

Modelo de otimização para seleção de árvores matrizes de *Eucalyptus grandis*

Optimization model for selection of *Eucalyptus grandis* matrix trees

Ricardo Marques Barreiros
José Nivaldo Garcia
José Vicente Caixeta Filho
Cláudio Angeli Sansigolo

RESUMO: Na realização desta pesquisa foram utilizados os dados individuais de densidade básica e volume da madeira, do número kappa da polpa, da lignina solubilizada, do custo de deslignificação e do rendimento bruto gravimétrico do processo de polpação, obtidos de 64 árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, procedentes de uma população comercial, situada no município de Lençóis Paulista, Estado de São Paulo. As sementes desta população foram originadas de uma Área de Produção de Sementes (APS) da Duratex S/A, município de Botucatu, SP. Quantificaram-se as variabilidades dos dados obtidos para tais propriedades, e posteriormente, considerando o objetivo de maximização de polpa não-branqueada produzida e as restrições de volume e massa de madeira, massas de ligninas residual e solubilizada, área plantada e custo do processo de polpação, foi também proposto um método para seleção de árvores matrizes, através de técnicas de programação matemática. A estratégia obtida maximizou o resultado econômico, selecionou árvores matrizes e obedeceu a todas as limitações de produtividade, tecnológicas e organizacionais, impostas pela empresa interessada, bem como atendeu à produção de celulose não-branqueada dentro do período de planejamento considerado.

PALAVRAS-CHAVE: Modelo, Seleção, Polpação, Programação linear, *Eucalyptus grandis*

ABSTRACT: Individual data of basic density and volume of wood, pulp kappa number, soluble lignin, cost of pulping process as well as gravimetric gross yield of pulping process were used from 64 trees of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden from a commercial population at Lençóis Paulista, SP. The *Eucalyptus grandis*'s seeds were originally from a Seed Production Area (SPA) of Duratex S/A at Botucatu, SP. Obtained data were quantified considering objective of maximization no-bleaching pulp and volume and mass wood restriction, mass of residual and soluble lignin, planted area and pulping process cost. It has also been aimed a selection method for matrix trees through mathematical programming techniques. Obtained strategy maximized the economical result, selected matrix trees and followed all limits of technological and organizing productivities imposed by the company. It also aimed the production of no-bleaching pulp within the planned time.

KEYWORDS: Modelling, Selection, Pulping, Linear programming, *Eucalyptus grandis*

INTRODUÇÃO

Uma das maiores demandas de madeira nos países industrializados, inclusive no Brasil, tem sido para a produção de polpa e papel, cujo mercado tem estado em constante prosperidade. Dentre os gêneros de madeira utilizados, o *Eucalyptus sp* tem-se destacado como o mais promissor.

As indústrias do setor de polpa e papel, em especial, ainda necessitam da certeza da sua eficiência operacional, para prever as melhorias viáveis, fixar objetivos, planejar futuras possibilidades de expansão e tomar decisões com retornos absolutamente garantidos.

No caso das espécies florestais que apresentam elevada variabilidade e que ainda não foram submetidas a processos de melhoramento, a seleção massal e individual é de aplicação prática bastante eficiente (Kikuti e Monteiro, 1984).

A identificação de indivíduos superiores para a composição das populações de melhoramento requer a definição de critérios eficientes de seleção, de modo a garantir o sucesso do empreendimento (Cotterill e Dean, 1990)

Segundo Almeida e Silva (1997), vários trabalhos têm procurado incorporar características tecnológicas da madeira ao processo de seleção de clones, com o rendimento e qualidade do produto.

A programação linear foi desenvolvida para a resolução de problemas que envolvem a maximização ou a minimização do valor de uma dada função matemática, chamada de função objetivo, sujeita a algumas restrições também expressas na forma de equações matemáticas (Scarf, 1990).

Não foram encontradas referências que indicassem a aplicação da programação linear em programas de seleção de árvores matrizes e nem para a produção de polpa, na obtenção de modelos que determinassem a maximização do retorno obtido.

Nesse sentido, pretendeu-se apresentar uma contribuição inédita qual seja, a composição de um modelo capaz de auxiliar na definição de estratégias e na tomada de decisão na seleção de árvores matrizes para fins clonais. Este modelo previu a otimização do rendimento e qualidade, tanto da madeira quanto da polpa produzidas.

MATERIAL E MÉTODOS

Procedimentos adotados para a quantificação dos parâmetros de qualidade

O material pré-selecionado foi constituído por 64 árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden de 7 anos de idade, procedentes de uma população comercial, situada no município de Lençóis Paulista, Estado de São Paulo, e cujas sementes foram originadas de uma Área de Produção de Sementes (APS) da Duratex S/A, município de Botucatu, SP.

A amostragem das árvores foi por seleção massal (1:8000). Buscaram-se indivíduos que tivessem boa retidão de fuste, bom aspecto de sanidade, copa pequena e uniforme, considerável DAP, elevada altura e volume superior às demais árvores do povoamento.

Após a medição dos diâmetros à altura do peito (DAPs), as árvores foram abatidas e em seguida foram medidas as suas alturas total (HT) e comercial (HC), sendo esta correspondente a um diâmetro mínimo de 8 cm com casca. Logo em seguida foram retirados discos a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial de cada árvore.

Os discos tiveram seus diâmetros medidos para posteriores cálculos de densidade básica ao longo do fuste e do volume das árvores. Depois, foram descascados, cortados em 4 cunhas de 90°, das quais uma foi destinada à determinação da densidade básica, a seguinte

para análises químicas, outra para a polpação e a última, para reserva.

A densidade básica de cada árvore foi calculada através de média ponderada, em função da densidade básica de cada cunha determinada pelo método da balança hidrostática, segundo a norma ABTCP M14/70 (ABTCP, 1974) e o respectivo diâmetro do disco sem casca, através da seguinte expressão (Sansígolo e Barreiros, 1998):

$$D_{ba} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(D^2_{0} + D^2_{25})(D_{b0} + D_{b25}) + \dots + (D^2_{75} + D^2_{100})(D_{b75} + D_{b100})}{D^2_{0} + D^2_{100} + 2(D^2_{25} + \dots + D^2_{75})} \quad (1)$$

D_{ba} = Densidade básica da árvore, em t/m³;

D_h = Diâmetro dos discos, a uma altura h da HC da árvore, em m;

D_{b_h} = Densidade básica das cunhas, a uma altura h da HC, em t/m³;

h = Alturas a 0, 25, 50, 75 e 100% da HC da árvore.

Para a análise química de cada árvore foi utilizada uma amostra composta, ou seja, foi tomada uma cunha de cada disco, representativa de cada altura da árvore. Todas as cunhas foram agrupadas e reduzidas a serragem, a qual foi classificada para a obtenção da fração entre 40/60 "mesh", que é a recomendada pelas normas TAPPI (1999) e ABTCP (1974) nas determinações de extrativos totais, lignina e holo celulose. Posteriormente, foi determinado o teor absolutamente seco dessa serragem, conforme a norma TAPPI T210 OM-93 (TAPPI, 1999).

A fração de extrativos totais da madeira foi determinada através da norma ABTCP M3/69 (ABTCP, 1974). Já a determinação da lignina da madeira foi realizada através do método Klason e da norma TAPPI T222 OM-88 (TAPPI, 1999). O teor de holocelulose (celulose + hemiceluloses) foi determinado através da equação 2 (Sansígolo e Barreiros, 1998), que expressa a composição restante da substância madeira.

$$H = 100 - Et - L \quad (2)$$

H = Holocelulose, em %;

Et = Extrativos totais, em %;

L = Lignina, em %.

Polpação da madeira

Para a polpação da madeira também foram utilizadas amostras compostas, picadas na forma de cavacos, os quais foram colocados em cápsulas microperfuradas de aproximadamente 200 cm³. Cada cápsula representou a amostra de apenas uma árvore. As cápsulas foram colocadas em digestor rotativo laboratorial, onde junto com o licor previamente preparado realizou-se a deslignificação.

O método utilizado foi o kraft-antraquinona, cujas condições foram: Álcali ativo, base madeira seca = 15,50% como Na₂O; Álcali efetivo, base madeira seca = 14,40% como Na₂O; Sulfidez do licor, base madeira seca = 15,00%; Antraquinona, base madeira seca = 0,07%; Relação licor/madeira = 3,8/1; Temperatura máxima = 174°C; Tempo até a temperatura máxima = 80 minutos; Tempo na temperatura máxima = 30 minutos.

Após cada deslignificação, as amostras de cavacos foram separadas, desfibradas, lavadas e determinados os respectivos teores secos para os cálculos do rendimento bruto gravimétrico (Rbg), consumo específico de madeira (Cem) e número kappa (Nk).

Em seguida determinou-se o teor absolutamente seco das amostras de polpas segundo a norma TAPPI T210 OM-93 (TAPPI, 1999) e o Rendimento bruto gravimétrico da polpação, através da seguinte expressão (Sansígolo e Barreiros, 1998):

$$Rbg = (M_{sp}/M_{sm}) \cdot 100 \quad (3)$$

M_{sp} = Massa seca de polpa, em t;

M_{sm} = Massa seca de madeira, em t.

Uma vez determinados a densidade básica média de cada árvore e o correspondente Rbg,

pôde ser calculado o consumo específico de madeira, através da seguinte expressão (Sansígolo e Barreiros, 1998):

$$Cem = 1/(Rbg.Dba) \quad (4)$$

Cem = Consumo específico de madeira, em m³ madeira/t polpa seca.

Número kappa

O número kappa refere-se à quantidade de lignina residual na polpa. Sua determinação, segundo a norma TAPPI T236 OM-85 (TAPPI, 1999), foi efetuada nas amostras de polpas obtidas. O cálculo seguiu as seguintes expressões:

$$P = [(Vb - Ve).N_1] / N_2 \quad (5)$$

$$\text{Log}(Nk) = \text{log}(P/W) + 0,00093.(P - 50) \quad (6)$$

Vb = Volume (mL) de Na₂S₂O₃ 0,2N consumido na prova em branco;

Ve = Volume (mL) de Na₂S₂O₃ consumido no ensaio, em mL;

N₁ = Normalidade do Na₂S₂O₃, 0,2N;

N₂ = Normalidade do KMnO₄, 0,1N;

P = Volume (mL) de KMnO₄ consumido pela polpa, em mL;

W = Masa seca da polpa, em g;

Nk = Número kappa.

A percentagem de lignina residual na polpa, após a deslignificação, foi calculada conforme a seguinte expressão:

$$\%Lr = Nk.0,147 \quad (7)$$

%Lr = Percentagem de lignina residual;

0,147 = Fator de conversão de número kappa para % de lignina residual na polpa (Marruccia et al., 1998).

A massa de lignina residual na polpa, após a deslignificação, foi calculada conforme a seguinte expressão:

$$Lr = [(Nk.0,147)/100].Rbg.Dba.Vsc \quad (8)$$

Lr = Massa de lignina residual, em t;

Vsc = Volume sem casca de madeira consumida, em m³.

O teor de lignina solubilizada da madeira, através do processo de deslignificação kraft-antraquinona, pôde ser quantificado em função do teor de lignina existente na madeira, antes da polpação e do teor de lignina residual na polpa após a polpação.

A percentagem de lignina solubilizada foi calculada conforme a seguinte expressão:

$$\%Ls = [L-(0,147.Nk.Rbg)/100]/L.100 \quad (9)$$

%Ls = Percentagem de lignina solubilizada, em %;

L = Lignina na madeira, em %.

A massa de lignina solubilizada foi calculada conforme a seguinte expressão:

$$Ls = (\%Ls/100).Dba.Vsc \quad (10)$$

Ls = Lignina solubilizada, em t.

O custo total da polpação kraft para a produção de uma tonelada seca de polpa não-branqueada foi determinado segundo Greaves e Borralho (1996), em função dos parâmetros densidade básica e rendimento bruto gravimétrico médios de cada árvore, pela seguinte expressão:

$$C = Cpk.(Dbm^{0,53}.Rbgm^{0,70}) / (Dba^{0,53}.Rbg^{0,70}) \quad (11)$$

C = Custo total da polpação kraft, em US\$/t polpa seca;

Cpk = Custo médio da polpação kraft (US\$ 200.00/t polpa);

Dbm = Média das densidades básicas das árvores, em t/m³;

Rbgm = Média dos rendimentos brutos gravimétricos das árvores, em %.

A partir do custo da polpação por tonelada seca de polpa não-branqueada, pôde-se calcular o custo da polpação por m³ de madeira consumida, para cada amostra, através da seguinte expressão:

$$C/m^3 = C/Cem \quad (12)$$

C = Custo da polpação de cada árvore, em US\$/t polpa seca;

C/m^3 = Custo da polpação de cada árvore, em US\$/m³ de madeira.

O teor de madeira comercial em massa de cada árvore foi calculado pela seguinte expressão (Sansígolo e Barreiros, 1998):

$$Msm = Dba.Vsc \quad (13)$$

Msm = Massa seca de madeira comercial da árvore, em t.

O volume de madeira de cada árvore foi calculado através da fórmula generalizada de Smalian (Veiga, 1984):

$$Vsc = (z/2) \cdot (\pi/4) \cdot [D_0^2 + D_{100}^2 + 2 \cdot (D_{25}^2 + D_{50}^2 + D_{75}^2)] \quad (14)$$

z = Comprimento das toras, em m;

D = Diâmetro sem casca das toras em cada altura da árvore, em m;

0, 25, 50, 75 e 100 = Percentagem da altura comercial da árvore, em %.

Procedimentos adotados quanto ao modelo de otimização

O modelo proposto possui uma função objetivo de 64 variáveis, sujeita a 70 restrições e apresenta a seguinte forma indicial (Σ):

$$Msp = \sum_{i=1}^{64} Dba_i.Rbg_i.Vsc_i$$

Onde:

Msp = Massa seca de polpa a ser maximizada, em t;

Dba_i = Densidade básica da madeira da árvore i , em t/m³;

Rbg_i = Rendimento bruto gravimétrico da polpação da árvore i , em decimal;

Vsc_i = Volume sem casca necessário de madeira da árvore i , em m³;

$i = 1, \dots, 64$.

Sujeita a:

✓ Massa seca total de madeira utilizada por ano $\leq Msm^*$;

$$\sum_{i=1}^{64} Dba_i.Vsc_i \leq Msm^*$$

Onde:

Msm^* = Massa seca total média consumida por ano, em t.

✓ Massa seca total de lignina residual produzida/ano $\leq Mslr^*$;

$$\sum_{i=1}^{64} Dba_i.Rbg_i.k_i.Vsc_i \leq Mslr^*$$

Onde:

K_i = Percentagem de lignina residual na polpa da árvore i , em decimal;

$Mslr^*$ = Massa seca total média de lignina residual produzida/ano, em t.

✓ Volume total sem casca de madeira consumido por ano $\leq Vsc^*$;

$$\sum_{i=1}^{64} Vsc_i \leq Vsc^*$$

Onde:

Vsc^* = Volume total médio sem casca de madeira consumido/ano, em m³.

✓ Custo total da polpação $\leq C^*$;

$$\sum_{i=1}^{64} C_i.Vsc_i \leq C^*$$

Onde:

C_i = Custo de designificação da árvore i , em US\$/m³;

C^* = Custo total médio de designificação por ano, em US\$.

✓ Massa seca total de lignina solubilizada por ano $\geq Msls^*$;

$$\sum_{i=1}^{64} Dba_i.Ls_i.Vsc_i \geq Msls^*$$

Onde:

Ls_i = Percentagem de lignina solubilizada da árvore i no processo de deslignificação, em decimal;

$Msls^*$ = Massa seca total média de lignina solubilizada por ano, em t.

✓ Área (Ar) utilizada/ano $\leq Ar^*$;

$$\sum_{i=1}^{64} Ar_i.Vsc_i \leq Ar^* \cdot Msls^*$$

Onde:

Ar_i = Área utilizada da árvore i , em ha/m³;

Ar^* = Área média utilizada por ano, em ha.

✓ Volume total de madeira sem casca utilizado de cada árvore i , por ano $\leq Vsc_i$;

$$Vsc_i \leq Vsc^*$$

✓ Positividade;

$$Vsc_i \geq 0$$

A solução do problema de programação linear proposto foi obtida através do algoritmo denominado “Método Simplex” e do software denominado Orsys.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultado das análises das 64 árvores

A densidade básica média da madeira, observada na Tabela 1, encontra-se praticamente dentro da faixa recomendada para produção de polpa, que é de 0,450 a 0,550 g/cm³ (Fonseca et al., 1996).

Verificou-se que 44% das árvores analisadas apresentaram valores de densidade básica apropriados para a produção de polpa. Esse fato pressupõe a necessidade de outros parâmetros de desempenho.

Massa e volume comerciais

Na Tabela 1, pode-se notar mais uma vez, a necessidade de se levar em conta outros parâmetros de qualidade da madeira e do pro-

duto final, pois nem sempre os maiores valores de massa e/ou volume comerciais indicam as árvores de maior produção.

Composição química da madeira e da polpa

Observando-se os valores encontrados na Tabela 1, vê-se que os teores de lignina foram ligeiramente mais altos que o usual, ou seja, de até 25%. Os teores de extrativos totais foram relativamente baixos quando relacionados com o esperado de até 5%. Conseqüentemente, os teores de holocelulose ficaram um pouco abaixo do esperado, que era de 75% em média. Quanto ao número kappa, os resultados mínimo e médio foram satisfatórios para a boa qualidade da polpa produzida. Entretanto, por apresentar valores de número kappa acima de 20, que seria o limite máximo indicado para eucalipto, este parâmetro torna-se um importante indicador para a seleção das matrizes.

Cenário 1

De posse desses dados, especificamente da percentagem de lignina e do número kappa, puderam-se estimar os respectivos coeficientes da restrição quantidade de lignina solubilizada para as 64 árvores analisadas, a qual multiplicada pelo respectivo volume de madeira consumido anualmente (Equação 10), fornece a quantidade de lignina solubilizada por ano, cuja média foi 39.884 toneladas.

Resultados médios da deslignificação

Tomando-se a capacidade de produção anual de polpa não-branqueada da empresa, que é de 87.120 toneladas, e dividindo-se pelo rendimento bruto gravimétrico de cada árvore, obteve-se a quantidade de madeira consumida por árvore em toneladas por ano que, quando aplicada na restrição de massa de madeira consumida anualmente, significa que esta não poderá ser maior que a média de 164.119 toneladas anuais. Logo, relacionando o valor de cada árvore em massa, com a respectiva densi-

dade básica da árvore, obteve-se a quantidade de madeira consumida por árvore em metros cúbicos por ano, bem como a respectiva média, a qual foi aplicada na restrição de volume de madeira consumida anualmente, implicando que este não poderá ser maior que 369.551 metros cúbicos anuais. Isso posto, pretendeu-se otimizar a produção de massa de polpa não-branqueada sem aumentar o consumo de madeira, obrigando assim a uma seleção daquelas árvores que, quando ponderadas suas características dendrométricas e tecnológicas, envolvidas direta ou indiretamente nas restrições, apresentariam uma maior produção sem contrariar as qualidades desejadas.

Custo da deslignificação

Os valores estimados para as 64 árvores foram obtidos em função do custo médio de deslignificação estabelecido por Greaves e

Borrvalho (1996), da densidade básica e do rendimento bruto gravimétrico de cada uma das 64 árvores pré-selecionadas, após a transformação de US\$/t polpa seca em US\$/m³. Estes valores foram os coeficientes da restrição custo de polpação que, quando multiplicados pelos respectivos volumes anuais de madeira, implicaram nas respectivas quantidades de capital investidas anualmente, as quais não poderão ser maiores que a média de 17,503,516 dólares por ano.

A Tabela 1 mostra as variabilidades encontradas no presente estudo, referentes aos custos da produção de polpa não-branqueada no final do processo de deslignificação, baseado em um estudo realizado por Greaves e Borrvalho (1996), o qual indica que o rendimento é o principal fator sobre o custo final do processo de deslignificação.

Tabela 1.

Parâmetros estatísticos obtidos para a densidade básica da madeira, massa e volume comerciais, composição química da madeira, número kappa da polpa, rendimento bruto gravimétrico, consumo específico de madeira, lignina solubilizada e custo da polpação, referentes ao conjunto das 64 árvores pré-selecionadas de *E. grandis*.

(Statistical parameters obtained for the wood basic density, commercial mass and volume, wood chemical composition, pulp number kappa, graviometric gross yield, wood specific consummate, soluble lignin and pulping process cost, referring to the group from 64 pre-selected trees of *E. grandis*).

Parâmetro	Média	Mínimo	Máximo	C.V., %
Densidade básica, t/m ³	0,447	0,370	0,532	8,33
Massa comercial sem casca, kg	401,08	252,02	583,48	21,15
Volume comercial. Sem casca, m ³	0,893	0,611	1,235	16,91
Holocelulose, %	73,19	67,79	76,63	2,41
Lignina, %	25,70	22,96	29,85	6,02
Extrativos totais, %	1,11	0,08	2,84	65,82
Número kappa	18,2	14,3	24,4	2,10
Rendimento bruto gravimétrico, %	53,12	50,12	57,03	2,55
Consumo madeira, m ³ /t polpa seca	4,236	3,335	5,188	9,22
Lignina solubilizada, t/m ³ madeira	0,109	0,086	0,138	9,88
Custo polpação, US\$/m ³ madeira	47,54	43,19	52,35	4,30
Custo polpação, US\$/t polpa seca	200,58	174,58	224,10	5,07

C.V.: Coeficiente de variação

Médias anuais dos parâmetros estimados

Buscando atingir o objetivo proposto, procurou-se otimizar a produção de massa seca de polpa não-branqueada utilizando-se, como base, os valores médios dos principais parâmetros estimados. Entretanto, com base nos dados disponibilizados pela empresa e resultados médios das 64 árvores analisadas, os quais serviram de referência, foram elaboradas as seguintes considerações:

✓ Produção diária atual de polpa não-branqueada = 242 t/dia;

✓ Funcionamento efetivo da indústria = 360 dias/ano;

✓ Produção anual de polpa não-branqueada = 87.120,0 t/ano;

✓ Espaçamento entre árvores = 3 m x 2 m;

Dados baseados na média das 64 árvores:

✓ Massa seca total média de madeira (Msm*) por ano = 164.119,008 t;

✓ Volume total médio sem casca de madeira utilizado (Vsc*) por ano = 369.550,756 m³;

✓ Massa seca total média de lignina residual na polpa (Mslr*) por ano = 2.333,557 t;

✓ Massa seca total média de lignina solubilizada no processo de deslignificação (Msls*) por ano = 39.992,521 t;

✓ Custo total médio de polpação (C*) por ano = US\$17,503,515.53;

✓ Área total média utilizada (Ar*) por ano = 256,3 ha

Valores obtidos para as variáveis

Uma vez utilizado o programa Orsys para otimização da função objetivo, isto é, calculando-se o maior retorno possível em termos de toneladas de polpa não-branqueada seca, obteve-se a Tabela 2 que trata somente das variáveis que fizeram parte da base.

A Tabela 2 mostra que a solução ótima diz respeito a um consumo anual de 143.778,0 m³ de madeira da árvore 15, 121.229,0 m³ da árvore 6 e 84.699,0 m³ da árvore 41, o que resultou num retorno de 90.955,780 toneladas de polpa

não-branqueada seca. Porém, apenas três árvores foram selecionadas por esse método, o que foi considerado muito pouco para um programa de melhoramento, principalmente por se tratar de propagação clonal. Logo, houve a necessidade de se implementar novas condições restritivas.

Tabela 2.

Árvores selecionadas pelo programa Orsys e solução ótima quanto ao retorno máximo de massa de polpa. (Selected trees by the Orsys program and optimum solution with relationship to the maximum return of pulp mass)

Variável	Solução máxima, m ³	Retorno = 90.955,78 t		
		Retorno	Ret. unit.	Ret. Líq.
Árvore 15	143.778	0,23610	0,23610	0,00000
Árvore 6	121.229	0,30000	0,30000	0,00000
Árvore 41	84.699	0,24370	0,24370	0,00000
Árvore 64	0,000	0,23850	0,246847	-0,008347

Ret. Unit. = Retorno unitário, em toneladas;

Ret. Líq. = Retorno líquido, em toneladas.

Cenário 2

A alternativa utilizada para selecionar-se um número razoável de árvores, por exemplo entre 10 e 12 árvores, foi limitar a disponibilidade de madeira de cada árvore. Assim, as restrições para volume sem casca de madeira de cada árvore passaram a ter um volume limite de 11% do volume limite total que era de 369.550,756 m³.

A Tabela 3 mostra um maior número de árvores selecionadas, porém com um retorno menor, de 90.121,486 toneladas de polpa não-branqueada seca, o que também era esperado, porque foram tomadas outras árvores com propriedades inferiores às anteriores.

Restrições atuantes

Observa-se na Tabela 4, que as restrições para massas de madeira, lignina solubilizada e área de plantio utilizada foram atuantes na questão, o que pode ser verificado pelo fato de apresentarem folgas nulas, assim como valores de preço-sombra não nulos. Por exemplo, substituindo-se a solução ótima obtida na restrição

associada à massa de madeira, observa-se que as 164.119 toneladas de madeira disponíveis são efetivamente utilizadas, sendo que na eventualidade de se obter uma tonelada adicional, o valor da função objetivo, ou seja, o retorno, seria aumentado em 0,639 toneladas. Isto significa que a cada alteração unitária no valor limite da restrição em questão, ocorre uma correspondente alteração da função objetivo, exatamente do valor previsto para o preço-sombra. É de se esperar, portanto, que a variação no limite de uma restrição atuante seja diretamente proporcional ao valor do preço-sombra. Entretanto, essa relação diretamente proporcional entre variação no limite e variação no valor da função objetivo deverá respeitar alguns limites, uma vez que, se extrapolando determinado intervalo de variação, tal restrição poderá tornar-se não-atuante. Isso foi verificado quando se alterou o limite da restrição de volume de madeira para 40.650,6 metros cúbicos, quando da tentativa de se selecionar um número razoável de árvores. Assim, passou-se a ter a seguinte solução ótima (Tabela 5).

Tabela 3.

Árvores selecionadas pelo programa Orsys e solução ótima quanto ao retorno máximo de polpa, quando o limite do volume por árvore foi de 11% do volume total.

(Selected trees by the Orsys program and optimum solution with relationship to the maximum return of pulp, when the volume limit per tree was 11% of the total volume)

Árvore selecionada	Volume de madeira, m ³	Retorno = 90.121,486 t	
		Retorno de polpa, t/m ³	Retorno de polpa, t
15	40.650,584	0,2361	9.597,603
6	40.650,584	0,3000	12.195,175
41	40.650,584	0,2437	9.906,547
46	40.650,584	0,2659	10.808,990
37	40.650,584	0,2382	9.682,969
23	40.650,584	0,2564	10.422,810
5	40.650,584	0,2346	9.536,627
45	40.650,584	0,2471	10.044,759
43	30.185,204	0,2461	7.428,579
24	1.012,825	0,2728	276,299
25	758,326	0,2916	221,128
Total	357.161,030	-	90.121,486

Tabela 4.

Restrições atuantes e solução ótima quanto ao retorno máximo de polpa obtido.

(Actuate restrictions and optimum solution with relationship to the obtained maximum return of pulp).

Restrição	Solução ótima			Retorno = 90.955,78 t	
	Condição	Preço-sombra	Limite	Utilizado	Folga
Massa madeira, t	Atuante	0,639	164.119,008	164.119,008	0,000
Massa lig. Res., t	Não	0,000	2.333,557	2.286,468	47,089
Volume madeira, m ³	Não	0,000	369.550,756	357.161,030	12.389,720
Custo polpação, US\$	Não	0,000	17,503,515.53	17,337,734.65	165,780.88
Massa lig. Solub., t	Atuante	-0,410	39.884,312	39.884,312	0,000
Área utilizada, ha	Atuante	2,831	256,3	256,3	0,000
Volume árv. 01	Não	0,000	369.550,756	0,000	369.550,756
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Volume árv. 06	Não	0,000	369.550,756	121.229,000	248.321,760
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Volume árv. 15	Não	0,000	369.550,756	143.778,000	225.772,760
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Volume árv. 41	Não	0,000	369.550,756	84.699,000	284.851,760
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Volume árv. 64	Não	0,000	369.550,756	0,000	369.550,756

Tabela 5.

Restrições atuantes e solução ótima quanto ao retorno máximo de polpa para um número razoável de árvores matrizes selecionadas.

(Actuante restrictions and optimum solution with relationship to the maximum return of pulp for a reasonable number of selected matrix trees)

Restrição	Solução ótima			Retorno = 90.121,486 t	
	Condição	Preço-sombra	Limite	Utilizado	Folga
Massa madeira, t	Atuante	0,639	164.119,008	164.119,008	0,000
Massa lig. Res., t	Não	0,000	2.333,557	2.286,468	47,089
Volume mad., m ³	Não	0,000	369.550,756	357.161,030	12.389,720
Custo polpação, US\$	Não	0,000	17,503,515.53	17,337,734.65	165,780.88
Massa lig. Solub., t	Atuante	-0,410	39.884,312	39.884,312	0,000
Área utilizada, ha	Atuante	2,831	256,3	256,3	0,000
Volume árv. 01, m ³	Não	0,000	40.650,584	0,000	40.650,584
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Volume árv. 05, m ³	Atuante	0,0008	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 06, m ³	Atuante	0,0107	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 15, m ³	Atuante	0,0022	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 23, m ³	Atuante	0,0009	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 24, m ³	Não	0,0000	40.650,584	1.012,825	39.637,759
Volume árv. 25, m ³	Não	0,0000	40.650,584	758,326	39.892,258
Volume árv. 37, m ³	Atuante	0,0012	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 41, m ³	Atuante	0,0024	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 43, m ³	Não	0,0000	40.650,584	30.185,204	10.465,380
Volume árv. 45, m ³	Atuante	0,0011	40.650,584	40.650,584	0,000
Volume árv. 46, m ³	Atuante	0,0037	40.650,584	40.650,584	0,000

A discussão dos dados da Tabela 5 segue a mesma lógica daquela efetuada sobre os dados da Tabela 4. A partir deste novo cenário, onde se obteve um número razoável de árvores matrizes selecionadas, verificou-se novos limites, o que gerou a Tabela 6, que se refere ao intervalo de variação dos limites das restrições.

Intervalo de variação dos limites das restrições

Enquanto o limite da restrição de massa de madeira variar dentro do intervalo compreendido entre 164.071,3 e 164.266,6 toneladas de madeira, a variação correspondente no valor da função objetivo continuará a ser diretamente proporcional ao valor do preço-sombra. Vale

ainda lembrar que, dentro desse intervalo de variação do limite, naturalmente outras soluções ótimas deverão ser obtidas, mas associadas a um mesmo conjunto de árvores selecionadas, no caso, as árvores 5, 6, 15, 23, 24, 25, 37, 41, 43, 45 e 46 (Tabela 6 e 7). Notou-se também que os intervalos de variação dos limites das restrições e do preço-sombra para cada uma das restrições são válidos somente para cada uma das restrições, individualmente. Deste modo, se forem alterados os valores dos limites de duas restrições, ao mesmo tempo, nada poderá se inferir a partir daquelas informações apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Intervalos de variação dos limites das restrições.
(Variation intervals of the limits from restrictions)

Restrição	Solução ótima			Retorno = 90.121,486 t	
	Condição	Preço-sombra	Limite	Mínimo	Máximo
Massa madeira, t	Atuante	0,639	164.119,008	164.071,250	164.266,610
Massa lig. Res., t	Não	0,000	2.333,557	2.286,468	Nenhum
Volume mad., m ³	Não	0,000	369.550,756	357.161,030	Nenhum
Custo polp., US\$	Não	0,000	17,503,515.53	17,337,735.00	Nenhum
Massa lig. Solub., t	Atuante	-0,410	39.884,312	39.864,939	39.901,477
Área utilizada, ha	Atuante	2,831	256,300	253,523	256,518
Volume árv. 01, m ³	Não	0,000	40.650,584	0,000	Nenhum
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Volume árv. 05, m ³	Atuante	0,00079	40.650,584	38.823,536	58.395,508
Volume árv. 06, m ³	Atuante	0,0107	40.650,584	7.203,482	41.286,391
Volume árv. 15, m ³	Atuante	0,0022	40.650,584	38.799,996	62.229,592
Volume árv. 23, m ³	Atuante	0,0009	40.650,584	37.352,813	42.698,252
Volume árv. 24, m ³	Não	0,0000	40.650,584	1.012,825	Nenhum
Volume árv. 25, m ³	Não	0,0000	40.650,584	758,326	Nenhum
Volume árv. 37, m ³	Atuante	0,0012	40.650,584	39.005,250	53.904,005
Volume árv. 41, m ³	Atuante	0,0024	40.650,584	39.988,864	48.754,620
Volume árv. 43, m ³	Não	0,0000	40.650,584	30.185,204	Nenhum
Volume árv. 45, m ³	Atuante	0,0011	40.650,584	40.007,423	50.968,110
Volume árv. 46, m ³	Atuante	0,0037	40.650,584	39.840,244	49.432,277

Intervalos de variação dos coeficientes da função objetivo

A Tabela 7 foi obtida associada ao intervalo de variação dos coeficientes da função objetivo.

Tais informações são importantes pelo fato de poderem adiantar algo a respeito do nível de incerteza incorporado nos valores dos coeficientes da função objetivo. Por exemplo, enquanto o valor do retorno unitário da árvore 43 (0,2461 t/m³) estiver dentro do intervalo compreendido entre 0,2460 e 0,2465 t/m³, a solução ótima, em termos de volume de madeira utilizado de cada árvore, continuará sendo o mesmo, que neste exemplo foi de 30.185,2 m³. Entretanto, caso a empresa necessite de um maior nível de segurança quanto ao volume inicialmente obtido em função de eventuais osci-

lações de produção de madeira desse possível clone, essa tabela informa as faixas individuais de variação dos valores dos coeficientes da função objetivo, no caso os próprios retornos unitários, de tal forma que seja mantido o padrão de utilização de 30.185,204 m³ de madeira da árvore 43, 758,326 m³ da árvore 25, 1.012,825 m³ da árvore 24 e 40.650,584 m³ das demais árvores selecionadas. Obviamente, nenhuma unidade das árvores que não foram selecionadas.

Por fim, vale ainda ressaltar que, ao se variar o valor de um determinado coeficiente da função objetivo dentro do intervalo proposto, os níveis de madeira utilizados serão mantidos mas, naturalmente, o valor da função objetivo, associada ao retorno de polpa não-branqueada, será alterado.

Tabela 7.

Intervalos de confiança para os coeficientes da função objetivo.
(Trust intervals for the coefficients from objective function)

Variável	Solução ótima			Retorno = 90.501,88t	
	Condição	Padrão, m ³	Retorno, t/m ³	Mínimo, t/m ³	Máximo, t/m ³
Árvore 1	Não	0,000	0,2458	Nenhum	0,2534
Árvore 5	Base	40.650,584	0,2346	0,2338	Nenhum
Árvore 6	Base	40.650,584	0,3000	0,2893	Nenhum
Árvore 15	Base	40.650,584	0,2361	0,2339	Nenhum
Árvore 23	Base	40.650,584	0,2564	0,2555	Nenhum
Árvore 24	Base	1.012,825	0,2728	0,2721	0,2731
Árvore 25	Base	758,326	0,2916	0,2909	0,2921
Árvore 37	Base	40.650,584	0,2382	0,2370	Nenhum
Árvore 41	Base	40.650,584	0,2437	0,2413	Nenhum
Árvore 43	Base	30.185,204	0,2461	0,2460	0,2465
Árvore 45	Base	40.650,584	0,2471	0,2460	Nenhum
Árvore 46	Base	40.650,584	0,2659	0,2622	Nenhum

Ganhos obtidos com a aplicação do método proposto

A Tabela 8 mostra a comparação dos principais parâmetros estudados, referentes aos cenários abordados, ou seja, com as médias das 64 árvores estudadas (Cenário I) e com as 11 árvores matrizes selecionadas (Cenário II).

A partir da Tabela 8, pode-se verificar que houve ganho, com as 11 árvores matrizes selecionadas em relação ao conjunto das 64 árvores estudadas, para os parâmetros densidade básica, massa seca da árvore, holocelulose, rendimento bruto gravimétrico, custo de deslignificação, consumo específico de madeira, número kappa, ligninas residual e solubilizada, área plantada e retorno de polpa. O parâmetro custo de deslignificação em US\$/m³ de madeira foi maior para a média das 11 árvores matrizes selecionadas, porém, em US\$/t de polpa seca foi menor. Pode-se observar realmente, que quando levado em conta o consumo específico de madeira, houve um ganho real com relação a esse parâmetro.

Tabela 8.

Médias dos principais parâmetros estudados, referentes aos cenários abordados.
(Averages of the main studied parameters, referring to the approached sceneries)

Parâmetro	Média das	Média das 11
	64 árvores pré-selecionadas	árvores selecionadas
Vsc, m ³	0,893	0,887
Dbm, t/m ³	0,447	0,471
Msa, t	401,1	420,3
H, %	73,19	73,48
L, %	25,70	25,87
Rbgm, %	53,12	54,70
C, US\$/t	200,58	191,16
C, US\$/m ³	47,54	49,03
Cem, m ³ /t	4,236	3,911
Cem, t/t	1,893	1,828
Nk	18,2	18,0
Lr, %	2,68	2,63
Ls, t/m ³	0,1086	0,1149
Árvore/t	4,7	4,5
Hectare	253,8	241,3
Retorno, t	87.120,0	90.121,5

A Tabela 9 mostra, de forma clara, os ganhos obtidos com a aplicação do método proposto em relação à média dos parâmetros estudados, referente às 64 árvores pré-selecionadas.

Tabela 9.

Ganhos obtidos com a aplicação do método proposto. (Advantage obtained with the application of the proposed method)

Ganhos	
Massa de polpa s.e., t/ano	3.001,5
Dias/ano	12,4
Volume de madeira, m ³ /ano	12.779,070
Massa de lignina residual, t/ano	47,1
Massa de lignina solubilizada, t/ano	0,0063
Custo da deslignificação, US\$/m ³	-1.49
Custo da deslignificação, US\$/árvore	-1.32
Custo da deslignificação, US\$/ t polpa	8.84
Número de árvores anuais/ t polpa	0,2
Número de árvores anuais	14.407,1
Número de hectares anuais	8,6

Pode-se verificar nessa tabela que os ganhos obtidos, em relação às médias das 64 árvores pré-selecionadas, são realmente expressivos.

Observa-se um ganho de massa de polpa de 3.001,5 toneladas por ano inclusive com a redução de 12.779,1 m³ no consumo de madeira que deverá ser suprido pelas 64 árvores pré-selecionadas. Isto equivale à produção de 12,4 dias de funcionamento da fábrica, considerando que esta funciona 24 horas por dia.

Com a produção de 47,1 toneladas, a menos por ano, de lignina residual na polpa obtida, obtém-se um ganho conseqüente no custo do branqueamento desta polpa, uma vez que serão exigidos menores quantidades de energia e produtos químicos em tal processo.

Observa-se um ganho com relação à quantidade de lignina solubilizada por ano causado

pela otimização do processo de deslignificação, ou seja, houve um aumento da quantidade de lignina solubilizada, da ordem de 80,5 toneladas por ano, e uma diminuição do custo desse processo com a seleção das 11 matrizes selecionadas.

Verificam-se ganhos negativos com o custo de deslignificação em dólares por metro cúbicos de madeira utilizada; porém, o ganho com o custo de deslignificação em dólares por tonelada de polpa é muito superior, o que implica em ganhos positivos para esse parâmetro.

Outro parâmetro importante e que foi minimizado com a aplicação do método proposto, foi o número de árvores anuais necessário para a produção de uma tonelada de polpa. A redução desse número implicou numa significativa redução também da área necessária de plantio, fator muito importante para as empresas florestais, uma vez que elas devem e buscam produzir mais com insumos cada vez mais escassos.

A seleção de um número razoável de árvores matrizes, no caso 11 árvores, pode ser considerada satisfatória pelo fato de ser uma medida estratégica no desenvolvimento de um programa de melhoramento, por não restringir demasiadamente a base genética e por possibilitar um retorno de 90.121,5 toneladas de polpa não-branqueada seca, o que supera o valor apresentado inicialmente pelo conjunto das 64 árvores, que era de 87.120,0 toneladas.

A principal limitação deste trabalho foi não encontrar na literatura referências anteriores que auxiliassem na escolha das restrições, o que serviria de base para o trabalho realizado.

Para minimizar a escassez de informações acerca de metodologias na área de seleção de árvores para o processo de polpação, propõe-se esta contribuição inédita, voltada para a otimização do rendimento e qualidade, tanto da madeira quanto da polpa não-branqueada, através da programação linear.

CONCLUSÕES

De acordo com o método aplicado e com os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- ✓ não devem ser utilizados parâmetros isolados, sejam estes dendrométricos, tecnológicos ou organizacionais, na seleção de árvores matrizes, bem como na otimização de quaisquer objetivos;
- ✓ não devem ser utilizados métodos restritos no julgamento dos valores dos parâmetros, visto que tais métodos não apresentam a sensibilidade necessária para ponderar os verdadeiros limites dos mesmos e nem levam em conta a interação que há entre eles;
- ✓ a resolução do problema através da programação linear apresentou informações que seriam impossíveis de serem obtidas com os métodos tradicionais de seleção de árvores e otimização da produção de polpa;
- ✓ as variáveis (árvores) que apresentam valores relativamente ótimos para rendimento bruto gravimétrico, número kappa e consumo específico de madeira, nem sempre ficaram dentre as primeiras no “ranking”, visto que esbarraram em restrições de densidade básica, lignina solubilizada e/ou custo da deslignificação, quando interagidas;
- ✓ o aumento da produtividade foi muito significativo, visto que o ganho teórico obtido foi em função da seleção de matrizes e não por um aumento da capacidade física da indústria, ou da quantidade de matéria-prima ou de insumos utilizados.

Sugere-se que outros estudos de seleção de árvores e processo de polpação sejam realizados através da programação linear, enriquecendo as informações fornecidas pelo método proposto no presente trabalho.

AUTORES E AGRADECIMENTOS

RICARDO MARQUES BARREIROS é Pós-Graduando em Recursos Florestais no Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 - rmbarreiros@esalq.usp.br

JOSÉ NIVALDO GARCIA é Professor Doutor do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 - jngarcia@esalq.usp.br

JOSÉ VICENTE CAIXETA FILHO é Professor Doutor do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11 – Caixa Postal 9 – Piracicaba, SP – 13400-970 - jvcaixet@esalq.usp.br

CLÁUDIO ANGELI SANSIGOLO é Professor Doutor do Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP. Caixa Postal 237 - Botucatu, SP - 18603-970 - sansigolo@fca.unesp.br

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABTCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Métodos de ensaio**. São Paulo, 1974.
- ALMEIDA, J.M.; SILVA, D.J. Inclusion of a new and important potential parameter in the selection of eucalypts for the production of kraft pulp. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTS, Salvador, 1997. **Anais**. Colombo: EMBRAPA/CNPQ, 1997. v.3, p.228-233.
- COTTERILL, P.P.; DEAN, C.A. **Successfull tree breeding with index selection**. Melbourne: CSIRO, Division of Forestry and Forest Products, 1990. 80 p.
- FONSECA, S.M.; OLIVEIRA, R.C.; SILVEIRA, P.N. Seleção da árvore industrial: procedimentos, riscos, custos e benefícios. **Revista árvore**, v.20, n.1, p.69-85, 1996.

- GREAVES, B.L.; BORRALHO, N.M.G. The influence of basic density and pulp yield on the cost of eucalypt kraft pulping: a theoretical model for tree breeding. **Appita**, v.49, n.2, p.90-95, 1996.
- KIKUTI, P.; MONTEIRO, R.F.R. Seleção de árvores matrizes para trabalhos de melhoramento de *Eucalyptus* spp. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL: MÉTODOS DE PRODUÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE DE SEMENTES E MUDAS FLORESTAIS, Curitiba, 1984. **Anais**. Curitiba: FUPEF, 1984. p.227-243.
- MARCOCCIA, B.; STROMBERG, B.; PROUGH, J.R. A novel method for realtime measurement of alkaline pulping yield. In: TAPPI PULPING CONFERENCE, Montreal, 1998. **Proceedings**. Montreal: Tappi Press, 1998. (CD-Rom).
- SANSÍGOLO, C.A.; BARREIROS, R.M. Qualidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* para produção de celulose kraft. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL DA ABTCP, 31, São Paulo, 1998. **Anais**. São Paulo: ABTCP, 1998. p.417-429
- SCARF, E.H. Mathematical programming and economic theory. **OR FORUM**, v.38, n.3, p.377-385, 1990.
- TAPPI - TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **Test methods 1998-1999**. Atlanta: TAPPI, 1999. (CD-ROM)
- VEIGA, R.A.A. **Dendrometria e inventário florestal**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1984. 108p. (Boletim didático, 1)