

# **AJUSTE DO MODELO DE REINEKE PARA ESTIMATIVA DA LINHA DE MÁXIMA DENSIDADE NA FLORESTA ESTACIONAL DECIDUAL NO RIO GRANDE DO SUL<sup>1</sup>**

Evandro Alcir Meyer<sup>2</sup>, Frederico Dimas Fleig<sup>3</sup>, Lílian Daniel Pereira<sup>2</sup> e Elisabete Vuaden<sup>4</sup>

**RESUMO** – O objetivo deste trabalho foi estudar a relação entre a densidade de árvores por hectare e o diâmetro médio de uma Floresta Estacional Decidual, bem como ajustar o modelo Reineke para descrever esse comportamento, comparando o desempenho de diferentes métodos. A área de estudo localiza-se no Município de Silveira Martins, na região central do Rio Grande do Sul, e encontra-se em estágio inicial de sucessão, após o uso agrícola. As informações referentes ao número de árvores por hectare e ao diâmetro médio foram obtidas por meio do método de densidade pontual proposto por Spurr. As amostras foram tomadas nos estágios iniciais de uma floresta secundária, escolhendo-se áreas onde predominava o camboatá-vermelho (*Cupania vernalis*). Como as florestas naturais apresentam espaçamento irregular, a densidade é bastante variável. Assim, para selecionar apenas parcelas em alta densidade, foram escolhidas áreas onde se verificava a ocorrência de indivíduos mortos. Foram testados diferentes métodos para estimar o limite superior da linha de autodesbaste: a análise de regressão (para todos os dados e densidade relativa maior que 60%), corrigindo o intercepto para que os resíduos fossem negativos; o ajuste manual; o de densidade relativa ( $DR > 90\%$ ); e a análise de fronteira estocástica. O método que melhor estimou a máxima densidade foi a análise de regressão com dados de no mínimo 60% da densidade máxima, obtendo-se um coeficiente angular de -1,563 para o modelo de Reineke. Não houve diferença significativa entre as potências fornecidas pelos diferentes métodos.

Palavras-chave: Autodesbaste; Densidade pontual; Competição.

## ***ADJUSTMENT OF REINEKE MODEL TO ESTIMATE THE LINE OF MAXIMUM DENSITY IN SEASONAL DECIDUOUS FOREST - RS***

**ABSTRACT** – The objective of the present work was to study the relationship between the density of trees per hectare and the average diameter of a Deciduous Forest, as well as to adjust the Reineke model to describe this behavior, comparing the performance of different methods. The area studied is in the municipality of Silveira Martins, in the central region of Rio Grande do Sul State, Brazil, and it is in early stage of succession after agricultural use. The number of the trees per hectare and the average diameter were obtained by the method of density-off proposed by Spurr. Samples were taken in early stages of a secondary forest, choosing areas with predominance of camboatá-vermelho (*Cupania vernalis*). As natural forests have irregular spacing, density is quite variable. Therefore, in order to select only high-density plots, areas with occurrence of dead individuals were chosen. Different methods to estimate the upper limit of the self-thinning line were tested: regression analysis (for all data and relative density higher than 60%), correcting the intercept so that the residuals were negative; the manual adjustment; the relative density ( $DR > 90\%$ ); the stochastic frontier analysis. The method that best estimated the maximum density was regression analysis with data from at least 60% of maximum density, with a slope of -1.563 for Reineke model. There was no significant difference between the powers provided by the methods.

Key words: Self-thinning; Point density; Competition.

---

<sup>1</sup> Recebido em 10.09.2012 aceito para publicação em 06.08.2013.

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal na Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Brasil. E-mail: <eam.meyer@gmail.com> e <liliandapereira@yahoo.com.br>.

<sup>3</sup> Departamento de Ciências Florestais na Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Brasil. E-mail: <dimasfleig@uol.com.br>.

<sup>4</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Brasil. E-mail: <elisabetevuaden@hotmail.com>.

## 1. INTRODUÇÃO

A densidade de uma população florestal pode ser definida com medida da ocupação do sítio, indicando o grau de aproveitamento dos recursos (água, luz, nutrientes) pelas plantas. Conforme Spurr (1952), existem várias maneiras de expressar a densidade de uma população florestal, como o número de árvores por unidade de área. Outra medida comum é a área basal que, apesar de dar uma boa ideia da densidade, não indica se este total surge de muitas árvores pequenas ou poucas árvores grandes. Por isso, esse autor sugeriu que a área basal fosse desmembrada em número de árvores por hectare e o diâmetro da árvore de área transversal média, fornecendo informação sobre a dimensão das árvores do povoamento. Zeide (1987) também sugeriu que o diâmetro fosse utilizado com a finalidade de expressar o tamanho da árvore média. Para Del Río et al. (2001), o diâmetro apresenta maior capacidade para responder às variações na densidade, em razão de forte correlação com a largura de copa. Além disso, o diâmetro médio quadrático pode ser medido mais facilmente e com maior precisão que o volume e a biomassa.

Uma consequência de altas densidades em populações florestais é o autodesbaste, que de acordo com Johnson et al. (2002) é um processo natural, cujo princípio pode ser mais facilmente descrito como mudança temporal no número de árvores, que acontece em populações florestais equiâneas ou inequiâneas. Conforme esse princípio, um espaço de crescimento finito é ocupado progressivamente por menos árvores, à medida que elas crescem em tamanho com a idade. Isso acontece porque, sem ter espaço suficiente para crescer, os indivíduos cuja capacidade de competir por recursos é menor, morrem em virtude do aumento da competição e da supressão, conforme as populações florestais se aproximam do número-limite de árvores de certo tamanho, que possam coexistir em determinada área.

Desde que a forte relação entre a densidade e o diâmetro médio de um povoamento foi descoberta, as equações de densidade-tamanho tornaram-se importante ferramenta de análise para engenheiros florestais e ecólogos (JACK; LONG, 1996). Logo, conhecer o limite da relação entre o número de árvores e o seu tamanho, por exemplo, o diâmetro, em populações florestais, é extremamente importante do ponto de vista do manejo,

pois oferece aos técnicos ferramenta para planejar intervenções silviculturais, como os cortes seletivos e de liberação, de modo a alcançar objetivos predefinidos.

Para Vanclay e Sands (2009), a linha de máxima densidade assemelha-se a um buraco negro, não visível diretamente, mas pode ser indiretamente deduzida pela morte de alguns indivíduos, à medida que a população se aproxima da linha de máxima densidade. A fronteira do autodesbaste não é uma barreira inflexível, ela apresenta flutuação que varia com as estações, manifestando-se diferentemente em tempos de acordo com os fatores limitantes. Como resultado disso, essa fronteira apenas pode ser estimada indireta, aproximada e assintoticamente.

Então, para estimar a linha de máxima densidade, faz-se necessário avaliar áreas em que existam árvores mortas, evidenciando que tal local se encontra no estágio de autodesbaste. Um método para obter a densidade nessas áreas de maneira satisfatória é o método de densidade pontual, proposto por Spurr (1962). Segundo Thomas (2009), a escolha desse método para a obtenção da densidade justifica-se pelo fato de ser muito difícil encontrar população florestal que esteja em alta densidade de maneira homogênea e em toda a sua extensão. Por esse método, é possível estimar a densidade a partir de uma situação localizada e da identificação de locais na floresta que apresentem mortalidade induzida pela competição. Além disso, esse método permite tomar várias amostras em uma área relativamente pequena, que esteja em alta densidade.

Em seu trabalho, Spurr (1962) citou vários motivos pelos quais os métodos de área fixa não devem ser empregados com a finalidade de determinar a densidade de populações florestais. Segundo esse autor, a área basal é variável com o tamanho da amostra e, além disso, com a utilização do método de parcelas todas as árvores contribuem, de maneira direta, para a densidade do seu tamanho, sem levar em conta sua localização em relação ao ponto avaliado.

Segundo Spurr (1962), o “método de adição angular”, por ele proposto, não é indicado para estimar a densidade média em um inventário florestal, mas é muito indicado para a medição da densidade em pontos individuais em pesquisas silviculturais ou ecológicas. Nesses casos, a precisão é muito importante para o estudo da capacidade de estoque. Em tais aplicações, esse método é naturalmente mais preciso que qualquer outro método

de estimação de área basal. Esse método envolve a seleção de um ponto ou de uma árvore na qual se deseja determinar o grau de competição de árvores circunvizinhas. Para isso, todos os indivíduos próximos da árvore escolhida como central são avaliados para verificar a sua inclusão ou não. Essa verificação é feita usando-se a teoria básica de Bitterlich (amostra de contagem angular), baseada em determinado fator de área basal (FAB). Spurr (1962) ainda ressaltou que esse método requer medir, em vez de apenas contar, todas as árvores encontradas dentro desse ângulo-limite (FAB), tornando o método mais trabalhoso, mas, como as medições são mais precisas, é possível alcançar elevada precisão com reduzido número de unidades amostrais.

Independente da origem de dados, a determinação precisa da trajetória de autodesbaste para qualquer população permanece tarefa difícil. Alguns dos problemas são inerentes aos dados, especialmente aqueles obtidos usando-se parcelas temporárias. Primeiro, em determinada amostra só uma fração do povoamento está, de fato, em um verdadeiro estado de autodesbaste. O restante é menor que o otimamente estocado por várias razões. Por exemplo, é incomum achar povoamentos regenerados com densidade suficientemente alta, como aquela em que eles estão na máxima densidade relativa em idades jovens. Em povoamentos mais velhos, insetos, doença e outras perturbações podem reduzir o estoque mais rapidamente que o povoamento residual pode reocupar espaço de crescimento. Em ambos os casos é necessário checar os dados ou aplicar métodos insensíveis a observações em condições de subestocagem (SHAW, 2006).

Segundo Reineke (1933), para populações florestais que apresentam mortalidade devido à competição entre indivíduos existe relação linear em escala de duplo logaritmo, entre o número de árvores por hectare e o diâmetro médio quadrático, com valor constante do coeficiente angular de -1,605, em todas as espécies. O intercepto, por sua vez, varia entre as espécies. Essa curva é representada pela função  $\ln(N) = \beta_0 - 1,605 \ln(d_g)$ , em que  $N$  é o número de árvores por hectare, e  $d_g$  é o diâmetro médio quadrático do povoamento (cm).

Esse autor considerou que os parâmetros da equação são independentes da idade e da qualidade do sítio. Por isso, essa equação é usada para estimar a densidade populacional como função do diâmetro médio. Todavia, em estudo realizado por Del Río et

al. (2001) sobre a taxa de autodesbaste em *Pinus*, esses autores constataram que houve variação do coeficiente angular em função das espécies e, muitas vezes, com a idade, com valores variando entre -2,33 e -1,54.

Na literatura, encontram-se vários estudos nos quais o expoente da equação entre densidade e diâmetro é menor que -1. Para folhosas, Puettmann et al. (1993) definiram como coeficiente angular da linha de máxima densidade o valor de -0,52 para *Pseudotsuga menziesii* e -0,64 para *Alnus rubra*. Esses valores tão diferentes foram obtidos porque, no lugar de utilizar o diâmetro como variável independente, os autores usaram o número de árvores. Isso é feito para estimar qual diâmetro poderá ser alcançado para determinado número de árvores.

Historicamente, vários métodos de regressão foram utilizados para ajustar o modelo de máxima densidade, como o ajuste manual (REINEKE, 1933; YODA et al., 1963), a regressão dos mínimos quadrados ordinários, os mínimos quadrados ponderados e a análise de fronteira estocástica (BI et al., 2000), entre outros.

A técnica de ajuste manual consiste em traçar à mão uma linha que passe pelos pontos de máxima densidade, plotados em escala duplo logarítmica. Essa técnica foi empregada por vários autores. Para ajustar manualmente o modelo de Reineke, Zhang et al. (2005) utilizaram as coordenadas  $x$  e  $y$  das duas parcelas de maior densidade para calcular os coeficientes  $b_0$  e  $b_1$  da equação.

Como não há procedimento estatístico estabelecido para selecionar parcelas adequadas para estimar os coeficientes da máxima relação densidade-tamanho, Solomon e Zhang (2002) adotaram a densidade relativa das parcelas para fazer tal seleção. Eles assumiram que o coeficiente angular da relação  $\ln(VM)$  e  $\ln(N)$  é -1,5. Determinaram o intercepto pela equação  $b_0 = \ln(VM) + 1,5 * \ln(N)$  (em que  $VM$  é o volume da árvore média e  $N$ , o número de árvores por hectare), usando a parcela com maior combinação  $\ln(VM)$  e  $\ln(N)$ . A equação determinada foi usada para calcular a densidade máxima do povoamento ( $N_{max}$ ) para o volume da árvore média de determinada parcela. O índice de densidade relativa foi calculado por  $N_i/N_{max}$ , em que  $N_i$  é o número atual de árvores da  $i$ ésima parcela. A densidade relativa foi computada para cada parcela, sendo selecionadas parcelas cuja densidade relativa fosse maior que 0,7 para desenvolver a máxima relação entre a densidade e o tamanho.

Um dos métodos mais utilizados para estimar a fronteira de máxima densidade é o método dos mínimos quadrados ordinários corrigidos. Por meio desse método, estima-se uma curva média para a nuvem de pontos. Para garantir que a linha de máxima densidade estimada envolva todos os dados e passe pelo ponto de maior densidade, o intercepto calculado é ajustado até que todos os resíduos sejam negativos, exceto um. Mas, como apenas o intercepto é corrigido, a linha de máxima densidade será paralela à linha de tendência central estimada (ZANINI, 2004).

Alguns autores brasileiros empregaram esse método para ajustar a linha de máxima densidade, podendo-se citar, entre eles, Schneider et al. (2008), Selle (2009), Thomas (2009) e Téó et al. (2008).

Para comparar a capacidade de métodos alternativos em estimar o limite superior da linha de autodesbaste e avaliar a qualidade dos parâmetros, Zhang et al. (2005) utilizaram o ajuste manual como uma linha-guia, com a qual todas as linhas obtidas pelos demais métodos foram comparadas. Para essa comparação, os autores não utilizaram ferramentas estatísticas além da análise gráfica.

Apesar de o modelo de Reineke ser uma das principais ferramentas para estimativas de densidade máxima em populações florestais, praticamente não foram encontrados trabalhos que quantificassem a linha de máxima densidade em florestas mistas e inequiâneas. Conhecendo esse limite, é possível identificar as densidades relativas nas quais ocorrem o fechamento de copas, a diminuição do crescimento e a mortalidade para, assim, definir os momentos e a intensidade de intervenção em florestas nativas.

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento do modelo de densidade de Reineke (1933) para a relação diâmetro (dg) e número de árvores, bem como avaliar o desempenho de diferentes métodos para ajustar o modelo de Reineke.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização do local de estudo

Os dados para o estudo foram inventariados em uma área localizada no Município de Silveira Martins, região Central do Rio Grande do Sul, numa faixa transitória

entre o Planalto Médio e a Depressão Central, ainda que a maior parte da área do município situasse no Planalto Médio.

O clima mesotérmico e úmido da região, conforme a classificação de Köpen, é do tipo fundamental Cfa, caracterizado como subtropical úmido, com verões quentes, sem estação seca definida, acumulando uma precipitação média de aproximadamente 1.712 mm anuais (MORENO, 1961; HELDWEIN et al., 2008). Apesar das precipitações médias elevadas, são frequentes períodos de déficit hídrico, principalmente, nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro, quando, devido às altas temperaturas, há elevada perda de água por evapotranspiração. O solo predominante na região é o Neossolo Litólico Húmido típico, que são solos pouco profundos, bem drenados, sendo encontrados entre as superfícies onduladas do início do Planalto. O uso desses solos é dominado por pastagens, culturas anuais e áreas de vegetação secundária. São solos aptos a usos menos intensivos, principalmente para silvicultura (DALMOLIN et al., 2008).

O Município de Silveira Martins caracteriza-se por uma cobertura florestal de 37,60 km<sup>2</sup>, que corresponde a 30,7% do território. A vegetação da região pertence ao domínio da Floresta Estacional Decidual e é formada por fragmentos em diferentes estágios sucessionais (BRENA; LONGHI, 2002). A propriedade utilizada no estudo possui aproximadamente 15 ha, localiza-se nas seguintes coordenadas geográficas: latitude S 29°37'36" e longitude W 53°37'10", com altitude variando entre 320 e 390 m. A vegetação da área é uma floresta secundária, resultante do abandono de lavouras. Segundo o proprietário, essa área não era cultivada havia pelo menos 15 anos.

A atual vegetação da área estudada é formada, principalmente, por camboatá-vermelho (*Cupania vernalis* Cambess.), canela-do-brejo (*Machaerium paraguayense* Hassl.), angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan), canela-preta (*Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez), sabão-de-soldado (*Quillaja brasiliensis* (A.St.-Hil. & Tul.) Mart.), cedro (*Cedrela fissilis* Vell.), timbaúva (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong) e carvalhinho (*Casearia sylvestris* Sw.). Para facilitar as análises, foram tomadas amostras de áreas dominadas pelo camboatá-vermelho, que de acordo com Meyer (2011) apresentou 61% do VI da população.

Para realização deste trabalho, foram amostrados 198 pontos, pelo método de Densidade Pontual, proposto por Spurr (1962), utilizando um Fator de Área Basal (FAB) de modo a excluir árvores que estejam acima do limite de amostragem selecionado para a amostra. A inclusão das árvores que compõem a densidade pontual foi realizada da mesma maneira que pelo método de Bitterlich. Nas áreas onde havia árvores com diâmetro duas vezes maior que o da árvore central, utilizou-se o FAB 2, sendo nas demais adotado o FAB 1. A distância de inclusão da árvore em análise com base no seu DAP foi calculada por:

$$L = \frac{0,5 \cdot \text{DAP}}{\sqrt{\text{FAB}}}$$

em que L = distância calculada em função do DAP da árvore vizinha, para verificar a inclusão ou não na unidade amostral, em m; DAP = diâmetro à altura do peito da árvore com suspeita de ser concorrente, em cm; e FAB = fator de área basal utilizado na amostragem.

A fim de calcular a densidade pontual sobre certa árvore, mediu-se o CAP (circunferência à altura do peito), estabelecido a 1,30 m de todas as árvores da unidade amostral, com fita métrica calibrada em centímetros. Já a distância de cada árvore incluída na amostragem até a central foi realizada com o hipsômetro Vertex III.

As árvores incluídas na determinação da densidade pontual foram ranqueadas em ordem decrescente da relação entre o diâmetro da árvore em análise e a sua distância até a árvore central. Logo, quanto maior essa relação, maior o ângulo criado entre a árvore central e as tangentes da árvore em análise; conseqüentemente, maior a influência dessa árvore até a central. Para cada árvore incluída na seleção, calculou-se a área transversal, de modo que a estimativa final da densidade pontual para a parcela foi obtida pela média de todas as árvores incluídas na amostragem.

Para alcançar o objetivo de estimar a área basal máxima que pode ser acumulada para determinado diâmetro médio, amostraram-se intencionalmente sítios onde era possível identificar a ocorrência do autodesbaste. Para isso, foram inventariadas áreas onde havia árvores mortas, que não poderiam ser as maiores. Essa restrição quanto ao processo de amostragem é necessária para a aplicabilidade do método, pois o autodesbaste é a redução no número de árvores devido

à mortalidade causada pela densidade, e isso significa que o autodesbaste indica a densidade máxima que pode ocorrer para determinada dimensão média das árvores (VANDERSAHAFF, 2006). A árvore central de cada parcela foi escolhida com critérios preestabelecidos de ser um exemplar de tamanho intermediário (nem suprimido, nem dominante), haver ausência de indivíduos de diâmetro duas vezes maior que o da central a uma pequena distância da árvore. As restrições quanto à escolha da árvore central foram tomadas para evitar possíveis problemas com respeito aos cálculos da área basal pontual de Spurr observados e descritos por Pereira (2011).

Apesar da seleção intencional, que teve por objetivo medir apenas parcelas que apresentassem mortalidade decorrente da alta densidade, é possível que ocorra a inclusão de parcelas que ainda não tenham atingido o estágio de autodesbaste. A mortalidade, mesmo nos indivíduos dominados, pode ser decorrente de fatores aleatórios, como ataques de insetos, doenças, extremos climáticos etc.

O processo de cálculo para obtenção da área basal por hectare (G) seguiu o método proposto por Spurr (1962), demonstrado em continuidade.

$$G_{\text{pontual}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( i - \frac{1}{2} \right) \cdot \left( 0,25 \cdot \left( \frac{D_i}{L_i} \right)^2 \right) \right]}{n}$$

em que:

G = área basal por hectare estimada no ponto de amostragem, em m<sup>2</sup>;

i = número da árvore por ordem de classificação na unidade amostral;

Di = diâmetro da árvore competidora, em cm;

Li = distância da árvore competidora até a árvore central, em m; e

n = número de árvores contadas.

O número de árvores por hectare foi estimado com base no método de Bitterlich. O número de árvores, calculado com base nas árvores incluídas na amostragem por Bitterlich, foi obtido pelo somatório do inverso das áreas basais das árvores incluídas na unidade amostral, depois multiplicado pelo Fator de Área Basal

(FAB). O diâmetro quadrático médio foi definido dividindo a área basal de cada parcela pelo respectivo número de árvores.

$$N = FAB \times \sum \frac{1}{g_i}$$

em que N = número de árvores por hectare; e  $g_i$  = área transversal da  $i$ -ésima árvore medida na unidade amostral, em m.

A linha de máxima densidade foi obtida ajustando-se o modelo  $\ln(N_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(d_{gr}) + \varepsilon_i$  proposto por Reineke (1933) aos dados referentes ao número de árvores e ao diâmetro médio observado nas parcelas. Para isso, foram utilizados os métodos: quadrados ordinários corrigidos, para todos os dados e com DR > 60%; da densidade relativa, para análise de regressão dos dados de densidade relativa maior que 90%; e de ajuste manual.

Os parâmetros do modelo foram obtidos por meio do uso de planilhas eletrônicas e do sistema estatístico SAS (1999).

### 3. RESULTADOS

Os dados amostrados apresentaram grande variação. Verificou-se que o número de árvores apresentou a maior oscilação, variando de 5.213 a 45.175 árvores por hectare, com um desvio-padrão de 7.736, que representa um coeficiente de variação de 40,2%. Já o diâmetro médio quadrático variou entre 2,86 e 9,51 cm. A área basal foi a variável que apresentou a menor variação, com um coeficiente de variação de 20,6%.

Plotando o número de árvores por hectare pelo diâmetro quadrático médio, gerou-se uma curva em “J” invertido (Figura 1A), como observado por Reineke (1933). Nesse tipo de curva, notaram-se rápida redução do número de indivíduos para diâmetros pequenos e diminuição mais lenta nos maiores. Transformando esses dados para uma escala duplo- logarítmica, observou-se tendência linear decrescente (Figura 1B).

Apesar dos diferentes métodos utilizados, a variação do coeficiente angular foi pequena, não sendo significativa a 95% de probabilidade (Tabela 1). Em percentuais, a diferença máxima entre os coeficientes foi de apenas 2%. Todos os coeficientes encontravam-se entre os valores obtidos por Yoda et al. (1963) e Reineke (1933), respectivamente entre -1,5 e -1,605.

Na Figura 2, pode-se observar o comportamento das linhas de máxima densidade obtidas pelos diferentes métodos testados. Os métodos ajuste manual e regressão dos dados com densidade relativa maior que 60%, corrigido o intercepto, apresentam praticamente a mesma trajetória, coincidindo as linhas de número de árvores pelo diâmetro em unidade logarítmica.

### 4. DISCUSSÃO

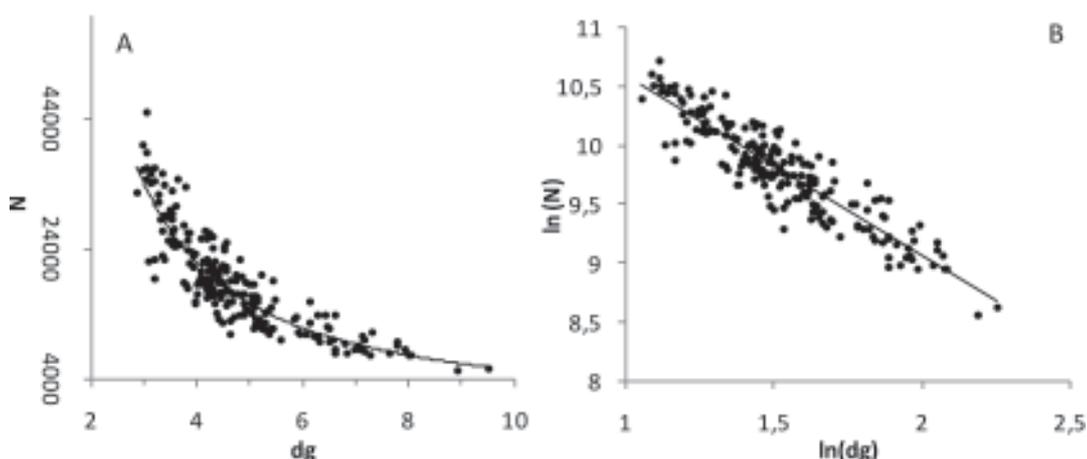
A grande variação no número de árvores ocorreu porque, à medida que as árvores crescem, elas necessitam de mais espaço, ampliando a competição que causará a morte de algumas árvores. Isso evidenciou que, mesmo para um pequeno crescimento em diâmetro, fez-se necessária uma redução considerável no número de árvores por hectare.

No caso da rápida redução no número de árvores nos menores diâmetros, o que provavelmente se deva ao pequeno espaço liberado pela morte de um desses indivíduos, em comparação com árvores grandes. Além disso, a capacidade de ocupação desse espaço pelos remanescentes também diminui com o aumento das dimensões, ou seja, a morte de uma árvore grande libera maior espaço de crescimento para indivíduos que possuem menor capacidade de ocupá-los. Dessa forma, como o espaço para crescimento permanece disponível, não é necessário que outra árvore morra.

Embora os dados apresentem certa dispersão, com parcelas de menor densidade, observa-se, na Figura 1, que há um limite máximo nitidamente definido, demonstrando que essa é a densidade-limite, ocorrendo a máxima ocupação possível do espaço físico, de modo que os povoamentos, ou as parcelas que estejam próximas desse limite, estão superestocados, necessitando, urgentemente, de cortes de liberação.

Isso mostra que em populações florestais, onde há o completo fechamento das copas, o diâmetro é a melhor variável para prever a mortalidade causada pelo autodesbaste, uma vez que possui a maior correlação com o diâmetro de copa, que é muito afetado pela densidade do povoamento (ZEIDE, 2010).

Apesar da seleção intencional amostrando apenas áreas com mortalidade, verificou-se a presença de pontos com densidade relativamente baixa. Segundo Osawa e Allen (1993), é possível que alguns pontos de menor



**Figura 1** – Tendência do número de árvores em função do diâmetro médio quadrático em escala aritmética (A) e duplo-logarítmica (B) em remanescente florestal em Silveira Martins, RS, 2010.

**Figure 1** – Trend of the number of trees by quadratic mean diameter in arithmetic scale (A) and double-log scale (B) in a remnant forest in Siveira Martins, Rio Grande do Sul State, Brazil, 2010.

**Tabela 1** – Comparação dos parâmetros do modelo de Reineke estimados por diferentes métodos para Floresta Estacional Decidua em Silveira Martins, RS.

**Table 1** – Comparison of Reineke model parameters estimated by different methods for Seasonal Deciduous Forest in Siveira Martins, Rio Grande do Sul State, Brazil.

Método de ajuste	Coeficientes				Dg					
	$\beta_0$	$\beta_1$	Limite $\beta_1$ (95%)		3,8		5,5		6,1	
			Inferior	Superior	N real	N est	N real	N est	N real	N est
Reg.C Total	260967	-1,531	-1,627	-1,434	33729	33729	19107	19445	15971	16254
Reg. 90 % DR	257008	-1,556	-1,627	-1,486		32125		18355		15298
Reg.C 60 % DR	272370	-1,563	-1,641	-1,485		33729		19223		16008
Ajuste manual	274107	-1,568	-	-		33718		19182		15964

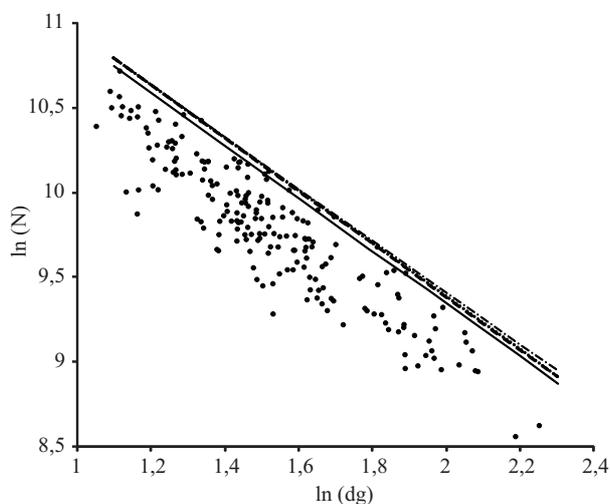
Em que Reg.C Total = regressão para todos os dados, intercepto corrigido; Reg. 90% DR = regressão dos dados com densidade relativa maior que 90%; e Reg.C 60% DR = regressão dos dados com densidade relativa maior que 60%, intercepto corrigido.

densidade ainda não tenham atingido densidade suficiente para causar a mortalidade de árvores. Essas parcelas, portanto, não poderiam ser utilizadas para estimar a linha de autodesbaste. Dependendo do método adotado para ajustar a curva de máxima densidade, o coeficiente angular do modelo será afetado por pontos de mínima, que, no caso, seriam parcelas que estão abaixo da densidade necessária para causar a mortalidade. Por isso, Solomon e Zhang (2002), preocupados com a presença de parcelas subestocadas no conjunto de dados, optaram por utilizar apenas aquelas cuja densidade fosse de no mínimo 70% da máxima. No entanto, Gezan et al. (2007) definiram que a mortalidade induzida pela competição acentua-se entre 50% e 60% da densidade

máxima, bem como consideraram a densidade relativa de 60% como a densidade mínima para que ocorra o autodesbaste.

Para evitar que parcelas em que a mortalidade não era causada pela densidade fossem utilizadas para a modelagem, selecionaram-se apenas parcelas cuja densidade relativa fosse maior que 60% da densidade máxima. Esse valor foi sugerido por Gezan et al. (2007) como a densidade relativa em que se inicia o autodesbaste.

Esse cuidado foi necessário, pois, segundo Johnson et al. (2002), a mortalidade dos indivíduos em uma população florestal pode acontecer antes de eles atingirem a



**Figura 2** – Comparação do limite superior do autodesbaste em estágio inicial de uma Floresta Estacional Decidual RS, obtido pelos diferentes métodos.

**Figure 2** – Comparison of the upper limit of self-thinning in early stages of Seasonal Deciduous Forest - RS, obtained by different methods.

densidade necessária para ocorrência do autodesbaste. Nesse caso, a morte das árvores pode ser induzida por fatores externos como variações climáticas, extremos climáticos como vendavais, granizo etc., ataques de insetos, doenças e, ou, outras variações no ambiente em que cada população florestal se desenvolve.

Com exceção da equação obtida pela análise de regressão com todos os dados, que teve o expoente com menor inclinação (-1,531), as demais ficaram dentro do intervalo obtido por Del Rio et al. (2001), os quais constataram variação por espécie e, muitas vezes, com a idade, para valores entre - 2,33 e -1,54. Para *Pinus elliottii* Engelm, Thomas (2009) encontrou um valor de -1,92 para mesmo coeficiente, já para *Hovenia dulcis* Thunberg Selle (2009) obteve coeficiente angular muito próximo do -1,5, postulado por Yoda et al. (1963).

Analisando o número de indivíduos em função do diâmetro nas três parcelas de maior densidade (Tabela 1), observou-se que o método que melhor ajustou a densidade dessas unidades foi a regressão com os dados das parcelas com densidade relativa maior que 60%. A equação estimou, com exatidão, o número de árvores para a parcela de maior densidade. Da mesma maneira, a regressão com todos os dados estimou, com

precisão, a parcela mais densa, porém superestimou, em muito, as outras parcelas.

Ajustou-se um modelo que descrevesse a média dos pontos que possuam densidade relativa maior que 60% da densidade máxima. Mas, como o objetivo era determinar uma curva que descrevesse o limite superior da nuvem de pontos, corrigiu-se o intercepto de maneira que a curva passasse exatamente sobre o ponto de maior densidade. Autores como Zhang et al. (2005) mencionaram os perigos desse método de ajustar a curva de máxima densidade. Por isso, a utilização desse método deve ser feita com muito cuidado, avaliando se a inclinação da curva média se ajusta bem ao limite superior dos dados.

Em condições não controladas, as linhas obtidas por regressão poderiam variar desordenadamente, sem que o limite superior de autodesbaste variasse, exceto quando todas as populações florestais estivessem sob destruição extraordinária (GUO; RUNDEL, 1998), indicando que o coeficiente angular da equação de Reineke é muito influenciável por parcelas que estejam com baixa densidade.

Para averiguar se a equação obtida descreve bem o limite superior do autodesbaste, ela foi comparada com a equação ajustada “manualmente”. Como a diferença no resultado do coeficiente angular foi muito pequena, não sendo significativa, pode-se afirmar que, para esses dados, o método dos mínimos quadrados ordinários corrigidos foi eficiente em estimar a curva de máxima densidade.

A equação  $\hat{N} = 272370 * d_g^{-1,563}$ , a qual foi obtida por análise de regressão de dados, cuja densidade era maior que 60%, corrigindo o intercepto, configurou-se como aquela que melhor estimou a linha de máxima densidade.

## 5. CONCLUSÕES

O modelo de densidade de Reineke descreveu satisfatoriamente a linha de máxima densidade em função do dg.

Os métodos que melhor descreveram o limite superior da linha de autodesbaste foram a análise de regressão dos dados com densidade relativa maior que 60%, corrigindo o intercepto; e o ajuste manual.

A partir do conhecimento da linha de máxima densidade, pode-se subsidiar a implementação de ferramentas para auxiliar na tomada de decisões quanto

ao manejo de florestas nativas, devendo estimular estudos semelhantes em diferentes formações florestais.

## 6. REFERÊNCIAS

- BI, H.; WAN, G.; TURVEY, N. D. Estimating the self-thinning boundary line as a density-dependent stochastic biomass frontier. **Ecology**, v.81, n.6, p.1477-1483, 2000.
- BRENA, D. A.; LONGHI, S. J. Inventário florestal In: ITAQUI, J. (Org.) **Quarta Colônia: inventários técnicos**. Santa Maria: Condesus Quarta Colônia, 2002. p.34-136.
- DALMOLIN, R. S. D. et al. **Solos do município de Silveira Martins: características, classificação, distribuição geográfica e aptidão agrícola**. Santa Maria: Orium, 2008. 73p.
- DEL RÍO, 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**, v.142, n.1, p.79-87, 2001.
- GEZAN, S. A.; ORTEGA, A.; ANDENMATTEN, E. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe em Chile. **Bosque**, v.28, n.2, p.97-105, 2007.
- GUO, Q.; RUNDEL, P. W. Self-thinning in early postfire chaparral succession: mechanisms, implications, and a combined approach. **Ecology**, v.79, n.2, p.579-586, 1998.
- HELDWEIN, A. B.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. O clima de Santa Maria. **Ciência & Ambiente**, v.38, n.1, p.43-58, 2009.
- JACK, S. B.; LONG, J. N. Linkages between silviculture and ecology: an analysis of density management diagrams. **Forest Ecology and Management**, v.86, n.1/3, p.205-220, 1996.
- JOHNSON, P. S.; SHIFLEY, S. R.; ROGERS, R. **The ecology and silviculture of oaks**. New York: CABI, 2002. p.544.
- MEYER, E. A. **Densidade de árvores por diâmetro na floresta estacional decidual no Rio Grande do Sul**. 2011. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 41p.
- OSAWA, A.; ALLEN, R. Allometric theory explains self-thinning relationships of mountain beech and red pine. **Ecology**, v.74, n.4, p.1020-1032, 1993.
- PEREIRA, L. D. **Dendrocronologia de Cedrela fissilis (Vell.) na região de Santa Maria, RS**. 2011. 63f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.
- PUETTMANN, K. J.; HANN, D. W.; HIBBS, D. E. Evaluation of the size-density relationships for pure red alder and Douglas-Fir stands. **Forest Science**, v.39, n.1, p.7-27, 1993.
- REINEKE, L. H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. **Journal of Agricultural Research**, v.46, p.627-638, 1933.
- SAS Institute Inc. **SAS/STAT user's guide**. Version 8 (computer manual). Cary: 1999.
- SCHNEIDER, P. S. P. et al. Avaliação da relação densidade e diâmetro em povoamento de Pinus taeda. **Ciência Florestal**, v.18, n.4, p.481-491, 2008.
- SELLE, G. L. **Guias de densidade e índices de sítios para *Holvenia dulcis* Thunberg na Região Central do Estado Rio Grande do Sul, Brasil**. 2009. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- SHAW, J. D. Reineke's stand density index: where are we and where do we go from here? In: SOCIETY OF AMERICAN FORESTERS NATIONAL CONVENTION, 2005, Fort Worth. **Proceedings...** Bethesda: Society of American Foresters, 2005. p.1-13. CD-ROM

- SOLOMON, D. S.; ZHANG, L. Maximum size–density relationships for mixed softwoods in the northeastern USA. **Forest Ecology and Management**, v.155, n.1, p.163-170, 2002.
- SPURR, S. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press Company, 1952. 476p.
- SPURR, S. A measure of point density. **Forest Science**, v.8, n.1, p.85-96, 1962.
- TÉO, S. J. et al. Índice de densidade do povoamento para bracatingais nativos da região Metropolitana de Curitiba, PR. **Cerne**, v.14, n.1, p.54-61, 2008.
- THOMAS, C. **Dendrograma de manejo da densidade para povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm na região central do Rio Grande do Sul**. 2009. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- VANCLAY, J.K.; SANDS, P. J. Calibrating the self-thinning frontier. **Forest Ecology and Management**, v.259, n.1, p.81-85, 2009.
- VANDERSCHAAF, C. L. **Modeling maximum size-density relationships of loblolly.pine (*Pinus taeda* L.) plantations**. 2006, 171 f. Dissertation Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- YODA, K. et al. Self-thinning in over rowed pur stands under cultivated and natural conditions. **Journal of Biology**, v.14, n.1, p.107-129, 1963.
- ZANINI, A. **Regulação econômica no setor brasileiro: uma metodologia para definição de fronteiras de eficiência e cálculo do fator X para empresas distribuidoras de energia elétrica**. 2004. 147f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- ZEIDE, B. Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. **Forest Science**, v.33, n.5, p.17-537, 1987.
- ZEIDE, B. Comparison of self-thinning models: an exercise in reasoning. **Trees**, v.24, p.1117-1126, 2010.
- ZHANG, L. et al. A comparison of alternative methods for estimating the self-thinning boundary line. **Canadian Journal of Forest Research**, v.35, p.1507-1514, 2005.