



Universidade de Brasília Departamento
de Engenharia Florestal
Prof. Humberto Ângelo

PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DA RENTABILIDADE DE SORTIMENTOS DE TECA

Estudante: Marta Nogueira Vázquez - Matrícula: 15/0140622

Orientador: Prof. Dr. Humberto Ângelo.

Projeto de pesquisa apresentado ao
Departamento de Engenharia Florestal
da Universidade de Brasília, como parte
das exigências para obtenção do título de
Engenheiro Florestal.

Brasília, 2021

ANEXO .

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL

PROGRAMAÇÃO LINEAR PARA OTIMIZAÇÃO DA RENTABILIDADE DE SORTIMENTOS DE TECAEstudante: **Marta Nogueira Vásquez**Matrícula: **15/0140622**Orientador: **Humberto Angelo**Menção: **SS**

Aprovada por:

Prof. Dr. Humberto Angelo
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Orientador (EFL)

Prof. Álvaro Nogueira de Souza
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Prof. Leonardo Job Biali
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Engenharia Florestal
Membro da Banca

Brasília, 21 de outubro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Job Biali, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Tecnologia**, em 26/10/2021, às 11:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Alvaro Nogueira de Souza, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Tecnologia**, em 26/10/2021, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Humberto Angelo, Professor(a) de Magistério Superior da Faculdade de Tecnologia**, em 29/10/2021, às 16:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unb.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7306763** e o código CRC **552ED05B**.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Np Nogueira Vázquez, Marta
Programação Linear para Otimização da Rentabilidade de
Sortimentos de Teca / Marta Nogueira Vázquez; orientador
Humberto Ângelo. -- Brasília, 2021.
49 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Florestal) --
Universidade de Brasília, 2021.

1. Teca. 2. Sortimento. 3. Programação Linear. 4.
Maximização. 5. Receita bruta. I. Ângelo, Humberto, orient.
II. Título.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de início agradecer a meus pais por serem o meu suporte, e por serem os responsáveis por quem eu sou e por sempre estarem ao meu lado aonde quer que eu esteja.

Agradeço ao meu orientador Humberto Ângelo pela inspiração na realização de este trabalho assim como a sua confiança em min. E aos outros professores do departamento e fora do departamento que contribuíram na minha formação, obrigada por todos os conhecimentos proporcionados.

À minha querida Universidade de Brasília e a cidade de Brasília, por todas as experiências aqui vividas e por contribuir na formação da pessoa que sou hoje.

A meu namorado Filipe Alves pelo apoio e pela motivação nas horas mais difíceis. Aos meus amigos de graduação, muito obrigada pelo companheirismo e pelas risadas, em especial à Felipe Fochat, Gislaine Brito e Manuela Álvarez. Agradeço também aos meus amigos fora do departamento por me proporcionarem risadas e momentos de distração.

A todos que me ajudaram a chegar até aqui e passaram por minha vida durante estes anos, minha mais profunda gratidão.

*“Es feliz el que soñando,
muere. Desgraciado el que
muere sin soñar”*

Rosalía de Castro.

RESUMO

A Teca (*Tectona grandis*) é uma espécie com grande interesse comercial que apresenta uma alta demanda, sendo que o Brasil é um potencial fornecedor dessa matéria-prima para o mundo. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo específico em programação linear que maximize a receita bruta e a rentabilidade do manejo florestal madeireiro da Teca. Como base metodológica foi utilizado o modelo do polinômio de quinto grau proposto por Schöpfer (1966) para o ajuste e o cálculo dos sortimentos. A otimização da receita bruta ao produtor foi feita utilizando a ferramenta solver que trabalha com o método matemático de Programação Linear utilizando a função Simplex LP. As 22 árvores que serviram de base para este estudo foram provenientes de plantios de Teca localizados na Fazenda da Floresteca - Mato Grosso. As árvores tinham idade de 13 anos e espaçamento 3x3 metros, do seu abatimento obteve-se três tipos de sortimento cuja venda que maximiza a receita bruta é de 70,07% de serraria, 25,36% de torete e 4,57% de lenha, levando em conta que serraria pode ser vendida como torete e torete como lenha. Na programação linear observa-se que dependendo da demanda, é mais interessante atender uma determinada oferta realocando o uso de um determinado sortimento. Conclui-se que a programação linear nem sempre direciona o maior lucro para os cenários mais óbvios, sendo uma ferramenta interessante para ajudar o produtor na tomada de decisões de onde e para quem vender, e desta maneira, direcionar para os compradores ideais que trarão melhor lucratividade.

Palavras-chave: Teca, sortimento, programação linear, maximização, receita bruta.

ABSTRACT

Teak (*Tectona grandis*) is a species with a great commercial interest that has high demands, and Brazil is a potential supplier of this material to the world. This work aims at developing a specific model in linear programming that maximizes the gross revenue and profitability of the Teak timber forest management. The fifth-degree polynomial model proposed by Schöepfer (1966) was used as a methodological basis for the adjustment and calculation of assortments. The optimization of the producer's gross revenue was made using the solver tool that works with the mathematical method of Linear Programming using the Simplex LP function. The 22 trees that served as the basis for this study came from Teak plantations located at Fazenda da Floresteca - Mato Grosso. The felled trees had an age of 13 years and 3x3 meter spacing, obtaining tree kinds of assortments which the percentage of sales that maximize the gross revenue is 70.07% for sawmill, 25.36% for logs, and 4.57% for firewood, considering that sawmill can be called as logs and logs as firewood. In linear programming, it is observed that depending on demand, it is more interesting to meet a given offer by reallocating the use of a given assortment. It is concluded that linear programming does not always direct the greatest profit to the most obvious scenarios, being an interesting tool to help the producer in making decisions about where and to whom to sell, and thus directed to the ideal buyers that will bring better profitability.

Keywords: Teak, assortment, linear programming, maximizes, gross revenue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Representação das estruturas morfológicas da Teca: tronco e galhos (A), inflorescência (B), folhas (C) e casca (D).	10
Figura 2- Distribuição natural da Teca no continente asiático.	12
Figura 3-Movelaria de madeira de Teca.	14
Figura 4-Plantios de Teca no estado de Mato Grosso, Brasil.	16
Figura 5 - Localização das fazendas da Floresteca S/A Fonte: Resumo Público Plano de Manejo Florestal Floresteca S/A (2015).	22
Figura 6- Estatísticas empregadas para avaliar a qualidade do ajuste e os coeficientes de ajustes encontrados para a variável diâmetro.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Diferentes Cenários.	26
Tabela 2- Produtos e respectivas dimensões com o seu valor comercial. O diâmetro indicado trata-se do diâmetro de ponta fina.	26
Tabela 3- Células de variáveis de decisão: As células em azul contém as variáveis de decisão assumindo valores binários, as células em branco contém variáveis independentes enquanto as células em amarelo contém as variáveis dependentes.....	31
Tabela 4- Células de restrição e otimização: As células em branco denotam variáveis independentes, as células em amarelo denotam variáveis dependentes, as células em vermelho denotam as células de restrição e a célula em verde denota a célula objetivo.	32
Tabela 5- Grupos de células utilizadas no modelo.	32
Tabela 6- Características das árvores de <i>Tectona grandis</i> estudadas.....	34
Tabela 7- Estatísticas empregadas para avaliar a qualidade do ajuste, e os coeficientes de ajustes encontrados para a variável diâmetro.	35
Tabela 8- O regime de desbastes padrão atualmente adotado pela empresa para espaçamento 3x3 metros, considerando 10% de mortalidade.....	36
Tabela 9- Sortimento para os diversos arranjos de produtos para cada cenário criado com seus respectivos volumes e lucros não otimizados.....	36
Tabela 10-Exemplo de otimização em um Cenário Exemplo.	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS.....	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1	Formação de povoamentos florestais.....	11
3.2	Caracterização da <i>Tectona grandis</i> (Teca)	12
3.3	Distribuição geográfica e aspectos silviculturais de povoamentos de teca.....	15
3.4	Potenciais econômicos dos produtos madeireiros e não madeireiros	17
3.5	Manejo florestal	18
3.6	Mercado de teca no Brasil	20
3.7	Função de afilamento.....	21
3.8	Estimativa do volume	22
3.9	Programação linear aplicada ao mercado florestal no Brasil.....	22
3.10	Floresteca	23
4	METODOLOGIA	24
4.1	Pesquisa dos dados.....	24
4.2	Produtos e cenários criados.....	25
4.3	Ajuste de modelos e análise do sortimento.....	26
4.4	Otimização	28
4.4.1	Descrição do modelo de otimização.....	28
4.4.2	Utilizando o Modelo.....	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6	CONCLUSÕES.....	39
7	BIBLIOGRAFIA.....	41

1 INTRODUÇÃO

Os principais fornecedores de madeiras tropicais são Indonésia e Malásia, porém, devido a entraves na política florestal e a problemas ambientais, a oferta de madeira por parte desses países está comprometida. Portanto, existe um cenário favorável para que o Brasil se torne o principal fornecedor dessa matéria-prima no mundo (CLEMENTS & HIGUCHI, 2006).

Observa-se nas últimas décadas o crescimento da competição entre produtores e, conseqüentemente, da profissionalização dos mesmos, que buscam reduzir custos e maximizar receitas, sendo que os produtos florestais têm múltiplas possibilidades de venda tanto para diferentes clientes como diferentes produtos provenientes da mesma floresta, como: lenha, carvão vegetal, laminados, compensados, aglomerados, mourões, estacas, madeira para celulose, madeira para serraria, entre outros produtos não-madeireiros (PEREIRA, 2015).

Dependendo dos produtos gerados por cada árvore, os preços e custos variam, portanto, é de suma importância a tomada de decisões multidisciplinares e estruturadas que abrangem, entre outros estudos, o inventário e manejo florestal, avaliação econômica e métodos matemáticos (PEREIRA, 2015).

O sortimento é uma forma de definir o aproveitamento de uma árvore para diferentes finalidades, a partir de funções de afilamento que permitem estimar o diâmetro a qualquer altura e a altura a qualquer diâmetro, assim como o volume a qualquer altura (MIGUEL *et al.*, 2011).

A posição dos cortes que definirão as toras deve ser decidida no local, após a visualização da árvore abatida. Quando um único comprimento de tora é retirado da floresta, estas decisões tornam-se bem mais simples, porém, no caso de multiprodutos florestais a complexidade para definir o traçamento otimizado é maior. A utilização de técnicas de otimização aplicada à obtenção de multiprodutos florestais contribui de forma significativa para aumentar a utilização da matéria-prima, reduzindo os resíduos deixados na floresta ou subutilizados, ao serem aproveitados como energia (ARCE; MACDONAGH; FRIEDL, 2004).

Em 1947, George Dantzig (1963), ao desenvolver técnicas de otimização para problemas militares, delineou um método matemático chamado Método Simplex, que trata os problemas de planejamento sobre a perspectiva da programação linear (SOUZA, 2004).

A programação linear apresentasse como um método matemático bastante útil, com potencial para aumentar a receita do produtor florestal assim como a quantidade e qualidade dos produtos disponibilizados para o mercado consumidor. A programação linear também pode ser utilizada para minimizar riscos na tomada de decisão, desenvolver análises de custo-benefício e inclusive garantir flexibilidade ao projeto (PEREIRA, 2015).

2 OBJETIVOS

O trabalho objetiva otimizar a rentabilidade de um povoamento de Teca, considerando diferentes sortimentos que a madeira é comercializada. Em especial, busca-se:

- a) Ajustar uma função de afilamento que descreve a forma do tronco para espécie;
- b) Determinar o volume de madeira para diferentes sortimentos de um povoamento de Teca;
- c) Maximizar a receita bruta dos produtores de Teca, a partir do sortimento em diversos produtos e diferentes perfis de compradores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1 Formação de povoamentos florestais

Segundo Lamprecht (1990), um povoamento florestal é a parte da floresta que difere de seu restante devido a particularidades estruturais e composição das espécies arbóreas. Uma implantação florestal é o ciclo inicial das atividades focadas no sucesso operacional de um empreendimento nesse segmento, é uma fase de planejamento estratégico das espécies e áreas a serem utilizadas, desde a aquisição de mudas até seu efetivo plantio (SCHUMACHER *et al.*, 2017).

Um povoamento está voltado para os mais variados fins e deve ser analisado de forma ampla, dentro dos conceitos da Gestão Florestal, passando por planejamentos bem elaborados para se obter o melhor potencial produtivo das áreas florestais (SANTANA; FONTAN; OLIVEIRA, 2014). Sua sistemática de implantação necessitará da cobertura vegetal ou ocupação anterior da área a ser utilizada, da disponibilidade de recursos e da finalidade do plantio (FERREIRA; SILVA, 2008).

De acordo com Ferreira e Silva (2008), quando os plantios visam uma produção, eles são estabelecidos mediante práticas silviculturais¹ que possam contemplar principalmente os fatores de crescimento da espécie escolhida para o manejo, e quando necessário, deve ser eliminada a vegetação competidora e até mesmo incluir técnicas de irrigação. Assim sendo, os fatores que influenciam uma produção de biomassa são: tipo de solo, espécie, disponibilidade de nutrientes, material genético, disponibilidade hídrica, luz, temperatura e espaçamento (SCHUMACHER *et al.*, 2017).

Ryan (*et al.*, 2010) afirma que a produção de biomassa varia com a disponibilidade de recursos dos sítios florestais, que influenciam no particionamento do carbono, na produção de folhas, fotossíntese, respiração, entre outros. Não obstante, um bom desenvolvimento de mudas após plantio dependerá da manutenção adequada da área plantada (FERREIRA; SILVA, 2008) ou seja, estabelecer povoamentos de produtividade elevada vai muito além do plantio de mudas sadias no campo (SCHUMACHER *et al.*, 2017).

3.2 Caracterização da *Tectona grandis* (Teca)

Devido ao rápido crescimento de seus indivíduos e a formação de fuste retilíneo, a Teca possui qualidades necessárias para reconhecer e justificar o seu plantio em larga escala com foco no mercado exterior (SHIMIZU; KLEIN; OLIVEIRA, 2007). É uma árvore originária da Ásia pertencente à família Lamiaceae, que vem se sobressaindo no setor florestal por apresentar excelentes características para construção civil, assoalhos e decks, fabricação de móveis de luxo e lâminas decorativas (OLIVEIRA, 2014).

Em ambiente natural ela possui tronco retilíneo com casca áspera e fina de aproximadamente 1,2 cm, que se desprende em placas (CHAVES & FONSECA, 1991). Sua madeira tem coloração marrom uniforme que exposta ao ar livre adquire tons mais escuros (LAMPRECHT, 1990). O cerne mostra uma cor amarela dourada densa, não apresentando rachaduras nem deformidades e sua durabilidade é de considerável importância para os reflorestadores (BEBARTA, 1999).

¹ Silviculturais: Ciência dedicada ao estudo do melhor uso da floresta. Mas como em outras ciências, em silvicultura surgem outras definições. Entende-se como silvicultura a produção, reprodução e cultivo de florestas de modo a obter rendimento de forma perpétua. As práticas silvícolas tanto podem ser para preservação das florestas como para o reflorestamento tendo em vista o aspecto econômico e de uma prática perpétua, visando o desenvolvimento das potencialidades existentes nas florestas. (LIMA, 2010)

É uma espécie com alta deciduidade foliar² com folhas opostas e elípticas, coriáceas de pecíolos curtos ou ausentes, de ápices e bases agudas. Nos indivíduos adultos elas possuem em média de 30 a 40 cm de comprimento por 25 cm de largura, e que com três anos de idade podem atingir o dobro dessas dimensões (FIGUEIREDO; OLIVEIRA; SCOLFORO, 2005). Após o aparecimento de suas folhas, ela passa por um período de intenso crescimento que diminui ao longo da estação chuvosa parando no próximo período seco. Esse ritmo de crescimento confere à sua madeira melhores propriedades (LORENZI *et al.*, 2003).

Sua inflorescência é composta por cachos na forma de panículas com 700 a 3.500 flores (ver Figura 1), onde apenas 1% se desenvolve em frutos do tipo drupa subglobosa e tetra ocular. Estes frutos são envolvidos por uma membrana fina e esférica de 5 a 20 mm de diâmetro, que também são utilizados como material de propagação, podendo conter de uma até quatro sementes por lóculo, as quais são pequenas, delicadas e oleaginosas, com 5 a 6 mm de comprimento (CALDEIRA *et al.*, 2000).

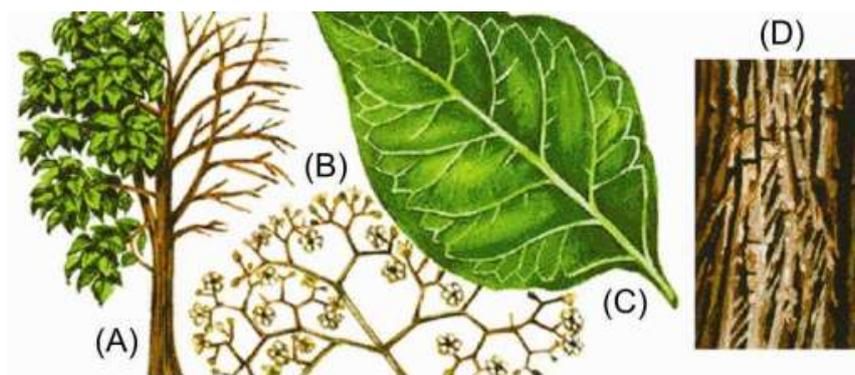


Figura 1-Representação das estruturas morfológicas da Teca: tronco e galhos (A), inflorescência(B), folhas(C) e casca(D).

Fonte: adaptado de CALDEIRA (2004).

A madeira juvenil diferencia-se da madeira adulta por apresentar menor densidade, elementos celulares mais curtos, maior ângulo microfibrilar, maior proporção de lenho de

² Deciduidade foliar: estratégia utilizada para evitar possíveis danos provocados pela seca, sendo comum a perda total de folhas em espécies arbóreas decíduas durante essa estação (LENZA; KLINK, 2006).

reação, paredes celulares mais finas, maior conteúdo de lignina e hemicelulose e menor resistência em relação à madeira adulta (FLORÉZ, 2012).

O alborno e cerne dessa árvore são bastante perceptíveis, a quantidade de cerne está relacionada com a sua idade e às práticas silviculturais, (KOKUTSE *et al.*, 2004) e tem características comerciais e econômicas importantes por ser a porção da madeira que determina o seu valor comercial, sendo essencial sua análise interna para determinar a qualidade e rendimentos de sua madeira serrada (OLIVEIRA, 2014). Seu crescimento muda de acordo com as condições edáficas e climáticas locais, principalmente com a precipitação, umidade relativa do ar e temperatura (SINHA *et al.*, 2011).

Apesar de tolerar uma grande variedade de climas, esta espécie desenvolve-se melhor em condições tropicais moderadamente úmidas e quentes, onde grande parte de sua distribuição natural se caracteriza por climas do tipo Monzonal (WEAVER, 1993; PANDEY & BROWN, 2000). Por ser uma espécie com alta exigência de luz solar e sensível a geadas e ventos fortes (SALAZAR & ALBERTIN *et al.*, 1974), o Brasil oferece áreas com condições ideais para seu cultivo, sendo cultivadas em regiões com precipitação média anual de 1.500 mm a 2.750 mm, temperaturas máximas de 35°C a 40°C e mínimas de 15°C a 20°C, com três a quatro meses de período seco (BEHLING, 2009).

O pH é um atributo importante a ser considerado para estabelecer seu plantio (PELLISSARI *et al.*, 2012), pois esta propriedade está ligada diretamente à disponibilidade de nutrientes do solo (LIMA *et al.*, 2010). Não existindo concordância entre níveis ideais de pH para seu desenvolvimento, esta espécie prefere pH ligeiramente ácido a alcalino (TANAKA; HAMAZAKI; VACHARANGKURA, 1998).

Solos ácidos com elevada concentração de alumínio podem causar deformidades em sua divisão celular, diminuição da respiração das raízes, interferência na captação e no transporte de nutrientes (OMBINA, 2008).

A matéria orgânica por sua vez rica em nutrientes e com significativo papel na manutenção do pH da terra, promove respostas positivas à planta (SUZUKI; TAKEDA; THEIN, 2007), a qual apresenta uma melhor escalada em solos de texturas franco arenosos a argilosos (OMBINA, 2008), profundos e de boa drenagem, com terrenos planos, ou pouco declivosos, e férteis (VÁSQUEZ & UGALDE *et al.*, 1995).

Com alto poder de assimilação, esta árvore é eficiente na utilização do fósforo (MATA, 1999), mineral importante para o desdobramento de seu sistema radicular (BEHLING, 2009). A disponibilidade de potássio no solo também influencia no crescimento desta espécie por ter relação direta em seus processos metabólicos (MORAES *et al.*, 2008). É uma espécie com

uma alta exigência de cálcio (TANAKA; HAMAZAKI; VACHARANGKURA, 1998), atendendo de forma positiva ao acréscimo deste elemento a terra de cultivo, não necessitando de altas concentrações de magnésio (MATRICARDI, 1989).

3.3 Distribuição geográfica e aspectos silviculturais de povoamentos de teca

Com espaço notável no mercado mundial entre as principais espécies produtoras de madeira tropical, a Teca, é uma espécie do sul e sudeste do continente asiático, com distribuição natural descontínua na Índia, Mianmar, Tailândia e Laos (ver Figura 2), entre os paralelos 9° e 25° de latitude e introduzida, há centenas de anos, na Indonésia e Sri Lanka. Atualmente ela apresenta uma distribuição de extensão média, sendo cultivada em diversas regiões da África e das Américas do Sul e Central (CATIE, 1986; TANAKA; HAMAZAKI; VACHARANGKURA, 1998; KRISHNAPILLAY, 2000; PANDEY & BROWN, 2000; BERMEJO; CAÑELLAS; SÃO MIGUEL, 2004; RUGMINI & JAYARAMAN, 2009; NOCETTI *et al.*, 2011).

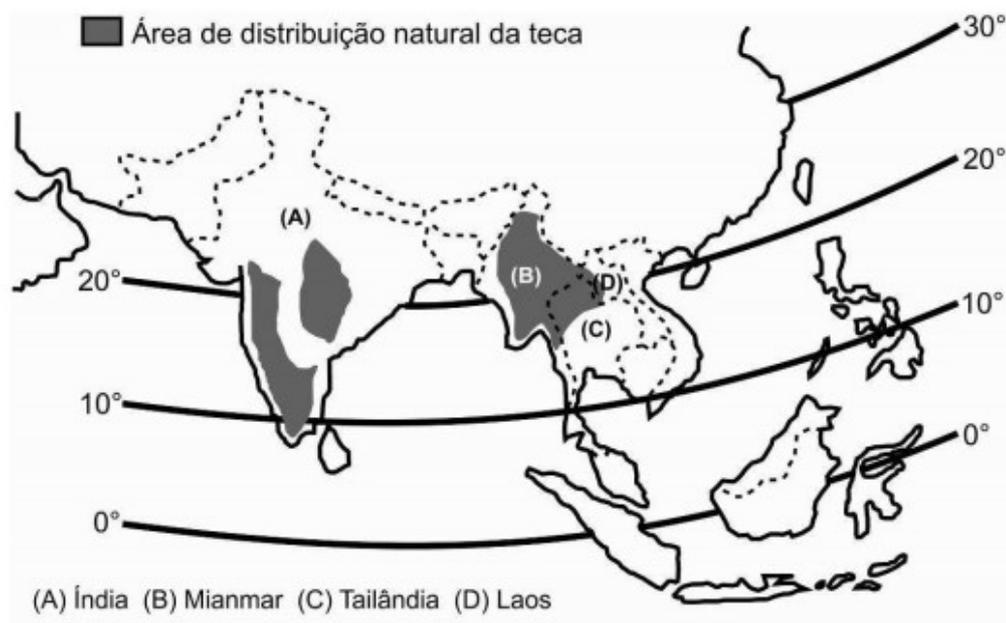


Figura 2- Distribuição natural da Teca no continente asiático.

Fonte: adaptado de KAOSA-ARD (1981) e TANAKA; HAMAZAKI; VACHARANGKURA (1998).

Suas florestas naturais representam uma área parcialmente restrita e com baixa participação na produção de madeira (KRISHNAPILLAY, 2000). Com a proibição da exploração das florestas nativas dos principais fornecedores, como a Índia em 1986 e Laos e

Tailândia em 1989, os povoamentos artificiais passaram a alcançar destaque no mercado mundial como fonte importante dessa matéria-prima, para suprir as necessidades do mercado mundial (PANDEY & BROWN, 2000), de preferência nos trópicos onde as características climáticas são idôneas para seu crescimento e a produtividade (VAIDES; UGALDE; GALLOWAY, 2005).

No mundo, calcula-se que atualmente exista cerca de 4,3 milhões de hectares cultivados dessa *commodity*, sendo 83% concentrados na Ásia, 11% na África e 6% na América tropical (CAMINO & MORALES, 2013). A Índia e a Indonésia destacam-se, respectivamente, com 44% e 31% da área plantada com a espécie no continente asiático (SHUKLA *et al.*, 2011), enquanto Mianmar é o único país que ainda depende de florestas naturais para a produção da madeira (NAIR & SOUVANNAVONG, 2000).

Em geral, a densidade inicial dos plantios de Teca é de 1.000 a 2.000 árvores.ha⁻¹, com o primeiro desbaste entre quatro e cinco anos de idade, removendo-se 50% da densidade inicial, para obter uma densidade final de 180 a 250 árvores.ha⁻¹ após uma rotação igual ou superior a 20 anos (PANDEY & BROWN, 2000). No entanto, na América Central, as densidades entre 1.110 a 1.600 árvores.ha⁻¹, com três a cinco desbastes, são mais produtivas do que os espaçamentos mais amplos e com poucos desbastes (GONZÁLEZ, 2004).

Segundo Garcia (2006), no Brasil, os povoamentos normalmente são implantados com 1.667 árvores.ha⁻¹, espaçamento de 3,0 m x 2,0 m, e os desbastes acontecem de cinco em cinco anos e iniciam-se por volta do quinto ano de idade da planta. Isso proporciona de 200 a 250 árvores.ha⁻¹ para o corte final. No entanto, atualmente, há a tendência de aumento dos espaçamentos para 3,5 m x 3,0 m ou 4,0 m x 2,5 m, principalmente com o advento de máquinas e implementos que exigem uma maior largura nas entrelinhas de plantio.

Pelissari (*et al.*, 2013) descreve que nos povoamentos implantados com objetivos comerciais, a aplicação de desbastes e desramas, desde os estágios iniciais de desenvolvimento, tem um efeito positivo sobre a forma do tronco da espécie, produzindo árvores com diâmetro e altura em proporções desejadas, fustes livres de nós, aumento do conteúdo de cerne e melhoria da qualidade sanitária dos plantios. Esse tronco é fortemente afetado pela competição intraespecífica, o que resulta na necessidade da execução de uma série de desbastes em diferentes intensidade e períodos.

Dessa forma, a estratégia usual dos empreendimentos é manter os povoamentos com densidade inicial até o quarto ou quinto ano do plantio e, posteriormente, executar um desbaste seletivo com intensidades entre 40% a 60% do número de indivíduos por hectare (CALDEIRA & OLIVEIRA, 2008). As desramas, em geral, são executadas a partir do segundo ano, com a

retirada de galhos até $\frac{1}{3}$ da altura total das árvores nessa idade, até a $\frac{1}{2}$ da altura total no terceiro ano e até $\frac{2}{3}$ no quarto ano, e a manutenção da desrama, com a remoção de galhos até 7,0 m de altura nas idades seguintes (PELLISSARI, 2012).

A idade de rotação dos plantios em sua área de distribuição natural varia entre 50 a 90 anos (PANDEY & BROWN, 2000), com produtividade de 3 a $10\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}$ (CENTENO, 1997), enquanto que em outras regiões essas rotações são mais curtas, como no continente africano, que acontecem de 35 a 55 anos, com produtividade de 5 a $16\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}$ (DUPUY; MAÎTRE; KANGA, 1999). Já nas Américas do Sul e Central, com expectativa de 20 a 25 anos (GONZÁLEZ, 2004) e produtividade de 10 a $20\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}$ (CENTENO, 1997), com a possibilidade de valores maiores nos melhores sítios (VAIDES; UGALDE; GALLOWAY, 2005).

3.4 Potenciais econômicos dos produtos madeireiros e não madeireiros

Nos trópicos, os plantios de Teca têm alcançado maior auge nas últimas décadas. devido ao potencial de crescimento e produtividade (VAIDES; UGALDE; GALLOWAY, 2005). E, atualmente, possuem alta perspectiva de retorno de investimentos nos plantios intensivos (SHIMIZU; KLEIN; OLIVEIRA, 2007). Entretanto, o cultivo da espécie é, por vezes, baseado em conhecimentos insuficientes (ENTERS, 2000), visto que ela apresenta, em geral, crescimento superior nas Américas Central e do Sul, o que dificulta estabelecer comparações entre os regimes de manejo e as respostas das práticas de silvicultura em locais com características edafoclimáticas distintas (PELLISSARI; CALDEIRA; DRESCHER, 2013).



Figura 3-Movelaria de madeira de Teca.

Fonte: LADRACH (2009).

Seus sortimentos apresentam uma gama de finalidades, tais como a construção de bancos, cadeiras, pontes pequenas, teares, andaimes, produtos esculpidos para decoração, utensílios domésticos, entre outros (ver Figura 3), enquanto o aproveitamento de resíduos constitui uma alternativa para a produção de lenha e também são úteis como cercas vivas (MALDONADO & LOUPPE, 1999). As folhas são utilizadas como embalagens para açougues, para extração de corantes para tingir seda e para a concentração de fármacos que combatem a malária e a anemia (GOMES; SANTOS JUNIOR; ARRUDA, 2011).

Pesquisas recentes com extratos de flores também apontam potencial antidiabético, antioxidante, anti-inflamatório, analgésico e cicatrização de feridas (RAMACHANDRAN; RAJASEKARAN; KUMAR, 2011). Apesar de sua alta leveza, com densidade média de $0,65 \text{ g.cm}^{-3}$, ela apresenta propriedades físico-mecânicas semelhantes às do mogno brasileiro, tais como durabilidade, estabilidade, facilidade de pré-tratamento e resistência natural ao ataque de fungos, insetos, pragas e brocas (GOMES; SANTOS JUNIOR; ARRUDA, 2011).

Os maiores fabricantes de produtos industrializados à base do seu tronco são a Indonésia, Tailândia, Índia e China (PANDEY & BROWN, 2000), e segundo Alvarado (2006), são voltados a mais ou menos 25 usos distintos, destacando-se a movelaria de luxo e a construção naval (NIAMKÉ *et al.*, 2011). Hoje em dia, seu manejo é considerado como uma alternativa a outras espécies de alto padrão e valor econômico, como a *Swietenia macrophylla* King e a *Torresea acreana* Ducke, para o suprimento sustentável de indústrias de base florestal (CALDEIRA *et al.*, 2000; DRESCHER, 2004).

3.5 Manejo florestal

Apesar do grande potencial das florestas tropicais, estas áreas são vistas apenas como reserva para agricultura. O manejo florestal como ferramenta de desenvolvimento, ou mais realisticamente, como opção de atividade econômica, não é destacado seriamente. (BRAZ, 2001).

Na análise da relação entre produção sustentada de madeira e intensidade de exploração, Silva (1993), comenta a necessidade de se desenvolver mais pesquisas para estudar as respostas da floresta em diferentes intensidades de exploração e de tratamentos para futuras projeções. Silva ainda comenta que as limitações para o manejo da floresta tropical, não são de ordem técnica para a implementação correta do manejo florestal, mas sim de ordem econômica, institucional e social.

Para Hosokawa (1998) o manejo das florestas tropicais deve ser concebido como um

agrupamento de atividades que pretenda a maximização da produtividade dos recursos florestais, priorizando os fatores ambientais, econômicos e sociais da produção florestal.



Figura 4-Plantios de Teca no estado de Mato Grosso, Brasil

Fonte: TECA DO BRASIL (2013).

A exploração florestal é um dos grandes causadores de dano na vegetação das florestas tropicais (EWEL & CONDE, 1976). Os mesmos autores salientam que a revisão de numerosos estudos indica que a exploração florestal danifica aproximadamente 50% da exploração residual e que com o aumento da dimensão dos equipamentos, tem aumentado o dano ao povoamento. Estes danos não só alcançam os fustes das árvores como também a sua regeneração.

Existe a necessidade da garantia de um fluxo constante de madeira com potencial comercial para que a viabilidade da pequena propriedade seja efetiva, e isto nem sempre é possível devido aos talhões serem pequenos e a distribuição das espécies de interesse na floresta nativa ser irregular (BRAZ, 2001).

O manejo florestal é economicamente viável em áreas muito extensas e com investimento alto em máquinas para a exploração florestal, portanto as atividades agrícolas são economicamente mais atrativas que o manejo florestal, o que intensifica a pressão para o desmatamento ilegal (D'OLIVEIRA *et al.*, 2002).

Lacki (1996) indica que um dos problemas da administração da pequena propriedade é o fato dos agricultores não estarem treinados para administrar suas propriedades com eficiência e assim utilizar plena e racionalmente os recursos mais abundantes, e considerando inclusive a possibilidade da introdução correta de tecnologias apropriadas e menos dependentes de insumos externos.

Para que o manejo florestal seja sustentável é preciso que haja um esforço contínuo em pesquisa, pois o conhecimento da evolução das florestas submetidas a diferentes regimes

de manejo florestal é incipiente. Os sistemas silviculturais desenvolvidos para florestas tropicais só começaram a ser executados a partir de 1989, por imposição do Ibama, por meio da OS nº 001/89.

Um bom planejamento deve representar da melhor forma as situações reais e nesse sentido o planejamento pode ser considerado como um exercício de construir modelos ou, em outras palavras, formular problemas (JOHNSON & SCHEURMAN, 1977).

Administrar recursos florestais implica a todo o tempo a tomada de decisões. Segundo Buongiorno & Gilless (1987), “o manejo de recursos florestais é a arte e a ciência de tomar decisões no que diz respeito à empresa, uso e conservação das florestas e seus recursos”. E o processo de tomada de decisões é formado basicamente na predição de três tipos de informação: meios, fins e valores, ou seja, como fazer, para que fazer e quanto fazer (DUERR *et al.*, 1982).

Segundo Johnson & Scheurman (1977), o processo de planejamento e tomada de decisão no contexto florestal é ainda mais complexo em relação a outros tipos de atividades devido às suas peculiaridades, como por exemplo, as grandes extensões ocupadas pelas florestas.

Um bom planejamento deve adequar-se o mais possível com a realidade sendo considerado um exercício de formular problemas (JOHNSON & SCHEURMAN, 1977). É importante ter no processo de planejamento objetivos definidos e claros, pois eles indicarão os caminhos a serem seguidos (ARCE, 2009; JOHNSON & SCHEURMAN, 1977).

Uma ferramenta bastante aplicada na resolução de problemas e tomada de decisão no planejamento florestal é a Programação Linear (PL). Buongiorno & Gilless (1987) a definem como “um método para alocar recursos limitados em atividades concorrentes de maneira ótima”, quer dizer dentro de uma ampla gama de soluções possíveis, vamos determinar qual delas produz o melhor resultado.

3.6 Mercado de teca no Brasil

Os plantios de Teca no Brasil iniciaram-se no final da década de 60, implantados pela empresa Cáceres Florestal S.A., na região do município de Cáceres – Mato Grosso, onde as condições climáticas são semelhantes às dos países de origem da espécie e o solo possui uma melhor fertilidade, com os tratamentos silviculturais mais adequados e intensos contribuindo para reduzir o ciclo de produção de 80 anos, na região de origem da Teca, para apenas 25 anos, na região de Cáceres-MT (FILHO, *et al.*, 2003).

No Brasil, o desenvolvimento espécie como alternativa aos plantios florestais tradicionais, concentra-se atualmente nas regiões Centro-Oeste e Norte do país, principalmente no Estado de Mato Grosso (FIGUEIREDO; OLIVEIRA; BARBOSA, 2005; LIMA *et al.*, 2009; SCHUHLLI & PALUDZYSZYN FILHO, 2010).

O mercado consumidor de madeira de Teca no Distrito Federal é praticamente escasso. No Brasil, este mercado concentra-se mais na região do Mato Grosso, sendo este o pioneiro nos plantios de Teca. Outros estados importantes são Pará e Roraima.

Segundo Finger *et al.* (2001), a produção mundial de madeira de Teca é estimada em 3 milhões de m³/ano, o que é extremamente baixa considerando a demanda atual dessa espécie no mercado exterior. Veit (2000) afirmou que o desequilíbrio entre a oferta e a procura determinou a continuada valorização da madeira de Teca.

Apesar do reflorestamento com Teca ser um ótimo investimento, no Mato Grosso ainda não ultrapassam 20.000 ha. Também são poucas as empresas que estão investindo nas plantações florestais desta espécie, nesse Estado e no Brasil. Além disto, estudos econômicos dos plantios de Teca no país são escassos ou são de domínio apenas das empresas reflorestadoras. (FILHO, *et al.*, 2003).

3.7 Função de afilamento

O uso no Brasil cada vez mais diversificado de madeiras para celulose, madeira serrada e madeira laminada, em diferentes bitolas e comprimentos, estimula cada vez mais o uso das funções de afilamento, sendo necessário identificar quais variáveis podem auxiliar a eficiência dessas estimativas (FISCHER *et al.*, 2001).

Segundo Campos e Leite (2009), existem vários modelos de afilamentos caracterizados como simples, segmentados e polinomiais. Modelos simples são aqueles em que uma única função representa a forma do fuste desde a base até o ápice. Modelos segmentados são mais difíceis de serem trabalhados e constituem uma variação dos modelos polinomiais, sendo ajustados por seções do fuste, duas ou três seções. Esses modelos procuram diminuir erros de tendência nas estimativas dos diâmetros ao longo do fuste.

O modelo de afilamento é uma interessante ferramenta estatística que permite estimar três características básicas das árvores (PRODAN *et al.*, 1997): diâmetro a qualquer ponto do fuste; altura do fuste onde se encontra um diâmetro limite especificado; volume entre pontos qualquer do fuste ou do fuste ou a qualquer índice de utilização, proporcionando uma gama

de informações que possibilitam o desenvolvimento de diferentes técnicas de modelagem do perfil dos fustes.

De acordo com Ahrens e Holbert (1981), função de afilamento é uma descrição matemática do perfil longitudinal de um tronco. Admitindo-se que a secção transversal seja circular em qualquer ponto ao longo do tronco, o seu volume pode ser obtido por integração da função de volume. Por conseguinte, uma vez definido um modelo matemático para o afilamento, pode-se determinar o volume de madeira entre quaisquer pontos ao longo do tronco.

Segundo Campos e Leite (2009) os modelos polinomiais são caracterizados por ajuste de regressão entre a relação de diâmetros d_i/DAP e de alturas (h_i/h). A variável dependente é dada pela razão entre os diâmetros superiores e o diâmetro medido a 1,30 m do solo. As variáveis independentes são expressas por razões de alturas comerciais e altura total.

3.8 Estimativa do volume

Georkiantz e Olsen (1955) afirmam que o mérito de uma equação de volume aumenta notavelmente se ela possui poucas variáveis que sejam fáceis de mensurar com exatidão, que sejam altamente correlacionadas com o volume, tenham baixa correlação entre si e o volume estimado por árvores individuais se aproxime do volume calculado.

Veiga (1972) desenvolveu vários estudos para estimar volume através da utilização de equações volumétricas a partir de modelos aritméticos e logarítmicos. O mesmo autor comparou diversos modelos do ponto de vista matemático e em relação à expressão da forma como terceira variável independente, concluindo que, estatisticamente, os modelos formais são mais precisos em relação aos não formais.

Prodan *et al.* (1997) afirma que a estimativa do volume pode ser considerada como um problema relevante dentro da dendrometria e do inventário florestal. O volume de árvores tem sido estimado com certa facilidade e acuracidade empregando-se equações de volume, ajustadas quase sempre a partir de medições do diâmetro à altura do peito e da altura total (CONCEIÇÃO, 2004).

3.9 Programação linear aplicada ao mercado florestal no Brasil.

No setor florestal, os primeiros trabalhos que utilizaram Programação Linear para resolver problemas de gestão florestal foram desenvolvidos na década de 60, porém, o marco para a difusão da técnica no planejamento florestal ocorreu em 1971, por Navon, que trabalhava para o Serviço Florestal americano, e Ware e Clutter, da Universidade da Geórgia, em colaboração com a indústria de celulose do sul do Estados Unidos (RODRIGUEZ, 2005)

A Programação Linear é um método matemático que objetiva a alocação eficiente de recursos limitados entre diferentes atividades que competem entre si de forma ótima. (BUONGIORNO, GILLESS, 1987).

O uso de programação linear no planejamento de floresta inequiduais, que é o caso das florestas tropicais brasileiras, já foi abordado por Boungiorno & Gilless (1987), que concluíam que para este tipo de florestas o corte raso não é uma boa opção, já que altera severamente a paisagem e ocasiona notáveis impactos ecológicos.

Buongiorno & Gilless (1987) aprofundaram bastante no planejamento otimizado para florestas inequiduais, porém, ainda existem muitos obstáculos para a utilização destes modelos em florestas tropicais. As florestas abordadas por esses autores, apesar de serem inequiduais, são florestas de clima temperado, diferindo enormemente das florestas tropicais quanto à riqueza de espécies, densidade de sub-bosque e outros aspectos, sendo, portanto, as publicações escassas.

As possibilidades de utilização da Programação Linear no setor florestal são enormes, somente para citar alguns estudos e projetos: otimização do corte de toras para a serraria (HAGG, 1973), estudos de minimização dos custos de exploração e transporte (MCGUIGAN, 1984), identificação de estratégias ótimas de regulação florestal (SANTOS, 2012, RODRIGUES, 1998) e determinação de estratégia ótima de reforma de um talhão florestal (RODRIGUEZ, LIMA, 1985).

3.10 Floresteca

A Floresteca S/A, começou seus plantios em 1994 no município de Jangada, que fica a 90 km de Cuiabá, capital do Estado de Mato Grosso, sendo a maior empresa produtora de Teca (*Tectona grandis*) do mundo. A partir disto, ampliou suas unidades de manejo nos municípios de Rosário Oeste e Barra do Bugresé, sendo uma empresa brasileira de capital misto (Brasil e Holanda), originalmente registrada como Floresteca Agroflorestal LTDA.

A Floresteca é uma empresa dedicada à gestão eficiente de ativos florestais, especializada no desenvolvimento de sementes melhoradas, produção de mudas clonais, plantio, manejo, colheita, processamento, comercialização de Teca certificada e gestão do ativo florestal de forma integrada.

Ela investe nos pilares do *triple bottom line* da sustentabilidade - meio ambiente, responsabilidade social e retorno econômico. Em 1998, a unidade de manejo da Floresteca recebeu a Certificação de Manejo Florestal, de acordo com os princípios e critérios do FSC®, Forest Stewardship Council®, certificação essa que é mantida pela empresa até o momento, sob o número de registro RA-FM/COC-005657. Essa certificação garante o bom manejo florestal, prezando pelas melhores práticas ambientais, sociais e viabilidade econômica. O logotipo do FSC® é um selo verde mundialmente reconhecido e presente em mais de 100 milhões de hectares, distribuídos por mais de 80 países. Isso significa que o processo produtivo da Floresteca é ecologicamente correto, socialmente justo e economicamente viável, em pleno cumprimento das leis vigentes do Brasil e seguindo rígidos padrões internacionais.

4 METODOLOGIA

4.1 Pesquisa dos dados

Os dados do povoamento avaliado foram fornecidos pela Floresteca (ver Resumo Público Plano De Manejo Florestal Floresteca S/A, 2015) que é uma das empresas mais importantes de Teca no país. A Floresteca S/A está localizada no Estado de Mato Grosso, região Centro-Oeste brasileira, entre as latitudes 07° 20' 42" S e 18° 10' 00" ao Sul do Equador, longitudes 50° 13' 42" W e 60° 31' 00" Oeste de Greenwich, caracterizada por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média de 24°C e precipitação média anual ente 1500 mm a 1750 mm.

A Figura 5 mostra a distribuição geográfica dos plantios de Teca da Floresteca. Mapas mais detalhados de cada fazenda podem ser encontrados no departamento de planejamento florestal da empresa.

Foram selecionadas 22 árvores de um povoamento de Teca (*Tectona grandis*) onde o corte foi realizado aos 13 anos e com espaçamento de 3x3 metros.



Figura 5 - Localização das fazendas da Floresteca S/A
 Fonte: RESUMO PÚBLICO PLANO DE MANEJO FLORESTAL FLORESTECA S/A (2015)

Os preços foram disponibilizados pela Floresteca. As dimensões dos sortimentos foram calculadas mediante uma análise de mercado.

4.2 Produtos e cenários criados

Delinearam-se vários cenários (Tabela 1), em que a produção seria designada a três diferentes produtos de forma otimizada (serraria, torete e lenha para carvão vegetal). Para cada especialidade, de cada cenário, levou-se em consideração as medidas de cada sortimento e seu valor comercial (Tabela 2).

Tabela 1-Diferentes Cenários.

Cenários	Produtos
I	Serraria + Lenha
II	Torete + Lenha
III	Serraria + Torete + Lenha
IV	Lenha

Tabela 2- Produtos e respectivas dimensões com o seu valor comercial. O diâmetro indicado trata-se do diâmetro de ponta fina.

Sortimento	Diâmetro. min (cm)	Comprimento (m)	R\$/m ³
Serraria	25	4,2	1.600
Torete	15	2,2	540
Lenha	5	2,0	110
Resíduo	<5		

4.3 Ajuste de modelos e análise do sortimento

Foram abatidas e cubadas 22 árvores pelo método de Smalian, para gerar a equação de *taper*. Para descrever o perfil do fuste e obter múltiplos produtos foi ajustado o modelo do polinômio de quinto grau proposto por Schöpfer (1966), por se tratar de um dos modelos mais adotados no Brasil. O modelo é expresso por:

$$\frac{d_i}{d_{1,3}} = \beta_0 + \beta_1 \frac{hi}{h} + \beta_2 \left(\frac{hi}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{hi}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{hi}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{hi}{h}\right)^5 + e_i$$

Em que:

β 's = parâmetros a serem estimados;

d_i = diâmetros (cm) medidos à altura hi ao longo do fuste;

DAP = diâmetros (cm) a altura do peito ($h = 1,3m$);

h = altura total (m);

hi = alturas as quais foram medidos os diâmetros d_i .

Por meio da integral do polinômio obtêm-se o volume:

$$V = K \int_{h_1}^{h_2} d_i^2 \delta h$$

$$V = K \text{ DAP}^2 \int_{h_1}^{h_2} (c_0 + c_1 h_i^{p_1} + c_2 h_i^{p_2} + \dots + c_n h_i^{p_n})^2 \delta h$$

Em que:

$$k = \pi/40000$$

p_j = expoentes variando de 1 a 5;

Para integrar a função e obter -se a expressão que permite a estimativa dos volumes, faz-se a seguinte simplificação:

$$C_0 = \beta_0; \quad C_1 = \frac{\beta_1}{h}; \quad C_2 = \frac{\beta_2}{h}; \quad C_3 = \frac{\beta_3}{h}; \quad C_4 = \frac{\beta_4}{h}; \quad C_5 = \frac{\beta_5}{h}$$

Integral resolvida:

$$V = K * \text{DAP}^2 * \left[c_0^2 h_i + c_0 c_1 h_i^2 + \left(\frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h_i^3 + \left(\frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h_i^4 + \right]$$

$$+ \left(\frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h_i^5 + \left(\frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h_i^6 +$$

$$+ \left(\frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h_i^7 + \left(\frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h_i^8 +$$

$$+ \left(\frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h_i^9 + \frac{1}{5} c_4 c_5 h_i^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_i^{11} \Big|_{h_1}^{h_2}$$

Após a configuração dos diferentes sortimentos e inserção dos valores dos respectivos produtos, buscou-se o cenário que possibilitasse maior retorno financeiro para a destinação da

madeira com a maior receita bruta (R\$), sendo este o mais rentável entre as diversas combinações de cortes possíveis, garantindo o maior retorno financeiro.

4.4 Otimização

A otimização da receita ao produtor foi feita utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel – Microsoft Office Professional Plus 2016® que trabalha com o método matemático de Programação Linear utilizado pelas funções Simplex LP o GRG Nonlinear Solving method ou Evolutionary Solving method, sendo a mais adequada a Simplex LP por se tratar de um problema de Solver Linear.

Em geral, o Solver é utilizado para realizar análise de hipóteses. Neste caso, as hipóteses são dadas por escolhas comerciais de um determinado sortimento a uma determinada empresa, portanto, o Solver calcula a quantidade vendida otimizada. O Solver também encontra um valor otimizado (máximo ou mínimo), de uma fórmula numa célula, chamada de célula de objetivo, sujeita a restrições. Neste caso o valor a ser otimizado, contido na célula objetivo, é a receita. As restrições são dadas pela oferta e demanda de cada tipo de sortimento.

4.4.1 Descrição do modelo de otimização

Empregamos um modelo, utilizando o Solver, que visa maximizar a receita bruta, $Max(RBT)$, em que

$$RBT = \sum_{i=1}^N RB_S(E_i) + \sum_{i=1}^N RB_T(E_i) + \sum_{i=1}^N RB_L(E_i),$$

é dada pela soma da receita bruta da venda dos três tipos de sortimentos, Serraria (S), Torete (T) e Lenha (L) para um determinado número, N , de Empresas E_1, E_2, \dots, E_N .

O Solver foi implementado considerando cinco grupos de células (ver Tabela 5): as células de variáveis independentes, células de variáveis dependentes, células de variáveis de decisão, células de restrições e finalmente a célula de objetivo.

O Solver ajusta os valores nas células do grupo de decisão, respeitando os valores em cada uma das células de restrição, para maximizar ou minimizar o resultado da célula de objetivo. Por outras palavras, pode-se utilizar o Solver para determinar o valor máximo ou mínimo de uma célula ao alterar as células das variáveis independentes.

Neste caso, as células de variáveis independentes denotam os parâmetros a serem inseridos pelo usuário, enquanto as células de variáveis dependentes denotam valores calculados a partir das células das variáveis independentes.

As células de variáveis de decisão calculam a quantidade vendida que otimiza a receita bruta de uma determinada proposta comercial.

Já o grupo de células de restrições são caracterizadas por conter as restrições utilizadas para otimização, que neste caso são dadas pela diferença entre oferta e demanda para cada tipo de sortimento em estoque, levando em conta todos os quatro cenários possíveis I, II, III e IV (veja Tabela 1). Por último, a célula de objetivo é a célula a ser otimizada. Neste caso, a célula objetivo contém a receita total e a otimização tem o efeito de maximizar este valor.

A proposta de otimização é dada, em geral, considerando a análise de mercado de N empresas, denotadas por E_1, E_2, \dots, E_N . Desta análise se obtém a demanda, por metro cúbico, de cada empresa para cada um dos tipos de sortimentos. A demanda para serraria, torete e lenha, de uma Empresa E_i , $1 \leq i \leq N$, é dada pelas variáveis independentes $DS(E_i)$, $DT(E_i)$ e $DL(E_i)$. As variáveis independentes de demanda, denotadas pela cor branca na Tabela 3, devem ser preenchidas pelo usuário considerando $DS(E_i)$, $DT(E_i)$ e $DL(E_i)$, $1 \leq i \leq N$, maiores ou iguais a zero, podendo assumir valor zero na situação em que a Empresa E_i não tem interesse em comprar este tipo de sortimento.

A partir da análise de mercado, também se obtém os preços por metro cúbico de cada tipo de sortimento para cada empresa E_i , $1 \leq i \leq N$. Neste modelo, o preço negociado pelo metro cúbico de serraria, torete e lenha é denotado pelas variáveis independentes $PS(E_i)$, $PT(E_i)$ e $PL(E_i)$, $1 \leq i \leq N$, representadas na Tabela 5 pelas células com cor branca.

As células de variáveis de decisão, representadas em cor azul na Tabela 3, assumem valores de 0 até o valor demandado. Neste modelo as variáveis de decisão são denotadas por

$$OS(E_i), OT(E_i), OL(E_i) \quad 1 \leq i \leq N.$$

A variáveis de decisão são escolhidas pelo Solver de modo a maximizar a Receita respeitando as demais restrições, ou seja, a performance do Solver revelará quais as melhores escolhas para $OS(E_i), OT(E_i), OL(E_i) \quad 1 \leq i \leq N$, de modo a obter um valor ótimo para a receita.

A receita bruta em reais, na venda de cada sortimento de serraria, torete e lenha, para uma dada empresa E_i é denotado por $RB_S(E_i)$, $RB_T(E_i)$ e $RB_L(E_i)$, respectivamente. Neste modelo, estas variáveis são categorizadas no grupo das células de variáveis dependentes, denotadas em amarelo na Tabela 3. Estas variáveis dependentes são obtidas diretamente a partir das variáveis independentes, mais especificamente a receita bruta é obtida pelo preço

para a quantidade otimizada, para cada tipo de sortimento, isto é, para serraria, torete e lenha, respectivamente, para cada empresa E_i , $1 \leq i \leq N$.

$$RB_S(E_i) = PS(E_i)OS(E_i),$$

$$RB_T(E_i) = PT(E_i)OT(E_i),$$

$$RB_L(E_i) = PL(E_i)OL(E_i).$$

O inventário é levado em conta na Tabela 4. Os volumes (m^3) de sortimentos em estoque, serraria, torete e lenha são denotados por ES, ET e EL, respectivamente. Neste modelo, ES, ET e EL são variáveis independentes, denotadas por células em cor branca na Tabela 4, as quais devem ser inseridas pelo usuário.

Neste modelo, as variáveis dependentes S, T e L representadas na Tabela 4, pela cor amarela, representam o volume total (m^3) da demanda de cada sortimento. Mais especificamente, para cada uma das decisões $OS(E_i), OT(E_i), OL(E_i), 1 \leq i \leq N$, totalizando $3N$ decisões dependendo do número N de empresas, o volume total negociado é dado pelo somatório das quantidades otimizadas.

$$S = \sum_{i=1}^N OS(E_i),$$

$$T = \sum_{i=1}^N OT(E_i),$$

$$L = \sum_{i=1}^N OL(E_i).$$

Os volumes totais demandados de cada sortimento S, T e L e as variáveis de decisão $OS(E_i), OT(E_i), OL(E_i), 1 \leq i \leq N$, estão sujeitas a restrições. Os volumes de cada sortimento têm que ser menores ou iguais ao estoque disponível no inventário. As restrições dos volumes totais demandados são consideradas na Tabela 4, em vermelho, por Res(S), Res(T) e Res(L), de modo que neste modelo, devem ser atendidas as seguintes restrições:

$$S \leq Res(S),$$

$$T \leq Res(T),$$

$$L \leq Res(L).$$

A quantidade vendida otimizada tem que ser um valor não negativo menor que a demanda do respectivo sortimento para a respectiva empresa, $1 \leq i \leq N$;

$$0 \leq OS(E_i) \leq DS(E_i),$$

$$0 \leq OT(E_i) \leq DT(E_i),$$

$$0 \leq OL(E_i) \leq DL(E_i).$$

Consideramos todos os possíveis cenários I, II, III e IV (ver Tabela 1), nos quais se considera que serraria pode ser usada como torete e lenha e que torete pode ser usado como lenha. Assim, a restrição de $Res(S)$ é dada pelo estoque máximo de serraria disponível,

$$Res(S) = ES,$$

enquanto $Res(T)$ é dado pelo estoque de torete acrescido do restante de serraria não negociada,

$$Res(T) = ET + (ES - S),$$

analogamente $Res(L)$ é dado pelo estoque de lenha acrescido do restante de serraria e torete não negociados,

$$Res(L) = EL + (ES - S) + (ET - T).$$

Finalmente a célula objetivo contém a receita bruta total (R\$), que é calculada como a soma das receitas brutas obtidas na venda de cada sortimento para cada empresa,

$$RBT = \sum_{i=1}^N RB_S(E_i) + \sum_{i=1}^N RB_T(E_i) + \sum_{i=1}^N RB_L(E_i).$$

Tabela 3- Células de variáveis de decisão: As células em azul contém as variáveis de decisão, as células em branco contém variáveis independentes enquanto as células em amarelo contém as variáveis dependentes.

Empresa	Sortimento	Demanda (m ³)	Decisão	Preço (R\$/m ³)	Receita Bruta (R\$)
E ₁	Serraria	DS(E ₁)	OS(S ₁)	PS(E ₁)	RB _S (E ₁)
	Torete	DT(E ₁)	OT(T ₁)	PT(E ₁)	RB _T (E ₁)
	Lenha	DL(E ₁)	OL(L ₃)	PL(E ₁)	RB _L (E ₁)
E ₂	Serraria	DS(E ₂)	OS(S ₂)	PS(E ₂)	RB _S (E ₂)
	Torete	DT(E ₂)	OT(T ₂)	PT(E ₂)	RB _T (E ₂)
	Lenha	DL(E ₂)	OL(L ₂)	PL(E ₂)	RB _L (E ₂)
E ₃	Serraria	DS(E ₃)	OS(S ₃)	PS(E ₂)	RB _S (E ₃)
	Torete	DT(E ₃)	OT(T ₃)	PT(E ₃)	RB _T (E ₃)
	Lenha	DL(E ₃)	OL(L ₃)	PL(E ₃)	RB _L (E ₃)
...
E _M	Serraria	DS(E _N)	OS(S _N)	PS(E _N)	RB _S (E _N)
	Torete	DT(E _N)	OT(T _N)	PT(E _N)	RB _T (E _N)
	Lenha	DL(E _N)	OL(L _N)	PL(E _N)	RB _L (E _N)

Tabela 4- Células de restrição e otimização: As células em branco denotam variáveis independentes, as células em amarelo denotam variáveis dependentes, as células em vermelho denotam as células de restrição e a célula em verde denota a célula objetivo.

	Inventário		Serraria	Torete	Lenha
Sortimento	Estoque máx. (m ³)	Vol. negociado (m ³)	S	T	L
Serraria	ES	Tipo de restrição	≤	≤	≤
Torete	ET	Restrição	Res(S)	Res(T)	Res(L)
Lenha	EL	Receita bruta	RBT		

Tabela 5- Grupos de células utilizadas no modelo.

Variáveis	Tipo	Unidade	Descrição
$DS(E_i)$	Independente	m ³	Demanda de serraria para a Empresa E_i
$DT(E_i)$	Independente	m ³	Demanda de torete para a Empresa E_i
$DL(E_i)$	Independente	m ³	Demanda de lenha para a Empresa E_i
$PS(E_i)$	Independente	R\$	Preço de serraria para Empresa E_i
$PT(E_i)$	Independente	R\$	Preço de torete para Empresa E_i
$PL(E_i)$	Independente	R\$	Preço de lenha para Empresa E_i
$RB_S(E_i)$	Dependente	R\$	Receita bruta da venda de serraria para a empresa E_i $RB_S(E_i) = PS(E_i)OS(E_i),$
$RB_T(E_i)$	Dependente	R\$	Receita bruta da venda de torete para a empresa E_i $RB_T(E_i) = PT(E_i)OT(E_i),$
$RB_L(E_i)$	Dependente	R\$	Receita bruta da venda de lenha para a empresa E_i $RB_L(E_i) = PL(E_i)OL(E_i),$
S	Dependente	m ³	Volume de serraria a ser negociado pela empresa E_i . $S = \sum_{i=1}^N OS(E_i),$
T	Dependente	m ³	Volume de torete a ser negociado pela empresa E_i . $T = \sum_{i=1}^N OT(E_i)$
L	Dependente	m ³	Volume de lenha a ser negociado pela empresa E_i . $L = \sum_{i=1}^N OL(E_i).$

$OS(E_i)$	Decisão	m^3	Quantidade otimizada de serraria para a Empresa E_i $0 \leq OS(E_i) \leq DS(E_i)$,
$OT(E_i)$	Decisão	m^3	Quantidade otimizada de torete para a Empresa E_i $0 \leq OT(E_i) \leq DT(E_i)$
$OL(E_i)$	Decisão	m^3	Quantidade otimizada de lenha para a Empresa E_i $0 \leq OL(E_i) \leq DL(E_i)$
$Res(S)$	Restrição	m^3	Estoque de serraria disponível: $Res(S) = ES$
$Res(T)$	Restrição	m^3	Estoque de torete disponível: $Res(T) = ET + (ES - S)$
$Res(L)$	Restrição	m^3	Estoque de lenha disponível: $Res(L) = EL + (ES - S) + (ET - T)$
RBT	Objetivo	R\$	Receita bruta total: $RBT = \sum_{i=1}^N RB_S(E_i) + \sum_{i=1}^N RB_T(E_i) + \sum_{i=1}^N RB_L(E_i).$

4.4.2 Utilizando o Modelo

O modelo tem como objetivo maximizar a Receita da venda dos sortimentos em estoque, escolhendo, de forma ótima, as quantidades otimizadas. Neste caso o Solver pode ser utilizado pelas funções Simplex LP. Para se utilizar o modelo, o usuário deve:

1. Inserir na planilha os valores das variáveis independentes;
2. Indicar ao solver a célula objetivo utilizando a opção de maximização;
3. Identificar as células de decisão;
4. Impor as restrições dadas pelas células de restrição;

5. Utilizar o Solver pela opção Simplex LP.
6. Aguardar o tempo necessário para otimização;
7. Obter as variáveis de decisão que maximizam a receita.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentadas a seguir as seguintes características sobre as 22 árvores do povoamento de Teca (*Tectona grandis*):

Tabela 6- Características das árvores de *Tectona grandis* estudadas.

DAP médio (cm)	40,0
Diâmetro máx. (cm)	49,3
Diâmetro mín (cm)	28,7
Coef. de variação DAP	17%
Altura média (m)	24,1
Altura máx. (m)	29,6
Altura mín (m)	18,8
Coef. de variação altura	12%

Observamos que as árvores de Teca apresentam um DAP médio grande, de 40,0 cm, o que pode proporcionar uma quantidade de volume maior para serraria. Não obstante, os valores das alturas são parecidos aos encontrados na literatura para eucalipto tratando-se de uma espécie bastante alta.

O modelo do polinômio de 5º grau proposto por Schöepfer (1966) apresentou erro padrão de estimativa (Syx) de diâmetro de 2,56 cm e 8,53 % em erro padrão da estimativa em percentual (Syx %) e 0,949 de coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) (ver Tabela 7).

Os valores encontrados na literatura, como Madi (2017), encontraram um erro padrão da estimativa em percentual (Syx %) de 10,69 e 0,95 de coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado). Outros autores obtiveram 0,9149 para R^2 ajustado e 18,22% para o erro padrão da estimativa em percentual (SILVA; WOJCIECHOWSKI; SANTOS, 2017). Observa-se que os valores do erro padrão da estimativa em porcentual (Syx%) e o coeficiente de determinação

ajustado R^2 com valores de 8,53% e 0,94 respectivamente, não diferem tanto dos valores encontrados na literatura.

Tabela 7- Estatísticas empregadas para avaliar a qualidade do ajuste, e os coeficientes de ajustes encontrados para a variável diâmetro.

R² ajustado	0,94
Syx(cm)	2,56
Syx%	8,53
β 0	1,36
β 1	-7,59
β 2	38,87
β 3	-96,55
β 4	107,41
β 5	-44,17

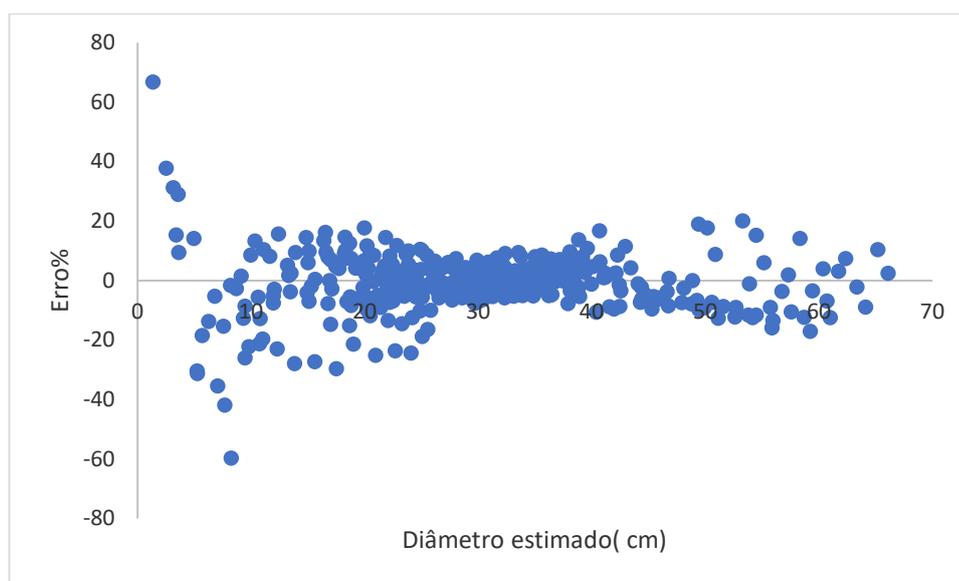


Figura 6- Estatísticas empregadas para avaliar a qualidade do ajuste e os coeficientes de ajustes encontrados para a variável diâmetro.

O gráfico de dispersão de resíduos demonstra que o erro (%) é menor para classes diamétricas maiores. Essa tendência já era esperada e também foi observada por Miguel (2009).

O modelo polinomial de quinto grau foi integrado para gerar a equação de volume, considerando que ele foi eficiente para descrever o perfil do fuste ao estimar os diferentes diâmetros a diferentes alturas pré-determinadas.

O regime de desbastes padrão atualmente adotado pela empresa, com base em seus históricos de manejo, é apresentado na Tabela 8:

Tabela 8- O regime de desbastes padrão atualmente adotado pela empresa para espaçamento 3x3 metros, considerando 10% de mortalidade.

Idade	Total	Desbaste	Remanescente	% Desbaste
	Arv/ha		Arv/ha	
4	1000	1P	550	45%
7	555	1T	330	41%
10	330	2D	230	30%
15	230	3D	160	30%
22	160	CF	0	100%

Sabendo-se que o povoamento tem 13 anos e um espaçamento 3x3 metros, segundo dados encontrados no Resumo Público do Plano de Manejo Florestal da Floresteca S/A (ver Tabela 8), espera-se que este povoamento tem um total aproximado de 230 árvores por hectare.

Foi feita uma extrapolação dos volumes calculados com os dados encontrados obtendo:

Tabela 9- Sortimento para os diversos arranjos de produtos para cada cenário criado com seus respectivos volumes e lucros não otimizados.

Cenários	Volume (m ³)			
	Serraria	Torete	Lenha	Receita Bruta
I	201,95		86,28	R\$ 332.616,3
II		275,06	13,17	R\$ 149.984,6
III	201,95	73,11	13,17	R\$ 364.054,5
IV			288,24	R\$ 31.706,6

Nos cenários não otimizados o de maior renda bruta foi o Cenário III, seguido do Cenário I. Neste cenário a produção seria destinada a serraria, torete e lenha. O volume comercial calculado ficou em 201,95 m³ para serraria, 73,11 m³ para torete, 13,17 m³ para lenha. Ao aplicar os valores dos preços de cada produto a receita total resultou em R\$ 364.054,50. No Cenário I, em que a produção foi destinada a serraria e lenha, encontramos uma receita de R\$332.616,30 e observamos que a produção de multiprodutos ou de serraria aumenta o valor da receita total, o que pode ser previsível visto que o preço de serraria e de torete é maior que o de lenha.

Observa-se que há aumento no volume de lenha nos cenários I e IV. No Cenário I, isto ocorre porque a seção das árvores que antes era destinada ao produto torete passa a ser usada também como lenha, a qual tem exigência de dimensões menores.

O Cenário IV, em que não é feito sortimento e há apenas lenha, mostra que o volume comercial total de madeira na área estudada, de um hectare, é de 288,24 m³. O volume total de madeira na área é de 297,59 m³, ou seja, 9,34 m³ são resíduos. Visto que a floresta tem 13 anos, o incremento médio anual (IMA) é de 22,89 m³, valor superior ao encontrado na literatura para árvores entre 20 e 25 anos, aproximadamente 15 m³ha⁻¹ano, em termos de produção líquida para povoamentos desbastados aos 5, 10 e 15 anos (FAVALESSA *et al.*, 2012).

Este incremento menor pode dever-se a serem dados de estudos antigos, e as atividades de pesquisa e desenvolvimento em prol do melhoramento genético e da otimização do manejo florestal trabalham com a finalidade de aumentar o incremento médio anual (IMA) dos plantios florestais. E também, por estas árvores estarem mais próximas da idade de máximo crescimento, com o passar do tempo a floresta entra na senilidade, em que o IMA tende a reduzir. A Teca atingiu um crescimento de 15 m³ha⁻¹ano em 2012 (ABRAF, 2013), apresentando um aumento de 5,3% em relação a 2010. O valor máximo de IMA para a Teca ocorre em uma idade entre os 7 e 12 anos (LADRACH, 2009).

O modelo criado foi utilizado para comparar vários cenários utilizando programação linear. Nesses cenários foram comparadas as demandas com as ofertas disponíveis ao mesmo tempo em que se comparou os preços com as demandas a fim de otimizar a receita. Esta análise torna-se interessante devido ao desequilíbrio entre a oferta e a procura, que determinou a contínua valorização da madeira de Teca (VEIT, 2000).

Em geral, o modelo proposto pode ser implementado em diversas situações para análise de um número arbitrários de empresas e de propostas de venda, dependendo das demandas e ofertas disponíveis. Segundo Finger *et al.* (2001), a produção mundial de madeira de Teca é estimada em 3 milhões de m³/ano, a qual é extremamente baixa considerando a demanda atual dessa espécie.

A aplicação do modelo foi exemplificada em um Cenário Exemplo segundo a Tabela 10, na qual 5 empresas, E1, E2, E3, E4 e E5 apresentaram demandas de diversos sortimentos.

Neste Cenário Exemplo, foi considerado que cada uma das empresas apresentou demandas de multi-sortimentos. Por exemplo, a empresa E3 tem uma demanda de 400 m³ de serraria e 7 m³ de lenha, e não apresentou interesse na compra do sortimento de torete representado como 0 (Tabela 10). Os preços dos sortimentos variam de uma empresa para a

outra, com o preço da serraria sempre maior. Como exemplo, na empresa E1 madeira para serraria tem preço de R\$ 1.350,00, torete de R\$ 490,00 e a lenha o menor preço, de R\$ 100,00.

A programação linear foi utilizada no Cenário Exemplo, obtendo-se quantidade otimizada. Como resultado, na E1 optou-se por atender toda a demanda de torete, ao passo que se recusou a venda de serraria para esta mesma empresa. A receita bruta foi calculada com as quantidades otimizadas multiplicadas por seus respectivos preços. Na última coluna fez-se o somatório das receitas brutas dos respectivos sortimentos para cada empresa.

O resultado foi que a combinação que maximiza a receita bruta foi obtida vendendo-se 151,95 m³ de serraria para a empresa E3 e 50 m³ de serraria para a empresa E2.

Enquanto a venda de torete foi de 20 m³ para a empresa E1, 20 m³ para a empresa E4 e 15 m³ para a empresa E5, sendo negociados 20+20+15=55 m³ de torete, dos 73,11 m³ totais disponíveis no estoque, de modo que a diferença de 73,11-55=18,11 m³ foi usada para compor o estoque de lenha disponível no inventário passando este de 13,17 m³ para 31,29 m³.

Deste novo estoque de lenha foram vendidos 6 m³ para a empresa E1, 11 m³ para a empresa E2, 7 m³ para a empresa E3, 3,29 m³ para a empresa E4 e 4 m³ para a empresa E5.

O modelo levou em conta que o sortimento serraria pode ser empregado como torete e lenha, ao passo que torete pode ser empregado também como lenha. Observa-se que o Cenário Exemplo pode ocasionar uma menor rentabilidade em comparação com o Cenário III, mais lucrativo, porém, não otimizado.

Tabela 10-Exemplo de otimização em um Cenário Exemplo.

Empresa	Sortimento	Demanda (m ³)	Demanda otimizada (m ³)	Preço (R\$)	Receita Bruta (R\$)	Receita bruta por comprador (R\$)
E ₁	Serraria	400	0	1350	0	R\$ 10.400,00
	Torete	20	20	490	9.800	
	Lenha	6	6	100	600	
E ₂	Serraria	50	50	1.600	80.000	R\$ 80.990,00
	Torete	0	0	550	0	
	Lenha	11	11	90	990	
E ₃	Serraria	400	151,95	1.500	227.925	R\$ 228.485,00
	Torete	0	0	500	0	
	Lenha	7	7	80	560	
E ₄	Serraria	150	0	1.200	0	R\$ 11.230,30
	Torete	20	20	550	11.000	
	Lenha	30	3,29	70	230,3	
E ₅	Serraria	200	0	900	0	R\$ 7.190,00
	Torete	15	15	450	6.750	
	Lenha	4	4	110	440	

No Cenário Exemplo (ver Tabela 10), o modelo apresenta uma tendência a direcionar as vendas para as empresas com os maiores preços no mercado. Porém, nem sempre as empresas com maiores preços oferecem a quantidade demandada suficiente. Neste caso, o modelo venderia primeiro para a empresa com maior preço ainda que com menor demanda, e depois o restante para seguinte empresa que conseguisse oferecer o restante da demanda com o segundo maior preço, e assim consecutivamente, até abater a quantidade ofertada.

Portanto, o que induz o modelo a resolver de forma ótima a distribuição é o preço pago por cada produto - quanto mais alto melhor - e a quantidade demandada - quanto maior quantidade, melhor.

O modelo utilizado revelou-se uma boa ferramenta para resolver problemas de otimização, porque leva em conta fatores que influenciam na tomada de decisões na hora da venda de produtos no mercado. Como por exemplo, os diferentes preços podem ser ocasionados pelas diferentes demandas encontradas no mercado.

Desta forma, a programação linear apresenta-se como um método matemático bastante viável para minimizar os riscos na tomada de decisões ao desenvolver análises de custo-benefício, com potencial para aumentar a receita do produtor florestal, assim como, a quantidade dos produtos disponibilizados para o mercado consumidor e, inclusive, garantir versatilidade ao projeto.

O Brasil é um país com ótimas condições para o cultivo de Teca, já que aqui se obtém um crescimento ainda maior do que nos países de ocorrência natural da espécie.

6 CONCLUSÕES

A função de afilamento ajustada descreveu satisfatoriamente a forma do tronco da espécie, com coeficientes estatísticos e distribuição dos resíduos similares a outros estudos que trabalharam com Teca.

O trabalho atende o objetivo de determinar os volumes de madeira para diferentes usos de um povoamento de Teca, cujo volume total é 288,24 m³ por hectare, sem resíduos. O cálculo dos volumes de cada sortimento resultou em 201,95 m³ de serraria, 73,11 m³ de torete e 13,17 m³ de lenha.

Outro objetivo, de maximizar a receita bruta dos produtores de Teca, a partir de sortimento em diversos produtos, também foi atendido. Primeiramente sem ajuda de

programação linear, obtém-se uma renda de R\$ 364.054,50. A porcentagem que maximiza a receita bruta seria de 70,07% para serraria, 25,36% para torete e 4,57% para lenha. Em seguida introduzimos um modelo de otimização utilizando solver para obter a receita bruta maximizada.

O modelo de otimização foi exemplificado utilizando-se um Cenário Exemplo na qual a venda foi distribuída entre 5 empresas. Apesar de que, em princípio, o sortimento de produtos que possibilite o maior retorno possa parecer a combinação de multiprodutos de serraria, torete e lenha (Cenário III), na programação linear podemos observar que, às vezes, dependendo da demanda, é necessário vender serraria como torete, ou torete como lenha. Notou-se que no Cenário Exemplo, parte do sortimento de torete foi vendido como lenha. Neste caso, foram negociados 55 m³ de torete dos 73,11 m³ totais disponíveis no estoque, de modo que a diferença de 18,11 m³ foi usada para compor o estoque de lenha disponível no inventário.

Concluimos que a programação linear é uma ferramenta interessante para a maximização da receita. Sua utilização é interessante na maximização do lucro da Teca, sendo esta uma espécie com grande interesse comercial e alta demanda, longe ainda de esgotar as exigências do mercado.

7 BIBLIOGRAFIA

ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013**. Ano base 2012. ABRAF. 148 p. 2014.

AHRENS, S.; HOLBERT, D. **Uma função para forma de tronco e volume de Pinus taeda L.** Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo, n.3, p.37-68, 1981.

ARCE, J. E. **Modelos matemáticos de otimização**. Apostila. Curitiba: UFPR, 2009.

ARCE, Júlio Eduardo; MACDONAGH, Patrício; FRIEDL, Ramón Alejandro. **Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais**. Rev. Árvore, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 207-217, Abr. 2004.

BEBARTA, K. C. **Teak: Ecology, Silviculture, Management and Profitability**. International Book Distributors, 1999. 379 p.

BEHLING, M. **Nutrição, partição de biomassa e crescimento de povoamentos de teca em Tangará da Serra-MT**. 2009. 176 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

BRAZ, E. M. **Um modelo em programação linear para garantia do rendimento sustentado em pequena propriedade na floresta tropical**. Dissertação de Mestrado, UFPR, 2001.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. K. **Decision methods for forest resource management**. New York: Macmillan Publishing Company, 1987.

CALDEIRA, B. R. P. P. **Caracterização das propriedades físico-mecânicas e determinação da percentagem de cerne da madeira de Tectona grandis**. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2004. 84 p.

CATIE - Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. **Silvicultura de espécie promisorias para producción de leña en América Central**: resultados de cinco años de investigación. Turrialba: CATIE, 1986. 228 p.

CALDEIRA, S. F.; CALDEIRA, S. A. F.; MENDONÇA, E. A. F. de; DINIZ, N. N. **Caracterização e avaliação da qualidade dos frutos de teca (Tectona grandis L.f.) produzidos no Mato Grosso**. Revista Brasileira de Sementes, v. 22, n. 1, p. 216–224, 2000.

CALDEIRA, S. F.; OLIVEIRA, D. L. C. **Desbaste seletivo em povoamentos de *Tectona grandis* com diferentes idades**. Acta Amazonica, v. 38, n. 2, p. 223–228, 2008.

CAMINO, R. de; MORALES, J. P. **Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades**. Turrialba: CATIE, 2013. 392 p. (Série técnica: Informe técnico, 397).

CAMPOS, J. C. C., LEITE, H. G. **Mensuração Florestal, Perguntas e Respostas**. 3. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 548 p.

CENTENO, J. C. **El manejo de las plantaciones de teca**. Actualidad Forestal Tropical, v. 5, n. 2, p. 10–12, 1997.

CHAVES, E.; FONSECA, W. **Teca (*Tectona grandis* L.f.) árbol de uso múltiple em América Central**. Turrialba: CATIE, 1991. 47 p. (Série técnica: Informe técnico, 179).

CLEMENTS, C. R.; HIGUCHI, N. **A Floresta Amazônia e o futuro do Brasil**. Ciência e Cultura. São Paulo, v.58, n.3, p. 44-49, jul/set 2006.

CONCEIÇÃO, M. B. **Comparação de métodos de estimativas de volume em diferentes idades em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill ex- Maiden**. 2004. 166 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR.

DANTZIG, G.B. **Linear programming and extensions**. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1963.

D'OLIVEIRA, M. V. N.; BRAZ, E. M.; OLIVEIRA, L. C. de; MIRANDA, E. M. de; SÁ, C. P. de; ARAÚJO, H. J. B. de. **Manejo Florestal em Áreas de Reserva Legal em Pequenas Propriedades Rurais**. Rio Branco: EMBRAPA Acre, 2002.

DRESCHER, R. Crescimento e produção de *Tectona grandis* Linn. F. **Empovoamentos jovens de duas regiões do Estado de Mato Grosso**. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS.

DUERR, W. A.; TEEGUARDEN, D. E.; CHRISTIANSEN, N. B.; GUTTENBERG, S. **Forest Resource Management: Decision-Making Principles and Cases**. Corvallis: O.S.U. Book Stores. 612 p. 1982.

DUPUY, B.; MAÎTRE, H.; KANGA, A. N. **Table de production du teck (*Tectona grandis*): L'exemple de la Côte d'Ivoire**. Bois et Forêts des Tropiques, v. 3, n. 261, p. 5–16, 1999.

ENTERS, T. **Site, technology and productivity of teak plantations in Southeast Asia.** Unasylva, v. 51, n. 201, p. 55–61, 2000.

EWEL, J ; CONDE, L. **Potential ecological impact of increased intensity of tropical forest utilization.** Florida. Botany Department of University of Florida, 1976.

FAVELESSA, C. M. C.; UBIALI J. A.; CALDEIRA S. F.; DRESCHER R. **Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas de *Tectona grandis* na região centro-sul mato-grossense.** Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 72, p. 373-387, out./dez. 2012.

FERREIRA, C. A.; SILVA, H.D. Formação de povoamentos florestais. Colombo: Embrapa Florestas, 2008. p. 39-41.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, A. D. de; BARBOSA, L. K. F. **Teca (*Tectona grandis* L.f.): principais perguntas do futuro empreendedor florestal.** Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. 87 p. (Embrapa Acre. Documentos, 97).

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, A. D. de; SCOLFORO, J. R. S. **Análise econômica de povoamentos não desbastados de *Tectona grandis* L.f., na microrregião do baixo Rio Acre.** Cerne, v. 11, n. 4, p. 342–353, 2005.

FILHO, TSUKAMOTO; SILVA, M. L. da; COUTO, L.; MÜLLER, M. D. **Análise econômica de um plantio de teca submetido a desbastes.** Revista Árvore, v. 27, n. 4, p. 487-494, 2003.

FINGER, Z; FINGER, F. A.; DRESCHER, R. **Teca (*Tectona grandis* L.f.): plante esta idéia.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 1., 2001, Santa Maria-RS. Anais. Santa Maria: UFSM, 2001. CD-Rom.

FLORESTECA S/A. **Resumo público – Plano de manejo Florestal 2015.** Disponível em: http://www.floresteca.profissional.ws/arquivos/pdf/Resumo_Publico_Plano_Manejo_Florestal_2015.pdf .Acesso em: 29 de agosto de 2021.

FLÓREZ, J.B. **Caracterização tecnológica da madeira jovem de Teca (*Tectona grandis* L. f).** 2009. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) Universidade Federal de Lavras, 2012.

GARCIA, M. L. **Intensidade de desbaste em um povoamento de *Tectona grandis* L.f., no município de Sinop – MT.** 2006. 45 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT.

GEORKIANTZ, S.R.; OLSEN, L.P. **Composite volume table for timber and their application in the Lake State.** Washington - D.C: U. S. D. A., (Technical Bull., 1104), 1955. 51p.

GOMES, I. M. da S.; SANTOS JUNIOR, W. R. dos; ARRUDA, A. da S. **Análise de soluções para extração de corante de folhas da teca em diferentes estágios de desenvolvimento.** Enciclopédia Biosfera, v. 7, n. 12, p. 1–18, 2011.

GONZÁLEZ, W. F. **Manual para productores de teca (*Tectona grandis* L. f) en Costa Rica.** Heredia: Costa Rica, 2004. 121 p.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.de; CUNHA, U. S. da. **Introdução ao manejo e economia de florestas.** Curitiba: Ed. da UFPR, 1998.

JOHNSON, K. N.; SCHEURMAN, H. L. **Techniques for prescribing optimal timber harvest and investment under different objectives.** Forest Science Monography 18, Washington, 1977.

KAOSA-ARD, A. Teak (*Tectona grandis* Linn. F.) natural distribution and related factors. **Natural History Bulletin of the Siam Society**, v. 29, p. 55–74, 1981.

KOKUTSE, A.; BAILLERES, H.; STOKES, A.; KOKOU, K. **Proportion and quality of heartwood in Togolese teak (*Tectona grandis* L.f).** Forest Ecology and Management, Amsterdam, v. 189, n. 1-3, p. 37-48, 2004.

KRISHNAPILLAY, B. **Silviculture and management of teak plantations.** *Unasylya*, v. 51,n. 201, p. 14–21, 2000.

LACKI P. **Rentabilidade na Agricultura: com mais Subsídios ou com mais Profissionalismo? Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação.** Santiago, Chile. 1996. Disponível em <https://www.milkpoint.com.br/fao/lacki.htm>, Acesso em 27 de agosto de 2021.

LADRACH, W. **Management of teak plantations for solid wood products.** Bethesda: ISTF, 2009. 25 p.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas**. Rossdorf: TZ-Verl.-Ges., 1990. 343 p.

LENZA, E., & KLINK, C. A. **Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um cerrado sentido restrito de Brasília, DF**. Revista Brasileira de Botânica, 29(4), 627–638, 2006.

LIMA, C. G. da R.; CARVALHO, M. de P. e; NARIMATSU, K. C. P.; SILVA, M. G. da; QUEIROZ, H. A. de. **Atributos físico-químicos de um Latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 163–173, 2010.

LIMA, L.K.S. **Aspectos Gerais de Silvicultura**. www.webartigos.com, 2010. Disponível em: <https://www.webartigos.com/artigos/aspectos-gerais-da-silvicultura/47957#ixzz5CZpKiGLz>. Acesso em: 28 de agosto de 2021.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; BACHER, L. B. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

MADI, J.P.S. **Funções de afilamento não segmentadas aplicadas ao sortimento de *Tectona grandis* L.f** em Curitiba, 2017.

MALDONADO, G.; LOUPPE, D. **Les plantations villageoises de teck en Côte d'Ivoire**. Bois et Forêts des Tropiques, n. 262, p. 9-30, 1999.

MATA, M. M. **Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. f. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica**. 1999. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidad Austral de Chile, Valdivia – Chile.

MATRICARDI, W. A. T. **Efeitos dos fatores de solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis* L. F.) cultivada na grande Cáceres - Mato Grosso**. 1989. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP.

MCGUIGAN, B.N. **A log resource allocation model to assist forest industry managers in process selection and location, wood allocation and transportation and production planning**. Apitta, Melbourne, 1984. 37(4): 289-96.

- MIGUEL, E. P. **Avaliação biométrica e prognose da produção de *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) na região norte do estado de Goiás.** 159 f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba. 2009.
- MIGUEL, E. PEREIRA.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J. E. **Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás.** Floresta, Curitiba - PR, v. 41, n. 2, p. 355-368, abr/jun. 2011.
- MORAES, L. F. D. de; CAMPELLO, E. F. de C.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A. **Características do solo na restauração de áreas degradadas na Reserva Biológica de Poço das Antas, RJ.** Ciência Florestal, v. 18, n. 2, p. 193–206, 2008.
- NAIR, C. T. S.; SOUVANNAVONG, O. **Emerging research issues in the management of teak.** Unasylva, v. 51, n. 201, p. 45–54, 2000.
- NIAMKÉ, F. B.; AMUSANT, N.; CHARPENTIER, J.; CHAIX, G.; BAISSAC, Y.; BOUTAHAR, N.; ADIMA, A. A.; KATI-COULIBALY, S.; JAY-ALLEMAND, C. **Relationships between biochemical attributes (non-structural carbohydrates and phenolics) and natural durability against fungi in dry teak wood (*Tectona grandis* L. f.).** Annals of Forest Science, v. 68, p. 201–211, 2011.
- NOCETTI, M.; ROZENBERG, P.; CHAIX, G.; MACCHIONI, N. **Provenance effect on the structure of teak (*Tectona grandis* L.f.) wood by X-ray microdensitometry.** Annals of Forest Science, v. 68, p. 1375–1383, 2011.
- OLIVEIRA, B. R. **Determinação do volume de cerne produzido em árvores de *Tectona grandis* L. f. em Mato Grosso.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Engenharia Florestal, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Cuiabá, 2014.
- OMBINA, C. A. **Soil characterization for teak (*Tectona grandis*) plantations in Nzara District of South Sudan.** 2008. 135 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Université des Sciences et Techniques de Masuku – Gabão.
- PANDEY, D.; BROWN, C. **Teak: a global overview.** Unasylva, v. 51, n. 201, p. 3–13, 2000.

- PELISSARI, A. L. **Silvicultura de precisão aplicada ao desenvolvimento de *Tectona grandis* L.f. na região Sul do Estado de Mato Grosso**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá - MT.
- PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R. **Desenvolvimento Quantitativo e Qualitativo de *Tectona grandis* L.f. em Mato Grosso**. *Floresta e Ambiente*, v. 20, n. 3, p. 371–383, 2013.
- PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; SANTOS, V. S. dos; SANTOS, J. O. P. dos. **Correlação espacial dos atributos químicos do solo com o desenvolvimento da teca em Mato Grosso**. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 32, n. 71, p. 247–256, 2012.
- PEREIRA, B. **Otimização da produção madeireira de um povoamento de eucalipto**. 2015. x, 62 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José (Costa Rica): IICA/GTZ, 586p. 1997.
- RAMACHANDRAN, S.; RAJASEKARAN, A.; KUMAR, K. M. **Antidiabetic, antihyperlipidemic and antioxidant potential of methanol extract of *Tectona grandis* flowers in streptozotocin induced diabetic rats**. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, p. 624-631, 2011.
- RODRIGUEZ, L.C.E. **Técnicas quantitativas para a gestão de florestas plantadas. Apostila do programa de reciclagem em Métodos Quantitativos – Curso de Planejamento da Produção Florestal (Modelos de Otimização)**. Piracicaba, SP. Julho de 2005
- RUGMINI, P.; JAYARAMAN, K. **Intrinsic units of growth for teak trees**. *Trees*, v. 23, p.51–58. 2009.
- SALAZAR, R.; ALBERTIN, W. **Requerimientos edaficos y climáticos para *Tectona grandis***. *Turrialba*, v. 1, n. 24, p. 66–71, 1974.
- SANTANA, R. C.; FONTAN, I. C. I.; OLIVEIRA, S. L. **Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos**. In: VALE, A. B. et al. *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência*. Viçosa: UFV, 2014. p. 187-207.

SCHUHLI, G. S.; PALUDZYSZYN FILHO, E. **O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 30, n. 63, p. 217–230, 2010.

SCHUMACHER, M.V; DICK, G; VIERA, M; LUDVICHAK, A.A. **Silvicultura aplicada Parte II.** 3º edição – revisada. Universidade Federal de Santa Maria Centro de Ciências Rurais Departamento de Ciências Florestais, 2017.

SHIMIZU, J. Y.; KLEIN, H.; OLIVEIRA, J. R. V. **Diagnóstico das plantações florestais em Mato Grosso.** Cuiabá: Central de Texto, 63 p. 2007.

SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung Stender Waldbestände Schriftenreihe Bad.** [S.I.]: Wurt-Forstl., 1966.

SHUKLA, P. K.; RAO, R. V.; SHASHIKALA, S.; KUMAR, P.; SHARMA, S. K. **Wood quality variation in *Tectona grandis* (teak) clones from CSO raised at Maredumilli (Rajahmundry), Andhra Pradesh.** Journal of the Indian Academy of Wood Science, v.8, n. 2, p. 116–119, 2011.

SILVA, M. L., FONTES, A. A. **Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: Valor Presente Líquido (VPL), Valor Anual Equivalente (VAE) e Valor Esperado da Terra (VET).** Revista Árvore, v.29, n.6, p.931-936, 2005.

SILVA, N. M. **A experiência do manejo sob rendimento sustentado em florestas tropicais úmidas.** 7º Congresso Florestal Brasileiro, Curitiba. Anais. p. 2002- 2006. 1993.

SINHA, S. K.; DEEPAK, M. S.; RAO, R. V.; BORGAONKAR, H. P. **Dendroclimatic analysis of teak (*Tectona grandis* L. f.) annual rings from two locations of peninsular India.** Current Science, v. 100, n. 1, p. 84–88, 2011.

SILVA, F.R; WOJCIECHOWSKI, J.C; SANTOS,A.F.A.S. **Perfil do fuste comercial da espécie *Tectona grandis* L.f.** Universidade do Estado de Mato Grosso, Alta Floresta, MT, Brasil, 2017.

SHUKLA, P. K.; RAO, R. V.; SHASHIKALA, S.; KUMAR, P.; SHARMA, S. K. **Wood quality variation in *Tectona grandis* (teak) clones from CSO raised at Maredumilli. (Rajahmundry), Andhra Pradesh.** 2011.

SOUZA, D. O. **Algoritmos genéricos aplicados ao planejamento do transporte principal de madeira**. Curitiba, Paraná. 2004.

SUZUKI, R.; TAKEDA, S.; THEIN, H. M. **Chronosequence changes in soil properties of teak (*Tectona grandis*) plantations in the Bago Mountains, Myanmar**. Journal of Tropical Forest Science, v. 19, n. 4, p. 207–217, 2007.

TANAKA, N.; HAMAZAKI, T.; VACHARANGKURA, T. **Distribution, growth and site requirements of teak**. Japan Agricultural Research Quarterly, v. 32, p. 65–77, 1998.

TECA DO BRASIL. **Galerias / A Floresta**. 2013. Disponível em: <http://www.tecadobrasil.com.br/pt/galerias/galeria.asp?id=1> Acesso em: 28 de agosto de 2021.

VAIDES, E.; UGALDE, L.; GALLOWAY, G. **Crecimiento y productividad de teca em plantaciones forestales jóvenes en Guatemala**. Recursos Naturales y Ambiente, n. 46, p. 137–145, 2005.

VÁSQUEZ, W. C.; UGALDE, L. A. A. **Rendimiento y calidad de sitio para *Gmelina arborea*, *Tectona grandis*, *Bombacopsis quinatum* y *Pinus caribaea* em Guanacaste, Costa Rica**. Turrialba: CATIE, 1995. 40 p. (Serie técnica: Informe técnico, n. 256).

VEIGA, J.A.A. **Comparações de equações de volume para *Eucalyptus saligna* Smith II - Equações aritméticas formais**. Curitiba. Revista Floresta, Curitiba – PR, v. 4, n. 1, p. 95-104, 1972.

VEIT, L. F. **Dinheiro não cresce em árvores**. Revista Silvicultura, n. 83, p. 38-39, 2000.

WEAVER P.L. ***Tectona grandis* L.f. (Teak)**. Bulletin USDA, International Institute of Tropical Forestry. 1993.