

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Direcionadores estratégicos no melhoramento florestal para produção de
carvão vegetal**

Caio Varonill de Almada Oliveira
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

CAIO VARONILL DE ALMADA OLIVEIRA

**Direcionadores estratégicos no melhoramento florestal para produção de
carvão vegetal**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Gleison Augusto Dos Santos

Coorientadora: Angelica de C O Carneiro

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

O48d
2020
Oliveira, Caio Varonill de Almada, 1994-
Direcionadores estratégicos no melhoramento florestal para
produção de carvão vegetal / Caio Varonill de Almada Oliveira.
– Viçosa, MG, 2020.
1 dissertação eletrônica (74 f.): il.

Orientador: Gleison Augusto dos Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Florestal, 2020.
Referências bibliográficas: f. 65-74.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.291>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. *Corymbia* - Melhoramento genético. 2. *Corymbia* -
Seleção. 3. Genética florestal. I. Santos, Gleison Augusto dos,
1977-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência
Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 22. ed. 634.92321

CAIO VARONILL DE ALMADA OLIVEIRA

Direcionadores estratégicos no melhoramento florestal para produção de carvão vegetal

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2020.

Assentimento:

Caio Varonill de Almada Oliveira
Autor

Gleison Augusto Dos Santos
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 09/12/2024 às 22:31:25 e pelo orientador em 10/12/2024 às 13:00:06. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **5BVO.WKB3.JUWK** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais Valdimar Silva de Oliveira e Maria de Almada Oliveira, minha irmã Camila Varonill de Almada Oliveira, e minha esposa Larissa Ravenna Nascimento de Sousa Varonill, por todo o suporte, dedicação e carinho, e ao meu primogênito Apollo Varonill, que veio para me motivar ainda mais na finalização desta jornada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter abençoado cada dia até aqui.

A todos meus familiares que sempre estiveram torcendo pelo meu sucesso.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

A ArcelorMittal BioFlorestas pela disponibilização dos dados experimentais. Em especial aos seus funcionários: Roosevelt Almado, Celso Dotta e José Maria de Paula, Carlos de Paula, Erlaine dos Santos, Érica Silva, Giovanne Silva, Rosa Carvalho, Rosa dos Santos, Helena Alves, Demétrios Silva, José Martins, Geraldo Alves e Cleiton Praxedes.

Ao meu orientador Prof. Glêison dos Santos, e coorientadora Prof.^a Angélica Carneiro (Cassinha), por todos os ensinamentos que me foram repassados.

Ao grupo de pesquisa Genética e Melhoramento Florestal - GenMflor, pelas contribuições profissionais que me foram acrescentadas durante o período em que fui um de seus membros. Em especial aos meus amigos Guilherme Mendes, Thales Martins, Alexandre Ferraz, Genaina Souza, Michelle Brandão e Carla Castro.

Aos pesquisadores Ricardo Gallo (UFRPE), Andrei Nunes (UFSB), Sofia Rocha (UFES), Graziela Vidaurre (UFES), e ao consultor Teotônio de Assis (Assistech), que se mantiveram sempre dispostos a contribuir comigo quando contatados.

A todos que compartilharam comigo momentos incríveis e inesquecíveis durante o período em que cursei o mestrado.

Muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de

Finanziamento 001.

“Felizes seremos agradecendo a própria natureza pelo viver nosso de cada dia.
Fazemos tudo através da nossa missão, andando sim, por ruas e mais ruas,
sentindo e percebendo o quanto devemos ser felizes pela existência nossa de cada
dia”

(Chiquinho da Floresta, 2020)

RESUMO

OLIVEIRA, Caio Varonill de Almada, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Direcionadores estratégicos no melhoramento florestal para produção de carvão vegetal.** Orientador: Gleison Augusto Dos Santos. Coorientadora: Angelica de Cassia Oliveira Carneiro.

OLIVEIRA, Caio Varonill de Almada, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Direcionadores estratégicos no melhoramento florestal para produção de carvão vegetal.** Orientador: Glêison Augusto dos Santos. Coorientadora: Angélica de Cassia Oliveira Carneiro.

A criação de índices de seleção estratégicos aumenta a eficiência na identificação de indivíduos superiores de um programa de melhoramento genético. Os entraves atuais da eucaliptocultura tornou estratégico que as empresas que dependem da matéria prima do eucalipto tenham uma alternativa para atender suas demandas com outra fonte. Um exemplo sendo o uso do gênero *Corymbia* spp.. O objetivo foi estabelecer direcionadores estratégicos para programas de melhoramento genético florestal, que visem a produção de carvão vegetal siderúrgico, por meio da criação de índices de seleção verticalizados com suas diretrizes, e com base nestes indicar clones de superiores para plantios comerciais. Assim, foram avaliados 10 clones híbridos, sendo 9 do gênero *Corymbia* spp. e 1 do gênero *Eucalyptus* spp. (testemunha), em teste clonal com 3 anos de idade, por meio de 5 índices fenotípicos e 1 genético. Tais índices são eficientes na seleção de materiais genéticos superiores e potencializam a indicação de clones que atendam as diretrizes estratégicas de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico. Todos os clones híbridos de *Corymbia* spp. testados são superiores à testemunha de *Eucalyptus* spp., quando comparados por meio do índice genético criado. O clone híbrido de *Corymbia* 4775 foi indicado para plantios comerciais destinados à produção de carvão vegetal siderúrgico.

Palavras-chave: corymbia; índice de seleção; seleção precoce

ABSTRACT

OLIVEIRA, Caio Varonill de Almada, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Strategic drivers in forestry improvement for charcoal production.** Adviser: Gleison Augusto Dos Santos. Co-adviser: Angelica de Cassia Oliveira Carneiro.

OLIVEIRA, Caio Varonill de Almada, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2020. **Strategic drivers in forest improvement for charcoal production.** Advisor: Glêison Augusto dos Santos. Co-advisor: Angélica de Cassia Oliveira Carneiro.

Creating strategic selection indexes increases efficiency in identifying superior individuals in a genetic improvement program. The current obstacles to eucalyptus cultivation have made it strategic for companies that depend on eucalyptus raw materials to have an alternative to meet their demands from another source. One example being the use of genus *Corymbia* spp. The objective was to establish strategic guidelines for forest genetic improvement programs, aiming at the production of steel charcoal through the creation of vertical selection indexes with their guidelines, and based on these, indicate the superior clones. for commercial plantations. Thus, 10 hybrid clones were evaluated, 9 of which belonged to the genus *Corymbia* spp. and 1 of the genus *Eucalyptus* spp. (control), in a clonal test at the age of 3, using 5 phenotypic and 1 genetic index. Such indexes are efficient in the selection of superior genetic materials and enhance the indication of clones that meet the strategic guidelines of a forest genetic improvement program to produce steel charcoal. All hybrid clones of *Corymbia* spp. tested are superior to the *Eucalyptus* spp. control when compared using the created genetic index. The hybrid clone of *Corymbia* 4775 were indicated for commercial plantations intended to produce steel charcoal.

Keywords: corymbia; selection index; early selection

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	10
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal	13
2.2. Madeira de Corymbia para produção de carvão vegetal	16
2.3. Propriedades do carvão vegetal para produção de ferro gusa	18
2.4 Diretrizes estratégicas de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico	21
3.MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1.Teste genético-estatístico.....	24
3.2.Pré-seleção de materiais genéticos	25
3.3.Variáveis utilizadas para a estimação de índices de seleção estratégicos	27
3.4.Incremento médio anual em volume de madeira sem casca (IMA_{vol-sc})	28
3.5.Densidade básica da madeira	29
3.6.Secagem da madeira.....	31
3.7.Carbonização	33
3.8.Rendimento gravimétrico em carvão vegetal.....	37
3.9.Teor de finos do carvão vegetal	37
3.10.Densidade a granel do carvão vegetal.....	37
3.11.Carbono fixo	38
3.12.Índices de seleção	39
3.12.1.Índices de seleção para atendimento ao foco florestal.....	41
3.12.1.1.Índice fenotípico incremento médio anual em massa seca de madeira	41
3.12.2.Índice de seleção para atendimento ao foco industrial – carvão vegetal	43
3.12.3.Índice de seleção para atendimento ao foco industrial – ferro gusa	44
3.13.Análises estatísticas	46
4.RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1.Análise de deviance (ANADEV)	49
4.2.Parâmetros genéticos preditos.....	49
4.3.Correlações genéticas	51
4.4.Valores genotípicos e ganhos genéticos	53
5.CONCLUSÕES	64
6. BIBLIOGRAFIA.....	65

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui mais de 130 indústrias que utilizam carvão vegetal como redutor do minério de ferro. Sendo responsável por 11 % de todo o carvão vegetal produzido globalmente e por isso é considerado o maior produtor de aço verde do mundo (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018; INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). Atualmente o país possui 7,83 milhões de hectares de árvores plantadas, e 12 % dessa área é destinada para uso industrial de siderurgia a carvão vegetal (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2019). Somente entre 2016 e 2017, as indústrias siderúrgicas a carvão vegetal reflorestaram cerca de 750 mil hectares com espécies do gênero *Eucalyptus* (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2018).

O desenvolvimento de plantações florestais para uso industrial, dentro do atual ambiente mercadológico de economia globalizada, deve ter como um de seus focos principais a contribuição que a matéria-prima florestal representa. Desta forma, podemos aumentar a competitividade das indústrias florestais nos distintos segmentos de mercado em que atuam (SANTOS et al., 2017).

Os povoamentos florestais destinados ao segmento industrial da siderurgia devem originar carvão vegetal que atenda um conjunto de parâmetros de qualidade para ser considerado adequado (CARNEIRO et al., 2013). Os materiais genéticos utilizados para o estabelecimento de povoamentos florestais destinados a produção de carvão vegetal são híbridos do gênero *Eucalyptus*, isso devido a seu rápido crescimento e de sua grande plasticidade (VALENTE, 2017). Contudo, diante do cenário desafiador atual, em que adversidades bióticas e abióticas assolam as plantações de eucalipto, é extremamente necessário que as empresas que dependem da matéria-prima desses materiais genéticos tenham uma alternativa para atender suas demandas (ASSIS, 2014).

Clones híbridos do gênero *Corymbia* spp., têm se mostrado uma opção viável para suprir a demanda de matéria prima para a produção de carvão vegetal em substituição a clones de eucalipto, uma vez que a maioria das espécies desse gênero tem tolerância às principais pragas e doenças que prejudicam a eucaliptocultura. Adicionalmente possui madeira de qualidade adequada para uso nos mais distintos segmentos da atividade industrial baseada em madeira de eucalipto, principalmente para o carvão vegetal siderúrgico (ASSIS, 2014).

Mesmo diante do potencial que indivíduos híbridos do gênero *Corymbia* já tenham demonstrado, como por exemplo, de atingir níveis de produtividade volumétrica semelhantes aos dos clones de híbridos de *Eucalyptus* (ASSIS, 2014), atualmente seus clones ainda são pouco explorados pela silvicultura brasileira (VALENTE, 2017).

Para mudar essa realidade, diversas empresas do setor florestal vêm investindo em programas de melhoramento genético de *Corymbia* ssp.. Contudo, para que esses programas sejam eficazes, devem ter por base as diretrizes estratégicas estabelecidas para o negócio, tendo como direcionadores as áreas: florestal, industrial e comercial. Suas diretrizes devem ser estabelecidas por foco de atuação (florestal, industrial e comercial), ter objetivos bem definidos, metas claras, e estratégias e ferramentas que possibilitem o cumprimento de suas metas.

Programas de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico, utilizam grande quantidade de variáveis para selecionar materiais genéticos superiores verticalizados com suas diretrizes. Isso ocorre, dentre outros motivos, por que a qualidade do carvão vegetal é influenciada pelas propriedades da madeira e pela tecnologia empregada no processo de carbonização.

Portanto, o processo de carbonização deve ser adequado e a madeira utilizada como matéria-prima também deve atender a um conjunto de parâmetros de qualidade. Entre eles, densidade básica elevada, alta produtividade de matéria seca, baixa relação Siringil/Guaiacil, baixa relação Cerne/Alburno, alto poder calorífico, facilidade na secagem da madeira, alto índice de cristalinidade, alta granulometria, baixo teor de finos e alto rendimento gravimétrico (VITAL et al., 2013; TRUGILHO, 2014;).

Deste modo, é prudente que os programas de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico, utilize índices de seleção que sintetizem variáveis de produtividade e qualidade da madeira e do carvão, para que se aumente a eficiência de seleção de indivíduos superiores verticalizados com as diretrizes do programa.

Para fins de melhoramento genético, a utilização de índices capazes de sintetizar diversas características de interesse na seleção de indivíduos superiores aumentam a eficiência do programa de melhoramento. A teoria de índice de seleção consiste em uma função linear dos valores fenotípicos das diferentes características

ponderados por coeficientes estimados. Sendo assim, buscamos maximizar a correlação entre o índice e os valores genéticos verdadeiros. Logo o ganho genético pode ser maximizado se comparado à seleção direta, ou seleção individual, para cada caractere, separadamente (CUNNINGHAM et al., 1975; RESENDE et al., 1990; NUNES, 2015;). Assim, é estratégico a criação de índices de seleção, que sejam em função da qualidade e produtividade da matéria prima e do produto. Atendendo as diretrizes florestais, industrial e comercial, de um programa de melhoramento genético florestal.

Diante do exposto, o objetivo principal foi estabelecer direcionadores estratégicos para programas de melhoramento genético florestal, que visam a produção de carvão vegetal siderúrgico (PMGF-CVS). Os objetivos específicos foram: (a) Criar índices de seleção que sintetizem características que impactam positivamente as diretrizes dos focos florestal, industrial e comercial de um PMGF-CVS; (b) Estimar e analisar correlações genéticas entre os índices criados e os caracteres utilizados para sua determinação; (c) Estimar e analisar parâmetros genéticos para os índices de seleção criados; (d) Sugerir o plantio comercial de clones híbridos de *Corymbia* spp. que estejam verticalizados com as diretrizes de um PMGF-CVS, considerando seus ganhos genéticos em relação ao clone híbrido de *Eucalyptus* utilizado como testemunha.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Propriedades da madeira para produção de carvão vegetal

A madeira é um material físico, químico e mecanicamente heterogêneo. Tal heterogeneidade pode ser atribuída à idade, ao material genético, sítio, aspectos silviculturais e interações ambientais (TRUGILHO et al., 2015). Como consequência, não só a qualidade da madeira é afetada, mas também, a qualidade do “produto final”, por exemplo, o carvão vegetal (SANTOS et al., 2011). Neste contexto, é de fundamental importância identificar quais as propriedades da madeira tem maior influência sobre as propriedades e qualidades do carvão vegetal.

A densidade básica é uma das propriedades da madeira que mais se utiliza para a destinação adequada da mesma função do seu uso, em virtude de sua elevada correlação com outras propriedades e alto controle genético. Além de ser um indicador importante de desempenho durante o processo industrial (ARANTES et al., 2016).

Para o uso siderúrgico, por exemplo, buscamos madeiras com densidade acima de 500 kg.m^{-3} , pois quanto maior a densidade maior será a produção de massa. Consequentemente, a concentração de carbono fixo, resistência mecânica do carvão vegetal, além da capacidade de carga do alto-forno para produção de ferro-gusa (PEREIRA, 2012; CARNEIRO et al., 2017).

Com relação a composição química da madeira, em termos percentuais, sua constituição varia entre 40 e 50 % de celulose, 20 e 30 % de hemiceluloses, 20 a 35 % de lignina e 0 a 10 % de extrativos. Essa composição química pode, no entanto, variar de acordo com fatores de crescimento, idade e estresse da planta (BARNETT e JERONIMIDIS, 2009).

A celulose é o principal componente estrutural da madeira, sendo formada por uma longa cadeia polimérica de moléculas β -D-glicopiranoses, ligadas entre si por ligações glicosídicas β (1-4). Durante a pirólise, a degradação da celulose ocorre num faixa de temperatura entre 315 e 400 °C, com a taxa máxima de perda de massa a 355 °C (YANG et al., 2007).

As hemiceluloses são polissacarídeos ramificados, que compreendem vários compostos de diferentes estruturas moleculares e composição química (heteropolímeros). Sua classificação se faz de acordo com os principais açúcares

presentes em sua composição, sendo as mais importantes as xilanas e glucomananas (BARNETT e JERONIMIDIS, 2009). As hemiceluloses são mais suscetíveis às reações químicas de degradação e menos tolerantes à ação do calor, devido a existência de hidroxilas livres em sua estrutura molecular em condição amorfa (OLIVEIRA, 2012). A decomposição das hemiceluloses ocorre entre 200 e 320 °C, com dois picos distintos, um a 246 e outro a 295 °C (STEFANIDIS et al., 2014).

Com base nas informações de estabilidade térmica citadas, a holocelulose (fração da madeira formada pela celulose e as hemiceluloses) contribui pouco na produção de carvão vegetal, degradando a baixas temperaturas, sendo mais importante para a queima direta da madeira (CASTRO, 2011).

A lignina é o constituinte estrutural da madeira mais importante para a produção de carvão vegetal. Este componente é uma macromolécula formada pela polimerização de três monômeros de fenilpropano: o álcool p-coumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico. Os anéis aromáticos destes álcoois são denominados, respectivamente: p-hidroxifenil, guaiacil e siringil, nos quais se baseiam a designação dos diferentes tipos de ligninas. A lignina é termicamente mais resistente que a holocelulose, em virtude de possuir uma estrutura aromática e de elevada massa molecular (BARNETT e JERONIMIDIS, 2009; SANTOS et al., 2016).

A razão entre as unidades manoméricas de siringil e guaiacil presentes na lignina é, convencionalmente, usada como parâmetro de qualidade da madeira para produção de carvão vegetal (SANTOS et al., 2016). Ao contrário da siringil, a lignina do tipo guaiacil possui o 5° carbono do anel fenilpropano livre para ligações com outros anéis, o que confere uma estrutura mais condensada e, portanto, mais difícil de se romper. Desse modo, quando o objetivo é a produção de carvão vegetal, é preferível madeira com uma menor relação siringil/guaiacil (CASTRO, 2011). A razão siringil/guaiacil observada nas madeiras de eucalipto pode variar de 0,5 a 5,0 (CARVALHO, 2002; GUTIÉRREZ et al., 2006; SANTOS et al., 2016).

A madeira contém ainda extrativos e os minerais, que em sua maioria, são metabólitos secundários que desempenham funções de proteção contra agentes patogênicos e outros ataques bióticos, o que confere maior durabilidade à madeira (BARNETT e JERONIMIDIS, 2009). Entre esses compostos estão incluídos: polifenóis, óleos, gorduras, gomas, resinas, ceras e amidos (SANTOS, 2010).

O teor de extrativos totais da madeira constitui importante parâmetro a ser considerado na seleção de material genético destinados a produção de carvão vegetal siderúrgico. Pois a elevada quantidade de extrativos da madeira é prejudicial à produção de carvão vegetal, diminuindo o rendimento gravimétrico em carvão, em decorrência da degradação dessas substâncias a baixas temperaturas (VALENTE, 2017). Portanto, para a produção de carvão vegetal, a madeira com elevados teores de extrativos não é indicada (CASTRO, 2011). No entanto, os extrativos de natureza fenólica, por serem ricos em carbono, contribuem para o maior poder calorífico da madeira. Quando esses não são degradados durante a carbonização, podem colaborar para o poder calorífico do carvão e rendimento gravimétrico (FREDERICO, 2009). Os minerais são constituintes inorgânicos que não contribuem na combustão da madeira, ao contrário, em teores elevados acarretam na produção de carvão vegetal com grande quantidade de cinzas, o que é prejudicial para o uso siderúrgico (NEVES, 2012). Dessa forma, o ideal é que o teor de inorgânicos da madeira seja inferior a 1 %.

As dimensões das fibras e poros são importantes para seleção de genótipos para produção de carvão vegetal. Madeiras ricas em fibras de fração parede espessas tem elevada densidade básica, ou seja, são recomendadas para geração de carvão vegetal (PAULA, 2005; SANTOS, 2010). Segundo Pereira et al. (2016), é recomendado que a quantidade de espaços vazios, equivalente ao lume das fibras e vasos, seja a menor possível.

Outra característica anatômica importante é a relação cerne/alburno. Na produção de carvão vegetal, madeiras com maior relação cerne/alburno proporcionam o aumento na geração de finos. Pois uma maior área de cerne representa um maior caminho obstruído que os gases liberados durante a carbonização deverão percorrer, provocando o rompimento de células e elevando o teor de finos do carvão (PEREIRA, 2012).

Outro parâmetro importante que deve ser levado em conta ao utilizar uma madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico, é a sua composição elementar. Madeiras destinadas a energia devem conter menores quantidade de oxigênio e elevados teores de carbono e hidrogênio, pois estes componentes elementares tem correlações diretas com o poder calorífico da biomassa vegetal (LOUREIRO et al., 2019).

Segundo Protásio et al. (2011), baixos valores de hidrogênio na composição da madeira resultam em uma alta relação C/H, fato este indesejável quando visa à produção de energia devido a diminuição drásticas do poder calorífico. O carvão vegetal com maior poder calorífico proporciona, especialmente para o emprego siderúrgico, menor consumo de insumo redutor, considerando uma mesma produtividade (SANTOS et al., 2016). Por esse motivo, maiores porcentagens de lignina na madeira proporcionam, a vantagem de se utilizar madeira para carbonização com a possibilidade de se obter carvão com maiores teores de carbono. Isso, em virtude de a lignina possuir porcentagens consideráveis de carbono elementar em sua composição. Além de possuir maior resistência à degradação, se comparados aos demais constituintes químicos da madeira (SANTOS et al., 2016).

2.2. Madeira de *Corymbia* para produção de carvão vegetal

As espécies do gênero *Corymbia*, como *C. citriodora*, *C. torelliana*, *C. maculata*, *C. nesophila*, e seus híbridos interespecíficos, estão sendo estudadas em diversos programas de melhoramento, com o objetivo de obter clones produtivos e tolerantes aos fatores bióticos e abióticos que assolam a eucaliptocultura (VALENTE 2017; PERES et al., 2019).

O atual interesse das empresas florestais por estas espécies é justificado pela qualidade de sua madeira que é adequada a diferentes finalidades (ASSIS, 2014). Porém, diferente do que ocorre para a madeira de *Eucalyptus*, características da madeira de relevância para produção de carvão vegetal siderúrgico, até o momento são pouco estudadas para a madeira de *Corymbia*, tais como: relação siringil/guaiacil, relação cerne/alburno, tempo de secagem, índice de cristalinidade, composição química elementar, entre outras. Deste modo, são necessários mais estudos com a madeira de *Corymbia* para que saibamos o real potencial deste gênero para produção de carvão vegetal.

Apesar disso, é possível encontrar informações sobre importantes características da madeira para produção de carvão, como a densidade básica, teor de lignina e teor de extrativos.

No geral, as espécies do gênero *Corymbia* alcançam, na idade de rotação (sete anos), valores superiores a 600 kg.m⁻³ (ASSIS, 2014). Enquanto a densidade

básica da madeira de clones híbridos de *Eucalyptus* é em média 493 kg.m^{-3} (DA SILVA et al., 2020). Madeiras com maior densidade básica proporcionam, dentre outros benefícios, uma maior densidade aparente e maior resistência mecânica do carvão vegetal (COUTO et al., 2015). A alta densidade básica da madeira do gênero *Corymbia* é um dos principais fatores que corroboram a sua indicação para produção de carvão vegetal siderúrgico.

Quanto ao teor de lignina, a madeira de *Corymbia* possui teor relativamente inferior ao da madeira de *Eucalyptus* (SEGURA, 2015). Isso pode ser explicado pelo fato dos principais clones de *Eucalyptus* do país terem origem em programa de melhoramento para carvão vegetal, que utiliza esta característica como padrão de seleção. (VALENTE 2017).

Contudo, a quantidade de lignina total presente em madeira de *Corymbia* estão próximas as observadas em madeiras de eucaliptos (aproximadamente 30 %) (MEDEIROS et al., 2016; VALENTE, 2017), e como o teor de lignina recomendado para a produção de carvão vegetal deve ser de pelo menos 28 %, as madeiras de *Corymbia* tem forte aptidão para esta finalidade (PEREIRA et al., 2013; VALENTE, 2017).

Ao que se refere ao teor de extrativos na madeira de híbridos de *Corymbia* apresenta grande variabilidade, podendo apresentar baixos e altos teores. Segura (2015), avaliou o teor de extrativo na madeira de quatro híbridos de *Corymbia* aos 7 anos e observou uma variação de 2,38 e 9,81%. Enquanto Valente (2017) pôde observar uma variação de 2,76 a 6,04% ao avaliar o teor de extrativo na madeira de 12 clones híbridos de *Corymbia* (*C. torelliana* x *C. citriodora* e *C. citriodora* x *C. torelliana*) aos 5,75 anos. Tal variação nos teores de extrativo na madeira de *Corymbia* sugere que existe variação genética para essa característica o que permite a seleção de matérias com menores valores. O baixo teor de extrativos na madeira de alguns clones híbridos interespecíficos de *Corymbia* é outra característica que corrobora sua destinação para produção de carvão vegetal siderúrgico.

2.3. Propriedades do carvão vegetal para produção de ferro gusa

Historicamente, o uso da madeira no Brasil visando à geração de energia tem sido relacionado à produção de carvão vegetal, em decorrência da demanda existente pelo produto junto ao setor siderúrgico (SANTOS et al., 2011).

As propriedades do carvão vegetal tem alta variabilidade, pois são influenciadas pelas propriedades da madeira e pela tecnologia empregada no processo de carbonização. Logo, devemos considerar as diferentes propriedades e suas variações nas diversas utilizações (PEREIRA et al., 2013). No entanto, algumas propriedades são essenciais para o uso siderúrgico, entre elas podemos destacar: densidade, poder calorífico superior, resistência mecânica ou friabilidade, umidade e composição química imediata (OLIVEIRA et al., 2010).

Nos altos-fornos, o carvão vegetal tem função de fornecer carbono e energia para redução do minério de ferro, além de atuar como estrutura de sustentação da carga de minério. Dessa maneira, é fundamental que o carvão vegetal possua propriedades adequadas a fim de garantir a produtividade e a qualidade do produto final (FIGUEIRÓ et al., 2019).

Na Tabela 1 são apresentados os valores desejáveis de cada caractere do carvão vegetal para utilização do setor siderúrgico.

A heterogeneidade das propriedades do carvão vegetal interfere na produtividade de um alto-forno a carvão vegetal e torna suas operações mais complexas (ISBAEX, 2018). Por esse motivo, o conhecimento sobre essas propriedades é importante para obter maiores eficiências nos altos-fornos e redução nos custos de produção do ferro gusa em siderúrgicas a carvão vegetal.

Ao que diz respeito às propriedades químicas do carvão vegetal siderúrgico, o conhecimento acerca da composição químicas imediata é essencial na avaliação do potencial energético do redutor. A composição química imediata corresponde ao conteúdo percentual de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade na massa de carvão vegetal (SILVA, at al., 2018).

Tabela 1 – Propriedades do carvão vegetal e coque para utilização em siderúrgica

Propriedade	Unidade	Carvão Vegetal	Coque	Carvão Vegetal: Preferencial
Carbono Fixo	%	70 - 80	≅ 88	75 - 80
Materiais Voláteis	%	25 - 35	≅ 1	Máx. 25
Umidade	%	1 - 6	1 – 2	Máx. 4
Cinzas	%	0,5 - 4	10 – 12	Máx. 1
Enxofre	%	0,03 - 0,1	0,45 – 0,7	Máx. 0,03
Resistência a Compressão	Kg cm ⁻²	10 - 80	130 - 160	Min. 30
Granulometria	mm	9 - 100	25 – 75	40 - 50
Densidade	Kg m ⁻³	180 - 350	550	Min. 250

Fonte: Santos, 2008

O carbono fixo é um dos mais importantes indicadores de qualidade do carvão vegetal como termo redutor na siderurgia e representa a quantidade de carbono presente no carvão. Maiores percentuais de carbono fixo promovem maior produtividade nos altos-fornos para a mesma carga de carvão vegetal. Entretanto, teores muito elevados causam maior degradação térmica, o que diminui o rendimento em carvão vegetal, além de reduzir a resistência mecânica do material combustível (SANTOS, 2008). Valores entre 70 e 75 % de carbono fixo são indicados pela literatura como desejáveis para a utilização do carvão vegetal como um termo redutor siderúrgico (SANTOS et al., 2016; CARNEIRO et al., 2017).

Os materiais voláteis podem ser definidos como substâncias que são despreendidas da madeira como gases durante a carbonização e/ou queima do carvão (BARCELLOS, 2007). Dessa forma, os materiais voláteis influenciam na composição do gás do alto forno, o que reflete diretamente no seu poder calorífico, devido ao teor elevado de hidrogênio e hidrocarbonetos (SILVA e QUINTÃO, 1991). Além disso, maiores teores de materiais voláteis significam menores teores de carbono fixo, comprometendo a eficiência do carvão vegetal no alto-forno (FIGUEIRÓ et al., 2019). Tanto os teores de carbono fixo quanto de materiais voláteis são sensivelmente influenciados pela temperatura final e taxa de aquecimento do sistema de conversão (OLIVEIRA et al., 2010).

A cinza é um resíduo mineral proveniente dos componentes minerais do lenho e da casca. A presença de cinzas no carvão vegetal deve ser a menor possível, pois compromete a qualidade do ferro-gusa, reduzindo o seu poder calorífico e promovendo formações de trincas e fissuras. Formam também incrustações nos equipamentos e tubulações (ASSIS et al., 2012; FROEHLICH e MOURA, 2017).

O carvão vegetal possui baixa higroscopicidade com relação a madeira, no entanto, mesmo com baixos teores de umidade, a presença de água é extremamente prejudicial à operação no alto-forno, provocando perda de calor, aumentando o consumo específico de carbono e diminuindo a resistência do carvão vegetal (MORAIS, et al., 2005). De acordo com as especificações siderúrgicas, a variação da umidade do carvão como termo redutor deve variar de 1 a 6 %, sendo 4 % o valor médio referencial.

Ao que diz respeito às propriedades físicas do carvão vegetal, densidade e granulometria se destacam. Sabemos que quanto maior a densidade do carvão vegetal, maior será a sua resistência mecânica e maiores serão os estoques energéticos e de carbono fixo (PROTÁSIO et al., 2013). Além disso, maior densidade do carvão vegetal implica em maior utilização do volume dos altos-fornos siderúrgicos (PICANCIO et al., 2018).

A granulometria do carvão vegetal é uma característica física fundamental que compõe a estrutura permeabilizante entre as camadas de minério (ISABEX, 2018). Carvão vegetal com menores granulometrias acarreta maior ocupação dos espaços vazios entre as peças de carvão, podendo influenciar diretamente sua densidade a granel, e na redução da permeabilidade no alto-forno. Essa redução da permeabilidade dificulta a passagem dos gases pela carga de carvão vegetal durante o processo de redução do minério. Esse fenômeno pode causar uma série de problemas dentro do alto-forno. Um dos principais é o aumento excessivo da pressão do sistema, podendo levar a interrupção do processo para evitar possíveis acidentes (FIGUEIRÓ et al., 2019).

Ao que diz respeito as propriedades mecânicas do carvão vegetal para produção de ferro gusa, a sua resistência mecânica é destaque. A resistência mecânica do carvão vegetal tem implicações diretas sobre a sua granulometria, pois um carvão menos resistente degrada com maior facilidade, diminuindo seu tamanho médio no interior do alto forno (ISABEX, 2018). Durante as movimentações fora e

dentro dos altos-fornos, ao se utilizar carvões de baixa resistência, umidade elevada e alto teor de voláteis, estes tendem a gerar finos com mais facilidade acarretando problemas de permeabilidade da carga. (PEREIRA, 2012).

2.4. Diretrizes estratégicas de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico

Na busca do pleno abastecimento de carvão vegetal nas siderúrgicas, as empresas investem em programas de melhoramento genético florestal (PMGF) robustos. Isso na perspectiva de aumentar a produtividade, qualidade e capacidade de superar os desafios bióticos e abióticos enfrentados por suas florestas, as empresas do setor florestal (VALENTE, 2017).

A forma mais eficiente para superar os desafios florestais por meio de programas de melhoramento genético florestal é a combinação da técnica de hibridação e clonagem de indivíduos superiores, pois tem proporcionado o aumento da produtividade das florestas plantadas brasileiras (ASSIS, 2014).

Para a condução de um programa de melhoramento genético florestal eficiente é importante que suas diretrizes estejam bem descritas e de acordo com o produto final e os mercados que a empresa deseja atingir. Para isso os direcionadores devem atender a área florestal, industrial e comercial, e devendo ser estabelecidas por foco de atuação. Onde, cada foco teve ter objetivos bem definidos e metas claras e factíveis. As diretrizes contribuem para que um programa de melhoramento tenha sucesso, pois o norteia e o alinha com os objetivos estratégicos de curto, médio e longo prazos da empresa (SANTOS, 2017).

Sabemos que o estabelecimento de diretrizes de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico (PGMF-CVS), difere em função do tipo de empresa. Em empresas independentes, que comercializam carvão vegetal siderúrgico, as diretrizes estratégicas do PGMF contemplam os focos florestal, industrial e comercial. Já empresas integradas, onde a produção de carvão vegetal e ferro gusa é própria, as diretrizes estratégicas do programa contemplam os focos florestal, industrial – carvão vegetal e industrial – ferro gusa.

Diretrizes de PMGF-CVS não são encontradas de forma clara na literatura, contudo, com base nas informações relatadas por Carneiro et al. (2013), Vital et. al (2013), Assis (2014), Trugilho (2014), CGEE (2015), Santos et al. (2017), Valente (2017), Instituto Aço Brasil (2018), e Indústria Brasileira de Árvores (2019), são apresentados alguns exemplos de diretrizes estratégicas para um PMGF-CVS de empresas integradas, organizadas por focos de atuação na Tabela 2.

O melhorista de um PMGF-CVS deve manusear grande quantidade de variáveis para que possam indicar clones para plantio comercial que estejam verticalizados com as estratégias de produção da empresa e para facilitar tal indicação podemos utilizar a metodologia de índices de seleção.

Outro fato que reitera a necessidade da criação de índices de seleção verticalizados com as diretrizes de um PMGF-CVS, é que a seleção de clones superiores geralmente é realizada apenas por meio de características dendrométricas, principalmente quando se realiza seleção precoce, e esse procedimento não garantiu a seleção de genótipos com características tecnológicas desejadas para usos específicos (BOTREL et. al, 2010).

Deste modo, é estratégico a criação de índices de seleção, que sejam função da qualidade e produtividade da matéria-prima e do produto, e que atendam os focos das diretrizes florestal, industrial e comercial, de um programa de melhoramento genético florestal.

Tabela 2 – Exemplo de diretrizes estratégicas de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico

Focos	Orientação	Diretrizes Estratégicas
Florestal	Aumentar	a) densidade básica da madeira; b) produção volumétrica de madeira sem casca; c) tolerância a fatores abióticos: seca, vento, geada, entre outros; d) tolerância a fatores bióticos: pragas e doenças; e) desrama natural; f) predisposição à propagação vegetativa;
	Diminuir	a) tempo de secagem em campo; b) conicidade do tronco; c) porcentagem de casca;
Industrial – carvão vegetal	Aumentar	a) densidade básica da madeira; b) densidade do carvão vegetal; c) teor de lignina na madeira; d) índice de cristalinidade da madeira; e) rendimento gravimétrico em carvão vegetal; f) porcentagem de carvão vegetal com granulometria maior que 25mm; g) resistência mecânica do carvão vegetal;
	Diminuir	a) consumo de madeira para produção de carvão vegetal; b) heterogeneidade do carvão vegetal; c) relação siringil/guaiacil; d) relação cerne/alburno; e) teor de finos de carvão vegetal; f) umidade do carvão vegetal;
Industrial – ferro gusa	Aumentar	a) densidade do carvão vegetal; b) resistência mecânica do carvão vegetal; c) rendimento do carvão vegetal em carbono fixo; d) porcentagem de carvão vegetal com granulometria maior que 25mm;
	Diminuir	a) consumo de carvão vegetal para produção de ferro gusa; b) heterogeneidade do carvão vegetal; c) umidade do carvão vegetal d) teor de finos de carvão vegetal;

Fonte: o autor

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Teste genético-estatístico

O teste clonal avaliado nesta pesquisa foi de híbridos do gênero *Corymbia* (*C. torelliana* x *C. citriodora*) que pertence à empresa ArcelorMittal BioFlorestas, uma empresa do grupo ArcelorMittal. Está localizado no município de Bom Despacho, Minas Gerais, situado na região centro-oeste do estado. A região apresenta vegetação típica do bioma cerrado, solos predominantes do tipo latossolo vermelho com topografia plana. A precipitação média anual é de 1300 mm e temperaturas médias máximas e mínimas anuais de 33,7 e 10,7 °C, respectivamente (AMBio, 2019).

As mudas utilizadas para implantação do teste foram produzidas por meio da técnica de miniestaquia e conduzidas seguindo os manejos habituais de um viveiro clonal. O preparo de solo e manutenções na condução da floresta seguiram as recomendações comerciais da empresa para o desenvolvimento de seus plantios comerciais.

O teste clonal foi implantado, em 17 de maio de 2016, com o objetivo de indicar clones híbridos do gênero *Corymbia* para implantação de teste clonal ampliado e/ou plantio comercial para produção de carvão vegetal. Foram testados 32 clones híbridos de espécies do gênero *Corymbia* e 5 clones comerciais do gênero *Eucalyptus* (AEC 144, AEC 1528, AEC 2475, VM 04, AEC 2233) foram utilizados como testemunha (TABELA 3). O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso (DBC), com 37 tratamentos, 6 plantas por parcelas, e 10 blocos, totalizando 60 repetições por clone e 2220 árvores no experimento.

O espaçamento utilizado no plantio foi 4,5 x 2m. O preparo de solo, manutenções e dosagens de adubações seguiram os métodos utilizados para plantios comerciais da empresa. A recomendação de adubação contou com as seguintes aplicações: a) no pré-plantio: 2000 kg/ha de Agrosilício 36% de CaO + 9% de MgO; b) no plantio: 443 kg/ha de Basifós Forest 0,3% de B + 0,2% de Zn + 0,2% de Cu; c) na primeira cobertura (6 meses após o plantio): 170 kg /ha de NPK 18-00-18 + 1% de B + 4% de S; d) na segunda cobertura (1 ano após o plantio): 210 kg/ha de NPK 150030 + 0,7% de B + 6% de S; e) na terceira cobertura (2 anos após o plantio): 210 kg/ha de NPK 150030 + 0,7% de B + 6% de S.

Tabela 3 – Identificação dos clones dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* avaliados no teste clonal

Clone	Espécies/Híbridos	Clone	Espécies/Híbridos
4736	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4800	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4740	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4813	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4741	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4819	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4742	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4821	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4751	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4822	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4758	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4838	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4762	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4839	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4765	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	4844	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4773	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AM 01	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4775	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AM 02	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4777	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AM 03	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4778	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	M 07	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4779	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	M 04	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>
4782	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AEC 144	Híbrido espontâneo de <i>E. urophylla</i>
4784	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AEC 1528	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>
4789	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AEC 2475	<i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i>
4790	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	VM 04	<i>E. urophylla</i> x <i>E. grandis</i>
4794	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	AEC 2233	<i>E. urophylla</i> x (<i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>)
4797	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>		

Fonte: o autor

3.2. Pré-seleção de materiais genéticos

Para evitar o desprendimento de tempo e recurso com avaliações de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones que tem baixa taxa de crescimento, uma pré-seleção foi realizada com o objetivo de identificar os 10 clones de maior volume médio individual de madeira com casca (VMI), aos 36 meses de idade.

Diante disso, foram mensuradas a circunferência do fuste a altura do peito (CAP - 1,30 metros de altura), com o auxílio de uma fita métrica, e a altura total (Alt),

por meio de um clinômetro, de todas as árvores do teste. De posse dessas informações foram calculados o diâmetro a altura do peito (DAP), em centímetros, e o volume com casca (Vol_{cc}), em metro cúbico, para cada clone. O DAP foi estimado por meio da Equação 1. O volume com casca foi estimado por meio da equação de Schumacher e Hall (1933) (Equação 2).

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (1)$$

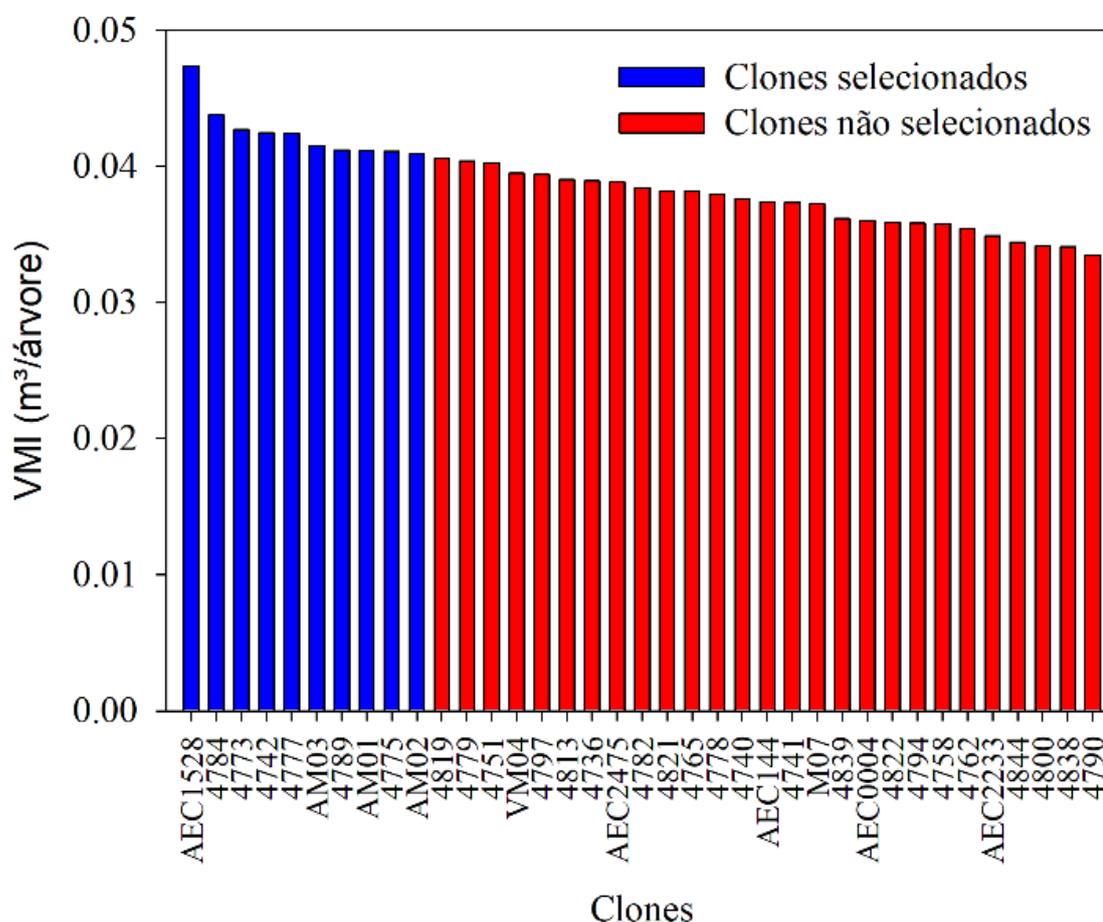
Em que: DAP: diâmetro do fuste a altura do peito, em metro (m); CAP: circunferência do fuste a altura do peito, em metro (m); e $\pi = 3,142$;

$$Vol_{cc} = \left(\frac{\pi \times DAP^2}{40000} \right) \times Alt \times f \quad (2)$$

Em que: Vol_{cc} : volume com casca, em metro cúbico (m^3); DAP: diâmetro do fuste a altura do peito, em metro (m); $\pi = 3,142$; Alt: altura total, em metro (m); e f : fator de forma do fuste, estabelecido como sendo 0,5.

Assim sendo, apenas os clones: AEC 1528, 4784, 4773, 4742, 4777, AM03, 4789, AM01, 4775, e AM02 foram considerados na seleção genética de clones que atendam os focos florestal, industrial e comercial de um programa de melhoramento genético florestal visando a produção de carvão vegetal. (FIGURA 1). Em que, apenas o clone AEC 1528, é do gênero *Eucalyptus* e foi utilizado como testemunha.

Figura 1 – Volume médio individual de clones do gênero *Corymbia* e *Eucalyptus* avaliados aos 36 meses de idade em teste clonal localizado em Bom Despacho-MG



Fonte: o autor

3.3. Variáveis utilizadas para a estimação de índices de seleção estratégicos

As variáveis densidade básica da madeira (D_b), incremento médio anual em volume de madeira sem casca (IMA_{vol-sc}), rendimento gravimétrico em carvão vegetal (RG_{cv}), densidade a granel do carvão vegetal (D_g), e teor de carbono fixo do carvão vegetal (C_f), foram utilizadas para a estimação de índices de seleção estratégicos para a identificação de clones superiores que atendam os focos florestal, industrial e comercial de um PMGF- CVS.

Para determinação dessas variáveis foram utilizadas cinco árvores de cada clone pré-selecionado, sendo estas a primeira árvore dos cinco primeiros blocos do teste clonal. Destas, uma árvore de cada clone foi utilizada par estimação da umidade da madeira no momento da carbonização. Assim, o delineamento experimental

utilizado para a realização da seleção genética nesta pesquisa, foi o de blocos ao acaso, com 4 repetições e uma planta por parcela (*single tree plot*), totalizando 40 indivíduos na avaliação.

3.4. Incremento médio anual em volume de madeira sem casca (IMA_{vol-sc})

Para obtenção do incremento médio anual em volume de madeira sem casca (IMA_{vol-sc}), o volume real de madeira sem casca das cinco árvores de cada clone, foi estimado por meio de cubagem, utilizando a expressão matemática de Smalian (Equação 3), método mais utilizado para cubagem de árvores (REGO et al., 2019).

As árvores foram abatidas, deixando o toco (cepa) com uma altura de aproximadamente 10,0 cm. Foi mensurada a circunferência do fuste nas seguintes posições: 0,1 m; 0,3 m; 0,6 m; 1,3 m, sendo que a partir dessa última posição, a circunferência foi mensurada a cada 1 metro de distância até chegar a 8,0 cm de diâmetro (aproximadamente 25 cm de circunferência) e quando última seção não apresentava a circunferência mínima, mensurávamos a circunferência na sessão anterior. Em cada seção foram medidas ainda a espessura da casca, com auxílio de um paquímetro, e um facão, para retirar a casca a ser medida (FIGURA 2).

$$Vol_{sc} = \left(\frac{AS_1 - AS_2}{2} \right) \times L \quad (3)$$

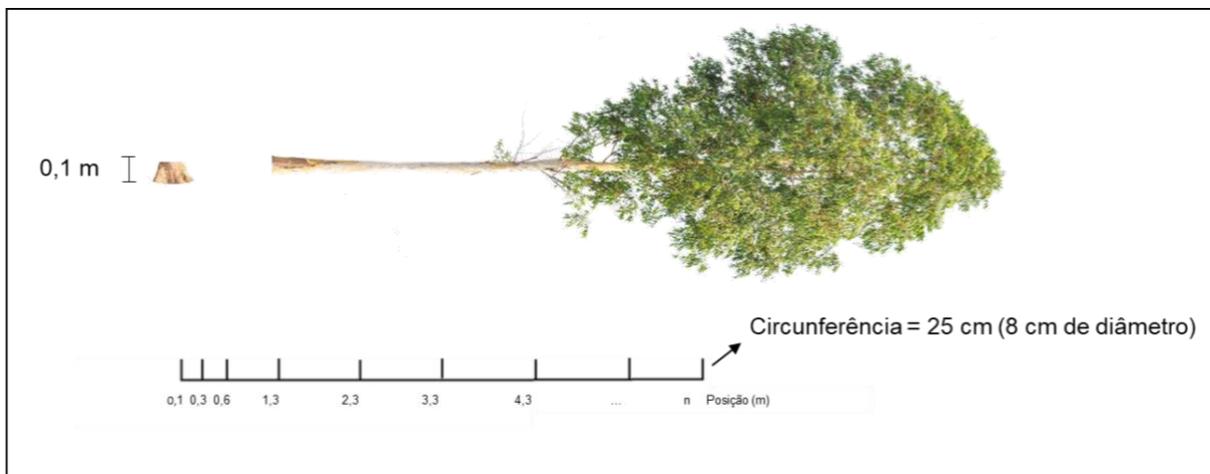
Em que: Vol_{sc} : volume sem casca, em metros cúbicos (m^3); AS_1 e AS_2 : áreas seccionais obtidas das extremidades de cada seção do fuste, em metros quadrados (m^2); e L : comprimento da seção, em metro (m).

O valor das áreas seccionais foi obtido por meio da Equação 4.

$$AS = \frac{(\pi \times d^2)}{4} \quad (4)$$

Em que: AS : área seccional da extremidade, em metros quadrados (m^2); π : 3,142; e d : diâmetro da seção, em metro (m).

Figura 2 – Cubagem rigorosa das árvores dos 10 clones que apresentaram os maiores valores de volume com casca aos 36 meses em teste clonal instalado em Bom Despacho - MG

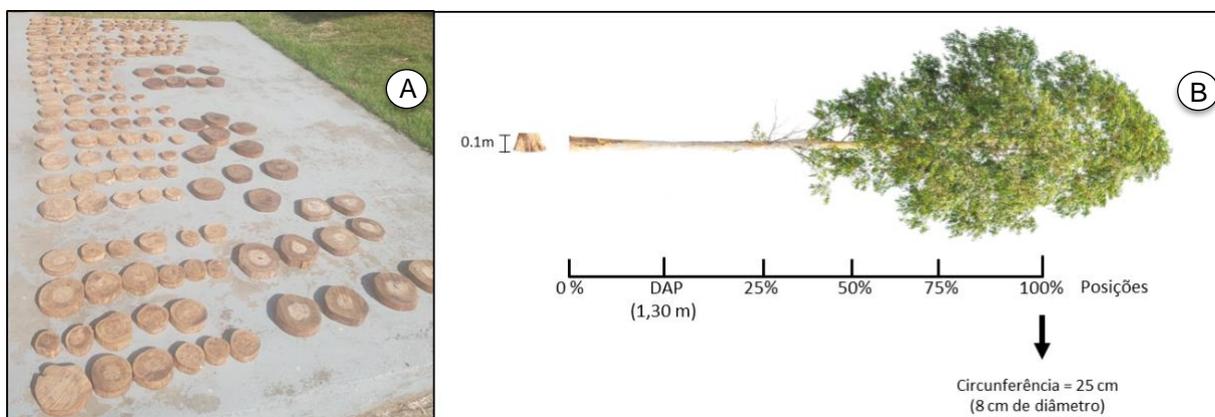


Fonte: o autor.

3.5. Densidade básica da madeira

Para determinação da densidade básica da madeira foi retirado de cada árvore seis discos de 5 cm de espessura, correspondentes a 0%, DAP (diâmetro a altura do peito, que corresponde a 1,3 m de altura do fuste), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial do fuste, até 8 cm de diâmetro (FIGURA 3).

Figura 3 – Discos de madeira (A) e posições em que foram retirados (B) em árvore avaliada aos 36 meses de idade em teste clonal instalado em Bom Despacho - MG



Fonte: o autor.

As amostras foram enviadas para o Laboratório de Qualidade da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, onde a densidade básica da madeira foi determinada por meio de discos inteiros sem casca, pelo método de imersão em água, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Os discos foram imersos em água durante 70 dias, até a sua saturação completa por água, para determinação do seu volume saturado (Figura 4). Posteriormente foram acondicionados em estufa de circulação forçada à 103°C (± 2) durante 10 dias até atingirem peso constante, com variação máxima de 0,5%, para determinação de suas massas secas. A Densidade básica da madeira foi obtida por meio da Equação 5.

$$Db = 100 * \frac{M.seca}{V.saturado} \quad (5)$$

Em que: Db: Densidade básica da madeira, em quilograma por metro cúbico (Kg.cm³); M.seca: Massa seca, em quilograma (Kg); V.saturado: Volume saturado, em metros cúbicos (m³).

Figura 4 – Determinação do volume dos discos de madeira saturados em água, para cada árvore avaliada aos 36 meses de idade em teste clonal instalado em Bom Despacho - MG



Fonte: o autor.

3.6. Secagem da madeira

As árvores foram seccionadas em toretes com 75 cm de comprimento e transportadas para o Centro de Pesquisa e Melhoramento Genético Florestal da empresa ArcelorMittal BioFlorestas. Todos os toretes foram devidamente identificados a nível de clone e repetição, e alocados sobre canteiros suspensos de fios de aço, de modo a favorecer a secagem, onde permaneceram durante 60 dias para secagem natural (FIGURA 5).

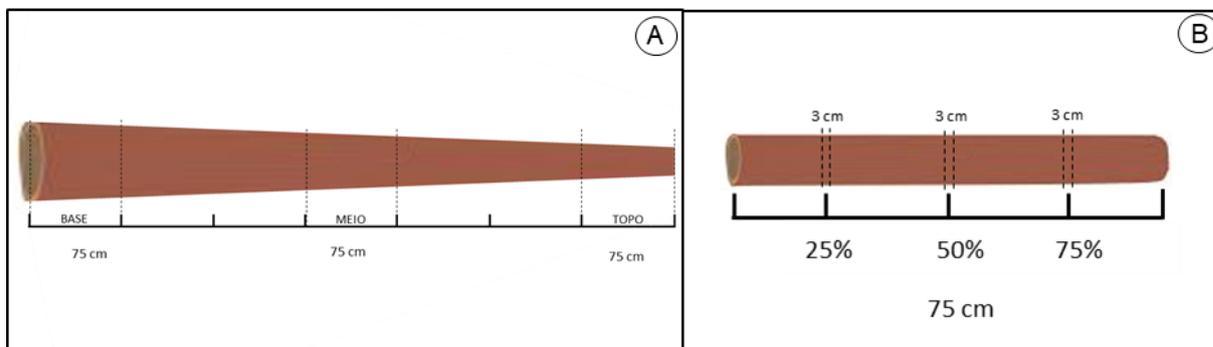
Figura 5 – Disposição das toras de madeira para secagem



Fonte: o autor.

Ao final do tempo de secagem, uma árvore de cada clone foi utilizada para determinar o teor de umidade da madeira destes no momento da carbonização. Para isso, foram utilizados 3 toretes de cada árvore, estes localizados na base, meio e ponta do fuste comercial. Em cada torete foram retirados três discos nas posições de 25, 50 e 75% do comprimento do torete. Portanto, foram utilizados 9 discos por árvore para a determinação do teor de umidade de cada clone (Figura 6).

Figura 6 – Posição dos toretes em relação ao fuste, que foram utilizados para determinação do teor de umidade da madeira (A) e posições em que os discos foram retirados nos torestes, em relação ao comprimento deles.



Fonte: o autor.

A umidade foi determinada conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003), por meio de cunhas opostas de cada disco de madeira retirado ao longo do fuste. As cunhas foram pesadas em balança analítica, com precisão de 0,0001 gramas, para determinação de sua massa úmida e posteriormente levadas em estufa de circulação forçada a 103+/- 2°C até peso constante, para determinação de sua massa seca. A umidade da madeira foi determinada com base em sua massa seca, por meio da Equação 6.

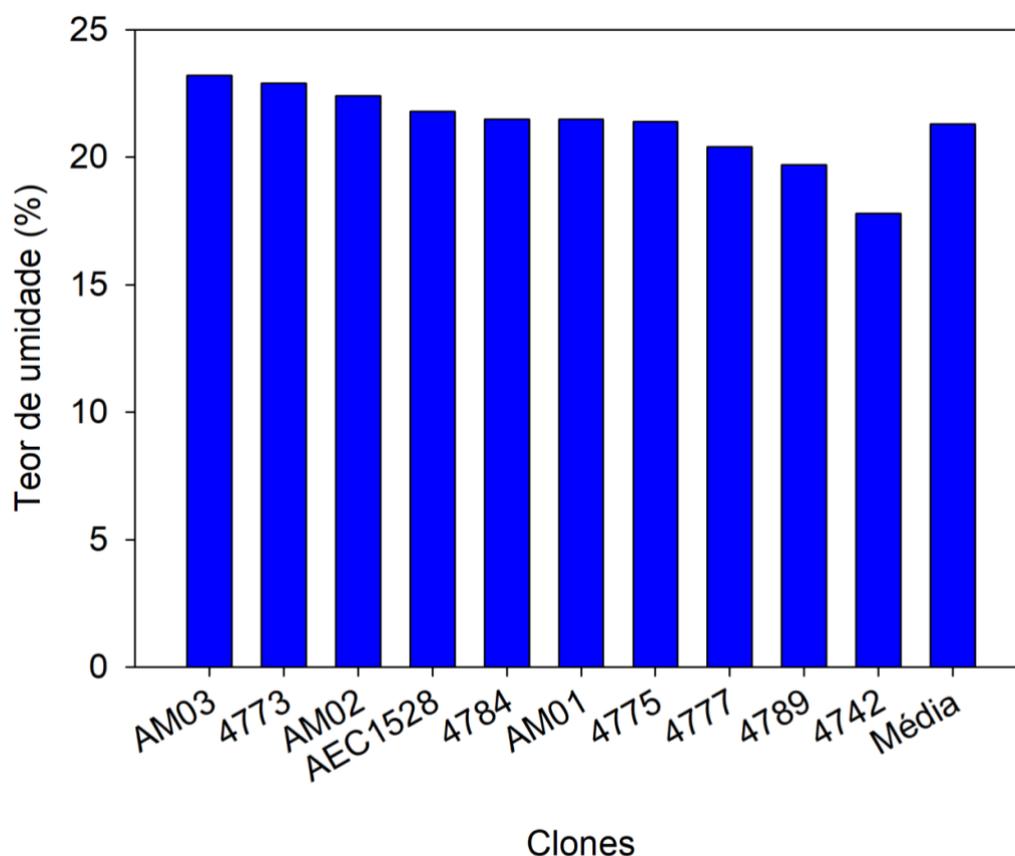
$$U\% = ((UM - MS) / MS) * 100 \quad (6)$$

Em que: U %: teor de umidade, em porcentagem (%); MU: Massa úmida da madeira, em gramas (g); e MS: Massa seca da madeira, em gramas (g).

O teor de umidade de todos os toretes no momento da carbonização, foi determinado pela ponderação dos teores de umidade estimados das cunhas ao longo do tronco, utilizando a circunferências ao quadrado da região central de cada torete como fator de ponderação.

O teor médio de umidade da madeira no momento da carbonização foi de 21,3%, sendo que a madeira com maior teor de umidade foi a do clone AM03, com 23,2% e a de menor, foi a do clone 4742, com 17,8% (FIGURA 7).

Figura 7 – Teor de umidade da madeira de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus* com 36 meses de idade após 60 dias de secagem



Fonte: o autor

3.7. Carbonização

A carbonização foi realizada na unidade de produção de carvão vegetal Buriti da empresa ArcelorMittal BioFlorestas e o processo foi realizado seguindo o procedimento operacional da mesma.

O forno utilizado é do tipo retangular, com orifícios de entrada de ar (“tatus”) nas bases das paredes, com 32 m de comprimento, 4 m de largura e 4 m de altura das paredes, e 1,27 m de flecha na cúpula, com capacidade volumétrica de enformamento do forno é de 320 m³ de madeira com casca. As paredes dos fornos são em alvenaria comum, com 10 cm de espessura, revestida externamente por uma camada de 4 cm de argamassa armada. As portas são de concreto armado, com revestimento da barra da porta de concreto refratário (FIGURA 8).

Figura 8 – Forno utilizado para as carbonizações. Vista da parede do lado direito (A) e do lado esquerdo (B) do forno.



Fonte: o autor.

Para separar o carvão vegetal proveniente das madeiras de cada respectivo clone e repetição, as mesmas foram individualizadas em recipiente metálico com capacidade de 200 litros, devidamente identificado por meio de placas de zinco contendo o nome do clone e sua repetição. Em todos os recipientes metálicos foram realizados orifícios para permitir a expansão dos gases resultantes do processo de degradação da madeira (FIGURA 9).

Figura 9 – Recipiente metálico utilizado para carbonização (A). Orifícios feitos nos recipientes (B). Placas de identificação (C). Recipiente metálico com madeira (D)

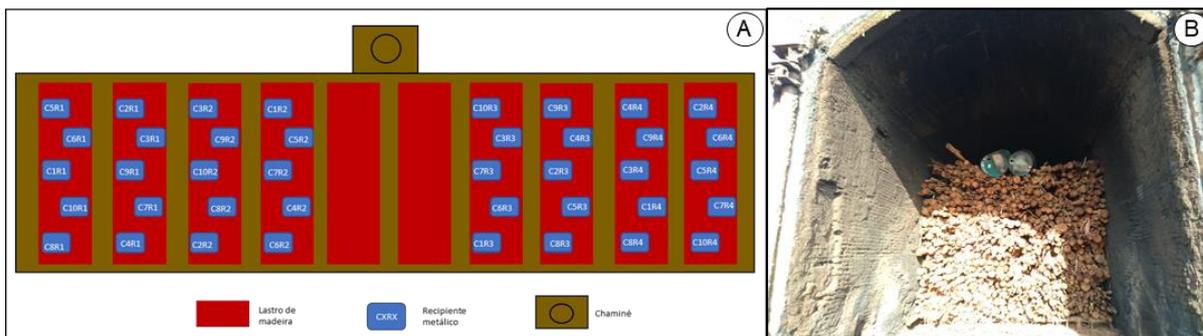


Fonte: o autor

Foram carbonizadas 4 árvores (repetições) por clone, sendo uma árvore por recipiente metálico, totalizando 40 árvores carbonizadas. Os recipientes metálicos foram e alocados sobre oito lastros de madeira no forno, sendo cinco recipientes metálicos por lastro e não utilizando os lastros do centro do forno para isso, por essa ser uma das regiões de maior variação de temperatura do forno. Durante a carga do

forno os recipientes metálicos foram aleatorizados e posicionados paralelamente aos lastros de madeira, com seus orifícios livre de obstruções (FIGURA 10)

Figura 10 – Enfornamento dos recipientes metálicos utilizados na carbonização. Croqui dos recipientes metálicos no forno (A). Alocação dos tambores sobre os lastros de madeira do forno (B).

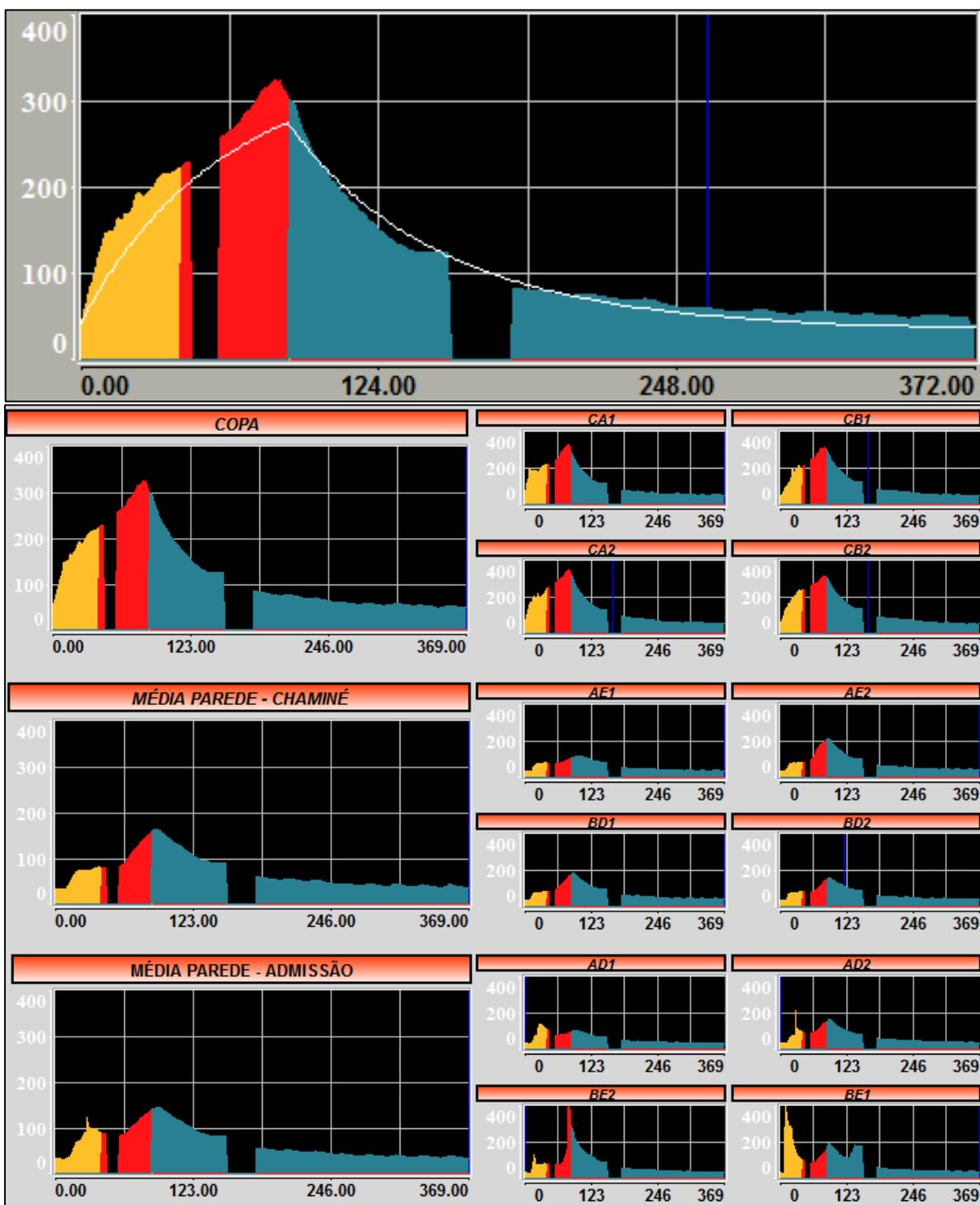


Fonte: o autor.

O processo de carbonização foi monitorado via sistema supervisório, por meio de medição automatizada de temperatura por 12 termopares. A ignição da carbonização foi dada simultaneamente pelos 8 ignitores (“tatus”). O fechamento dos ignitores foi realizado com base na temperatura média da copa, da seguinte forma: a) aos 150°C, 50% dos ignitores foram fechados. b) aos 200°C, 75% dos ignitores foram fechados. c) 250°C, 90% dos ignitores foram fechados. d) 280°C, 100% dos ignitores foram vedados.

A carbonização seguiu 94,44% da marcha estabelecida como ótima para as carbonizações realizadas pela empresa, por meio do sistema supervisório. As temperaturas médias máximas registradas na copa, parede com chaminé e parede sem chaminé, durante a carbonização foram de 325°C, 165°C e 150°C, respectivamente. A temperatura final de carbonização foi de 300°C, e a temperatura de abertura do forno foi de 38°C. O ciclo de produção do carvão vegetal durou 368 horas, sendo 87 horas de carbonização e 281 horas de resfriamento natural. (FIGURA 11).

Figura 11 – Curva da carbonização, obtida por meio do sistema supervisório, no forno em que os recipientes metálicos foram alocados.



Fonte: o autor

A retirada dos recipientes metálicos do interior do forno foi realizada por um implemento (concha) acoplado a um trator agrícola. Após descarga, os mesmos foram transportados para o Laboratório de Análises de Carvão Vegetal da empresa ArcelorMittal BioFlorestas, para realização das seguintes análises do carvão vegetal produzido: umidade, rendimento gravimétrico em carvão vegetal, teor de finos, densidade a granel, e carbono fixo

3.8. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal

O rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi determinado por meio da relação entre toda a massa seca de carvão vegetal e toda a massa seca de madeira enfiada, por recipiente metálico, conforme a Equação 7.

$$RG = \left[\left(\frac{MSC}{MSM} \right) * 100 \right] \quad (7)$$

Em que: RG = rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em porcentagem (%); MSC= massa seca total de carvão vegetal por recipiente metálico, em quilogramas (Kg), obtida por meio da umidade do carvão vegetal em base seca; MSM= Massa seca total de madeira por recipiente metálico, em quilogramas (Kg), obtida por meio da umidade da madeira em base seca.

3.9. Teor de finos do carvão vegetal

O teor de finos do carvão foi calculado por meio da razão entre a massa total de carvão vegetal que passou pela peneira de 9,52 mm, por recipiente metálico, e a massa total de carvão vegetal, por recipiente metálico.

3.10. Densidade a granel do carvão vegetal

Para realização das análises de densidade a granel carvão vegetal, o carvão vegetal obtido em cada recipiente metálico foi amostrado, por meio de sua disposição sobre lona plástica, onde foi homogeneizado e quarteado (dividido em 4 partes),

sendo duas partes opostas utilizadas para a retirada de uma alíquota de 20 litros de carvão vegetal (FIGURA 12).

Figura 12 – Amostragem do carvão vegetal obtido. Volume de carvão vegetal empilhado (A); Pilha de carvão vegetal quarteada (B); Mistura de carvão vegetal de partes opostas (C); e amostra de carvão vegetal (D)



Fonte: o autor

Após a amostragem, a densidade a granel foi determinada seguindo as recomendações da norma NBR 6922 (ABNT, 1981) adaptada, para o volume do recipiente de um recipiente com $0,027 \text{ m}^3$.

3.11. Carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo foi realizada com base em uma amostra composta de 4% do carvão vegetal proveniente de cada peneira do ensaio de classificação granulométrica (63 mm, 37,5 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5 mm e 9,5 mm) do carvão vegetal, que após moída, selecionamos a fração que ficou retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh. A determinação do teor de carbono fixo foi realizada em duplicatas, seguindo os procedimentos preconizados na norma NBR 8112

(ABNT,1986), substituindo o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura para determinação do teor de cinzas foi de 750°C a 600°C.

3.12. Índices de seleção

Para selecionar materiais genéticos superiores com características que atendam os focos das diretrizes florestal, industrial-carvão vegetal, e industrial-ferro gusa de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico foram criados 5 índices fenotípicos e 1 índice genotípico de seleção, onde foi atribuído peso 1 para cada caráter utilizado para construção dos índices (TABELA 4).

Tabela – 4 Detalhamento dos 6 índices de seleção estratégicos, criados para a identificação de clones superiores que atendam os focos florestal, industrial e comercial de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico

Descrição	Atendimento	Variáveis utilizadas para estimação	Unidade de medida	Sentido de seleção
IMA _{ms}	Foco Florestal	D _b e IMA _{vol} ;	t/ha/ano	Quanto maior melhor
IMA _{cv}	Foco Florestal	D _b ; IMA _{vol} ; RG _{cv} e F;	t/ha/ano	Quanto maior melhor
IMA _{fg}	Foco Florestal	D _b ; IMA _{vol} ; RG _{cv} ; F; CF; e Ccf;	t/ha/ano	Quanto maior melhor
CMCV	Foco Industrial – Carvão Vegetal	D _b ; RG _{cv} ; e F.	m ³ /t ou t/t	Quanto menor melhor
CVFG	Foco Industrial – Ferro Gusa	Ccf; D _g ; e CF.	m ³ /t ou t/t	Quanto menor melhor
CVS	Foco Florestal; Foco Industrial – Carvão Vegetal; Foco Industrial – Ferro Gusa;	Valores genotípicos dos índices: IMA _{ms} ; IMA _{cv} ; IMA _{fg} ; CMCV e CVFG	-	Quanto menor melhor

IMA_{ms}: índice fenotípico incremento médio anual em massa seca de madeira; IMA_{cv}: índice fenotípico Incremento médio anual em carvão vegetal; IMA_{fg}: índice fenotípico Incremento médio anual em ferro gusa; CMCV: índice fenotípico consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal; CVFG: índice fenotípico consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa; CVS: índice genético carvão vegetal siderúrgico; D_b: densidade básica da madeira (Kg/m³); IMA_{vol}: incremento médio anual em volume de madeira (m³/ha/ano); RG_{cv}: rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); F: teor de finos de carvão vegetal (%); CF: teor de carbono fixo do carvão vegetal (%); Ccf: consumo específico de carbono por tonelada de ferro gusa (Kg/t); D_g: densidade a granel do carvão vegetal (Kg/m³);

3.12.1. Índices de seleção para atendimento ao foco florestal

Para selecionar indivíduos superiores que atendam as diretrizes estratégicas do foco florestal de um programa de melhoramento genético para produção de carvão vegetal siderúrgico foram criados os índices fenotípicos: Incremento Médio Anual em Massa Seca de Madeira (IMA_{ms}); Incremento Médio Anual em Carvão Vegetal (IMA_{cv}) e Incremento Médio Anual em Ferro Gusa (IMA_{fg}).

3.12.1.1. Índice fenotípico incremento médio anual em massa seca de madeira (IMA_{ms})

O IMA_{ms} é função da densidade básica da madeira e do incremento médio anual em volume de madeira e foi estimado por meio da Equação 8.

$$IMA_{ms} = \left[\frac{(D_b \times IMA_{vol})}{1000} \right] \quad (8)$$

Em que: IMA_{ms} : incremento médio anual em massa seca de madeira, em t/ha/ano; D_b : densidade básica da madeira, em Kg/m³; IMA_{vol} : incremento médio anual em volume de madeira, em m³/ ha/ano;

3.12.1.2. Índice fenotípico incremento médio anual em carvão vegetal (IMA_{cv})

O IMA_{cv} é função do incremento médio anual em massa seca de madeira, rendimento gravimétrico em carvão vegetal, e do teor de finos de carvão vegetal, e foi estimado por meio da Equação 9.

$$IMA_{cv} = \{ IMA_{ms} \times (RG/100) \times [(100 - F)/100] \} \quad (9)$$

Em que: IMA_{cv} : incremento médio anual em carvão vegetal, em t/ha/ano; IMA_{ms} : incremento médio anual em massa seca de madeira, t/ha/ano; RG: rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em %; F: teor de finos de carvão vegetal, em %.

3.12.1.3. Índice fenotípico incremento médio anual em ferro gusa (IMA_{fg})

O IMA_{fg} é função do incremento médio anual em carbono fixo e do consumo de carbono por tonelada de ferro gusa, e foi estimado por meio da Equação 10.

$$IMA_{fg} = \left[\frac{(IMA_{cf} \times 1000)}{Ccf} \right] \quad (10)$$

Em que: IMA_{fg} : incremento médio anual em ferro gusa, em t/ha/ano; IMA_{cf} : incremento médio anual em carbono fixo, t/ha/ano; Ccf : Consumo específico de carbono por tonelada de ferro gusa, em Kg/t.

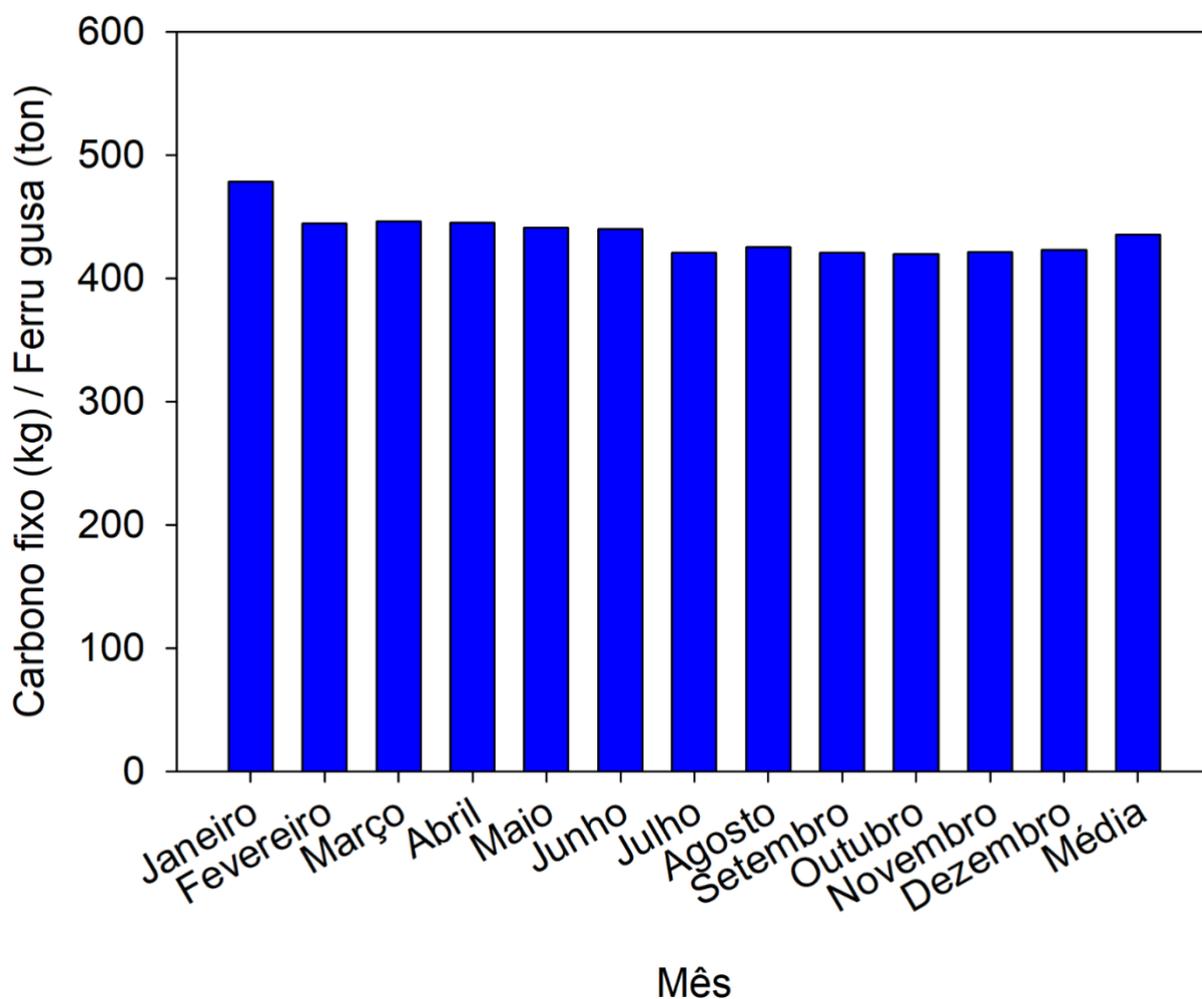
O IMA_{cf} é função do incremento médio anual em carvão vegetal e do teor de carbono fixo no carvão vegetal, e foi estimado por meio da equação 11.

$$IMA_{cf} = [IMA_{cv} \times (CF/100)] \quad (11)$$

Em que: IMA_{cf} : incremento médio anual em carbono fixo, em t/ha/ano; IMA_{cv} : Incremento médio anual em carvão vegetal, em t/ha/ano; CF : teor de carbono fixo do carvão vegetal, em %;

O valor de consumo específico de carbono por tonelada de ferro gusa (Ccf) considerado nesta pesquisa, foi de 436 kg de carbono / tonelada de ferro gusa, que se refere a média anual de Ccf , registrado pelos altos-fornos da empresa ArcelorMittal Juiz de Fora no ano de 2019, considerando apenas o consumo de carvão vegetal granular, comumente chamado de “carvão de topo” (FIGURA 13).

Figura 13 – Consumo específico de carbono por tonelada de ferro gusa, considerando consumo de carvão vegetal granular nos altos-fornos da empresa ArcelorMittal em 2019.



Fonte: ArcelorMittal Juiz de Fora

3.12.2. Índice de seleção para atendimento ao foco industrial – carvão vegetal

Para selecionar indivíduos superiores que atendam as diretrizes e metas do foco industrial-carvão vegetal de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico foi criado o índice fenotípico: Consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal (CMCV).

3.12.2.1. Índice fenotípico consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal (CMCV)

O CMCV é função da densidade básica da madeira, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e do teor de finos de carvão vegetal, e foi estimado por meio da Equação 12.

$$\text{CMCV} = \frac{1000}{\{D_b \times (\text{RG}/100) \times [(100-f)/100]\}} \quad (12)$$

Em que: CMCV: consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal, em m³/t; D_b: densidade básica da madeira, em Kg/m³; RG: rendimento gravimétrico em carvão vegetal, em %; F: teor de finos de carvão vegetal, em %.

O consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal também pode ser estimado em tonelada de madeira por tonelada de carvão vegetal (t/t), por meio da Equação 13.

$$\text{CMCV}_{t/t} = \left[\frac{\text{CMCV}_{m^3/t}}{\left(\frac{1000}{D_b}\right)} \right] \quad (13)$$

Em que: CMCV_{t/t}: consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal, em t/t; CMCV_{m³/t}: consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal, em m³/t; D_b: Densidade básica da madeira, em Kg/m³;

O CMCV utilizado nesta pesquisa foi estimado em metros cúbicos de madeira por tonelada de carvão vegetal (m³/t).

3.12.3. Índice de seleção para atendimento ao foco industrial – ferro gusa

Para selecionar indivíduos superiores que atendam as diretrizes e metas do foco industrial-ferro gusa de um programa de melhoramento genético florestal para

produção de carvão vegetal siderúrgico foi criado o índice fenotípico: Consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa (CVFG).

3.12.3.1. Índice fenotípico consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa (CVFG)

O CVFG é função do consumo de carbono por tonelada de ferro gusa, da densidade a granel e teor de carbono fixo do carvão vegetal, e foi estimado por meio da Equação 14.

$$CVFG = \left\{ \frac{C_{cf}}{[D_g \times (CF/100)]} \right\} \quad (14)$$

Em que: CVFG: consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa, em m³/t; C_{cf}: consumo específico de carbono por tonelada de ferro gusa, em Kg/t; D_g: densidade a granel do carvão, em Kg/m³; CF: teor de carbono fixo no carvão vegetal, em %.

O consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa, também pode ser estimado tonelada de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa (t/t), por meio da equação 15.

$$CVFG_{\text{ton/ton}} = \left[\frac{CVFG_{\text{m}^3/\text{ton}}}{(1000/D_g)} \right] \quad (15)$$

Em que: CVFG_{t/t}: Consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa, em t/t; CVFG_{m³/t}: Consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa, em m³/t; D_g: Densidade a granel do carvão vegetal, em Kg/m³.

O CVFG utilizado nesta pesquisa foi estimado em metros cúbicos de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa (m³/t).

3.12.4. Índice de seleção para atendimento conjunto aos focos florestal, industrial-carvão vegetal e industrial-ferro gusa

Para selecionar indivíduos superiores que atendam as diretrizes estratégicas dos focos florestal, industrial-carvão vegetal e industrial-ferro gusa de um programa de melhoramento genético florestal para produção de carvão vegetal siderúrgico foi criado o índice genético carvão vegetal siderúrgico (CVS).

3.12.4.1. Índice Genético Carvão Vegetal Siderúrgico (CVS).

O CVS visa ganhos genéticos de seleção em um agregado genotípico e foi obtido a partir da metodologia do índice do *ranking* médio (RESENDE, 2007) adaptado de Mulamba e Mock (1978), e representa a média dos valores genotípicos estimados para os índices fenotípicos IMA_{ms} , IMA_{cv} , IMA_{fg} , CMCV e CVFG, sendo atribuídos os seguintes pesos econômicos: quanto maior melhor para os índices IMA_{ms} , IMA_{cv} e IMA_{fg} , e quando menor melhor para os índices CMCV e CVFG. Sendo que quanto menor o valor dessa média, melhor colocado fica o genótipo no ranking (CRUZ et al., 2012)

Esse método permite selecionar indivíduos superiores geneticamente de forma mais equilibrada em termos de vários caracteres, pois otimiza a seleção por meio de ganhos genéticos em todos os caracteres simultaneamente (MANFIO et al., 2012).

A estimação dos valores do índice genético CSV foi realizada com o uso do software SELEGENREML/BLUP (RESENDE, 2016), por meio do modelo estatístico 101, após rodar cada uma das variáveis de interesse (IMA_{ms} , IMA_{cv} , IMA_{fg} , CMCV e CVFG) no modelo 20.

3.13. Análises estatísticas

As estimativas dos componentes de variância e predição dos valores e ganhos genotípicos foram realizadas com base na metodologia de modelos mistos, pelo procedimento REML/BLUP (Máxima Verossimilhança Restrita / Melhor Predição Linear não Viesada) (Resende, 2007), mediante uso do software SELEGEN

REML/BLUP (RESENDE, 2016), rodando o modelo estatístico 20, descrito na Equação 16.

$$y = Xr + Zg + e \quad (16)$$

Em que: y é o vetor de dados; r é o vetor dos efeitos de repetição (assumidos como fixos) somados à média geral; g é o vetor dos efeitos genotípicos (assumidos como aleatórios); e é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios); X : matriz de incidência para os efeitos da repetição; e Z : matriz de incidência para os genotípicos.

Distribuições e estruturas de médias e variâncias:

$$E \begin{bmatrix} y \\ g \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Xr \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad Var \begin{bmatrix} g \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I\sigma_g^2 & 0 \\ 0 & I\sigma_e^2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

Equações de modelo misto:

$$\begin{bmatrix} X'X & X'Z \\ Z'X & Z'Z + \lambda_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'y \\ Z'y \end{bmatrix} \quad (18)$$

em que:

$$\lambda_1 = \frac{\sigma_e^2}{\sigma_g^2} = \frac{1-h_g^2}{h_g^2}; \quad (19)$$

Herdabilidade individual no sentido amplo de parcelas individuais:

$$h_g^2 = \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_e^2} = \quad (20)$$

$\sigma_g^2 =$ variância genotípica;

$\sigma_e^2 =$ variância residual entre parcelas;

Estimadores de componentes de variância por REML via algoritmo EM:

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{[y'y - \hat{r}'X'y - \hat{g}'Zy]}{[N-r(x)]}; \quad (22)$$

$$\hat{\sigma}_g^2 = \frac{[\hat{g}'\hat{g} + \hat{\sigma}_e^2 \text{tr}C^{22}]}{q}; \quad (23)$$

Em que C^{22} advém de:

$$C^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

C: matriz dos coeficientes das equações de modelo misto;

tr: operador traço matricial;

r(x): posto da matriz X;

N,q: número total de dados e número de genótipos, respectivamente.

Os efeitos aleatórios (genotípicos) foram testados via teste da razão de verossimilhança (LRT) e análise de deviance (ANADEV)(RESENDE, 2007). As deviances foram obtidas, rodando o modelo 20 com e sem os valores de h^2 para cada variável e, em seguida, subtraindo-os e confrontando-os com o valor do Qui-quadrado com um grau de liberdade 1 a 5% de probabilidade.

As correlações genotípicas ou correlação entre os valores genotípicos foram obtidas pelo uso do modelo 102, após rodar cada uma das variáveis de interesse por meio do modelo 20. A significância das correlações genotípicas verificada via teste t com n-2 graus de liberdade, em que n corresponde ao número de genótipos avaliados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise de deviance (ANADEV)

A ANADEV revelou, via teste da razão de verossimilhança (LRT), que todos os índices de seleção tiveram efeitos de clones significativos a 1% de probabilidade pelo teste do Qui-quadrado (Tabela 4).

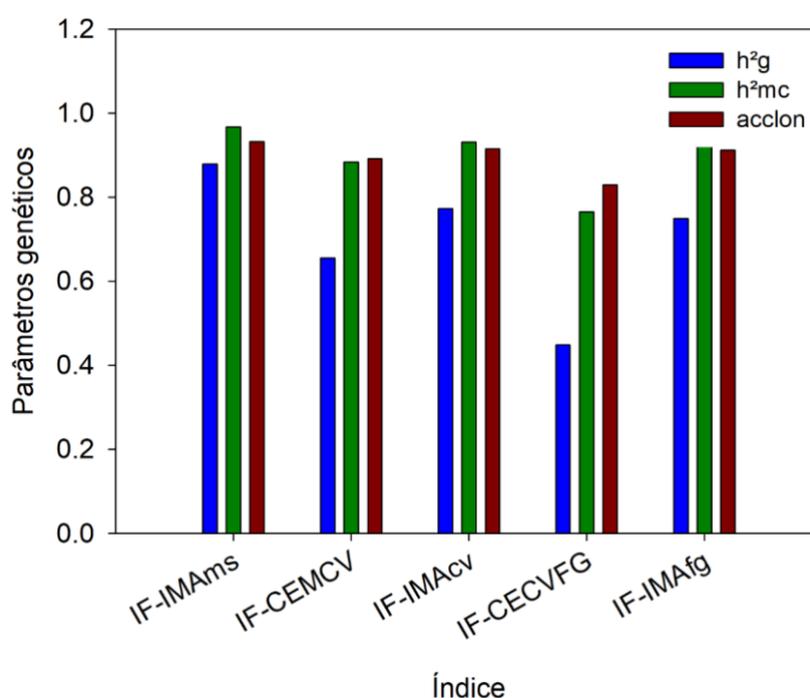
Efeito	IMA _{ms}	IMA _{cv}	IMA _{fg}	CMCV	CVFG
Clones	36,59	-21,1	2,29	-30,97	-60,32
Modelo Completo	81,97	-2,12	29,03	-1,81	-51,94
LRT	45,34**	18,98**	26,74**	29,16**	8,38**

A significância dos efeitos de clones para todos os índices avaliados, indica que há variabilidade genotípica para esses índices, entre os clones avaliados. Assim sendo, foi possível se obter ganhos genéticos com seleção de genótipos por meio dos índices criados. Por esse motivo, a seleção de materiais genéticos, com base nesses índices, permitirá a indicação clones para plantio comercial que representarão avanços na produção de carvão vegetal siderúrgico (AZEVEDO et al., 2015; MENEGATTI et al., 2016).

4.2. Parâmetros genéticos preditos

As estimativas dos parâmetros genéticos: herdabilidade individual no sentido amplo (h^2_g), herdabilidade média de clones (h^2_{mc}), e acurácia de seleção de genótipos (Ac_{clon}), preditos por meio dos índices de seleção avaliados nesta pesquisa, sugerem que estes são eficientes para seleção de materiais genéticos superiores. Os valores de h^2_g variaram de média ($h^2_g > 0,45$) a alta magnitude ($h^2_g > 0,65$), considerando a classificação de herdabilidades definidas por Resende (2002), enquanto que a h^2_{mc} e a Ac_{clon} , tiveram valores considerados de alta magnitude ($h^2_{mc} > 0,76$ e $Ac_{clon} > 0,83$) (RESENDE e DUARTE, 2007) (FIGURA 12).

Figura 12 – Estimativa de parâmetros genéticos para os índices fenotípicos: incremento médio anual em massa seca (IMA_{ms}), consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal (CEMCV), incremento médio anual em carvão vegetal (IMA_{cv}), consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa (CECVFG) e incremento médio anual em ferro gusa (IMA_{fg}), avaliados em clones híbridos de *Corymbia* e um clone híbrido de *Eucalyptus*, aos três anos de idade. h^2g : herdabilidade de parcelas individuais no sentido amplo; h^2mc : herdabilidade da média de clone e Acclon: acurácia genética na seleção de clones.



Fonte: o autor.

Os valores estimados para h^2g e h^2mc dos índices estudados sugerem a existência de alto controle genético na expressão fenotípica desses índices e que há boas perspectivas de ganhos genéticos com seleção de materiais superiores em nível individual ou em média de clones (ROSADO et al., 2012; LI et al., 2017).

A herdabilidade é um dos mais importantes parâmetros genéticos, pois quantifica a fração da variação fenotípica de natureza herdável, passível de ser explorada na seleção (RESENDE, 2002). Além disso, os maiores valores de h^2mc observados são consequência do incremento do número de repetições sugerindo

maior precisão na seleção de clones superiores, em razão da minimização dos erros experimentais (ROSADO et al., 2012).

As magnitudes de acurácia verificadas indicam que o delineamento experimental foi adequadamente estabelecido nesta pesquisa e que os resultados são confiáveis. Também permite inferir que os valores genéticos preditos estão próximos dos valores genéticos reais (RESENDE, 2002).

Os valores observados para os parâmetros genéticos avaliados, sugerem que os índices criados podem ser importantes direcionadores para seleção de futuros clones comerciais destinados à produção de carvão vegetal siderúrgico (ROSADO et al., 2012; LI et al., 2017).

4.3. Correlações genéticas

As correlações genéticas entre os índices fenotípicos criados, e, entre estes e os caracteres utilizados para as suas estimações, tiveram, direções variando entre positiva e negativa, magnitudes variando entre baixa e alta, e significâncias variando entre não significativas e significativas a 1 e 5% pelo teste t (Tabela 5).

Tabela 5 – Correlação genética entre os índices fenotípicos de seleção, e, entre estes e os caracteres utilizados para as suas estimações.

Variáveis	IMA _{cv}	IMA _{fg}	CMCV	CVFG	D _b	RG _{cv}	F	D _g	Cf	IMA _{vol}
IMA _{ms}	0.68*	0.88**	-0.12 ^{ns}	0.11 ^{ns}	0.39 ^{ns}	-0.59 ^{ns}	-0.38 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	0.46 ^{ns}	0.35 ^{ns}
IMA _{cv}		0.85**	-0.43 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	0.40 ^{ns}	0.05 ^{ns}	-0.44 ^{ns}	0.15 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	-0.13 ^{ns}
IMA _{fg}			-0.34 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	0.43 ^{ns}	-0.22 ^{ns}	-0.42 ^{ns}	0.08 ^{ns}	0.21 ^{ns}	0.16 ^{ns}
CMCV				0.87**	-0.89**	-0.27 ^{ns}	-0.40 ^{ns}	-0.84**	0.40 ^{ns}	0.82**
CVFG					-0.73*	-0.37 ^{ns}	-0.48 ^{ns}	-0.98**	0.44 ^{ns}	0.69*

IMA_{ms}: incremento médio anual em massa seca; IMA_{cv}: incremento médio anual em carvão vegetal; IMA_{fg}: incremento médio anual em ferro gusa; CMCV: consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal; CVFG: consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa; D_b: densidade básica da madeira; D_g: densidade a granel do carvão vegetal, RG_{cv}: rendimento gravimétrico em carvão vegetal; Cf: teor de carbono fixo no carvão vegetal; **, *, e ^{ns}: significativo a 1, a 5 %, e não significativo, respectivamente, pelo teste t.

O conhecimento a respeito das correlações genéticas entre características é de fundamental importância e pode auxiliar na tomada de decisão do melhorista, pois permite selecionar com precisão características que trarão ganhos diretos para o programa de melhoramento genético e, também influenciarão de forma indireta em outras características de mais difícil mensuração. Além disso, dão subsídios para o conhecimento acerca dos efeitos dos genes e da existência de desequilíbrios de ligação (HUNG et al., 2015).

Os índices IMA_{ms} , IMA_{cv} e IMA_{fg} tiveram correlações genéticas significativas, positivas e de altas magnitudes (Tabela 5).

As correlações observadas entre os índices IMA_{ms} , IMA_{cv} e IMA_{fg} indicam que a seleção de materiais genéticos superiores utilizando qualquer um desses índices identifica os materiais genéticos de maior produtividade em biomassa de madeira, carvão vegetal e ferro gusa por hectare.ano⁻¹, o que é estratégico para as empresas do setor de carvão vegetal siderúrgico. Contudo, como o índice IMA_{fg} teve as maiores magnitudes de correlação genética com os índices IMA_{ms} e IMA_{cv} , logo ele possui maior potencial, quando comparado os demais, de identificar materiais genéticos que atendam as diretrizes do foco florestal de um PMGF-CVS.

Os índices CMCV e CVFG tiveram correlações genéticas significativas, positivas e de altas magnitudes entre si, além de correlações significativas, negativas e de alta magnitude com a D_b e a D_g , bem como, correlações significativas, positivas e de alta magnitude com o IMA_{vol} (Tabela 5).

As correlações genéticas observadas entre os índices CMCV e CVFG indicam que seleção de materiais genéticos superiores utilizando qualquer um desses índices identifica materiais genéticos que proporcionarão os menores consumos específicos de madeira para produção de carvão vegetal, e de carvão vegetal para produção de ferro gusa, o que também é estratégico para as empresas do setor de carvão vegetal siderúrgico. Além disso, que os indivíduos selecionados por meio de qualquer um desses índices, atenderão tanto as diretrizes do foco industrial carvão vegetal, quanto as do foco industrial ferro gusa de um PMGF-CVS.

As correlações genéticas observadas entre os índices CMCV e CVFG, e os caracteres D_b , D_g e IMA_{vol} indicam que os materiais genéticos que tem os menores consumos específicos de madeira para produção de carvão vegetal e de carvão vegetal para produção de ferro gusa, tem maiores valores de densidade básica da

madeira e de densidade a granel do carvão vegetal, e menor produtividade em volume de madeira por hectare.ano⁻¹. Assim, é possível realizar seleção indireta para os caracteres densidade básica da madeira, densidade a granel do carvão vegetal e incremento médio anual em volume de madeira por meio da utilização dos índices CMCV e CVFG para escolha de materiais genéticos superiores para produção de carvão vegetal siderúrgico.

As correlações genéticas observadas entre os índices CMCV e CVFG e os caracteres D_b e D_g eram esperadas, pois a densidade básica da madeira está diretamente relacionada com a densidade a granel do carvão vegetal (CASTRO et al., 2013; SOARES et al., 2014; FROEHLICH e MOURA, 2017; LOUREIRO et al., 2019).

As correlações observadas entre os CMCV e CVFG, e o IMA_{vol} indicam que o aumento volume individual de madeira por árvore pode contribuir com o aumento do consumo específico desta para a produção de carvão vegetal, aumentando os custos de produção. Essas correlações possivelmente estão ligadas a diminuição da densidade da madeira em detrimento do aumento do volume, o que pode ser limitante para a utilização de alguns clones para fins industriais, pois a densidade básica da madeira é um importante parâmetro de qualificação da madeira para essas atividades (PEREIRA, 2012).

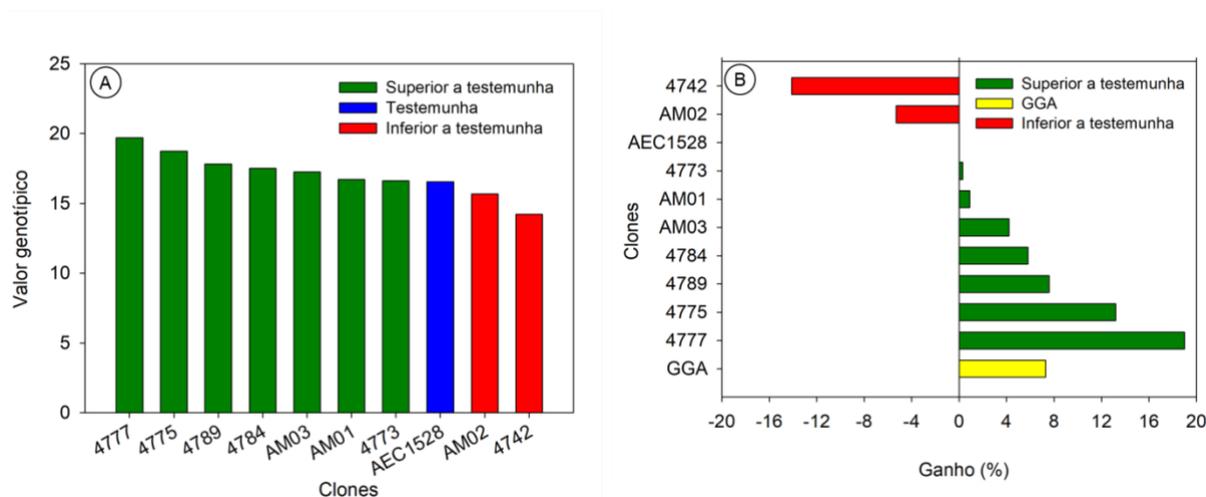
4.4. Valores genotípicos e ganhos genéticos

4.4.1. Índice de seleção fenotípico: Incremento médio anual em massa seca de madeira (IMA_{ms})

A utilização do índice de seleção IMA_{ms} para indicação de clones para plantio comercial pode influenciar significativamente a produção de carvão vegetal, uma vez que está diretamente relacionado com a produção de massa seca produzida por cada clone. Os valores genotípicos estimados para o IMA_{ms} dos clones 4777, 4775, 4789, 4784, AM03, AM01 e 4773 foram superiores aos valores observados para a testemunha (AEC 1528 - *E. grandis* x *E. urophylla*) (FIGURA 13A).

Figura 13 – A: Seleção genética de clones híbridos de *Corymbia* spp. com base no índice de seleção fenotípico incremento médio anual em massa seca de madeira

(IMA_{ms}) aos três anos de idade. (A) Valores genotípicos preditos ($\mu + g$) para o IMA_{ms}. (B) Ganhos genéticos individuais (%) de seleção para o IMA_{ms}. GGA= ganho genético acumulado.



Fonte: o autor.

Desse modo, sugerimos a utilização dos clones 4777, 4775, 4789, 4784, AM03, AM01 e 4773 em estratégias de melhoramento genético de *Corymbia* que visem o aumento de massa seca de madeira por hectare das florestas.

O clone 4777 teve ganhos genéticos superiores a 19% mediante seleção individual, quando comparado à testemunha (FIGURA 13B). No geral, com seleção dos sete clones com valores positivos será possível obter ganhos em incremento médio anual em massa seca por hectare ano⁻¹ de até 7,3%, em comparação a testemunha.

O valor genotípico observado para o clone 4777 em relação ao índice IMA_{ms} indica que esse possui maior potencial em manter a superioridade de produção de massa seca de madeira por hectare em plantios comerciais, em relação aos demais, e, portanto, aumenta a segurança na sua recomendação comercial visando a produção de madeira (RESENDE e HIGA, 1994; COSTA et al., 2012).

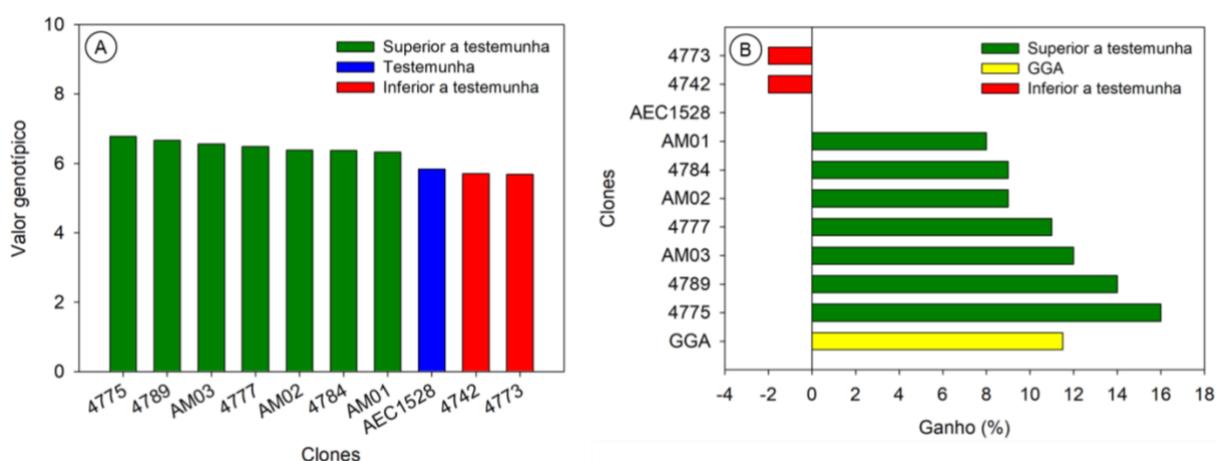
Diante do observado, podemos afirmar que a utilização do IMA_{ms} para seleção de clones superiores foi eficiente e potencializa a indicação de clones que aumentem a produção de massa seca de madeira por hectare.

4.4.2. Índice de seleção fenotípico: Incremento médio anual em carvão vegetal (IMA_{cv})

A utilização do índice de seleção IMA_{cv} para indicação de clones para plantio comercial pode influenciar significativamente a produção de carvão vegetal, uma vez que está diretamente relacionado com a produção de massa seca, rendimento gravimétrico em carvão vegetal e o teor de finos de cada clone.

Os clones 4775, 4789, AM03, 4777, AM02, 4784 e AM01, tiveram valores genotípicos superiores à testemunha (AEC 1528 - *E. grandis* x *E. urophylla*) quando comparados por meio do índice de seleção IMA_{cv} (FIGURA 14A).

Figura 14 – Seleção genética de clones híbridos de *Corymbia* spp. com base no índice de seleção fenotípico incremento médio anual em carvão vegetal (IMA_{cv}) aos três anos de idade. (A) Valores genotípicos preditos ($\mu + g$) para o IMA_{cv}. (B) Ganhos genéticos (%) individuais e acumulado, considerando todos os clones superiores a testemunha, de seleção para o IMA_{cv}. GGA= ganho genético acumulado.



Fonte: o autor.

Os valores genotípicos observados evidenciam ganhos genéticos individuais com seleção que variaram entre 8% (AM01) e 16% (4775) quando comparados com a testemunha. Caso todos os clones superiores fossem plantados comercialmente, o potencial seria de aumentar em 11,5 % o incremento em carvão vegetal da floresta, em relação à testemunha (FIGURA 14B).

Dessa forma, sugerimos a utilização dos clones 4775, 4789, AM03, 4777, AM02, 4784 e AM01, em estratégias de melhoramento genético de *Corymbia* que visem o aumento da produção de massa carvão vegetal por hectare das florestas.

O clone 4775 (híbrido de *Corymbia*) foi superior a todos os clones testados quando comparados por meio dos seus valores genotípicos estimados para o IMA_{cv} e, portanto, possui potencial para aumentar em até 16 % o incremento médio anual em carvão vegetal por hectare quando comparado ao AEC1528 (híbrido de *Eucalyptus*), sob as condições edafoclimáticas avaliadas.

O valor genotípico observado para o clone 4775 em relação ao índice IMA_{cv} indica que este possui maior potencial em manter a superioridade de produção de carvão vegetal por hectare em plantios comerciais, em relação aos demais, e, portanto, aumenta a segurança na sua recomendação comercial visando a produção de carvão vegetal siderúrgico (RESENDE e HIGA, 1994; COSTA et al., 2012).

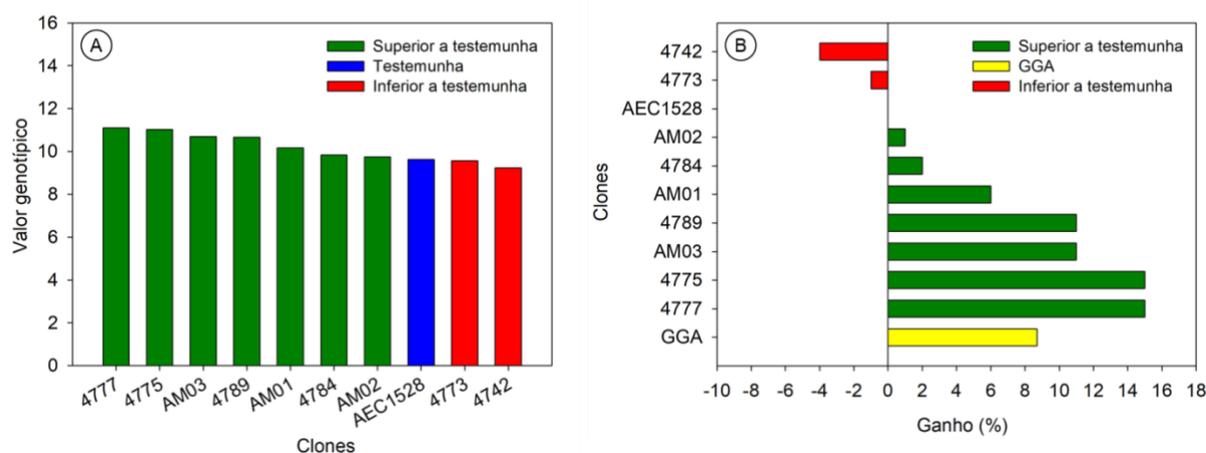
Com base no exposto, podemos afirmar que a utilização do IMA_{cv} para seleção de clones superiores geneticamente foi eficiente e potencializa a indicação de clones que aumentem a produtividade em carvão vegetal em tonelada por hectare.

4.4.3. Índice de seleção fenotípico: Incremento médio anual em ferro gusa (IMA_{fg})

A utilização do índice de seleção IMA_{fg} expressa a capacidade hipotética dos materiais genéticos avaliados produzirem este produto, sendo expresso em toneladas de ferro gusa por hectare.ano⁻¹. Sua utilização para indicação de clones para plantio comercial pode influenciar significativamente a produção de carvão vegetal, uma vez que está diretamente relacionado com a produção de massa seca, rendimento gravimétrico em carvão vegetal, teor de finos e de carbono fixo do carvão vegetal de cada clone, e associa essas características ao consumo específico de carbono por tonelada de ferro gusa.

Os clones 4777, 4775, AM03, 4789, AM01, 4784 e AM02 tiveram valores genotípicos superiores à testemunha (AEC 1528 - *E. grandis* x *E. urophylla*) quando comparados por meio do índice de seleção IMA_{fg} (FIGURA 15A).

Figura 15 – Seleção genética de clones híbridos de *Corymbia* spp. com base no índice de seleção fenotípico incremento médio anual em ferro gusa (IMA_{fg}) aos três anos de idade. (A) Valores genotípicos preditos ($\mu + g$) para o IMA_{fg} . (B) Ganhos genéticos (%) individuais e acumulado, considerando todos os clones superiores a testemunha, de seleção para IMA_{fg} . GGA: Ganho genético acumulado



Fonte: o autor.

Os ganhos genéticos a partir da seleção individual em relação à testemunha variaram entre 1% (AM02) e 15% (4777 e 4775), para esses clones, e, caso todos os clones superiores fossem plantados comercialmente, a floresta teria o potencial de aumentar em 8,7% seu incremento médio em ferro gusa por hectare, em relação à testemunha (FIGURA 15B).

Dessa forma, sugerimos a utilização dos clones 4777, 4775, AM03, 4789, AM01, 4784 e AM02 em estratégias de melhoramento genético de *Corymbia* que visem o aumento da produtividade das florestas em tonelada de ferro gusa por hectare.

Os clones 4777 e 4775 foram superiores geneticamente para o IMA_{fg} quando comparados aos demais clones e tem potencial para aumentar em até 15% o incremento anual em ferro gusa por hectare, quando comparado ao AEC1528 (clone testemunha - híbrido de *Eucalyptus*), sob as condições edafoclimáticas avaliadas.

A seleção com base no IMA_{fg} identificou melhores clones, os mesmos materiais genéticos já indicados como superiores para os índices IMA_{ms} (4777) e IMA_{cv} (4775). Isso revela a capacidade desse índice de, além indicar o clone com maior capacidade de produção de ferro gusa por hectare, selecionar indivíduos superiores

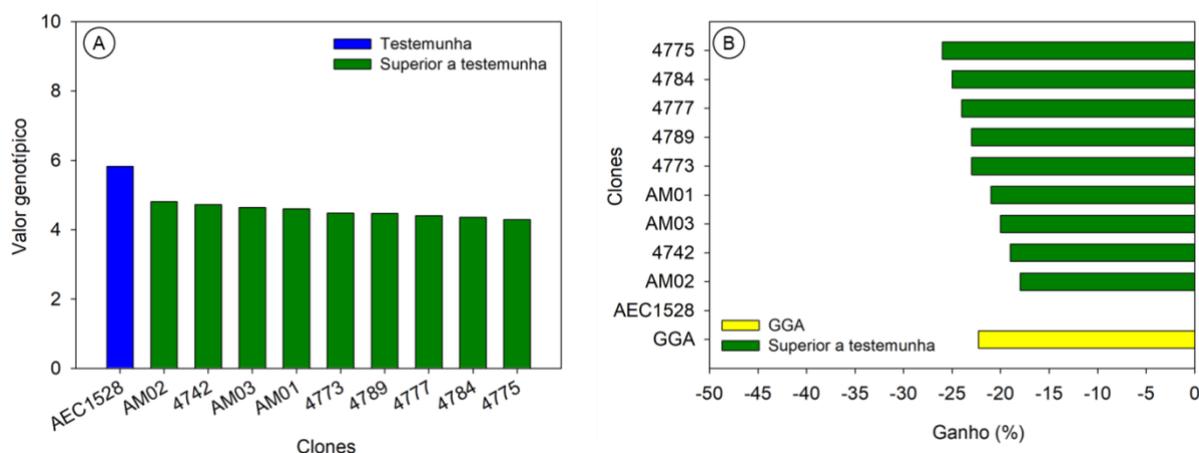
geneticamente para produção de massa seca de madeira e de carvão vegetal, por hectare. Portanto, esse índice pode ser utilizado para identificar os melhores genótipos do ponto de vista florestal, para produção de carvão vegetal siderúrgico.

Os resultados observados, evidenciam que a utilização do IMA_{fg} para seleção de clones superiores geneticamente foi eficiente e potencializa a indicação de clones que aumentem a produção de ferro gusa por hectare, e que atendam as diretrizes do foco florestal de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico.

4.4.4. Índice fenotípico: Consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico (CMCV)

Todos os clones de *Corymbia* testados, tiveram valores genotípicos inferiores quando comparados a testemunha de *Eucalyptus* (AEC 1528) (FIGURA 16A). Valores genotípicos inferiores implicam em clones com ganhos genéticos negativos, que por sua vez proporcionam a redução do consumo específico de madeira por tonelada de carvão vegetal. Esses resultados reforçam o potencial de clones híbridos de *Corymbia* em substituir o uso de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal siderúrgico (Lee, 2007; Assis, 2014), visto a relevância da redução do consumo específico de madeira no custo de produção do carvão vegetal (MORAES et al., 2014).

Figura 16 – Seleção genética de clones híbridos de *Corymbia* spp. com base no índice fenotípico consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico (CMCV) aos três anos de idade. A: Valores genotípicos preditos ($\mu + g$) para o CMCV. (B) Ganhos genéticos (%) individuais e acumulado, considerando todos os clones superiores a testemunha, de seleção para o CMCV. GGA: Ganho genético acumulado



Fonte: o autor.

Os nove clones de *Corymbia* avaliados tiveram ganhos individuais de seleção negativos em relação à testemunha de *Eucalyptus*, e variaram entre -18% e -26%. Isso significa que todos os clones de *Corymbia* avaliados tem o potencial de reduzir o consumo de madeira para produção de uma mesma massa de carvão vegetal, quando comparados com o AEC 1528 (*Eucalyptus*). Caso todos os clones de *Corymbia* fossem plantados comercialmente, teriam o potencial de reduzir o consumo de madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico em até 22,3% quando comparado com a testemunha (FIGURA 16B).

Quanto menor o valor de CMCV, mais eficiente o material genético é em converter madeira em carvão vegetal e, portanto, menores serão os custos variáveis de produção (MOKFIENSKI et al., 2008).

O clone 4775 possui maior potencial para redução do CMCV quando comparado aos demais, com base nos valores genotípicos estimados. Quando comparado apenas ao clone AEC1528 (híbrido de *Eucalyptus*), ele teve potencial de reduzir em até 26% o consumo específico de madeira por tonelada de carvão vegetal siderúrgico produzido.

A redução do consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico, observada para os híbridos de *Corymbia*, deve ser levada em

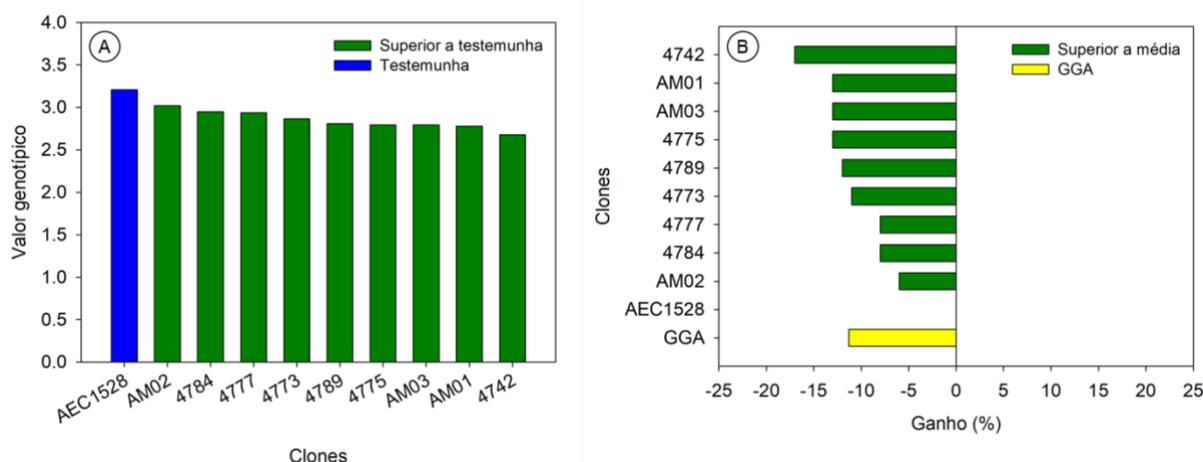
consideração em programas de melhoramento genético. Dessa forma, sugerimos a utilização de todos os clones de *Corymbia* estudados nesta pesquisa, sobretudo o clone 4775, em estratégias de melhoramento genético que visem a redução do consumo específico de madeira para produção de carvão vegetal em metro cúbico de madeira por tonelada de carvão vegetal.

Diante do exposto, podemos afirmar que a utilização do CMCV para seleção de clones superiores geneticamente foi eficiente e potencializa a indicação de clones que reduzem o consumo específico de madeira por tonelada de carvão vegetal e atendam as diretrizes do foco industrial – carvão vegetal de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico.

4.4.5. Índice fenotípico: Consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa (CVFG)

Todos os clones de *Corymbia* testados tiveram valores genotípicos inferiores quando comparados à testemunha de *Eucalyptus* (AEC1528) com base em seus valores fenotípicos de CVFG, (FIGURA 17A). Valores genotípicos inferiores implicam em clones com ganhos genéticos negativos, que por sua vez proporcionam a redução do consumo específico de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa. A redução do CVFG implica em ganhos de produtividade para as usinas siderúrgicas, em maior aproveitamento do volume útil do alto-forno siderúrgico, e menor custo de transporte e armazenamento do carvão vegetal (FROEHLICH e MOURA, 2017).

Figura 17 – Seleção genética de clones híbridos de *Corymbia* spp. com base no índice fenotípico consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa (CVFG) aos três anos de idade. (A) Valores genotípicos preditos ($\mu + g$) para o CVFG. (B) Ganhos genéticos (%) individuais e acumulado, considerando todos os clones superiores a testemunha, de seleção para o CVFG. GGA: Ganho genético acumulado



Fonte: o autor.

Todos os clones de *Corymbia* avaliados tiveram ganhos genéticos individuais de seleção negativos em relação a testemunha de *Eucalyptus*, e variaram entre -6% e -17%. Isso significa que todos os clones de *Corymbia* avaliados tem o potencial de reduzir o consumo de carvão vegetal para produção de uma mesma massa de ferro gusa, quando comparados com o AEC1528 (*Eucalyptus*). Caso todos os clones fossem plantados comercialmente, teriam o potencial de reduzir o consumo de carvão vegetal siderúrgico para produção de ferro gusa em até 11,3% quando comparado com a testemunha (FIGURA 17B).

A redução do CVFG aumenta a competitividade do carvão vegetal frente o carvão mineral frente a produção de ferro gusa (COELHO JUNIOR et al., 2006), pois a redução do consumo específico de carvão vegetal no custo de produção de ferro gusa é de grande relevância (FROEHLICH e MOURA, 2017).

O clone 4742 possui maior potencial de reduzir o CVFG, quando comparado a todos os clones testados. Quando comparado apenas ao clone AEC1528 (híbrido de *Eucalyptus*), o mesmo teve potencial de reduzir em até 17% o consumo específico de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa produzido.

Portanto, sugerimos a utilização de todos os clones de *Corymbia* estudados nesta pesquisa, sobretudo o clone 4742, em estratégias de melhoramento genético que visem a redução do consumo específico de carvão vegetal para produção de ferro gusa, em metro cúbico de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa.

Portanto, a utilização do CVFG para seleção de clones superiores geneticamente foi eficiente para potencializar a indicação de clones que atendam as diretrizes do foco industrial – ferro gusa de um PMGF para carvão vegetal siderúrgico.

4.4.6. Índice genético carvão vegetal siderúrgico (CVS)

Todos os clones do gênero *Corymbia* avaliados, são superiores ao clone do gênero *Eucalyptus* (AEC1528) quando comparados pelo índice genético CVS (TABELA 6). Tal resultado implica que os clones de *Corymbia* tiveram maiores ganhos simultâneos para os índices IMA_{ms} , IMA_{cv} , IMA_{fg} , CMCV e CVFG quando comparado com a testemunha de *Eucalyptus*.

Tabela 6 – Ranqueamento dos clones e ganhos percentuais sobre a testemunha (AEC1528) com seleção pelo índice genético carvão vegetal siderúrgico (CVS), estimado por meio da metodologia do índice do ranking médio (RESENDE, 2007) adaptado de Mulamba e Mock (1978).

Clone	Rank médio	Ganho Genético em relação a testemunha
4775	2.0	77%
AM03	3.4	61%
4777	4.0	55%
4789	4.0	55%
AM01	5.0	43%
4784	5.6	36%
4742	6.4	27%
AM02	7.8	11%
4773	8.0	9%
AEC1528	8.8	0%
Ganho Genético Acumulado		41.7%

Fonte: o autor.

Os ganhos genéticos dos clones de *Corymbia* variaram entre 9% (4773) a 77% (4775) sobre a testemunha de *Eucalyptus*, sendo que, caso todos os clones fossem plantados comercialmente, o ganho genético acumulado em relação a testemunha seria de 41,7%.

Tais resultados corroboram com os demais resultados observados nesta pesquisa, que demonstram a superioridade do gênero *Corymbia* em produzir carvão vegetal siderúrgico em relação ao gênero *Eucalyptus*. Portanto, sugerimos a priorização da utilização de espécies do gênero *Corymbia* e seus híbridos no desenvolvimento de clones destinados a plantios comerciais para produção de carvão vegetal siderúrgico.

O clone 4775 (híbrido de *Corymbia*) foi superior a todos os clones testados quando comparados por meio do índice genético CVS, e possui ganho genético de 77% sobre o clone AEC1528 (híbrido de *Eucalyptus*). Esse clone ficou na segunda posição do rank de seleção para o IMA_{ms}, na primeira para o IMA_{cv}, na segunda para o IMA_{fg}, na primeira para o CMCV, e na quarta para o CVFG. O que representou a possibilidade de ganho genético de respectivamente, 13,2%, 16%, 15%, 26%, e 13%, sobre a testemunha de *Eucalyptus*, para esses índices.

Assim, sugerimos a indicação do clone 4775 para plantio comercial em florestas destinadas a produção de carvão vegetal siderúrgico, bem como em estratégias de melhoramento genético que visem o aumento da competitividade do carvão vegetal frente ao carvão mineral na produção de ferro gusa.

Portanto, a utilização do índice genético CVS para seleção de clones superiores pode aumentar simultaneamente a concentração de alelos favoráveis a produção de carvão vegetal siderúrgico e potencializa a indicação de clones verticalizados com todas as diretrizes de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico. Logo, recomendamos a utilização do CVS como critério de seleção de materiais genéticos superiores e indicação de clones para plantios comerciais destinados a produção de carvão vegetal siderúrgico.

5. CONCLUSÕES

Os índices criados possuem adequado controle genético e são direcionadores eficientes para seleção de clones para plantio comercial que visam a produção de carvão vegetal siderúrgico.

O índice IMA_{fg} considera a produtividade de materiais genéticos em função do produto final da cadeia produtiva do carvão vegetal siderúrgico, e por tanto deve ser considerado o principal critério na seleção de materiais genéticos superiores que atendam as diretrizes do foco florestal de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico.

O índice CMCV deve ser utilizado para a selecionar clones que atendam as diretrizes do foco industrial–carvão vegetal de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico.

O índice CVFG deve ser utilizado para selecionar clones que atendam as diretrizes do foco industrial–ferro gusa de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico.

O índice CVS deve ser utilizado para a seleção de clones que atendam as diretrizes de todos os focos de um programa de melhoramento genético para carvão vegetal siderúrgico. Portanto, sua utilização é estratégica como critério final de seleção de materiais genéticos superiores para plantio comercial.

Sugerimos que o clone 4775 (híbrido de *Corymbia*) seja utilizado em plantios comerciais com o objetivo de fornecer madeira para produção de carvão vegetal siderúrgico.

Todos os clones de *Corymbia* avaliados são superiores ao híbrido de *Eucalyptus* utilizado como testemunha. Sugerimos que todos os clones de *Corymbia* avaliados sejam utilizados em estratégias de melhoramento genético que visem o aumento da competitividade do carvão vegetal frente ao carvão mineral na produção de ferro gusa.

6. BIBLIOGRAFIA

ARANTES, M. D. C. *et al.* Densitometria de raios x na madeira e carvão de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake1. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 155-162, 2016.

ArcellorMittal BioFlorestas – AMBio. **Resumo Público do Plano de Manejo Florestal**. Minas Gerais, 2019.

ASSIS, M. R. *et al.* Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 71, p. 291, 2012.

ASSIS, T. F. Melhoramento genético de *Eucalyptus*: desafios e perspectivas. In: **3º Encontro Brasileiro de Silvicultura**. Curitiba: Embrapa Florestas, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-11941: madeira – determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-6922: Ensaios físicos determinação da massa específica (densidade à granel)**. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-8112: Carvão vegetal – Análise Imediata**. Rio de Janeiro, 1986.

AZEVEDO, L. P. D. A. *et al.* Seleção genética em progênies de *Eucalyptus camaldulensis* em área de cerrado matogrossense. **Ciência Rural**, v. 45, n. 11, p. 2001-2006, 2015.

BARCELLOS, D. C. **Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo**. 2007. 139f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) –Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2007.

BARNETT, J.; JERONIMIDIS, G. **Wood quality and its biological basis**. London: Blackwell, 240 p., 2009.

BOTREL, M. C. G. *et al.* Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Florestalis**, Piracicada, v. 38, n. 86, p. 237-245, jun. 2010.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal In: SANTOS, F.; COLODETE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa-MG: Super Gráfica e Editora Ltda. p. 322-354p, 2013.

CARNEIRO, A. C. O. *et al.* Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **Floresta**, v.46, n.4, p.473-480, 2017.

CARVALHO, A. G. M. **Relação siringila/guaiacila na lignina e suas implicações**. 2002. 40 f. Monografia (Pós-Graduação em Tecnologia de Celulose e Papel) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* na madeira e carvão vegetal**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CASTRO, A. F. N. M. *et al.* Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 627-635, 2013.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia**. 150 p. 2015.

COELHO JUNIOR, L. M. *et al.* Análise longitudinal dos preços do carvão vegetal, no estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 30, p. 429-438, 2006.

COSTA, R. B. *et al.* Avaliação genética de *Eucalyptus camaldulensis* no Estado de Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 32, n. 70, p. 165-173, 2012.

COUTO, A. M. *et al.* Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 817–831, 2015.

CRUZ, C. D. *et al.* **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. Ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 514p., 2012.

CUNNINGHAM, E. P. Multi-stage index selection. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 46, n. 1, p. 55-61, 1975.

DA SILVA, P. H., *et al.* Avaliação da eficiência técnica de clones de eucalipto em escala comercial: uma abordagem empregando Data Envelopment Analysis (DEA). **Ciência Florestal**, v. 30, n. 2, p. 421-435, 2020.

FIGUEIRÓ, C. G., *et al.* Caracterização do carvão vegetal produzido em fornos retangulares industriais. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 14, n. 3, p. 5659, 2019.

FREDERICO, P. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FROEHLICH, P. L., MOURA, A. Carvão vegetal: propriedades físico-químicas e principais aplicações. **Revista Tecnologia e Tendências**, v. 9, n. 1, p. 13-32, 2017.

GUTIÉRREZ, A. *et al.* Chemical characterization of lignin fractions in industrial hemp bast fibers used for manufacturing high-quality paper pulps. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 12, p. 2138-2144, 2006.

HUNG, T. D. *et al.* Estimates of genetic parameters for growth and wood properties in *Eucalyptus pellita* F. Muell. to support tree breeding in Vietnam. **Annals of Forest Science**, Nancy, v. 72, p. 205-217, 2015.

ISBAEX, C. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa**. 2018. 124 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. 2018.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório ano base 2018. 80 f. 2019.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Relatório de Sustentabilidade ano base 2016/2017. 84 f. 2018.

LEE, D. J. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand. 2: development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. **Australian Forestry Journal**, v. 70, n. 1, p. 11–16, 2007.

LI, C. *et al.* Genetic parameters for growth and wood mechanical properties in *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **New forests**, v. 48, n. 1, p. 33-49, 2017.

LOUREIRO, B. A. *et al.* Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 21, n. 4, p. 619-630, 2019.

MANFIO, C. E. *et al.* Avaliação de progênies de macaúba na fase juvenil e estimativas de parâmetros genéticos e diversidade genética. **Embrapa Florestas (ALICE)**, v. 32, p. 63-68, 2012.

MEDEIROS, B. L. M. A. *et al.* Avaliação das propriedades físicas e químicas da madeira de *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cultivadas no Piauí. **Nativa**, v. 4, n. 6, p. 403–407, 2016.

MENEGATTI, R. D. *et al.* Parâmetros genéticos para caracteres de crescimento inicial de progênies de bracatinga em Lages, SC. **Brazilian Journal of Forest Research**, v. 36, n. 87, p. 235-243, 2016.

MOKFIENSKI, A. *et al.* A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 3, p. 401-413, 2008.

MORAES, F. D. A. B. *et al.* Condições ideais para o consumo específico de madeira na produção de celulose. **Production**, v. 24, n. 3, p. 712-724, 2014.

MORAIS, S. A. L. D. *et al.* Análise da madeira de *Pinus oocarpa* parte I: estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 461-470, 2005.

MULAMBA, N.N.; MOCK, J.J. Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. **Egypt Journal of Genetics and Cytology**, Alexandria, v.7, p.40-51, 1978.

NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2012.

NUNES, A. C. P. **Qualidade da madeira, critérios de seleção e interação genótipos x ambientes de clones de *Eucalyptus* no Rio Grande do Sul**. 2015. 121f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2015.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 74f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, p. 431-439, 2010.

PAULA, J. E. D. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, v. 11, n. 1, p. 90-100, 2005.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2012.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

PERES, L. C. *et al.* Clonal selection of *Corymbia* for energy and charcoal production. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 3, p. 749–753, 2019.

PICANCIO, A. C. S. *et al.* Controle do processo de produção de carvão vegetal para siderurgia. **Caderno de Administração. Revista da Faculdade de Administração da FEA**, v. 12, n. 1, 2018.

PROTÁSIO, T. de P. *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp* aos 42 meses de idade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 74, p. 137-149, 2013.

REGO, A. M. *et al.* Modelos de equações volumétricas para um povoamento de eucalipto situado em Codó (MA). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 4, p. 1-8, 2019.

RESENDE, M. D. V. **Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes**. Brasília: Embrapa informações tecnológicas, 975p., 2002.

RESENDE, M. D. V. **Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético**. Colombo: Embrapa Florestas, 362p., 2007.

RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: A useful tool for plant Breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 16, n. 4, p. 330–339, 2016.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

RESENDE, M. D. V.; HIGA, A. R. Estimação de valores genéticos no melhoramento de *Eucalyptus*: seleção em um caráter com base em informações do indivíduo e de seus parentes. **Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo**, n. 28/29, p. 11-36, 1994.

RESENDE, M. D. V. *et al.* Utilização de índices de seleção no melhoramento de eucalipto. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 21, p.1-13, 1990.

ROSADO, A. M. *et al.* Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade, estabilidade e adaptabilidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 7, p. 964-971, 2012.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: **Fórum nacional sobre carvão vegetal**, 1., 2008, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: UFMG, 2008.

SANTOS, O. P. *et al.* Directrices, metas y estrategias de un programa de mejoramiento genético forestal. In: NUNES, A. C. P., RODRÍGUEZ, V. M. N., SANTOS, G. A., CARVAJAL, L. S. B. (Org.). **Mejoramiento Genético de Eucalipto**. 1ed. Bogotá: CONIF, v. 1, p. 113-122, 2017.

SANTOS, R. C. D. *et al.* Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90 p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C. D. *et al.* Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SANTOS, R. D. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010. 173f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2010.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SEGURA, T. E. S. **Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada**. 2015. 199 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2015.

SILVA, M. A. M.; Quintão, M. A. Especificação de carvão vegetal e seu efeito na operação de alto forno. In: **Carvão vegetal: produção, propriedades e aplicações na siderurgia**. Associação Brasileira de Metais. Belo Horizonte - MG, p. 110 – 163, 1991.

SILVA, R. C. *et al.* Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

SILVA, M. O. S. **Crescimento e qualidade da madeira da espécie *Tachigali vulgaris* cultivada em diferentes espaçamentos para uso bioenergético**. 2018. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará, 2018

SOARES, V. C. *et al.* Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, p. 543-549, 2014.

STEFANIDIS, S. D. *et al.* A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 105, p. 143-150, 2014.

TRUGILHO, P. F. **Matéria Prima para Produção de Carvão Vegetal e Aproveitamento Energético de Resíduos Florestais**. In anais: Fórum Nacional sobre Carvão vegetal. Belo Horizonte, 2014.

TRUGILHO, P. F. *et al.* Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. **Ciência Rural**, v. 45, n. 4, p. 661-666, 2015.

VALENTE, B. M. dos R. T. **Avaliação de clones híbridos de *Corymbia* para crescimento, qualidade da madeira e carvão vegetal na Região do Rio Doce**. 2017. 84f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2017.

VITAL, B. R. *et al.* Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F., COLODETE, J., QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa-MG: Super Gráfica e Editora Ltda. p. 322-354, 2013.

YANG, H. *et al.* Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

ZANUNCIO, A. J. V. *et al.* Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of *Eucalyptus* and *Corymbia* logs. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 17, n. 2, p. 335-344, 2015.