

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Milene Alves dos Santos

**ÍNDICES DE COMPETIÇÃO INDEPENDENTES DA DISTÂNCIA PARA UM
FRAGMENTO DE MATA ATLÂNTICA**

São João Evangelista
2021

MILENE ALVES DOS SANTOS

**ÍNDICES DE COMPETIÇÃO INDEPENDENTES DA DISTÂNCIA PARA UM
FRAGMENTO DE MATA ATLÂNTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Engenharia Florestal do
Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* São
João Evangelista para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr Bruno Oliveira Lafetá

São João Evangelista
2021

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FICHA CATALOGRÁFICA

S237i Santos, Milene Alves dos.
Índices de competição independentes da distância para um
fragmento de Mata Atlântica. / Milene Alves dos Santos.- 2021.
24 p.:il.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Florestal) - Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2021.

1. Altura de árvores. 2. Competitividade. 3. Comportamento
sigmoidal. Relação funcional. I. Instituto Federal de Minas Gerais.
II. Título.

CDD 634.95

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

Milene Alves dos Santos

**ÍNDICES DE COMPETIÇÃO INDEPENDENTES DA DISTÂNCIA PARA UM
FRAGMENTO DE MATA ATLÂNTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Florestal do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 15/12/2021 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Bruno de Oliveira Lafetá (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *campus* São João Evangelista



Prof. Dr^a. Grazielle Wolff de Almeida Carvalho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *campus* São João Evangelista



Dr. Diego dos Santos Vieira
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – *campus* Diamantina

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e Nossa Senhora, pela presença constante em minha vida, força, sabedoria e proteção em todos os momentos.

A minha mãe Dete e meus irmãos, pelo amor, apoio e incentivo ao longo dos anos.

Ao meu namorado Bruno, pelo amor e companheirismo de sempre.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá, pelo voto de confiança, paciência, incentivo e orientações ao longo de minha formação acadêmica.

Aos meus professores, por me proporcionar o conhecimento no longo caminho percorrido nesses 5 anos.

Por fim, agradeço ao Instituto Federal de Minas Gerais pela oportunidade e pelos conhecimentos adquiridos ao longo de todos esses anos e a todos que de alguma maneira, direta ou indiretamente, contribuíram para essa conquista.

Muito obrigada!

RESUMO

Investigações científicas sobre o comportamento de índices de competição em diferentes estratos de altura são escassas e auxiliam futuras pesquisas sobre o monitoramento da dinâmica de crescimento e manejo florestal sustentável. O objetivo foi avaliar índices de competição independentes da distância e apresentar o mais indicado para representar a competitividade em diferentes estratos de altura em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal. O estudo foi conduzido em uma área de 2,53ha, onde se realizou o inventário com intensidade amostral de 15,81%. Calcularam-se 6 índices de competição para árvores contidas nos estratos inferior, médio e superior do fragmento florestal. O índice de competição IC2, que relaciona o DAP da árvore objetivo com a aquele proveniente da média das árvores competidoras, foi o preditor que resultou em equações mais precisas para a estimativa biométrica. O modelo logístico se adequou satisfatoriamente ao problema, mais especificamente na predição biométrica utilizando índices de competição como variáveis preditoras. Conclui-se que, para o local de estudo, o índice de competição IC2 é indicado para análises sobre relações entre a competitividade e aspectos biométricos em distintos estratos de altura.

Palavras-chave: Altura de árvores. Competitividade. Comportamento sigmoidal. Relação funcional.

ABSTRACT

Scientific investigations on the behavior of competition indices in different height strata are scarce and help future research on the monitoring of growth dynamics and sustainable forest management. The objective was to evaluate distance-independent competition indices and to present the most suitable to represent competitiveness in different height strata in an Atlantic Forest fragment under forest recovery. This study was conducted in an area of 2.53ha, where inventory was carried out with a sampling intensity of 15.81%. Six competition indices were calculated for trees contained in lower, middle and upper strata of the forest fragment. IC2 competition index, which relates DBH of the objective tree with that from the average of competing trees, was the predictor that resulted in accurate equations for biometric estimation. Logistic model satisfactorily fitted the problem, more specifically in biometric prediction using competition indices as predictor variables. It is concluded that, for the study site, IC2 competition index is indicated for analyzes on the relationship between competitiveness and biometric aspects in different height strata.

Keywords: Tree height. Competitiveness. Sigmoidal behavior. Functional relationship.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 Descrição da área de estudo.....	10
2.2 Coleta e processamento de dados	10
3 RESULTADOS	12
4 DISCUSSÃO	17
5 CONCLUSÕES.....	20
REFERÊNCIAS	21

1 INTRODUÇÃO

As florestas são mosaicos de fases estruturais dinâmicos que fornecem serviços ecossistêmicos aproveitáveis direto ou indiretamente pela sociedade (HILL et al., 2016). O conhecimento da interação competitiva entre árvores é essencial para a compreensão da estruturação de uma formação lenhosa e para a definição de estratégias de conservação e manejo florestal sustentável (SIRAMI et al., 2018).

A análise quantitativa da competição entre árvores e sua relação com a estrutura vertical de uma formação lenhosa reflete a produtividade e a vulnerabilidade de indivíduos em cada estrato de altura (VERSACE et al., 2019). Todavia, as relações competitivas entre árvores situadas em diferentes estratos de altura não estão completamente esclarecidas para uma floresta natural (HUI et al., 2019), sobretudo, que se encontra em fase de recuperação.

A estratificação vertical é resultado da competição e seleção de espécies arbóreas em uma comunidade, analisada por meio da distribuição de indivíduos em classes de tamanho (HUI et al., 2019). A diferenciação em estratos de altura ocorre naturalmente em consequência do ritmo de crescimento, adaptação de árvores e disponibilidade de radiação luminosa, que se modifica ao longo do perfil vertical (CAO et al., 2019; FISCHER et al., 2019; THOM; KEETON, 2019). A competição por radiação luminosa aumenta devido à proximidade de árvores mais altas, enquanto todos os indivíduos competem por nutrientes e água (MOHAMMADI et al., 2017).

A competição florestal pode ser definida como uma interação negativa entre árvores, podendo ser explicada pela altura e diâmetro da árvore, comprimento da copa, posição sociológica ou a trajetória de crescimento (CURTO et al., 2020; HELLUY et al., 2020). Essa interação negativa entre plantas pode ser considerada direta, por contato, ou indireta através do uso de recursos comuns (HELLUY et al., 2020), e o esgotamento ou escassez desses recursos tem como resultado algumas consequências para a ecologia e o manejo florestal (LUSTOSA JUNIOR et al., 2019). Espera-se então, que a competição entre plantas aumente a taxa de mortalidade e retraia o crescimento em altura e diâmetro das árvores (LUSTOSA JUNIOR et al., 2019).

A competitividade entre árvores é convencionalmente quantificada na forma de índices, que representam um conjunto de características e interações bióticas e abióticas inerentes a uma árvore ou grupo de indivíduos (YANG; HUANG, 2018). Os índices de competição são expressões matemáticas que refletem o grau de supressão de cada árvore em relação àquelas competidoras (COSTA et al., 2018; MINATTI et al., 2019; SCHONS, 2019).

Os índices de competição podem ser classificados em três categorias, assim descritas: (a) Índice Independente da Distância (IID) – não exige localização das árvores individuais; (b) Índice Dependente da Distância (IDD) – exige as coordenadas de localização das árvores; e (c) Índice de Competição Semi-dependente da Distância (ISD) – calculado para as espécies presentes em um raio pré-determinado que varia entre 1 a 9 metros, a partir de uma “árvore-objetivo” (LUSTOSA JUNIOR, 2016). Embora haja diferenças operacionais na coleta e processamento de dados para as diferentes categorias de índice, pesquisas têm demonstrado precisões similares de suas relações funcionais com aspectos biométricos.

Índices de competição independentes da distância são facilmente calculados e exigem menos recursos para a coleta de dados (CURTO et al., 2020; FUKUMOTO et al., 2020), pois assumem que a biometria vegetal exprime todas as relações competitivas envolvidas no crescimento individual. Estes índices podem ainda ser agrupados em duas subcategorias de competitividade, unilateral e bilateral. A competição unilateral representa a concorrência por radiação luminosa e considera que as árvores maiores não são afetadas por aquelas vizinhas menores, enquanto que competição bilateral se refere a disputa, especialmente, por água e nutrientes, assumindo que os recursos são disputados por todas as árvores vizinhas (BURKHART; TOMÉ, 2012; SCHONS et al., 2020)

Investigações científicas sobre o comportamento de índices de competição em diferentes estratos de altura são escassas e podem subsidiar o desenvolvimento de planos, manutenção e monitoramento para a recuperação de áreas degradadas e auxiliar futuras pesquisas sobre a dinâmica de crescimento em povoamentos inequiâneos (CASTRO et al., 2014; MA et al., 2017; LUSTOSA JÚNIOR et al., 2019). Essa falta de informações pode ser justificada pelas dificuldades na coleta de dados, acessibilidade e heterogeneidade de um ecossistema natural.

A definição e análises de índices de competição adequados para a representatividade de relações competitivas entre árvores, especialmente em área degradada, são de grande importância prática para gestores, órgãos ambientais e consultores, que buscam o retorno da funcionalidade ecossistêmica de uma floresta. Mediante o exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar índices de competição independentes da distância e apresentar o mais indicado para representar a competitividade em diferentes estratos de altura em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

O trabalho foi conduzido no município de São João Evangelista – MG, em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, nas coordenadas de 18°33'5,05" Sul e 42°45'50,40" de longitude Oeste (Datum Sirgas 2000). O clima da região é do tipo Cwa (temperado chuvoso-mesotérmico) pela classificação do sistema internacional de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 20,2° C (médias variando de 16,7°C em julho a 22,8°C em janeiro e fevereiro) e 1.377 mm (médias variando de 10 mm em julho e agosto a 308 mm em dezembro), respectivamente. Os dados climáticos foram oriundos de registros anuais de 1982 a 2012 (CLIMATE-DATA.ORG, 2022).

O fragmento de Mata Atlântica possui 2,53 ha e encontra-se em fase de recuperação florestal (regeneração passiva) desde novembro de 2013 em estágio intermediário inicial de sucessão. A regeneração passiva acontece quando se utiliza a sucessão natural da floresta no projeto de restauração, ou seja, a floresta se regenera naturalmente, sem manejo humano. A vegetação original de Mata Atlântica com a fitofisionomia de floresta estacional semidecidual foi convertida para sucessivos monocultivos de *Coffea arabica* L. por período de, aproximadamente, 10 anos. O tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com o horizonte A proeminente, textura arenosa, relevo ondulado e a 690 m de altitude.

O inventário florestal foi realizado aos 80 meses após início da recuperação do fragmento de Mata Atlântica.

2.2 Coleta e processamento de dados

Diante da assimetria de forma e tamanho reduzido do fragmento, optou-se pelo lançamento de 10 parcelas contíguas quadradas de 20 × 20 m (400 m², equivalente a uma intensidade amostral de 15,81%). Todos os fustes dos indivíduos arbóreos com circunferência a 1,30 m de altura do solo (CAP, cm) igual ou superior a 10 cm foram mensurados.

O diâmetro à 1,30 m de altura do solo (DAP, cm) foi calculado pela relação entre (CAP) e o valor de π (3,141592654...). Adotou-se o diâmetro equivalente (DAP_{EQ}) para as árvores com bifurcação, com uso da expressão: $DAP_{EQ} = \sqrt{DAP_1^2 + DAP_2^2 + \dots + DAP_n^2}$, em que DAP₁

... n é o diâmetro de cada fuste. A altura (H , m) foi obtida pelo método de superposição de ângulos iguais. Para a estimativa volumétrica (V , m^3) e cálculo do fator de forma, foi empregada a seguinte equação conforme CETEC (1995), para mata secundária:

$$V = 0,000074 DAP^{1,707348} H^{1,16873}, R^2 = 97,3\%$$

Avaliaram-se seis índices de competição independentes da distância conhecidos no setor florestal (Tabela 1). Os índices IC1, IC2 e IC3 representam a competição bilateral. Os demais índices IC4, IC5 e IC6 assumem como árvores competidoras aquelas de diâmetro maior que a árvore objetivo e, portanto, representam a competição unilateral.

Tabela 1. Índices de competição independentes da distância testados para um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal.

Índice	Expressão	Interpretação	Fonte
----- Competição bilateral -----			
IC1	$IC_1 = \sum_{j=1}^n \frac{DAP_j}{DAP_i}$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.	Lorimer (1983)
IC2	$IC_2 = \frac{DAP_i^2}{\overline{DAP_j^2}}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.	Glover e Hool (1979)
IC3	$IC_3 = \frac{DAP_i^2}{q^2}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.	Stage (1973)
----- Competição unilateral -----			
IC4	$IC_4 = \sum_{i=1}^{n_j} B_j$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.	Stage (1973)
IC5	$IC_5 = \sum_{i=1}^{n_j} B_j / DAP_i$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.	Lhotka e Loewenstein (2011)
IC6	$IC_6 = \frac{DAP_i}{DAP_{max}}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.	Tomé e Burkhart (1989)

Em que: \overline{DAP} = média de DAP das árvores de setor (cm); q = diâmetro médio quadrático de setor (cm); DAP_{max} = DAP da árvore mais grossa; B_j = área basal das árvores competidoras (m^2/ha) com DAP maior que o DAP da árvore-objetivo; i = i -ésima árvore-objetivo e; j = j -ésima árvore competidora.

A análise da estrutura vertical foi realizada com a estratificação arbórea em três estratos de altura: Estrato inferior – compreendeu as árvores com altura (H) menor que a média amostrada (H_m) menos uma unidade de desvio-padrão (s); estrato médio – compreendi as árvores com $(H_m - 1s) \leq H < (H_m + 1s)$; e estrato superior – compreendeu as árvores com $H \geq (H_m + 1s)$.

A seleção do índice de competição ideal para a representação da competitividade entre árvores em cada estrato de altura se baseou na análise estatística e biológica de coeficientes de correlação de Pearson. Esse é um critério tradicional a priori para a seleção de índices de competição (CANHAM et al., 2004; CASTRO et al., 2014; TENZIN et al. 2017). A fim de se minimizar problemas com a perda de precisão durante a modelagem, assumiu-se os valores de $r > 0,70$ ou $r < 0,70$ e significativos pelo teste t ($r, p > 0,01$) como critério para a inclusão de índices de competição como preditores.

Para todo o banco de dados e cada estrato de altura, foram estabelecidas relações funcionais de simples entrada para a estimativa de atributos biométricos (DAP e V) utilizando exclusivamente índice de competição como variável preditora. A análise de regressão foi realizada através do método iterativo de Levenberg-Marquardt, com o ajuste do modelo logístico de três parâmetros, $Y = \alpha (1 + \beta \cdot e^{-\gamma \cdot X})^{-1}$; em que α , β e γ são parâmetros do modelo logístico.

A qualidade dos ajustes foi avaliada de acordo com a significância dos parâmetros pelo teste t, Média dos Desvios Absolutos (MDA), Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM) e coeficiente de correlação de Pearson (r). Menores valores de MDA e REQM implicam em melhor desempenho preditivo. O teste de $F(H_0)$ Graybill (1976) foi aplicado para avaliar a identidade de modelos e possibilidade do uso de equação generalista.

Para diagnóstico de efeito estatístico, foi empregado 1% de significância em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio dos softwares Microsoft Excel® e R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

3 RESULTADOS

A correlação entre a altura e o DAP foi significativa ($r = 0,6780, p \leq 0,01$), de modo que diâmetros menores estiveram associados a fustes mais baixos e, conseqüentemente, de menor volume. O estrato superior, com a presença de fustes com maior diâmetro, conteve 59,96% do volume amostrado, seguido dos estratos médio (37,04%) e inferior (3,00%). Os fatores de forma

foram de $0,74 \pm 0,0538$, $0,74 \pm 0,0720$ e $0,64 \pm 0,0604$ nos estratos inferior, médio e superior, respectivamente. As amplitudes de variações foram de 5,71, 12,14 e 22,35 cm para o DAP e de 0,0129, 0,0782 e 0,2756 m³ ind⁻¹ para o volume nos estratos inferior, médio e superior, respectivamente.

Os estratos inferior, médio e superior representaram 150 (16,00%), 608 (64,80%) e 180 ind ha⁻¹ (19,20%), respectivamente. As correlações entre atributos biométricos e índices de competição independentes da distância se encontram na Tabela 2. Em geral, a maioria dos índices que representam a competitividade bilateral apresentaram forte correlação com os atributos biométricos ($r > 0,70$ ou $r < 0,70$, $p \leq 0,01$). Não se identificaram inconsistências biológicas relacionadas às correlações; árvores com dimensões menores tendem a ser menos competitivas.

Tabela 2. Correlações entre atributos biométricos e índices de competição de fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal e diferentes estratos de altura.

Índice	DAP	Volume	DAP	Volume
	----- Generalista -----		----- Estrato Inferior -----	
IC1	-0,7092**	-0,5245**	-0,7610**	-0,6935**
IC2	0,8680**	0,8629**	0,8578**	0,7734**
IC3	0,8664**	0,8496**	0,8514**	0,7665**
IC4	-0,4868**	-0,4198**	-0,2300 ^{ns}	-0,1539 ^{ns}
IC5	-0,6815**	-0,5144**	-0,6473**	-0,5633**
IC6	0,9153**	0,8053**	0,8728**	0,7975**
	----- Estrato Médio -----		----- Estrato Superior -----	
IC1	-0,7673**	-0,6221**	-0,7976**	-0,6723**
IC2	0,8540**	0,8427**	0,8108**	0,7868**
IC3	0,8525**	0,8346**	0,7874**	0,7677**
IC4	-0,4296**	-0,3592**	-0,6994**	-0,6410**
IC5	-0,7148**	-0,5897**	-0,7624**	-0,6579**
IC6	0,8879**	0,8133**	0,8998**	0,8165**

**,* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ^{ns} não significativo 5% de probabilidade pelo teste t.

Os índices de competição mais fortemente correlacionados com os atributos biométricos ($r > 0,70$ ou $r < 0,70$) foram designados para as análises estatísticas subsequentes. As equações obtidas com o ajuste do modelo logístico para estimativa biométrica de árvores se encontram nas Tabelas 3 e 4. As equações obtidas para a estimativa de DAP no estrato superior tiveram parâmetros não significativos ($p > 0,01$) com uso dos preditores IC1, IC5 e IC6 (Tabela 3). Para esse mesmo estrato de altura, o ajuste volumétrico com uso do preditor IC6 também resultou

em parâmetro não significativo ($p > 0,01$, Tabela 4). Na ausência de significância, estes índices foram desconsiderados das demais análises de representação gráfica.

Tabela 3. Coeficientes e estatísticas de qualidade do ajuste do modelo logístico para estimativa do DAP de árvores em função do índice de competição para um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal em diferentes estratos de altura.

Índice	α	β	γ	MDA	RQEM	r
----- Generalista -----						
IC1	2,926325**	-1,000230**	0,013055**	1,5585	2,0519	0,8740
IC2	19,752704**	3,965731**	0,806794**	1,1916	1,6144	0,9241
IC3	19,786632**	4,097345**	1,044047**	1,2466	1,6807	0,9174
IC6	28,520510**	9,624740**	3,195690**	1,2717	1,6819	0,9172
----- Estrato Inferior -----						
IC1	2,910278**	-1,052303**	0,019238 ^{ns}	0,6225	0,7617	0,8633
IC2	8,835390**	2,005881**	2,063938**	0,5986	0,7464	0,8691
IC3	9,240832**	2,038041**	2,230266**	0,6186	0,7720	0,8593
IC6	10,955169**	5,132768**	5,340291**	0,6291	0,7338	0,8738
----- Estrato Médio -----						
IC1	2,944010**	-0,919518**	0,011523**	1,0460	1,3593	0,8486
IC2	12,625803**	2,652551**	1,327894**	0,9560	1,1973	0,8848
IC3	12,723766**	2,646696**	1,604429**	0,9890	1,2255	0,8790
IC5	3,243154**	-0,756157**	14,746385**	1,2195	1,5563	0,7957
IC6	14,883007**	5,179263**	4,303790**	0,9277	1,1761	0,8891
----- Estrato Superior -----						
IC1	4,630718 ^{ns}	-0,911664**	0,013443 ^{ns}	1,7222	2,4385	0,8633
IC2	21,942393**	2,719795**	0,578270**	1,8539	2,2636	0,8836
IC3	21,263823**	3,087098**	0,884752**	1,9647	2,4127	0,8664
IC5	4,480071 ^{ns}	-0,778291**	16,426627 ^{ns}	2,1507	2,8056	0,8141
IC6	45,235614 ^{ns}	7,960819*	1,981732**	1,4740	2,0765	0,9029

**,* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ^{ns} não significativo 5% de probabilidade pelo teste t. MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = Raiz Quadrada do Erro Médio e; r = coeficiente de correlação de Pearson.

Tabela 4. Coeficientes e estatísticas de qualidade do ajuste do modelo logístico para estimativa do volume de árvores em função do índice de competição para um fragmento de Mata Atlântica em recuperação florestal em diferentes estratos de altura.

Índice	α	β	γ	MDA	RQEM	r
----- Generalista -----						
IC2	0,169540**	19,617382**	0,884948**	0,0115	0,0200	0,8640
IC3	0,158397**	22,708778**	1,316213**	0,0116	0,0208	0,8521
IC6	0,207732**	107,905407**	5,949436**	0,0114	0,0202	0,8598
----- Estrato Inferior -----						
IC2	0,011860**	5,246307**	2,618866**	0,0014	0,0019	0,7785
IC3	0,012166**	5,287966**	3,039005**	0,0014	0,0019	0,7722
IC6	0,012094**	24,183374*	10,059073**	0,0014	0,0018	0,8028
----- Estrato Médio -----						
IC2	0,056266**	8,805024**	1,260941**	0,0050	0,0072	0,8294
IC3	0,058747**	8,842012**	1,478338**	0,0051	0,0074	0,8200
IC6	0,078938**	23,268709**	4,756802**	0,0052	0,0074	0,8169
----- Estrato Superior -----						
IC2	0,213395**	6,646869**	0,495159**	0,0241	0,0342	0,8087
IC3	0,186332**	8,078618**	0,889851**	0,0250	0,0356	0,7908
IC6	0,328369 ^{ns}	29,331586**	3,562162**	0,0205	0,0318	0,8371

**,* significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste t, respectivamente. ^{ns} não significativo 5% de probabilidade pelo teste t. MDA = média dos desvios absolutos; RQEM = Raiz Quadrada do Erro Médio e; r = coeficiente de correlação de Pearson.

Na busca de um único índice de competição capaz de representar com precisão todos os estratos de alturas, todas as equações geradas a partir da inclusão do índice IC2 como variável preditora foram selecionadas para a inspeção gráfica, mas o IC3 também poderia trazer resultados satisfatórios para o trabalho, por apresentar valores próximos do índice selecionado, o IC2, para representar os estratos de altura. Estas equações exibiram todos os parâmetros significativos ($p \leq 0,01$), além de menores desvios (baixos valores de MDA e RQEM). O teste de identidade de modelos de F Graybill foi significativo ($p \leq 0,01$) tanto para a estimativa de DAP quanto para o volume, indicando ser necessário o ajuste por estrato de altura.

A tendência sigmoideal positiva foi encontrada em todos os ajustes biométricos em função do índice IC2 (Figura 1). Observou-se maior amplitude de variação desse índice no estrato superior de altura (14,20), oscilando de 0,11 a 1,75 e de 0,10 a 4,84 nos estratos inferior e médio, respectivamente. A assíntota, representada pelo parâmetro α , tendeu ao aumento no sentido do estrato de altura inferior para o superior (Figura 1, Tabelas 3 e 4).

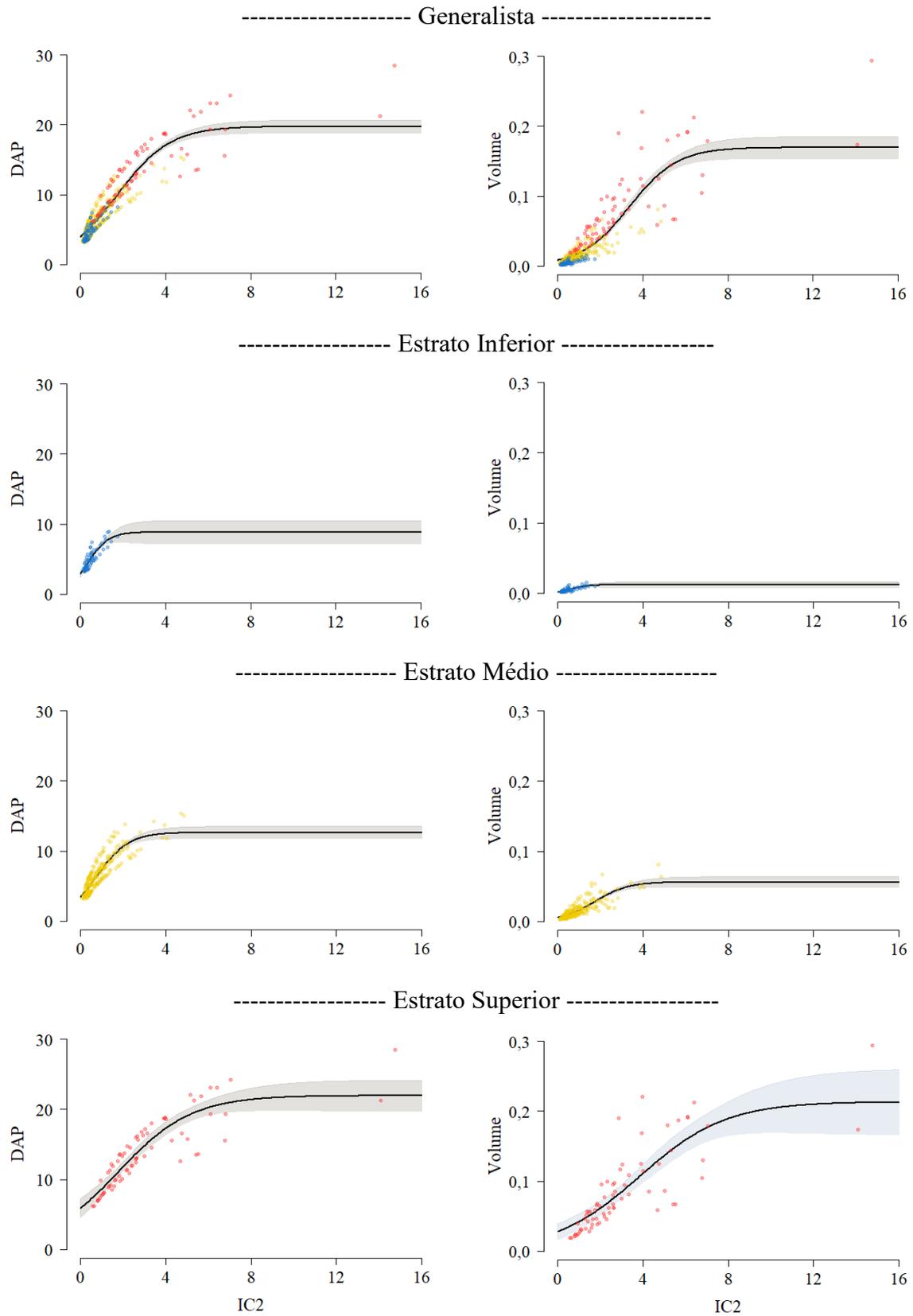


Figura 1. Valores observados e curvas geradas para DAP (cm) e volume ($\text{m}^3 \text{ind}^{-1}$) em um fragmento de Mata Atlântica sob recuperação florestal, considerando todas as árvores inventariadas (Generalista) e por estrato de altura (azul = estrato inferior; amarelo = estrato médio e; vermelho = estrato superior).

4 DISCUSSÃO

A competição em ambientes naturais influenciou a biometria das árvores do fragmento florestal. Em geral, todos os índices de competição avaliados correlacionaram significativamente com o diâmetro e volume individual (Tabela 2). Como esperado biologicamente, os índices cujos menores valores representam maior competição sobre a árvore objetivo exibiram correlação positiva e se associaram melhor com os atributos biométricos; o inverso exibiu correlação negativa. Face aos inúmeros índices de competição disponíveis na literatura (STAGE; 1973; GLOVER; HOOL, 1979; LORIMER, 1983; TOMÉ; BURKHART, 1989; LHOTKA; LOEWENSTEIN, 2011) e especificidades de formações lenhosas, sugere-se que a escolha do índice de competição seja baseada em critérios estatísticos, intrínsecos a vegetação, operacionais de coleta e facilidade no processamento de dados.

Os fustes do estrato superior de altura tenderam a exibir menores valores de fator de forma ($0,64 \pm 0,0604$). Tal variabilidade da forma de fustes pode ser consequência de aspectos competitivos inerentes a cada estrato de altura e da diversidade genética encontrada em ecossistemas naturais. Evidenciou-se dois grupos distintos relacionados à forma de fuste, um formado pelo estrato superior e o outro, pelos dois demais estratos de altura. Enfatiza-se que limitações na interceptação de radiação luminosa comprometem a etapa fotoquímica da fotossíntese e promove a senescência foliar, restringindo a produtividade primária líquida (TAIZ et al., 2017).

Genericamente, o fator de forma reduziu com o aumento do diâmetro de fustes inventariados ($r = -0,8087$, $p \leq 0,01$). Uma hipótese a se considerar é a de que a intensa competição nos estratos inferiores de altura, especialmente por radiação solar, possa ter promovido a formação de fustes mais cilíndricos. Esta hipótese corrobora com o relatado também em povoamentos equiâneos, onde se tem fustes mais cilíndricos à medida que se adensa o plantio e se intensifica a competição por recursos essenciais para o crescimento vegetal (CAMPOS; LEITE, 2017; TRINDADE et al., 2019).

Os índices de competição independentes da distância IC2, IC3 e IC6 foram os únicos contemplados como preditores para a modelagem da estimativa biométrica em todos os estratos de altura do fragmento florestal. Estabeleceram-se 18 e 12 relações funcionais para a estimativas diamétricas e de volume individual, respectivamente (Tabelas 3 e 4). Em virtude da complexidade envolvida na representação da competição em florestas naturais (TENZIM et al., 2017; SIRAMI et al., 2018; VERSACE et al., 2019; BIANCHI et al., 2020), a qualidade dos ajustes realizados foi considerada satisfatória.

As equações geradas para o estrato superior de altura apresentaram maiores valores de MDA e RQEM, provavelmente, devido à heterogeneidade biométrica. Nesse mesmo estrato, também foram encontradas árvores com diâmetro e volume similares aos estratos inferiores, ou seja, desde árvores com fustes mais finos (DAP mínimo de 6,18 cm) quanto mais grossos (DAP máximo de 28,52cm).

O uso do índice de competição IC2 como preditor exclusivo da modelagem proporcionou estimativas biométricas mais precisas. Este resultado é um indício de que para o fragmento de Mata Atlântica em regeneração estudado, a representação da competição resumida na forma de um único índice deve considerar a disputa de recursos por todas as árvores vizinhas (competição bilateral) e, não somente, aquelas competidoras maiores que a árvore objetivo. Tem-se a expectativa de que árvores contidas em ambientes naturais sob regeneração estejam menos sujeitas aos efeitos competitivos por radiação luminosa devido ao menor porte da vegetação do que florestas em estágios sucessionais mais avançados (CANHAM et al., 2004; HILL et al., 2016; KRŮČEK et al., 2019).

Para as ocasiões em que se verificou valores do índice IC2 comum entre os três estratos de altura (faixa aproximada de IC2 entre 0,5565 a 1,7491), os valores de DAP foram de $6,6503 \pm 1,3979$ cm, $7,5910 \pm 1,8253$ cm e $8,9432 \pm 1,8775$ cm nos estratos inferior, médio e superior, respectivamente. É conveniente enfatizar que nessa faixa de índice IC2, as árvores do estrato superior de altura apresentaram maior fator de forma e menores robustez, vigor e estabilidade. A razão da altura com o DAP foram de 5:1, 7:1 e 9:1 no sentido do estrato de altura inferior para o superior. Estes resultados são indícios da presença de espécies menos tolerantes ao sombreamento da fase sucessional que se encontra o fragmento, as espécies heliófilas, que direcionam a produção de fotoassimilados preferencialmente para o crescimento em altura e fototropismo (HUNT et al., 2006).

A capacidade em delinear adequadamente a realidade biológica é uma característica indispensável para o emprego de um índice de competição. As equações demonstraram que os atributos biométricos tenderam ao aumento assintoticamente com a redução da competição sobre a árvore objetivo e de forma diferenciada entre os estratos de altura, isto é, a biometria tende a se estabilizar mesmo com ausência de competição (Figura 1). Ressalta-se que o crescimento de árvores isoladas, submetidas à mínima competição, é limitada às características intrínsecas do potencial produtivo do próprio sítio. Logo, o uso de uma equação generalista para delinear o comportamento biométrico em função de índices de competição deve ser visto com bastante cautela, pois a competição sobre uma árvore objetivo pode, em alguns casos, se destoar conforme o estrato de altura.

A estratificação da floresta desempenha um papel crucial na interceptação de luz solar, atividades fotossintéticas e volume lenhoso (MENSAH et al., 2018). A competição unilateral se tornou menos evidente no estrato superior de altura, o qual se espera menor disputa pela interceptação da radiação luminosa (RODRÍGUEZ-RONDEROS et al., 2016). Os índices de competição unilaterais selecionados (IC5 e IC6) apresentaram, inclusive, assíntota não significativa nas equações de diâmetro e volume individual para tal estrato de altura (Tabelas 3 e 4).

Neste trabalho, a definição de estratos de altura mostrou-se eficaz para inferir sobre a competição e tendências de crescimento em função do grau de competitividade de árvores em um fragmento de Mata Atlântica. Salienta-se que a estrutura tridimensional de ambientes florestais influencia o microclima, habitat, ciclagem de nutrientes, comportamento de fogo, disponibilidade de radiação solar e outras importantes funções do ecossistema (SUMNALL et al., 2017). Deste modo, sugerem-se mais pesquisas envolvendo aspectos relacionados à competição e a estruturação de florestas naturais, que são bases fundamentais para o monitoramento da dinâmica de crescimento e planejamento com vistas ao manejo florestal sustentável.

5 CONCLUSÕES

Existe correlação significativa entre índices de competição e o diâmetro/volume de árvores no fragmento de Mata Atlântica em regeneração.

Para o local de estudo, o índice de competição independente da distância IC2 é indicado para análises sobre relações entre a competitividade e aspectos biométricos em distintos estratos de altura.

O modelo logístico se adequou satisfatoriamente ao problema, mais especificamente na predição biométrica utilizando índices de competição como variáveis preditoras. O comportamento de aspectos biométricos lenhosos em relação à competitividade da árvore objetivo é distinto entre estratos de altura, ou seja, a influência da competição não é similar entre estratos verticais.

REFERÊNCIAS

- BIANCHI, S.; HUUSKONEN, S.; SIIPILEHTO, J.; HYNYNEN, J. Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 1-7, 2020.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest trees and stands**. Dordrecht: Springer. 2012. 472p.
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. 636p.
- CANHAM, C. D.; LEPAGE, P. T.; COATES, K. D. A neighborhood analysis of canopy tree competition: effects of shading versus crowding. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 34, n. 4, p. 778-787, 2004.
- CAO, L.; COOPS, N. C.; SUN, Y.; RUAN, H.; WANG, G.; DAI, J.; SHE, G. Estimating canopy structure and biomass in bamboo forest using airborne LiDAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p114–129, 2019.
- CASTRO, R.; SOARES, C.; LEITE, H. G.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G. S.; SILVA, M. O. F. Competição em nível de árvore individual em uma floresta estacional semidecidual. **Silva Lusitana**, v. 22, n. 1, p. 43-66, 2014.
- CLIMATE-DATA.ORG. **DATOS CLIMÁTICOS MUNDIALES**. Disponível em: <https://es.climate-data.org/>. Acesso em: 07 jan. 2022.
- COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; HESS, A. F. Competition indices and their relationship with basal area increment of Araucaria. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 5, p. 198-2010, 2018.
- CURTO, R. D. A. et al. Effectiveness of competition indices for understanding growth in an overstocked stand. **Forest Ecology and Management**, v. 477, p. 118472, 2020.
- FISCHER, R.; KNAPP, N.; BOHN, F. J.; SHUGART, H. H.; HUTH, A. The relevance of forest structure for biomass and productivity in temperate forests: new perspectives for remote sensing. **Surveys in Geophysics**, V. 40, P. 709-734, 2019.
- FUKUMOTO, K. et al. Evaluation of individual distance-independent diameter growth models for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) trees under multiple thinning treatments. **Forests**, v. 11, n. 3, p. 1–13, 2020.
- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC. **Desenvolvimento de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas do estado de Minas Gerais e outras regiões do país**. Belo Horizonte: 1995.

- GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v. 25, n. 2, p. 275-282, 1979.
- HELLUY, M. et al. Competition and water stress indices as predictors of *Pinus halepensis* Mill. radial growth under drought. **Forest Ecology and Management**, v. 460, n. August 2019, p. 117877, 2020.
- HILL, S.; LATIFI, H.; HEURICH, M.; MÜLLER, J. Individual-tree and stand-based development following natural disturbance in a heterogeneously structure forest: a LiDAR-based approach. **Ecological Informatics**, v. 38, p. 12-25, 2016.
- HUI, G.; ZHANG, G.; ZHAO, Z.; YANG, A. Methods of forest structure research: a review. **Current Forestry Reports**, v. 5, p. 142-154, 2019.
- KRŮČEK, M.; TROCHTA, J.; CIBULKA, M.; KRÁL, K. Beyond the cones: how crown shape plasticity alters aboveground competition for space and light – evidence from terrestrial laser scanning. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 264, p. 188-199, 2019.
- LHOTKA, J. M.; LOEWENSTEIN, E. F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 3, p. 770-778, 2011.
- LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v. 6, p. 343-360, 1983.
- LUSTOSA JÚNIOR, I. M.; CASTRO, R. C. O.; GASPAR, R. O.; ARAÚJO, J. B. C. N.; AQUINO, F. G. Competition indexes to evaluate tree growth in a semi-deciduous seasonal forest. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-12, 2019.
- MA, Q.; SU, Y.; TAO, S.; GUO, Q. Quantifying individual tree growth and tree competition using bi-temporal airborne laser scanning data: a case study in the Sierra Nevada Mountains, California. **International Journal of Digital Earth**, v. 11, n. 5, p. 485-503, 2017.
- MENSAH, S.; TOIT, B.; SEIFERT, T. Diversity–biomass relationship across forest layers: implications for niche complementarity and selection effects. **Oecologia**, v. 187, p. 783-795, 2018.
- MINATTI, M.; SANQUETTA, C. R.; NETTO, S. P.; CORTE, A. P. D. Índices de competição dependentes da distância para *Araucaria angustifolia* em São João do Triunfo – PR. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 3, p. 187-194, 2019.
- MOHAMMADI, Z.; LIMAEI, S. M.; LOHMANDER, P.; OLSSON, L. Estimation of a basal area growth model for individual trees in uneven-aged Caspian mixed species forests. **Journal of Forestry Research**, v. 29, p. 1205-1214, 2017.

- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.
- RODRÍGUEZ-RONDEROS, M. E.; BOHRER, G.; SANCHEZ-AZOFEIFA, A.; POWERS, J. S.; SCHNITZER, S. A. Contribution of lianas to plant area index and canopy structure in a Panamanian forest. **Ecology**, v. 97, n. 12, p. 3271-3277, 2016.
- SCHONS, C. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANTOS, T. L.; NASCIMENTO, R. G. M. Índices de competição em nível de árvore individual para espécies da floresta ombrófila mista. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3275, 2020.
- SIRAMI, E. V.; MARSONO, D.; SADONO, R.; IMRON, M. A. Ideal planting space for merbau (*Intsia bijuga*) forest plantations in Papua based on distance-dependent competition. **Biodiversitas**, v. 19, n. 6, p. 2219-2231, 2018.
- STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development** (Research Paper, No. INT-137). Madison: USDA Forest Service, 1973.
- SUMNALL, M.; FOX, T. R.; WYNNE, R. H.; THOMAS, V. A. Mapping the height and spatial cover of features beneath the forest canopy at small-scales using airborne scanning discrete return Lidar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 133, p. 186-200, 2017.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.
- TENZIN, J.; TENZIN, K.; HASENAUER, H. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. **Forestry**, v. 90, p. 367-380, 2017.
- TENZIN, J.; TENZIN, K.; HASENAUER, H. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. **Forestry**, v. 90, p. 367-380, 2017.
- THOM, D.; KEETON, W. S. Stand structure drives disparities in carbon storage in northern hardwood-conifer forests. **Forest Ecology and Management**, v. 442, p. 10-20, 2019.
- TRINDADE, R. N. R.; LAFETÁ, B. O.; AGUIAR, V. F.; SILVA, A. G.; FERRARO, A. C.; PENIDO, T. M. A.; VIEIRA, D. S. Morfometria da copa de povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake em diferentes espaçamentos de plantio. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 121, p. 83-91, 2019.
- VERSACE, S.; GIANELLE, D.; FRIZZERA, L.; TOGNETTI, R.; GARFI, V.; DALPONTE, M. Prediction of competition indices in a Norway spruce and silver fir-dominated forest using LiDAR data. **Remote Sensing**, v. 11, p. 18, 2019.

YANG, Y.; HUANG, S. Effects of competition and climate variables on modelling height to live crown for tree boreal tree species in Alberta, Canada. **European Journal of Forest Research**, v. 137, p. 153-167, 2018.