	18,1	21,8
	Hc (m)	12,4	13,7
<i>Zeyheria tuberculosa</i>	Dap (cm)	21,6	26,3
	Htot (m)	15,2	19,6
	Hc (m)	8,8	11,62



## 05 DISCUSSÃO

### 5.1. DESEMPENHO SILVICULTURAL DAS CINCO ESPÉCIES NATIVAS

O jequitibá-rosa (*C. legalis*) foi a espécie com melhor performance silvicultural atingindo altos valores de diâmetro, altura total e comercial, assim como fuste em geral de ótima qualidade. Além disso, foi visto que a aplicação de práticas de manejo melhorado (cenário melhorado) para essa espécie pode resultar em um aumento notável no diâmetro de 24,5 cm para 29,61 cm. A altura total e do fuste comercial também apresentaram melhorias consideráveis no cenário melhorado, passando de 14 m para 16,9 m e de 9,2 m para 11,9 m, respectivamente, demonstrando mais uma vez que se forem dadas condições favoráveis de manejo a essa espécie é possível aumentar substancialmente sua produtividade. Tradicionalmente, *C. legalis* é uma espécie nativa cuja madeira é amplamente apreciada pelo setor florestal madeireiro devido às suas qualidades físicas e estéticas (madeira avermelhada), que a torna excelente para uso nobre e, conseqüentemente, aumentam seu valor agregado (CARVALHO, 2014; EMBRAPA, 2022; ROLIM; PIOTTO, 2018). Por conta disso, historicamente, a madeira de jequitibá-rosa tem se sido extremamente explorada de forma ilegal, o que causou o declínio de suas populações que crescem naturalmente em florestas nativas, colocando a espécie em risco de extinção (IUCN, 2022). O Jequitibá-rosa pode ser plantado em pleno sol, mas seu crescimento é favorecido em plantios mistos (ROLIM; PIOTTO, 2018). Essa espécie exibe naturalmente um alta qualidade e aproveitamento do fuste diminuindo a necessidade por podas e desbastes periódicos, o que a torna comercialmente mais viável (ROLIM; PIOTTO, 2018).

Em comparação ao jequitibá-rosa, *D. nigra* revelou um padrão de crescimento diferente. Embora tenha ocorrido um aumento no diâmetro, de 25,2 cm para 30,4 cm, nas condições melhoradas, a altura total e do fuste comercial apresentaram melhorias menos expressivas (**Tabela 9**). Esse resultado sugere que o manejo diferenciado pode estar mais focado no desenvolvimento do tronco do que na altura total dessa espécie. Em relação as demais espécies, *D. nigra* não atingiu valores satisfatórios de altura total e comercial, além disso a espécie frequentemente possui fuste comercial curto e tortuoso, o que pode limitar seu uso em serraia (**Tabela 9; Figura 4**). Outros estudos também relataram resultados similares para essa espécie (ROLIM; PIOTTO, 2018). Segundo Rolim e Piotto (2018), *D. nigra* quando plantada a pleno em espaçamento grande tende a apresentar desenvolvimento silvicultural insatisfatório, como alta rebrota desde a base e troncos tortuosos. Dessa forma, fica claro que tal espécie requer um manejo intensivo de longo prazo para alcançar melhor aproveitamento comercial. Apesar disso, a madeira dessa espécie é considerada altamente valiosa, principalmente por suas características estéticas, apresentado um cerne avermelhado muito apreciado pela indústria madeireira para fabricação de diversos produtos (ROLIM; PIOTTO, 2018).

No caso da *H. courbaril*, observamos melhorias notáveis em todas as medidas de crescimento quando comparadas entre as condições geral e melhorada. Além do mais, essa espécie apresentou um aproveitamento do fuste considerado razoável. Porém, a qualidade do fuste dessa espécie variou consideravelmente. Provavelmente, devido ao fato que essa espécie possui alta plasticidade, pois ocorre naturalmente em uma variedade de biomas brasileiros, o que possivelmente é uma das razões pela sua alta variabilidade em diferentes plantios amostrados (ROLIM; PIOTTO, 2018). Tudo isso, evidencia que essa espécie requer um cuidado especial na seleção da muda ou semente para plantio, ou seja, é preciso entender melhor sua matriz de origem para evitar perdas de produtividade e de aproveitamento comercial. Usualmente, *H. courbaril* produz fustes que bifurcam quando plantados a pleno sol (ROLIM; PIOTTO, 2018). Sendo assim, tal espécie necessita de poda precoce, sendo recomendado plantar *H. courbaril* em condições de meia sombra para evitar bifurcação precoce e diminuir custos com manejo adaptativo (ROLIM; PIOTTO, 2018).

Assim como o jatobá, a *P. peroba* também demonstrou aumentos significativos nas medidas de crescimento na condição melhorada. Apesar dessa espécie ter apresentado diâmetro e altura relativamente alta, sua qualidade do fuste variou amplamente. Segundo Rolim e Piotto (2018) para promover o desenvolvimento de um fuste comercial de alta qualidade é necessário plantar essa espécie em condições de sombreamento parcial para evitar sua bifurcação e conduzir seu crescimento vertical. Por fim, *Z. tuberculosa* é outra espécie nativa que apresentou performance silvicultural satisfatória. Apesar de não possuir troncos tão largos, sua altura (total e comercial) tornam essa espécie atrativa do ponto de vista silvicultural, além do mais a espécie também demonstrou em geral fustes de qualidade excelente (**Figura 4**). Tal espécie possui propriedades físicas da madeira que agregam durabilidade e permite que ela seja utilizada para fabricação de uma variedade de produtos madeireiros (ROLIM; PIOTTO, 2018).

## 5.2. IMPLICAÇÕES PARA PRÁTICA

Aqui, de forma inédita, foram ajustados modelos de crescimento aplicáveis a uma gama de condições edafoclimáticas para cinco espécies nativas com o objetivo de demonstrar o potencial silvicultural delas para produção de madeira. Tais modelos foram ajustados através de dados coletados em plantios localizados em uma ampla distribuição geográfica que representa um imenso gradiente ambiental. Por conta disso, é possível dizer que os modelos parametrizados são robustos o suficiente para predizer o crescimento das espécies em diferentes condições de sítio. Assim, tais modelos podem ser utilizados por múltiplas partes interessadas, como governo, proprietários de terras, pesquisadores, etc.

Apesar das particularidades, a maioria das espécies apresentaram comportamento silvicultural satisfatório, tornando seu uso para exploração sustentável de madeira em plantios de restauração florestal factível. Nossos resultados também ressal-

tam a importância de adaptar as práticas de manejo florestal às necessidades de cada espécie demonstrando a relevância de um manejo florestal estratégico e personalizado, que leve em consideração as características silviculturais de cada espécie. Embora seja difícil fazer uma comparação direta com espécies exóticas, como eucalipto e mogno africano, os resultados obtidos indicam que o manejo florestal pode ter um impacto positivo no crescimento das espécies nativas mencionadas aumentando ainda mais seu desempenho. Tendo em vista isso, nosso estudo fornece preciosos insights sobre o potencial silvicultural dessas espécies em plantios comerciais, como modelos de restauração com fins econômicos, o que pode reduzir a pressão de desmatamento sob remanescentes de floresta nativa.

Alguns estudos já demonstraram que modelos de restauração visando a exploração econômica de produtos florestais, principalmente a madeira, podem sinergicamente gerar benefícios ecológicos (e.g., conservação da fauna e flora, mitigação climática, segurança hídrica) e socioeconômicos (e.g., emprego, renda, produtos florestais, etc.) (BENINI; ADEODATO, 2017; BRANCALION et al., 2012; BRANCALION et al., 2022). Inúmeros podem ser os benefícios de modelos de restauração florestal voltados para produção de madeira. Por exemplo, a maioria das espécies estudadas aqui são beneficiadas quando plantadas em condições de sombreamento (ROLIM; PIOTTO, 2018), o que torna vantajoso seu emprego em plantações mistas, tais como plantios de restauração florestal.

Em contrapartida, a adoção de modelos de restauração florestal que conciliem objetivos ecológicos e socioeconômicos pode ainda promover um maior engajamento e, portanto, uma participação mais efetiva de diversas partes interessadas, como empresários, governo, proprietários de terras, e comunidades locais, o que pode impulsionar esforços de restauração em todo o Brasil permitindo que o país cumpra com metas ambiciosas de restauração firmadas através de acordos nacionais e internacionais (BRANCALION et al., 2019; ONU, 2019).

Ainda, ao considerar questões de mercado, é visto que modelos de restauração visando produção de madeira nativa podem ser um empreendimento altamente rentável. Uma vez que a madeira nativa de plantios de restauração frequentemente possuem um valor mais elevado no mercado em comparação com a madeira de espécies exóticas, devido à sua origem sustentável (EMBRAPA, 2022). Além disso, o valor agregado pode aumentar se forem aplicadas práticas de manejo sustentável e certificações de sustentabilidade (EMBRAPA, 2022).

Esse estudo fornece informações valiosas que podem guiar múltiplas partes interessadas na tomada de decisão sobre manejo florestal e produção sustentável de madeira nativa. Nosso estudo evidencia oportunidades para o cultivo sustentável de espécies nativas de interesse comercial e apontam desafios que podem ser superados com a aplicação de manejo adequado. Tradicionalmente, a silvicultura de nativas no Brasil ainda é considerada um investimento de alto risco por diversos fatores, sejam eles administrativos, burocráticos ou legais, mas um dos principais desafios ainda continua sendo a falta de dados sobre o tempo de colheita das espécies, que majoritariamente é usado para calcular a taxa de retorno interna do investimento (ROLIM et al., 2019). Aqui, estimamos o potencial das espécies considerando apenas um ciclo de produção comercial aos 18 anos. Sendo assim, é esperado que em ciclos de colheita maiores que o estipulado esses resultados sejam ainda melhores. Isso possibilita a criação de modelos de consórcios de nativas com diferentes ciclos de produção comercial, onde a madeira nativa com uso menos nobre (e.g., laminados, caixotes, etc.) pode ser colhida mais cedo e as de uso mais nobre (e.g., mobília, construção, pisos, etc.) mais tarde.

## 06 CONCLUSÃO

Em suma, esse estudo fornece evidências científicas sólidas que podem orientar a tomada de decisões relacionadas ao manejo florestal e à produção sustentável de madeira nativa na Mata Atlântica brasileira. Isso tem implicações importantes para a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento econômico. Foi visto que as espécies *C. legalis* (jequitibá-rosa), *Z. tuberculosa* (ipê-felpudo), *P. peroba* (ipê-peroba) e *H. courbaril* (jatobá) demonstraram bom desempenho em termos de crescimento em diâmetro e altura, tornando-as adequadas para a produção de madeira. Contudo, *D. nigra* (Jacarandá-da-Bahia) apresentou desempenho bem abaixo quando comparada as demais espécies avaliadas. Os modelos de crescimento para cada espécie mostraram que todas elas têm alto potencial de crescimento em diâmetro, altura total e altura comercial ao longo do tempo, principalmente se for feito manejo florestal adequado. Os modelos ajustados podem ser usados para prever o crescimento das espécies em diferentes condições ambientais.

## 07 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKINDELE, Shadrach Olufemi; ONYEKWELU, Jonathan C. **Review Silviculture in Secondary Forests**. p. 351-367, 2011. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19986-8\\_23](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19986-8_23)>. Acesso em: 4 jul. 2022.

ALOUNSAVATH MASTER, Phayvanh; KIM, Se Bin. Economic feasibility of a sustainable production forest management system in Xaibouathong forest management area, Khammouan province, Lao PDR. **Forest Science and Technoly**, v. 17, n. 3, p. 119-124, 2021.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

AZNAR-SÁNCHEZ, José A. et al. Forest Ecosystem Services: An Analysis of Worldwide Research. **Forests**, v. 9, n. 8, p. 453, 2018.

BENINI, Rubens de Miranda; ADEODATO, Sérgio. **Economia da restauração florestal**. [S.l: s.n.], 2017.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin et al. Finding the money for tropical forest restoration. **Unasylva**, v. 63, p. 41-50, 2012.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin et al. Exotic eucalypts: From demonized trees to allies of tropical forest restoration? **Journal of Applied Ecology**, v. 57, n. 1, p. 55-66, 2020.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin et al. Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. **Science Advances**, v. 5, n. 7, 2019.

BRANCALION, Pedro Henrique Santin et al. Ecosystem restoration job creation potential in Brazil. **People and Nature**, v. 4, n. 6, p. 12, 2022.

BRASIL. **Lei no 11.284, de 2 de março de 2006**. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2004-2006/2006/Lei/L11284.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11284.htm)>. Acesso em: 28 set. 2023.

BRASIL. **LEI No 4.771, DE 15 DE SETEMBRO DE 1965**. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l4771.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm)>. Acesso em: 28 set. 2023.

BRAZIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm)>. Acesso em: 27 abr. 2023.

BRITTO, Pedro Caldas de et al. Impact Assessment of Timber Harvesting Operations for Enhancing Sustainable Management in a Secondary Atlantic Forest. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p. 6272, 2019.

BUSTAMANTE, Mercedes Maria da Cunha et al. Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 24, n. 7, p. 1249–1270, 2019.

CARVALHO, P. E.R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Florestas, 2014. v. 5. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/305634>>. Acesso em: 7 jul. 2023.

DO VALLE, Raul Silva Telles et al. **Implicações da legislação brasileira na atividade de plantio de florestas nativas para fins econômicos**. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/implicacoes-da-legislacao-brasileira-na-atividade-de-plantio-de-florestas-nativas-para>>. Acesso em: 7 jul. 2023.

EMBRAPA. **Crescimento e intensificação da produção florestal brasileiro**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/intensificacao-tecnologica-e-concentracao-da-producao/sinal-e-tendencia/crescimento-e-intensificacao-da-producao-florestal-brasileiro>>. Acesso em: 29 set. 2023.

ERSKINE, Peter D.; LAMB, David; BRISTOW, Mila. Tree species diversity and ecosystem function: Can tropical multi-species plantations generate greater productivity? **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2–3, p. 205–210, 2006.

FAO - Food and Agriculture Organization. **Consumption of primary processed wood products predicted to grow 37 percent by 2050**. Disponível em: <<https://www.fao.org/newsroom/detail/consumption-of-primary-processed-wood-products-predicted-to-grow-37-percent-by-2050/en>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

FAO - Food and Agriculture Organization . **State World's For**. 2020. Disponível em: <<https://www.fao.org/publications/card/en/c/CA8642EN/>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2012. Disponível em: <<https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/pdf/manual-tecnico-da-vegetacao-brasileira.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2023.

ITTO - International Tropical Timber Organization. **Annual Review and Assessment to the World Timber Situation**. Disponível em: <<https://www.itto.int/>>. Acesso em: 28 set. 2023.

IUCN - International Union for Conservation of Nature. **IUCN Red List of Threatened Species**. Disponível em: <<https://www.iucnredlist.org/>>. Acesso em: 28 set. 2023.

LAMB, David; ERSKINE, Peter D.; PARROTTA, John A. Restoration of degraded tropical forest landscapes. *Science*, v. 310, n. 5754, p. 1628–1632, 2005.

LOZANO-BAEZ, Sergio Esteban et al. Recovery of Soil Hydraulic Properties for Assisted Passive and Active Restoration: Assessing Historical Land Use and Forest Structure. **Wa-**

ter, v. 11, n. 1, p. 86, 2019.

MATOS, Fabio et al. Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 509–522, 2020.

NÖLTE, Anja et al. Broad-scale and long-term forest growth predictions and management for native, mixed species plantations and teak in Costa Rica and Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 520, p. 120386, 2022.

ONU - United Nations. **UN Decade on Restoration**. Disponível em: <<https://www.decadonrestoration.org/>>. Acesso em: 28 set. 2023.

PASCHKE, Mark W.; PERKINS, Lora B.; VEBLEN, Kari E. Restoration for multiple use. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 4, p. 701–704, 2019.

PAYN, Tim et al. Changes in planted forests and future global implications. **Forest Ecology and Management**, v. 352, p. 57–67, 7 set. 2015.

PIOTTO, Daniel; CALMON, Miguel; ROLIM, Samir G. **O potencial inexplorado da silvicultura de nativas no Brasil** | WRI Brasil. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/o-potencial-inexplorado-da-silvicultura-de-nativas-no-brasil>>. Acesso em: 30 mar. 2023.

PIRES, Aliny et al. **Atlantic Forest: Ecosystem Services Linking People and Biodiversity**. In: Marques, M.C.M., Grelle, C.E.V. (eds) *The Atlantic Forest*. Springer, Cham. p. 347–367, 2021

PLATH, Mirco et al. Establishment of native tropical timber trees in monoculture and mixed-species plantations: Small-scale effects on tree performance and insect herbivory. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 3, p. 741–750, 2011.

PONTES, Danila Morena Fidéles; ENGEL, Vera Lex; PARROTTA, John A. Forest Structure, Wood Standing Stock, and Tree Biomass in Different Restoration Systems in the Brazilian Atlantic Forest. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 588, 2019.

R CORE TEAM DEVELOPMENT. **R: The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 14 set. 2023.

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 208–214, 1 out. 2018.

RIBEIRO, Milton Cezar et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

ROLIM, Samir et al. **Research gaps and priorities in silviculture of native species in Brazil**. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/336346259>>. Acesso

em: 7 fev. 2023.

ROLIM, Samir G.; PIOTTO, Daniel. **Silvicultura e Tecnologia de Espécies da Mata Atlântica**. Belo Horizonte, Rona, 2018.

ROMANELLI, João Paulo et al. Biodiversity responses to restoration across the Brazilian Atlantic Forest. **Science of The Total Environment**, v. 821, p. 153403, 2022.

ROSA, Marcos et al. Hidden destruction of older forests threatens Brazil's Atlantic Forest and challenges restoration programs. **Science Advances**, v. 7, n. 4, 2021.

SANTOS, H. G. dos et al. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/920267>>. Acesso em: 9 ago. 2023.

SHIMAMOTO, Carolina Y. et al. Restoration of ecosystem services in tropical forests: **A global meta-analysis**. PLOS ONE, v. 13, n. 12, p. e0208523, 2018.

SIMA - Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente de São Paulo . **Madeira legal Vs. Madeira ilegal**. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/madeiralegal/madeira-legal-vs-madeira-ilegal/>>. Acesso em: 28 set. 2023.

SFB - Serviço Florestal Brasileiro. Florestas do Brasil em resumo. **Serviço Florestal Brasileiro**. 152 p. 2009.

SPAROVEK, Gerd et al. The revision of the Brazilian Forest Act: increased deforestation or a historic step towards balancing agricultural development and nature conservation? **Environmental Science & Policy**, v. 16, p. 65–72, 1 fev. 2012.

TRUJILLO-MIRANDA, Alma L. et al. Tree diversity and timber productivity in planted forests: *Pinus patula* versus mixed cloud forest species. **New Forests**, v. 52, n. 2, p. 177–195, 2021.

VIEIRA, Daniel L.M.; HOLL, Karen D.; PENEIREIRO, Fabiana M. Agro-Successional Restoration as a Strategy to Facilitate Tropical Forest Recovery. **Restoration Ecology**, v. 17, n. 4, p. 451–459, 2009.

ZAMBIAZI, Daisy Christiane et al. Timber stock recovery in a chronosequence of secondary forests in Southern Brazil: Adding value to restored landscapes. **Forest Ecology and Management**, v. 495, p. 119352, 1 set. 2021.

ZANINI, Anani Morilha et al. The effect of ecological restoration methods on carbon stocks in the Brazilian Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 481, p. 118734, 1 fev. 2021.



# APÊNDICES

**Apêndice A** - Informações dos locais de estudos e espécies plantadas em cada um deles. "X" indica presença. **Fonte:** autor.

Local	Latitude	Longitude	Espécies				
			<i>C. legalis</i>	<i>D. nigra</i>	<i>H. courbaril</i>	<i>P. peroba</i>	<i>Z. tuberculosa</i>
Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi, SP	22°43'33,28"S	48°10'26,35"W	X	X	X	-	X
Fazenda Conde do Pinhal, São Carlos, SP	22°08'10,42"S	47°51'17,85"W	X	X	X	-	X
Fazenda Santana do Monte Alegre, Descalvado, SP	21°57'39,41"S	21°57'39,41"S	X	X	X	X	X
Suzano, Igrapiúna, BA	13°49'0"S	39°09'0"W	X	X	x	x	-
Fíbria, Aracruz, ES	19°49'12"S	40°16'22"W	X	X	X	X	X
Organização de Conservação da Terra, Mucuri, BA	18°05'09"S	39°33'03"W	-	X	X	X	X
Estação Experimental de Luiz Antônio, SP	21°33'32,96"S	47°43'10,88"W	X	-	-	-	-
Reserva Natural da Vale, Sooretama, ES	19°08'39,78"S	40°04'01,66"W	X	X	X	X	X
Fazenda Sucupira, BA	13°19'54,77"S	39°18'41"W	X	X	-	-	-
Fazenda guariroba, SP	22°55'45,13"S	46°54'20,65"W	X	-	X	-	-
Iracemápolis, SP	22°34'51,34"S	47°31'03,39"W	X	-	-	-	-