

X PRÊMIO SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO

Estudos de Economia e Mercado Florestal

TEMA: Metodologias para Precificação de Ativos Florestais

EIXO TEMÁTICO 1: Planejamento, Avaliação e Monitoramento das Concessões Florestais

MODELAGEM ECONÔMICO-ESPACIAL DE ATIVOS FLORESTAIS DE PINUS EM CONCESSÃO DE TRANSIÇÃO ECOLÓGICA: RESINAGEM, ECOLOGIA DA PAISAGEM E CUSTO MARGINAL DE CONVERSÃO ECOLÓGICA

RESUMO

A Lei Federal n. 11.284/2006 instituiu as concessões florestais como instrumento de manejo sustentável em florestas públicas. A partir de 2020, o Serviço Florestal Brasileiro ampliou as iniciativas voltadas à concessão de florestas plantadas no Sul do Brasil, incluindo a Floresta Nacional de Capão Bonito, em São Paulo. Apesar de seu potencial estratégico, a área ainda carece de estudos técnico-econômicos para subsidiar a estruturação da concessão. Este artigo desenvolve uma metodologia integrada de modelagem espacial e econômica para avaliação de ativos florestais de *Pinus* em concessões de transição ecológica. A metodologia combina geoprocessamento em SIG, dados ALOS PALSAR, projeções pelo SISPINUS/EMBRAPA e análise econômica por VPL, MTIR e TMA. Foram avaliados quatro cenários: dois convencionais, derivados do Plano de Manejo da Unidade de Conservação, e dois orientados pela Ecologia da Paisagem, EP-70m e EP-120m, com silvicultura de espécies nativas em corredores ecológicos ripários. Os resultados indicam que a resinagem de *Pinus elliottii* constitui o principal ativo econômico da concessão, com receita bruta entre R\$ 771 milhões e R\$ 1,36 bilhão em 40 anos. O VPL variou de R\$ 5,3 milhões a R\$ 42,1 milhões, e a MTIR, de 10,5% a 13,4%. O Custo Marginal de Conversão Ecológica variou de R\$ 21.135/ha a R\$ 37.192/ha. Conclui-se que, sob as premissas adotadas, a resinagem apresenta potencial para atuar como mecanismo financeiro de suporte à conversão gradual para espécies nativas, articulando viabilidade econômica, conectividade ecológica e restauração da Mata Atlântica.

Palavras-chave: concessões florestais; resinagem; conversão ecológica.

ABSTRACT

Federal Law No. 11,284/2006 established forest concessions in Brazil as an instrument for sustainable forest management in public forests. Since 2020, the Brazilian Forest Service has expanded initiatives aimed at the concession of planted forests in southern Brazil, including the Capão Bonito National Forest, located in the state of São Paulo. Despite its strategic potential, the area still lacks technical and economic studies to support the structuring of its forest concession. This article develops an integrated spatial and economic modeling methodology for assessing *Pinus* forest assets in ecological transition concessions. The methodology combines GIS-based geoprocessing, ALOS PALSAR data, growth projections using SISPINUS/EMBRAPA, and economic feasibility analysis based on NPV, MIRR, and MARR. Four scenarios were evaluated: two conventional scenarios derived from the Management Plan of the Conservation Unit, and two scenarios guided by Landscape Ecology, EP-70m and EP-120m, involving the establishment of native species silviculture in riparian ecological corridors. The results indicate that *Pinus elliottii* resin tapping represents the main economic asset of the concession, with gross revenue ranging from BRL 771 million to BRL 1.36 billion over 40 years. NPV ranged from BRL 5.3 million to BRL 42.1 million, while MIRR ranged from 10.5% to 13.4%. The Marginal Cost of Ecological Conversion ranged from BRL 21,135/ha to BRL 37,192/ha. The study concludes that resin tapping can finance the gradual conversion to native species, offering a comparative tool to support public decision-making in ecological transition concessions, with potential gains in economic feasibility, ecological connectivity, and Atlantic Forest restoration.

Keywords: forest concessions; resin tapping; ecological conversion.

SUMÁRIO

RESUMO	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1 Concessões Florestais e Precificação de Ativos	7
2.2 Modelagem Espacial em Florestas Plantadas	8
2.3 Ecologia da Paisagem e Manejo Adaptativo	8
2.4 Custo Marginal de Conversão Ecológica: Fundamentos Teóricos	9
3. METODOLOGIA	10
3.1 Área de Estudo	10
3.2 Dados e Fontes	11
3.3 Análise Espacial em SIG	11
3.4 Cenários de Manejo	11
3.5 Projeção de Crescimento e Produtividade	14
3.6 Modelagem Econômica	14
3.7 Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE)	15
4. RESULTADOS	16
4.1 Zoneamento e Classificação Espacial	16
4.2 Produtividade do Pinus e da Resinagem	16
4.3 Resultados Econômicos por Cenário	16
4.4 Análise de Sensibilidade	18
4.5 Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE)	19
4.6 Dimensão Ambiental e Social	20
5. DISCUSSÃO	21
5.1 A Resinagem como Mecanismo Financeiro de Transição Ecológica	21
5.2 Cenários de Paisagem: Eficiência Espacial e Robustez Econômica	22
5.3 O CMCE como Instrumento de Política Pública	23
5.4 Potencial de Replicação	24
5.5 Limitações e Perspectivas Futuras	24
6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Floresta Nacional de Capão Bonito (SP) e zoneamento geral do PMUC	10
Figura 2. Fluxograma metodológico da modelagem espacial e econômica.	11
Figura 3. PMUC 1 - Conversão integral da ZMFS I: 622 ha de Pinus e 1.823 ha de silvicultura de espécies nativas	12
Figura 4. PMUC 2 - Conversão parcial: 1.253 ha de Pinus e 1.192 ha de silvicultura de espécies nativas	13
Figura 5. Corredor ecológico ripário de 240 m além das APPs: 1.460 ha de Pinus e 986 ha de silvicultura de espécies nativas.....	13
Figura 6. Corredor ecológico ripário de 140 m além das APPs: 1.980 ha de Pinus e 465 ha de silvicultura de espécies nativas.....	14
Figura 7. Comparativo dos indicadores econômicos por cenário de manejo da FNCB.	17
Figura 8. Fronteira de trade off entre área destinada à silvicultura de espécies nativas e VPL dos cenários.	20
Figura 9. Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) por cenário de manejo.....	20
Figura 10. Diagrama conceitual da resinagem como mecanismo de transição ecológica	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos cenários de manejo avaliados para a FNCB.	12
Tabela 2. Indicadores econômicos por cenário de manejo da FNCB (horizonte de 40 anos). .	17
Tabela 3. Análise de sensibilidade da MTIR por cenário (custo de colheita × preço de resina).	18
Tabela 4. Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) por cenário de manejo.	19

1. INTRODUÇÃO

A precificação de ativos florestais em concessões públicas constitui um dos maiores desafios para a expansão do setor florestal sustentável brasileiro. A Lei Federal n. 11.284/2006 (Lei de Gestão de Florestas Públicas - LGFP), instituiu as concessões florestais como mecanismo para fomentar o manejo florestal sustentável, combater a extração ilegal de madeira e gerar receitas públicas. Contudo, a ausência de metodologias robustas e replicáveis para a avaliação econômica e espacial das áreas concessionáveis limita tanto o interesse do setor privado quanto a capacidade decisória de órgãos públicos como o SFB e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).

Em 2020, o SFB lançou o primeiro Plano Anual de Outorga Florestal (PAOF) contemplando florestas plantadas no sul do país, denominadas Flonas Sul, que incluem as Florestas Nacionais de Irati (PR), Três Barras (SC), Chapecó (SC) e Capão Bonito (SP). Esse conjunto representa um novo modelo de concessão florestal, baseado na colheita e substituição gradual de plantios de *Pinus* e *Eucalyptus* por espécies nativas, com objetivos simultâneos de restauração do bioma Mata Atlântica e geração de receitas. Para as Flonas de Irati, Três Barras e Chapecó, estudos técnico-econômicos foram desenvolvidos por consórcio contratado pelo BNDES (SFB/BNDES, 2023). A Floresta Nacional de Capão Bonito ainda carece de estudos técnico-econômicos publicamente disponíveis ou consolidados para subsidiar a modelagem da concessão.

A FNCB está localizada no sudeste do estado de São Paulo, nos municípios de Capão Bonito e Buri. Com aproximadamente 4.345 ha, é composta majoritariamente por plantios de *Pinus elliottii* e *Araucaria angustifolia*, além de vegetação nativa em matas ciliares e sub-bosque. O Plano de Manejo da Unidade de Conservação (PMUC, ICMBio, 2017/2018) estabelece diretrizes de zoneamento e manejo, com ênfase na conversão progressiva das áreas de *Pinus* para espécies nativas, no manejo de produtos florestais não madeireiros, especialmente a resinagem, e na conservação dos recursos hídricos e da biodiversidade.

A premissa estruturante deste trabalho é que a restauração ecológica em concessões florestais não é um objetivo isolado, mas um processo que precisa ser economicamente viável para ser sustentável. Nesse sentido, a resinagem de *Pinus elliottii*, como ativo de retorno previsível e relativamente estável, funciona como mecanismo financeiro de transição: seu fluxo de caixa consolidado cria as condições econômicas necessárias para financiar a expansão gradual da silvicultura de espécies nativas e os custos de restauração ecológica ao longo do horizonte contratual de 40 anos.

Este artigo tem como problema central: quais metodologias de modelagem espacial e econômica permitem precificar, de forma integrada e replicável, os ativos florestais de uma concessão de *Pinus*, considerando diferentes cenários de manejo e as diretrizes do plano de manejo vigente? A pergunta norteadora desdobra-se em questões acessórias: (a) qual o potencial econômico da resinagem como ativo não madeireiro na FNCB?; (b) de que forma a abordagem da Ecologia da Paisagem altera os indicadores de viabilidade econômica e os retornos públicos?; (c) como a análise de sensibilidade pode orientar a gestão de risco em concessões florestais?; e (d) como quantificar o Custo Marginal de Conversão Ecológica associado à ampliação das áreas de restauração?

O objetivo geral é desenvolver uma metodologia integrada de modelagem espacial e econômica para a precificação de ativos florestais na FNCB, sob diferentes cenários de implementação do PMUC. Os objetivos específicos são: (i) analisar e interpretar o zoneamento do PMUC integrando-o a dados de geoprocessamento; (ii) delimitar as Áreas de Preservação Permanente (APPs) por meio de extração automática de redes de drenagem; (iii) desenvolver e comparar cenários de destinação das áreas manejadas; (iv) avaliar a viabilidade técnico-econômica de cada cenário por meio de indicadores financeiros padronizados; e (v) calcular o Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) como indicador comparativo de apoio à tomada de decisão pública.

A justificativa para este estudo reside em três dimensões complementares. Do ponto de vista científico, a integração de SIG, modelagem de crescimento florestal e análise econômica em cenários comparativos constitui abordagem ainda pouco explorada no contexto das concessões florestais brasileiras. Do ponto de vista prático, os resultados podem subsidiar diretamente o SFB e o ICMBio na tomada de decisão para a implementação do PMUC. Do ponto de vista da política pública, a demonstração de que modelos adaptativos de manejo da paisagem conciliam viabilidade econômica e restauração ambiental reforça as concessões florestais como instrumento de desenvolvimento sustentável.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Concessões Florestais e Precificação de Ativos

A LGFP (Lei n. 11.284/2006) define concessão florestal como a delegação onerosa, feita pelo poder concedente, do direito de praticar o manejo florestal sustentável para exploração de produtos e serviços de uma unidade de manejo, mediante licitação. A precificação dos ativos florestais envolve a estimativa do valor presente dos fluxos futuros de caixa gerados pela exploração madeireira, pela extração de produtos não madeireiros e pelos serviços ambientais (PELANDA, 2014). A literatura econômica florestal distingue duas categorias principais de ativos: (i) madeireiros, cuja precificação baseia-se no volume, nas classes de diâmetro e nos preços de mercado por sortimento; e (ii) não madeireiros, como a resina de *Pinus*, sementes, mel e frutos, cujo valor depende de produtividade, sazonalidade e condições de mercado.

A resinagem consiste na extração da goma-resina em árvores vivas do gênero *Pinus* e possui ampla aplicação industrial, com destaque para a indústria química (FERREIRA, 2001; MARCELINO, 2004). Cordeiro e Silva (2009) demonstraram que, em povoamentos de *Pinus elliottii*, a Taxa Interna de Retorno para produção combinada de madeira e resina supera a obtida com produção exclusiva de madeira, confirmando a resinagem como ativo econômico prioritário. Dossa et al. (2002) reforçam que a rentabilidade dos reflorestamentos de *Pinus* é diretamente influenciada pelo portfólio de produtos explorados, sendo a resina o componente de maior valor agregado por unidade de área.

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) adotada pelo SFB para os editais das Flonas Sul é de 10,5% ao ano, valor que baliza a viabilidade econômica dos projetos de concessão. O Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR) constituem os indicadores primários de viabilidade, por incorporarem o valor temporal do capital e corrigirem

os problemas de raízes múltiplas da TIR convencional (REZENDE; OLIVEIRA, 2013). As concessões florestais devem, ademais, gerar benefícios simultâneos ao concessionário, à comunidade local e à manutenção dos serviços ecológicos — premissa que reforça a importância de modelos econômicos transparentes e tecnicamente robustos (SILVA, 2020).

2.2 Modelagem Espacial em Florestas Plantadas

A integração dos arquivos shapefile do ICMBio com os quadros de planejamento do PMUC resultou na classificação de 4.186 ha distribuídos entre as principais categorias de manejo consideradas na modelagem espacial da FNCB. Ressalta-se que pequenas diferenças entre as áreas oficiais do PMUC e as áreas utilizadas na modelagem decorrem de procedimentos de geoprocessamento, reprojeção, recortes vetoriais e arredondamentos inerentes ao ambiente SIG.

No âmbito das zonas de manejo florestal, a ZMFS I compreende aproximadamente 2.138 ha, conforme o PMUC. Para fins de modelagem econômica, entretanto, foram consideradas classes operacionais associadas aos talhões produtivos de Pinus, incluindo 1.215,9 ha de talhões prioritários para corte raso e 1.229,83 ha de talhões com potencial de resinagem. Esses valores não devem ser interpretados como subáreas exclusivas da ZMFS I, mas como categorias de manejo derivadas da integração entre o zoneamento, os quadros de planejamento do PMUC e os arquivos shapefile utilizados na análise espacial. A ZMFS II B abrange 1.089 ha destinados à conservação e pesquisa com Araucária e Imbuia. As APPs totalizam 406,77 ha, distribuídos entre vegetação nativa (112,35 ha), Pinus sp. (205,55 ha), Pinus experimental (4,95 ha), Araucária (80,97 ha) e Imbuia (2,95 ha).

A extração automática da rede de drenagem por meio do radar ALOS PALSAR gerou resultados compatíveis com a hidrografia oficial do estado de São Paulo, indicando potencial de aplicação do método em estudos de planejamento florestal e delimitação de APPs.

2.3 Ecologia da Paisagem e Manejo Adaptativo

O conceito de manejo da paisagem deriva da aplicação dos princípios da Ecologia da Paisagem ao manejo de ecossistemas, buscando conciliar produção florestal, conservação ambiental e conectividade ecológica em diferentes escalas espaciais (VIANA; OLIVEIRA, 1997). Na prática, essa abordagem envolve a definição de zonas de uso diferenciado para produção, restauração e conservação, com base em critérios espaciais como declividade, proximidade a recursos hídricos, sensibilidade ambiental e potencial de conectividade entre fragmentos florestais (FERRAZ; VETTORAZZI, 2003).

No contexto da FNCB, e especialmente das Flonas Sul, a Ecologia da Paisagem fornece um arcabouço metodológico para orientar a transição entre o modelo atual de silvicultura de Pinus e cenários de longo prazo com maior predominância de espécies nativas. Nos cenários orientados pela Ecologia da Paisagem, a silvicultura de espécies nativas foi concebida como sistemas multifuncionais de plantio em corredores ripários e áreas adjacentes às APPs, integrando restauração ecológica, conectividade estrutural da paisagem e diversificação produtiva de longo prazo.

Essa concepção aproxima-se das experiências do Programa Arboretum, reconhecido pelo Serviço Florestal Brasileiro como Centro de Desenvolvimento Florestal Sustentável, que

evidenciam o potencial produtivo e ecológico de sistemas florestais com espécies nativas em ciclos de 10 a 40 anos. De forma complementar, os cenários EP desenvolvidos neste estudo incorporam princípios da Ecologia da Paisagem ao priorizar áreas adjacentes à rede hidrográfica, ampliar corredores ripários e favorecer a continuidade espacial entre remanescentes florestais. Essa estratégia busca compatibilizar conservação da biodiversidade, proteção dos recursos hídricos e viabilidade econômica da concessão, reconhecendo que a configuração espacial das áreas restauradas influencia simultaneamente processos ecológicos e o desempenho produtivo do sistema florestal.

Na Mata Atlântica, a conectividade da paisagem constitui um dos principais desafios para a conservação da biodiversidade remanescente, diante do elevado grau de fragmentação do bioma e da predominância de pequenos fragmentos isolados (RIBEIRO et al., 2009). Estudos também indicam que a fragmentação pode comprometer processos ecológicos fundamentais, incluindo interações planta-polinizador e a manutenção da diversidade funcional de espécies arbóreas em ambientes dominados por efeito de borda (LOPES et al., 2009).

A literatura em Ecologia da Paisagem destaca que corredores ripários desempenham papel relevante na manutenção da conectividade ecológica, proteção dos recursos hídricos e suporte à biodiversidade. Burbrink, Philips e Heske (1998), analisando zonas ripárias em ecossistemas florestais temperados, observaram maior diversidade de répteis e anfíbios em corredores com largura superior a 100 metros. Embora desenvolvido em contexto ecológico distinto da Mata Atlântica, o estudo reforça a relevância potencial de corredores ripários mais amplos para a manutenção da biodiversidade e da conectividade ecológica.

Cabe reconhecer, contudo, que a silvicultura de espécies nativas ainda envolve incertezas operacionais, mercadológicas e silviculturais no contexto brasileiro. Aspectos relacionados à padronização das cadeias produtivas, ao domínio técnico das espécies e à previsibilidade econômica ainda limitam sua expansão em escala comercial. Nesse contexto, a manutenção parcial da resinagem de *Pinus* nos cenários EP pode contribuir para a estabilização do fluxo de caixa da concessão e para a consolidação gradual das cadeias produtivas associadas à silvicultura nativa ao longo do horizonte contratual.

2.4 Custo Marginal de Conversão Ecológica: Fundamentos Teóricos

O custo de oportunidade constitui conceito central da economia ambiental e das análises de alocação espacial do uso do solo. Pearce e Turner (1990) estabelecem que toda escolha de destinação de um recurso implica a renúncia aos fluxos econômicos alternativos que ele poderia gerar, princípio que fundamenta análises de trade-off entre usos produtivos e conservação ambiental. Andrade e Oliveira (2008) destacam que o método do custo de oportunidade não busca valorar diretamente os recursos ambientais, mas mensurar as perdas de renda decorrentes de restrições de uso impostas por ações de conservação. Assim, o que se mensura não é o valor do bem ambiental preservado, mas a renúncia econômica associada à sua proteção.

A aplicação desse referencial a concessões florestais com objetivos simultâneos de produção e restauração é sustentada por estudos que destacam a necessidade de tornar a restauração economicamente sustentável ao longo do horizonte contratual. Harrison et al. (2020) demonstram que modelos de restauração em larga escala requerem fontes contínuas de receita para financiar custos operacionais e reduzir riscos de descontinuidade contratual.

Complementarmente, Cordeiro e Silva (2009) demonstram que a produção de resina pode ampliar a rentabilidade de projetos florestais em relação à produção exclusiva de madeira.

A ampliação das áreas destinadas à conversão ecológica configura um trade-off espacial cujo custo marginal depende da configuração territorial da paisagem. Essa relação foi formalizada por Hannesson (1978) e retomada por Strassburg et al. (2020), que demonstraram ganhos substanciais de eficiência quando a restauração é espacialmente priorizada.

Com base nessa fundamentação, o Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) é proposto como adaptação operacional do conceito de custo de oportunidade ao contexto de concessões florestais com metas simultâneas de produção e restauração. O indicador expressa a renúncia econômica marginal por hectare adicional destinado à conversão ecológica, tomando como referência o cenário de maior retorno econômico entre os avaliados. Trata-se de ferramenta de apoio à tomada de decisão pública, concebida para comparar economicamente diferentes cenários de manejo territorial, sem pretensão de representar valoração monetária direta dos serviços ecossistêmicos.

3. METODOLOGIA

3.1 Área de Estudo

A Floresta Nacional de Capão Bonito (FNCB) está localizada no sudeste do estado de São Paulo, abrangendo partes dos municípios de Capão Bonito e Buri. Com área total de aproximadamente 4.345 ha, a FNCB está inserida em zona de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado. Os plantios de *Pinus elliottii* foram iniciados em 1958, com área aproximada de 2.400 ha, e os de *Araucaria angustifolia* ocupam cerca de 1.000 ha. A Zona de Manejo Florestal Sustentável (ZMFS) totaliza 4.135 ha e constitui o objeto central desta análise. A localização e o zoneamento geral da unidade são apresentados na Figura 1.

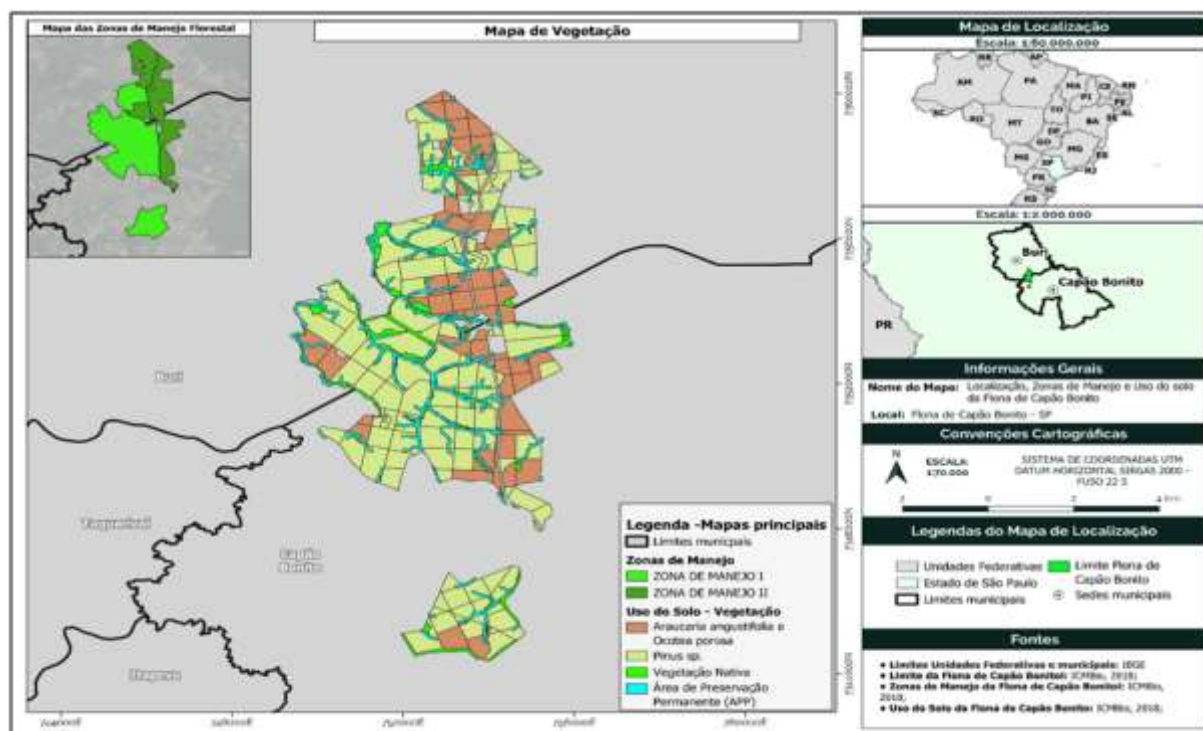


Figura 1. Localização da Floresta Nacional de Capão Bonito (SP) e zoneamento geral do PMUC

3.2 Dados e Fontes

Os dados utilizados compreendem: (i) arquivos shapefile de zoneamento e talhões do ICMBio, disponíveis no portal da FNCB; (ii) imagens do radar ALOS PALSAR com resolução de 12,5 m, obtidas no Alaska Satellite Facility (ASF DAAC); (iii) diretrizes e quadros de planejamento do PMUC (ICMBio, 2017/2018); (iv) premissas econômicas do edital de concessão da Flona de Irati (SFB, 2019/2022), utilizadas como referência para custos e receitas; e (v) dados de preço médio de resina da Associação dos Resinadores do Brasil (ARESB, 2022).

3.3 Análise Espacial em SIG

O processamento geoespacial foi realizado na plataforma ArcGIS 10.5. A classificação dos talhões integrou os arquivos shapefile aos quadros do PMUC, identificando quatro categorias de destinação: (a) talhões prioritários para corte raso na ZMFS I; (b) talhões com permissão de resinagem na ZMFS II A; (c) talhões de conservação de Araucária e Imbuia na ZMFS II B; e (d) áreas de manutenção. O fluxo metodológico completo é apresentado na Figura 2.



Figura 2. Fluxograma metodológico da modelagem espacial e econômica.

A extração automática da rede de drenagem seguiu o protocolo da ANA (2011), compreendendo cinco etapas: (1) projeção para SIRGAS 2000 UTM 22S; (2) geração do arquivo de direção de fluxo (Flow Direction); (3) cálculo de acumulação de fluxo (Flow Accumulation); (4) aplicação de limiar (valor < 4) para extração da rede; e (5) conversão vetorial (Stream to Feature). O modelo foi validado por comparação com a hidrografia oficial do estado de São Paulo. As APPs foram delimitadas pela função buffer, 50 metros para nascentes e 30 metros para linhas de drenagem com largura inferior a 10 metros, conforme a Lei n. 12.651/2012.

3.4 Cenários de Manejo

Foram definidos quatro cenários de destinação das áreas da ZMFS, conforme a Tabela 1. Os cenários convencionais PMUC 1 (Figura 3) e PMUC 2 (Figura 4) derivam de uma leitura interpretativa do PMUC. No chamado PMUC 1, toda a ZMFS I é convertida para silvicultura

de nativas em nove anos; no PMUC 2, apenas os talhões prioritários são convertidos, destinando-se os demais a novo reflorestamento de Pinus e resinagem.

Os cenários de manejo da paisagem EP-120m (Figura 5) e EP-70m (Figura 6) definem a implantação de silvicultura de espécies nativas em faixas adicionais de buffer aplicadas às APPs legalmente estabelecidas. Nos cenários EP-70m e EP-120m foram adicionadas faixas de 70 m e 120 m em cada margem dos cursos d'água, resultando em corredores ecológicos totais aproximados de 140 m e 240 m, respectivamente, além das APPs previstas na Lei. A delimitação dos corredores considerou critérios de proximidade à rede hidrográfica, visando ampliar a conectividade ripária e preservar a capacidade produtiva em áreas de menor sensibilidade ambiental.

Tabela 1. Destinação final das áreas silviculturais produtivas nos cenários de manejo avaliados para a FNCB.

Cenário	Descrição	Silvicultura Pinus (ha)	Silvicultura Nativas (ha)
PMUC 1	Conversão total da ZMFS I para nativas em 9 anos	622	1.823
PMUC 2	Conversão parcial (talhões prioritários); demais com Pinus	1.253	1.192
EP-120m	Corredor ecológico 240 m + APP; menor área Pinus	1.460	986
EP-70m	Corredor ecológico 140 m + APP; maior área Pinus	1.980	465

Nota: As áreas apresentadas correspondem à destinação final das áreas silviculturais produtivas consideradas na modelagem econômica.

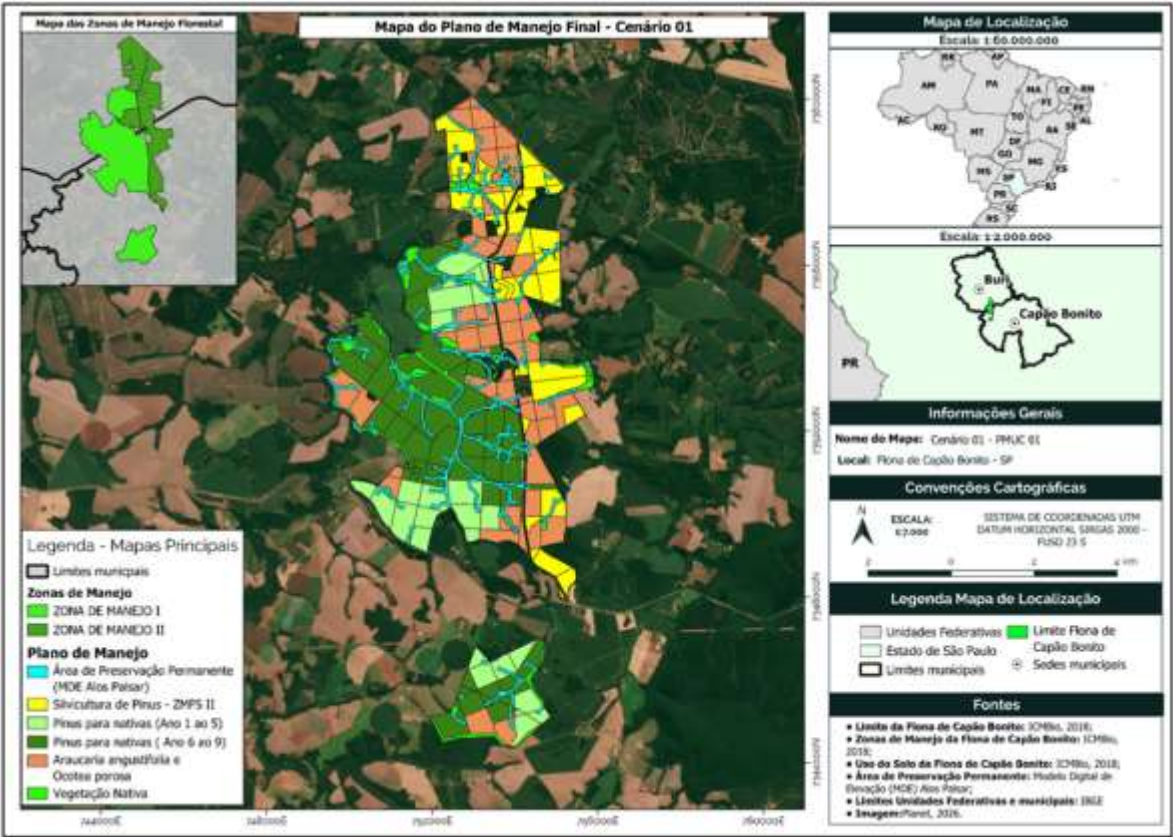


Figura 3. PMUC 1 - Conversão integral da ZMFS I para nativas (1823 ha), com manutenção de 622 ha de Pinus na ZMFS II.

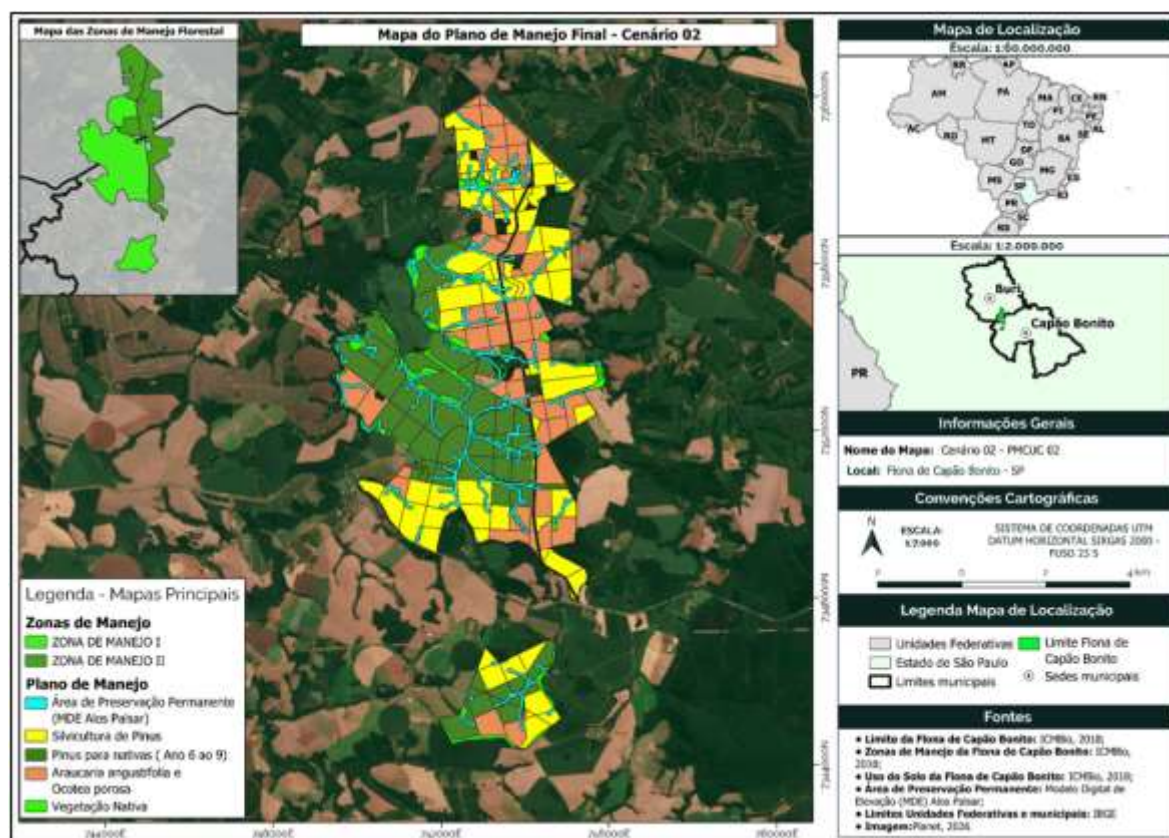


Figura 4. PMUC 2 - Conversão parcial da ZMFS I. São destinados 1.253 ha para silvicultura de Pinus e 1.192 ha para silvicultura de espécies nativas.

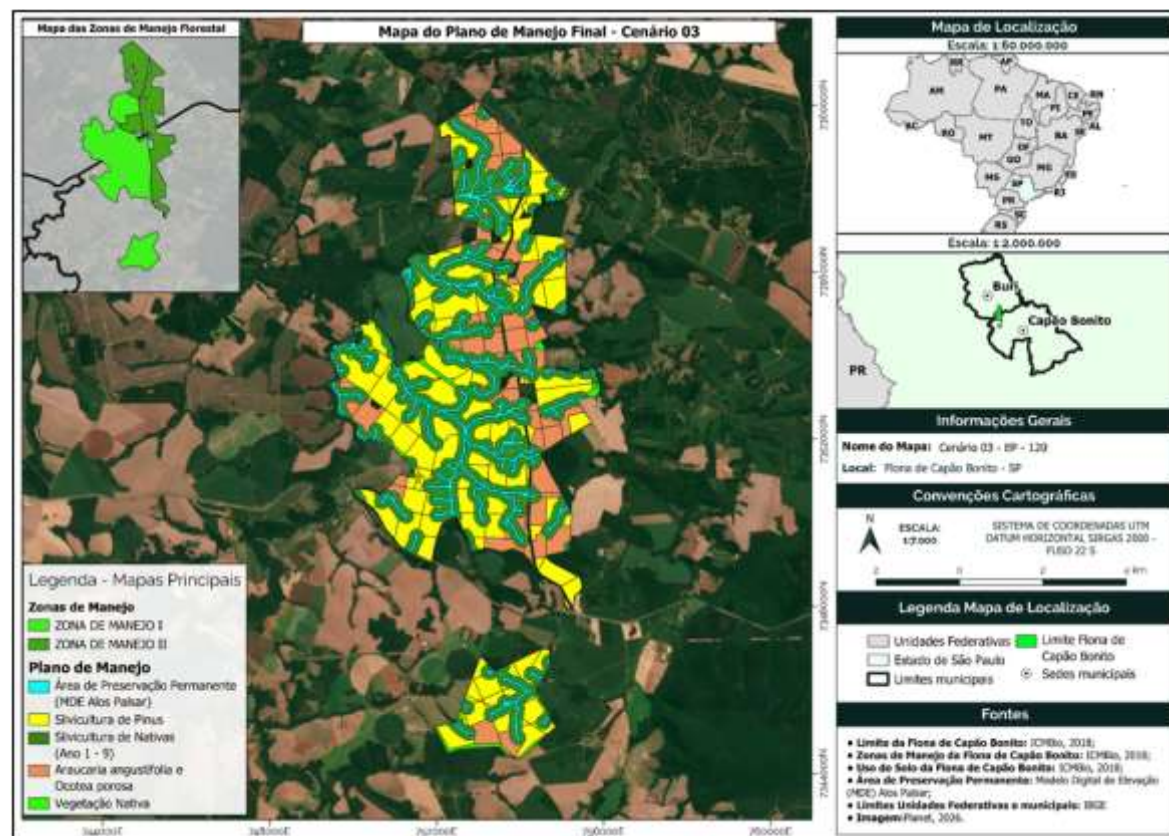


Figura 5. Ecologia da Paisagem (EP-120m) - Corredor ecológico ripário de 120 m em cada margem além das APPs: 1.460 ha de Pinus e 986 ha de silvicultura de espécies nativas

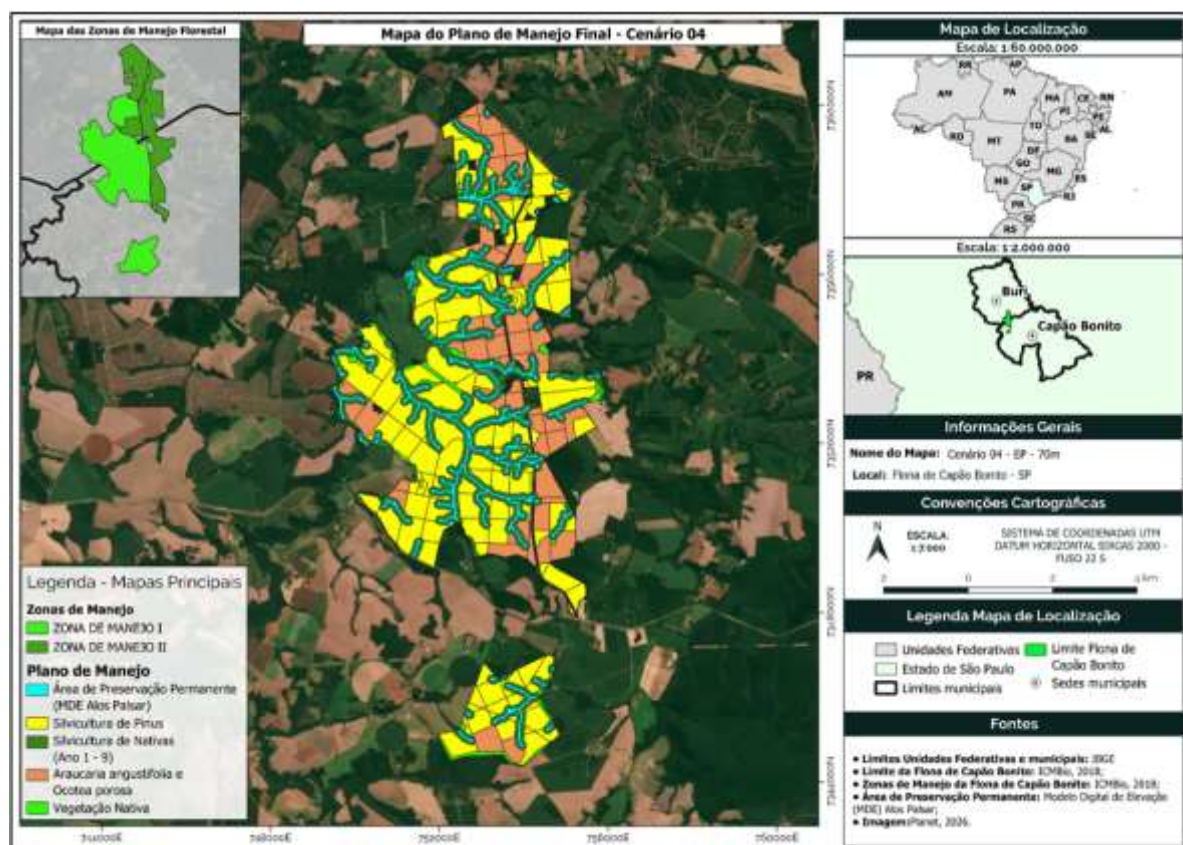


Figura 6. Ecologia da Paisagem (EP-70m) - Corredor ecológico ripário de 70 m em cada margem além das APPs: 1.980 ha de Pinus e 465 ha de silvicultura de espécies nativas

3.5 Projeção de Crescimento e Produtividade

As projeções de volume madeireiro para os novos reflorestamentos de *Pinus elliottii* foram realizadas com o software SISPINUS (Embrapa Florestas), com parâmetro de sítio 22 (intermediário), espaçamento $3,5 \times 2,3$ m (1.242 árvores/ha) e ciclo de 16 anos, incluindo limpeza no ano 8 (mortalidade de 5%) e desbaste no ano 12 (mortalidade de 15%). O sortimento adotado considera cinco classes de diâmetro, com preços referenciados na modelagem da Flona de Irati (SFB, 2019): energia (< 8 cm), celulose (8–18 cm, R\$ 75,74/m³), serraria (18–25 cm, R\$ 121,11/m³), lâmina I (25–35 cm, R\$ 175,03/m³) e lâmina II (> 35 cm, R\$ 227,67/m³).

Para a resinagem, adotou-se produtividade de 4,0 kg/árvore/ano nos plantios novos (do ano 8 ao 16), conforme dados da ARESB (2022) e literatura especializada (SHIMIZU, 2008). O preço médio da resina foi definido como a média do período 2020–2022, correspondente a R\$ 5,03/kg. Para a floresta remanescente, a produtividade média considerada foi de 1.600 kg/ha/ano, dado o maior espaçamento após desbastes.

3.6 Modelagem Econômica

O modelo econômico foi estruturado em planilha de fluxo de caixa com horizonte de 40 anos (prazo contratual da concessão). As premissas de custos foram referenciadas no edital da Flona de Irati (SFB, 2019/2022) e incluem: (i) custos variáveis, sendo a colheita e carregamento de madeira (R\$ 47,18/m³), colheita e carregamento de resina (R\$ 2,00/kg), inventário florestal (R\$ 250/ha/ano), operação de roçagem (R\$ 800/ha/ano); (ii) custos de recuperação florestal, sendo: restauração (R\$ 6.149,30/ha no 1º ano), enriquecimento (R\$ 3.756,55/ha) e regeneração

natural (R\$ 436,46/ha); (iii) certificação florestal (R\$ 20,00/m³); (iv) custos fixos de administração e gestão (10% sobre receita bruta) e recursos humanos (R\$ 1.274.389,45/ano); e (v) outorga upfront de R\$ 2.000.000,00 e outorga variável de 15% sobre a receita operacional bruta de madeira e resina.

Os indicadores econômicos calculados foram: (a) Valor Presente Líquido (VPL), pela diferença entre receitas e custos atualizados à TMA de 10,5% ao ano; (b) Taxa Interna de Retorno Modificada (MTIR), com taxa de reinvestimento e custo de oportunidade de 10% ao ano; e (c) retorno público total, compreendendo outorgas, encargos de infraestrutura e impostos (regime de lucro presumido, alíquota de 9%). A análise de sensibilidade avaliou o impacto de variações no custo de colheita da resina (R\$ 2,00, R\$ 3,00 e R\$ 4,00/kg) e no preço de venda (R\$ 4,45, R\$ 5,03 e R\$ 6,57/kg) sobre a MTIR de cada cenário.

Ressalta-se que o modelo não incorporou receitas da silvicultura de espécies nativas, adotando abordagem conservadora nas projeções de longo prazo, conforme fundamentado na Seção 2.4.

3.7 Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE)

Com base no conceito econômico de custo de oportunidade, foi proposto o indicador denominado Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE), definido como um indicador comparativo da renúncia econômica marginal associada à ampliação das áreas destinadas à silvicultura de espécies nativas e à consequente redução da área destinada ao cultivo de *Pinus* para resinagem. O indicador foi concebido como ferramenta de apoio à decisão pública e à análise de trade-offs territoriais entre produção florestal e restauração ecológica, sem pretensão de representar valoração monetária direta dos serviços ecossistêmicos.

O CMCE constitui uma adaptação operacional simplificada do conceito de custo de oportunidade aplicado ao contexto de concessões florestais com objetivos simultâneos de produção e restauração ecológica. O indicador é calculado conforme a expressão:

$$\text{CMCE} = (\text{VPL}_{\text{max}} - \text{VPL}_i) / (\text{Anati} - \text{Anatmin})$$

Em que:

CMCE = Custo Marginal de Conversão Ecológica (R\$/ha);

VPL_{max} = maior VPL entre os cenários avaliados (EP-70m);

VPL_i = VPL do cenário i;

Anati = área destinada à silvicultura de nativas no cenário i (ha);

Anatmin = menor área destinada à silvicultura de nativas entre os cenários (EP-70m = 465 ha).

A adoção do cenário EP-70m como referência decorre de sua condição simultânea de maior VPL e menor área destinada à silvicultura de espécies nativas entre os cenários avaliados, configurando a fronteira de máxima eficiência econômica relativa do conjunto analisado. Em termos operacionais, o indicador expressa a variação do VPL por hectare adicional destinado à conversão ecológica. Assim, incrementos na área destinada à silvicultura nativa implicam

redução proporcional da área produtiva de Pinus para resinagem e, consequentemente, perda incremental de VPL, relação quantificada pelo CMCE de forma comparável entre cenários.

Ressalta-se que o CMCE constitui um indicador comparativo de custo de oportunidade espacial, e não um instrumento de valoração econômica ambiental. Os valores obtidos devem ser interpretados como estimativas conservadoras da renúncia econômica marginal, uma vez que o modelo não incorpora potenciais receitas futuras associadas à silvicultura de espécies nativas nem aos serviços ecossistêmicos das áreas convertidas.

4. RESULTADOS

4.1 Zoneamento e Classificação Espacial

A integração dos arquivos shapefile do ICMBio com os quadros de planejamento do PMUC resultou na classificação de 4.186 ha distribuídos nas zonas de manejo da FNCB. Ressalta-se que pequenas diferenças entre as áreas oficiais do PMUC e as áreas utilizadas na modelagem espacial decorrem de procedimentos de geoprocessamento, reprojeção e arredondamentos inerentes ao ambiente SIG.

A ZMFS I compreende 2.138 ha, dos quais 1.215,9 ha correspondem a talhões prioritários para corte raso e 1.229,83 ha apresentam potencial para resinagem. A ZMFS II B abrange 1.089 ha destinados à conservação e pesquisa com Araucária e Imbuia. As APPs totalizam 406,77 ha, distribuídos entre vegetação nativa (112,35 ha), Pinus sp. (205,55 ha), Pinus experimental (4,95 ha), Araucária (80,97 ha) e Imbuia (2,95 ha).

A extração automática da rede de drenagem por meio do radar ALOS PALSAR gerou resultados compatíveis com a hidrografia oficial do estado de São Paulo, indicando potencial de aplicação do método em estudos de planejamento florestal e delimitação de APPs.

4.2 Produtividade do Pinus e da Resinagem

As projeções do SISPINUS para o ciclo de 16 anos com sítio 22 indicam volume total de 464,7 m³/ha no corte final, com distribuição de sortimento dominada pelas classes de lâmina I e serraria. O desbaste do ano 12 produz 35,3 m³/ha, com predominância de celulose e serraria. O cruzamento entre o Incremento Corrente Anual (ICA) e o Incremento Médio Anual (IMA) confirma o ano 16 como o ponto ótimo de colheita.

A produtividade de resinagem para o reflorestamento foi estimada em 4.100 kg/ha/ano do ano 8 ao 12, reduzindo para 3.808 kg/ha/ano do ano 13 ao 16 em função das operações silviculturais. Para a floresta remanescente, a produtividade de 1.600 kg/ha/ano reflete a idade avançada dos plantios.

4.3 Resultados Econômicos por Cenário

As diferenças espaciais e operacionais entre os cenários simulados resultaram em distintos desempenhos econômicos ao longo do horizonte de 40 anos da concessão florestal, conforme sintetizado na Tabela 2. Observa-se um gradiente econômico crescente entre os cenários PMUC 1, PMUC 2, EP-120m e EP-70m, refletindo principalmente o aumento progressivo da área destinada à resinagem de Pinus.

Tabela 2. Indicadores econômicos por cenário de manejo da FNCB (horizonte de 40 anos).

Indicador	PMUC 1	PMUC 2	EP-120m	EP-70m
Receita Bruta Total (R\$)	770.994.477	839.180.012	1.096.185.131	1.356.757.075
Receita Resina — Replanteio (R\$)	205.021.474	413.180.275	632.143.061	841.244.164
Retorno Público Total (R\$)	211.741.530	276.842.466	337.290.891	398.460.482
VPL (R\$)	5.305.054	15.063.558	31.089.736	42.101.296
MTIR (%)	10,5%	11,4%	12,7%	13,4%
Empregos Diretos (estimativa)	~124	~250	~292	~396

O cenário EP-70m apresentou o maior desempenho econômico em todas as métricas avaliadas, alcançando Receita Bruta Total de R\$ 1,36 bilhão, Retorno Público acumulado de R\$ 398,5 milhões, Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 42,1 milhões e MTIR de 13,4%. Em contraste, o cenário PMUC 1 apresentou os menores resultados econômicos, com VPL de R\$ 5,3 milhões e retorno público total de R\$ 211,7 milhões ao longo do horizonte de 40 anos.

A Figura 7 demonstra o comportamento crescente do VPL e do retorno público entre os cenários simulados, evidenciando a relação direta entre a manutenção das áreas produtivas de resinagem e a ampliação da capacidade de geração de receitas da concessão florestal. Embora o retorno público apresente magnitude substancialmente superior ao VPL em todos os cenários, observa-se tendência proporcional semelhante entre os indicadores, indicando convergência entre o aumento da rentabilidade da concessão e a ampliação da arrecadação pública associada ao modelo de manejo adotado.

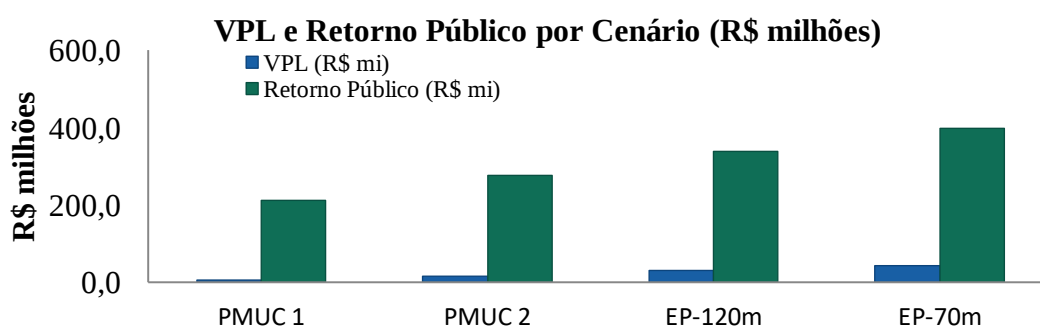


Figura 7. Comparativo dos indicadores econômicos por cenário de manejo da FNCB.

Os resultados evidenciam que a resinagem associada ao replanteio de Pinus constitui o principal mecanismo de sustentação financeira dos cenários restaurativos simulados. A participação da receita de resina na composição da receita bruta total variou de 26,6% no cenário PMUC 1 a 62,0% no cenário EP-70m, demonstrando forte dependência econômica da concessão em relação à manutenção estratégica das áreas produtivas de resinagem.

Esse comportamento também evidencia o papel da resinagem como mecanismo de redução de risco econômico da concessão florestal, especialmente diante da baixa maturidade produtiva, maior incerteza mercadológica e menor previsibilidade financeira ainda associadas

às cadeias econômicas da silvicultura de espécies nativas. Nesse contexto, a manutenção estratégica de áreas produtivas de Pinus tende a funcionar como elemento estabilizador do fluxo de caixa da concessão e mecanismo financiador da transição ecológica ao longo do horizonte de restauração.

Esses resultados convergem com Lima et al. (2021), que observaram aumento de lucratividade de até 62,7% em áreas submetidas à resinagem em comparação a áreas não resinadas. No contexto da FNCB, a ampliação das áreas destinadas à conversão ecológica implicou redução progressiva dos indicadores econômicos, evidenciando a existência de trade-offs espaciais entre restauração florestal e capacidade de geração de fluxo de caixa da concessão.

A diferença acumulada de retorno público entre o cenário mais restritivo (PMUC 1) e o cenário de maior desempenho econômico (EP-70m) totalizou aproximadamente R\$ 186,7 milhões ao longo dos 40 anos simulados, correspondendo a uma renúncia financeira média de aproximadamente R\$ 4,7 milhões anuais para a administração pública. Esse resultado evidencia que estratégias de conversão ecológica mais intensivas, embora potencialmente mais favoráveis sob a perspectiva ecológica, tendem a reduzir significativamente a capacidade de geração de receitas da concessão quando desacompanhadas de mecanismos compensatórios ou fontes econômicas alternativas.

Apesar disso, os cenários baseados na Ecologia da Paisagem (EP-120m e EP-70m) demonstraram que a incorporação de critérios espaciais de conectividade ecológica não implica necessariamente inviabilidade econômica. Pelo contrário, os resultados indicam que modelos híbridos capazes de combinar restauração florestal e manutenção estratégica da resinagem podem ampliar simultaneamente os benefícios econômicos, territoriais e institucionais das concessões florestais restaurativas.

4.4 Análise de Sensibilidade

A Tabela 3 apresenta a MTIR para diferentes combinações de custo de colheita e preço de venda da resina nos cenários extremos, PMUC 1 e EP-70m. O cenário PMUC 1 é economicamente viável apenas quando o custo de colheita não ultrapassa R\$ 2,00/kg e o preço de venda é igual ou superior a R\$ 5,03/kg. Considerando que produtores locais informaram custo de colheita de R\$ 3,00/kg, o modelo mais restritivo do PMUC torna-se inviável nesse contexto, com MTIR de 8,36%, abaixo da TMA de 10,5%.

Tabela 3. Análise de sensibilidade da MTIR por cenário (custo de colheita × preço de resina).

Cenário	Custo Colheita (R\$/kg)	Preço R\$4,45/kg	Preço R\$5,03/kg	Preço R\$6,57/kg
PMUC 1	R\$ 2,00	10,00%	10,52%	11,50%
PMUC 1	R\$ 3,00	8,36%	9,02%	10,47%
PMUC 1	R\$ 4,00	6,41%	7,19%	9,00%
EP-70m	R\$ 2,00	12,72%	13,38%	14,55%
EP-70m	R\$ 3,00	10,02%	11,14%	13,24%
EP-70m	R\$ 4,00	7,10%	8,16%	11,08%

O cenário EP-70m mantém MTIR de 11,14% mesmo com custo de colheita de R\$ 3,00/kg e preço de R\$ 5,03/kg, acima da TMA, evidenciando a maior margem de segurança proporcionada pela ampla área de resinagem. Pelanda (2014) identificou a atratividade econômica como principal entrave à expansão das concessões florestais; os resultados aqui apresentados indicam que a ampliação da área de resinagem é o mecanismo mais eficaz para elevar essa atratividade.

4.5 Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE)

A Tabela 4 apresenta os resultados do Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) para os cenários analisados, considerando o cenário EP-70m como referência de maior VPL (R\$ 42.101.296) e menor área destinada à silvicultura de espécies nativas (465 ha).

Tabela 4. Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) por cenário de manejo.

Cenário	VPLi (R\$)	Renúncia de VPL (R\$)	Área destinada à silvicultura de nativas (ha)	CMCE (R\$/ha)
EP-70m (ref.)	42.101.296	—	465	Referência
EP-120m	31.089.736	11.011.560	986	21.135
PMUC 2	15.063.558	27.037.738	1.192	37.192
PMUC 1	5.305.054	36.796.242	1.823	27.096

Nota: $CMCE = (VPL_{max} - VPL_i) / (Anati - 465)$.

O menor CMCE entre os cenários não referência foi observado no EP-120m (R\$ 21.135/ha), indicando que a ampliação moderada dos corredores ecológicos ripários representa a alternativa de menor impacto econômico relativo por hectare adicional destinado à restauração. Esse resultado está associado à priorização espacial de áreas de menor aptidão econômica relativa para a resinagem, frequentemente localizadas próximas às drenagens, em setores com maior declividade e em áreas sujeitas a maiores restrições operacionais de manejo.

O cenário PMUC 2 apresentou o maior CMCE entre os cenários avaliados (R\$ 37.192/ha), indicando maior custo relativo de conversão por hectare restaurado. Esse comportamento sugere que parte relevante da conversão ecológica ocorre sobre talhões com elevada contribuição ao VPL da concessão. O cenário PMUC 1, por sua vez, apresentou CMCE intermediário (R\$ 27.096/ha). Embora apresente a maior área destinada à silvicultura de espécies nativas, a renúncia de VPL é diluída em uma área convertida mais ampla, resultando em custo médio incremental inferior ao observado no PMUC 2.

Esse comportamento indica que o custo de conversão não depende apenas da área total destinada à restauração, mas também da localização espacial dos talhões convertidos, de sua contribuição relativa ao fluxo de caixa e da distribuição temporal dos impactos econômicos ao longo do contrato.

A Figura 8 evidencia o trade-off entre expansão das áreas destinadas à silvicultura de espécies nativas e redução do VPL dos cenários, indicando comportamento não linear da relação entre conservação e retorno econômico.

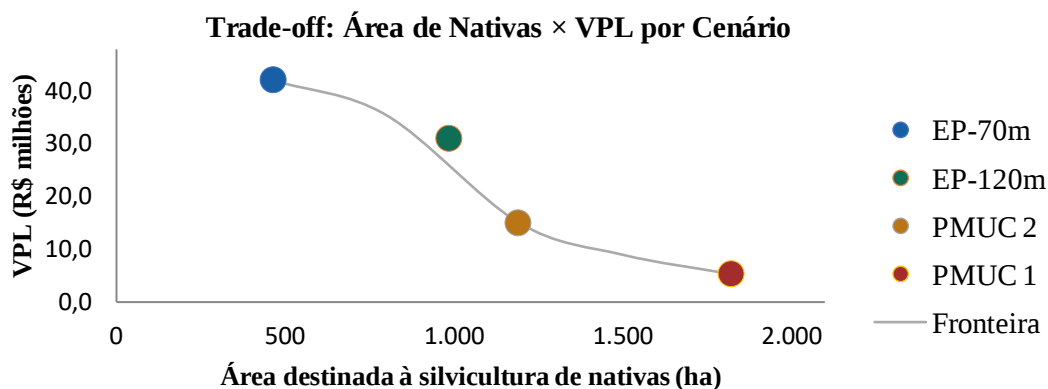


Figura 8. Fronteira de trade-off entre área destinada à silvicultura de espécies nativas e VPL dos cenários.

A Figura 9 apresenta a relação comparativa entre o CMCE e a área destinada à silvicultura de espécies nativas nos diferentes cenários analisados. Observa-se que o aumento da área convertida não produz comportamento linear do custo marginal ecológico, evidenciando a influência da configuração espacial das áreas restauradas e da distribuição da produtividade econômica da paisagem sobre os custos relativos de conversão.

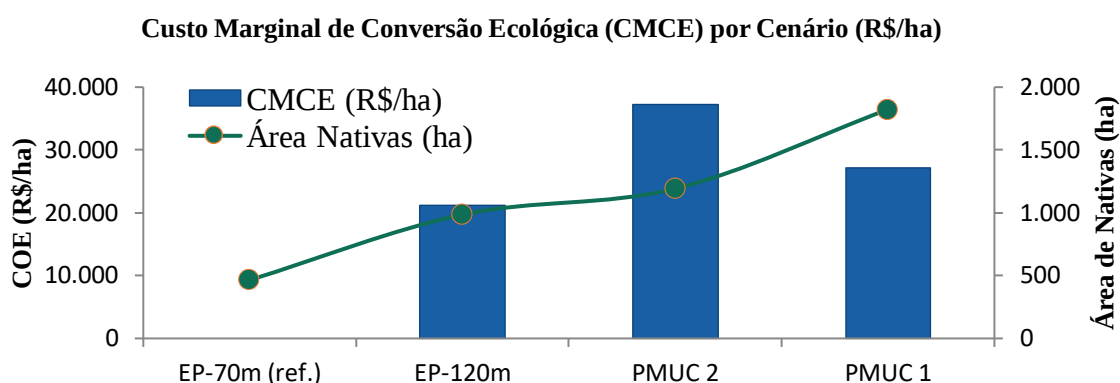


Figura 9. Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) por cenário de manejo.

Em conjunto, os resultados indicam que a configuração espacial da restauração exerce influência direta sobre os custos relativos de conversão ecológica, reforçando a importância de estratégias territorialmente orientadas para compatibilizar conservação e viabilidade econômica em concessões florestais.

4.6 Dimensão Ambiental e Social

Do ponto de vista ambiental, o cenário EP-120m proporciona a maior extensão de corredor ecológico ripário, com aproximadamente 10 km², enquanto o EP-70m gera cerca de 6 km². Ambos dialogam com evidências da literatura que apontam maior suporte à biodiversidade em corredores ripários mais amplos, embora tais parâmetros devam ser interpretados com cautela diante das diferenças ecológicas entre os contextos estudados.

Os cenários PMUC, embora destinem maior proporção total à vegetação nativa, concentram a conversão em grandes blocos de talhões prioritários nos primeiros anos de implementação. Essa configuração pode ampliar os custos iniciais, a complexidade operacional

e a necessidade de medidas de controle erosivo, especialmente quando comparada aos modelos de paisagem, nos quais a conversão é espacialmente distribuída ao longo das faixas ripárias.

Cabe reconhecer que a manutenção parcial de plantios de *Pinus* em unidades de conservação envolve riscos ecológicos associados ao potencial invasor do gênero, especialmente em ambientes campestres, bordas florestais e áreas abertas sensíveis. A magnitude dessas interferências, contudo, depende da intensidade de manejo, da configuração da paisagem e da capacidade de monitoramento e controle das regenerações espontâneas. Nesse sentido, a permanência temporária de áreas produtivas de *Pinus* deve ser acompanhada por protocolos de monitoramento, remoção precoce de regenerantes e controle sistemático de focos de dispersão, de modo a reduzir riscos ecológicos durante o processo de transição.

Estudos recentes demonstram que técnicas de sensoriamento remoto com RPAS (drones) e análise orientada a objetos (GEOBIA) permitem identificar com elevada precisão focos de invasão de *Pinus*, ampliando a eficiência operacional do monitoramento em áreas extensas e de difícil acesso (GONÇALVES; RIBEIRO; IMAI, 2022). Além disso, estratégias preventivas de manejo e remoção precoce de indivíduos regenerantes constituem mecanismos relevantes para reduzir a expansão de espécies exóticas invasoras em paisagens manejadas.

Em termos de geração de emprego, o EP-70m estima 396 empregos diretos na resinagem, contra 124 do PMUC 1. Considerando que a atividade de resinagem no Brasil emprega mais de 15.000 trabalhadores em aproximadamente 45 milhões de árvores (DE OLIVEIRA et al., 2017), a expansão da área resinada na FNCB representa contribuição relevante para o desenvolvimento socioeconômico dos municípios de Capão Bonito e Buri, com IDHMs de 0,721 e 0,667, respectivamente.

Em conjunto, os resultados sugerem que a configuração espacial dos cenários influencia simultaneamente a viabilidade econômica, a distribuição dos custos de restauração e o potencial de conectividade ecológica da paisagem, aspecto discutido nas seções seguintes.

5. DISCUSSÃO

5.1 A Resinagem como Mecanismo Financeiro de Transição Ecológica

Uma das principais contribuições deste estudo consiste em demonstrar que a resinagem de *Pinus elliottii* pode atuar como mecanismo financeiro de transição ecológica em concessões florestais com objetivos simultâneos de produção e restauração. Esse resultado é consistente com o papel historicamente desempenhado pela resinagem no setor florestal brasileiro, caracterizando-se como atividade economicamente consolidada, de elevada previsibilidade operacional e capacidade de geração contínua de receitas ao longo do ciclo produtivo.

Os resultados sugerem que processos de restauração em larga escala dificilmente se sustentam economicamente em suas fases iniciais sem a presença de atividades geradoras de receita capazes de financiar os custos de implantação e manutenção ao longo do horizonte contratual. Nesse contexto, a manutenção parcial da resinagem pode contribuir para o financiamento dos custos iniciais de restauração, para a absorção do período de imaturidade produtiva das espécies nativas e para a redução dos riscos associados à consolidação de novas cadeias produtivas florestais.

No contexto da FNCB, a resinagem apresentou capacidade de geração antecipada de receita, iniciando retornos econômicos antes da maturação dos sistemas de silvicultura de espécies nativas considerados no estudo. Além disso, a atividade apresenta elevada demanda de mão de obra e pode ser integrada a estratégias graduais de conversão ecológica da paisagem, permitindo distribuir espacial e temporalmente os custos associados à restauração ao longo do período de concessão.

O diagrama conceitual apresentado na Figura 10 sintetiza esse mecanismo. A estabilidade financeira gerada pela resinagem cria as condições para a expansão gradual da silvicultura de espécies nativas, que por sua vez viabiliza a restauração ecológica em escala de paisagem, ao longo do horizonte de 40 anos.



Figura 10. Diagrama conceitual da resinagem como mecanismo de transição ecológica

É necessário, contudo, reconhecer que a dependência excessiva de um único produto florestal, a resina, expõe a concessão à volatilidade de preços e às possíveis transformações tecnológicas da cadeia produtiva de produtos resinosos, incluindo o desenvolvimento de substitutos sintéticos ou a oscilação da demanda global.

Essa vulnerabilidade estrutural reforça, precisamente, a importância da diversificação gradual por meio da silvicultura de espécies nativas e dos serviços ecossistêmicos: não apenas como objetivo ambiental, mas como estratégia de resiliência econômica de longo prazo. O modelo híbrido proposto pelos cenários EP configura, portanto, uma carteira de ativos florestais diversificada, com resina como ativo de curto e médio prazo e silvicultura de nativas como ativo de consolidação ecológica e produtiva de longo prazo.

5.2 Cenários de Paisagem: Eficiência Espacial e Robustez Econômica

A maior robustez econômica dos cenários EP não decorre apenas da maior área de resinagem, mas da eficiência espacial na alocação das atividades produtivas e restaurativas. Ao concentrar a conversão ecológica nas faixas ripárias de maior valor ambiental, onde o Pinus produtivo já seria limitado por legislação ou custos operacionais elevados, os cenários EP preservam as áreas de maior produtividade para a resinagem, maximizando o retorno por hectare manejado. Esse mecanismo configura o que a literatura de economia ambiental denomina alocação eficiente em presença de restrições espaciais, aproximando-se da fronteira de eficiência produção-conservação descrita por Strassburg et al. (2020) em escala global.

A análise de sensibilidade reforça essa interpretação: mesmo sob condições de mercado adversas, custo de colheita de R\$ 3,00/kg e preço de R\$ 5,03/kg, o EP-70m mantém MTIR acima da TMA. O PMUC 1, em contraste, torna-se inviável nessas condições. Essa diferença tem implicação contratual direta: um modelo cuja viabilidade depende de condições específicas

de mercado gera risco de descontinuidade; um modelo com maior margem de segurança reduz a probabilidade de rescisão antecipada, aumentando a confiabilidade das metas de restauração de longo prazo.

Do ponto de vista da Ecologia da Paisagem, os cenários EP também se destacam por concentrar a conversão ecológica em corredores ripários contínuos, favorecendo estratégias graduais de restauração e reduzindo a necessidade de grandes conversões simultâneas da paisagem produtiva. Essa configuração espacial facilita o monitoramento adaptativo das áreas restauradas, amplia o potencial de conectividade entre fragmentos remanescentes de vegetação nativa e distribui os custos de implantação e manutenção ao longo do horizonte contratual, em contraste com modelos de conversão mais intensiva nos primeiros anos da concessão.

Além disso, estudos conduzidos na Mata Atlântica sugerem que plantações manejadas de Pinus, quando inseridas em mosaicos com remanescentes nativos e corredores ecológicos, podem atuar como matriz menos hostil à biodiversidade florestal em paisagens fragmentadas (FONSECA et al., 2009). Nesse contexto, os cenários EP não representam apenas uma redução espacialmente planejada da área produtiva, mas uma configuração de paisagem potencialmente mais compatível com objetivos graduais de restauração e conectividade ecológica.

Essa abordagem é coerente com discussões recentes sobre concessões restaurativas e manejo florestal multifuncional, nas quais a restauração é integrada a estratégias de geração gradual de receita e à manutenção de usos produtivos compatíveis com objetivos ecológicos de longo prazo. Harrison et al. (2020) destacam que modelos de restauração em larga escala tendem a apresentar maior viabilidade quando estruturados sob lógica de manejo espacial multifuncional, combinando proteção, regeneração gradual e atividades econômicas capazes de sustentar financeiramente os custos operacionais da restauração ao longo do tempo.

5.3 O CMCE como Instrumento de Política Pública

O Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE) introduzido neste estudo representa uma proposta metodológica para apoiar a estruturação de contratos de concessão florestal com objetivos simultâneos de produção e restauração ecológica. Ao expressar a renúncia econômica marginal associada à ampliação das áreas destinadas à silvicultura de espécies nativas e à formação de corredores ecológicos, o indicador fornece uma métrica comparativa de apoio à tomada de decisão e à avaliação de trade-offs espaciais entre produção florestal e conversão ecológica no âmbito da concessão.

Essa abordagem dialoga com modelos recentes de priorização espacial da restauração. Strassburg et al. (2020) demonstraram que a alocação estratégica das áreas restauradas pode ampliar substancialmente os benefícios ambientais e aumentar a eficiência relativa das intervenções quando comparada a estratégias uniformes de restauração. Os autores destacam que a priorização territorial permite maximizar ganhos simultâneos de biodiversidade, carbono e redução de custos relativos de implementação. No presente estudo, os cenários EP seguem lógica semelhante ao concentrar a conversão ecológica em áreas ripárias de menor aptidão relativa para a resinagem e maior relevância ambiental.

O menor CMCE identificado entre os cenários avaliados (R\$ 21.135/ha no cenário EP-120m) indica que a ampliação dos corredores ecológicos ripários pode ocorrer com menor renúncia econômica marginal relativa quando direcionada espacialmente para áreas de menor

aptidão produtiva da resinagem. Esse resultado possui implicações relevantes para o desenho contratual da concessão, sugerindo que mecanismos flexíveis de incentivo vinculados à ampliação de corredores ecológicos podem aumentar a atratividade econômica de estratégias restaurativas alinhadas aos princípios da Ecologia da Paisagem, reduzindo simultaneamente riscos de inviabilidade financeira associados a metas rígidas de conversão espacial.

Cabe ressaltar, contudo, que o CMCE constitui um indicador simplificado de apoio à decisão. O modelo não incorpora diferenças qualitativas entre os hectares convertidos, como variações de biodiversidade, funcionalidade ecológica, qualidade da conectividade da paisagem ou provisão de serviços ecossistêmicos, tampouco contempla externalidades ambientais que extrapolam os limites da concessão. Além disso, potenciais receitas futuras associadas à silvicultura de espécies nativas e aos serviços ecossistêmicos não foram incorporadas ao fluxo de caixa do modelo, de modo que os valores estimados devem ser interpretados como aproximações conservadoras da renúncia econômica marginal associada à conversão ecológica.

5.4 Potencial de Replicação

A metodologia desenvolvida neste estudo apresenta potencial de replicação para outras concessões florestais federais, especialmente nas demais Flonas Sul, mediante adaptações pontuais das premissas econômicas e dos parâmetros silviculturais. A disponibilidade pública dos dados espaciais necessários, associada ao uso de ferramentas consolidadas de geoprocessamento e modelagem florestal, torna a abordagem operacionalmente acessível para equipes técnicas do SFB e do ICMBio.

O indicador de Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE), em particular, pode ser aplicado em diferentes contextos de alocação espacial do uso do solo envolvendo trade-offs entre produção e conservação, incluindo concessões de restauração, contratos de pagamento por serviços ecossistêmicos e planejamento territorial de florestas públicas. Nesse sentido, o modelo proposto contribui para aproximar instrumentos econômicos e critérios espaciais de Ecologia da Paisagem na formulação de políticas públicas voltadas à restauração florestal.

Além da replicabilidade metodológica, os resultados sugerem que a resinagem de *Pinus elliottii* pode representar mecanismo transitório de sustentação financeira para estratégias graduais de restauração em paisagens florestais produtivas. Embora dependente de condições locais de mercado, manejo e monitoramento ambiental, a lógica de utilização de ativos florestais economicamente consolidados para financiar processos de conversão ecológica gradual pode possuir aplicabilidade potencial em outros contextos de concessão florestal com objetivos simultâneos de produção e restauração.

No contexto específico da Flona de Capão Bonito, os resultados sugerem que estratégias graduais de conversão ecológica associadas à manutenção parcial da resinagem podem representar alternativa operacionalmente viável para compatibilizar restauração, geração de receita e redução de riscos de descontinuidade contratual ao longo do horizonte da concessão.

5.5 Limitações e Perspectivas Futuras

As conclusões deste estudo devem ser interpretadas considerando um conjunto de limitações metodológicas e operacionais. As premissas econômicas adotadas foram referenciadas nos editais da Flona de Irati (SFB, 2019/2022), cujas condições logísticas,

operacionais e de mercado podem diferir substancialmente das observadas na região de Capão Bonito e Buri.

O preço médio de R\$ 5,03/kg utilizado para a resina foi estimado com base no período 2020–2022 (ARESB, 2022). Embora o estudo tenha incorporado análise de sensibilidade para diferentes cenários de preço e custo, o mercado de resina apresenta elevada volatilidade e sensibilidade às oscilações de oferta e demanda, às variações cambiais e aos custos logísticos, de modo que alterações futuras nas condições de mercado ainda podem influenciar os indicadores de viabilidade econômica projetados.

O modelo também não contempla análise probabilística de risco sobre variáveis de preço e custo, nem incorpora integralmente premissas de evolução tecnológica da resinagem, como o uso de pastas estimulantes de nova geração capazes de elevar a produtividade por árvore (FREITAS et al., 2023). Essas limitações podem influenciar os resultados econômicos dos cenários analisados.

Em relação aos componentes ecológicos, o estudo não incorpora a valoração do estoque de carbono, dos serviços de regulação hídrica nem dos benefícios associados à biodiversidade. A exclusão desses ativos tende a subestimar o valor total dos cenários com maior área destinada à restauração e à silvicultura de espécies nativas, tornando os CMCEs estimados conservadores. Além disso, a ausência de monitoramento ecológico de campo limita a validação empírica das premissas de conectividade ecológica e biodiversidade associadas aos corredores ripários.

A exclusão das receitas potenciais associadas à silvicultura de espécies nativas também constitui uma limitação conservadora do modelo econômico. Embora existam iniciativas promissoras voltadas à produção madeireira, sistemas agroflorestais, créditos de carbono e produtos florestais não madeireiros em restauração produtiva, essas cadeias ainda apresentam elevada variabilidade técnica e mercadológica, dificultando a adoção de parâmetros robustos para projeções financeiras de longo prazo.

Os cenários propostos também exigem monitoramento contínuo da regeneração natural invasora de *Pinus*, especialmente em áreas campestres e ambientes mais sensíveis à dispersão da espécie. Nesse contexto, avanços recentes em biotecnologia florestal vêm indicando potencial para o desenvolvimento de mecanismos de esterilidade reprodutiva em espécies florestais comerciais como estratégia de mitigação da dispersão de sementes e dos riscos associados à invasão biológica (FRITSCHÉ et al., 2018). Embora ainda dependentes de validação operacional e marcos regulatórios específicos, essas abordagens podem representar alternativas futuras relevantes para concessões florestais em áreas ambientalmente sensíveis.

Em relação aos serviços ecossistêmicos, estudos recentes indicam que plantações de *Pinus elliottii* submetidas à resinagem podem manter estoques relevantes de carbono em biomassa florestal, associando a atividade resinosa ao potencial de geração de ativos ambientais complementares à produção florestal (RODRIGUES-HONDA et al., 2023). Embora esses elementos não tenham sido incorporados ao fluxo de caixa do presente estudo, sua integração futura aos modelos de concessão representa agenda promissora de pesquisa, especialmente no contexto de mercados de carbono e mecanismos de pagamento por serviços ecossistêmicos.

6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados demonstram que estratégias de restauração orientadas pela Ecologia da Paisagem podem compatibilizar viabilidade econômica, conectividade ecológica e restauração gradual em concessões florestais públicas. No contexto da Floresta Nacional de Capão Bonito, os cenários EP-70m e EP-120m apresentaram melhor desempenho relativo ao combinar maior eficiência espacial da restauração, continuidade de corredores ripários e capacidade de sustentação econômica da concessão.

Para avaliar esse potencial, o estudo desenvolveu uma metodologia integrada de modelagem espacial e econômica aplicada à precificação de ativos florestais em concessões públicas, contribuindo para a incorporação de objetivos ecológicos em editais de concessão florestal. Os resultados indicam que a priorização espacial de áreas de menor aptidão econômica relativa para a resinagem e maior relevância ambiental permite ampliar a conectividade ecológica da paisagem com menor impacto sobre os indicadores econômicos da concessão.

A hipótese central do trabalho foi corroborada ao demonstrar que, sob as premissas adotadas, a resinagem de *Pinus elliottii* apresenta potencial para atuar como mecanismo financeiro de suporte à transição ecológica em concessões florestais com objetivos simultâneos de produção e restauração. No cenário EP-70m, a atividade apresentou elevada capacidade de geração de fluxo de caixa, com receita bruta acumulada superior a R\$ 1,35 bilhão e MTIR de 13,4%, indicando potencial para apoiar gradualmente a restauração e a consolidação da silvicultura de espécies nativas.

A análise de sensibilidade demonstrou, contudo, que essa viabilidade depende de variáveis críticas, como preço da resina, custo de colheita e extensão da área resinável. Assim, embora a dependência de um único produto florestal represente fator de vulnerabilidade de longo prazo, a manutenção parcial da resinagem pode favorecer a diversificação gradual da concessão e a futura incorporação de ativos associados à silvicultura de espécies nativas e aos serviços ecossistêmicos.

O indicador de Custo Marginal de Conversão Ecológica (CMCE), proposto neste estudo, representa contribuição metodológica à precificação de ativos em concessões florestais com objetivos múltiplos. Por se tratar de uma análise comparativa entre cenários discretos, o CMCE deve ser interpretado como custo médio incremental de conversão ecológica em relação ao cenário de referência. O menor valor observado no cenário EP-120m (R\$ 21.135/ha) sugere que a ampliação moderada dos corredores ecológicos pode maximizar ganhos ambientais com menor custo relativo por hectare adicional destinado à silvicultura de espécies nativas, fornecendo subsídios à formulação de incentivos contratuais voltados à conservação.

Para o Serviço Florestal Brasileiro, os resultados sugerem que editais de concessão podem se beneficiar da integração entre incentivos econômicos à resinagem, maior flexibilidade na definição de corredores ecológicos e metas de restauração associadas a indicadores de custo de oportunidade espacial, como o CMCE. Essa abordagem pode ampliar a atratividade econômica da concessão, sem dissociá-la dos objetivos de restauração, conectividade ecológica e transição produtiva.

A metodologia proposta apresenta potencial de replicação para outras Flonas Sul e contextos semelhantes de silvicultura em florestas públicas brasileiras. Ressalta-se, contudo,

que os cenários com maior área destinada à silvicultura de espécies nativas foram avaliados sob premissas econômicas conservadoras, uma vez que potenciais receitas associadas às cadeias produtivas de espécies nativas e aos serviços ecossistêmicos não foram incorporadas ao fluxo de caixa do modelo. Essa limitação indica a necessidade de estudos futuros que integrem produtividade, mercado, risco e valoração de serviços ambientais em modelos de concessão de transição ecológica.

Em um contexto de crescente demanda por restauração em larga escala, concessões florestais estruturadas sob princípios de viabilidade econômica, planejamento territorial e manejo adaptativo podem constituir instrumentos estratégicos para conciliar produção, conservação e desenvolvimento sustentável em florestas públicas brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos. Brasília: ANA, 2011. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/acesso-a-informacao/manuais-e-publicacoes>. Acesso em: 20 jul. 2022.

ALASKA SATELLITE FACILITY DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER (ASF DAAC). ALOS PALSAR Radiometric Terrain Corrected high resolution data. Fairbanks: University of Alaska, [s.d.]. Disponível em: <https://asf.alaska.edu/>. Acesso em: 20 jul. 2022.

ANDRADE, J. R. L.; OLIVEIRA, A. S. T. Valoração econômica do meio ambiente: aplicação do método do custo de oportunidade em áreas degradadas no Baixo São Francisco Sergipano. *Revista de Desenvolvimento Econômico*, Salvador, v. 10, n. 17, p. 58-66, 2008. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/rde/article/view/1026>. Acesso em: 20 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO DOS RESINADORES DO BRASIL (ARESB). Histórico de preço médio da resina de *Pinus elliottii*. Disponível em: <https://www.aresb.com.br/portal/preco-medio-resina>. Acesso em: 20 jul. 2022.

BRASIL. Lei n. 11.284, de 2 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui o Serviço Florestal Brasileiro. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 3 mar. 2006. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/11284.htm. Acesso em: 20 jul. 2022.

BRASIL. Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm. Acesso em: 20 jul. 2022.

BRASIL. Lei n. 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 20 jul. 2022.

BURBRINK, F. T.; PHILIPS, C. A.; HESKE, E. J. A riparian zone in southern Illinois as a potential dispersal corridor for reptiles and amphibians: testing the hypothesis. *Biological Conservation*, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 107-115, 1998. DOI: 10.1016/S0006-3207(98)00054-8.

CORDEIRO, S. A.; SILVA, M. L. Avaliação econômica de floresta de pinus para produção de madeira e resina. *Revista Agrogeoambiental*, Pouso Alegre, v. 1, n. 2, p. 29-38, 2009.

DE OLIVEIRA, Y. M. M. et al. Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

DOSSA, D. et al. Produção e rentabilidade de pínus em empresas florestais. Colombo: Embrapa Florestas, 2002. (Comunicado Técnico, 82). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/307960>. Acesso em: 20 jul. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). SISPINUS: simulador de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus*. Colombo: Embrapa Florestas, [s.d.].

- FERRAZ, S. F. B.; VETTORAZZI, C. A. Identificação de áreas para recomposição florestal com base em princípios de ecologia de paisagem. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 575-583, 2003.
- FERREIRA, J. P. D. R. Análise da cadeia produtiva e estrutura de custos do setor brasileiro de produtos resinosos. 2001. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- FONSECA, C. R. et al. Towards an ecologically sustainable forestry in the Atlantic Forest. *Biological Conservation*, Amsterdam, v. 142, n. 6, p. 1209-1219, 2009.
- FREITAS, L. et al. Avaliação de diferentes composições de pasta estimulante em um sistema resinoso. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 51, e4012, 2023. (Conferir volume e paginação do artigo).
- FRITSCH, S. et al. Strategies for engineering reproductive sterility in plantation forests. *Frontiers in Plant Science*, Lausanne, v. 9, p. 1671, 2018. DOI: 10.3389/fpls.2018.01671.
- GONÇALVES, V. P.; RIBEIRO, E. A. W.; IMAI, N. N. Mapping areas invaded by *Pinus* sp. from Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) applied on RPAS (drone) color images. *Remote Sensing*, Basel, v. 14, n. 12, p. 2805, 2022. DOI: 10.3390/rs14122805.
- HANNESSON, R. Economics of fisheries: an introduction. Bergen: Universitetsforlaget, 1978.
- HARRISON, M. E. et al. Restoration concessions: a second lease on life for beleaguered forests? *Frontiers in Ecology and the Environment*, Washington, v. 18, n. 2, p. 86-94, 2020. DOI: 10.1002/fee.2160.
- INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBIO). Plano de Manejo da Floresta Nacional de Capão Bonito: diagnóstico e planejamento. Brasília, DF: ICMBio, 2017/2018. 2 v. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/biodiversidade/unidade-de-conservacao/unidades-de-biomas/mata-atlantica/lista-de-ucs/flona-de-capao-bonito>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- LIMA, B. A. et al. Impactos dendrométricos e econômicos de um povoamento de *Pinus elliottii* submetido à produção de resina. *Advances in Forestry Science*, Cuiabá, v. 8, n. 2, p. 1475-1487, 2021.
- LONGHI, A. L. B.; MENESES, P. R. O uso de técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto para o zoneamento de Florestas Nacionais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, 2005. p. 16-21.
- LOPES, A. V. et al. Long-term erosion of tree reproductive trait diversity in edge-dominated Atlantic forest fragments. *Biological Conservation*, Amsterdam, v. 142, n. 6, p. 1154-1165, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.01.007.
- MACÊDO, R. J. A. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno. *Contexto Geográfico*, Maceió, v. 3, n. 6, p. 47-55, 2018.
- MARCELINO, F. A. Análise técnica e econômica da resinagem de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* na região de Manduri, SP. 2004. Monografia (Especialização) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2004.

PEARCE, D.; TURNER, R. K. Economics of natural resources and the environment. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990.

PELANDA, F. M. A ampliação da atratividade econômica da concessão florestal. 2014. Dissertação (Mestrado em Administração Pública) – Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2014.

REZENDE, J. L. P.; OLIVEIRA, A. D. Análise econômica e social de projetos florestais. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB); BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Plano de negócios referencial: Floresta Nacional de Chapecó. Brasília, DF: BNDES, 2023.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*, Amsterdam, v. 142, n. 5, p. 1141-1153, 2009. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.02.021.

RODRIGUES-HONDA, K. C. S. et al. Carbon sequestration in resin-tapped slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) subtropical plantations. *Biology*, Basel, v. 12, n. 2, p. 324, 2023. DOI: 10.3390/biology12020324.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). Edital de consulta pública para a Floresta Nacional de Irati. Brasília, DF: SFB, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/servico-florestal-brasileiro/concessoes-florestais>. Acesso em: 20 jul. 2022.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). Modelagem econômica: Floresta Nacional de Irati. Brasília, DF: SFB/BNDES, 2019.

SHIMIZU, J. Y. Pinus na silvicultura brasileira. Colombo: Embrapa Florestas, 2008.

SILVA, K. G. Concessão florestal: utilizando recursos de arrecadação para fortalecimento da política florestal e do desenvolvimento sustentável. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Gestão Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

STRASSBURG, B. B. N. et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, London, v. 586, p. 724-729, 2020. DOI: 10.1038/s41586-020-2784-9.

VIANA, V. M.; OLIVEIRA, S. M. A. Manejo de paisagem para a conservação de espécies raras e em extinção: princípios gerais e metodologia para a Mata Atlântica. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 48., 1997, Crato. Anais... Crato: Sociedade Botânica do Brasil, 1997.