

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

LORENA DE CASTRO CAMPOS

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ÍNDICES DE COMPETIÇÃO EM  
POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO

2015

LORENA DE CASTRO CAMPOS

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ÍNDICES DE COMPETIÇÃO EM  
POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

Monografia apresentada ao  
Departamento de Ciências  
Florestais e da Madeira da  
Universidade Federal do Espírito  
Santo, como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheira  
Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2015

LORENA DE CASTRO CAMPOS

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ÍNDICES DE COMPETIÇÃO EM  
POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 03 de DEZEMBRO de 2015

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Professor Dr. Gilson Fernandes da Silva  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

Lívia Thais Moreira de Figueiredo

Dra. Lívia Thais Moreira de Figueiredo  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Professor Me. Clayton Vieira Fraga Filho  
Universidade Federal do Espírito Santo

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, pela saúde, aos meus pais por sempre estarem ao meu lado me apoiando em todas as escolhas.

Ao meu orientador professor Dr. Gilson Fernandes da Silva por acreditar em mim e por todo o conhecimento passado.

Ao Laboratório de Manejo e Mensuração Florestal por ter permitido a realização dessa pesquisa.

Ao professor Clayton por toda a paciência (muita paciência!!) e ajuda no processamento dos dados, aos amigos e colegas do Laboratório de Manejo e Mensuração Florestal, Lili, Julyana, Daniel, Giovanni, Lívia, Eth, Sandra, Catherine, Evandro e os demais.

Aos meus amigos de Alegre (Well, Aide, Aline, Rodrigo, Moara, Rodrigo, Nathan, Taís, Sabrina, Letícia, Mari e Yan), por todas as farras, sorrisos e afeto.

Aos meus amigos de Pavão, Isabela, Maiane, Fernanda, Liz, Rayete e Gabriella que sempre estiveram comigo apesar da distância. À Vivian por desde 2011 ser a minha família em Alegre.

À Universidade Federal do Espírito Santo por permitir a realização do meu sonho em me graduar em Engenharia Florestal.

## RESUMO

As técnicas de regulação e mensuração de florestas podem abordar desde o indivíduo até o povoamento. Entre essas técnicas encontra-se a modelagem de crescimento e produção em nível de árvore individual que consiste em um sistema de equações que projeta o crescimento em diâmetro e altura das árvores, além da mortalidade e ingresso. Neste contexto, a competição entre árvores é uma variável importante para melhorar o desempenho desse tipo de modelo. Tal variável pode se expressar por índices existindo diversas propostas de cálculos na literatura para esse tipo de índice. No Brasil, pesquisas envolvendo esse tipo de modelo são ainda escassas. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo analisar diversos índices de competição e demonstrar estatisticamente qual é o mais correlacionado com o crescimento em diâmetro, altura e mortalidade de um povoamento florestal com aproximadamente 14 clones de eucaliptos não desbastados. Dos 12 índices de competição analisados, o que mais se destacou foi o índice de BAL (IID5).

**Palavras-chave:** índice de competição, modelo de crescimento e produção, árvore individual, eucalipto.

## ABSTRACT

Technical regulation and measurement of forests can address from the individual to the settlement. Among these techniques is the growth modeling and production in individual tree level consisting of a system of equations which projects growth in diameter and height of trees, as well as mortality and recruitment. In this context tree competition is an important variable to improve the performance of this type of model. Such a variable can be expressed by indexes exist several proposals calculations in the literature for this kind of content. In Brazil, research involving this type of model is scarce. Thus, this study aimed to analyze various levels of competition and demonstrate statistically what is the most correlated with the growth in diameter, height and mortality of a forest stand with about 14 clones of eucalyptus not chopped. Of the 12 analyzed levels of competition, what stood out was the BAL index (IID5).

Keywords: competition index, growth and yield model, individual tree, eucalyptus.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
1.INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1 Objetivo Geral .....	4
2.2 Objetivos específicos .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1 A produção na área florestal e o manejo florestal .....	5
3.2 Modelagem do crescimento e da produção florestal .....	6
3.3 Índice de competição .....	7
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
4.1 Descrição da coleta de dados .....	11
4.2 Índices de competição .....	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
6. CONCLUSÃO.....	24
7. REFERÊNCIAS .....	25

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios das variáveis diâmetro a 1,30 (DAP) e altura total (HT).	11
Tabela 2: Tabela de correlação simples entre os índices de competição (IID1 à IID12), crescimento em diâmetro ( $\Delta$ DAP), altura ( $\Delta$ HT), probabilidade de mortalidade (P(M)) e área basal (B) para diferentes classes de produtividade.....	18
Tabela 3 –Coeficientes e parâmetros estatísticos das regressões múltiplas para estimar o crescimento em diâmetro ( $\Delta$ DAP) e altura ( $\Delta$ HT) e probabilidade de mortalidade (P(M)) nas três classes de produtividade (alta S = 33; média S = 27 e baixa S = 21). ....	21
Tabela 4 - Teste F – parcial para os índices de competição IID5, IID9 e IID11 por classe de produtividade (alta S = 33; média S = 27 e baixa S = 21). ....	23

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comportamento médio dos índices de competição por sítio (IID1, IID2, IID3, IID4, IID5, IID6, IID7, IID8, IID9, IID10, IID11 e IID12), em função da idade. .... 17

## 1. INTRODUÇÃO

O relatório anual de 2015 da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) mostra que no ano de 2014 a área ocupada por florestas plantadas correspondeu a 7,74 milhões de hectares, 0,9% do território nacional. Deste total 71,9% é representado pelos plantios de eucalipto (5,56 milhões de ha), sendo que o Espírito Santo detém 246.441 ha de florestas plantadas (IBÁ, 2015).

Do total de florestas plantadas no Brasil, as indústrias de papel e celulose detém 34% da área, seguida dos proprietários independentes e fomentados com 26,8%, 15,2% das indústrias de siderurgia, carvão vegetal e os investidores financeiros, a produção de painéis, madeira serrada, móveis e outros produtos somam 24% (IBÁ, 2015).

As árvores plantadas além de desempenharem o papel produtivo também são importantes nos serviços ambientais como: conservação do solo, redução da emissão de gases (estoque natural de carbono). Além disso, elas são fontes de energia renovável e ajudam na redução da pressão sobre as matas nativas, sendo uma matéria-prima de estoque renovável e ambientalmente correta (IBÁ, 2015).

Para a regulação e mensuração da produção das florestas, plantadas ou nativas, usam-se técnicas do manejo florestal, que podem abordar desde o indivíduo até a população. Dentre essas técnicas, tem-se a modelagem de crescimento e produção em nível de árvore individual. A escolha do modelo de crescimento e produção ideal, depende do objetivo do usuário e dos dados disponíveis (CAMPOS e LEITE, 2009). Os modelos de crescimento buscam estimar o crescimento e produção de um povoamento florestal através de variáveis dendrométricas empregando-se análise de regressão (ZEIDE, 1993). No Brasil, ainda há uma carência de desenvolvimento desses modelos em nível de árvores individuais, sendo que para o manejador os modelos de crescimento e produção são fundamentais para a tomada de decisão no planejamento e para otimizar o rendimento do projeto (SCOLFORO, 2006).

Bella (1971) afirma que os modelos em nível de árvore individual são mais complexos do que os modelos em nível de povoamento e de distribuição diamétrica, uma vez que são constituídos por vários submodelos. Todas essas dificuldades

encontradas não são justificativas para a falta de pesquisas sobre esses modelos, sendo que para se estimar o volume de madeira por hectare, em florestas plantadas de eucalipto, o modelo de árvore individual é mais preciso (CASTRO et al., 2013). Estes modelos que envolvem árvores individuais, de acordo Mendes et al. (2006) afetam diretamente os planejamentos das empresas florestais e podem produzir informações com grande precisão e exatidão, gerando uma redução de custos na cadeia produtiva das empresas florestais.

Os modelos de crescimento e produção que expressam o crescimento de árvores individuais, são constituídos por submodelos que estimam a competição, a mortalidade e o crescimento em diâmetro e altura em cada árvore (CAMPOS; LEITE, 2013).

No que se refere a competição entre plantas, esta tem início quando os recursos indispensáveis para o seu desenvolvimento diminuem, ficando abaixo do necessário, afetando o crescimento; fatores como água, luz e nutrientes são os recursos alvos da competição das plantas. (WEBER et al., 2008). Para evitar a competição entre os indivíduos faz-se o desbaste da população, para favorecer o crescimento das espécies que permanecerem no povoamento (RIBEIRO et al., 2002).

Na ecologia, a competição pode ser um indicador de um estágio de sucessão vegetal e está diretamente ligada ao declínio, estabilidade ou aumento da produção de uma espécie. Um bom competidor, seria um indivíduo capaz de absorver mais rapidamente os nutrientes, crescer com rapidez e dominar a vegetação ao redor (DIAS-FILHO, 2006).

A dinâmica de crescimento dos povoamentos comerciais deve ser estudada para que se possa aprimorar os modelos de crescimento e produção florestal, tal que o entendimento das mudanças na estrutura paramétrica da floresta auxilie os manejadores acerca do tempo da colheita ou desbaste (DEMOLINARI, 2006). Uma maneira de se estudar a dinâmica de crescimento dos povoamentos comerciais é por meio dos índices de competição.

O índice de competição é a expressão matemática que traduz a condição de competição por recursos como água, luz e nutrientes, empregando-se variáveis dendrométricas. Eles podem ser dependentes ou independentes da distância, entre a árvore objeto e as competidoras (SCOLFORO, 2006).

Uma das aplicabilidades do índice de competição é no desbaste seletivo, que tem como objetivo concentrar a produção em termos de incremento, nos indivíduos que sofrerão o corte final. O índice de competição também é uma variável importante para se calcular a probabilidade de mortalidade, principalmente nos locais, onde se tem uma maior competição por recursos (SCHNEIDER, 1993; MARTINS, 2011).

Sendo assim, há uma necessidade de estudos acerca de índices de competição para auxiliar na tomada de decisão de qual índice de competição melhor se enquadra em cada situação de povoamento.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo testar alguns índices de competição independentes da distância, para uma floresta plantada de *Eucalyptus* no Brasil.

### 2.2 Objetivos específicos

- Avaliar índices de competição independentes da distância utilizando a linguagem R;
- Avaliar estes índices relacionando-os com o crescimento em diâmetro;
- Avaliar estes índices relacionando-os com o crescimento em altura;
- Avaliar estes índices relacionando-os com a probabilidade de mortalidade.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A produção na área florestal e o manejo florestal

O meio ambiente é o fornecedor de recursos para o sustento da sociedade, a população mundial tem aumentado em proporções geométricas e os recursos estão cada vez mais escassos, logicamente com esse problema de demanda e oferta a necessidade de um planejamento do manejo florestal é essencial (SCHNEIDER, 1993). Segundo Schneider e Schneider (2008) o significante desenvolvimento do agronegócio brasileiro, representado pelo intenso reflorestamento feito nos últimos anos, é fruto da grande contribuição do setor florestal.

Os principais produtos do setor florestal são: celulose e papel, painéis de madeira, carvão e outras biomassas para fins energéticos. O setor de árvores plantadas do Brasil é o de maior potencial na economia do país, e é comprometido em utilizar as melhores técnicas socioambientais, significando a maior conservação da biodiversidade, maximização da eficiência energética, seguindo uma produção mais limpa e certificada (IBÁ, 2015).

Na maximização da produção do setor usam-se técnicas do manejo que abrangem diversas especialidades, incluindo assuntos relacionados ao crescimento, produção, densidade populacional, fatores do meio ambiente e a estruturação do crescimento e produção florestal; as técnicas usadas devem seguir uma linha de planejamento de acordo com o produto final, se diferenciando para cada espécie e em cada sítio. O principal objetivo do manejo florestal é maximizar a efetividade da produção e reduzir os custos, e para que isso funcione é importante que ocorra uma boa execução no processo biológico e econômico do projeto (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008; ACERBI Jr. et al, 2002).

O manejador enfrenta algumas decisões difíceis para definir qual caminho tomar, ele conta com o apoio de técnicas como escolha do material genético, espaçamento, desbastes e desramas, etc. Outro fator que influencia na tomada de decisão é o objetivo do manejo, uma vez que as várias possibilidades de uso da floresta são uma alternativa para o aumento da produção e consequentemente da renda do produtor (SILVA et al, 2014)

Por fim, o manejo florestal é importante para extrair da floresta todo o seu potencial econômico e biológico, maximizando a produção e minimizando os gastos e perdas.

### 3.2 Modelagem do crescimento e da produção florestal

Segundo Acerbi Jr. (2002) o setor florestal vislumbra perspectivas promissoras no mercado internacional a médio e longo prazo, e para que se concretizem é necessário um planejamento minucioso e a adoção de técnicas de manejo adequadas a cada variável (espécie, sítio) que irão espelhar-se na qualidade final do produto.

Modelagem engloba crescimento, mortalidade e outras mudanças na estrutura de uma floresta, sendo que um modelo de crescimento é um resumo da dinâmica natural de um povoamento (VANCLAY, 2006). Este autor ainda afirma que os modelos de crescimento são um importante auxílio para pesquisadores e manejadore florestais. Usados principalmente para prever os rendimentos futuros e as opções silviculturais de exploração e estes modelos são essenciais em cada tomada de decisão dos gestores florestais.

Os modelos de crescimento e produção podem ser representados por uma ou mais equações, com uma ou mais variáveis independentes. Esses modelos ainda podem ser classificados em:

- -Modelos em nível de povoamento: também denominado de modelos de povoamento total, estima o crescimento e a produção a partir de características do povoamento, como idade, área basal e índice de local;
- -Modelos de distribuição por classe de diâmetro: estimam o número de árvores por área (hectare) de acordo as classes diamétricas nas idades presentes e futuras; e
- -Modelos em nível de árvores individuais: é um conjunto de submodelos que são usados para estimar crescimento (diâmetro e altura) e mortalidade (CAMPOS; LEITE, 2009).

Mendes et al. (2006) afirmam que o crescimento de árvores individuais pode ser expresso por meio das variáveis diâmetro, área basal, altura, volume ou massa. Estes mesmos modelos podem se dividir em dependentes, semi-independentes e independentes da distância (SCOLFORO, 2006).

Segundo Castro et al. (2013) o modelo em nível de árvore individual é mais preciso para se estimar o volume de madeira por hectare do que os modelos de povoamento total.

Os modelos de árvore individuais, são mais difíceis de se ajustar, pois exigem dados muito específicos sobre cada indivíduo (CAMPOS; LEITE, 2006). No Brasil os modelos de árvores individuais são os menos utilizados, porém tem um uso mais significativo na Europa, EUA, Canadá e Finlândia (MARTINS et al. 2011; MIINA; PUKKALA, 2002; VOSPERNIK et al, 2010)

### 3.3 Índice de competição

A competição é uma das responsáveis pela mortalidade de indivíduos no povoamento, e quando não causa a morte, causa a diminuição do crescimento do indivíduo. As árvores dominantes sofrem menos com a competição do que as árvores suprimidas, elas competem por luz, umidade e nutrientes do solo. É importante se estabelecer um índice para a competição, pois a partir dele serão tomadas decisões no manejo do povoamento (SCHNEIDER, 1993). Segundo Bella (1971) a variação do crescimento está associada a competição.

Os modelos de crescimento para árvores individuais, em relação a competição, são divididos em dois grupos principais: modelos espaciais (dependentes da distância) e os não espaciais (não dependem da distância) (VANCLAY, 1994). Essa classificação foi feita por Munro (1974), os independentes utilizam variáveis do povoamento e da dimensão inicial da árvore e os dependentes abrangem o número, dimensões e distância de árvores vizinhas (TOMÉ; BURKHART, 1989).

De acordo com Tomé e Burkhart (1989) há duas diferenciações entre índices de competição de distância independente, a saber:

1.medidas da densidade do povoamento, as quais não incluem a dimensão de cada árvore individual, logo avalia-se o ambiente geral de competição existente no povoamento;

2.medidas de dominância da árvore, os quais incluem a dimensão individual da árvore central e traduzem geralmente a dominância da árvore dentro do povoamento

em estudo, dominância esta que é determinada pelas condições (ambientais e de competição).

Os modelos independentes da distância foram desenvolvidos e aplicados usando-se vários índices de competição (MARTINS, 2011). A seguir, é apresentado uma lista com alguns índices independentes (IID):

1) Usados por Glover e Hool (1979):

a) Considerando-se o diâmetro:

$$IID1 = \frac{d_i^2}{\bar{D}^2}$$

em que  $d_i$ = diâmetro (dap) da árvore-objeto (cm); e  $\bar{D}$ = média dos diâmetros (dap) das árvores da unidade amostral (cm)

b) Considerando-se a altura:

$$IID2 = \frac{h_i}{\bar{H}}$$

em que  $h_i$ = altura da árvore objeto (m);  $\bar{H}$ = altura média das árvores da unidade amostral (m).

c) Considerando-se a combinação entre diâmetro e altura:

$$IID3 = \frac{d_i^2}{\bar{D}^2} \cdot \frac{h_i}{\bar{H}}$$

2) Usado por Stage (1973):

$$IID4 = BAI = \frac{AS_i}{AS_q} = \frac{d_i^2}{q^2}$$

em que BAI= índice de área basal;  $AS_i$ = área seccional da árvore-objeto ( $m^2$ );  $AS_q$ = área seccional da árvore média (área seccional definida pelo diâmetro quadrático); e  $q$ = diâmetro quadrático (cm).

$$IID5 = BAL_i$$

em que  $BAL_i$ = área basal total das árvores maiores que a árvore-objeto.

3) Usado por Lorimer (1983):

$$IID6 = \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i}$$

em que  $d_i$ = diâmetro (dap) da árvore-objeto (cm);  $d_j$ = diâmetro (dap) da árvore-competidora (cm);  $n$ = número de árvores competidoras.

4) Usado por Daniels et al. (1986):

$$IID7 = \frac{d_i^2}{\left( \sum_{j=1}^n d_j^2 / n_j \right)}$$

em que  $d_j$ = diâmetro (dap) da árvore-competidora (cm);  $d_i$ = diâmetro (dap) da árvore-objeto (cm); e  $n_j$ = número de árvores-competidoras.

5) Usado por Tomé e Burkart (1989):

a) Considerando-se o diâmetro:

$$IID8 = \frac{d_i}{q}$$

em que  $d_i$ = diâmetro (dap) da árvore-objeto (cm);  $q$ = diâmetro quadrático (cm).

$$IID9 = \frac{d_i}{d_{max}}$$

em que  $d_i$ =diâmetro (dap) da árvore-objeto (cm); e  $d_{max}$ = diâmetro quadrático (dap) máximo das cinco árvore na unidade amostral (cm).

$$IID10 = \frac{d_i}{d_{dom}}$$

em que  $d_i$ = diâmetro (dap) da árvore-objeto (cm); e  $d_{dom}$ = diâmetro (dap) das árvores dominantes, definido como o diâmetro quadrático das árvores dominantes.

b) Considerando-se a área seccional:

$$IID11 = \frac{AS_i}{AS_{max}} = \frac{d_i^2}{d_{max}^2}$$

em que  $AS_i$ = área seccional da árvore-objeto ( $m^2$ ); e  $AS_{max}$ = área seccional da árvore de diâmetro máximo ( $m^2$ ).

$$IID12 = \frac{AS_i}{AS_{dom}} = \frac{d_i^2}{d_{dom}^2}$$

em que  $AS_i$ = área seccional da árvore-objeto ( $m^2$ ); e  $AS_{dom}$ = área seccional da árvore dominante ( $m^2$ ).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Descrição da coleta de dados

Os dados deste trabalho são provenientes de inventários florestais contínuos, realizados entre 2006 e 2012, em povoamentos clonais de Eucalipto. Foram analisados dados de 20 parcelas permanentes para cada idade (24 a 72 meses), compostas por 14 clones, com áreas das parcelas variando de 204,85 a 339,10 m<sup>2</sup>. Mensurou-se os diâmetros (DAP) a 1,30 m do solo de todos os indivíduos com diâmetro maior que 4,0 cm, e altura total dos mesmos (Ht). As variáveis médias nas três classes de produtividade do povoamento por idade estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios das variáveis diâmetro a 1,30 (DAP) e altura total (HT).

<b>Idade (meses)</b>	<b>DAP (cm)</b>			<b>HT (m)</b>		
	<b>Min.</b>	<b>Média</b>	<b>Max.</b>	<b>Min.</b>	<b>Média</b>	<b>Max.</b>
<b>24</b>	5,20	9,86	13,60	7,09	11,81	17,80
<b>36</b>	6,20	13,49	17,80	11,80	18,05	25,90
<b>48</b>	6,20	15,42	20,90	12,74	21,46	30,70
<b>60</b>	6,30	16,84	22,80	14,48	24,57	34,30
<b>72</b>	6,30	17,81	24,90	14,17	26,41	34,90

Com relação as alturas, estas já se encontravam estimadas.

### 4.2 Índices de competição

No programa R Studio Versão 0.98.501 foram analisados e comparados todos os seguintes índices de competição (IID1 a IID12):

$$\begin{aligned}
 IID1 &= \frac{d_i^2}{\bar{D}^2}; & IID2 &= \frac{h_i}{\bar{H}}; & IID3 &= \frac{d_i^2 \cdot h_i}{\bar{D}^2 \cdot \bar{H}}; & IID4 &= BAI = \frac{AS_i}{AS_q} = \frac{d_i^2}{q^2}; & IID5 &= BAL_i; \\
 IID6 &= \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{d_i}; & IID7 &= \frac{d_i^2}{\left( \sum_{j=1}^n d_j^2 / n_j \right)}; & IID8 &= \frac{d_i}{q}; & IID9 &= \frac{d_i}{d_{max}}; & IID10 &= \frac{d_i}{d_{dom}}; \\
 IID11 &= \frac{AS_i}{AS_{max}} = \frac{d_i^2}{d_{max}^2}; & IID12 &= \frac{AS_i}{AS_{dom}} = \frac{d_i^2}{d_{dom}^2}.
 \end{aligned}$$

Para avaliação dos índices de competição, foram analisados o comportamento dos índices em função da idade em cada classe de produtividade.

Além disso, também foi avaliada a correlação simples entre os índices de competição, crescimento em diâmetro e altura, mortalidade, idade, área basal e número de árvores por hectare, segundo Daniels (1976).

Foi avaliada também, a significância estatística dos índices com maior correlação simples em relação a outras variáveis explicativas, em modelos de regressão. Para tal, foi utilizado o teste F-parcial, dado pela seguinte expressão (NETER et al. 1990):

$$F(x_1|x_2, x_3, \dots, x_n) = \frac{SQ_{reg}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) - SQ_{reg'}(x_2, x_3, \dots, x_n)}{QM_{res}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)}$$

em que  $F(x_1|x_2, x_3, \dots, x_n)$  = valor do teste F-parcial para a variável  $x_1$ , na presença das demais variáveis;  $SQ_{reg}$  = soma de quadrados da regressão do modelo completo;  $SQ_{reg'}$  = soma de quadrados da regressão do modelo reduzido; e  $QM_{res}$  = quadrado médio do resíduo do modelo completo.

O valor de F calculado ( $F_{cal}$ ) foi comparado ao valor de F tabelado ( $F_{tab}$ ), considerando uma probabilidade de 95%.

Para a aplicação do teste F-parcial, considerando as classes produtivas, foram ajustadas equações referentes aos seguintes modelos:

$$\Delta h = f(IC, dap, B, I)$$

$$\Delta d = f(IC, B, I)$$

$$P(M) = f(IC, dap, I)$$

em que  $\Delta h$  = crescimento em altura, em metros;  $\Delta d$  = crescimento em diâmetro, em cm; IC = índice de competição, dap = diâmetro à altura do peito (1,30 metros), em cm; B = área basal do povoamento, em  $m^2/ha$ , I = idade em meses, e  $P(M)$  = probabilidade de mortalidade ou percentual de árvores mortas em cada classe de dap.

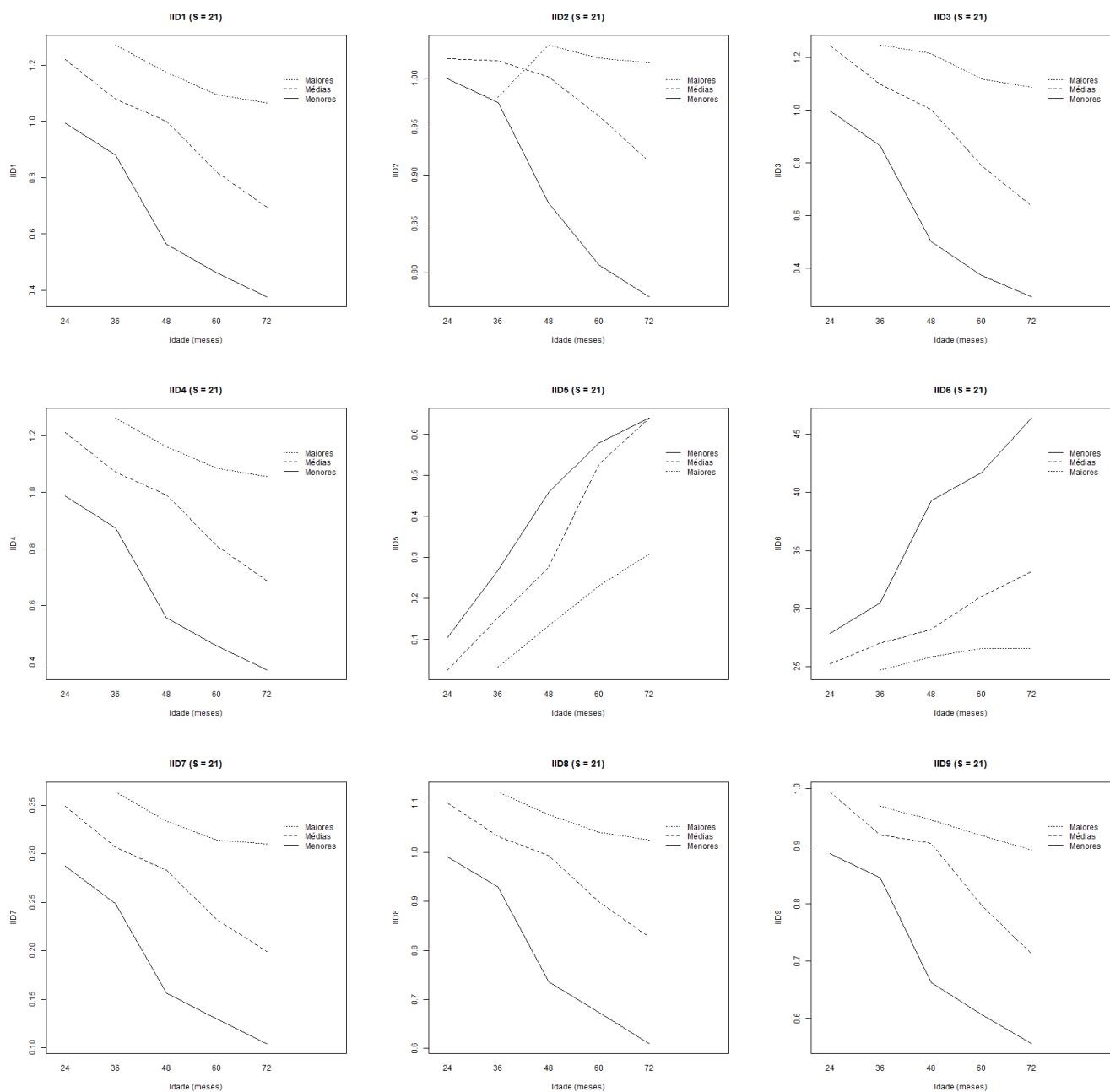
A probabilidade de mortalidade é dada por (adaptada por KEISTER; TIDWELL, 1975; GLOVER; HOOL, 1979):

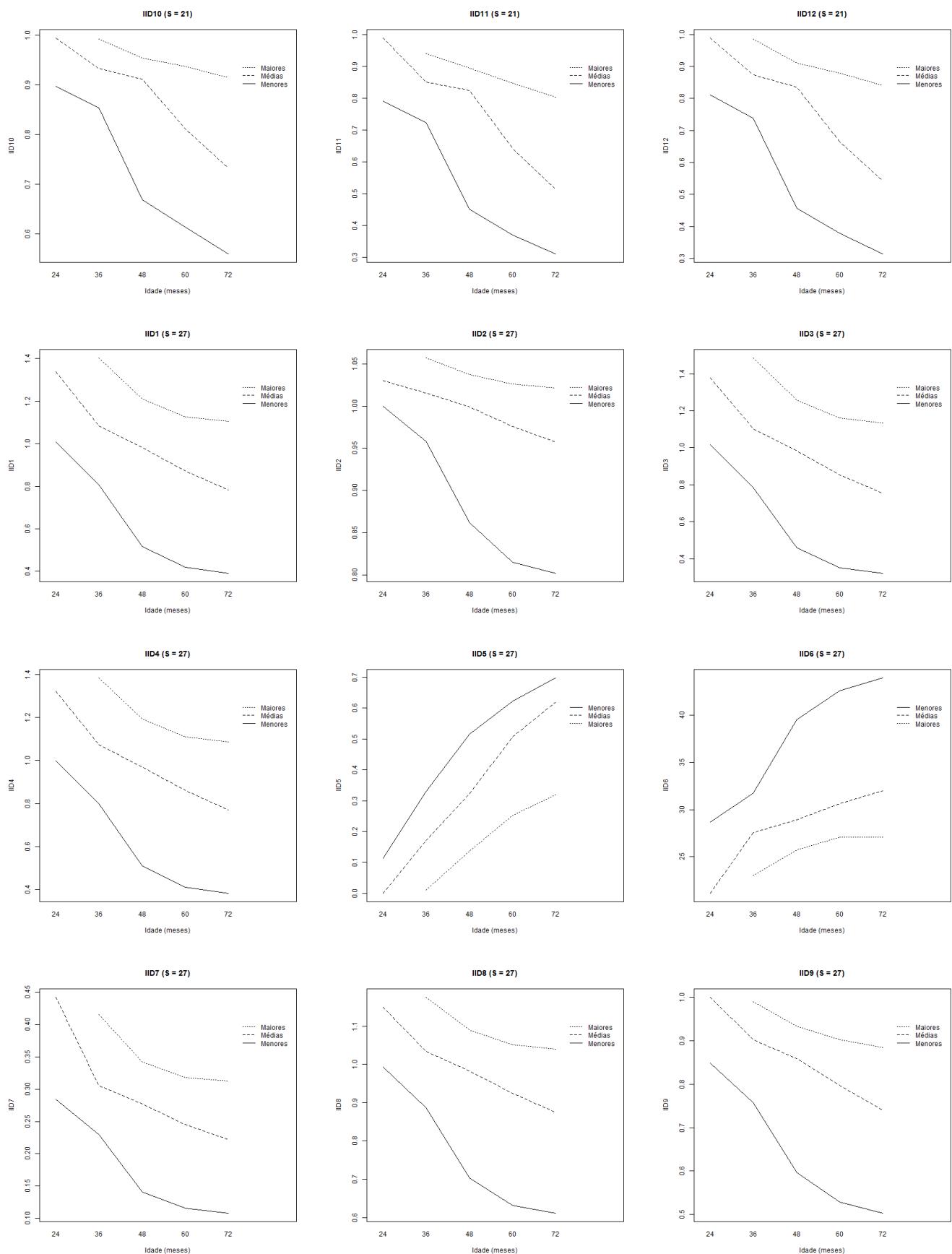
$$P(M) = \frac{N_{j(t-1)} - N_{j(t)}}{\sum_{i=1}^j N_{j(t-1)}}$$

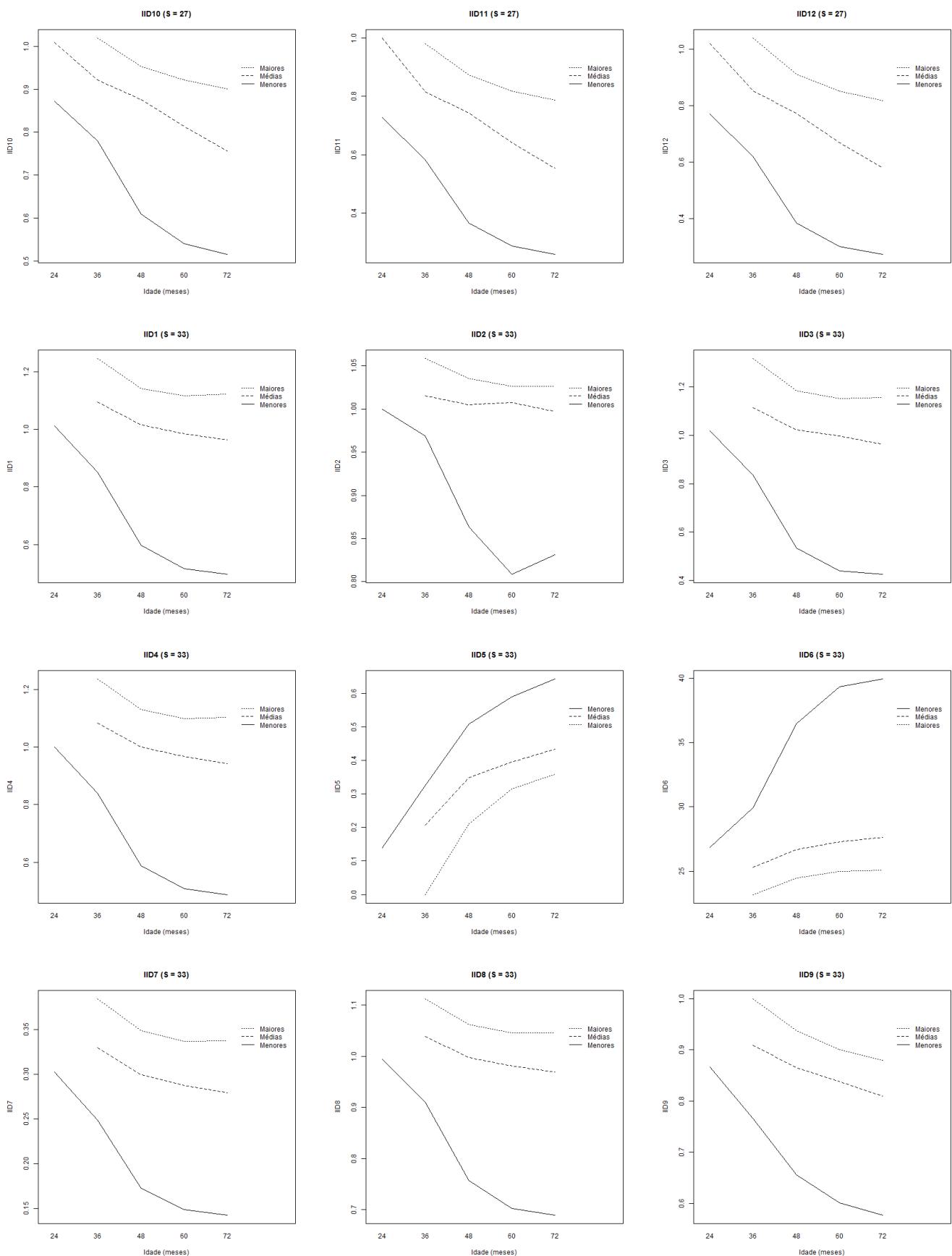
em que  $N_{j(t-1)}$  = número de árvores vivas na j-ésima classe de diâmetro, no início do período; e  $N_{j(t)}$  = número de árvores vivas na j-ésima classe de diâmetro no fim do período.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 os gráficos mostram o comportamento médio dos índices de competição por sítio de produtividade. Agrupou-se os dados das árvores em três classes de tamanhos: árvores menores ( $dap < \bar{X} - 0,5.s$ ), médias ( $\bar{X} - 0,5.s \leq dap \leq \bar{X} + 0,5.s$ ) e maiores ( $dap > \bar{X} + 0,5.s$ ) para as 3 classes de produtividade ( $S=21$ :  $\bar{X} = 14,22962$  e  $s=|3,308052|$ ) ; ( $S=27$ :  $\bar{X} = 14,65212$  e  $s=|3,422806|$ ) e ( $S=33$  :  $\bar{X} = 15,81236$  e  $s=|3,602826|$ ), veja os gráficos:







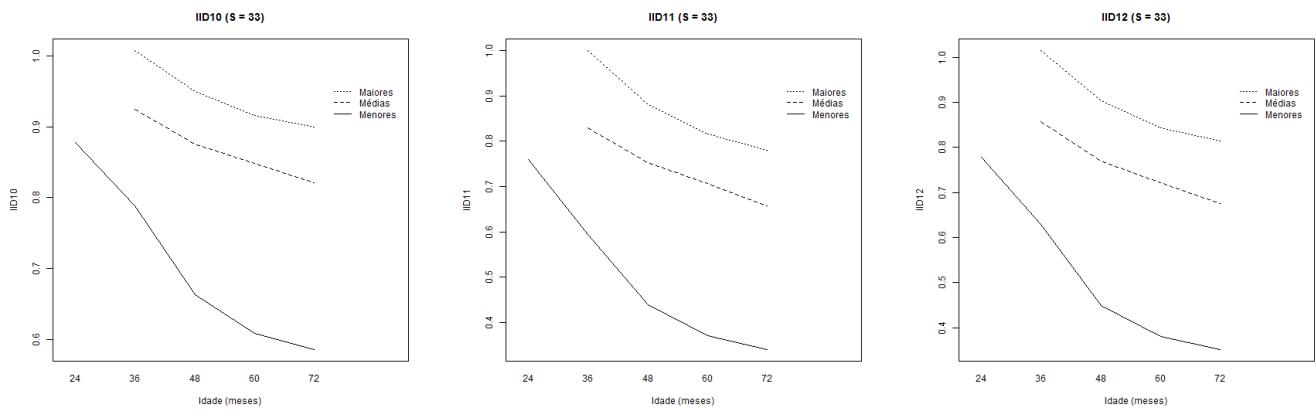


Figura 1 - Comportamento médio dos índices de competição por sítio (IID1, IID2, IID3, IID4, IID5, IID6, IID7, IID8, IID9, IID10, IID11 e IID12), em função da idade.

Notou-se que para os IID1, IID2, IID3 e IID4 as árvores de maiores DAP, apresentam índices maiores e em todas as classes de tamanho dos sítios 21 e 27, tiveram uma tendência decrescente e com variação próxima de 1 corroborando com o trabalho de Martins (2011) e Castro (2012). No gráfico do IID2 no sítio 21 na classe das árvores de tamanho grande na idade entra 36 e 48 meses o gráfico apresenta uma tendência crescente pois, só existem 4 árvores nessa classe de tamanho. Podendo-se concluir que o crescimento da árvore leva a uma maior competição.

Para o IID5, os resultados apresentam mesma tendência quanto aos descritos por Martins (2011) e Castro (2012). O resultado apresentado mostra que o crescimento das árvores-competidoras leva a um maior índice de competição, já que esse índice leva em consideração a área basal das árvores maiores do que a árvore-objeto. Além disso, as árvores de maior diâmetro apresentaram valores menores para o IID5, contrário ao que acontece nos índices anteriores. Neste índice leva-se em consideração que, quanto maior o IID5, maior a competição.

Já no IID6 nota-se a tendência crescente, uma vez que a medida que a árvore-objeto cresce, as árvores competidoras também irão crescer, porém nas árvores de menor diâmetro ficou evidente que há maior competição, uma vez que quanto maior o índice, maior será a competição. Lorimer (1983) diz também que aumentando o raio de árvores competidoras em relação a árvore-objeto, acarretará no aumento do índice.

O IID7 mostra que as árvores de maior diâmetro têm maior índice, indicando que a medida que foram crescendo, a relação diâmetro médio das competidoras foi diminuindo, haja vista a forma como o índice é calculado.

Os IID8, IID9, IID10, IID11 e IID12 apresentam uma tendência constante, decrescendo em aproximadamente 0,1 para as árvores de maior diâmetro, demonstrando que o diâmetro quadrático, diâmetro máximo e o diâmetro dominante cresce praticamente na mesma proporção que o da árvore-objeto. A maior variação ocorre nas árvores de menor diâmetro, decrescendo, o que indica que há uma competição maior.

As correlações entre os índices de competição, crescimento em diâmetro ( $\Delta DAP$ ), crescimento em altura ( $\Delta HT$ ), probabilidade de mortalidade [P(M)] e área basal (B), estão apresentados abaixo na Tabela 2.

Tabela 2: Tabela de correlação simples entre os índices de competição (IID1 à IID12), crescimento em diâmetro ( $\Delta DAP$ ), altura ( $\Delta HT$ ), probabilidade de mortalidade (P(M)) e área basal (B) para diferentes classes de produtividade.

Variáveis	IID1	IID2	IID3	IID4	IID5	IID6	IID7	IID8	IID9	IID10	IID11	IID12
<b>Baixo (S=21)</b>												
$\Delta DAP$	0,16	0,12	0,16	0,17	-0,58	-0,24	0,20	0,18	0,21	0,20	0,20	0,19
$\Delta HT$	0,09	-0,01	0,06	0,10	-0,52	-0,17	0,13	0,10	0,14	0,13	0,13	0,12
P(M)	-0,15	-0,18	-0,15	-0,15	0,10	0,20	-0,15	-0,17	-0,15	-0,15	-0,14	-0,14
B	0,02	0,01	0,02	0,01	0,52	0,04	-0,01	0,00	-0,12	-0,09	-0,12	-0,09
<b>Médio (S=27)</b>												
$\Delta DAP$	0,24	0,23	0,23	0,24	-0,57	-0,19	0,20	0,25	0,19	0,22	0,18	0,20
$\Delta HT$	0,11	0,07	0,09	0,12	-0,51	-0,15	0,12	0,13	0,12	0,14	0,10	0,13
P(M)	-0,21	-0,23	-0,21	-0,22	0,18	0,24	-0,20	-0,24	-0,23	-0,24	-0,21	-0,22
B	0,01	0,01	0,02	0,01	0,53	0,08	-0,04	0,00	0,02	-0,02	0,03	-0,01
<b>Alto (S=33)</b>												
$\Delta DAP$	0,23	0,23	0,22	0,24	-0,53	-0,28	0,26	0,25	0,31	0,30	0,31	0,29
$\Delta HT$	0,11	0,03	0,08	0,12	-0,43	-0,13	0,12	0,12	0,16	0,15	0,16	0,15
P(M)	-0,17	-0,16	-0,16	-0,17	0,10	0,20	-0,17	-0,18	-0,19	-0,19	-0,17	-0,18
B	0,00	0,00	0,01	0,00	0,50	-0,01	0,02	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00

Observou-se que as correlações entre os índices de competição e o crescimento em diâmetro variam, em relação à os sítios, de |0,58| a |0,12|, o maior valor foi encontrado no IID5 e o menor no IID2. Esses valores são inferiores se comparados aos resultados de Martins (2011) em híbridos de *Eucalyptus* que

variaram de |0,72| a |0,52| nos índices de IID1 e IID5, nesta ordem; porém são próximos aos valores encontrados por Vieira (2015) em clones de *Eucalyptus* sp. onde obteve valores entre |0,67| a |0,08| nos índices IID1 e IID4, respectivamente.

Os índices IID5 e IID6 são os únicos que possuem correlação negativa com o crescimento em DAP e altura, indicando que quanto menor o índice de competição maior o crescimento em diâmetro e altura.

Verificando-se a correlação dos índices com o crescimento em altura ( $\Delta HT$ ), analisou-se que o índice IID5, IID9 e o IID11 apresentaram superioridade nos valores da correlação. A variação dessa correlação ficou entre |0,52| e |0,01|, no IID5 e IID2 respectivamente. Os valores da correlação com o crescimento em altura encontrados são inferiores aos encontrados por Martins (2011), porém são maiores que os valores apresentados por Vieira (2015). Contudo, o índice que se destacou para crescimento em altura, nos trabalhos de Martins (2011) e Vieira (2015), é o mesmo índice deste trabalho o IID5.

Para a probabilidade de mortalidade ( $P(M)$ ), as correlações são positivas somente para os índices IID5 e IID6, isso se dá pois assim como a árvore objeto cresceu em área basal e diâmetro (variáveis usadas para calcular os dois índices), as árvores competidoras também cresceram, levando a condição de que quanto maior índice, menor a capacidade competitiva da árvore e maior probabilidade de morrer da mesma.

A correlação com a probabilidade de mortalidade demonstrou que o IID6, IID8 e IID10. Notou-se que as correlações apresentaram valores maiores para os sítios de média e alta produtividade. Essa análise demonstra que o índice de competição é importante quando se trata da probabilidade de mortalidade, principalmente quando o povoamento se encontra em sítios onde há uma maior competição por recursos (MARTINS, 2011).

Notou-se na Tabela 2 que as correlações foram maiores nos sítios de capacidade produtiva média e alta corroborando com a relação concluída por Weiner e Thomas (1986), em que a competição é diretamente proporcional ao índice de local, sendo que as plantas que se encontram no sítio de maior capacidade produtiva, são mais capazes de competir pelos mesmos recursos, do que as plantas localizadas em sítio de menor produção.

A seleção de índices de competição tem como critério mais usual, a correlação simples com o crescimento em diâmetro e altura (DANIELS, 1976). Como foi visto neste estudo, os índices que melhor se correlacionaram com o crescimento em altura e diâmetro foram IID5, IID9 e IID11. Porém não se tem muito conhecimento acerca do comportamento dos índices de competição, em modelos de regressão usados para estimar o crescimento e a produção de povoamentos florestais (DANIELS et al., 1986; TOMÉ; BURKHART, 1989; BINGING; DOBBERTIN, 1992; FILIPESCU; COMEAU, 2007). Para isso, ajustou-se equações lineares, considerando como variáveis dependentes o crescimento em diâmetro ( $\Delta DAP$ ) e altura ( $\Delta HT$ ) e a probabilidade de mortalidade ( $P(M)$ ), em função da idade, área basal, DAP e índice de competição das árvores (Tabela 3).

Tabela 3 –Coeficientes e parâmetros estatísticos das regressões múltiplas para estimar o crescimento em diâmetro ( $\Delta DAP$ ) e altura ( $\Delta HT$ ) e probabilidade de mortalidade ( $P(M)$ ) nas três classes de produtividade (alta S = 33; média S = 27 e baixa S = 21).

Índice de Local	Índice de Competição	Coeficientes				Parâmetro Estatístico	
Crescimento em diâmetro ( $\Delta DAP$ )							
		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$	$\bar{R}^2$
<b>S=21</b>	IID5	1,774905	-1,387278	0,295193	-0,100285		0,1864
	IID9	-2,84200	5,00087	0,31555	-0,11088		0,2737
	IID11	-0,823094	3,039901	0,317023	-0,111376		0,2751
<b>S=27</b>	IID5	1,455368	-1,712258	0,243040	-0,076158		0,2021
	IID9	-1,027608	2,899347	0,208552	-0,073266		0,2124
	IID11	0,103892*	1,825404	0,208194	-0,073306		0,2109
<b>S=33</b>	IID5	-0,50503	-1,51469	0,64574	-0,20719		0,5095
	IID9	-3,04013	2,97527	0,61155	-0,20324		0,5226
	IID11	-1,89224	1,88069	0,61194	-0,20338		0,5229
Crescimento em altura ( $\Delta HT$ )							
<b>S=21</b>	IID5	-3,70687	6,64448	0,96645	-0,06150*	-0,17467	0,3095
	IID9	5,62546	-10,53876	1,02704	-0,08696*	-0,14877	0,2402
	IID11	1,07662	-5,33656	0,93266	-0,04184*	-0,14737	0,2352
<b>S=27</b>	IID5	-1,901340	4,632047	0,645258	0,016090*	-0,132117	0,2514
	IID9	5,508069	-10,196574	0,841716	0,035827*	-0,146777	0,2588
	IID11	1,441593	-5,423484	0,744543	0,072166	-0,142761	0,2503
<b>S=33</b>	IID5	-1,14903	-1,00010*	0,03363*	1,16798	-0,38532	0,4858
	IID9	-5,71904	7,32768	-0,24771*	1,31614	-0,39231	0,4925
	IID11	-2,74949	4,11414	-0,20732*	1,29257	-0,39128	0,4919
Probabilidade de mortalidade ( $P(M)$ )							
<b>S=21</b>	IID5	0,0311682	-0,0048395	-0,0001985	0,0008973		0,009203
	IID9	0,0673046	-0,0561728*	-0,0025188*	0,0004687*		0,01117
	IID11	0,0405875	-0,0238373*	-0,0032236*	0,0005984*		0,01021
<b>S=27</b>	IID5	0,0603494	0,0178681*	-0,0091500	0,0016644		0,03456
	IID9	0,141769	-0,134094	-0,004405	0,000980		0,03919
	IID11	0,0825805	-0,0555291	-0,0064373	0,0013169		0,03643
<b>S=33</b>	IID5	0,0657260	-0,0213726*	-0,0078432	0,0015141		0,02576
	IID9	0,1017685*	-0,0837627*	-0,0035040*	0,0006725*		0,01577
	IID11	0,0630679	-0,0266367*	-0,0051636*	0,0009522*		0,01453

\* valor não significativo a 95% de significância;

Segundo a Tabela 3, as equações lineares não se ajustaram bem aos dados observados de crescimento em diâmetro, altura e probabilidade de mortalidade, com o  $\bar{R}^2$  menor que 55%, tanto para o índice 5 quanto para o índice 9 e 11. Os valores

encontrados são inferiores, aos encontrados por Martins (2011) em eucalipto, Daniels (1986) em *Pinus* e Filipescu e Comeau (2007) *Populos* e Pinheiro-do-canadá.

Os coeficientes associados com as variáveis explicativas das equações de crescimento em diâmetro e altura ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  e  $\beta_4$ ) não foram todos significativos a 95% de probabilidade, no sítio 27 o  $\beta_1$  do índice 11 não foi significativo. No crescimento em altura nem todos os  $\beta_x$  foram significativos.

Na Tabela 3 mostra que as equações se ajustaram melhor nos sítios de alta produtividade, no crescimento em altura e diâmetro.

A contribuição do índice de competição (IID5, IID9 e IID11) foram avaliadas através do teste F-parcial (Tabela 4).

Tabela 4 - Teste F – parcial para os índices de competição IID5, IID9 e IID11 por classe de produtividade (alta S = 33; média S = 27 e baixa S = 21).

<b>Índice de Local</b>	<b>Índice de competição</b>	<b>F-parcial**</b>
<b>Crescimento em diâmetro (<math>\Delta DAP</math>)</b>		
<b>S=21</b>	IID5	11,882*
	IID9	62,1308*
	IID11	62,0698*
<b>S=27</b>	IID5	43,255*
	IID9	173,83*
	IID11	170,579*
<b>S=33</b>	IID5	5,870*
	IID9	37.014*
	IID11	36.845*
<b>Crescimento em altura (<math>\Delta HT</math>)</b>		
<b>S=21</b>	IID5	0,5079 <sup>n</sup>
	IID9	35,068*
	IID11	34,652*
<b>S=27</b>	IID5	0,2311 <sup>n</sup>
	IID9	73,169*
	IID11	70,365*
<b>S=33</b>	IID5	0,0604 <sup>n</sup>
	IID9	8,5728*
	IID11	8,4486*
<b>Probabilidade de mortalidade (P(M))</b>		
<b>S=21</b>	IID5	3.3940*
	IID9	8.6215*
	IID11	7.4699*
<b>S=27</b>	IID5	37.160*
	IID9	78.0101*
	IID11	65.7801*
<b>S=33</b>	IID5	1.5856 <sup>n</sup>
	IID9	6.9158*
	IID11	6.0264*

\*\*Valor de  $F_{tab}$  (1,  $\infty$ ) = 3.84, <sup>n</sup> não significativo a 5% de significância; \* significativo a 5% de significância.

Segundo a Tabela 4, notou-se que o IID5 foi significativo ( $P<0,05$ ) para o crescimento em diâmetro e probabilidade de mortalidade, na probabilidade de mortalidade teve apenas um não significativo no sítio 33. O IID9 e IID11 foram significativos para todas as variáveis, sem distinção por sítio de produtividade.

## 6. CONCLUSÃO

Após as análises, pode-se concluir que entre os índices avaliados, o que mais se destacou foi o índice de BAL (IID5). Porém, de acordo com as análises realizadas, esse índice não se aplica para os modelos de crescimento linear testados nesse trabalho.

Notou-se também que a estratificação dos dados é de suma importância para se obter análises consistentes. Ao se estratificar os sítios em classe de produtividade, os dados apresentaram grande diferença quanto a correlação simples, onde mais uma vez se destacou o IID5.

No geral, este trabalho colabora com os estudos na área de mensuração florestal, já que a modelagem de crescimento a nível de árvore individual é um assunto complexo e pouco explorado.

## 7. REFERÊNCIAS

- ACERBI JR., F. W.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D.; MAESTRI, R.. Modelo para prognose do crescimento e da produção e análise econômica de regimes de manejo para *Pinus taeda* L.. Sociedade de Investigações Florestais, Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 26, n.6, p. 699-713, 2002.
- BELLA, I. E.. A new competition model for individual trees. Forest Science, United States of America. V. 17, n. 3, setember, 1971
- BINGING, G. S.; DOBBERTIN, M.. A comparasion of distance-dependent competition measures for height and basal área growth of individual conifer trees. Forest Science, v. 38, n. 3, p. 695-720, 1992.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H.G.. Mensuração florestal: perguntas e respostas. 3<sup>a</sup> ed. Viçosa, MG. Editora UFV, 2009.
- CASTRO, R. V.O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G.. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-295, março, 2013.
- DANIELS, R. F.. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. Forest Science, v. 22, n. 4, p. 454-457, 1976.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R.. A comparison of competition measures for predcting growth of loblolly pine trees. Can. J. for Res., v. 16, p. 1230-1237, 1986.
- DEMOLINARI, R.A.. Crescimento de povoamento de eucalipto não-desbastado. Viçosa-MG: UFV, 2006.
- DIAS-FILHO, M. B.. Competição e sucessão vegetal em pastagens. Embrapa, Belém-PA. Nov., 2006.
- FILIPESCU, C. N.; COMEAU, P. G.. Competitive interactions between aspen and white spruce vary with stand age in boreal mixedwoods. Holanda: Forest ecology and management, p. 175-184, 2007.
- GLOVER, G. R.; HOOL, J. N.. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. Forest Science, Society of American Foresters, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1979.
- IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. São Paulo, Relatório Anual Ibá, 2015.
- KEISTER, T. D.; TIDWELL, G. R.. Competition ratio dynamics for improved mortality estimates in simulated growth os forests stands. Forest Science, v. 21, n. 1, p. 46-51, 1975.

- LEONARDECZ-NETO, E.; VENCOVSKY, R.; SEBBENN, A. M.. Ajuste para competição entre plantas em teste progêneres e procedências de essências florestais. *Scientia Florestalis*, n. 63, p. 136-149, junho, 2003.
- LORIMER, C. G.. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. Holanda: Forest ecology and management, p. 343-360, 1983.
- MARTINS, F. B.. Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos. Viçosa-MG: UFV, 2011.
- MENDES, B. R., CALEGARIO, N.; VOLPATO, C. E. S.; MELLO, A. A.. Desenvolvimento de modelos de crescimento de árvores individuais fundamentado em equações diferenciais. CERNE, Lavras, v. 12, n. 3, p. 254-263, jun./set., 2006.
- MIINA, J.; PUKKALA, T.. Application of ecological field theory in distance-dependent growth modelling. Holanda: Forest Ecology and Management, p. 101-107, 2002.
- NETER, J.; WASSERMAN, W.; KUTNER, M. H.. Applied linear statistical models: regression, analyses of variance, and experimental designs. Massachutts: IRWIN, 1990.
- RIBEIRO, N.; SITOE, A. A.; GUEDES, B. S.; STAIISS, C.. Manual de Silvicultura Tropical. Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, 2002.
- SCHNEIDER, P. R.. Introdução ao manejo florestal. Santa Maria: UFSM/CEFET-FATEC. 1993.
- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.. Introdução ao manejo florestal. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2, ed., 2008.
- SCOLFORO, J. R. S. Biometria florestal: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras, MG, UFLA/FAEPE, 2006.
- SILVA, E. N. da; FIEDLER, N. C.; PEREIRA, D. P.; PAULA, M. O. de. Florestas de produção. Viçosa-MG: Suprema, 2014.
- STAGE, A. R.. Prognosis model for stand development. USDA Forest service, jun., 1973.
- TOMÉ, M.; BURKHART, H. E.. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *Forest Science, United States of America Foresters*, v. 35, n. 3, p. 816-831, 1989.
- VANCLAY, J. K.. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. School of environment, science and engineering papers. CAB International, Wallinford, UK, 1994.
- VIEIRA, G. C.. Prognose do diâmetro e da altura de árvores individuais utilizando inteligência artificial. Jerônimo Monteiro – ES: UFES, 2015.

VOSPERNIK, S.; MONSERUD, R. A.; STERBA, H.. Do individual-tree growth models correctly represent height: diameter ratios os Normay spruce and Scots pine?. Holanda: Forest ecology and management, p. 1735-1753, 2010.

WEBER, P.; BUGMANN, H.; FONTI, P.; RIGLING, A.. Using a retrospective dynamic competition index to reconstruct forest secessions. Forest Ecology and Management, Holanda, 2008.

WEINER, J. THOMAS, S. C. Size variability and competition in plant monocultures. Olkos, Copenhagen, v. 47, n. 2, p. 211-222, 1986.

ZEIDE, B.. Analysis of growth equations. Forest Science, v.39, n. 3, p. 594-616, august, 1993.