



CAROLINA SOUZA JAROSCHINSKI E SILVA

**ALOCAÇÃO DE FOMENTOS FLORESTAIS SOB
CONDIÇÕES DE INCERTEZA**

**LAVRAS – MG
2019**

CAROLINA SOUZA JAROCHINSKI E SILVA

**ALOCAÇÃO DE FOMENTOS FLORESTAIS SOB CONDIÇÕES DE
INCERTEZA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide
Orientador

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Jarochinski e Silva, Carolina Souza.

Alocação de fomentos florestais sob condições de incerteza /
Carolina Souza Jarochinski e Silva. – 2019.

89 p. : il.

Orientador: Lucas Rezende Gomide.

Coorientador: Moacir de Souza Dias Junior.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. Fomentos florestais. 2. Planejamento florestal. 3. Modelo
estocástico. I. Gomide, Lucas Rezende. II. Dias Junior, Moacir de
Souza. III. Título.

CAROLINA SOUZA JAROCHINSKI E SILVA

**ALOCAÇÃO DE FOMENTOS FLORESTAIS SOB CONDIÇÕES DE
INCERTEZA**

**ALLOCATION OF FORESTRY OUTGROWER SCHEMES UNDER
UNCERTAINTY CONDITIONS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 21 de outubro de 2019.

Dra. Andressa Ribeiro	UFPI
Dr. Carlos Alberto Araújo Júnior	UFMG
Dr. Kallil José Viana da Páscoa	UFLA
Dr. Luís Antônio Coimbra Borges	UFLA

Prof. Dr. Lucas Rezende Gomide
Orientador

Prof. Dr. Moacir de Souza Dias Junior
Coorientador

**LAVRAS – MG
2019**

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciências Florestais, pela grande oportunidade.

Aos professores Lucas Rezende Gomide e Moacir de Souza Dias Junior, pela orientação, paciência, ensinamentos e confiança.

Ao Matheus Ferreira e a Suzano Papel e Celulose pela disponibilização dos dados utilizados no presente estudo.

Aos colegas do LEMAF, pela ótima convivência.

Aos integrantes do Laboratório de Planejamento Florestal, pela parceria e amizade. Ao Rafael Menali, pela disponibilidade em me ajudar na fase final do doutorado.

Aos meus pais, Tadeu e Maria Aparecida, pelo amor e dedicação incondicional em todos os momentos de minha vida.

À minha irmã Mayara Jarochinski, pelo carinho, atenção, amizade e apoio sempre.

Ao Rafael Dellu, pelo companheirismo, amor e compreensão nesta fase tão importante para mim.

À minha família e amigos pela torcida e boas energias enviadas nos momentos decisivos.

A Deus, pelo aprendizado, conquista e pela vida.

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

Uma das modalidades de fomento florestal consiste na parceria entre produtores rurais e empresas florestais, cujo objetivo é a produção de florestas plantadas para o abastecimento de madeira. A contratação de fomentos, por meio da compra de madeira com preço definido em contrato, tem se mostrado uma forma de contratação comum nas grandes empresas de base florestal brasileiras. Dessa forma, o produtor se beneficia com a garantia de venda da madeira, e a empresa garante o abastecimento de madeira sem a necessidade de aquisição de terra. A definição de regiões ótimas, para a contratação desses fomentos, faz parte do planejamento estratégico do abastecimento de madeira das empresas. Conhecer os riscos financeiros que podem aumentar o custo de produção, nessas regiões selecionadas, faz com que as chances de sucesso do empreendimento sejam maiores. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é testar o uso de cenários estocásticos de programação linear (PL) para direcionar as estratégias de alocação de fomentos florestais ao abastecimento de madeira. Os objetivos específicos do presente estudo são: (i) verificar se é possível modelar o risco financeiro, empregando uma função de distribuição de probabilidade e associá-lo aos desafios de se operar em propriedades de fomentos; (ii) comparar a recomendação dos municípios-candidatos para a alocação de novos fomentos entre um modelo de programação linear determinístico e um estocástico; (iii) quantificar o impacto das variáveis de incerteza no custo de alocação de novos fomentos; (v) comparar os resultados obtidos entre o modelo de PL determinístico e o estocástico e indicar qual deles é melhor para auxiliar as tomadas de decisão da empresa. Foram testados dois modelos matemáticos de PL, um determinístico e um estocástico, para a alocação de fomentos florestais, de forma a atender as restrições de transporte e metas volumétricas de abastecimento de madeira para seis anos de produção de celulose. Como resultado, obteve-se um modelo capaz de indicar, para quais municípios devem ser direcionados os investimentos de produção florestal, sem ultrapassar os custos máximos estabelecidos. Concluiu-se que o uso do modelo de Programação Linear estocástico foi eficiente, para a geração de cenários e de informações estratégicas adicionais, quando comparado ao modelo determinístico. O modelo estocástico foi capaz de auxiliar as tomadas de decisão, de forma mais abrangente, uma vez que apresenta distribuições de probabilidade a respeito dos prováveis valores da função objetivo.

Palavras-chave: Fomentos florestais. Incerteza. Planejamento florestal. Programação linear. Modelo estocástico.

ABSTRACT

One of the modalities of forestry outgrower schemes is the partnership between rural producers and forestry companies of which objective is the production of planted forests for wood supply. The contract of outgrower schemes by purchasing wood at a contracted price has been a common form of contracting of large Brazilian forestry companies. Thus, the producer benefits from the guarantee of wood sale and the company guarantees the supply of wood without the need for land acquisition. The definition of optimal regions for hiring these outgrower schemes is part of the strategic planning of the companies' wood supply. The knowledge of the financial risks that can increase the cost of production in these selected regions increases the chances of success of the venture. In this context, the main objective of this work was to test the use of stochastic linear programming (LP) scenarios to direct the strategies of allocating forestry outgrower schemes to wood supply. The specific objectives of the study are (i) to verify whether it is possible to model financial risk by employing a probability distribution function and associate it with the challenges of operating on outgrower scheme properties; (ii) compare the recommendation of the candidate regions for the allocation of new outgrower schemes between a deterministic and a stochastic linear programming model; (iii) quantify the impact of uncertainty variables on the cost of allocating new outgrower schemes; (v) compare the results obtained between the deterministic and stochastic LP models and indicate which is best to assist the company's decision-making. Two LP mathematical, one deterministic and one stochastic, were tested regarding the allocation of forestry outgrower schemes to meet the transport restrictions and volumetric wood supply goals for six years of cellulose production. As a result, we obtained a model capable of indicating, to which regions forestry outgrower schemes should be directed without exceeding the established maximum costs. In conclusion, the use of the stochastic linear programming model was efficient in generating scenarios and additional strategic information when compared to the deterministic model. The stochastic model allowed more expanded decision-making since it presents probability distributions regarding the probable values of the objective function.

Keywords: Forestry outgrower schemes . Uncertainty. Forest planning. Linear Programming. Stochastic model.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 - Hierarquia de processos de planejamento florestal.	18
Figura 2 - Exemplo de um problema de PL, bidimensional com três restrições.....	22
Figura 3 - Exemplo de um problema de PLI, bidimensional com cinco restrições.....	25
Figura 4 - Ilustração do método <i>branch and bound</i> com apenas uma variável.....	26
Figura 5 - Ilustração da propagação da distribuição na Simulação de Monte Carlo.....	29

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Figura 1 - Localização geográfica dos 117 municípios disponíveis, para a contratação de novos fomentos, considerados no modelo matemático de otimização.....	50
Figura 2 - Representação espacial dos municípios selecionados na alocação de fomentos pelo modelo determinístico (a) e estocástico (efeito conjunto das variáveis) (b).	61
Figura 3 - Distribuição gráfica percentual dos resíduos, para explicar o custo médio da madeira, sendo (a) Independente da compra de madeira (Modelo 1), (b) Exclusivos sem a compra de madeira (Modelo 2).....	65

- Figura 4 - Representação gráfica da correlação entre as variáveis aleatórias custo de colheita (a), custo de transporte (c) e produção da floresta (e) versus o custo médio da madeira. Gráficos box plot que representam o impacto das variáveis aleatórias custo de colheita (b), custo de transporte (d) e produção da floresta (f) na aquisição de compra de madeira de mercado.66
- Figura 5 - Área a ser contratada por horizonte de planejamento, envolvendo o cenário determinístico e o estocástico (efeito conjunto de variáveis), que representam os limites superior e inferior do Intervalo de Confiança a 95%.82

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

Tabela 1 - Resumo dos dados de planejamento envolvendo os custos e metas por região que compõe os coeficientes da função-objetivo no modelo determinístico.	49
Tabela 2 - Resumo dos dados de planejamento envolvendo os custos e metas por região que compõe os coeficientes da função-objetivo no modelo determinístico.	52
Tabela 3 - Resultado dos modelos de regressão linear múltipla considerando o cenário de efeito em conjunto.	63
Tabela 4 - Análise de variância.	64
Tabela 5 - Estatísticas descritivas para os cenários avaliados. Teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov) e estimativas dos parâmetros resultantes dos ajustes das funções Weibull 2P, Normal e Lognormal para o VPC dos cenários avaliados.	69

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	13
1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Planejamento florestal	17
2.2	Métodos de resolução matemática	20
2.2.1	Programação Linear	21
2.2.2	Programação Linear Inteira/Mista	23
2.3	Avaliação de risco	27
2.4	Fomentos Florestais	30
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	33
	REFERÊNCIAS	35
	SEGUNDA PARTE – ARTIGO	43
	ARTIGO 1 – Alocação de fomentos florestais sob condições de incerteza	43
1	INTRODUÇÃO	46
2	MATERIAL E MÉTODOS	49
2.1	Hierarquização do problema florestal nos contratos de fomento	49
2.2	Estratégias de formulação matemática para contratos de fomento florestal	52
2.3	Modelos matemáticos de natureza determinística	53
2.4	Modelo matemático de natureza estocástica	55
2.5	Avaliação econômica da estocasticidade do modelo determinístico	58
3	RESULTADOS	60
3.1	Seleção de municípios aptos pelos modelos determinístico e estocástico	60
3.2	Modelo de regressão para a estimativa do custo total da madeira ...	62
3.3	Efeito das variáveis aleatórias na compra de madeira	65
3.4	Valor presente dos custos e funções de densidade de probabilidade	68
4	DISCUSSÃO	72
4.1	Seleção de municípios aptos pelos modelos determinístico e estocástico	72
4.2	Escolha dos modais de transporte	75
4.3	Modelagem do custo total da madeira	76
4.4	Comportamento das variáveis aleatórias no custo da madeira	78
4.5	Comportamento das variáveis aleatórias na compra de madeira	80

4.6	Análise do comportamento estocástico	80
5	CONCLUSÕES.....	84
	REFERÊNCIAS	85

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Os problemas de planejamento, sequenciamento e alocação de atividades fazem parte do cotidiano de todas as empresas. Porém esses problemas podem se tornar muito complexos e de difícil resolução, à medida que as restrições e o detalhamento das atividades aumentam. Uma ciência muito utilizada, para a resolução desse tipo de problema, é a pesquisa operacional (PO). Ela é aplicada a problemas relacionadas à condução e coordenação de operações dentro de uma organização. Essa técnica vem sendo utilizada, amplamente em áreas diversas, como, por exemplo, transporte, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, cuidados de saúde, militares e serviços públicos (HILLIER; LIEBERMAN, 2001). Portanto sua amplitude de aplicação hoje é muito abrangente.

A PO foi originada, durante a segunda guerra mundial, em virtude de uma necessidade urgente em alocar recursos escassos a várias operações militares. Pesquisadores americanos e britânicos foram convocados para desenvolver ferramentas capazes de lidar com esses e outros problemas táticos e estratégicos. Com o fim da guerra, os bons resultados obtidos com a PO estimularam o interesse em desenvolvê-la ainda mais e aplicá-la em outras áreas. Um marco nesse desenvolvimento ocorreu, após a criação do algoritmo *Simplex*, para solucionar problemas de programação linear complexos, por Dantzig em 1947.

No início da década de 60, a aplicação da PO foi se destacando, na área florestal, em razão de dois fatores. O primeiro fator, comum a todas áreas, refere-se à evolução e maior disponibilidade de recursos computacionais à época. O segundo fator se deu com a necessidade de planejar a exploração dos

recursos florestais, quanto a inúmeras tomadas de decisão existentes, tais como a obtenção de madeira, água, fauna, recreação ou a combinação de todos esses e outros fatores.

Verifica-se que o Brasil possui um enorme potencial, para o cultivo de florestas plantadas, em função de suas condições edafoclimáticas. Em decorrência, o país vem recebendo investimentos significativos nesse setor e expandindo sua extensão de florestas plantadas. Atualmente, as plantações florestais, no Brasil, são prioritariamente compostas por *Eucalyptus spp.* e *Pinus spp.* e totalizam uma área de 7,84 milhões de hectares (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ, 2018).

Os plantios florestais, em grandes extensões de área, se não manejados corretamente, podem causar impactos negativos ao meio ambiente e às comunidades vizinhas. As grandes empresas traçam estratégias, para que esses impactos sejam minimizados e consideram o investimento, em programas socioambientais, tais como os programas de fomentos florestais. A prática do fomento é uma alternativa para o abastecimento das empresas e pode trazer benefícios tanto para o produtor quanto para a comunidades (IBÁ, 2018).

Uma vez que os fomentos se inserem no contexto de abastecimento da empresa, é necessária a realização do planejamento de seus recursos físicos e financeiros, da mesma forma com que se faz nos plantios próprios dessas empresas. No entanto o cultivo de florestas, em áreas de terceiros, pode ser financeiramente incerto pelo desconhecimento detalhado da área no momento em que o planejamento florestal estratégico é realizado.

Observa-se que, no planejamento florestal, geralmente, utilizam-se premissas com valores incertos (variáveis de entrada) para a geração de direcionadores estratégicos. Nesse contexto, o presente estudo justifica-se pela necessidade de aprofundamento do conhecimento em modelos estocásticos para o planejamento florestal otimizado. Acredita-se que, a partir da identificação de

métricas e métodos, para a obtenção de resultados probabilísticos de rentabilidade da floresta, seja possível obter uma ferramenta de apoio à tomada de decisões mais segura e assertiva, quando comparada aos modelos que utilizam variáveis de entrada determinísticas.

Diante do exposto, utilizar o problema de alocação de novos fomentos, como o foco central da análise, facilita a aplicação das métricas e a visualização prática dos resultados. A contratação inicial de novos fomentos, para o abastecimento de madeira, deve ser avaliada diante de simulação de cenários e compreendendo-se quais os fatores mais impactam nos custos da empresa. Ao compreender os riscos financeiros envolvidos na região de interesse, para a contratação, os direcionadores estratégicos tornam-se mais confiáveis.

O presente estudo tem como hipótese verificar se a utilização do modelo estocástico, para modelar as incertezas das variáveis custo de colheita, custo de transporte e produção da floresta, em um modelo de programação linear, é capaz de auxiliar a tomada de decisão, para a alocação de fomentos florestais, voltados para o abastecimento de madeira de uma fábrica de celulose.

Assim sendo, o objetivo principal deste trabalho é testar o uso de cenários estocásticos de programação linear (PL) para direcionar as estratégias de alocação de fomentos florestais ao abastecimento de madeira.

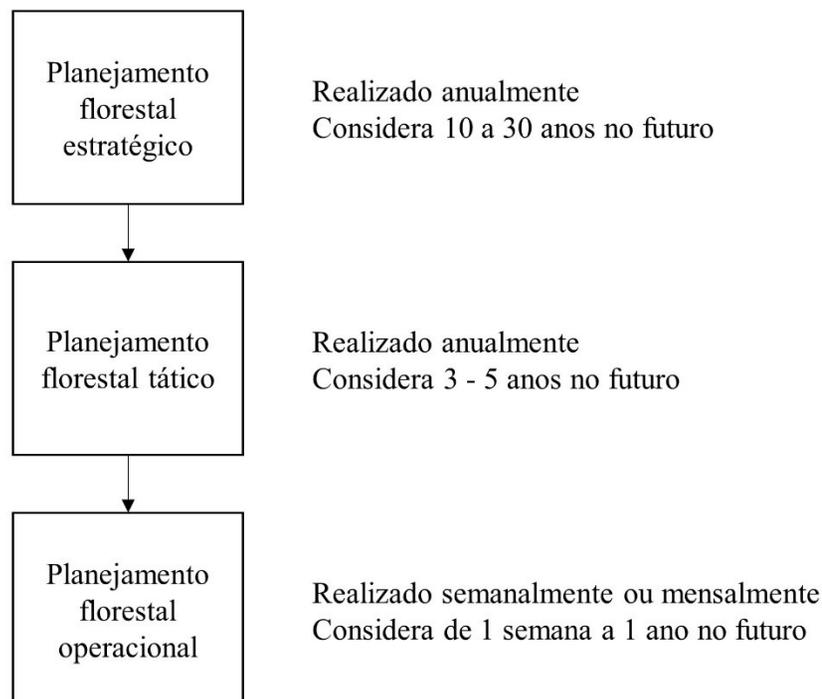
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Planejamento florestal

O planejamento de recursos florestais surgiu, no século 19, na Europa, com o intuito de regular o fluxo de madeira das indústrias (MARTELL; GUNN; WEINTRAUB, 1998). O nascimento dessa atividade foi de suma importância, para o manejo de uma floresta, ao auxiliar no gerenciamento dos recursos florestais, minimizando conflitos e alocação das atividades (BETTINGER; DEMIRCI; BOSTON, 2015). Segundo esses autores, os planos de gestão florestal são, muitas vezes, desenvolvidos como ferramentas para promover a transparência do gerenciamento, com a intenção de que eles possam ser usados para ajudar a gerenciar conflitos e orientar o tempo e a colocação das atividades de gerenciamento.

Um típico problema do planejamento florestal consiste em encontrar a combinação ótima de tratamentos agendados para os padrões da floresta (JIN; PUKKALA; LI, 2016). Esses problemas envolvem a integração de produção florestal e operações de campo a conceitos de negócios, indicando o melhor caminho para que se atinjam os objetivos almejados pelo proprietário da floresta. O planejamento florestal ainda pode ser dividido em três níveis hierárquicos: estratégico, tático e operacional (ANDERSSON, 2005). Esses níveis são caracterizados por apresentarem diferentes horizontes de planejamento (FIGURA 1). Segundo Anderson e Eriksson (2007), o horizonte temporal de planejamento é determinado pela taxa de crescimento das árvores, portanto os valores apresentados na Figura 1 estão em linha com os períodos comumente aplicados a florestas plantadas de eucalipto no Brasil. Porém podem ocorrer variações de acordo com a espécie e o produto que se deseja obter.

Figura 1 - Hierarquia de processos de planejamento florestal.



Fonte: Bettinger (2009), adaptado.

Segundo Bettinger (2009), no mais alto nível da hierarquia, encontra-se o planejamento estratégico, cujo foco é atingir as metas em longo-prazo, envolvendo extensas áreas de floresta. De acordo com Arce (2000), pode-se considerar o planejamento estratégico como um conjunto de decisões em longo prazo a serem adotadas, uma vez que, no período mínimo de uma rotação dos talhões, aproximadamente, tudo pode ser alterado (espécie, regime de manejo, área de efetivo plantio, etc).

Particularmente, os modelos de planejamento estratégico tendem a ser agregados e fazem uso da agregação tanto para talhões em estratos, quanto para tempo em períodos (ANDERSON; ERIKSSON, 2007). Nesse nível são comumente trabalhados temas que abordam metas de produção de madeira,

objetivos sociais (MONTE, 2012), ou até mesmo abordagens com diversas metas simultaneamente (econômica, ambiental, logística e silvicultural) (BROZ, 2017). As questões espaciais de planejamento são, no geral, ignoradas nesse nível, porém acredita-se que, com os avanços recentes em tecnologia e softwares, não há muitos motivos para se evitar essas abordagens no planejamento estratégico (BETTINGER, 2009).

No nível tático, o objetivo é agendar as operações em áreas específicas e em uma escala de tempo menor (MARTELL; GUNN; WEINTRAUNB, 1998). Os *inputs*, para o planejamento tático, são originados do planejamento estratégico e, em regra, vêm em forma de metas de volume a serem atingidas. O agrupamento de talhões, em blocos de colheita, é uma questão, com frequência, considerada como problema tático, em que o objetivo é buscar economia nos custos operacionais associados à logística de máquinas e equipes (BORGES; KANGAS; BERGSENG, 2017).

Um outro problema de planejamento tático se refere a questões espaciais, cujos aspectos ambientais passam a definir restrições ao sistema de produção, com a intenção de controlar ou evitar os possíveis distúrbios gerados após a colheita florestal (GOMIDE; ARCE; SILVA, 2013). Os aspectos espaciais das operações de colheita são geralmente expressos, em termos de restrições de adjacência, que determinam, por exemplo, que uma quantidade mínima de tempo deve existir entre os cortes dos talhões adjacentes (MARTELL; GUNN; WEINTRAUNB, 1998).

No último nível hierárquico está o planejamento operacional. Assim como o planejamento tático é guiado pelo estratégico, o operacional é guiado pelo tático, no qual são obtidos planos em curto prazo, que podem ser diários, semanais, mensais, bimestrais.

Segundo Bettinger (2009), o nível de detalhamento aumenta à medida que passamos do planejamento estratégico para o operacional. A maioria das

empresas desenvolve um plano estratégico e usa várias formas de planos operacionais. Esses problemas envolvem um grande volume de informações sobre a execução de operações (MARQUES, 2014).

Pelo seu caráter combinatório e interdisciplinar, o planejamento florestal é auxiliado por sistemas de otimização e podemos encontrar trabalhos que utilizam essas técnicas, na maioria das atividades florestais, como, por exemplo, abrangendo roteamento de veículos, para o transporte de madeira (CARDOSO; OLIVEIRA; JOAQUIM JUNIOR, 2016; KOÇ; KARAOGLAN, 2016), alocação de torres para identificar incêndios florestais (JUVANHOL et al., 2015), utilização de múltiplos produtos da madeira (FIORENTIN et al., 2019; SILVA; MONTES; SILVA, 2015), problemas de agendamento silviculturais (EL HACHEMI et al., 2015; MALLADI; SOWLATI, 2017), agendamento da colheita com restrições operacionais, espaciais e climáticas, modelado por Banhara (2010); a minimização do custo de reagentes em experimentos de deficiência nutricional de plantas (GARCIA; GOMIDE, 2013); a determinação automática de trilhas de remoção da madeira para reduzir os custos de arraste e os distúrbios do solo (CONTRERAS; PARROT; CHUNG, 2016), análise de risco sobre a demanda e preços da madeira (ALONSO-AYUSO; GUIGNARD; WEINTRAUB, 2018), entre outros.

2.2 Métodos de resolução matemática

Atualmente, a elaboração de planos de atuação, no cenário ambiental e econômico, exige que os gestores sejam experientes e cautelosos. É necessário buscar métodos, para manter o fornecimento homogêneo de madeira, utilizando os recursos florestais, de forma coesa e precisa, ao longo de horizontes de planejamento (AUGUSTYNCZIK; ARCE; SILVA, 2015).

Contudo construir um plano de atuação, em longos períodos de tempo, é uma tarefa onerosa. É fundamental utilizar o ferramental da pesquisa operacional para solucionar tais problemas de planejamento. A complexidade dos problemas tratados, também, é um fator limitante, para tomar decisões baseadas no senso comum. Pela grande quantidade de variáveis consideradas no cenário florestal, a modelagem matemática surge como alternativa de apoio à decisão (FERREIRA et al., 2018).

Dentro da pesquisa operacional aplicada ao planejamento florestal, os métodos mais utilizados, para a resolução de problemas, são: Programação Linear, Programação Linear Inteira, Programação Linear Inteira Mista (BETTINGER; DEMIRCI; BOSTON, 2015).

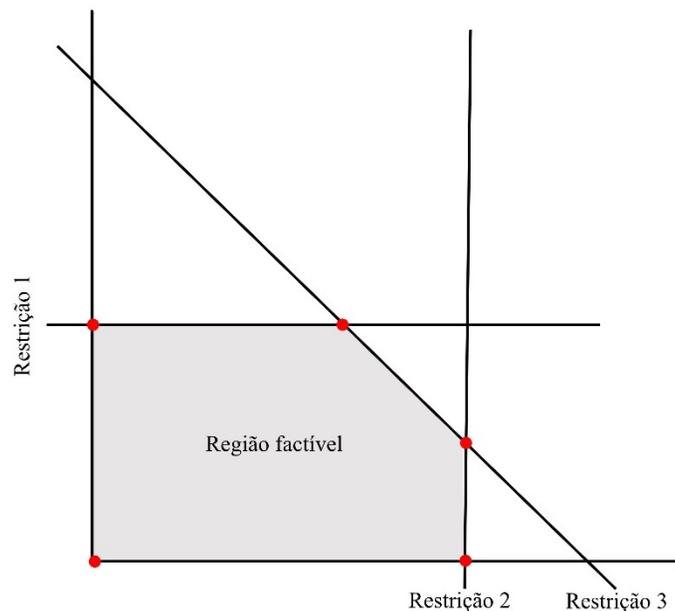
2.2.1 Programação Linear

A Programação Linear (PL) foi uma das primeiras ferramentas práticas para solucionar problemas complexos de tomadas de decisão comuns à indústria, à agricultura e a governos e se mostra uma técnica de otimização muito usual ainda hoje (BUONGIORNO; GILLES, 2003). No planejamento florestal, ela é aplicada, geralmente, a planos estratégicos e sua principal característica é utilização, unicamente, de variáveis contínuas.

PL é uma técnica baseada em equações lineares e que busca a melhor alocação possível, para os recursos escassos, entre as inúmeras tarefas ou atividades para obter um valor ótimo do objetivo desejado que, em geral, refere-se à lucratividade ou redução dos custos (ANDRADE, 2015). O caso particular, no qual o índice de desempenho ou o de custo é uma função linear e as restrições sobre a disponibilidade ou utilização de recursos é descrita como equações ou desigualdades lineares, é denominado de programação linear (ARCE, 1997).

A Figura 2 ilustra o exemplo de um problema de PL bidimensional com três restrições, adaptado de Silva, A. (2016). Como já citado, as restrições demarcam a região factível, que contém todas as soluções viáveis do problema. Após a demarcação, é, dessa forma, estabelecidos os pontos limítrofes da região (pontos vermelhos), o algoritmo *simplex* percorre esses pontos calculando o valor da função objetivo. E, no final, o algoritmo retorna à solução que possui o melhor valor da função-objetivo.

Figura 2 - Exemplo de um problema de PL, bidimensional com três restrições.



Fonte: adaptado de Silva, A. (2016).

O resultado de um problema de programação linear permite uma avaliação quantitativa das atividades gerenciais propostas. Além disso, possibilita a realização de análises de sensibilidade, a fim de descrever o comportamento do problema com alto nível de detalhe e estabelecer soluções

alternativas a ele, como encontrado nos trabalhos de Borgonovo e Plischke (2016), Hashemi, Karimi e Tavana (2015) e Rajesh e Ravi (2015).

Na literatura, ainda, é possível encontrar um enorme acervo de trabalhos que utilizam da PL, para resolver diversos problemas do setor florestal, por exemplo: ecologia (BOUKHERROUB; LEBEL; RUIZ, 2017; CORRIGAN; NIEUWENHUIS, 2016; DEMIREL; DEMIREL; GÖKÇEN, 2016), incêndios florestais (CHUNG, 2015), implantação florestal (MOHAMMADI; LIMAEI; SHAHRAJI, 2017), energia da biomassa (PAULO et al., 2015).

2.2.2 Programação Linear Inteira/Mista

A programação linear tem uma vertente que trabalha apenas com valores inteiros e/ou binários, é a chamada Programação Linear Inteira (PLI), contudo essa também apresenta suas variações. Quando todas as variáveis estão sujeitas à condição de integralidade, estamos diante de um problema de PLI pura e, se apenas algumas o estão, trata-se de um problema de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) (ALVES; DELGADO, 1997).

O uso de variáveis inteiras é comum, em problemas de planejamento florestal, que englobam situações em que os recursos não podem ser divididos, como, por exemplo, uma máquina de colheita inteira deve ser atribuída à colheita de um determinado talhão; ou então, ao alocar colaboradores em atividades florestais, temos que lidar com o fato de que isso ocorrerá apenas com valores inteiros.

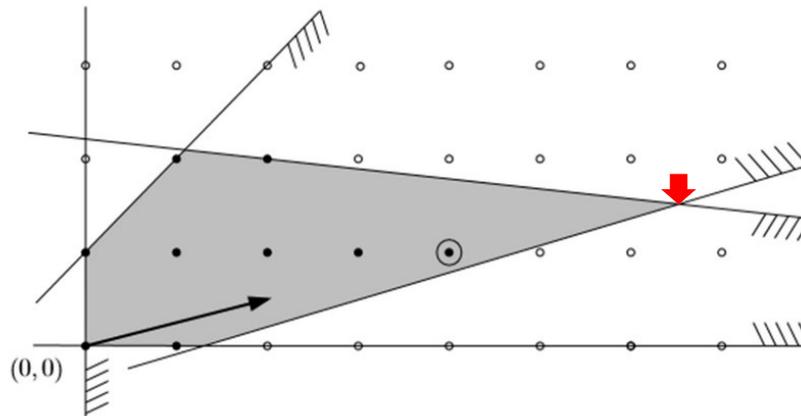
Os problemas com variáveis inteiras são, computacionalmente, mais difíceis de resolver que problemas com apenas variáveis contínuas (PL), sendo chamados de problemas *NP-hard* (AZAD; YU; LI, 2017). Sugere-se que, para facilitar a resolução desses problemas, deve-se recorrer a métodos para encontrar, ou pelo menos aproximar, o melhor valor de tais variáveis inteiras,

dada uma função-objetivo particular e um conjunto de restrições (BUONGIORNO; GILLES, 2003).

Silva (2003) avaliou, com a ajuda da Programação Inteira, as consequências do uso da Programação Linear com posterior arredondamento das respostas, em um problema de regulação florestal. Para isso, o problema foi resolvido pelo Modelo I, por meio da Programação Linear, Programação Linear com posterior arredondamento e Programação Inteira. Os autores observaram que o método de Programação Inteira levou a resultados factíveis, enquanto o método de arredondamento dos resultados, via Programação Linear, foi infactível e não é recomendado do ponto de vista matemático.

Neste contexto, ressalta-se que a inclusão de variáveis inteiras altera a natureza da região factível, a qual deixa de ser contínua e passa a ser definida por pontos finitos, portanto não há garantia de que a solução ótima esteja no ponto extremo do plano, conforme observado na PL (GOMIDE; ARCE; SILVA, 2013). A Figura 3 ilustra o exemplo de um problema de PLI bidimensional com cinco restrições, retirado de Matousek e Gaertner (2007). De acordo com os próprios autores, observa-se que o conjunto de soluções viáveis (pontos na cor preta) não é mais um poliedro convexo (área cinza), como no caso da PL e, sim, pontos inteiros separados. Nota-se que a solução ótima da PLI (indicada com um círculo) está muito distante da melhor solução obtida pela PL (indicada pela seta vermelha), para as mesmas restrições e função-objetivo.

Figura 3 - Exemplo de um problema de PLI, bidimensional com cinco restrições



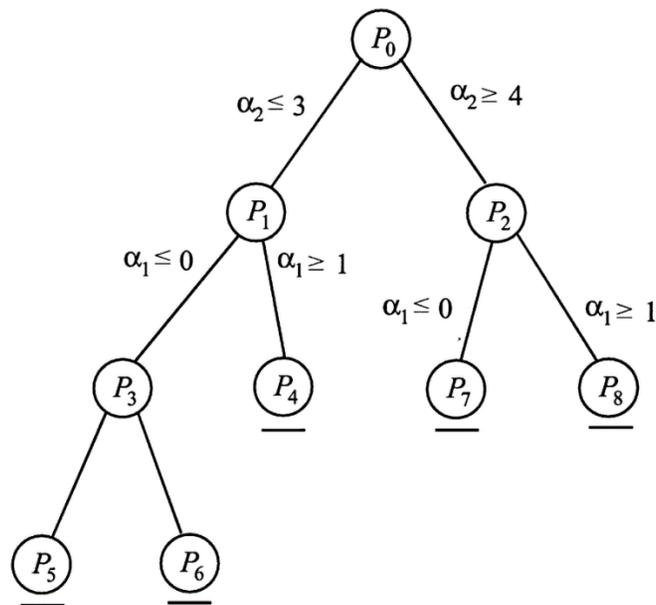
Fonte: Matousek e Gaertner (2007), adaptado.

Segundo Hillier e Lieberman (2001), a ideia mais simples, a fim de resolver um problema desse tipo, seria enumerar todos esses pontos e escolher a melhor solução entre eles. Entretanto, na realidade, o número de pontos é extremamente alto, para o qual seria necessário muito tempo para o processamento.

Logo, para a resolução de problemas dessa natureza, seguem-se métodos para direcionar a busca de soluções. O algoritmo *branch-and-bound* é um método de resolução de problemas que garante o valor ótimo da solução encontrada. Esse método utiliza da geração de uma árvore de nós os quais representam subproblemas do problema principal (NEMHAUSER; RINNOY KAN; TODD, 1989). Consiste em uma enumeração sistemática de todos os candidatos à solução, por meio da qual os subconjuntos de candidatos inviáveis são descartados, utilizando os limites superior e inferior da quantia otimizada, ou seja, otimizar subconjuntos, considerando o resultado total, em vez de tratar integralmente do conjunto total de soluções (FIGURA 4). O método é composto por duas operações básicas, *Branching* e *Bounding*. *Branching* divide o

problema principal em subproblemas, eliminando soluções inviáveis. *Bounding* elimina as soluções de baixa qualidade por comparações com soluções de outros subproblemas e limitantes (limite superior e inferior). Essas operações são dependentes das restrições do modelo e da finalidade do problema, sendo ele de maximização ou minimização, os critérios adjacentes aos processos são estabelecidos previamente.

Figura 4 - Ilustração do método *branch and bound* com apenas uma variável.



Fonte: Lim e Yu (2003).

Ao passar dos anos, a capacidade de processamento dos computadores passou por enormes melhorias. Da mesma forma, o *branch and bound* vem sendo substituído por algoritmos mais eficientes, como *branch and price* (CHITSAZ; CORDEAU; JANZ, 2019; FURTADO; MUNARI; MORABITO, 2017; VIGERSKE; GLEIXNER, 2018) e *branch and cut* (FRISKE; BURIOL;

CAMPONOGARA, 2018; YILDIZ; ARSLAN; KARAŞAN, 2016; YUAN; LIU; JIANG, 2015).

Por fim, a característica da PLI, em termos da possibilidade de considerar valores inteiros, é de grande importância para o planejamento florestal. Tal fato é evidenciado pelos trabalhos acadêmicos que podem ser encontrados, como, por exemplo, planejamento de unidades de produção, para áreas de manejo de floresta nativa na Amazônia (SILVA et al., 2018), planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais (AUGUSTYNCZIK; ARCE; SILVA, 2015), construção de planos operacionais da colheita florestal integrados à rede viária (SILVA, P., et al., 2016) e inúmeros outros.

2.3 Avaliação de risco

Existem quatro principais hipóteses implícitas aos modelos de Programação Linear, uma delas é a “Hipótese de certeza”. Essa hipótese admite que os coeficientes associados a cada uma das variáveis sejam valores conhecidos. Segundo Bettinger (2009), isso indica que não há variações estocásticas (aleatórias) nos coeficientes de um modelo de programação linear. Por exemplo, o custo por cada metro cúbico de madeira, produzido para celulose, é de R\$ 80 e não $R\$ 80 \pm \epsilon$, sendo ϵ alguma interação aleatória (ex: R\$ 82,73, em alguns casos e 76,29, em outros). Mas, na prática, confirma-se que é, no futuro, que estão as consequências das decisões de planejamento, portanto elas estão sujeitas a algum tipo de incerteza (ROBINSON; MCLARIN; MOSS, 2016), tais como flutuações de preços e variação de produção florestal.

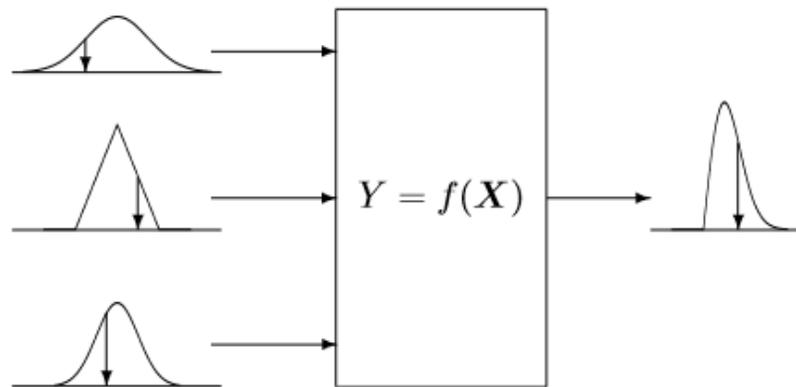
Para garantir uma tomada de decisão mais assertiva, estudos apontam a incorporação de incertezas nos modelos como forma de se conhecer o risco existente em um determinado cenário. Para análises financeiras, dadas as

incertezas inerentes ao fluxo de caixa, a escolha de investir deve ser baseada no risco obtido com simulações de fluxo de caixa, como condição básica para o desenvolvimento da análise de risco (SIMÕES, 2016). Sendo assim, abordagens de exploração de cenários são necessárias, para percorrer maior alcance de soluções possíveis, em eventos incertos no tempo futuro (MOSADEGHI et al., 2013). Madani e Lund (2011) afirmam que a Simulação de Monte Carlo possibilita a observação de maior variação de possíveis eventos futuros, retornando um mapa de ocorrências no tempo $t+n$, livre de restrições acerca da estrutura prévia do banco de dados utilizado.

A Simulação Monte Carlo (SMC) leva o nome de um cassino, mundialmente conhecido, no entanto a semelhança com o jogo se aplica apenas ao uso e dependência de eventos aleatórios. Os matemáticos John Von Neumann e Stanislaw Ulam são considerados os principais autores dessa técnica. Ela foi desenvolvida, ao longo da Segunda Guerra Mundial, para a solução de problemas matemáticos cujo tratamento analítico não se mostrava viável.

A SMC é uma abordagem de exploração de cenários, amplamente utilizada e consolidada, em inúmeros campos de atuação científicos (ACCASTELLO et al., 2018; HERNANDEZ-STEFANONI et al., 2018). Conforme demonstrado na Figura 5, ela consiste em: a) determinação das distribuições de probabilidade das variáveis de entrada; b) sorteio de valores dentro dos limites estabelecidos pela distribuição; c) cálculo do *output* para cada simulação realizada; d) determinação da distribuição de probabilidade considerando todas as simulações do *output*.

Figura 5 - Ilustração da propagação da distribuição na Simulação de Monte Carlo.



Fonte: Gum (2004).

De acordo com Hildebrandt e Knoke (2011), a SMC é amplamente utilizada, para a avaliação de risco, em análises financeiras, por sua capacidade de incorporar diferentes *inputs* incertos. Simões (2016) realizou a análise de risco de investimento, no transporte de madeira, utilizando situações realistas para estimar o custo operacional dos veículos utilizados. Dieter (2001) apresentou um modelo, para incluir riscos naturais, como tempestade e ataque de insetos, no cálculo do valor esperado da terra. Ao aplicar esse modelo, foi possível identificar os efeitos dos eventos naturais, na escolha de espécies a serem plantadas e na rotação econômica dos plantios. Simões, Dinardi e Silva (2018) utilizaram a SMC para manejo de risco em plantios florestais com finalidade carbonífera. Os autores observaram que a rotação de três anos, dentro das especificações de espaçamento, apresentava 83% de probabilidade de sucesso econômico. Eles também mostraram que a biomassa do fuste é a variável de maior importância na determinação da viabilidade econômico-financeira do projeto de investimento.

Para realizar o planejamento florestal via programação linear, as primeiras etapas são a determinação das estimativas das variáveis da floresta (custos, preços, volume, área, etc) e o cálculo do VPL das alternativas de manejo. É nesse momento, em que se inicia a convivência com algumas incertezas, que se recomenda aplicar a SMC para simular as alterações nas variáveis. Para quantificar os riscos associados às séries de valores obtidos, deve-se avaliar a probabilidade de ocorrência de valores negativos (SECURATO, 2007). Para a comparação entre projetos, mutuamente exclusivos, utiliza-se o desvio-padrão dos valores. Conforme Lapponi (2007), quanto menor for o desvio-padrão mais os valores simulados estarão próximos de seu valor esperado. Portanto quanto maior for o desvio-padrão maior será o risco.

2.4 Fomentos Florestais

Empresas de celulose e papel, siderurgia e painéis de madeira reconstituída dão impulsos aos investimentos no fomento florestal (CUNHA et al., 2019). O setor de celulose é um grande investidor em fomento pelo alto valor comercial do dólar, causando benefícios para tais empresas, pois têm grande parte de sua receita na matriz de exportação de sua pasta industrializada. O Brasil é o segundo maior país, em produção de celulose industrializada, com 19,5 milhões de toneladas, sendo que 67% desse montante é exportado para vários países. Não obstante o setor siderúrgico também investe boas cifras no fomento, para a finalidade de produção de carvão vegetal, sendo 4,5 milhões de toneladas produzidas no ano de 2017 (IBÁ, 2018).

O fomento florestal, no Brasil, segundo a Indústria Brasileira de Árvores, no ano base 2017-2018, representou 464 mil hectares plantados, em parceria com 27 mil pequenos e médios produtores florestais, demonstrando a importância desse investimento no cenário nacional socioeconômico nacional.

Segundo Carvalho et al. (2016), essa parceria promove vantagens financeiras aos pequenos produtores rurais e às empresas, pois terão disponível, em seu raio econômico, madeira sem a necessidade de compra de novas áreas de plantio. O pequeno produtor, beneficiando-se desse incentivo, tem acesso às tecnologias mais avançadas de produção florestal, o que significa maior receita ao final do período (EISFELD; SOCHER; RIBEIRO, 2017).

Muito tem se estudado acerca da viabilidade econômica e de planejamento do fomento florestal, como no trabalho de Rode et al. (2015), cujos autores compararam o planejamento estratégico de regulação florestal em duas abordagens: individual, cujo fomento era analisado separadamente das áreas próprias da empresa; e único, cujo fomento era incorporado ao planejamento da empresa contratante. Eles observaram que, no cenário único, o fomento vendido com madeira em pé produziu maiores ganhos ao proprietário. Essa abordagem é semelhante ao trabalho de Santos (2017), que trabalhou avaliação de métodos de colheita, em áreas de fomento florestal com relevo acidentado, adentrando a esfera operacional de planejamento. Esse autor concluiu que o método de colheita, parcialmente terceirizado, é a opção de melhor viabilidade econômica e operacional. Ou como no trabalho de Pasa et al. (2017), no qual os autores fizeram análise econômica, em plantios florestais em agricultura familiar, fomentados na região Sul do Brasil, sob a ótica do produtor. Utilizaram análise econômica, financeira e de sensibilidade e observaram viabilidade nos plantios e caracterizaram-na como fonte de renda complementar.

Outros estudos avaliaram as estratégias de fomento, adotadas pelas instituições públicas e os impactos ambientais potenciais pela atividade florestal fomentada, como no trabalho de Eisfeld, Socher e Ribeiro (2017), em que os autores avaliaram a disponibilidade das linhas de crédito aos produtores rurais nos estados do Sul, São Paulo e Minas Gerais. Os autores observaram que apenas o estado de Minas Gerais apresenta incentivo de fomento florestal com

amplitude significativa para o pequeno e médio produtor. Ou a abordagem de Valdetaro et al. (2015), em que avaliaram, qualitativa e quantitativamente, um programa de fomento florestal, na Zona da Mata, estado de Minas Gerais, quanto ao potencial de impacto ambiental; concluíram que o programa apresenta impactos positivos e negativos em na proporção de 1 para 2.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Diante do cenário florestal brasileiro, de plena expansão na produção, planejar a alocação dos recursos físicos e financeiros se torna uma premissa básica para a estratégia de crescimento da empresa de base florestal. Em um cenário florestal com grande volume de dados, em que a sua aquisição, muitas vezes, ocorre em tempo real, torna-se necessário um grande conhecimento computacional para melhor aproveitamento da informação. Nesse cenário, desenvolver ferramentas de apoio à tomada de decisão, com melhoria nas previsões das variáveis incertas e avaliação dos riscos, torna-se possível e necessário ao planejamento da produção. Entender como as decisões estratégicas podem melhorar as relações com as comunidades vizinhas e o meio-ambiente é uma prática importante e muito valorizada aos consumidores de produtos de origem florestal. Garantir que os contratos de fomento sejam viáveis economicamente para ambas as partes (produtor e empresa) e que não ocorram quebras de contrato por parte da empresa é um grande desafio a fim de manter a qualidade das relações entre as partes interessadas. Assim sendo, o presente estudo visa contribuir com o desenvolvimento de uma ferramenta que solucione questões de abastecimento de madeira, incerteza nas tomadas de decisões e viabilidade de contratos de fomentos florestais em uma indústria de celulose brasileira.

REFERÊNCIAS

- ACCASTELLO, C. et al. Assessing the timber value: a case study in the Italian Alps. **Forest Policy and Economics**, London, v. 93, p. 36-44, 2018.
- ALONSO-AYUSO, A. E.; GUIGNARD, M.; WEINTRAUB, A. Risk management for forestry planning under uncertainty in demand and prices. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 267, n. 3, p. 1051-1074, 2018.
- ALVES, R.; DELGADO, C. **Programação linear inteira**. Cidade do Porto: Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 1997.
- ANDERSSON, D. Approaches to integrated strategic/tactical forest planning. **Licentiate Thesis**, Umea, v. 16, p. 1-29, 2005.
- ANDERSSON, D.; ERIKSSON, L. O. Effects of temporal aggregation in integrated strategic/tactical and strategic forest planning. **Forest Policy and Economics**, London, v. 9, n. 8, p. 965-981, 2007.
- ANDRADE, E. L. **Introdução a pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.
- ARCE, J. E. **Um sistema de programação do transporte principal de multiprodutos florestais visando a minimização dos custos**. 1997. 89 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.
- ARCE, J. E. **Um Sistema de análise, simulação e otimização do sortimento florestal em função da demanda por multiprodutos e do custo de transporte**. 2000. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.
- AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. da. Planejamento espacial da colheita considerando áreas máximas operacionais. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 4, p. 649-655, 2015.
- AZAD, S. X. J.; YU, H.; LI, B. Scheduling live interactive narratives with mixed-integer linear programming. In: **ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND INTERACTIVE DIGITAL ENTERTAINMENT CONFERENCE**, 13., 2017, Alberta. **Proceedings...** Alberta: AAAI, 2017. Disponível em:

<<https://www.aaai.org/ocs/index.php/AIIDE/AIIDE17/paper/viewPaper/15873>>. Acesso em: 7 out. 2019.

BANHARA, J. R. Optimized harvest scheduling in eucalyptus plantations under operational, spatial and climatic constraints. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 85, n. 38, p. 85-95, 2010.

BETTINGER, P. **Forest management and planning**. New York: Academic, 2009.

BETTINGER, P.; DEMIRCI, M.; BOSTON, K. Search reversion within s-metaheuristics: impacts illustrated with a forest planning problem. **Silva Fennica**, Helsinki, v. 49, n. 2, p. 1-20, 2015.

BORGES, P.; KANGAS, A.; BERGSENG, E. Optimal harvest cluster size with increasing opening costs for harvest sites. **Forest Policy and Economics**, London, v. 75, p. 49-57, 2017.

BORGONOVO, E.; PLISCHKE, E. Sensitivity analysis: a review of recent advances. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 248, n. 3, p. 869-887, 2016.

BOUKHERROUB, T.; LEBEL, L.; RUIZ, A. A framework for sustainable forest resource allocation: a Canadian case study. **Omega**, Elmsford, v. 66, p. 224-235, 2017.

BROZ, D. Strategic planning in a forest supply chain: a multigoal and multiproduct approach. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 47, n. 3, p. 297-307, 2017.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. Amsterdam: Academic, 2003.

CARDOSO, L. E. Z.; OLIVEIRA, P. P.; JOAQUIM JUNIOR, C. F. Redução de custos no transporte de madeira por meio de roteirização otimizada: um estudo de caso. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 31-46, 2016.

CARVALHO, K. H. A. de et al. Influência de diferentes funções objetivo em modelos de regulação florestal. **Revista Agro@mbiente**, Boa Vista, v. 10, n. 4, p. 371-380, 2016.

CHITSAZ, M.; CORDEAU, J.; JANS, R. A branch-and-cut algorithm for an assembly routing problem. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON LOT-SIZING-IWLS'2019, 2019, Montreal. **Proceedings...** Montreal, 2019.

Disponível em: <http://chairelogistique.hec.ca/wp-content/uploads/2018/07/BC_ARP.pdf>. Acesso em: 10 out. 2019.

CHUNG, W. Optimizing fuel treatments to reduce wildland fire risk. **Current Forestry Reports**, London, v. 1, n. 1, p. 44-51, 2015.

CONTRERAS, M. A.; PARROTT, D. L.; CHUNG, W. Designing skid-trail networks to reduce skidding cost and soil disturbance for ground-based timber harvesting operations. **Forest Science**, Bethesda, v. 62, n. 1, p. 48-58, 2016.

CORRIGAN, E.; NIEUWENHUIS, M. A linear programming model to biophysically assess some ecosystem service synergies and trade-offs in two Irish Landscapes. **Forests**, Basel, v. 7, n. 7, p. 128, 2016.

CUNHA, G. et al. Panorama do setor florestal brasileiro com ênfase no estado de Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 16, p. 1582-1602, 2019.

DEMIREL, E.; DEMIREL, N.; GÖKÇEN, H. A mixed integer linear programming model to optimize reverse logistics activities of end-of-life vehicles in Turkey. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 112, p. 2101-2113, 2016.

DIETER, M. Land expectation values for spruce and beech calculated with Monte Carlo modelling techniques. **Forest Policy and Economics**, London, v. 2, n. 2, p. 157-166, 2001.

EISFELD, R. de L.; SOCHER, L. G.; RIBEIRO, C. C. Modelo de fomento florestal nas instituições estaduais nos estados do Sul, São Paulo e Minas Gerais. **BIOFIX Scientific Journal**, Curitiba, v. 2, n. 2, p. 1-9, 2017.

EL HACHEMI, N. E. et al. Flow-based integer linear programs to solve the weekly log-truck scheduling problem. **Annals of Operations Research**, Amsterdam, v. 232, n. 1, p. 87-97, 2015.

FERREIRA, P. H. B. M. L. M. A. et al. Influência dos parâmetros da metaheurística simulated annealing em um problema de planejamento da produção florestal. **Caderno de Ciências Agrárias**, Belo Horizonte, v. 10, n. 1, p. 59-67, 2018.

FIorentin, L. D. et al. Optimized planning of assortment production in forest stands. **Floresta**, Curitiba, v. 49, n. 4, p. 735-744, 2019.

FRISKE, M. W.; BURIOL, L. S.; CAMPONOGARA, E. A Branch-and-Price algorithm for a compressor scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, New York, v. 116, p. 72-81, 2018.

FURTADO, M. G. S.; MUNARI, P.; MORABITO, R. The pickup and delivery problem with time windows in the oil industry: model and Branch-and-cut methods. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 24, n. 3, p. 501-513, 2017.

GARCIA, M. B.; GOMIDE, L. R. Use of linear programming models in experimentation with plant nutrients. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 255-261, 2013.

GOMIDE, L. R.; ARCE, J. E.; SILVA, A. C. L. Comparação entre a meta-heurística simulated annealing e a programação linear inteira no agendamento da colheita florestal com restrições de adjacência. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 449-460, 2013.

GUM, S. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM):** supplement 1: numerical methods for the propagation of distributions. Geneva: International Organization for Standardization, 2004.

HASHEMI, S. H.; KARIMI, A.; TAVANA, M. An integrated green supplier selection approach with analytic network process and improved Grey relational analysis. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 159, p. 178-191, 2015.

HERNANDEZ-STEFANONI, J. L. et al. Effects of sample plot size and GPS location errors on aboveground biomass estimates from LiDAR in tropical dry forests. **Remote Sensing**, Basel, v. 10, p. 1-15, 2018.

HILDEBRANDT, P.; KNOKE, T. Investment decisions under uncertainty-A methodological review on forest science studies. **Forest Policy and Economics**, London, v. 13, n. 1, p. 1-15, 2011.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. 7th ed. New York: McGraw Hill, 2001.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Sumário Executivo/Relatório Anual**. Brasília, DF, 2018. Disponível em:

<<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

JIN, X.; PUKKALA, T.; LI, F. Fine-tuning heuristic methods for combinatorial optimization in forest planning. **European Journal of Forest Research**, Georgetown, v. 135, n. 4, p. 765-779, 2016.

JUVANHOL, R. S. et al. Uso de geotecnologias e programação matemática na alocação de torres de incêndios. In: SBPO-SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 47., 2015, Porto de Galinhas. **Anais eletrônicos...** Porto de Galinhas: SBPO, 2015. p. 666-676.

KOÇ, Ç.; KARAOGLAN, I. The green vehicle routing problem: a heuristic based exact solution approach. **Applied Soft Computing**, Amsterdam, v. 39, p. 154-164, 2016.

LAPPONI, J. C. **Projetos de investimentos na empresa**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LIM, Y. C.; YU, Y. J. A width-recursive depth-first tree search approach for the design of discrete coefficient perfect reconstruction lattice filter bank. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing**, New York, v. 50, n. 6, p. 257-266, 2003.

MADANI, K.; LUND, J. R. A Monte-Carlo game theoretic approach for Multi-Criteria Decision Making under uncertainty. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 34, p. 607-616, 2011.

MALLADI, K. T.; SOWLATI, T. Optimization of operational level transportation planning in forestry: a review. **International Journal of Forest Engineering**, Swedish, v. 28, n. 3, p. 198-210, 2017.

MARQUES, A. F. Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations. **Scandinavian Journal of Forest Research**, Stockholm, v. 29, n. 1, p. 166-177, 2014.

MARTELL, D. L.; GUNN, E. A.; WEINTRAUB, A. Forest management challenges for operational researchers. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 1-17, 1998.

MATOUSEK, J.; GARTNER, B. **Understanding and using linear programming**. Berlin: Springer, 2007.

MOHAMMADI, Z.; LIMAEI, S. M.; SHAHRAJI, T. R. Linear programming approach for optimal forest plantation. **Journal of Forestry Research**, London, v. 28, n. 2, p. 299-307, 2017.

MONTE, M. A. **Inclusão de critérios sociais na modelagem matemática do planejamento florestal**. 2012. 86 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

MOSADEGHI, R. et al. Uncertainty analysis in the application of multi-criteria decision-making methods in Australian strategic environmental decisions. **Journal of Environmental Planning and Management**, Abingdon, v. 56, p. 1097-1124, 2013.

NEMHAUSER, G. L.; RINNOY KAN, A. H. G.; TODD, M. J. **Handbook in operations research and management science: optimization**. North-Holland: Elsevier Science, 1989. v. 1.

PASA, D. et al. Análise econômica de plantios florestais na agricultura familiar da região sul do Brasil. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, MG, v. 15, n. 2, p. 277-292, 2017.

PAULO, H. et al. Supply chain optimization of residual forestry biomass for bioenergy production: the case study of Portugal. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 83, p. 245-256, 2015.

RAJESH, R.; RAVI, V. Supplier selection in resilient supply chains: a grey relational analysis approach. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 86, p. 343-359, 2015.

ROBINSON, A. P.; MCLARIN, M.; MOSS, I. Comment on “A simple way to incorporate uncertainty and risk into forest harvest scheduling”. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 386, p. 86-91, 2016.

RODE, R. et al. Comparação da regulação florestal de projetos de fomento com áreas próprias de empresas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 81, p. 11-19, 2015.

SANTOS, L. S. **Avaliação de métodos de colheita no fomento florestal em relevo acidentado**. 2017. 49 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

SECURATO, J. R. **Decisões financeiras em condições de risco**. São Paulo: Saint Paul Editora, 2007. 264 p.

SILVA, A. B. **O método simplex e o método gráfico na resolução de problemas de otimização**. 2016. 86 p. Dissertação (Mestrado em Matemática)- Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016.

SILVA, E. F. S. da et al. Planejamento de unidades de produção para áreas de manejo de floresta nativa na Amazônia. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 1, p. 5502, 2018.

SILVA, G. F. da S. Problemas com o uso de programação linear com posterior arredondamento da solução ótima, em regulação florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 677-688, 2003.

SILVA, P. H. B. M. D. et al. Forest harvest scheduling plan integrated to the road network. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 69-76, 2016.

SILVA, R. F.; MONTES, D. P.; SILVA, G. F. Calibração de uma heurística de construção por partes para otimizar o sortimento florestal em plantios de *Pinus taeda* L. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 47., 2015, Porto de Galinhas. **Anais eletrônicos...** Porto de Galinhas, 2015. Disponível em: <<http://cdsid.org.br/sbpo2015/wp-content/uploads/2015/08/142771.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

SIMÕES, D. Quantitative analysis of uncertainty in financial risk assessment of road transportation of wood in Uruguay. **Forests**, Basel, v. 7, n. 7, p. 130, June 2016.

SIMÕES, D.; DINARDI, A. J.; SILVA, M. R. Investment uncertainty analysis in Eucalyptus bole biomass production in Brazil. **Forests**, Basel, v. 9, n. 7, p. 384, 2018.

VALDETARO, E. B. et al. Conjugação dos métodos da matriz de interação e do check-list na avaliação quali-quantitativa de impactos ambientais de um programa de fomento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 611-622, 2015.

VIGERSKE, S.; GLEIXNER, A. SCIP: global optimization of mixed-integer nonlinear programs in a branch-and-cut framework. **Optimization Methods and Software**, New York, v. 33, n. 3, p. 563-593, 2018.

YILDIZ, B.; ARSLAN, O.; KARAŞAN, O. E. A branch and price approach for routing and refueling station location model. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 248, n. 3, p. 815-826, 2016.

YUAN, B.; LIU, R.; JIANG, Z. A branch-and-price algorithm for the home health care scheduling and routing problem with stochastic service times and skill requirements. **International Journal of Production Research**, London, v. 53, n. 24, p. 7450-7464, 2015.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

**ARTIGO 1 – ALOCAÇÃO DE FOMENTOS FLORESTAIS SOB
CONDIÇÕES DE INCERTEZA**

**ARTICLE 1 - ALLOCATION OF FORESTRY OUTGROWER
SCHEMES UNDER UNCERTAIN CONDITIONS**

Carolina Souza Jarochinski e Silva
Lucas Rezende Gomide,
Moacir de Souza Dias Junior
Matheus Andrade Ferreira

Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2003) e formatado de acordo
com o Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

A contratação de fomentos florestais por empresas do setor privado é uma prática comum ao suprimento de madeira no Brasil. Visando beneficiar ambas as partes envolvidas, nesta parceria (produtor e empresa), é importante minimizar os riscos de quebra de contrato. De forma geral, a quebra de contrato pode ocorrer pelas variações nas premissas de preço da madeira, no mercado, custos operacionais e produção florestal. Para evitar a quebra de contrato por parte da empresa, é importante incorporar algumas dessas premissas no planejamento estratégico de contratação dos fomentos florestais. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho é testar o uso de cenários estocásticos de programação linear (PL), para direcionar as estratégias de alocação de fomentos florestais ao abastecimento de madeira, quanto às incertezas nas principais variáveis de entrada do modelo (custo de colheita, custo de transporte e produção florestal). Concluiu-se que o uso do modelo de Programação Linear estocástico foi eficiente, para a geração de cenários e de informações estratégicas adicionais, quando comparado ao modelo determinístico, auxiliando na prospecção de novos fomentos e compras de madeira. O modelo estocástico mostrou-se capaz de apoiar as tomadas de decisão, de forma mais abrangente, uma vez que apresenta distribuições de probabilidade a respeito dos prováveis valores da função- objetivo.

Palavras-chave: Planejamento Florestal. Incertezas. Modelo estocástico.

ABSTRACT

The contract of forestry outgrower schemes through private sector companies is a common practice for wood supply in Brazil. It is important to minimize the risks of breach of contract to benefit both parties involved in this partnership (producer and company). In general, a breach of contract can occur due to variations in the assumptions of wood market price, operating costs, and forest production. To avoid the breach of contract by the company, it is essential to incorporate some of these assumptions into the strategic planning for contracting forestry outgrower schemes. In this context, the main objective of this work is to test the use of stochastic linear programming (LP) scenarios to direct the strategies for allocating forestry outgrower schemes to wood supply, given the uncertainties in the main input variables of the model (harvest cost, transportation cost, and forest production). In conclusion, the use of the Stochastic Linear Programming model was efficient in generating scenarios and additional strategic information when compared to the deterministic model, assisting in the prospection of new outgrower schemes and wood purchases. The stochastic model could support more expansive decision-making since it presents probability distributions regarding the probable values of the objective function.

Keywords: Forest Planning. Uncertainties. Stochastic model.

1 INTRODUÇÃO

O fomento florestal é uma modalidade de parceria entre produtores rurais e empresas florestais, cujo objetivo é a produção de florestas plantadas para o abastecimento de madeira, em que o produtor disponibiliza a terra ao cultivo da floresta e, em troca, recebe assistência técnica, financeira e contrato de venda garantida da madeira (RACE et al., 2009). O principal ganho do produtor é originado da receita complementar, obtida com a venda da madeira para a empresa. Indiretamente, percebem-se outras vantagens do processo, como a diversificação em sua produção e o aproveitamento de áreas improdutivas ou inadequadas para as atividades agropecuárias (RIBEIRO; MIRANDA, 2009). Em contrapartida, a empresa tem a garantia de compra da madeira e consegue assegurar sua produção sem a aquisição de terra. Os benefícios desse tipo de parceria existem e favorecem ambas as partes envolvidas, sendo uma prática muito usual no Brasil. Contudo o quão viável essa iniciativa será depende diretamente dos custos operacionais e da produtividade da floresta (RODE et al., 2014, 2015; VALDERATO et al., 2011). E é, por isso, que a melhor forma de se iniciar um contrato de fomento e assegurar sua viabilidade é realizando sua alocação de forma planejada e considerando os aspectos envolvidos (SALLES et al., 2019).

Na indústria florestal, tal qual em outros setores, o planejamento e a tomada de decisão são pontos cruciais, para a viabilidade do negócio, sendo importante responder as questões: a) como quantificar, em uma análise determinística, a confiança do resultado? B) qual o intervalo de variação do Valor Presente Líquido (VPL) considerando oscilações nos dados de mercado? C) qual o risco do investimento florestal para um determinado cenário político-econômico? Buscando responder a tais questionamentos, a incorporação dos riscos e incerteza, nos modelos matemáticos, traz benefícios aos processos de

tomada de decisão (HILDEBRANDT; KNOKE, 2011). A incerteza pode ser considerada como a ausência de informação ou a sua variabilidade. Segundo Kangas e Kangas (2004), o ponto importante é que a incerteza não seja ignorada e, sim, contabilizada para que os tomadores de decisão estejam cientes disso.

As incertezas relacionadas aos dados de entrada dos modelos podem ser levadas em consideração, na análise econômica, melhorando suas estimativas (SALLES et al., 2019). Uma forte ligação é observada entre o cotidiano de uma empresa florestal e o ambiente estocástico. Por exemplo, o abastecimento de madeira na fábrica depende de uma série de atributos, como o ritmo de crescimento da floresta. Porém, a gestão de ativos biológicos está sujeita a uma série de incertezas, uma vez que as decisões envolvem extensas áreas de plantio, horizonte de planejamento em longo prazo e diversas partes interessadas. Além disso, a operação, em áreas de terceiros com características de declividade, acesso à fazenda e condições estruturais das estradas pouco conhecidas e distantes da fábrica, também, são fontes de incertezas.

Risco pode ser definido de diversas formas. Securato (2006) conceitua o termo como sendo o grau de incerteza de um evento que pode ser expresso por uma probabilidade. Nesse sentido, a técnica de simulação de Monte Carlo aplicada a avaliação de plantios florestais auxilia na obtenção de probabilidade dos retornos financeiros e análise de risco dos empreendimentos (RIBEIRO et al., 2018; SILVA et al., 2014; SIMÕES et al., 2018).

A incorporação dessa abordagem, em modelos de otimização, é escassa nos trabalhos observados na literatura, o que justifica o esforço em sua aplicação. A inovação da técnica permite uma ampliação de possibilidades, para a tomada de decisão, ao transitar entre dois mundos metodológicos distintos. A percepção das condições estocásticas está diretamente associada à análise de sensibilidade na pós-otimização, já que, nas simulações, há perturbações na matriz final do *Simplex*, afetando a região factível e sua resposta. A grande

vantagem complementar é maior ampliação das possibilidades de se enxergar o problema, que, ao final, permite a geração de um modelo de regressão linear múltiplo, capaz de auxiliar na predição do comportamento médio do preço da madeira.

Neste contexto, a definição de métodos auxiliares de suporte à tomada de decisão pode auxiliar na gestão dos riscos. Assim sendo, o objetivo principal deste trabalho é testar o uso de cenários estocásticos de programação linear (PL), para direcionar as estratégias de alocação de fomentos florestais ao abastecimento de madeira. Os objetivos específicos do presente estudo são: (i) verificar se é possível modelar o risco financeiro, empregando uma função de distribuição de probabilidade e associá-lo aos desafios de se operar em propriedades de fomentos; (ii) comparar a recomendação dos municípios-candidatos para a alocação de novos fomentos entre um modelo de programação linear determinístico e um estocástico; (iii) quantificar o impacto das variáveis de incerteza no custo de alocação de novos fomentos; (v) comparar os resultados obtidos entre o modelo de PL determinístico e o estocástico e indicar qual deles é melhor para auxiliar as tomadas de decisão da empresa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Hierarquização do problema florestal nos contratos de fomento

A grande maioria dos problemas, envolvendo o uso de modelos de programação linear, no planejamento florestal, considera apenas uma condição determinística em escala de cenários. A proposta desses trabalhos, de modo geral, é apresentar o desenvolvimento de modelos ou métodos de resolução para problemas aplicados, deixando de lado, por não ser o foco, a exploração de possibilidades econômicas.

O enfoque principal deste trabalho é identificar o risco, associado ao resultado do planejamento florestal tradicional, que utiliza variáveis constantes. A condição hierárquica do problema é planejar a implantação anual de novas parcerias com produtores florestais, para suprir a demanda de madeira, um caminho determinístico clássico de uso da programação linear. O resultado esperado pelo modelo matemático é a indicação de áreas, para a contratação de novos fomentos entre o período de 2.020-2.025, fornecendo madeira futura, em 2.026 a 2.031, com rotação florestal de seis anos. A demanda anual de madeira está descrita na Tabela 1.

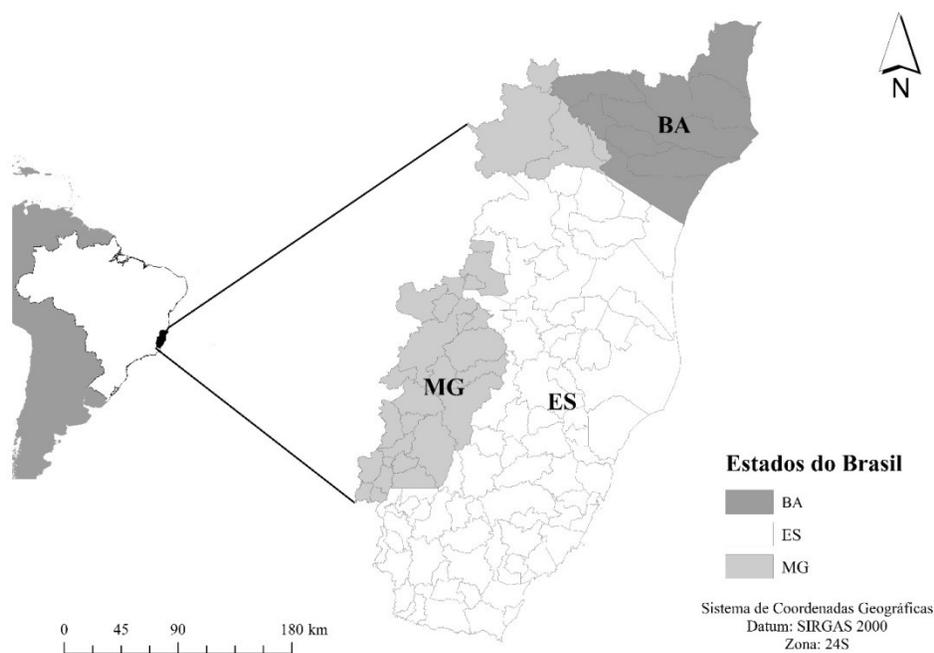
Tabela 1 - Resumo dos dados de planejamento envolvendo os custos e metas por região que compõe os coeficientes da função-objetivo no modelo determinístico.

Ano	Bahia	MG/ES	Total
2026	938	2189	3127
2027	1454	2189	3643
2028	1147	1402	2549
2029	419	1675	2094
2030	274	1550	1824
2031	114	1024	1138

Fonte: Ferreira (2016).

Dentre as inúmeras restrições técnicas, destaca-se que a empresa possui uma unidade fabril de celulose com demanda média anual de 30% de um total de, aproximadamente, 8 milhões de $m^3 \cdot ano^{-1}$ para essa origem. No ambiente de localização da fábrica, há áreas agricultáveis e disponíveis, para a contratação, com um total de 117 municípios brasileiros nos estados do Espírito Santo, Bahia e Minas Gerais (FIGURA 1). As áreas foram mapeadas e associadas a custos de produção florestal e produções volumétricas esperadas por região.

Figura 1 - Localização geográfica dos 117 municípios disponíveis, para a contratação de novos fomentos, considerados no modelo matemático de otimização.



Fonte: Da autora (2019).

Os dados utilizados, no presente trabalho, foram obtidos do trabalho de Ferreira (2016) e fornecidos pela empresa Suzano Papel e Celulose, antiga Fibria

Celulose. A estimativa do custo de implantação e manutenção da floresta ($\text{R}\$\cdot\text{ha}^{-1}$) considerou as atividades: a) preço do plantio/replanteio; b) insumos e análises; c) taxas governamentais ambientais; e, d) adiantamento do recurso no contrato com o produtor.

Os custos relacionados ao transporte foram derivados de cinco modalidades de transporte:

- 1) Rodoviário 1: transporte direto da unidade de produção até a fábrica por rodovia.
- 2) Rodoviário 2: transporte da unidade de produção até um depósito e, posteriormente, até a fábrica por rodovia.
- 3) Rodoviário e Ferroviário 1: transporte da unidade de produção via rodovia e, posteriormente, pela ferrovia 1 até a fábrica.
- 4) Rodoviário e Ferroviário 2: transporte da unidade de produção via rodovia e, posteriormente, pela ferrovia 2 até a fábrica.
- 5) Rodoviário e Marítimo: da unidade de produção via rodovia e, posteriormente, por barcaça marítima até a fábrica. Os modais podem variar por região, conforme condições técnicas, sendo calculados pela combinação das variáveis distância euclidiana, frete, combustível e pedágio (TABELA 2).

O custo da colheita foi determinado de acordo com o rendimento desta atividade nos diferentes sítios existentes. A produção média da florestal foi de $190 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, $182 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ e $162 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ para os estados Bahia (BA), Espírito Santo (ES) e Minas Gerais (MG), respectivamente. Demais custos como estradas e preço de compra da madeira foram estabelecidos de acordo com o mercado e praticados pela empresa.

Tabela 2 - Resumo dos dados de planejamento envolvendo os custos e metas por região que compõe os coeficientes da função objetivo no modelo determinístico.

Demanda (x10 ³ m ³)	Estado	Área disponível (x10 ³ · ha ⁻¹)	Modal	Custos (R\$.m ⁻³)		
				Colheita	Transporte	Outros
4.345	BA	107	2	31,20	54,88	61,66
			5	31,29	90,36	61,67
10.021	ES	252	1	45,41	65,29	63,04
			2	31,41	38,23	62,64
			3	34,87	57,14	62,90
			4	32,92	65,83	63,29
	MG	104	1	46,82	70,75	62,97
			2	32,83	56,09	62,84
			3	35,49	66,96	62,87

Fonte: Ferreira (2016).

A análise de viabilidade, na alocação dos contratos, considerou o valor presente dos custos (VPC), simulando a instalação completa do projeto até o momento de liberação da madeira (1), em que: *VPC* é o valor dos custos descapitalizados para o ano zero; *CT* é o custo total no ano *t* e *y* é a taxa de juros anual aplicada (8% a.a.).

$$VPC = \sum_{t=0}^{HP} \frac{CT_t}{(1+y)^t} \quad (1)$$

2.2 Estratégias de formulação matemática para contratos de fomento florestal

O problema matemático foi formulado no ambiente de programação computacional R (R CORE TEAM, 2016). Nesse ambiente, foram utilizados os pacotes *Triangle* (para a determinação das distribuições triangulares) (CARNELL, 2019), *LP Solve* (solver para a resolução do modelo de Programação Linear) (BERKELAAR et al., 2015). O processamento dos dados foi realizado em um Notebook com processador Intel® Core i7-6500U, com 8 GB de memória RAM.

O problema apresentado seguiu a formulação do Modelo tipo I, considerando o uso de variáveis contínuas, sendo a mesma proposta por Johnson e Scheurmann (1977).

Com base nessas condições, adotaram-se dois caminhos. O primeiro com uma abordagem determinística e o segundo, estocástica. A diferença entre os dois está no valor de seus coeficientes associados às variáveis de decisão. O modelo determinístico será solucionado uma única vez, adotando os valores dos coeficientes como os reais para o momento. Todas as análises serão realizadas para essa opção.

Já para o modelo determinístico, o uso de fatores multiplicativos aos coeficientes é empregado, alterando a matriz dos coeficientes do modelo e incorporando novas opções econômicas e produtivas. Esses modelos derivam em 1.000 processamentos, sendo alterados, a cada mudança unitária, os efeitos desejados para a análise, como custos de colheita, transporte e a produção florestal. A alteração dos fatores é guiada pela distribuição triangular, sem o controle ou tendências no resultado obtido.

2.3 Modelos matemáticos de natureza determinística

A formulação do modelo é iniciada, a partir da função-objetivo de minimização do custo de produção da madeira (Z), representada por (2), em que X_{miy} é a área (ha) de novos fomentos, a ser contratada no município m durante o ano i , utilizando o modal de transporte y . O Valor Presente dos Custos ($\text{R}\$\cdot\text{ha}^{-1}$) foi representado pela variável W_{miy} , para a o município m , no ano de contratação i , utilizando o modal de transporte y .

No presente modelo, considerou-se a possibilidade de aquisição de madeira do mercado no ano de contratação i . Essa variável foi inserida no modelo para que os cenários estocásticos pessimistas não se tornem infactíveis. Portanto, caso ocorra a combinação de diversas variáveis que inviabilizem a contratação do fomento, a compra de madeira será ativada.

A variável $H_{(i+6)}$ representa o coeficiente de desembolso em Reais (VPC), para a compra de madeira que ocorrerá no tempo $i + 6$, indicando que o pagamento ocorrerá no ano de entrega da madeira na fábrica. O preço a ser pago, nessa modalidade de compra, é de $150 \text{ R}\$\cdot\text{m}^{-3}$, valor que corresponde ao preço da madeira, colheita e transporte de madeira até a fábrica. A variável de decisão $T_{(i+6)}$ indica o volume de madeira a ser comprado, no ano $i + 6$.

A Equação (3) determina a área disponível para plantio (A_m), que corresponde à área existente em hectares para cada município m . A formulação considera as metas volumétricas de produção de madeira (4 e 5) a serem atingidas com a contratação dos novos fomentos. A demanda de madeira originada dos municípios localizados, nos estados do Espírito Santo e Minas Gerais, foi representada pela Equação (4), enquanto a demanda de madeira, proveniente do estado da Bahia, está representada pela Equação (5). Essa separação é feita pelo fato de o custo de produção de madeira, no estado da Bahia, ser mais elevado que nos demais estados, porém a contratação, nessa região, faz-se necessária à melhor distribuição da madeira entre os modais de transporte. Nessas equações, a variável v_{miy} corresponde à produção futura

estimada ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), no município m , durante o ano $i + 6$, a ser transportado pelo modal y . V e V_{BA} representam a demanda de madeira originada dos novos fomentos após os anos de contratação $i + 6$. Considerou-se uma capacidade mínima de estocagem de madeira (6), para os depósitos existentes nos modais 3, 4 e 5, sendo D_n a capacidade máxima por depósito N , em que $N = \{3 - (\text{Rodoviário e Ferroviário 1}), 4 - (\text{Rodoviário e Ferroviário 2}) \text{ e } 5 - (\text{Rodoviário e Marítimo})\}$ no ano i . O volume adotado, para a variável D_n , foi de 5.000 m^3 por depósito.

$$\text{Min}Z = \sum_m^M \sum_i^I \sum_y^{Y \in m} W_{miy} X_{miy} + \sum_i^I H_{(i+6)} T_{(i+6)} \quad (2)$$

st

$$\sum_i^I \sum_y^{Y \in m} X_{miy} \leq A_m ; \forall_m \quad (3)$$

$$\sum_m^M \sum_y^{Y \in m} v_{m(i+6)y} x_{miy} + \sum_i^I T_{(i+6)} \geq V_{(i+6)} ; \forall_i \quad (4)$$

$$\sum_m^{M \in BA} \sum_y^{Y \in m} v_{m(i+6)y} x_{miy} + \sum_i^I T_{(i+6)} \geq V_{BA(i+6)} ; \forall_i \quad (5)$$

$$\sum_m^M v_{m(i+6)y} x_{miy} \geq D_{n(i+6)} ; \forall_i ; \forall_{y \in n} \quad (6)$$

2.4 Modelo matemático de natureza estocástica

O modelo estocástico apresenta, em sua formação, o efeito aleatório de três fatores no modelo de otimização: custo de colheita (Π_A), custo de transporte (Π_B) e produção da floresta (Π_P). Esses fatores representam as possíveis oscilações, que podem ocorrer com as variáveis, afetando os coeficientes do

modelo determinístico. Dessa forma, as equações 1, 2, 4 e 5 foram alteradas, a cada nova simulação, resultando em um novo VPC (7), uma nova função-objetivo (8) e restrições (9) e (10), em substituição às formas originais. A variável de decisão W'_{miy} indica o novo VPC (7) alterado, em função dos fatores aleatórios, que multiplicam o custo de colheita (E_t) e o custo de transporte (F_t). Os demais custos, representados pelas variáveis G_t (custo de implantação) e N_t (custo de estradas e compra de madeira do fomento), mantiveram-se inalterados. O efeito aleatório, na produção da floresta, foi aplicado ao volume de madeira projetado, para o ano de corte v_m , nas restrições (9) e (10).

$$W'_{miy} = VPC = \sum_{t=0}^{HP} \frac{G_t}{(1+y)^t} + \frac{(E_t \Pi_A + F_t \Pi_B + N_t)}{(1+y)^{t+6}} \quad (7)$$

$$MinZ = \sum_m^M \sum_i^I \sum_y^{Y \in m} W'_{miy} X_{miy} + \sum_i^I H_{(i+6)} T_{(i+6)} \quad (8)$$

$$\sum_m^M \sum_y^{Y \in m} \Pi_P v_{m(i+6)y} x_{miy} + \sum_i^I T_{(i+6)} \geq V_{(i+6)} ; \forall_i \quad (9)$$

$$\sum_m^{M \in BA} \sum_y^{Y \in m} \Pi_P v_{m(i+6)y} x_{miy} + \sum_i^I T_{(i+6)} \geq V_{BA(i+6)} ; \forall_i \quad (10)$$

Os efeitos analisados por variável foram trabalhados de forma isolada ou unitária, ou seja, alterando um a cada conjunto de 1.000 simulações. Logo, para cada simulação realizada (iteração), dentro dos grupos de combinações analisados, foi sorteado um fator multiplicativo para a formação do novo modelo determinístico em análise. O valor resultante seguiu uma distribuição de probabilidade triangular, baseado na simulação de Monte Carlo. O parâmetro mínimo, central e máximo, que determinaram a distribuição triangular, para cada uma das variáveis de incerteza, foram Colheita (0.8, 1.00, 1.2), Transporte (0.8,

1.0, 1.2), Produção (0.8, 1.00, 1.2), tendo como base os valores de mercado. A distribuição triangular (11) é de fácil entendimento e comumente utilizada, na análise de incerteza, quando não há informações confiáveis acerca da distribuição de probabilidade das variáveis do modelo estocástico (SIMÕES, 2016), segundo Law (2007), considerando-se como parâmetros o valor mínimo (a), máximo (b) e central (m).

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(X-a)}{(m-a)(b-a)} & (\text{Se } a \leq X \leq m) \\ \frac{2(b-X)}{(b-m)(b-a)} & (\text{Se } m \leq X \leq b) \\ 0 & (\text{Se } X < a \text{ ou } X > b) \end{cases} \quad (11)$$

A geração de números aleatórios da distribuição triangular depende de valores obtidos pela distribuição uniforme no intervalo (0,1). Então, aplica-se o inverso da função de distribuição $F_T^{-1}(U) = T$, que retorna ao valor da variável de interesse (DIAS, 1996), conforme descrito em (12).

$$F_T^{-1}(U) = \begin{cases} \sqrt{(b-a)(m-a)u} + a, & \text{se } 0 \leq u \leq \left(\frac{m-a}{b-a}\right) \\ b - \sqrt{(u-1)(b-a)(a-b)}, & \text{se } \left(\frac{m-a}{b-a}\right) \leq u \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

As etapas descritas no presente estudo foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2016), sendo que a geração de valores aleatórios, a partir da distribuição triangular, ocorreu com o uso do pacote *Triangle* (CARNELL, 2017), comando *rtriangle*.

2.5 Avaliação econômica da estocasticidade do modelo determinístico

O resultado do modelo determinístico foi confrontado com a análise estocástica, verificando a variação nos direcionadores estratégicos: a) seleção de municípios para a prospecção de novos fomentos: foi comparado o aproveitamento de área disponível (área contratada/área disponível) dos municípios selecionados pelo modelo determinístico versus o aproveitamento dos municípios selecionados pelo modelo estocástico (área média contrata oriunda das 1.000 iterações/área disponível); b) impacto das variáveis aleatórias produção da floresta, colheita e transporte, no custo da madeira: simulou-se o impacto de cada uma das variáveis individualmente e verificou-se o seu efeito nos resultados. Para isso, foram realizadas três simulações, com 1.000 iterações cada. A partir dos dados obtidos, avaliou-se a correlação de cada uma das variáveis com o custo da madeira, utilizando o coeficiente de Pearson. Em cada simulação, foi mantido o efeito aleatório de uma única variável de incerteza; c) riscos financeiros envolvidos no abastecimento de madeira de terceiros. Avaliou-se o Intervalo de Confiança do custo médio da madeira ($\text{R}\$\cdot\text{m}^{-3}$) quanto às oscilações das variáveis aleatórias, para o cenário com o efeito conjunto das três variáveis de risco.

Com base nas simulações geradas, funções de distribuição de probabilidade foram ajustadas como *Weibull* dois parâmetros, Normal e Log-normal, empregando o pacote *Fitdistrplus* (MULLER; DUTANG, 2017) do ambiente estatístico R (R CORE TEAM, 2016). Para a avaliação da adequação das funções, foi utilizado o critério de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Avaliou-se o K-S dos modelos, rejeitando-se ou não a distribuição ao nível de significância de 0,05, aceitando-se as distribuições com valores menores que 0,05.

Um modelo de regressão linear múltiplo foi ajustado, para explicar o custo médio da madeira descapitalizado, para o ano zero (M), referente às

variações dos custos de colheita (C) e transporte (T), bem como à produção (P). Nessas condições, adotou-se o cenário, contendo as variações desses fatores. O modelo de regressão (13) adotado seguiu a estratégia de ajuste, para o conjunto dos dados, ou seja, independente da ocorrência ou não de compra de madeira (Modelo 1). Um segundo caso aplicado desconsiderou as opções de compra (Modelo 2). A avaliação do modelo de regressão considerou o uso do coeficiente de determinação ajustado, erro-padrão residual e análise gráfica dos resíduos, ajustada pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) no software R. Utilizou-se, ainda, o VIF (Variance Inflation Factors), pacote CAR (NILSSON; FOX, 2019), para mensurar a colinearidade entre as variáveis.

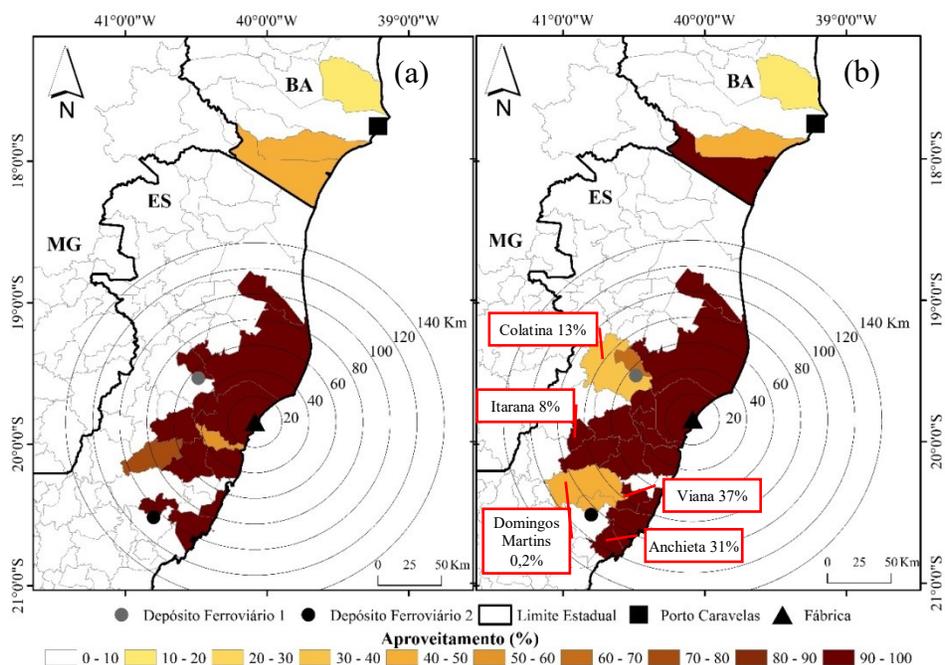
$$\ln(M) = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 C + \beta_3 P + \varepsilon \quad (13)$$

3 RESULTADOS

3.1 Seleção de municípios aptos pelos modelos determinístico e estocástico

A primeira decisão a ser tomada na contratação de novos fomentos é a escolha dos municípios ou regiões em que a empresa realizará a prospecção de terras. Ao problema proposto, no presente estudo, foram disponibilizadas áreas agricultáveis, em 117 municípios, para a alocação de novos fomentos. Por meio do modelo matemático determinístico, foi obtida a recomendação de plantio de apenas 17 municípios, totalizando 67.991 ha de área contratada, com produção média de $211 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ em sua rotação final. A Figura 2a indica os 17 municípios habilitados pelo modelo determinístico e o aproveitamento percentual de sua área disponível (área a contratar/área agricultável disponível). Por outro lado, a partir das simulações obtidas pelo modelo estocástico (cenário com efeito conjunto das variáveis), observou-se que 22 municípios podem ser habilitados em virtude de variações de custo de colheita, transporte e de produção da floresta. Nesse sentido, há uma ampliação das áreas a serem contratadas, promovendo uma quebra na lógica de concentração espacial (FIGURA 2b). Logo, comparando-se os resultados dos dois modelos, constatou-se que os 17 municípios selecionados foram sempre selecionados, ocorrendo, entretanto a ativação de cinco novos municípios em cenários com variação negativa na produção. A ativação adicional de municípios ocorreu apenas no estado do Espírito Santo, que apresenta grande vocação florestal e proximidade da fábrica. Os números, em vermelho no mapa, representam os cinco municípios adicionais, sendo: 1 – Viana; 2 – Anchieta; 3 – Itarana; 4 – Colatina; 5 – Domingos Martins (FIGURA 2b).

Figura 2 - Representação espacial dos municípios selecionados na alocação de fomentos pelo modelo determinístico (a) e estocástico (efeito conjunto das variáveis) (b).



Legenda: o gradiente de cores representa diferentes classes de aproveitamento da área disponível por município (área a contratar/área disponível). Na Figura b, estão indicados os cinco municípios adicionais selecionados e suas respectivas probabilidade de ocorrência.

Fonte: Da autora (2019).

Dentre os cinco municípios adicionais habilitados pelo modelo estocástico, o município de Viana foi o que apresentou maior probabilidade de ocorrência, aparecendo em 37% das iterações e tendo 97% de aproveitamento de área (FIGURA 2b). Os municípios de Anchieta e Colatina aparecem na sequência, com, respectivamente, 31% e 13% de probabilidade de ocorrência. Já os municípios de Itarana e Domingos Martins foram os menos representativos, com probabilidades de ocorrência de 8% e 0,2%.

Para a melhor compreensão dos fatores que levaram à recomendação adicional dos cinco municípios, será comparado o modelo determinístico versus os valores resultantes das simulações que habilitaram os municípios adicionais do modelo estocástico. O cenário determinístico utilizou como premissas os valores mais prováveis de custo de colheita, custo de transporte e produção da floresta e, por isso, ele será utilizado como referência.

A produção média da floresta, resultante do modelo determinístico, foi de 211 m³·ha⁻¹. Nas simulações do modelo estocástico, que habilitaram os municípios adicionais, a produção média da floresta apresentou reduções que variaram de -6% a -12% em relação à produção média do modelo determinístico.

No cenário determinístico, não ocorreu compra de madeira. Por outro lado, nos cenários com os cinco municípios adicionais, a compra de madeira variou de 2,7 a 4 milhões de m³.

O custo médio da madeira, resultante do modelo determinístico, foi de 128,15 R\$·m⁻³. Nas simulações do modelo estocástico, que habilitaram os municípios adicionais, o custo médio da madeira apresentou aumentos que variaram de +7% a +12% em relação ao custo da madeira do modelo determinístico.

Constata-se, portanto que os municípios adicionais foram selecionados apenas em cenários em que houve queda de produção, aumento da compra de madeira e consequente aumento do custo total da madeira, em relação ao modelo determinístico.

3.2 Modelo de regressão para a estimativa do custo total da madeira

Os resultados dos ajustes mostram que os coeficientes dos modelos ajustados foram significativos a 5% de probabilidade, indicando robustez em seu

uso. Em consequência da natureza linear múltipla, não foi detectado colinearidade e, pelos resultados do VIF, foram abaixo de dois, indicando grande contribuição na estimativa do custo médio da madeira para o fomento (TABELA 3). O erro-padrão residual obtido foi de 2,13% e 0,23%, para os modelos 1 e 2, respectivamente. O primeiro modelo (Modelo1) explica o custo levando em consideração as simulações que incorporavam compra e produção de madeira pelo fomento, na condição de efeito conjunto das variáveis. Já o segundo modelo (Modelo 2) considerou apenas as opções sem compra de madeira e com o efeito conjunto das variáveis.

Tabela 3 - Resultado dos modelos de regressão linear múltipla considerando o cenário de efeito em conjunto.

Opções	Cenários	β_0	β_1T	β_2C	β_3P	R^2_{aj} (%)	Syx (%)
Modelo 1	1.000	5,6385*	0,00351*	0,00866*	-0,00542*	94,39	2,13
VIF	-	-	1,19309	1,01124	1,19756	-	-
Modelo 2	641	5,3430*	0,00735*	0,00794*	-0,00455*	99,80	0,23
VIF	-	-	1,00879	1,00701	1,006135	-	-

Fonte: Da autora (2019).

Legenda: T-custo de transporte; C- custo de colheita e P- produção da floresta.

*- parâmetro significativo a 5% de probabilidade.

Analisando os valores absolutos dos coeficientes entre os modelos, observa-se que apresentam o mesmo comportamento. Sendo assim, indica que, independente das opções, a variação dessas três variáveis afeta, significativamente, o custo médio da madeira. Conforme o esperado, o coeficiente β_3 , que está associado à produção da floresta, tem efeito inverso na variável a ser predita e independente da opção testada. Além disso, a maior explicação da variação dos dados está relacionada à produção da floresta (Modelo 1 - 88,2% e Modelo 2 - 86,8%), custos de transporte (Modelo 1 - 8,9 % e Modelo 2 - 7,2%) e custos de colheita (Modelo 1 - 2,2% e Modelo 2 - 5,8%), conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise de variância.

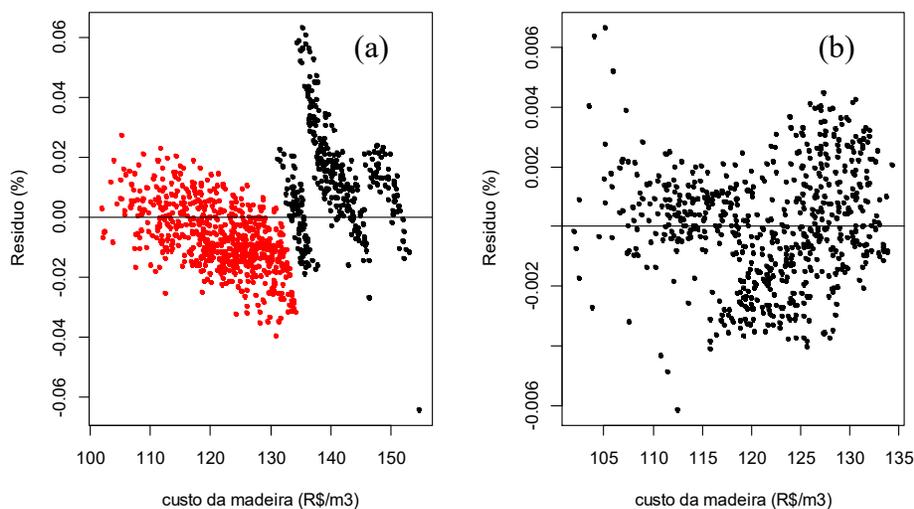
Modelo	Fonte de variação	Soma de Quadrados	Participação
1	TR	0.6809	9%
	CO	0.1731	2%
	PR	6.3683	88.2%
	Total	7.2223	100%
2	TR	0.1723	7%
	CO	0.1387	6%
	PR	2.0718	86.9%
	Total	2.3828	100%

Fonte: Da autora (2019).

Legenda: TR-custo de transporte; CO- custo de colheita e PR- produção da floresta.

A Figura 3 apresenta os gráficos de resíduos percentuais, para os modelos de regressão 1 e 2, respectivamente. Os gráficos mostraram que os resíduos apresentaram uma tendência sistemática e bem distribuída, sendo a escala do erro percentual concentrada abaixo de 0,6% o que gera uma maior acurácia no uso das equações. Contudo vieses positivos, em valores mais altos de custo da madeira, são observados no modelo 1. Essa subestimativa no custo da madeira é compreensível, pois esse modelo considera a possibilidade de aquisição de compra de madeira. O volume originado da compra de madeira tem o preço de 150 R\$.m⁻³, que é uma constante cujo valor não está associado aos custos de colheita e transporte dentro do modelo matemático. Como essas variáveis são nulas, o modelo não é capaz de predizer o custo da madeira, para a situação de compra de madeira, subestimando o custo total.

Figura 3 - Distribuição gráfica percentual dos resíduos, para explicar o custo médio da madeira, sendo (a) Independente da compra de madeira (Modelo 1), (b) Exclusivos sem a compra de madeira (Modelo 2).



Legenda: Os pontos vermelhos representam os resíduos sem o efeito da compra de madeira nos cenários do modelo 1.

Fonte: Da autora (2019).

3.3 Efeito das variáveis aleatórias na compra de madeira

A quantificação do efeito das variáveis custo de colheita, custo de transporte e produção da floresta foram medidas na ativação de compra de madeira pelo modelo estocástico. Os efeitos foram isolados e, separadamente, foi possível identificar seus impactos, tendo assim seus efeitos puros no valor da função-objetivo (FIGURA 4). Logo, por meio do coeficiente de correlação de Pearson, constatou-se uma forte relação com o custo total da madeira. Dessa forma, como esperado, os custos de colheita e transporte apresentaram correlação positiva e valores acima de 0,97. De igual modo, foi observado, para a produção local, porém com sentido contrário a esse comportamento. Isto é,

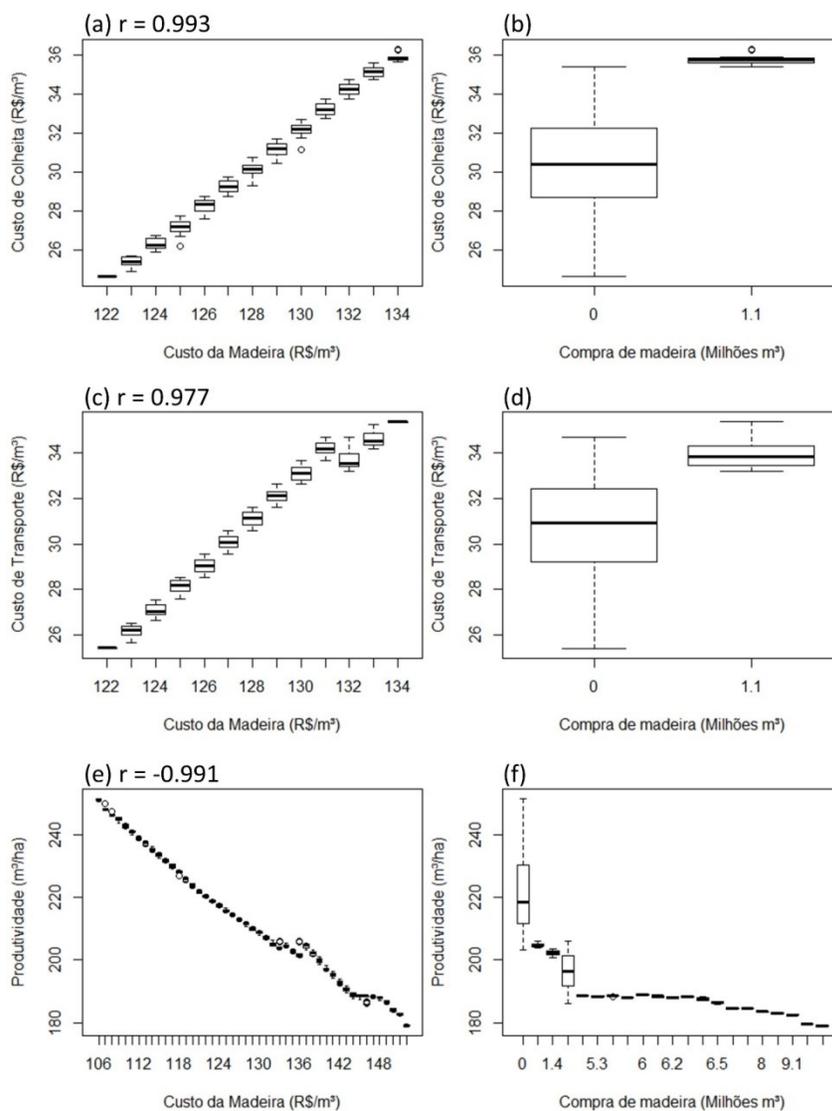
quando a produção é aumentada, há reduções unitárias no preço da madeira (FIGURA 4e).

Avaliando-se o efeito isolado de cada uma das variáveis, na ativação da compra de madeira, verificou-se que a oscilação no custo de colheita ativou 1,1 milhões de m³ de compra de madeira em 15 das 1.000 iterações realizadas (FIGURA 4b). A compra foi habilitada para custos médios de colheita iguais ou maiores a 35,41 R\$.m⁻³. A ativação da compra de madeira ocorre, quando o aumento da variável aleatória é maior ou igual a 16,86%, valor percentual que corresponde ao fator aleatorizado, a partir da distribuição triangular. Já quanto à variável custo de transporte, houve ativação de 1,1 milhões de m³ de compra de madeira em 98 das 1.000 iterações realizadas (FIGURA 4d). A compra foi habilitada para custos médios de transporte iguais ou maiores a 33,19 R\$.m⁻³. A ativação da compra de madeira ocorre, quando o aumento da variável aleatória, ou fator aleatório, for maior ou igual a 11,3%. Por fim, ao analisar a variável produção da madeira, verifica-se a ativação de compra de madeira na ordem de 1,2 a 10,1 milhões de m³, em 339 das 1000 iterações realizadas (FIGURA 4f). De maneira geral, a compra foi habilitada, para produções médias iguais ou menores que 206,02 R\$.m⁻³ e fator sorteado menor ou igual a 4%.

Os fatores aleatórios mencionados de 16,86%, 11,3% e 4% são os fatores que inviabilizam a contratação de municípios distantes e com baixa produção, sendo mais vantajosa a aquisição de madeira de mercado a 150 R\$.m⁻³. Como exemplo, temos o município de Nova Viçosa, que foi desabilitado com esses fatores, por apresentar raio médio de transporte relativamente alto (251,3 km), alto custo de transporte e produção baixa (184,73 m³.há⁻¹).

Figura 4 - Representação gráfica da correlação entre as variáveis aleatórias custo de colheita (a), custo de transporte (c) e produção da floresta (e)

versus o custo médio da madeira. Gráficos box plot que representam o impacto das variáveis aleatórias custo de colheita (b), custo de transporte (d) e produção da floresta (f) na aquisição de compra de madeira de mercado.



Fonte: Da autora (2019).

3.4 Valor presente dos custos e funções de densidade de probabilidade

O resultado da função-objetivo obtido pelo modelo determinístico foi de R\$ 931.317.797 com tempo de processamento de 5,43 segundos. No caso do modelo estocástico, para as simulações adotadas, as estatísticas descritivas das séries da função- objetivo e seu tempo de processamento estão representados na Tabela 5. Os valores gerados foram modelados por uma função de distribuição de probabilidade, dando destaque à distribuição normal, que apresentou melhor aderência, quando comparado com *Weibull 2P* e Lognormal, independente do cenário utilizado. Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, apenas *Weibull 2P* não apresentou aderência a 5% de probabilidade.

Avaliando os resultados pelas estatísticas descritivas, o efeito conjunto das variáveis resultou em maior desvio-padrão (R\$ 81.058.466), coeficiente de variação (8.69%) e amplitude dos dados, sendo seus valores mínimo e máximo, na ordem de R\$ 741.258.337 e R\$ 1.124.205.396, respectivamente (TABELA 5). Isso significa que esse cenário apresenta maior risco financeiro que os demais. Segundo Laponi (2007), quanto menor for o desvio-padrão mais os valores simulados estarão próximos a seu valor esperado. Portanto, quanto maior for o desvio-padrão, maior será o risco. Observou-se que a média do VPC, para essa simulação, foi superior em relação às demais (R\$ 932.445.778). Comparando-se os VPCs médios dos cenários “Efeito Conjunto” e “Produção”, observou-se que os valores foram próximos, com uma pequena diferença de 0.01% entre eles. Por outro lado, o cenário “Produção” resultou em menores valores de desvio-padrão (R\$ 77.129.912), coeficiente de variação (8.27%) e amplitude dos dados (R\$ 334.027.871), fato que já era esperado, uma vez que esse cenário apresenta menor número de variáveis aleatórias. Na simulação, em que o custo de transporte foi aleatorizado, individualmente, verificou-se o menor valor médio para o VPC (R\$ 931.296.236), desvio-padrão (R\$ 17.568.203) e

coeficiente de variação (1.88%), dentre as variáveis avaliadas. Esse cenário é classificado como sendo o de menor risco financeiro. Por outro lado, a variável custo de colheita, quando aleatorizada, resultou no segundo menor valor médio de VPC (R\$), desvio-padrão (R\$ 18.250.830) e coeficiente de variação (1,95 %).

O valor que mede a simetria das caudas da distribuição dos dados é a obliquidade (*Skewness*) a qual apresentou valores próximos a zero, em todas as simulações. Ou seja, há uma relativa simetria, na distribuição dos dados, pois o número de valores acima e abaixo da média é próximo. A *Kurtose* indica o grau de concentração dos valores da distribuição em torno do centro dessa distribuição. A variação do custo de transporte e colheita apresentaram resultados com maior curtose, ou seja, maior concentração de valores no centro da distribuição (TABELA 5).

Tabela 5 - Estatísticas descritivas para os cenários avaliados. Teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov) e estimativas dos parâmetros resultantes dos ajustes das funções Weibull 2P, Normal e Lognormal para o VPC dos cenários avaliados.

(continua)

Estatística descritiva	Cenários				
	Determinístico	Efeito conjunto	Colheita	Transporte	Produção
VPC (R\$)	931.317.797	-	-	-	-
Média (R\$)	-	932.445.778	932.115.600	931.296.236	932.358.720
Mediana (R\$)	-	930.321.472	932.170.400	931.580.488	929.202.570
Desvio Padrão (R\$)	-	81.058.466	18.250.830	17.568.203	77.129.912
Valor Mínimo (R\$)	-	741.258.337	889.587.900	889.177.914	770.136.782
Valor Máximo (R\$)	-	1.124.205.396	974.766.100	971.041.958	1.104.164.653
CV (%)	-	8,6931	1,9580	1,8864	8,2726

Tabela 5 - Estatísticas descritivas para os cenários avaliados. Teste de aderência (Kolmogorov-Smirnov) e estimativas dos parâmetros resultantes dos ajustes das funções Weibull 2P, Normal e Lognormal para o VPC dos cenários avaliados.

(conclusão)

Estatística descritiva	Cenários				
	Determinístico	Efeito conjunto	Colheita	Transporte	Produção
Quartil 1 (R\$)	-	871.332.228	919.243.600	918.937.283	877.528.436
Quartil 3 (R\$)	-	992.747.117	945.443.500	943.551.459	989.402.780
Skewness	-	0,01	- 0,04	- 0,02	0,04
Kurtosis	-	2,32	2,35	2,37	2,27
P (X<= VPC Deter)	-	49,44%	48,26%	50,05%	49,46%
Processamento (segundos)	5	3.180	3.360	3.420	3.240
Número de opções com compra de madeira	-	359	15	98	339
Weibull 2P	K-S	0,052	0,057	0,056	0,055
	$\beta 1$ (Shape)	11,89	54,65	57,22	12,96
	$\beta 2$ (Scale) x10 ⁶	968,47	940,68	939,54	966,70
Normal	K-S	0,042	0,027	0,029	0,033
	Média x10 ⁶	932,44	932,11	931,29	932,35
	Desvio padrão x10 ⁶	81,01	18,24	17,55	77,09
Lognormal	K-S	0,040	0,027	0,029	0,033
	$\beta 1$ (Meanlog)	20,65	20,65	20,65	20,65
	$\beta 2$ (Sdlog)	0,09	0,02	0,02	0,08

Fonte: Da autora (2019).

Em relação à probabilidade de ocorrência do VPC determinístico, dentro das distribuições de frequência obtidas, observaram-se valores próximos a 50% para os quatro cenários estocásticos. Resultado que já era esperado, uma vez que as variáveis determinísticas (custo de colheita, transporte e produção florestal)

foram utilizadas como inputs dos modelos estocásticos, representadas pelos valores mais prováveis das distribuições triangulares. Os valores obtidos, para o intervalo de ocorrência do risco, podem auxiliar na percepção dessa amplitude, quando simulados novos cenários determinísticos para o mesmo problema.

4 DISCUSSÃO

No presente estudo, foi possível desenvolver um modelo de simulação, para a alocação de fomentos florestais, obedecendo às restrições estratégicas de abastecimento de madeira e à capacidade dos modais de transporte. O modelo foi capaz de gerar centenas de simulações, de forma ágil, permitindo alterações, nas variáveis de incerteza, de maneira simples e refletindo as condições de risco com que o gestor se depara na vida real. É importante destacar que o modelo de simulação estocástica, desenvolvido no presente estudo, forneceu um grande volume de dados e que as métricas apresentadas, neste estudo, não esgotam as possibilidades de sua utilização, para outras análises ligadas ao abastecimento de madeira.

No contexto do presente trabalho, o modelo possibilitou indicar para quais municípios devem ser direcionados os investimentos de produção florestal sem ultrapassar os custos máximos estabelecidos para o custo total da madeira (150 R\$.m³), ao contribuir com um crescimento sustentável da indústria de base florestal, em um mercado, cuja concorrência apresenta escala global.

4.1 Seleção de municípios aptos pelos modelos determinístico e estocástico

Os plantios de eucalipto, para a produção de madeira em larga escala, são uma realidade no Brasil. Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2018), dos 7,84 milhões de hectares de árvores plantadas, no Brasil, em 2016, 34% pertencem às empresas do segmento de celulose e papel. Em segundo lugar, com 29%, encontram-se proprietários independentes e pequenos e médios produtores do programa de fomento florestal, que investem em plantios florestais para comercialização da madeira *in natura*. Reafirma-se que grande parte do abastecimento de madeira dessas empresas origina-se de pequenos e

médios produtores rurais. A literatura mostra que o estado do Espírito Santo é uma região propícia à expansão de florestas plantadas no Brasil. Santos et al. (2017) utilizaram a Lógica *Fuzzy*, para simular o plantio de diferentes espécies florestais e prospectar áreas adequadas à instalação de indústrias de painéis de madeira no Estado do Espírito Santo. Por meio da metodologia utilizada, os autores identificaram regiões com potencial muito bom (2,5% da área do estado) e bom (6% da área do estado) para o plantio das espécies de eucalipto. Essas informações podem ser confrontadas com o presente trabalho, mais no sentido de adequação de área, para pré-processamento, em nível apenas silvicultural, já que não adentra aos modelos de planejamento florestal. Contudo, seus resultados corroboram com o observado no presente estudo, pois o estado do Espírito Santo possui um grande potencial florestal para atender a demanda das indústrias de celulose e serraria.

Regiões do estado do Espírito Santo, também, mostraram-se viáveis ao cultivo de eucalipto em parcerias com fomentos florestais, conforme avaliado por Chichorro et al. (2017). Ao Sul da Bahia, Valderato et al. (2011), também, comprovaram a viabilidade dessa modalidade de contratação. No presente estudo, foram consideradas áreas agricultáveis, em 117 municípios dos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Bahia, para a alocação de novos fomentos florestais. Observou-se que 17 desses municípios foram indicados como sendo viáveis economicamente, tanto pelo modelo determinístico quanto pelo modelo estocástico (FIGURA 2). Dentre os 17 municípios selecionados por ambos os modelos, 14 deles estão situados no estado do Espírito Santo (FIGURA 2). Três deles estão situados no Estado da Bahia (FIGURA 2). Além dos 17 municípios selecionados pelo modelo determinístico, o modelo estocástico habilitou outros cinco municípios, em pelo menos uma das 1.000 simulações realizadas. Em 37% dos cenários, o município de Viana precisou ser habilitado, em consequência da redução de 6% na produção da floresta, quando comparado ao modelo

determinístico. Essa queda na produção, além de habilitar um número maior de municípios, ainda, gerou uma compra de madeira extra de, aproximadamente, 2,7 milhões de m³. Um aumento de 7% no custo total da madeira foi observado, em decorrência dessas oscilações (de 128,15 R\$.m⁻³ - modelo determinístico para 137,42 R\$.m⁻³ - cenários estocásticos com presença do município de Viana). O município de Domingos Martins apresentou pouca probabilidade de ser habilitado (0,2%), sendo sua ativação, quando houve uma queda de 9% na produção florestal, em relação ao cenário mais provável. Em consequência, ocorreu uma compra de madeira próxima a 4 milhões de m³ e um aumento de 12% no custo total da madeira. De maneira geral, todos os cinco municípios excedentes, apresentados pelo modelo estocástico, foram habilitados, em cenários com redução da produção, aumento na compra e no custo da madeira. Fica evidente que uma formação adequada dos plantios irá refletir na redução dos gastos futuros com a compra de madeira. Inúmeros métodos vêm sendo aplicados, para ter diagnósticos rápidos da qualidade do plantio e, assim, evitar perdas na produção florestal (HAKAMADA et al., 2015a, 2015b). Uma condução assertiva, conciliada ao controle de pragas e doenças (MELO, 2017), somada a bons materiais genéticos adaptados (GADELHA et al., 2015; JARDIM et al., 2017) e espaçamentos ideais, para cada sítio (ELOY et al., 2018; NAGAR et al., 2015), reflete condições ótimas para a cultura do eucalipto.

Informações adicionais disponibilizadas pelo modelo estocástico são relevantes, por indicar qual seria o município a ser contratado e qual custo ele teria, caso houvesse um cenário de escassez de madeira, possibilitando à empresa antecipar sua prospecção de terras nessa região. A prospecção envolve um longo trabalho de aproximação e diálogo com os proprietários do município-alvo. Analisando as Figura 2a e 2b, é possível verificar algumas tendências na escolha dos municípios. A primeira delas é que a maioria dos municípios habilitados possui 100% de aproveitamento, mesmo com o efeito aleatório nos

dados de entrada. Isso significa afirmar que esses municípios apresentam baixo risco de insucesso, em sua contratação e que a estratégia de contratação da empresa deve ser-lhes direcionada inicialmente.

Em relação à modalidade de transporte, verifica-se que, nos municípios com alto aproveitamento de terra, o modal de transporte predominante é o Rodoviário 1. Os demais modais apresentam custo de transporte muito elevado e são economicamente inviáveis. Esses foram ativados apenas para cumprir a restrição mínima de transporte estabelecida no modelo. Contudo existe a expectativa de melhoria, nos custos, com a expansão/melhoria dos modais pouco atrativos, caso os estados invistam melhor em infraestrutura.

4.2 Escolha dos modais de transporte

No presente estudo, foram disponibilizados cinco modais de transporte de madeira no modelo matemático. Dos cinco, quatro deles consideram a utilização de depósito intermediário para transbordo da madeira (Modais 2, 3, 4 e 5). O uso desses depósitos intermediários é comum, quando as estradas de acesso são declivosas e estão em más condições, e os veículos de grande porte não conseguem chegar à beira do talhão. Isso requer o uso de depósitos de armazenamento intermediários, a partir dos quais a madeira é novamente carregada e transportada até seu destino final (ACKERMAN; PULKKI, 2018). O modal 2 se enquadra na situação mencionada por viabilizar o acesso a áreas com declividade acima de 24°. Nesse caso, o transporte é realizado com um caminhão de pequeno porte (35 toneladas) da floresta até o depósito, que depois segue em veículo com maior capacidade de carga (48 toneladas) até a fábrica.

Nas simulações realizadas com o efeito conjunto das variáveis, o modal Rodoviário 2 foi habilitado, em apenas dois municípios, situados no estado do Espírito Santo (Itarana e Santa Teresa). O município de Santa Teresa teve o

maior volume transportado por esse modal (1.330,51 m³), mas mesmo assim o volume foi pouco expressivo. A maior parte do volume foi transportado pelo modal 1 (rodoviário sem transbordo), cujo custo é 29% inferior (25,90 R\$.m⁻³ versus 36,70 R\$.m⁻³). Ackerman e Pulkki (2018) avaliaram a viabilidade econômica de substituição ao transbordo, no transporte florestal, por opções diretas na África do Sul. Os resultados mostraram reduções de 0,82 \$US.m⁻³ no custo da madeira ou em termos absolutos em \$US 4.32 milhões.

Schettino et al. (2018) avaliaram a viabilidade financeira do transporte de madeira com caminhões leves e médios realizado por pequenos produtores florestais. O caminhão leve, na versão (7.95 ton), mostrou-se o mais viável para o transporte de madeira, para uma distância máxima de 125 km e em florestas com produção de até 250 m³.ha⁻¹. Nas florestas com produção acima de 300 m³.ha⁻¹ o caminhão médio (12.85 ton) mostrou ser o mais viável, economicamente, para distâncias a partir de 150 km. No presente estudo, tanto no modelo determinístico quanto no estocástico houve um predomínio, na utilização do modal 1, representando, em média, 92% do volume de madeira transportada. Dentre os municípios selecionados, o custo médio do modal 1 foi 21% inferior ao valor médio dos demais modais. Portanto pode-se concluir que a escolha dos demais modais foi feita, para atender as restrições impostas pelo modelo e atender o transporte mínimo de madeira.

4.3 Modelagem do custo total da madeira

Realizar a predição do custo da madeira de fomento florestal, em função das oscilações nos custos de colheita e transporte, é uma proposta inovadora e ainda pouco documentada na literatura. De forma geral, os estudos

econômicos, apresentados no setor florestal até o momento, têm como principal objetivo realizar a previsão do preço da madeira e da produção da floresta, a partir de dados históricos destas variáveis (ARAÚJO JUNIOR et al., 2016; SALLES et al., 2019; SOARES et al., 2010). Esses estudos existentes são de extrema relevância, já que as incertezas inerentes ao crescimento da floresta e às flutuações do preço da madeira comprometem o cálculo dos critérios econômicos de avaliação florestal. Segundo estudo realizado por Holopainen (2010), a oscilação resultante do efeito conjunto de erros de inventário, erros de modelos de crescimento e produção, bem como a flutuação no preço da madeira, podem gerar desvios de 6,4 a 12,6% nos retornos financeiros do empreendimento florestal.

Atualmente, o modelo praticado de contratação de fomentos, nas grandes empresas florestais brasileiras, segue a regra do preço pré-determinado, no momento de sua contratação (CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS - CIF, 2019). Logo, sem a flexibilidade do preço da madeira, ao longo do tempo, exceto por reajustes pré-estabelecidos em contato, a empresa precisa garantir que os demais custos irão viabilizar o negócio e gerar as margens de lucro desejadas. Nesse contexto, otimizar os demais custos e garantir que os fomentos sejam alocados, nas regiões mais viáveis economicamente, são etapas fundamentais no planejamento estratégico das empresas. Discriminá-los e entender seu comportamento ajuda na redução dos riscos.

A formação do custo total da madeira no fomento segue a mesma lógica do praticado na empresa, exceto em condições de entrega da madeira pelo produtor rural. Pode-se afirmar que os custos, quando avaliados pela ótica do produtor florestal, estão distribuídos em 34,90% (custo da terra), 23,34% (implantação), colheita (20,67%) e transporte (21,09%), segundo Chichorro et al. (2017). No presente estudo, pela ótica da empresa, os custos de colheita e transporte somados representaram 48% e 46% do custo da madeira, para os

modelos determinístico e estocástico (valor médio), respectivamente. A variação existente se encontra em decorrência das imposições dos modelos de programação linear via restrições. Por outro lado, o custo de compra de madeira é uma constante no valor de $150,00 \text{ R}\$.m^{-3}$ no modelo de programação linear.

Nos cenários com a compra de madeira de mercado, os custos de colheita e transporte são nulos, já que pela regra de contrato a madeira é levada até a fábrica pelo fornecedor. Assim, a partir do modelo de regressão ajustado, percebe-se que a distribuição dos resíduos na região dos preços entre $131,08 \text{ R}\$.m^{-3}$ a $154,70 \text{ R}\$.m^{-3}$ apresenta uma leve superestimativa quando adicionada a opção de compra (FIGURA 3a). Por outro lado, o modelo de regressão, sem a opção de compra de madeira de mercado, apresentou estimativas mais satisfatórias (FIGURA 3b), que se justifica pelo fato de que, nesse último modelo, todo o volume contratado de madeira está associado a um custo de colheita e transporte, o que aumenta a assertividade das estimativas. Na prática, a aplicação da metodologia de predição proposta permite mostrar de forma ágil o impacto dos principais fatores de incerteza do custo da madeira, fornecendo maior subsídio para a tomada de decisão dos gestores florestais. Segundo Kangas e Kangas (2004), é relevante estar ciente do maior número de fontes de incerteza em uma análise de decisão. E, independente da teoria de incerteza utilizada, responder a questões práticas para a tomada de decisão, é de primordial importância.

4.4 Comportamento das variáveis aleatórias no custo da madeira

Conforme esperado, o custo de colheita, transporte e produção florestal foram altamente correlacionadas ao custo total da madeira. Porém a oscilação no custo da madeira, causada pela produção da floresta, apresentou um coeficiente

significativo a 5% e com valor negativo (TABELA 3). Segundo estudo realizado por Rezende et al. (2006), a variação de $\pm 20\%$ na produção da floresta não inviabiliza a rentabilidade da venda da floresta em pé para os fomentados. Chichorro et al. (2017) identificaram que a produção média de $116 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, na idade de sete anos, é suficiente para cobrir os custos de um programa de Produtor Florestal no Espírito Santo. No modelo estocástico, avaliado no presente estudo, os valores de produção média da floresta oscilaram entre $174,13 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ a $252,22 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ para a idade de seis anos.

Segundo o IBÁ (2018), em 2018, o Brasil apresentou uma produção média de $36 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ para os plantios de eucalipto, o que corresponde, aproximadamente, a $216 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, considerando uma idade de corte de seis anos. Porém, no caso do fomento florestal, os valores de produção são ainda um pouco mais incertos e, muitas vezes, sem o monitoramento via inventário florestal contínuo. Apesar da assistência técnica fornecida pela empresa, os proprietários podem realizá-la de diferentes formas e, conseqüentemente, reduzir a produção do povoamento (RODE et al., 2015), como, por exemplo, o corte seletivo em idades inferiores à rotação. Essa variável afeta negativamente a colheita, caso o volume individual das árvores não seja o ideal, para o sítio e idade (BURGIN; LOPES; RODRIGUES, 2017; MACHADO, 2014). Um comportamento inverso é visto no transporte (KOIRALA et al., 2018), pois quanto maior o volume transportado menor será seu custo unitário. Os principais fatores que afetam o transporte são o custo de operação do caminhão, limitações de peso, distância de transporte e condições das estradas. Resumidamente, conclui-se que o custo final da madeira pode ser influenciado por dois grupos de fatores distintos, os não controláveis (característica da floresta) e os controláveis (associados à eficiência na operação) (SOUZA; PIRES, 2009). E a simulação dos fatores não controláveis pode ser representada pela variação de produção da floresta.

4.5 Comportamento das variáveis aleatórias na compra de madeira

A disponibilização de compra de madeira pelo preço de 150 R\$.m⁻³ teve o objetivo de evitar a alocação de novos fomentos em regiões muito caras. Além disso, a ativação de compra de madeira mostrou-se útil, para avaliar a sensibilidade das variáveis de incerteza, na pós-otimização do modelo de programação linear. A partir dos resultados (FIGURAS 4b, 4d e 4f), identifica-se maior ativação da compra de madeira quando a variável aleatorizada foi a produção da floresta. Como já era esperado, isso ocorre, porque a produção florestal tem impacto direto em todos os custos operacionais. A segunda variável mais sensível à ativação de compra de madeira foi o custo de transporte. A maior sensibilidade do custo de transporte ocorre, quando é maior sua participação no custo total da madeira. Por exemplo, o município de Nova Viçosa, que possui distância média de 251 km, apresenta custo de colheita 33% menor que o custo de transporte (30,98 R\$.m⁻³ colheita x 46,29 R\$.m⁻³ transporte). Contudo, pelo alto custo de transporte, para esse município, foi substituído pela compra de madeira, quando houve 11% de aumento no custo de transporte.

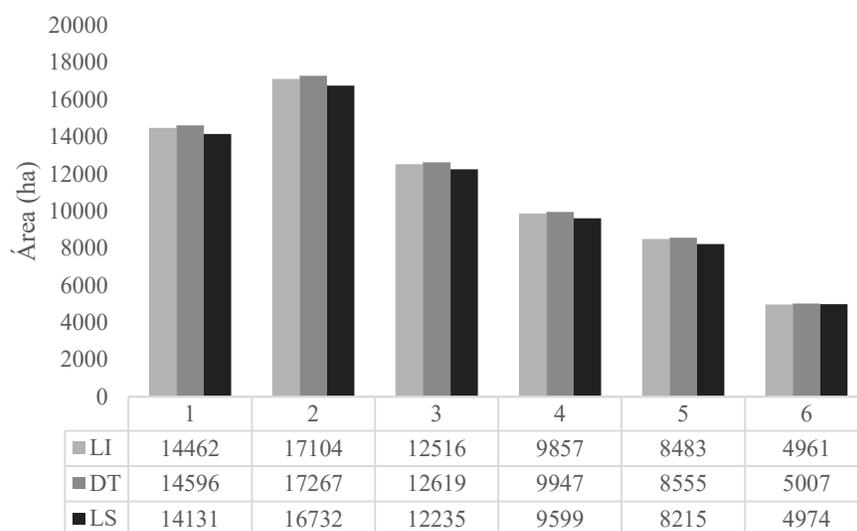
Levando em consideração as análises mencionadas, conclui-se que as oscilações no custo da madeira foram mais sensíveis do maior para o menor, pela produção florestal, custo de transporte e custo de colheita.

4.6 Análise do comportamento estocástico

Utilizando como referência os resultados do modelo estocástico com efeito conjunto das variáveis, é possível realizar uma análise exploratória pós-otimização dos dados. As 1.000 simulações realizadas resultaram não só em uma

série de Valor Presente dos Custos, mas também em uma base robusta de dados, referentes à área a ser contratada, compra de madeira, produção florestal, custo de colheita e transporte. Pressupondo essa perspectiva, uma primeira análise mostra que, com uma probabilidade de 95%, o VPC médio, para a alocação de novos fomentos, situa-se no intervalo de R\$ 927.415.700 a R\$ 937.475.800. A Figura 5 representa a área de contratação, nos horizontes de planejamento de um a seis, para o cenário determinístico e para os dois cenários que representam os limites inferior (LI) e superior do intervalo de confiança (LS).

Figura 5 - Área a ser contratada por horizonte de planejamento, envolvendo o cenário determinístico e o estocástico (efeito conjunto de variáveis), que representam os limites superior e inferior do Intervalo de Confiança a 95%.



Legenda: LI - área contratada para o cenário correspondente ao Limite Inferior do Intervalo de Confiança; LS - área contratada para o cenário correspondente ao Limite Superior do Intervalo de Confiança; DT - área contratada para o cenário determinístico.
Fonte: Da autora (2019).

Além de identificar o comportamento do VPC, conhecer o intervalo de confiança do custo médio da madeira transmite maior segurança aos investidores e gestores florestais. Os custos médios da madeira no LI e LS foram de 127,69 R\$.m⁻³ e 128,95 R\$.m⁻³, respectivamente.

Na literatura, não existem estudos semelhantes que avaliem a alocação de fomentos direcionada pela avaliação do custo da madeira da empresa, a partir de um custo da madeira pré-determinado. Apenas como referência, mas não de forma comparativa, podemos citar valores da literatura obtidos, a partir de estudos de viabilidade econômica do fomento, em outros contextos. Por exemplo, no trabalho realizado por Rode et al. (2014), encontraram-se

prescrições de manejo viáveis, para fomentos a distâncias de até 160 km da fábrica, no estado de Minas Gerais, considerando-se uma taxa de juros de 5%. Segundo Silva et al. (2007), em um raio de transporte de 100 km, é viável implantar reflorestamentos para os diversos veículos de transporte analisados (Caminhão truck, biminhão, bitrem art, treminhão, tritrem e rododrem). Salles et al. (2019) avaliaram a incerteza no Valor Presente Líquido (VPL) de fomentos florestais pela abordagem Bayesiana. Nesta metodologia, as probabilidades, para os valores de entrada, foram definidas a partir de distribuições com parâmetros calculados, especificamente, com base em dados amostrais. Porém essa técnica não define níveis de probabilidade aos valores de saída, o que impossibilita a análise de risco dos projetos (HILDEBRAN; KNOKE, 2011). Como resultado, Salles et al. (2019) obtiveram VPLs médios de 3.771,60 R\$.ha⁻¹ e 8.398,13 R\$.ha⁻¹, para os *inputs* de preço mínimo e máximo obtidos pelas distribuições. Rezende et al. (2006) realizaram a análise de sensibilidade, para o VPL de fomentos florestais, em Minas Gerais. Para a venda de madeira em pé, os autores obtiveram resultados viáveis aos produtores com produção da floresta acima de 200 mst.ha⁻¹ e preço pago pela madeira acima de 18 R\$.mst⁻¹.

5 CONCLUSÕES

Constatou-se que é possível modelar o risco financeiro, empregando uma função de distribuição de probabilidade e associá-la aos desafios de se operar em propriedades de fomentos.

Verificou-se que a recomendação dos municípios candidatos à alocação de novos fomentos foi distinta entre os modelos determinísticos e estocásticos. O modelo estocástico apresentou uma mudança na lógica de contratação, para os cenários apresentados, sendo a produção florestal a variável mais influente no modelo.

Ambos os modelos, determinístico e estocástico, mostraram-se importantes para auxiliar as tomadas de decisão relacionadas a contratação de fomentos florestais. O modelo determinístico foi capaz de fornecer as recomendações ótimas de abastecimento que devem ser colocadas em prática dentro da empresa, enquanto o modelo estocástico forneceu recomendações adicionais para auxiliar a prospecção de novos fomentos e compras de madeira, garantindo que o abastecimento de madeira da fábrica seja atendido frente a incertezas. Além disso, o segundo modelo forneceu uma base de dados robusta, para direcionar as estratégias de alocação de fomentos, permitindo a realização de análise de cenários, análise de risco financeiro e predições de variáveis.

REFERÊNCIAS

- ACKERMAN, P. A.; PULKKI, R. E. Economic impact of secondary intermediate transport of pulpwood to truck transport depots in South Africa: three case studies. **International Journal of Forest Engineering**, Swedish, v. 12, n. 2, p. 53-63, 2018.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Modelagem e prognose do preço de carvão usando um sistema neuro-fuzzy. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 2, p. 151-158, 2016.
- BERKELAAR, M. et al. **lpsolve**: interface to 'Lp_solve' v. 5.5 to Solve Linear/Integer Programs. R Package Version 5.6.13. 2015. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/lpSolve/lpSolve.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- BURGIN, M. R. B.; LOPES, E. S.; RODRIGUES, C. K. Efeito do volume individual e declividade do terreno na produtividade do *harvester* no desbaste de pinus. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 13, n. 4, p. 322-328, 2017.
- CARNELL, R. **Triangle**: provides the standard distribution functions for the triangle distribution. R Package Version 0.11. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/triangle/triangle.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- CENTRO DE INTELIGÊNCIA EM FLORESTAS. **Fomento**. Disponível em: <<http://www.ciflorestas.com.br/texto.php?p=fomento>>. Acesso em: 10 out. 2019.
- CHICHORRO, J. F. et al. Custos e índices econômicos de povoamentos de eucalipto do Programa Produtor Florestal no Espírito Santo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 92, p. 447-456, out./dez. 2017.
- DIAS, C. T. S. **Planejamento de uma fazenda em condições de risco**: programação linear e simulação multidimensional. 1996. 100 p. Tese (Doutorado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1996.
- ELOY, E. et al. Effect of age and spacing on biomass production in forest plantations. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 42, n. 2, p. 1-11, 2018.

FERREIRA, M. A. **Planejamento otimizado da produção de madeira no fomento florestal**: estudo de caso. 2016. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

GADELHA, F. H. L. et al. Produtividade de clones de eucaliptos em diferentes sistemas de manejo para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 83, p. 263-270, jul./set. 2015.

HAKAMADA, R. E. et al. Uniformidade entre árvores durante uma rotação e sua relação com a produtividade em *Eucalyptus* clonais. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 3, p. 465-472, 2015a.

HAKAMADA, R. E. et al. Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 105, p. 27-39, 2015b.

HILDEBRANDT, P.; KNOKE, T. Investment decisions under uncertainty-A methodological review on forest science studies. **Forest Policy and Economics**, London, v. 13, n. 1, p. 1-15, 2011.

HOLOPAINEN, M. Comparison of various sources of uncertainty in stand-level net present value estimates. **Forest Policy and Economics**, London, v. 12, n. 5, p. 377-386, 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Sumário Executivo/Relatório Anual**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/digital-sumarioexecutivo-2018.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

JARDIM, J. M. et al. Avaliação da qualidade e desempenho de clones de eucalipto na produção de celulose. **O Papel**, São Paulo, v. 78, n. 11, p. 122-129, nov. 2017.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMANN, H. L. Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives: discussion and synthesis. **Forest Science**, Bethesda, v. 18, n. 1, p. 1-31, 1977.

KANGAS, A. S.; KANGAS, J. Probability, possibility and evidence: approaches to consider risk and uncertainty in forestry decision analysis. **Forest Policy and Economics**, London, v. 6, n. 2, p. 169-188, 2004.

KOIRALA, A. et al. Annotated bibliography of the global literature on the secondary transportation of raw and comminuted forest products (2000-2015). **Forests**, Basel, v. 9, n. 7, p. 1-28, 2018.

LAPPONI, J. C. **Projetos de investimentos na empresa**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LAW, A. M. **Simulation modeling & analysis**. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

MACHADO, C. C. **Colheita florestal**. 3. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2014. 543 p.

MELO, M. R. **Influência da bacteriose foliar e a desfolha artificial em mudas de eucalipto no crescimento pós-plantio**. 2017. 54 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônômicas)-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2017.

MULLER, M. L. D.; DUTANG, C. **Fitdistrplus**: help to fit of a parametric distribution to non-censored or censored data. R Package Version 1.0-9. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/fitdistrplus/fitdistrplus.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

NAGAR, B. et al. Impact of initial spacing on growth and yield of Eucalyptus Camaldulensis in arid region of India. **World Applied Sciences Journal**, Dubai, v. 33, n. 8, p. 1362-1368, 2015.

NILSSON, H.; FOX, J. **Car**: companion to applied regression. R Package Version 0.11. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/car/car.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2019.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016. Disponível em: <<http://www.prota4u.org/search.asp.Mwww.R-project.org>>. Acesso em: 10 out. 2019.

RACE, D. et al. Partnerships for involving small-scale growers in commercial forestry: lessons from Australia and Indonesia. **International Forestry Review**, Oxford, v. 11, n. 1, p. 88-97, 2009.

REZENDE, J. L. P. et al. Análise econômica de fomento florestal com eucalipto no estado de Minas Gerais. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 221-231, jul./set. 2006.

RIBEIRO, A. B.; MIRANDA, G. M. Estudo descritivo de programas de fomento em empresas florestais. **Ambiência**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 49-66, jan./abr. 2009.

RIBEIRO, A. et al. Financial and risk analysis of African mahogany plantations in Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 42, n. 2, p. 148-158, mar./abr. 2018.

RODE, R. et al. Comparação da regulação florestal de projetos de fomento com áreas próprias de empresas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 81, p. 11-19, 2015.

RODE, R. et al. The economics and optimal management regimes of eucalyptus plantations: a case study of forestry outgrower schemes in Brazil. **Forest Policy and Economics**, London, v. 44, p. 26-33, 2014.

SALLES, T. T. et al. Bayesian approach and extreme value theory in economic analysis of forestry projects. **Forest Policy and Economics**, London, v. 105, p. 64-71, 2019.

SANTOS, A. R. dos et al. Fuzzy logic applied to prospecting for areas for installation of wood panel industries. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 193, p. 345-359, 2017.

SCHETTINO, S. et al. Feasibility analysis of the use of light and medium trucks in timber transport in rural properties. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 42, n. 6, p. 1-8, 2018.

SECURATO, J. R. **Decisões financeiras em condições de risco**. São Paulo: Saint Paul Editora, 2007. 264 p.

SILVA, C. S. J. et al. Viabilidade econômica e rotação florestal de plantios de candeia (*Eremanthus erythropappus*), em condições de risco. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 1, p. 113-122, jan./mar. 2014.

SILVA, M. L. et al. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SIMÕES, D. Quantitative analysis of uncertainty in financial risk assessment of road transportation of wood in Uruguay. **Forests**, Basel, v. 7, n. 7, p. 130, June 2016.

SIMÕES, D.; DINARDI, A. J.; SILVA, M. R. Investment uncertainty analysis in Eucalyptus bole biomass production in Brazil. **Forests**, Basel, v. 9, n. 7, p. 384, 2018.

SOARES, N. S. et al. Elaboração de modelo de previsão de preço da madeira de *Eucalyptus spp.* **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 41-52, jan./mar. 2010.

SOUZA, M. A.; PIRES, C. B. Colheita florestal: mensuração e análise dos custos incorridos na atividade mecanizada de extração. **Custos e @gronegocio Online**, Recife, v. 5, n. 2, p. 104-132, maio/ago. 2009.

VALDERATO, E. B. et al. contribuição dos créditos de carbono na viabilidade econômica dos contratos de fomento florestal no sul da Bahia. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 6, p. 1307-1317, 2011.