

## DIAGRAMA DE MANEJO DA DENSIDADE PARA POVOAMENTO DE *Pinus taeda* L. CONDUZIDO SEM DESBASTE

### DENSITY MANAGEMENT DIAGRAM OF *Pinus taeda* L. UNTHINNED STAND

Paulo Sérgio Pigatto Schneider<sup>1</sup> Frederico Dimas Fleig<sup>2</sup> Paulo Renato Schneider<sup>3</sup>  
César Augusto Guimarães Finger<sup>4</sup> Djalma Millers Chaves<sup>5</sup> Antônio Maurício Moreira<sup>6</sup>

#### RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a eficiência dos modelos que expressam a relação de densidade/diâmetro e autodesbaste em povoamentos de *Pinus taeda* L., implantados em vários espaçamentos, manejados em densidade completa, sem desbaste e altamente estocada, medida até a idade de 18 anos. Os resultados indicaram que o modelo de densidade e diâmetro de Tang apresentou boa precisão estatística, tendo apresentado: coeficiente de determinação igual a 0,99; erro padrão da estimativa igual a 0,0948; coeficiente de variação igual a 1,17%; mínima tendência com valor igual a 0,0086; e elevada eficiência, com valor igual a 0,8976. O coeficiente angular da equação de densidade e diâmetro não permitiu comprovar a universalidade da lei do autodesbaste, cujo valor do coeficiente angular é estipulado em  $-3/2$ . Com este modelo de densidade e diâmetro foram gerados seis Índices de Densidade do Povoamento (IDP), que variaram de um valor máximo igual a 1.400 até o mínimo de 600, com intervalo de classe de IDP de 200, tendo, como referência, o diâmetro padrão de 25 cm. Os Diagramas de Manejo da Densidade (DMD) da população, elaborados para as variáveis dendrométricas: diâmetro médio, área basal e volume por hectare, por IDP, apresentaram boa eficiência, com baixo erro na estimativa. Os volumes reais por hectare e os estimados no DMD apresentaram diferença absoluta de  $-7,39 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e relativa de  $-1,79 \%$ , demonstrando elevada precisão do modelo de DMD. As estimativas volumétricas por hectare do DMD em relação aos valores reais apresentaram valor de Eficiência igual a 0,99, o que indica alta precisão, e valor de  $\chi^2$  igual a 0,00034, não significativo a 0,01% de probabilidade, demonstrando que os valores reais e os estimados não diferem estatisticamente entre si.

**Palavras-chave:** diagrama; sem desbaste; densidade; *Pinus taeda*.

#### ABSTRACT

This work was developed with the purpose of studying the efficiency of the models which express the density-diameter relationship in stands of *Pinus taeda* L., implanted in several spacing and handled in unthinning density, and were measured every year until the of 18 age. Results indicated that all of the size-density relationship of Tang model presented good statistical precision, was more efficient than the others, presenting excellent coefficient of determination (0.99), low standard error of estimate (0.0948), low coefficient of variation (1.17%), low bias (0.0086) and high efficiency (0.8976). The slope of the size-density didn't allow proving the universality of the self-tinning law, with value of this slope is equal  $-3/2$ . With help of the size-density model, 6 Indexes of Density of the Stands (IDPs) were generated, with

1. Engenheiro Florestal, MSc., Doutorando pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). psp@mail.ufsm.br
2. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). fdfleig@smail.ufsm.br
3. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Titular do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). paulors@smail.ufsm.br
4. Engenheiro Florestal, Dr., Professor Associado do Departamento de Ciências Florestais, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, CEP: 97105-900, Santa Maria (RS). finger@smail.ufsm.br
5. Engenheiro Agrônomo, Dr., Técnico da Empresa Klabin S.A., Fazenda Monte Alegre, Lagoa, CEP: 84279-000, Telêmaco Borba (PR).
6. Engenheiro Florestal, Técnico da Empresa Klabin S.A., Av. Olinkraft, 6602, Bairro Igaras, CEP: 88540-000, Otacílio Costa (SC).

Recebido para publicação em 12/03/2009 e aceito em 22/06/2009.

variation from the maximum 1400 to the minimum 600, with interval of class of IDP equal to 200, having as reference the standard diameter of 25 cm. The population's Density Management Diagram (DMD), elaborated for the dendrometric variables – average diameter, basal area and volume for hectare (by IDP) – presented good efficiency with low mistake in the estimate of the values of these variables. Real volume and estimate volume per hectare in DMD presented an absolute difference of just  $-7.39 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$  and a relative difference of  $-1.79 \%$ , showing a great precision of the DMD model. The estimates volume of DMD per hectare, in relation to the real values, presented a value of efficiency equal to 0.99, what indicates a high precision, and an  $\chi^2$  value equal to 0.00034, not significant to 0.01% of probability, demonstrating that the real and the estimate values don't differ statistical amongst themselves.

**Keywords:** diagram; size-density; unthinning; *Pinus taeda*.

## INTRODUÇÃO

No manejo de povoamentos florestais equiâneos, em sistema de alto fuste, é de fundamental importância conhecer as inter-relações entre a densidade de árvores por hectare e o desenvolvimento do diâmetro no tempo, com o objetivo de antecipar as intervenções de desbastes, aplicadas com uma intensidade adequada, na dependência da capacidade produtiva do sítio e da velocidade de crescimento da espécie.

A produção qualitativa e quantitativa de madeira dos povoamentos florestais está, em sua maioria, relacionada ao sítio, tratos silviculturais e, principalmente, com a densidade da população e outros fatores ambientais. Sobre este aspecto, deve-se considerar que à medida que aumenta o número de árvores, aumenta a área basal significativamente, até o momento em que inicia a competição entre as árvores, sendo então, estabelecido o início da mortalidade natural na floresta e, com isso, a manutenção ou redução da área basal.

A mortalidade de indivíduos numa população pode ser uma ocorrência regular ou irregular. A mortalidade regular provavelmente está ligada a fatores exógenos e danos causados pelo homem (LEE, 1971). A mortalidade irregular é definida como morte casual, ligada a fatores endógenos, definidos pelo espaço e tempo, podendo manifestar-se a partir do plantio, em consequência de mudas menos vigorosas (BURKHART, 1974).

Existem muitos estudos sobre a relação número de árvores de povoamentos e o tamanho, expresso por uma variável dendrométrica, tais como: a regra do D-máximo de Mitchell (1943); a lei do autodesbaste, que estipula o valor de  $-3/2$  para coeficiente angular, possuindo relação direta com o modelo de Yoda *et al.* (1963), que utiliza coeficiente angular igual a  $-1,5$  e com o índice de densidade de Reineke (1933), que utiliza coeficiente angular de  $-1,605$ , que tem sido muito utilizado ao longo do tempo para várias espécies.

De acordo com Reineke (1933), em povoamento com densidade completa, a relação entre o diâmetro médio quadrático das árvores e o seu número de árvores por hectare é linear numa escala de duplo logaritmo. Considera que os parâmetros da equação são independentes da idade e qualidade do sítio, por isso usa uma equação da densidade populacional como uma função do diâmetro médio. Esse autor postulou que, numa escala logarítmica, a relação entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio quadrático de um povoamento sem tratamento resulta em uma linha reta, com um valor constante do coeficiente angular de  $-1,605$  para todas as espécies.

Porém, em estudo realizado recentemente sobre o coeficiente angular ou taxa de autodesbaste, Del Rio *et al.* (2001) constataram uma variação deste parâmetro com a espécie e, muitas vezes, com a idade, assumindo valores entre  $-2,33$  e  $-1,54$ .

A lei do autodesbaste tem sido objeto de uso prático e de discussões acerca da sua eficiência por vários pesquisadores. Dentre eles, destacam-se: Westoby (1981), West e Bourough (1983); Zeide (1985, 1987 e 1991); Sterba e Monserud (1993); Yoda *et al.* (1963); Tang *et al.* (1994, 1995); Osawa e Allen (1993); Smith e Hann (1986); Del Rio *et al.* (2001).

A lei do autodesbaste, desenvolvida por pesquisadores japoneses (Tang *et al.*, 1994), determina qual é o peso médio de árvores sobre o número de árvores sobreviventes por diâmetro médio, sendo ambas as variáveis determinadas em unidade logarítmica, que resulta numa relação linear, com descendente comum de potência  $-3/2$ . Assim, quando ocorre o autodesbaste, tem-se a expressão:  $W = k.N^{-3/2}$ , em que: W é o tamanho médio das árvores, podendo ser expressa em massa, volume, altura, área basal, diâmetro etc.; N é a densidade populacional expressa em número de árvores por hectare; e k é uma constante considerada como

uma medida de taxa requerida para sustentar e manter a área de copa estabelecida e que varia com as condições do dossel (YODA *et al.*, 1963).

Tang *et al.* (1994) estenderam a lei do autodesbaste de povoamentos em densidade completa para povoamentos subestocados e constataram que o autodesbaste começa antes de atingir a máxima densidade e que a taxa de autodesbaste incrementa com a densidade, atingindo o máximo na densidade máxima do povoamento. No modelo, a lei do autodesbaste pode ser considerada um caso especial, pois permite obter, para um diâmetro, a densidade de árvores e a produção. Esse modelo de autodesbaste é expresso por:

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (d(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right]$$

Em que:  $t$  é a idade do povoamento,  $\beta$  é a taxa máxima de autodesbaste do povoamento de densidade completa,  $N(t)$  é a densidade de árvores por hectare no tempo  $t$ ,  $d(t)$  o diâmetro médio das árvores no tempo  $t$  (cm),  $S_f$  o índice mínimo de densidade,  $\gamma$  o índice de autodesbaste, e  $d_o$  o diâmetro básico padrão (25 cm).

O parâmetro  $\delta$  é uma constante que dependente da integração dos valores iniciais de densidade do povoamento ( $N_1$ ) e do diâmetro médio inicial ( $d_1$ ). O valor desta constante é obtido através da seguinte relação:

$$\delta = (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_o)^{\beta\gamma}$$

Então, pode-se definir  $\delta$  como o parâmetro da deficiência de estoque do povoamento, pois quando o parâmetro  $\delta$  assume valor 0 (zero), tem-se a forma familiar do -3/2 da lei do autodesbaste.

A primeira observação da densidade do povoamento ( $N_1$ ) e o diâmetro médio inicial ( $d_1$ ) são usados para obter o  $\delta$  na equação. Todos os dados são combinados para obter o valor médio do índice de densidade máximo  $\bar{S}_f$ , o índice de autodesbaste  $\bar{\gamma}$  e a taxa de autodesbaste máximo  $\beta$  através de regressão não-linear, cujo procedimento de cálculo é descrito em Tang *et al.* (1994).

Ginrich (1967) foi um dos precursores no estudo da densidade populacional para definição de diagramas de manejo da densidade populacional, baseado na área requerida pela árvore, para definição conjunta da área basal, número de árvores e diâmetro médio. Atualmente, o Diagrama de Manejo da Densidade (DMD) é fundamentado na teoria da lei da potência do -3/2 de autodesbaste, desenvolvida por cientistas japoneses para colheitas agrícolas entre os anos de 1960 e 1970 (YODA *et al.*, 1963). Esta lei declara que "para qualquer densidade determinada há um máximo de biomassa comum que uma planta pode atingir individual, porém, esse valor máximo de biomassa só pode ser alcançado esse aumento adicional de biomassa da planta a uma densidade populacional mais baixa, para isto, algumas plantas têm que morrer (...)"

O DMD é uma técnica prática, baseada na teoria do autodesbaste das árvores de um povoamento. Esses diagramas permitem visualizar a mudança do diâmetro médio, altura, densidade e volume dos povoamentos equiâneos puros. As pesquisas de manejo podem avaliar alternativas de regime de densidade a partir da densidade inicial de plantio e intensidade de desbaste, considerando um objetivo de manejo (LONG e SMITH, 1985).

Para o estudo da densidade populacional, Drew e Flewelling (1977 e 1979) introduziram, na América do Norte, em meados de 1970, o diâmetro médio quadrático para auxiliar no manejo da máxima produção de madeira, sendo utilizado em trabalhos realizados por Dean e Jokela (1992), Smith e Woods (1997), entre outros.

Yoda *et al.* (1963) propuseram uma dimensão geométrica da lei do autodesbaste, baseada na suposição de que o autodesbaste ocorre quando a cobertura do povoamento excede a 100%; as plantas de muitas espécies são sempre similares geometricamente em amoldar-se sem consideração ao estágio de crescimento ou condições do *habitat*.

De acordo com Harrington (1997) a Linha de fechamento do dossel em plantações de *Pinus taeda* L. começa em torno de 25% do Índice de Densidade do Povoamento (IDP). O povoamento começa a sofrer autodesbaste entre os valores de 50 e 55% do IDP, com mortalidade de árvores devido à competição entre os

indivíduos. A zona é considerada ótima para manejo da densidade dos povoamentos com estoque completo, ausência de autodesbaste, e com boa recuperação do volume, mantendo as operações de desbaste entre os limites acima e abaixo de 30 e 45% do IDP.

Por outro lado, Archibald e Bowling (1995) estabeleceram para *Pinus banksiana*, que a posição da linha que correspondente à zona de iminente competição e mortalidade, localiza-se a 0,55 (55%), e a linha que define o ponto de fechamento das copas, localiza-se a 0,15 (15%) do máximo volume da árvore média numa determinada densidade, respectivamente. Isto é confirmado por Drew e Flewelling (1979) confirmaram que o ponto de fechamento de copa encontra-se a uma Densidade Relativa igual a 15% do máximo volume da árvore média e que, abaixo desse ponto, o crescimento por hectare é proporcional.

Segundo Reid (2004), um Diagrama de Densidade do Povoamento define o grau de competição entre os indivíduos em florestas equiâneas, mediante uma série de linhas paralelas, determinadas a partir da linha de autodesbaste. Disso, teoricamente, podem ser definidas zonas de competição para plantações: Zona de Densidade Excessiva, em que ocorre um crescimento restringido; Zona de Início de Competição e Iminente Mortalidade, a qual se presume que não deve ser obtido; Zona de Crescimento Livre, em que o incremento em diâmetro individual das árvores é máximo; Zona de Estoque Completo, na qual a produtividade é maximizada. Quando a floresta passa da zona de estoque completo, o incremento em volume é simplesmente distribuído sobre um maior número de árvores. Entre as Zonas de Crescimento Livre e a Zona de Estoque Completo, ocorre uma Zona de Aumento da Competição, em que o crescimento individual das árvores é crescentemente restringido.

Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo específico determinar o índice de densidade populacional e o diagrama de manejo da densidade de povoamentos de *Pinus taeda* manejados sem desbaste.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Localização e caracterização da área de estudo

Os dados foram levantados em áreas pertencentes à Empresa Klabin S.A., no município de Otacílio Costa, região fisiográfica denominada de Planalto Central Catarinense (SANTA CATARINA, 1986).

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo "Cfb", mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos, não apresentando estação seca definida. A precipitação média anual é de 1.808 mm, distribuída em 124 dias, temperatura média anual de 17,8°C (MOTTA *et al.*, 1971).

O solo da área do experimento é classificado como latossolo bruno, aluminico TB, horizonte A húmico, textura argilosa e relevo suavemente ondulado.

### Origem dos dados

Os dados utilizados no presente estudo são provenientes de um experimento concebido com base no Modelo Nelder Modificado, instalado em 1988, com idade atual de 18 anos, em 2006. O delineamento estatístico utilizado foi em blocos ao acaso, com três repetições e nove tratamentos, sendo estes definidos pelo espaçamento inicial de plantio. Destes tratamentos foram utilizados os dados dos espaçamentos mais densos de: 1,5 x 1,0 (1,5 m<sup>2</sup>), 2,5 x 1,0 (2,5 m<sup>2</sup>).

Na implantação do experimento, a área sofreu preparo de solo, com uma gradagem leve, realizada com trator agrícola. O plantio foi realizado manualmente, tendo sido realizados os tratos culturais comumente utilizados, como: roçadas, coroamentos e combate a formiga.

O experimento foi medido, periodicamente, até os 18 anos de idade. No interior de cada unidade amostral foram medidas a circunferência à altura do peito e a altura das árvores.

### Metodologia empregada

O estudo da densidade e diâmetro e autodesbaste foram realizados através do número de árvores por hectare e o correspondente diâmetro médio das árvores. Para isto, foi utilizado o modelo de autodesbaste proposto por Tang *et al.* (1994), expresso por:

$$\ln N(t) = \ln S_f - \frac{1}{\gamma} \ln \left[ (D(t)/d_o)^{\beta\gamma} + \delta \right]$$

Em que, t é a idade do povoamento (ano),  $\beta$  a taxa máxima de autodesbaste em densidade completa,

$N(t)$  a densidade no tempo  $t$  (número de árvores por hectare),  $D(t)$  o diâmetro médio das árvores no tempo  $t$  (cm),  $S_f$  o índice da máxima densidade,  $\gamma$  o índice de autodesbaste, e  $d_0$  o diâmetro básico padrão (25 cm).

A constante  $\delta$  foi determinada pela densidade inicial do povoamento ( $N_1$ ) e o diâmetro médio inicial ( $d_1$ ), da seguinte fórmula:

$$\delta = (S_f / N_1)^\gamma - (d_1 / d_0)^{\beta\gamma}$$

Para verificação da precisão estatística dos modelos de densidade e diâmetro foram utilizados o coeficiente de determinação ajustado, o erro padrão da estimativa e o coeficiente de variação.

A validação do modelo de densidade de árvores por hectare por diâmetro médio do povoamento foi realizada através dos critérios estatísticos recomendados por Palahi *et al.* (2002) e Cellini *et al.* (2002):

a) Tendência (Bias)

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}$$

b) Eficiência (E)

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

Em que,  $y_i$  é o valor observado da densidade de árvores por hectare,  $\bar{y}_i$  o valor média das densidades de árvores por hectare,  $\hat{y}_i$  o valor estimado de densidade de árvores por hectare,  $n$  o número de observações.

### Processamento dos dados do experimento

O modelo não linear de Tang foi ajustado no procedimento NLIN, através do método Gauss-Newton, no pacote SAS - Statistical Analysis System (1999).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Índices de Densidade do Povoamento

Os dados de número de árvores por hectare e diâmetro médio correspondentes são oriundos de parcelas permanentes, em povoamentos implantados em vários espaçamentos, com 18 anos de medições, tendo originado aproximadamente 50 observações em cada espaçamento.

Com os dados de número de árvores por hectare e diâmetros médios observados nas parcelas permanentes do povoamento, nos espaçamentos de 1,5x1,0 e 2,5x1,0 m, foram ajustadas equações de densidade e diâmetro e autodesbaste, expressa pelo modelo não linear de Tang *et al.* (1994), que apresentou um ótimo ajuste, com coeficiente de determinação de 0,99, erro padrão da estimativa de 0,0948 e coeficiente de variação de 1,17 %. Os parâmetros encontram-se dispostos no próprio modelo, expresso por:

$$\ln N = \ln 1494,5 - \frac{1}{16,56} \ln \left[ \frac{(d/25)^{1,6523.16,56}}{(1494,5/N_1)^{16,56} - (d_1/d_0)^{1,6523.16,56}} \right]$$

Em que,  $d$  é o diâmetro médio das árvores,  $d_1$  é o diâmetro médio inicial,  $d_0$  é o diâmetro básico padrão (25 cm) e  $N_1$  a densidade de árvores iniciais.

Com o modelo de Tang definido foram gerados os dados de densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio do povoamento. Esta equação permitiu obter a curva decrescente da máxima densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, que representa a máxima capacidade de tolerância fisiológica da árvore para se manter sobrevivente na população, em determinado habitat. Nesta condição, passa a ocorrer o autodesbaste de árvores da população, porque, a partir deste ponto, as árvores passam a não suportar mais a

concorrência entre os próprios indivíduos por água, luz e nutrientes, ocorrendo a mortalidade, normalmente, das árvores mais dominadas da população.

Na determinação dos Índices de Densidade do Povoamento (IDP) foi fixado o diâmetro médio padrão de 25 cm, que, para os dados amostrados, corresponde à idade de 15 anos. Assim, com a equação de autodesbaste ajustada anteriormente, foram gerados os IDPs a partir do valor máximo de 1.400 até o mínimo de 600, com intervalo de classe de índice de 200, perfazendo cinco curvas, obtidas de forma proporcional à curva de IDP máximo. Os resultados do número de árvores por hectare pelo diâmetro médio, para esses IDPs encontram-se relacionados na Tabela 1.

TABELA 1: Densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em unidade logarítmica e por Índices de Densidade do Povoamento.

TABLE 1: Density of trees for hectare for the medium diameter, in logarithmic unit and for Indexes of Stand Density.

DAP (cm)	Densidade Máxima	Índices de Densidade do Povoamento				
		1400	1200	1000	800	600
2,3026	8,7065	8,6287	8,4451	8,2279	7,9621	7,6195
2,3979	8,6387	8,5615	8,3794	8,1639	7,9002	7,5602
2,4849	8,5129	8,4368	8,2573	8,0449	7,7851	7,4500
2,5649	8,3833	8,3083	8,1315	7,9224	7,6665	7,3366
2,6391	8,2618	8,1879	8,0137	7,8076	7,5554	7,2302
2,7081	8,1485	8,0757	7,9038	7,7006	7,4518	7,1311
2,7726	8,0425	7,9706	7,8010	7,6004	7,3549	7,0384
2,8332	7,9429	7,8719	7,7044	7,5063	7,2638	6,9512
2,8904	7,8490	7,7789	7,6134	7,4176	7,1780	6,8691
2,9444	7,7603	7,6909	7,5273	7,3337	7,0968	6,7914
2,9957	7,6760	7,6074	7,4455	7,2541	7,0197	6,7176
3,0445	7,5959	7,5280	7,3678	7,1784	6,9465	6,6475
3,0910	7,5195	7,4523	7,2937	7,1062	6,8766	6,5807
3,1355	7,4465	7,3799	7,2229	7,0372	6,8098	6,5168
3,1781	7,3766	7,3107	7,1551	6,9711	6,7459	6,4556
3,2189	7,3095	7,2442	7,0901	6,9078	6,6846	6,3969
3,2581	7,2451	7,1804	7,0276	6,8469	6,6257	6,3406
3,2958	7,1832	7,1190	6,9675	6,7883	6,5690	6,2863
3,3322	7,1234	7,0598	6,9095	6,7319	6,5144	6,2340
3,3673	7,0658	7,0027	6,8536	6,6774	6,4617	6,1836
3,4012	7,0101	6,9475	6,7996	6,6248	6,4108	6,1349

O máximo número de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em unidade logarítmica, gerados no modelo de Tang, permitiu gerar a linha do índice de máxima densidade populacional. A partir dessa linha começa a ocorrer uma supressão de indivíduos pela mortalidade, com o incremento diamétrico das árvores remanescentes, cujos valores encontram-se representados na Figura 1. Essa linha de densidade máxima foi concebida a partir de um diâmetro padrão fixado em 25 cm, equivalente a 3,2 na unidade logarítmica que corresponde a uma densidade de árvores por hectare de 1.494 ou a 7,3 em unidade logarítmica.

As curvas de densidade de árvores por hectare, geradas para cada IDP, em unidade logarítmica, são representadas na Figura 1, na qual se observa a proporcionalidade entre elas, distanciando-se umas das outras à medida que diminui o IDP, descrevendo uma situação de uma população menos estocada.

A transformação antilogarítmica dos valores da Tabela 1 foi reunida na Tabela 2, que apresenta as frequências em unidade aritmética. Percebe-se que, em unidade aritmética, as tendências das frequências de indivíduos por hectare decrescem exponencialmente com o incremento diamétrico.

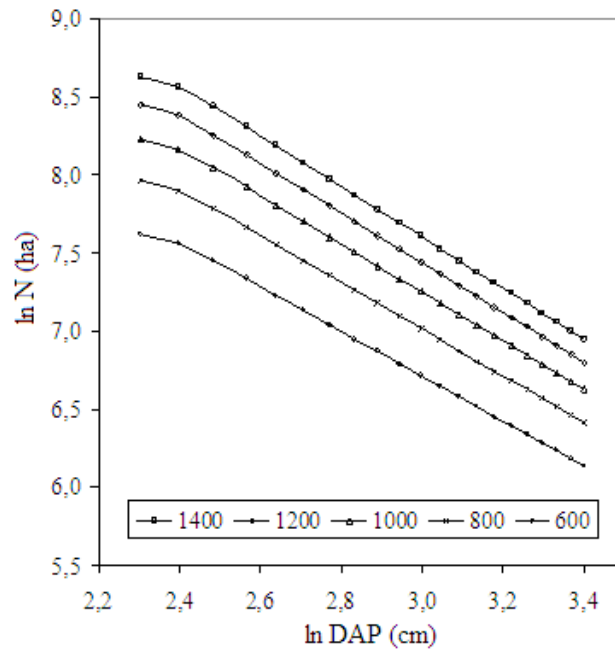


FIGURA 1: Índice de Densidade do Povoamento, com representação da densidade de árvores por hectare em função do diâmetro médio, em unidade logarítmica.

FIGURE 1: Index of Stand Density, with representation of the density of trees for hectare in function of the medium diameter, in logarithmic unit.

A representação gráfica da Tabela 2 permitiu observar que a densidade de árvores por hectare diminuiu numa relação inversamente proporcional ao IDP, e que o afastamento entre as curvas dos IDPs é maior nas menores densidades. Isso se reflete no momento de ocorrência do autodesbaste no povoamento, a partir de uma densidade de árvores por unidade de área em relação ao diâmetro médio, o que, em IDP de menor densidade de árvores, irá ocorrer mais tarde do que nos mais densos (Figura 2).

TABELA 2: Densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, por Índice de Densidade do Povoamento.

TABLE 2: Density of trees for hectare for the medium diameter, for Index of Stand Density.

DAP (cm)	Densidade Máxima	Índices de Densidade do Povoamento				
		1400	1200	1000	800	600
10	6042	5660	4851	4043	3234	2426
11	5646	5289	4534	3778	3022	2267
12	4978	4664	3997	3331	2665	1999
13	4373	4097	3511	2926	2341	1756
14	3873	3628	3110	2591	2073	1555
15	3458	3239	2777	2314	1851	1388
16	3110	2914	2497	2081	1665	1249
17	2816	2638	2261	1884	1507	1130
18	2563	2401	2058	1715	1372	1029
19	2346	2197	1883	1569	1256	942
20	2156	2020	1731	1443	1154	866
21	1990	1864	1598	1332	1065	799
22	1844	1727	1480	1234	987	740
23	1714	1605	1376	1147	917	688
24	1598	1497	1283	1069	855	642
25	1494	1400	1200	1000	800	600
26	1401	1313	1125	938	750	563
27	1317	1234	1058	881	705	529
28	1241	1162	996	830	664	498
29	1171	1097	940	784	627	470
30	1108	1038	889	741	593	445

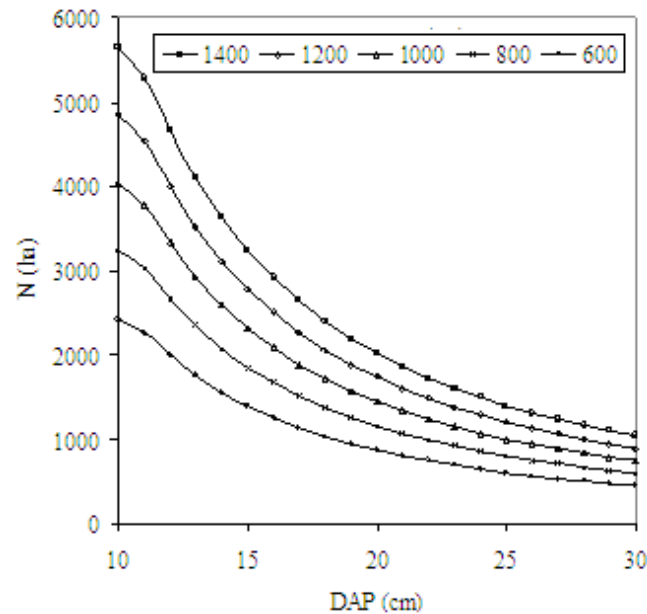


FIGURA 2: Índice de Densidade do Povoamento, com representação da densidade de árvores por hectare pelo diâmetro médio, em unidade aritmética.

FIGURE 2: Index of Stand Density, with representation of the density of trees for hectare in function of the medium diameter, in arithmetic unit.

### Relação da produção com o Índice de Densidade do Povoamento

Na representação do Diagrama de Manejo da Densidade pelo Volume foi estudada uma equação para estimar o volume da árvore média do povoamento em função de variáveis que expressam densidade da população e crescimento (Tabela 3).

TABELA 3: Parâmetros estatísticos das equações de volume testadas.

TABLE 3: Statistical parameters of the volume equations tested.

Equação	Modelo	Parâmetros			$R^2_{aj}$	$S_{xy}$	CV%
		$b_0$	$b_1$	$b_2$			
1	$\ln v = b_0 + b_1 \cdot N$	13,941	-1,9546		0,8266	0,2624	-12,1
2	$\ln v = b_0 + b_1 \cdot \ln N + b_2 \cdot \ln d$	-17,141	0,6091	3,7623	0,9845	0,1914	-5,01
3	$v = b_0 + b_1 \cdot (d \cdot h)^{b_2}$	0,0010	0,000009	1,7253	0,9883	0,1467	4,87
4	$\ln v = b_0 + b_1 \cdot \ln d + b_2 \cdot \ln h$	-10,236	1,8702	1,1400	0,9833	0,1904	8,87

Em que:  $v$  = volume médio ( $m^3$ );  $d$  = diâmetro médio (cm);  $N$  = número de árvores ( $ha^{-1}$ );  $G$  = área basal ( $m^2 ha^{-1}$ );  $h$  = altura dominante (m).

Os resultados estatísticos das equações testadas, relacionados na Tabela 3, indicam que a equação 3 foi a que apresentou maior coeficiente de determinação, igual a 0,9883; menor erro padrão da estimativa, igual a 0,1467; e menor coeficiente de variação, igual a 4,87%, indicando uma excelente precisão estatística. Por outro lado, esse modelo apresentou também uma melhor distribuição dos valores residuais do que as demais equações testadas.

Para estimar o volume na equação selecionada foi ajustada uma relação hipsométrica, que apresentou um coeficiente de determinação de 0,89, erro padrão da estimativa de 0,0509 e coeficiente de variação igual a 2,05%, indicando um bom ajuste. Essa equação corresponde ao modelo reduzido de Backman, sendo expressa por:

$$\ln h = 1,0657 \cdot \ln d - 0,0200 \cdot \ln^2 d$$

Em que:  $h$  é a altura (m) e  $d$  é o diâmetro à altura do peito (cm).

Com base na densidade de árvores por hectare, estratificadas por Índice de Densidade do



Povoamento, anteriormente determinados, foram geradas as áreas basais e volumes por hectare, conforme apresentado na Tabela 4.

TABELA 4: Área basal ( $\text{m}^2\text{ha}^{-1}$ ) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.

TABLE 4: Basal area ( $\text{m}^2\text{ha}^{-1}$ ) for medium diameter and Index of Stand Density.

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento				
	1400	1200	1000	800	600
10	44,4	38,1	31,7	25,4	19,0
11	50,2	43,0	35,9	28,7	21,5
12	52,7	45,2	37,6	30,1	22,6
13	54,3	46,6	38,8	31,0	23,3
14	55,8	47,8	39,8	31,9	23,9
15	57,2	49,0	40,8	32,7	24,5
16	58,5	50,2	41,8	33,4	25,1
17	59,8	51,3	42,7	34,2	25,6
18	61,1	52,3	43,6	34,9	26,1
19	62,2	53,4	44,5	35,6	26,7
20	63,4	54,3	45,3	36,2	27,1
21	64,5	55,3	46,1	36,8	27,6
22	65,6	56,2	46,8	37,5	28,1
23	66,7	57,1	47,6	38,1	28,5
24	67,7	58,0	48,3	38,7	29,0
25	68,7	58,9	49,0	39,2	29,4
26	69,6	59,7	49,7	39,8	29,8
27	70,6	60,5	50,4	40,3	30,2
28	71,5	61,3	51,1	40,8	30,6
29	72,4	62,1	51,7	41,4	31,0
30	73,3	62,8	52,3	41,9	31,4

Os valores de área basal por hectare apresentaram tendência de crescimento com o aumento do diâmetro médio e do Índice de Densidade do Povoamento, conforme representado na Figura 3.

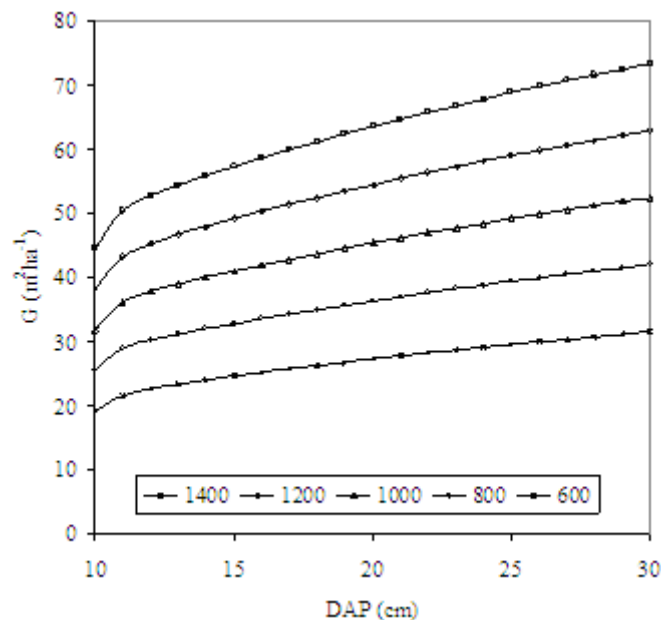


FIGURA 3: Área basal por hectare em função do diâmetro médio e por Índice de Densidade do Povoamento.  
FIGURE 3: Basal area for hectare in function of the medium diameter and for Index of Stand Density.

Com o mesmo procedimento, foram calculadas as tendências de crescimento do volume por hectare, em função do diâmetro médio, e discriminado por Índice de Densidade do Povoamento, conforme apresentado na Tabela 5. Esses valores de volume por hectare foram representados na Figura 4, na qual se

observa que as maiores produções volumétricas por hectare foram obtidas nos maiores Índices de Densidade do Povoamento, e, conseqüentemente, também onde ocorreram os maiores diâmetros médios.

TABELA 5: Volume ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) por diâmetro médio e Índice de Densidade do Povoamento.

TABLE 5: Volume ( $\text{m}^3\text{ha}^{-1}$ ) for medium diameter and Index of Stand Density.

DAP (cm)	Índice de Densidade do Povoamento				
	1400	1200	1000	800	600
10	163,0	139,7	116,4	93,1	69,9
11	208,6	178,8	149,0	119,2	89,4
12	245,6	210,5	175,4	140,3	105,2
13	281,7	241,4	201,2	161,0	120,7
14	319,5	273,9	228,2	182,6	136,9
15	359,4	308,0	256,7	205,4	154,0
16	401,2	343,9	286,6	229,3	171,9
17	444,9	381,3	317,8	254,2	190,7
18	490,5	420,4	350,3	280,3	210,2
19	537,8	461,0	384,2	307,3	230,5
20	587,0	503,1	419,3	335,4	251,6
21	637,8	546,7	455,6	364,5	273,3
22	690,3	591,7	493,1	394,5	295,9
23	744,5	638,1	531,8	425,4	319,1
24	800,3	685,9	571,6	457,3	343,0
25	857,6	735,1	612,6	490,0	367,5
26	916,5	785,5	654,6	523,7	392,8
27	976,9	837,3	697,8	558,2	418,7
28	1038,7	890,4	742,0	593,6	445,2
29	1102,1	944,6	787,2	629,8	472,3
30	1166,9	1000,2	833,5	666,8	500,1

Os volumes calculados mostraram tendência de aumento com o incremento do diâmetro médio e do IDP. As curvas de volume por IDPs apresentaram uma tendência de proporcionalidade, tendendo a afastar-se como o aumento do valor do IDP e da própria produção e diâmetro. Essas tendências podem ser consideradas normais em povoamentos superestocados, pois se enquadram na estrutura de crescimento de populações equiâneas de *Pinus taeda*.

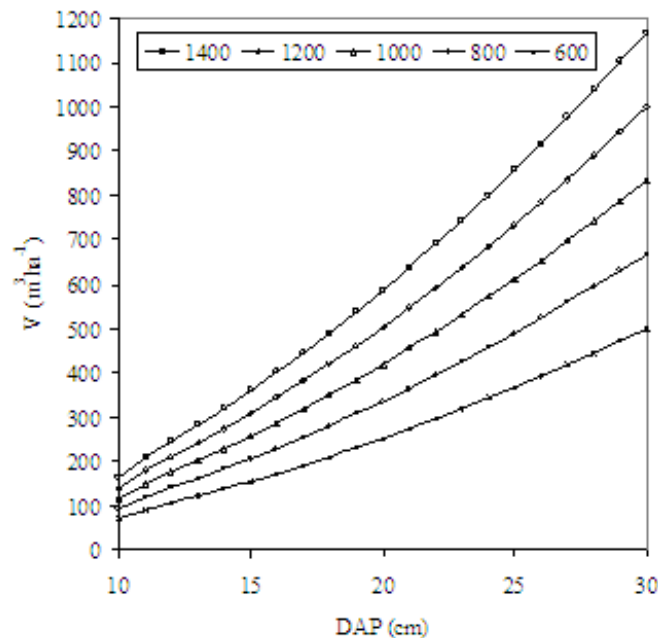


FIGURA 4: Volume por hectare em função do diâmetro médio e por Índice de Densidade do Povoamento.

FIGURE 4: Volume for hectare in function of the medium diameter and for Index of Stand Density.

### Diagrama de Manejo da Densidade

Os Diagramas de Manejo da Densidade (DMD), para cada IDP, foram concebidos pelo cruzamento das informações de densidade de árvores, área basal e volume por hectare, em relação ao diâmetro médio, e encontram-se discriminadas nas Tabelas 2, 4 e 5, respectivamente.

Assim, pela combinação das variáveis dendrométricas: número de árvores por hectare, área basal por hectare e diâmetro médio, discriminados por IDP, foi gerada a Figura 5.

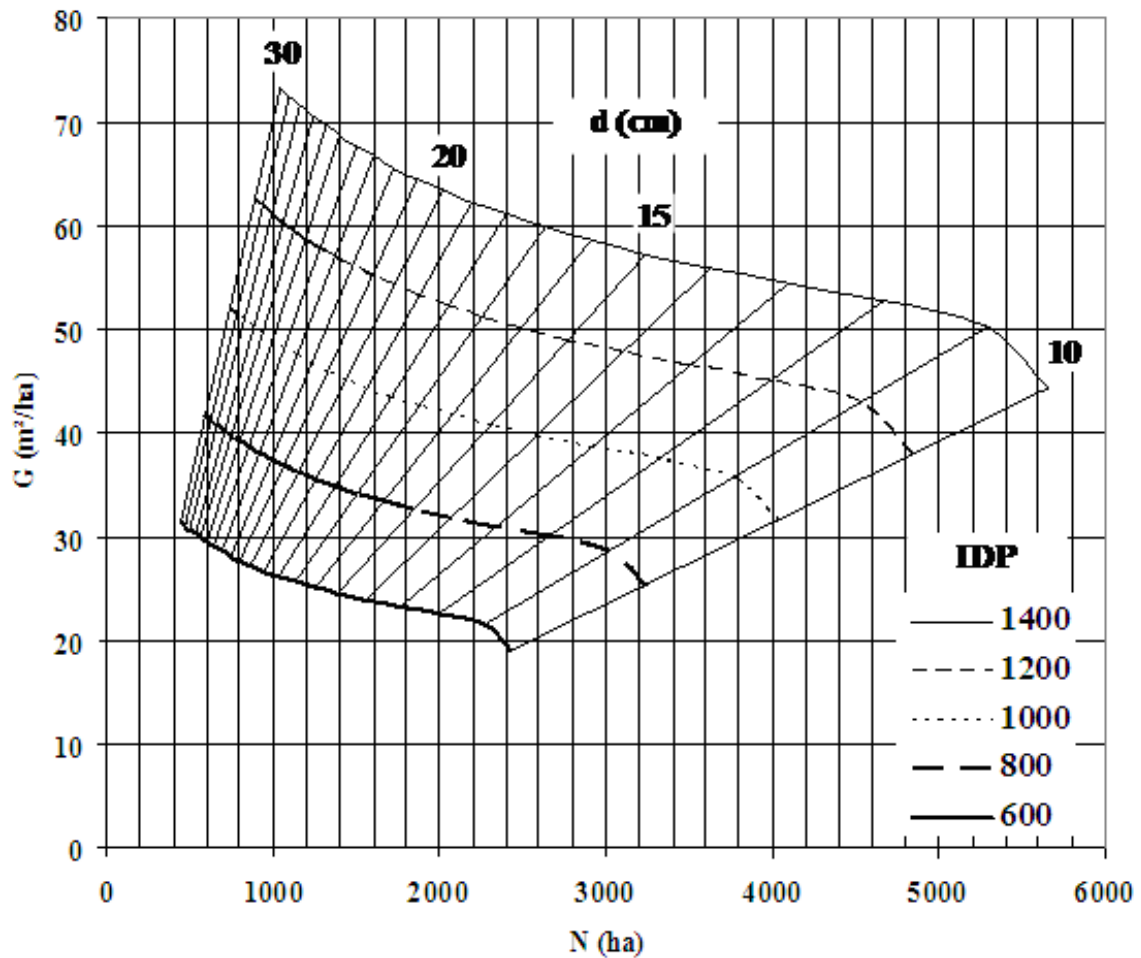


FIGURA 5: Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento, considerando a inter-relação do número de árvores e área basal por hectare com o diâmetro médio.

FIGURE 5: Diagram of Management of the Density for Index of Stand Density, considering the interrelation of the number of trees and basal area for hectare with the medium diameter.

Da mesma forma, da combinação das variáveis dendrométricas: número de árvores por hectare, volume por hectare e diâmetro médio, discriminados por IDP, foi gerada a Figura 6.

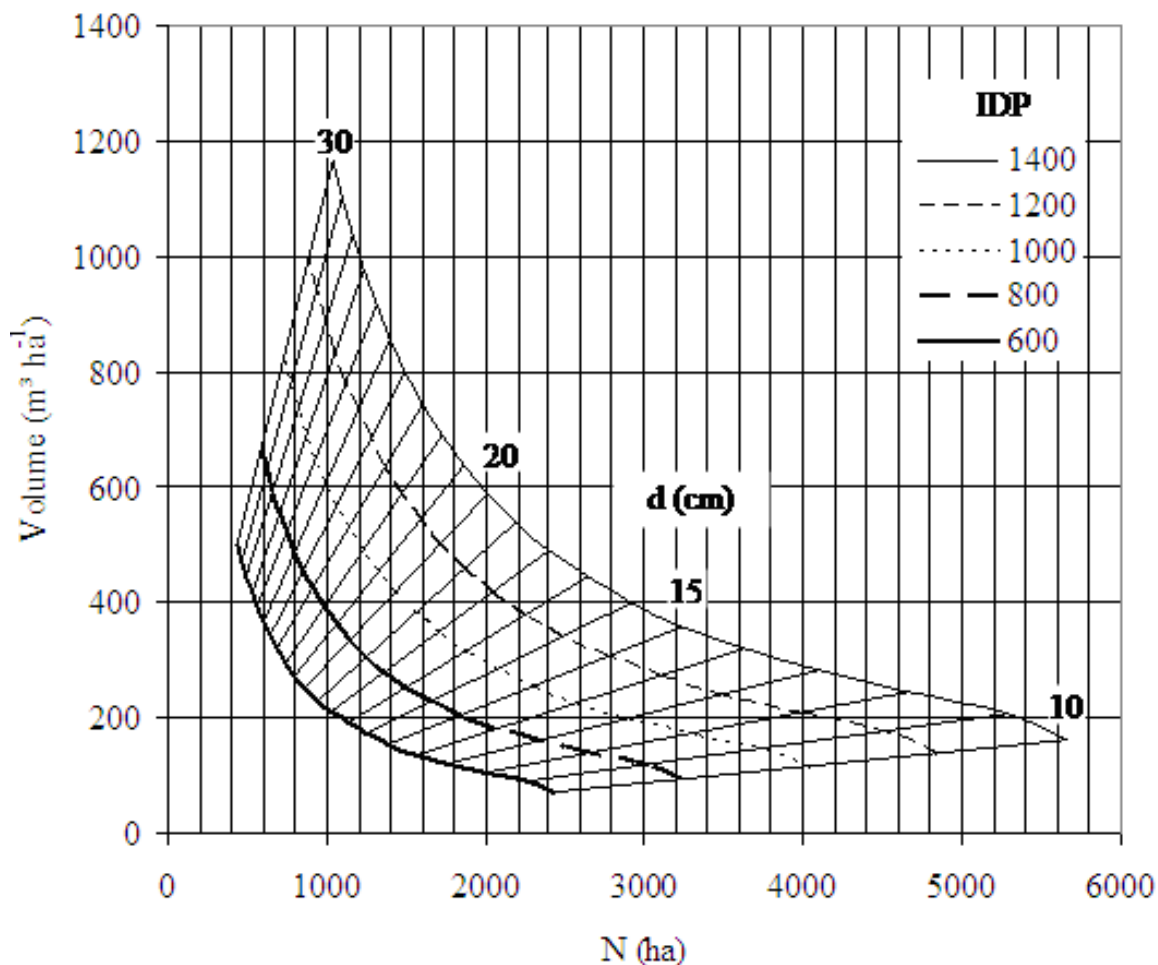


FIGURA 6: Diagrama de Manejo da Densidade por Índice de Densidade do Povoamento, considerando a inter-relação do número de árvores e volume por hectare com o diâmetro médio.

FIGURE 6: Diagram of Management of the Density for Index of Stand Density, considering the interrelation of the number of trees and volume for hectare with the medium diameter.

Para uma utilização prática dos Diagramas de Manejo da Densidade, deve-se, inicialmente, conhecer o número de árvores por hectare e o diâmetro médio da população alvo. Supondo-se que um povoamento de *Pinus taeda* apresente um diâmetro médio de 10 cm e 2.426 árvores por hectare, pode-se determinar o IDP a que pertence, usando-se as informações da Tabela 2. Para o caso em análise, o povoamento apresenta um IDP igual a 600.

Então, assumindo que o povoamento pertence ao IDP igual a 600, tomando os Diagramas de Manejo da Densidade para área basal e volume em hectare, conforme Figuras 5 e 6, respectivamente, podem-se prognosticar os valores das variáveis definidas pelo número de árvores, área basal em hectare para o diâmetro médio, que se projetam ao longo do tempo, como pode ser observado na Tabela 6.

TABELA 6: Prognose dos parâmetros dendrométricos de uma população com IDP igual 600.

TABLE 6: Prognosis of the parameters dendrométricos of a population with IDP equal 600.

DAP (cm)	N (ha)	G (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
10	2426	19,05	69,9
15	1388	24,53	154,0
20	866	27,19	251,6
25	600	29,45	367,5
30	445	31,44	500,1

Em que: N é o número de árvores por hectare, G é a área basal por hectare e V é o volume por hectare.

### Validação dos Diagramas de Manejo da Densidade

A validação dos Diagramas de Manejo da Densidade (DMDs) foi realizada por comparação das estimativas dos volumes no modelo em relação ao volume real por hectare, obtidos em parcelas permanentes, instaladas em povoamentos implantados em espaçamento de 2,0 x 2,0 m, e inventariadas nas idades de 10, 14 e 18 anos.

Assim, na Tabela 7, podem ser encontrados os resultados dos cálculos das diferenças absolutas e relativas dos volumes por hectare, para cada unidade amostral e por idade. Esses valores foram determinados a partir dos volumes por hectare estimados no DMD e os reais, observados na população para cada condição da unidade amostral com densidade de árvores específica.

TABELA 7: Diferenças absolutas e relativas dos volumes por hectare reais e estimados no DMD, para um povoamento implantado em espaçamento de 2,0 x 2,0 m.

TABLE 7: Absolute and relative differences of the volumes for hectare real and dear in DMD, for a stand implanted in spacing of 2,0 x 2,0 m.

Idade (ano)	Amostra	Povoamento real			DMD V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Dif. Abs. V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Diferença relativa (%)
		D (cm)	N (ha)	V (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )			
10	1	17,0	2383	379	401,9	-22,90	-6,04
	2	17,0	2383	373,6	401,9	-28,30	-7,57
	3	16,1	2500	355,2	344,2	11,00	3,10
14	1	19,5	2008	534,8	535,1	-0,30	-0,06
	2	18,8	2070	507	507,2	-0,20	-0,04
	3	18,9	2031	473,3	497,3	-24,00	-5,07
18	1	21,2	1875	653,9	641,5	12,40	1,90
	2	21,0	1836	616,7	628,2	-11,50	-1,86
	3	21,1	1719	585,5	588,2	-2,70	-0,46
Média / Erro (%)				497,7	497,7	-7,39	-1,79

Os resultados mostraram uma diferença de -7,39 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>, representando -1,79 % do volume total observado, demonstrando a precisão do modelo de DMD, o qual pode ser usado como estimador do volume por hectare de populações florestais em densidade completa.

Para maior segurança, também foi calculado o valor da Eficiência (E) das estimativas volumétricas por hectare no DMD em relação aos reais, tendo sido obtido um valor igual a 0,99, o que indica uma alta precisão, pois se aproxima de uma unidade. Para o mesmo fim, também foi calculado o  $\chi^2$ , tendo obtido um valor igual a 0,00034, não significativo a 0,01% de probabilidade, indicando que os volumes reais por hectare não diferem dos estimados no modelo do DMD determinado, comprovando a sua elevada eficiência.

Considerando-se esses resultados estatísticos, pode-se auferir que o modelo do DMD pode ser empregado sem restrição e com segurança na estimativa dos volumes por hectare, bem como ser utilizado para realizar prognose da produção em volume, área basal, diâmetro médio e número de árvores, para o estabelecimento de estratégias de manejo, com a finalidade de planejamento florestal.

### CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que:

a) os Diagramas de Manejo da Densidade, elaborados com as variáveis: diâmetro médio, área basal e volume por hectare, para cada Índice de Densidade do Povoamento, mostraram-se eficientes, permitindo estimar os valores com pouca tendência e baixo erro padrão;

b) Os volumes reais por hectare estimados apresentaram uma diferença absoluta de apenas 9,61 m<sup>3</sup>ha<sup>-1</sup> e relativa de 2,46%, comprovando uma elevada precisão do modelo de DMD desenvolvido;

c) As estimativas volumétricas por hectare em relação aos valores reais apresentaram o valor de eficiência igual a 0,99, o que indica uma alta precisão; e um valor de  $\chi^2$  igual a 0,00034, não significativo a 0,01% de probabilidade, demonstrando que os valores reais e os estimados não diferem estatisticamente entre si.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Klabin S.A., pela concessão dos dados dendrométricos, aos Engenheiros Antônio Maurício Moreira e Djalma Millers Chaves, pela prestimosa colaboração na organização das informações, responsáveis pela instalação e condução do experimento de espaçamento que deu origem aos dados utilizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCHIBALD, D. J.; BOWLING, C. Jack pine density management diagram for boreal Ontario. **Northeast Science & Technology**, NEST Technical Note TN-005. 1995, 19p.
- BURKHART, H. E. **Estimating growth and mortality**. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1974. 15p.
- CELLINI, J. M. *et al.* Modelos de perfil de tronco en *Nothofagus pumilio* (Polp. et Endl.) Krasser y su utilización en el cálculo del volumen total. **Invest. Agr.: Sist. Recur. For.**, Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid, v.11, n.2, p.245-261, 2002.
- DEAN, T. J.; JOKELA, E. J. A density-management diagram for slash pine plantations in the lower coast plain. **Southern Journal of Applied Forestry**, Society of American Foresters, v.16, n.4, p.51-54, november, 1992.
- DEL RIO, M.; MONTERO, G.; BRAVO, F. Analysis of diameter-density relationships and self-thinning in non-thinned even-aged Scots pine stands. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.142, p.79-87, march, 2001.
- DREW, T. J.; FLEWELLING, J. W. Some recent Japanese theories of yield density relationships and their application to Monterey pine plantations. **Forest Science**, Bethesda, v.23, n.4, p.517-534, december, 1977.
- DREW, T. J.; FLEWELLING, J. W. Stand density management: an alternative approach and its application to Douglas-fir plantations. **Forest Science**, Bethesda, v.25, n.3, p.518-532, september, 1979.
- GINRICH, S. F. Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forests in the central states. **Forest Science**, Bethesda, v.13, n.1, p.38-53, mach, 1967.
- HARRINGTON, T. B. Silvicultural approaches for thinning Southern Pines: Method, intensity and timing. USA. University of Georgia. Publ. n. FSP001. 17p. 1997.
- LEE, Y. L. Predicting mortality for even-aged stands of lodgepole pine. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 47, n.1, p.29-32, 1971.
- LONG, J. N.; SMITH, F. W. Relation between size and density in developing stands: a description and possible mechanisms **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.7, p.191-206, january, 1985.
- MOTTA, F. S.; BEIRSDORF, M. J. C.; GARCEZ, R. B. **Zoneamento agrícola do Rio Grande do Sul e Santa Catarina: normas agro-climáticas**. Pelotas: Ministério da Agricultura. 1971. 80p.
- OSAWA, A.; ALLEN, R. B. Allometric theory explains self-thinning relationships of mountain beech and Red pine. **Ecology**, v.74, n.4, p.1020-1032, april, 1993.
- PALAHÍ, M.; MIIMA, J.; MONTERO, E. Stand-level yield model for scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. **Invest. Agr. Sist. Recur. For.**, Ministerio de Agricultura, Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid, v.11, n.2, p.409-424. 2002.
- REID, R. Silvicultural management of Australian blackwood (*Acacia melanoxylon*) in plantations and multi-purpose forests. In: GOVE, J. H. Structural stocking guides: a new look at an old friend. **National Research Council Canada**, Canadá, v.34, n.5, may, 2004.
- REINEKE, L. H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. **Canadian Agricultural Research**, Ottawa, v.46, p.627-638, 1933.
- SANTA CATARINA. Gabinete de Planejamento e Coordenação Geral. Subchefia de Estatística. Geografia e Informática. **Atlas de Santa Catarina**, Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro. 1986. 173p.
- SAS Institute Inc. **SAS/STAT user's guide**. Version 8 (computer manual). SAS Institute Inc., Cary. N.C. 1999.
- SMITH, D. J.; WOODS, M. E. **Red pine and white pine density management diagrams for Ontario**. Tech. Rep. n.48. Ontario Ministry of Natural Resources, Southcentral Sciences Division, Sault Ste. Marie, ON. 1997. 31p.
- SMITH, N. J.; HANN, D. W. A growth model based on the self-thinning rule. **Canadian Journal of Forest Research**, New Westminster, v.16, n.2, p.330-334, april, 1986.
- STERBA, H.; MONSERUD, R.A. The maximum density concept applied to uneven-aged mixed-species stands. **Forest Science**, Bethesda, v.39, n.3, p.432-452, august, 1993.
- TANG, S. *et al.* A growth and self-thinning model for pure even-aged stands: theory and applications. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, v.70, p.67-73, december, 1994.

- TANG, S.; MENG, F. R.; MENG, C. H. The impact of initial stand density and site index on maximum stand density index and self-thinning index in a stand self-thinning model. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.75, p.61-68, july, 1995.
- WEST, P. W.; BOUROUGH, C. J. Tree supervision and the self-thinning. Rule in a monoculture of *Pinus radiata* D.Don. **Annals of Botany**, Oxford, v.52, p.149-158. 1983.
- WESTOBY, M. The place of the self-thinning rule in population dynamics. *American Naturalist*, Chicago, v.118, n.4, p.581-587, october, 1981.
- YODA, K. *et al.* Self-thinning in over crowded pure stands under cultivated and natural conditions. **Journal Biological**. Osaka, v.14, p.107-129, 1963.
- ZEIDE, B. Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. **Forest Science**, Bethesda, v.33, n.2, p.17-537, june, 1987.
- ZEIDE, B. Self-thinning and stand density. **Forest Science**, Bethesda, v.37, n.2, p.517-523, june, 1991.
- ZEIDE, B. Tolerance and self-tolerance of trees. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.13, p.149-166, november, 1985.