

## **AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA PARA OTIMIZAÇÃO DO SORTIMENTO DE *Eucalyptus* sp.**

### **EVALUATION OF AN ASSORTMENT OPTMIZATION SYSTEM OF *Eucalyptus* sp.**

Adriano Ribeiro de Mendonça<sup>1</sup> Gilson Fernandes da Silva<sup>2</sup>  
Julio Eduardo Arce<sup>3</sup> Romualdo Maestri<sup>4</sup>

#### **RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo geral a avaliação de uma metodologia para estimativa do volume de madeira no inventário florestal considerando o perfil de qualidade do fuste das árvores. Foi utilizado um talhão com área de 4,31 ha, plantado com *Eucalyptus* sp. com idade de dezesseis anos, proveniente de propagação seminífera. O espaçamento inicial utilizado no plantio foi 3 m x 3 m, sendo feito um desbaste seletivo aos 8,6 anos de idade. Foram lançadas oito parcelas circulares de 855 m<sup>2</sup>. Nessas parcelas, foram medidos o diâmetro na altura de 1,30 m (*DAP*) e altura total (*HT*) das árvores, sendo os fustes das árvores com *DAP* maior que 28 cm classificados de acordo com classes de qualidade definidas *a priori*. Os fustes das árvores das oito parcelas foram submetidos ao processo de otimização. Após a colheita de todas as árvores das oito parcelas, os fustes foram marcados por uma equipe treinada e passaram pelo processo de traçamento para posterior comparação dos volumes comerciais das toras traçadas com o volume obtido pelo método de otimização. O volume e o número de toras por classes de qualidade e sortimento, otimizado e colhido, diferiram significativamente pelo teste qui-quadrado a 5% de probabilidade. Concluiu-se, ao final, que há necessidade de padronização do treinamento das equipes de colheita e inventário florestal, e a metodologia de inventário apresentada necessita de ajustes antes de sua implementação.

**Palavras-chave:** classificação de fustes; sortimentos; programação dinâmica; heurísticas.

#### **ABSTRACT**

This work aims at evaluating a methodology in order to estimate the volume of wood in the forest inventory considering the stem taper quality of trees. A stand of 4.31 ha was used with an area planted with *Eucalyptus* sp. with sixteen years-old, originated from seminific propagation. The initial spacing used in the planting was 3 m x 3 m, being made a selective thinning at 8.6 years-old. Eight circular samples of 855 m<sup>2</sup> were located. In those samples, the diameter in the height of 1.30 m (*DBH*) and the total height (*HT*) of the trees were measured, being the tree stems *DBH* larger than 28 cm classified in agreement with a priori defined quality classes. The tree stems of the eight samples were submitted to the optimization process. After the crop of all trees, the stems were marked by a trained team and were sawed to subsequent comparison to commercial volume obtained by the optimization method. The volume and the number of logs for quality classes and assortment, optimized and harvested, differed significantly from the qui-square test to 5% of probability. It was concluded that it is needed standardization of the exploration and inventory team training, and the presented inventory methodology should be improved before implementation.

**Keywords:** stem classification, assortments, dynamic programming, heuristic.

#### **INTRODUÇÃO**

No Brasil, o inventário florestal tradicionalmente leva em conta apenas as variáveis quantitativas, especialmente o volume. Entretanto, para determinados usos da madeira, variáveis qualitativas importantes, muitas vezes, não são consideradas, gerando, como resultado final do inventário, apenas o volume total.

Uma das maneiras de se quantificar o volume de madeira para as diferentes classes de qualidade de fuste é por meio do uso de modelos de afilamento associados às técnicas de otimização, como a programação

1. Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras (MG). ribeiroflorestal@yahoo.com.br

2. Engenheiro Florestal, Dr., Professor do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Universitário de Alegre, Alto Universitário, Caixa Postal 16, CEP 29500-000, Alegre (ES). gfsilva@yahoo.com

3. Engenheiro Florestal, Dr., Professor da Escola de Florestas, Universidade Federal do Paraná, Rua Lothário Meissner, 3400, Jardim Botânico, Campus III, CEP 80210-170, Curitiba (PR).

4. Engenheiro Florestal, Dr., Diretor da Empresa Granflor, Rua João Manoel, 1448, Bairro Centro, CEP 97300-970, São Gabriel (RS). rm@granflor.com.br

dinâmica, por exemplo. No Brasil, os trabalhos de Leite *et al.* (1995), Lima *et al.* (1997), Soares *et al.* (2003) e Arce *et al.* (2004) utilizaram técnicas de otimização na quantificação de multiprodutos. Na Nova Zelândia, com o intuito de quantificar madeira utilizável pelas serrarias, foi desenvolvido um sistema denominado MARVL (Method for Assessment of Recoverable Volume by Log Types) baseado no trabalho de Deadman e Goulding (1978). Com o uso dessas técnicas, o inventário teria como resultado final quantidades de madeira para cada classe de qualidade de fuste de modo que a madeira seria traçada em tamanhos determinados pela indústria, e os resíduos seriam os menores possíveis.

Por outro lado, considerando que a otimização é baseada nos dados do inventário, quando a floresta é explorada e as árvores são de fato traçadas, não se tem garantias de que o procedimento empregado pela equipe responsável pelo traçamento produzirá os mesmos resultados otimizados estimados no inventário florestal. Arce *et al.* (2004) avaliaram uma metodologia de otimização de corte, ou traçamento de árvores, para obtenção de multiprodutos em níveis de fustes individuais e tiveram como resultado a redução de 16 para 5% dos resíduos deixados na floresta. Além disso, os eventuais danos provocados pelo processo de colheita florestal podem alterar a classificação da qualidade dos fustes, mudando os resultados encontrados no inventário florestal, podendo diminuir a confiabilidade desses resultados.

Considerando o uso da madeira para serraria, a realização de inventários florestais capazes de informar a quantidade de madeira em classes específicas de qualidade de fuste torna-se de suma importância para o planejamento estratégico da empresa. Obviamente, essas qualidades devem ser pesquisadas junto à serraria de modo que o inventário possa captar a informação mais fidedigna, também, possa interessar aos planos da empresa. Entretanto, considerando-se o problema apresentado, mesmo que o inventário seja feito de forma a estimar a quantidade de madeira para as diferentes classes de qualidade previamente levantadas na serraria, o mesmo fato não será digno de confiança caso a otimização não se concretize no momento da colheita, e caso novos defeitos apareçam nas toras com o processo de colheita. Assim, torna-se importante investigar se o volume otimizado gerado pelo inventário sofre grandes perdas com o processo de colheita da floresta e também se os eventuais danos provocados pelo processo de colheita irão comprometer a confiança dos resultados obtidos por meio do inventário florestal.

Considerando o exposto, este trabalho teve como objetivo geral a avaliação de uma metodologia para estimativa do volume de madeira no inventário florestal considerando o perfil de qualidade do fuste das árvores. Nesse sentido, são propostos os seguintes objetivos específicos:

1. Definir metodologia de levantamento de dados em campo que considera as qualidades da madeira ao longo do fuste das árvores identificadas.
2. Desenvolver procedimento de análise dos dados do inventário que permita determinar com precisão as estimativas de madeira associadas a cada classe de qualidade identificada, empregando-se, para isso, técnicas de otimização.
3. Avaliar as diferenças encontradas entre a estimativa de volume obtido pelo método de otimização empregado no inventário e o volume medido após colheita da floresta por uma equipe treinada.
4. Comparar o volume total de madeira inventariada em relação ao volume total de madeira colhida.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Coleta de dados via inventário florestal**

O trabalho foi realizado em uma área de plantio da empresa Aracruz Celulose S.A. localizada no município de Caravelas, Bahia. Foi utilizado um talhão com área de 4,31 ha plantado com *Eucalyptus* sp. com idade de 16 anos, proveniente de propagação semínifera. O espaçamento inicial utilizado no plantio foi 3 m x 3 m, sendo feito um desbaste seletivo aos 8,6 anos de idade, permanecendo ao final da rotação aproximadamente 250 árvores por hectare.

Primeiramente, foram lançadas de forma aleatória, no talhão descrito anteriormente, oito parcelas circulares de 855 m<sup>2</sup>. Após a demarcação de cada parcela, foi feita a identificação das árvores na parcela. As árvores, com diâmetro na altura de 1,30 m (DAP) maior que 28 cm, foram identificadas de acordo com: área, talhão, parcela, fila e número. Uma vez identificadas as árvores, foram coletados os dados de DAP, com o auxílio de uma fita diamétrica, e a altura total destas utilizando-se o hipsômetro Vertex. Cada árvore teve seu fuste classificado tomando-se como base as características externas que podem indicar defeitos na madeira

serrada, como: nós, curvatura do fuste, pragas ou doenças, conicidade e danos mecânicos de manejo. Foi medida a altura do final da seção homogênea, denominada de altura da qualificação. Depois disso, a seção homogênea foi classificada de acordo com um código de qualidade usado para designar classes de qualidade do fuste (Tabela 1). A altura de qualificação é o final de uma seção homogênea de qualidade e o início da próxima seção. Esta operação considerou a restrição de que o limite do diâmetro mínimo comercial esteja contido na classificação da última seção do fuste. A Figura 1 apresenta um exemplo de classificação do fuste de uma árvore com 46,40 m de altura.

TABELA 1: Classes de qualidade do fuste das seções homogêneas.

TABLE 1: Quality classes of the stem of the homogeneous sections.

DPF (cm)	Tortuosidade	Presença de nós			
		Sem nós	< 1 em 2 m	< 1 em 1 m	>= 1 em 1 m
28 a 30	Sim	D	D	D	D
	Não	2	3	D	D
30 a 35	Sim	3	D	D	D
	Não	1	2	3	D
35 a 40	Sim	2	3	D	D
	Não	1	2	3	D
> 40	Sim	1	2	3	D
	Não	1	1	2	D

Em que: DPF = Diâmetro da ponta fina; D = descarte; 1 = alta qualidade; 2 = média qualidade; 3 = baixa qualidade.



FIGURA 1: Exemplo de uma classificação de fustes, apresentando as classes de qualidade e altura de qualificação das seções homogêneas. Fonte: Arce (2004).

FIGURE 1: Example of a classification of stems, presenting the class of quality and height of qualification of the homogeneous sections. Source: Arce (2004).

### Ajuste da equação de afilamento

Para fins desse trabalho, foi feita a cubagem rigorosa de 32 árvores para o ajuste do modelo de afilamento. Utilizando uma suta, foram obtidas duas medidas ortogonais do diâmetro na altura de 1,30 m e de diâmetros a 0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, ...95% da altura total da árvore. O cálculo do volume com casca das seções foi feito empregando-se o método de Smalian. A Figura 2 apresenta a distribuição de frequência das 32 árvores utilizadas no ajuste da equação (a) e distribuição das árvores inventariadas nas oito parcelas amostradas (b).

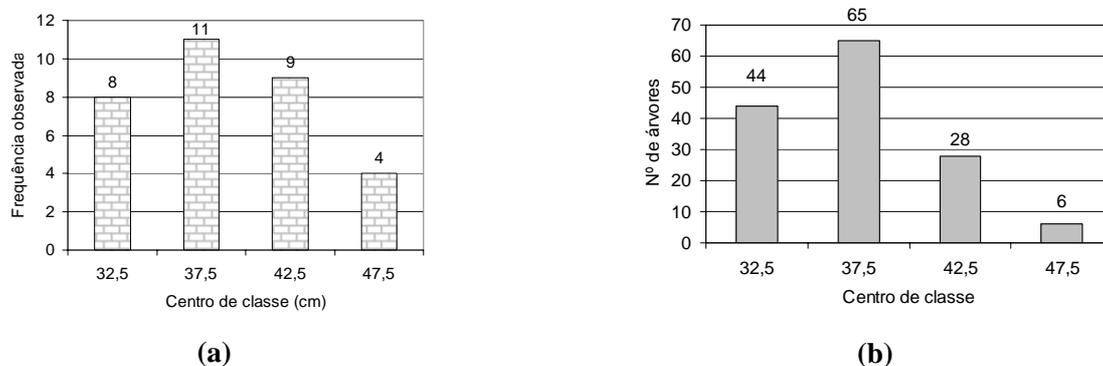


FIGURA 2: Distribuição de frequência das árvores-amostra utilizadas no ajuste (a) e inventariadas nas oito parcelas (b), por classes de diâmetro.

FIGURE 2: Distribution of frequency of the tree-sample used in the adjustment of the models (a) and inventoried in the eight plots (b), by diameter classes.

O modelo de afilamento utilizado foi o de Schöepfer (1966). Esse modelo foi selecionado em razão dos resultados encontrados na estimativa de altura e de volume, apresentados em Mendonça (2006). As expressões apresentadas correspondem à sua forma original (1), e volume de qualquer porção do tronco (obtida por meio da integração das áreas seccionais da árvore entre os limites  $h_1$  e  $h_2$ ) (2), tal como segue:

$$\frac{d_{ij}}{DAP_j} = \left[ \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{h_{ij}}{Ht_j} \right) + \beta_2 \left( \frac{h_{ij}}{Ht_j} \right)^2 + \beta_3 \left( \frac{h_{ij}}{Ht_j} \right)^3 + \beta_4 \left( \frac{h_{ij}}{Ht_j} \right)^4 + \beta_5 \left( \frac{h_{ij}}{Ht_j} \right)^5 \right] + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

$$\hat{v}_j = K DAP_j^2 \left[ c_0^2 h_{ij} + c_0 c_1 h_{ij}^2 + \left( \frac{2}{3} c_0 c_2 + \frac{1}{3} c_1^2 \right) h_{ij}^3 + \left( \frac{1}{2} c_0 c_3 + \frac{1}{2} c_1 c_2 \right) h_{ij}^4 + \left( \frac{2}{5} c_0 c_4 + \frac{2}{5} c_1 c_3 + \frac{1}{5} c_2^2 \right) h_{ij}^5 + \left( \frac{1}{3} c_0 c_5 + \frac{1}{3} c_1 c_4 + \frac{1}{3} c_2 c_3 \right) h_{ij}^6 + \left( \frac{2}{7} c_1 c_5 + \frac{2}{7} c_2 c_4 + \frac{1}{7} c_3^2 \right) h_{ij}^7 + \left( \frac{1}{4} c_2 c_5 + \frac{1}{4} c_3 c_4 \right) h_{ij}^8 + \left( \frac{2}{9} c_3 c_5 + \frac{1}{9} c_4^2 \right) h_{ij}^9 + \frac{1}{5} c_3 c_5 h_{ij}^{10} + \frac{1}{11} c_5^2 h_{ij}^{11} \right]_{h_1}^{h_2} \quad (2)$$

em que:  $d_{ij}$  = diâmetro na altura  $h_{ij}$  (cm);  $DAP_j$  = diâmetro na altura de 1,30 m (cm);  $Ht_j$  = altura total da árvore (m);  $h_{ij}$  = altura comercial (m);  $\hat{v}_j$  = volume comercial com casca ( $m^3$ );  $h_1$  e  $h_2$  = limites da

integração; sendo  $h_1$  = altura inferior da seção (m) e  $h_2$  = altura superior da seção (m);  $K = \frac{\pi}{40.000}$ ;  $\beta_i$  =

parâmetros da regressão, sendo  $i = 0, 1, \dots, n$ ;  $c_0 = \hat{\beta}_0$ ;  $c_1 = \frac{\hat{\beta}_1}{Ht_j^{p1}}$ ;  $c_2 = \frac{\hat{\beta}_2}{Ht_j^{p2}}$ ;  $\dots$ ;  $c_5 = \frac{\hat{\beta}_5}{Ht_j^{p5}}$ ;  $\varepsilon_{ij}$  = erro

aleatório.

### Otimização do uso das toras amostradas no inventário

Os fustes das árvores em todas as parcelas amostradas foram submetidos ao processo de otimização.

Na primeira etapa, empregou-se um algoritmo heurístico para geração de números úteis (ARCE *et al.*, 2004). Esse algoritmo identifica os cortes potenciais (números úteis) que devem ser avaliados ao longo do fuste. A Figura 3 apresenta o pseudocódigo do algoritmo heurístico de geração de números úteis.

Fase 1 – Calcule  $\beta = \min \{l_i, i = 1, 2, \dots, m\}$ . Defina  $U^{(m+1)} = F^{(m+1)} = \{0\}$ , e faça  $k = m$ .  
 Fase 2 – Calcule  $F^{(k)} = \{u + j * l_k; u \in U^{(k+1)}, j = 1, 2, \dots, \text{e } L - (u + j * l_k) \geq \beta\}$   
 Fase 3 – Faça  $U^{(k)} = F^{(k)} \cup U^{(k+1)}$ . Remova quaisquer números equivalentes de  $U^{(k)}$ .  
 Fase 4 – Se  $k > 1$ , faça  $k \leftarrow k - 1$  e vá para o *Passo 2*. Caso contrário, pare.  
 $U^{(1)}$  contém a lista dos números úteis.  
 Em que:  $L$  = comprimento útil da árvore que está sendo otimizada (\*);  $l_i$  = comprimento da tora do produto  $i$ ;  $m$  = número de produtos diferentes a serem considerados na otimização;  $F$ ,  $U$  = vetores (matrizes unidimensionais) destinados ao armazenamento de números.

FIGURA 3: Pseudocódigo do algoritmo heurístico de geração de números úteis.

FIGURE 3: Pseudo code of the heuristic algorithm generating useful numbers.

Na segunda etapa, os números úteis servem como base de dados para o algoritmo baseado em Programação Dinâmica (PD) para geração do corte ótimo (ARCE *et al.*, 2004). Esse algoritmo determina a combinação ótima das toras a se retirar do fuste com o objetivo de maximizar o aproveitamento volumétrico deste, ou seja, maximizar o volume de acordo com as classes de qualidade e tamanho das toras.

A PD caracteriza-se pela otimização em estágios por meio de uma equação recursiva. Em cada um desses estágios, são comparados vários estados ou opções, sendo armazenado somente o melhor valor destes, denominado de valor “*label*”. Dessa maneira, os diferentes produtos que são considerados na otimização de um determinado fuste representam as fases do problema de PD, e os números úteis gerados no algoritmo descrito anteriormente, constituem os estados. A equação de recorrência apresentada a seguir tem por função maximizar o valor do fuste.

$$\max F_s(x) = \max \{P_s + F_s(x - l_s), F_{s-1}(x)\}$$

$$s = 2, 3, \dots, m$$

Em que:  $x$  = ponto do fuste (número útil) no qual é feita a avaliação ( $m$ );  $F_s(x)$  = receita bruta acumulada da melhor combinação de produtos obtida até o comprimento  $x$  utilizando somente os primeiros  $s$  produtos (\$);  $l_s$  = comprimento do produto  $s$  (m);  $P_s$  = receita bruta da tora do produto  $s$ , que está sendo avaliada (\$);  $F_s(x - l_s)$  = receita bruta acumulada da melhor combinação de produtos obtida até o comprimento  $(x - l_s)$  utilizando somente os primeiros  $s$  produtos (\$).

No caso de uma tora possuir características de duas classes de qualidade, por exemplo, classes 1 e 2, o algoritmo possui uma alternativa de tolerância para que esta seja enquadrada em uma determinada classe de qualidade. Para esta pesquisa, considerou-se uma tolerância de 20%, ou seja, no exemplo acima, a tora terá que possuir pelo menos 80% do comprimento com classe de qualidade superior (classe 1) para que a totalidade dela seja classificada como sendo pertencente à essa classe. Um aspecto que deve ser salientado é que se a árvore apresentar um defeito e for classificada com o código D (descarte) no meio da seção útil, as duas porções úteis localizadas abaixo e acima do defeito devem ser otimizadas de forma separada, uma vez que o defeito, por ser categórico, não pode ser incluído de nenhuma maneira em qualquer tora em consequência do possível descarte na serraria. Para fins desta pesquisa, foi utilizado o mesmo valor monetário para cada classe de sortimento e qualidade. Os algoritmos apresentados foram implementados pelo Professor Julio Eduardo Arce da Universidade Federal do Paraná (UFPR) em um sistema de otimização denominado de FlorExcel. Esse sistema utiliza a linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) partindo do Microsoft Excel.

### Colheita e traçamento das árvores inventariadas

Os fustes de todas as árvores das oito parcelas foram submetidos ao processo de otimização. Em seguida, as 143 árvores foram derrubadas e marcadas por uma equipe treinada pela empresa e passaram pelo processo de traçamento para posterior comparação dos volumes comerciais das toras traçadas com o volume estimado pelo método de otimização. O procedimento de traçamento empregado pela equipe de colheita da empresa é padronizado e tem como principal objetivo obter o máximo de rendimento no traçamento das toras em termos de qualidade e quantidade. O procedimento treinado pela equipe de colheita é descrito a seguir.

Primeiramente é mensurado o comprimento útil do fuste para serraria, considerando o diâmetro mínimo comercial de 28 cm. Em seguida, é demarcada a área da chamada sapata ou catana e a “boca” do corte e depois estas são retiradas (Figura 4). Na seqüência, são marcadas as toras utilizando as opções de comprimento definidas na Tabela 2.

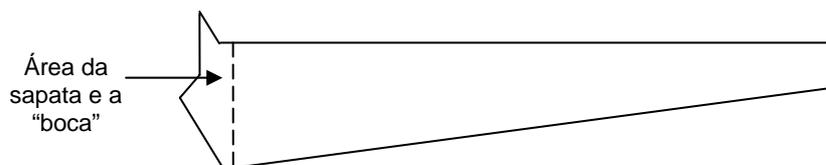


FIGURA 4: Demonstração da área da sapata (catana) e “boca”.

FIGURE 4: Demonstration of the area of the sapata (catana) and “mouth”.

TABELA 2: Dimensões das toras utilizadas na Aracruz Produtos de Madeira.

TABLE 2: Dimensions of logs used in the Aracruz Produtos de Madeira.

Produto n.	Comprimento (m)	DPF (cm)	
		Mínimo	Máximo
1	5,03	40	99
2	5,03	35	40
3	5,03	30	35
4	5,03	28	30
5	4,47	40	99
6	4,47	35	40
7	4,47	30	35
8	4,47	28	30
9	3,83	40	99
10	3,83	35	40
11	3,83	30	35
12	3,83	28	30
13	3,23	40	99
14	3,23	35	40
15	3,23	30	35
16	3,23	28	30
17	2,65	40	99
18	2,65	35	40
19	2,65	30	35
20	2,65	28	30

Em que: DPF = Diâmetro da ponta fina.

A marcação das toras é feita levando em consideração as orientações para: produzir toras retas; forçar uma menor diferença de diâmetros das extremidades da tora com traçamento de uma tora curta, para que seja o mais cilíndrica possível (Figura 5); localizar defeitos pequenos nas pontas das toras (quando as toras possuem pequenos defeitos na ponta, são aproveitadas sem restrição); e eliminar defeitos grandes. Além disso, podem ser feitos ajustes nos comprimentos e marcações para melhorar o aproveitamento da árvore, se necessário. Depois da marcação dos comprimentos das toras que serão serradas, estas são identificadas com uma tinta para separação das toras que servirão de matéria-prima para celulose.

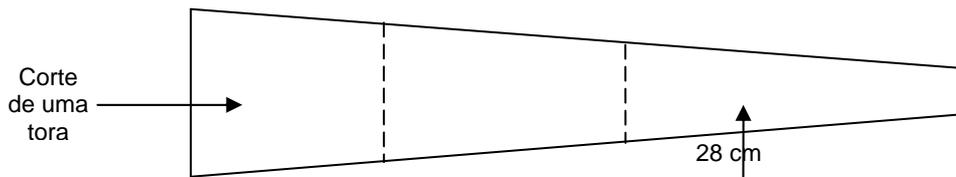


FIGURA 5: Corte de toras de menor comprimento para forçar uma diferença menor entre os diâmetros das extremidades da tora.

FIGURE 5: Cut of logs of smaller length to force a smaller difference among the diameters of the extremities of the log.

### Comparação do volume estimado pelo inventário com otimização do fuste e o volume obtido após colheita e traçamento das toras

As toras obtidas pelo processo de traçamento foram cubadas e divididas em classes de tamanho e qualidade. A cubagem foi feita utilizando-se da fórmula de Smalian.

$$V_{\text{tora}} = \left( \frac{g_{\text{base}} + g_{\text{topo}}}{2} \right) \cdot L$$

Em que:  $V_{\text{tora}}$  = Volume da tora com casca ( $\text{m}^3$ );  $g_{\text{base}}$  = área seccional da base da tora ( $\text{m}^2$ );  $g_{\text{topo}}$  = área seccional do topo da tora ( $\text{m}^2$ );  $L$  = comprimento da tora (m).

O volume obtido pela equipe de colheita foi comparado com o volume otimizado obtido pelo inventário florestal por meio do Teste qui-quadrado a 5% de probabilidade.

### Comparação do volume total estimado pelo inventário com otimização do fuste e o volume colhido no talhão

Após a etapa de otimização e considerando-se o delineamento de amostragem aleatória simples, foram calculadas as seguintes estatísticas para o inventário: média ( $\bar{v}$ ), variância ( $S_v^2$ ), desvio-padrão ( $S_v$ ), coeficiente de variação (CV), erro-padrão da média ( $S_{\bar{v}}$ ), erro de amostragem (EA), volume por hectare, volume total da população e intervalo de confiança (IC) para o volume total colhido no talhão. As estimativas da média e do volume total da população foram comparadas aos verdadeiros valores (parâmetros) do volume colhido.

O volume de madeira colhido no talhão em estudo, destinado para serraria, foi obtido pela pesagem dos caminhões contendo toras. O somatório do peso (ton.) das cargas é dividido por um fator de conversão para volume ( $\text{m}^3$ ). Esse fator é obtido por meio da cubagem de uma amostra de toras. O peso (ton.) dessa amostra é dividido por esse volume cubado ( $\text{m}^3$ ), resultando no fator peso/volume.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Ajuste da equação de afilamento

A Tabela 3 apresenta as estimativas dos parâmetros e estatísticas para o modelo de Schöepfer, considerando a estimativa do volume. Verifica-se um ajustamento considerado bom para o objetivo do estudo, uma vez que apresentou valores de coeficiente de correlação ( $r$ ) elevado e erro-padrão relativo ( $S_{YX}$  %) baixo.

TABELA 3: Estimativa dos parâmetros e estatísticas de ajuste da função de afilamento de Schöepfer.

TABLE 3: Estimate of the parameters and statistics of adjustment of the taper function of Schöepfer.

	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\hat{\beta}_5$	$r$	$S_{YX}$ (%)
Estimativa	1,11792	-4,06467	18,55763	-42,964	44,6834	-17,42466	0,9848	7,24
$t_c$	185,17*	-20,25*	12,13*	-9,77*	8,44*	-7,74*		

Em que:  $r$  = coeficiente de correlação entre os volumes observados e estimados pela integração da equação ajustada;\* significativo a 5% de probabilidade.

## Comparação entre volume estimado pelo inventário e volume obtido na colheita

### Número de toras e volume por classe de qualidade do fuste

Nas Figuras 6a e 6b, são apresentados os resultados para número de toras e para volume, por classe de qualidade de fuste, obtidos pelos algoritmos de otimização e o número de toras e o volume colhido pela equipe de colheita.

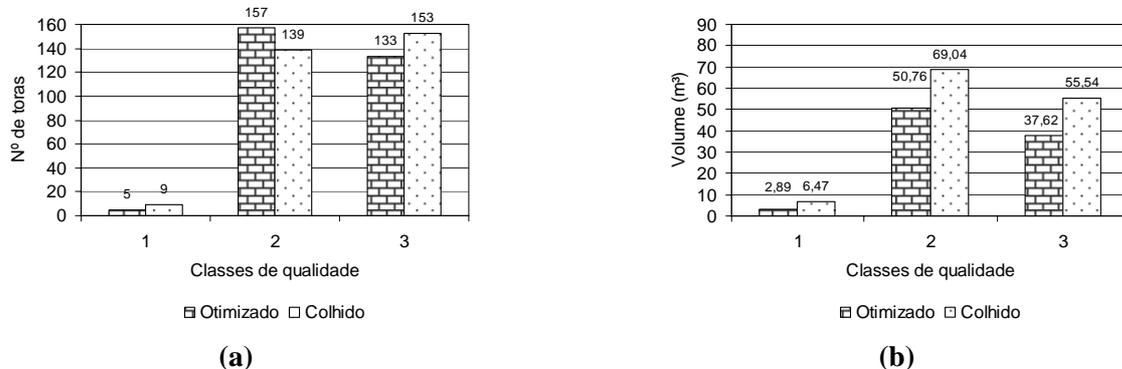


FIGURA 6: Comparação entre o número de toras (a) e volume (b) estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas.

FIGURE 6: Comparison between the log number (a) and volume (b) estimated by the inventory (optimized) and the gotten one in the harvest (harvested) for quality classes of the stem.

Quando comparados a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e o volume colhido diferenciaram estatisticamente do número de toras e do volume obtido pelo algoritmo de otimização. A provável explicação para essa diferença está no fato de que porções do tronco consideradas no inventário como pertencentes à classe D (descarte), no momento da colheita, foram consideradas pela equipe de traçamento como aproveitáveis. Esse aproveitamento pela equipe de colheita resultou em uma maior quantidade de toras colhidas classificadas na classe 3, uma vez que os defeitos que levaram a classificação de partes do fuste como “descarte” pela equipe de inventário provocou a classificação dessas toras na classe de pior qualidade, ou seja, a classe 3. Outro fator que pode ter influenciado nessa diferença é o treinamento da equipe de colheita. Essa equipe é treinada pela empresa de modo que, na operação de marcação das toras, os defeitos sejam localizados na ponta da tora. Esse procedimento acarreta o aumento do aproveitamento do comprimento útil do fuste, ou seja, comprimento até o diâmetro mínimo de 28 cm. Esse aproveitamento maior em relação aos algoritmos de otimização é explicado pelo fato de que os algoritmos se baseiam em critérios precisos de avaliação de possibilidades de potenciais de corte, e não possui uma rotina que antevê a possibilidade desse ajuste na alocação de pequenos defeitos. De acordo com Arce *et al.* (2004), a habilidade do motosserrista em contornar situações difíceis é fundamental para atingir, conjuntamente com os padrões ótimos de corte, a maior eficiência nas operações de colheita florestal.

Aliado a esses fatores, tem-se a dificuldade na identificação de defeitos quando as árvores estão deitadas. Nesse caso, defeitos presentes no fuste podem estar fora da área visual do marcador e do classificador, acarretando a mudança na classificação das toras e também no aproveitamento do comprimento útil do fuste.

Outro fator importante nas estimativas de inventário é a equação de afilamento utilizada no sistema de otimização. Esse fator pode ter sido uma causa de influência no maior aproveitamento volumétrico da equipe de colheita em relação aos algoritmos de otimização. A equação de Schöepfer, utilizada pelo sistema de inventário para o cálculo do volume e altura para o diâmetro mínimo de 28 cm, apresenta tendência de subestimativa no volume. Essa tendência, sobretudo em árvores de pequeno porte, é comprovada pelas análises de resíduos e pela estatística *bias* apresentadas em Mendonça (2006). Avaliando a distribuição diamétrica das árvores amostradas nas oito parcelas, apresentada na Figura 2, nota-se que há grande quantidade de árvores de classe de diâmetro de 32,5 cm, isto é, 44 árvores ou 30,77% do total. Isso pode ter gerado maior erro para árvores de pequeno porte e subestimado o volume inventariado pelos algoritmos utilizados neste trabalho.

### Número de toras e volume por classe de sortimento

Nas Figuras 7a e 7b, são apresentados os resultados para número de toras e para volume por classe de sortimento, respectivamente, obtidos por algoritmos de otimização e colhidos pela equipe de colheita.

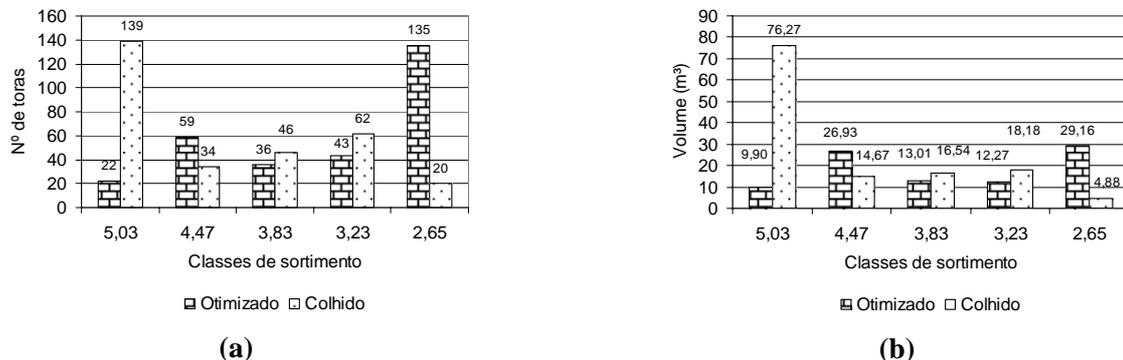


FIGURA 7: Comparação entre o número de toras (a) e volume (b) estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento.

FIGURE 7: Comparison between the log number (a) and volume (b) estimated by the inventory (optimized) and the gotten one in the harvest (harvested) for assortment class.

Analisando a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e o volume colhido diferem estatisticamente do número de toras e do volume obtido pelo algoritmo de otimização. Para as toras de 5,03 m, o número de toras traçado pela equipe de inventário foi substancialmente maior que o otimizado, enquanto que o otimizado apresentou um número de toras bem maior para o comprimento de 2,65 m. A diferença de número de toras de 5,03 m se deve ao fato de uma “tendência” de corte desse tamanho de tora por parte da equipe de colheita. Essa “tendência” é justificada pelo fato de que a obtenção de toras de comprimentos maiores diminui o número de cortes, diminuindo os custos de colheita e transporte. As toras de comprimentos menores (3,23 m e 2,65 m) somente são aproveitadas pela equipe de colheita, caso não seja possível a obtenção de toras de comprimentos maiores. Por outro lado, o algoritmo de otimização utilizado tem “tendência” de cortar toras de 2,65 m. Isso pode ser explicado pelo fato de toras de comprimentos menores possuírem maior probabilidade de serem alocadas dentro das diferentes combinações de corte possíveis do fuste, obtidas pelo algoritmo heurístico de números úteis. Os resultados dos volumes são diretamente proporcionais ao número de toras por tipo de sortimento.

Multiplicando o número de toras pelo comprimento destas (Figura 7), foi obtido o comprimento linear de madeira aproveitável pela equipe de colheita (1280,59 m) e pela equipe de inventário (1008,91 m). Percebe-se que o aproveitamento obtido pela equipe de colheita foi superior ao obtido pela equipe de inventário em 21,21%. Entretanto, a equação de Schöepfer apresentou tendência de subestimativa da altura, como evidenciado pela estatística *bias* e na distribuição residual apresentada em Mendonça (2006), sobretudo, em árvores de pequeno porte. Isso pode ter ocasionado a **subestimativa** do comprimento útil do fuste para serraria, o que resulta em um menor aproveitamento da árvore a ser otimizada.

### Comparação entre volume estimado pelo inventário desconsiderando os descartes e volume obtido na colheita

Uma vez que a equipe de colheita utilizou as seções do tronco classificadas como pertencentes à classe D (descarte) e priorizou toras de comprimentos maiores, foram feitas novas estimativas de número de toras e volume por classe de qualidade de fuste e classe de sortimento. As seções basais consideradas descartes foram reclassificadas como pertencentes à classe 3 e foi estipulado um peso para as toras no valor de seu comprimento.

### Número de toras e volume por classe de qualidade do fuste

Nas Figuras 8a e 8b são apresentados os resultados para número de toras e para volume, por classe de qualidade de fuste, obtidos pelos algoritmos de otimização e o número de toras e o volume colhido pela equipe de colheita.

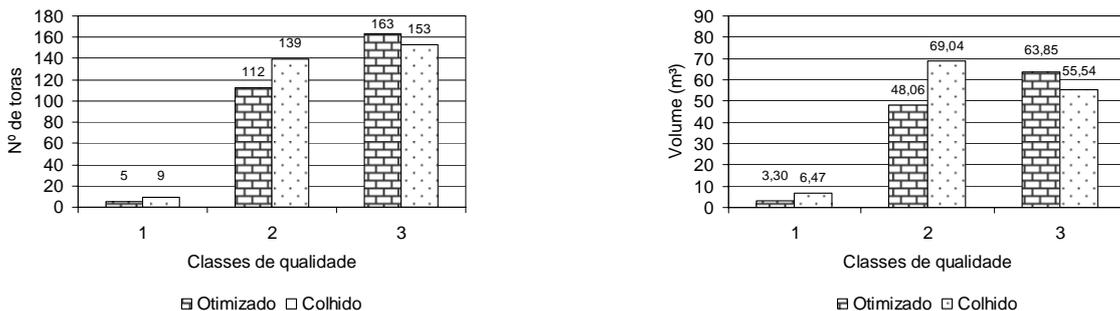


FIGURA 8: Comparação entre o número de toras (a) e volume (b) estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de qualidade de fuste pré-definidas.

FIGURE 8: Comparison between the log number (a) and volume (b) estimated by the inventory (optimized) and the gotten one in the harvest (harvested) for class of quality of the stem.

Quando comparados a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e volume colhido diferenciaram estatisticamente do número de toras e o volume obtido pelo algoritmo de otimização. A reclassificação da classe D (descarte) para classe 3, aliada a priorização de toras de 5,03 m, resultou em um maior número de toras classificadas da classe 3 e diminuição do número de toras da classe 2. O mesmo resultado foi encontrado para o volume. Outro fator relevante na modificação do volume e número de toras é a tolerância. Esse fator pode ter influenciado em toras que, anteriormente classificadas na classe 2, migraram para classe 3, pelo ao aumento do comprimento da seção ocupada pela classe inferior (classe 3). Todavia, o número de toras da classe 1 não se modificou, enquanto o volume resultou em um ligeiro aumento.

**Número de toras e volume por classe de sortimento**

Nas Figuras 9a e 9b, são apresentados os resultados para número de toras e para volume por classe de sortimento respectivamente, obtidos por algoritmos de otimização e colhidos pela equipe de colheita.

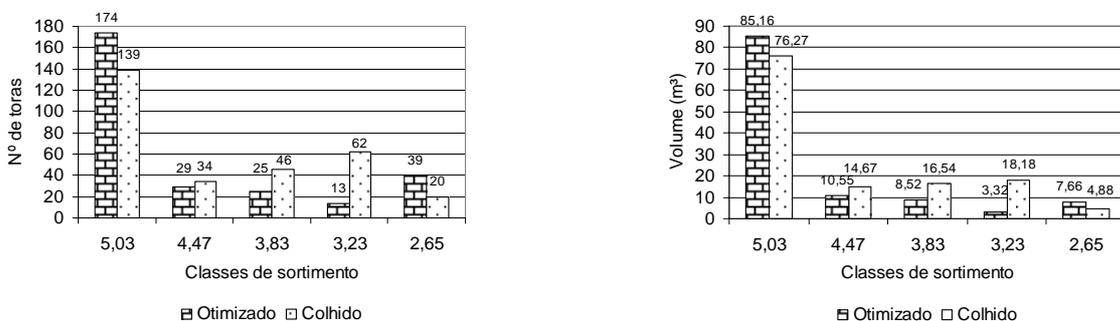


FIGURA 9: Comparação entre o número de toras (a) e volume (b) estimados pelo inventário (otimizado) e o obtido na colheita (colhido) por classes de sortimento.

FIGURE 9: Comparison between the log number (a) and volume (b) estimated by the inventory (optimized) and the gotten one in the harvest (harvested) for assortment class.

Analisando a 5% de probabilidade pelo teste qui-quadrado, o número de toras e o volume colhido diferem estatisticamente do número de toras e do volume obtido pelo algoritmo de otimização. Para as toras de 5,03 m, o número de toras e o volume traçado pela equipe de colheita foram menores que os obtidos pela equipe de inventário, o mesmo ocorreu para toras de 2,65 m. Todavia, para os comprimentos intermediários (4,47; 3,83 e 3,23), o número de toras e o volume obtido pela equipe de colheita foram maiores que os obtidos pela equipe de inventário. Como foram atribuídos pesos maiores às toras de comprimentos maiores, o algoritmo priorizou as toras de 5,03 m, superando os resultados obtidos pela equipe de colheita. Como consequência, toras de 2,65 m são a segunda classe de sortimento a ser mais utilizada pelo algoritmo de otimização, uma vez que possuem maior probabilidade de serem alocadas dentro das diferentes combinações de corte obtidas pelo algoritmo heurístico de números úteis.

Multiplicando o número de toras pelo comprimento destas (Figura 9), foi obtido o comprimento

linear de madeira aproveitável pela equipe de colheita (1280,59 m) e pela equipe de inventário (1245,94 m). Nota-se que o aproveitamento obtido pela equipe de colheita treinada foi superior ao obtido pela equipe de inventário em 2,71%. Esse erro foi bem inferior ao encontrado quando analisados os dados de otimização considerando a classe descarte e peso igual para os comprimentos de toras. Isso pode ter sido ocasionado pela tendência de subestimativa da altura pela equação de afilamento, como já discutido anteriormente.

### Avaliação do inventário florestal

Primeiramente, foi calculado o volume obtido pelo processo de colheita. O peso de toras colhidas na primeira semana de colheita foi de 276,90 toneladas que, dividido por um fator de 1,046; obteve-se o volume de 264,7230 m<sup>3</sup>. O peso de toras colhidas na segunda semana de colheita foi de 395,07 toneladas que, dividido por um fator de 0,9777, obteve-se o volume de 404,0810 m<sup>3</sup>. A soma desses dois volumes foi o volume colhido no talhão (668,8040 m<sup>3</sup>). Esse procedimento proporcionou como resultado um valor médio de referência do volume colhido de 13,2675 m<sup>3</sup>/855 m. A Tabela 4 apresenta o resultado das estimativas do volume obtido pelos algoritmos de otimização, admitindo pesos maiores a toras de maiores comprimento e a reclassificação das seções de descarte.

A média estimada na amostragem é maior que a média de referência ( $\mu = 13,2675 \text{ m}^3/855 \text{ m}^2$ ), determinando uma superestimativa ( $\varepsilon = 1,1338 \text{ m}^3/0,0855 \text{ ha}$ ), que representa o verdadeiro erro de amostragem. Nos intervalos de confiança para média e para o total da população, observa-se que estes contêm os parâmetros ( $\mu = 13,2675 \text{ m}^3$  e  $X = 668,8040 \text{ m}^3$  respectivamente). Apesar da média e o volume total estarem contidos dentro dos respectivos intervalos de confiança, verifica-se que a amplitude destes é considerada grande para o objetivo. Nota-se que o volume total estimado pelos algoritmos de otimização superestimou o volume total colhido, ocasionando um erro de 8,55%.

TABELA 4: Resultados do inventário florestal de *Eucalyptus* sp. em Caravelas, BA.

TABLE 4: Results of the forest inventory of *Eucalyptus* sp. in Caravelas, BA.

Estimador	Estimativa
Média (m <sup>3</sup> /855 m <sup>2</sup> )	14,4013
Variância ((m <sup>3</sup> /855m <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> )	18,4973
Desvio-padrão (m <sup>3</sup> /855m <sup>2</sup> )	4,3009
Erro padrão da média (m <sup>3</sup> /855m <sup>2</sup> )	1,3947
Erro de amostragem (m <sup>3</sup> /855m <sup>2</sup> )	3,2915
Erro de amostragem percentual (%)	22,86
Coefficiente de Variação (%)	29,86
Total por hectare (m <sup>3</sup> /ha)	168,4357
Total da população (m <sup>3</sup> /4,31ha)	725,9577
Intervalo de confiança para média (m <sup>3</sup> /855 m <sup>2</sup> )	IC <sub>(95%)</sub> =[11,1097 ≤ $\mu$ ≤ 17,6928]
Intervalo de confiança para população (m <sup>3</sup> /4,31ha)	IC <sub>(95%)</sub> =[560,0342 ≤ X ≤ 891,8813]

Além disso, a intensidade amostral utilizada neste estudo foi de 15,87% e a intensidade usada normalmente pela empresa é de 2%. Apesar disso, os intervalos de confiança, mesmo contendo os volumes de referência, são considerados grandes para o estudo. Visto que a variabilidade entre as parcelas foi alta, isso pode ter ocasionado um erro de amostragem muito superior ao verdadeiro. Essa variabilidade entre as parcelas deve ter sido ocasionada em razão do manejo para árvores destinadas a serraria ser diferente do manejo para outros fins.

Em florestas destinadas à serraria, o espaçamento inicial é homogêneo e, à medida que o crescimento das árvores é afetado pela competição entre as árvores, há necessidade de desbastes. Uma vez que as florestas necessitam de vários desbastes durante o ciclo de crescimento, e estes são feitos de maneiras distintas, o espaçamento final entre as árvores é variável. Essa variação no espaçamento provoca, por consequência, uma variação no número de árvores aptas a serem derrubadas e destinadas à serraria e o volume colhido dentro de cada parcela. Por exemplo, no inventário realizado para fins desta pesquisa, foi encontrado um número de árvores com *DAP* maior que 28 cm que variou de 13 a 25 unidades. Outro fator que pode ter influenciado nos resultados é o número de parcelas amostradas no inventário. Como a área em

estudo é relativamente pequena, lançou-se um número pequeno de parcelas. Uma vez que o erro-padrão da média aumenta com um número baixo de parcelas, o erro de amostragem também aumenta. E, com isso, a amplitude do intervalo de confiança também aumenta.

Visto a dificuldade de obtenção de estimativas mais precisas em áreas submetidas a desbaste e a influência dessa operação na estimativa do volume colhido, surge a necessidade de estudos sobre a melhor intensidade de amostragem e o tamanho ideal de parcela a serem inventariadas. Esses estudos devem ser feitos de maneira que todas as condições da população (por exemplo, uniformidade e espaçamento) sejam bem caracterizadas dentro do estudo, para que o resultado encontrado seja operacionalmente viável, com custos aceitáveis e que seja o mais preciso possível.

## CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, para as condições em que foi desenvolvido este estudo, conclui-se que:

A metodologia avaliada precisa de ajustes antes de sua implementação em inventários florestais.

Há necessidade de padronização do treinamento das equipes de colheita e inventário florestal, visto que a falta de sincronia entre essas operações influenciam significativamente no resultado obtido pelo inventário.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCE, J. E.; MACDONAGH, P.; FRIEDL, R. A. Geração de padrões ótimos de corte através de algoritmos de traçamento aplicados a fustes individuais. **Revista Árvore**, v. 28, n.2, p.207-217, 2004.
- ARCE, J. E. **Sistema de inventário florestal com qualificação otimizada de toras para serraria**: Relatório técnico-científico final. Curitiba : Aracruz Celulose, 2004.
- DEADMAN, M.W.; GOULDING, C. J. A method for assessment of recoverable volume by log types. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v.9, n.2, p. 225-239, 1978.
- LEITE, H. G.; CAMPOS, J. C. C.; PAULA JÚNIOR, G. G. Emprego de um modelo de programação dinâmica para conversão de troncos em multiprodutos da madeira. **Revista Árvore**, v.19, n.4, p.447-465, 1995.
- LIMA, D. G. de; LEITE, H. G.; PAULA JÚNIOR, G. G.; SOUZA, A. L. Um modelo de suporte a decisão sobre multiprodutos de povoamentos de eucalipto. **Revista Árvore**, v.21, n.1, p.35-48, 1997.
- MENDONÇA, A. R. de. **Avaliação de uma metodologia para otimização de volume de toras comerciais de *Eucalyptus* sp. em função da qualidade do fuste**. 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre.
- SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des massen, sorten und wertberechnung stenender waldbestände schriftenreihe bad**. [S.l.]: Wurt-Forstl., 1966. n.p.
- SOARES, T. S.; VALE, A. B. do; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, v.27, n.6, p.811-820, 2003.