



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

VALDIR MARIUCCI JUNIOR

**ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS GENÉTICOS E NÚMERO
ÓTIMO DE MEDIDAS PARA A SELEÇÃO DE PROGÊNIES F₄
DE CAFÉ ARÁBICA VIA REML/BLUP**

Londrina
2021

VALDIR MARIUCCI JUNIOR

**ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS GENÉTICOS E NÚMERO
ÓTIMO DE MEDIDAS PARA A SELEÇÃO DE PROGÊNIES F₄
DE CAFÉ ARÁBICA VIA REML/BLUP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Inês Cristina de Batista Fonseca

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Hiroshi Sera

Londrina
2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

V146 Mariucci Junior, Valdir.
Estimativas de parâmetros genéticos e número ótimo de medidas para a seleção de progênies F4 de café arábica via REML/BLUP / Valdir Mariucci Junior. - Londrina, 2021.
94 f.

Orientador: Inês Cristina de Batista Fonseca.
Coorientador: Gustavo Hiroshi Sera.
Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2021.
Inclui bibliografia.

1. Coffea arabica - Tese. 2. Modelo misto - Tese. 3. Parâmetros genéticos - Tese. 4. Valor genético aditivo - Tese. I. Fonseca, Inês Cristina de Batista. II. Sera, Gustavo Hiroshi. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

VALDIR MARIUCCI JUNIOR

**ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS GENÉTICOS E NÚMERO ÓTIMO
DE MEDIDAS PARA A SELEÇÃO DE PROGÊNIES F₄ DE CAFÉ
ARÁBICA VIA REML/BLUP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Inês Cristina de Batista
Fonseca
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Hiroshi Sera
Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná -
IAPAR-EMATER – IDR-Paraná

Dr. Rodrigo Silva Alves
Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia do
Café – INCT Café

Dr.^a Juliana Costa de Rezende Abrahão
Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas
Gerais - EPAMIG

Londrina, 18 de fevereiro de 2021.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual de Londrina, ao Programa de Pós Graduação em Agronomia e ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER, em razão de todo o conhecimento transmitido, aos docentes e toda a estrutura fornecida para o desenvolvimento do trabalho.

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

Aos professores responsáveis pela minha orientação, Inês e Gustavo, pelos conhecimentos passados, empréstimo de livros e todo apoio moral durante esses dois anos de mestrado.

Aos docentes e pesquisadores que contribuíram à minha formação, principalmente ao professor Zucareli, o qual sempre foi muito presente e paciente em vários momentos. Também, à professora Suzana, a qual conseguiu participar da minha banca de qualificação aos 45 minutos do segundo tempo. Além do professor Leandro e ao futuro professor Rodrigo, que ouviram muitas dúvidas sobre melhoramento, estatística e modelos mistos e, portanto, me auxiliaram à inúmeros raciocínios no desenvolvimento desse trabalho.

Para os meus pais e, também, ao meu irmão que foi bastante prestativo ao me auxiliar nas avaliações de campo, em um período difícil para pedir ajuda fora de casa.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, em especial ao Teló, Kakaw, Carlão, Tatalo, Harumi, Bruna, Carducci, Seu Tumoru, Nathan, Angelita, Dhalton, Hamanaka, Zé Alves, e outros que demonstraram grande companheirismo durante os dois anos de mestrado. Além de todos meus amigos que sempre estiveram disponíveis *virtualmente* durante todo o período da pandemia, principalmente àqueles que me ajudaram a manter a sanidade mental. Além, é claro, do dimesilato de lisdexanfetamina e de todo o café ingerido, os quais foram meus grandes companheiros de todas as manhãs e essenciais para a realização desse trabalho.

*O que teria acontecido ao Bird, sem o prato
arremessado pelo Jo Jones?*

MARIUCCI JUNIOR, Valdir. **Estimativas de parâmetros genéticos e número ótimo de medidas para a seleção de progênies F₄ de café arábica via REML/BLUP**. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021.

RESUMO

No melhoramento genético de *Coffea arabica*, várias características de interesse ao melhorista possuem herança quantitativa, o que exige a compreensão das propriedades genéticas da população em estudo. Entretanto, espécies perenes necessitam a realização de medidas repetidas e tendem a gerar dados desbalanceados. Nesses casos, é necessário a adoção de metodologias estatísticas robustas, como a de modelos mistos (REML/BLUP), e da determinação do número de safras necessárias para otimização da seleção e avaliação de genótipos. Portanto, o objetivo desse estudo foi estimar parâmetros genéticos e determinar o número ótimo de medidas para a seleção de progênies F₄ de *C. arabica*. O experimento foi instalado em 2014, no campo experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER, em Londrina, Paraná, Brasil. Foi adotado o delineamento em blocos ao acaso com três repetições e parcelas de 10 plantas, no espaçamento de 2,5 m x 0,5 m. As avaliações fenotípicas foram realizadas em 17 progênies F₄, nas safras de 2017 a 2020, para os caracteres: índice de desenvolvimento vegetativo (IDV), índice de nutrição foliar (INF), produtividade (PROD), tamanho do fruto (TF), ciclo de maturação dos frutos (M) e resistência à ferrugem (F). Os métodos REML e BLUP foram utilizados para a estimação dos parâmetros genéticos e predição dos valores genéticos aditivos, respectivamente. Com a obtenção da estimativa do coeficiente de repetibilidade, foi determinado o número ótimo de medidas para aumentar a acurácia seletiva das características avaliadas. Em seguida, a seleção dos genótipos foi ordenada pelo índice de Mulamba e Mock, com base nos valores genéticos preditos pelo BLUP. Os efeitos genéticos foram significativos apenas para M e F, enquanto as características IDV, INF, PROD e TF demonstraram inviabilidade para a seleção devido à ausência de variabilidade entre os genótipos, além da baixa magnitude dos parâmetros estimados. Por outro lado, as estimativas de herdabilidade no sentido restrito para M e F tiveram magnitudes média e alta, com os respectivos valores de 0,24 e 0,64. Os valores mais altos das estimativas do coeficiente de repetibilidade em IDV, M e F, indicaram a necessidade de, respectivamente, 4, 5 e 2 safras de medições, para a obtenção de alta acurácia ($\geq 0,70$). Em contrapartida, os resultados obtidos para INF, PROD e TF demonstraram a necessidade de alto número de safras (≥ 13) para o aumento da acurácia seletiva. A seleção de genótipos baseada nos valores genéticos preditos pelo BLUP possibilitou ganhos de 4,89% para M e -22,64% para F, aplicando a intensidade de seleção de 23,5%. Esses resultados permitiram a seleção acurada de genótipos com ganhos balanceados para ciclo de maturação precoce e resistência à ferrugem alaranjada para compor a geração F₅.

Palavras-chave: *Coffea arabica*; modelo misto; valor genético; herdabilidade; repetibilidade.

MARIUCCI JUNIOR, Valdir. **Estimates of genetic parameters and optimum number of measures to the selection of F₄ progenies in Arabica coffee by REML/BLUP**. 2021. 94 p. Dissertation (Master's degree in Agronomy – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2021).

ABSTRACT

In the genetic breeding of *Coffea arabica*, several traits of interest to breeders have quantitative inheritance, which requires an understanding of the genetic properties of the population in study. However, perennial species require repeated measurements and tend to generate unbalanced data. In such cases, it is necessary to adopt robust statistical methodologies, such as mixed models (REML/BLUP), and to determine the number of harvests necessary to optimize the selection and evaluation of genotypes. Therefore, the aim of this study was to estimate genetic parameters and determine the optimal number of measures for the selection of F₄ progenies of *C. arabica*. The experiment was installed in 2014, in the experimental field of the Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER, in Londrina, Paraná, Brazil. A randomized block design was adopted with three replications and plots of 10 plants, with a spacing of 2.5 m x 0.5 m. Phenotypic evaluations were carried out on 17 F₄ progenies, in the 2017-2020 harvests, for the traits: vegetative development index (IDV), leaf nutrition index (INF), productivity (PROD), fruit size (TF), fruit ripeness cycle (M) and leaf rust resistance (F). The REML and BLUP methods were used to estimate genetic parameters and predict additive genetic values, respectively. With the estimation of the repeatability coefficient, the optimal number of measures was determined to increase the selective accuracy of the evaluated traits. Then, the selection of genotypes was ordered by the Mulamba and Mock index, based on the genetic values predicted by BLUP. The genetic effects were significant only for M and F, while the characteristics IDV, INF, PROD and TF demonstrated unfeasibility for selection due to the absence of variability between genotypes, in addition to the low magnitude of the estimated parameters. On the other hand, the heritability estimates in the narrow sense for M and F had medium and high magnitudes, with the respective values of 0.24 and 0.64. The higher values of the estimates of the repeatability coefficient in IDV, M and F, indicated 4, 5 and 2 harvests of measurement, respectively, is needed to obtain high accuracy (≥ 0.70). In contrast, the results obtained for INF, PROD and TF demonstrated that is necessary a high number of harvests (≥ 13) to increase selective accuracy. The selection of genotypes based on the genetic values predicted by BLUP enabled gains of 4.89% for M and -22.64% for F, applying the selection intensity of 23.5%. These results allowed the accurate selection of genotypes with balanced gains for early ripeness cycle and resistance to leaf rust to compose the F₅ generation.

Keywords: *Coffea arabica*; mixed model; genetic value; heritability; repeatability.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	ASPECTOS ECONÔMICOS DA CAFEICULTURA	13
2.2	ESPÉCIES DO GÊNERO <i>COFFEA</i>	14
2.2.1	<i>Coffea arabica</i>	15
2.3	MELHORAMENTO GENÉTICO DE CAFEEIROS ARÁBICA.....	16
2.3.1	Histórico do Melhoramento no Brasil.....	17
2.3.2	Diversidade Genética	19
2.3.3	Métodos de Melhoramento	23
2.3.4	Objetivos do Melhoramento Genético de Cafeeiros	25
2.3.4.1	Componentes de produção	26
2.3.4.2	Ciclo de maturação dos frutos.....	27
2.3.4.3	Resistência à ferrugem alaranjada.....	29
2.4	BASE GENÉTICA DE CARACTERES QUANTITATIVOS.....	32
2.5	COMPONENTES DE VARIÂNCIA E PARÂMETROS GENÉTICOS	33
2.5.1	Coeficiente de Herdabilidade.....	35
2.5.2	Coeficiente de Repetibilidade	36
2.6	NATUREZA DOS EFEITOS ESTATÍSTICOS.....	37
2.7	MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO GENÉTICA.....	39
2.7.1	<i>Restricted Maximum Likelihood (REML)</i>	42
2.7.2	<i>Best Linear Unbiased Prediction (BLUP)</i>	42
2.7.3	Metodologia de Modelos Mistos (REML/BLUP) em Cafeeiros Arábica.....	43
3	ARTIGO A: ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS GENÉTICOS E NÚMERO ÓTIMO DE MEDIDAS PARA A SELEÇÃO DE PROGÊNIES F₄ DE CAFÉ ARÁBICA VIA REML/BLUP	46
3.1	RESUMO	46
3.2	ABSTRACT	46
3.3	INTRODUÇÃO	47
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	48
3.4.1	Material Genético.....	49

3.4.2	Caracteres Avaliados.....	49
3.4.3	Análise Estatística	51
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
3.6	CONCLUSÕES	65
4	REFERÊNCIAS (ARTIGO A)	66
5	CONCLUSÕES GERAIS.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas mais importantes, no âmbito social e econômico, em mais de 50 países localizados em regiões tropicais e subtropicais. Em todo o mundo, milhões de pessoas são beneficiadas pela cadeia produtiva de café, a partir do cultivo das espécies *Coffea arabica* e *C. canephora*. Dentre as duas espécies mais cultivadas, o café arábica possui maior relevância devido, principalmente, à sua maior qualidade da bebida. Como consequência, diversas pesquisas foram desenvolvidas para a espécie arábica, que incrementaram o conhecimento científico e tecnológico, principalmente no melhoramento genético da cultura.

A maioria das características de interesse agrônômico apresentam herança quantitativa e, assim, estão sujeitas à influência de um elevado número de genes, além do pronunciado efeito ambiental. Desse modo, é necessário a aplicação de análises que permitam compreender as propriedades genéticas da população em estudo. No entanto, em plantas perenes, como é o caso do café arábica, é comum que as estimativas dos parâmetros genéticos apresentem variação ao longo das safras. Isso acontece devido à complexidade dos caracteres, decorrente da expressão de diferentes genes ao longo do desenvolvimento, altamente influenciados pelas condições ambientais, além da base genética estreita que limita a variabilidade entre os genótipos.

Outros aspectos biológicos, como o longo ciclo reprodutivo, a bienalidade produtiva, a expressão diferencial do mesmo caráter em vários anos e os aspectos referentes a precocidade e longevidade produtiva, são considerados como complicadores do desenvolvimento de cultivares. Esses aspectos tendem a tornar o processo longo e oneroso, pois exigem avaliações repetidas em diferentes safras para a avaliação e seleção genética. Além de serem escassos os estudos em cafeeiros que buscaram determinar o número ótimo de safras consideradas para a avaliação de características visando uma seleção acurada de genótipos. Consequentemente, outras dificuldades são evidentes, devido a utilização do material genético por vários anos e a redução na taxa de sobrevivência de indivíduos em campos experimentais. Nessas situações, os dados obtidos são, geralmente, desbalanceados e, portanto, exigem a aplicação de metodologias robustas para a análise estatística dos caracteres alvo do melhoramento.

Além disso, para a avaliação genética de populações segregantes sob seleção, os genótipos em estudo devem ser considerados como efeito aleatório para fornecerem estimativas mais precisas de média de tratamentos ou ganho de seleção. Por outro lado, os

efeitos ambientais identificáveis devem ser considerados como vetor de efeitos fixos, em experimentos completos em termos de representatividade dos efeitos de tratamentos em cada um de seus níveis. Conseqüentemente, a presença de efeitos fixos e aleatórios torna ideal a aplicação de metodologias de modelos mistos.

No estudo de avaliação e seleção genética em plantas perenes, a metodologia de modelos lineares mistos (REML/BLUP) tem sido amplamente utilizada, pois fornece resultados mais realistas e permite lidar com as condições de desbalanceamento dos dados. Através o procedimento REML (*Restricted Maximum Likelihood*) é possível obter a decomposição dos componentes de variância fenotípica, genética e ambiental, além da estimação dos parâmetros genéticos não viesados. As estimativas dos componentes de variância obtidas via REML são utilizadas para a predição dos valores genéticos pelo BLUP (*Best Linear Unbiased Prediction*). Porém, em se tratando de medidas repetidas, é relevante compreender o número de safras necessárias para a avaliação das características, visando uma acurada seleção genética. Portanto, o objetivo desse trabalho foi estimar parâmetros genéticos, determinar o número ótimo de medidas e prever o valor genético, via REML/BLUP, para a seleção de cafeeiros de geração F₄.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS ECONÔMICOS DA CAFEICULTURA

O café é uma das principais *commodities* agrícolas mundiais, responsável por uma valiosa cadeia produtiva, do agricultor ao consumidor, principalmente nos países em desenvolvimento (ALEXANDRATOS; BRUINSMA, 2012; DAVIS et al., 2019). Além disso, devido ao seu efeito estimulante e sabor agradável, o café é uma das bebidas mais consumidas do mundo, com crescimento médio anual de 2,7%, estimulando ainda mais o comércio do grão (GÖKCEN; ŞANLIER, 2019; ICO, 2020). Em toda a cadeia produtiva do produto, aproximadamente, 100 milhões de pessoas são beneficiadas com a fonte de renda gerada pelo café (VEJA; ROSENQUIST; COLLINS, 2003). Por esses motivos, a cafeicultura é considerada como uma das mais importantes atividades agrícolas no âmbito econômico e social (BRUINSMA, 2003).

O cultivo de café é realizado em mais de 50 países, localizados em regiões tropicais e subtropicais, através das espécies denominadas arábica (*Coffea arabica*) e *C. canephora*, também chamada de Robusta ou Conilon (GUERREIRO FILHO et al., 2008a; ICO, 2020). Essas duas espécies foram responsáveis, na última década, pela produção média anual superior a 151 milhões de sacas (60 kg), correspondente à 60% de café arábica e os outros 40% em robusta (DAVIS et al., 2019; ICO, 2020). Todavia, a produção de café é, relativamente, pequena na maioria dos países produtores, sendo que apenas 15 deles possuem produção superior a um milhão de sacas. Dentre esses países, somente quatro ultrapassam a produção de 10 milhões de sacas, sendo eles: o Brasil, o Vietnã, a Colômbia e a Indonésia (ICO, 2020).

O Brasil é o maior produtor de café do mundo, responsável por mais de 35% de participação na produção mundial, o qual caracterizou 53,7 milhões de sacas na última década (ICO, 2020). Atualmente, a área de cultivo de café em produção no Brasil está estimada em 1,88 milhão de hectares plantados, composta por 81,3% em café arábica e o restante da área em *C. canephora* (CONAB, 2020). Entretanto, com relação a produtividade das duas espécies, o percentual de café arábica no país é de 75%, visto que essa espécie possui produtividade inferior (GUERREIRO FILHO et al., 2008a; CONAB, 2020).

De forma geral, os maiores índices de consumo de café estão em países desenvolvidos, impulsionando o mercado de exportação dos países produtores (BRUINSMA, 2003). Nesse cenário, o Brasil também é destaque, como maior exportador do mundo,

responsável pela exportação de, cerca de, 33,3 milhões de sacas por ano, correspondendo à 30,43% de todo o café exportado, nos últimos dez anos (ICO, 2020). Apenas no ano de 2019, essa *commodity* foi responsável pela receita de 5,10 bilhões de dólares na exportação de 40,7 milhões de sacas (CECAFÉ, 2020). Os Estados Unidos são os principais importadores de cafés brasileiros, além de serem também os maiores consumidores do mundo, à frente do Brasil que se caracteriza como o segundo maior consumidor da bebida (CECAFÉ, 2020; ICO, 2020).

Além da atual importância ao agronegócio, o setor cafeeiro no Brasil também foi responsável por transformações estruturais e econômicas em diversas micro regiões incluídas na cadeia produtiva (VOLSI, et al., 2019). A cadeia produtiva de café no Brasil é bastante complexa e pode ser dividida em fornecedores de insumos para a produção agrícola, produtores rurais, cooperativas, corretores, indústria (torrefação e moagem, solúvel, cápsulas), exportadores de grãos, atacado interno e externo e, por fim, os consumidores. Consequentemente, são gerados empregos e renda para os diversos setores de produção, comércio, indústria e serviços, além de arrecadar taxas e impostos para estados e municípios (CONCEIÇÃO; ELLERY JUNIOR; CONCEIÇÃO, 2017).

2.2 ESPÉCIES DO GÊNERO *COFFEA*

Os cafeeiros pertencem ao filo das Fanerógamas, à classe das Angiospermas e subclasse Eudicotiledônea, à ordem Rubiales, da família das Rubiaceae, tribo Coffeae e subtribo Coffeinae, no gênero *Coffea* (GUERREIRO FILHO et al., 2008a; DAVIS et al., 2011; DAVIS, 2010; 2011). Dentre os grupos de plantas pertencentes a família das Rubiaceae, o gênero *Coffea* é considerado o mais importante no aspecto econômico (VEGA; ROSENQUIST; COLLINS, 2003).

As espécies de *Coffea* possuem amplo alcance geográfico que compreende desde regiões tropicais da África, Madagascar e Ilhas Mascarenhas, até as regiões da Ásia tropical e Australasia, com vegetação subtropical de altitude elevada e florestas semi decíduas (DAVIS et al., 2011). Muitas espécies foram identificadas durante explorações de florestas tropicais da África, desde a segunda metade do século XIX, principalmente em Madagascar e no leste africano (CHARRIER; BERTHAUD, 1985). Entretanto, os três principais centros de diversidade de *Coffea* são Madagascar, Camarões e Tanzânia (DAVIS et al., 2006; 2009). Nesses locais é possível identificar uma imensa variabilidade genética, devido as interações genéticas entre as espécies de cafeeiros (CHARRIER; BERTHAUD, 1985).

Atualmente, são conhecidas 124 espécies no gênero *Coffea*, sendo que as mais utilizadas com destinação ao consumo são *C. arabica*, *C. canephora* e *C. liberica* (DAVIS et al., 2006; 2011). Outras espécies pertencentes ao gênero *Coffea*, apesar de não comercializadas, são consideradas importantes, principalmente em função da variabilidade genética que podem introduzir nos programas de melhoramento, como *C. racemosa*, *C. dewevrei*, *C. klainii*, *C. congensis*, *C. salvatrix*, *C. stenophylla*, *C. eugenioides*, *C. kapakata*, *C. humilis*, *C. sessiliflora*, *C. heterocalyx* e *C. anthonyi*, dentre outras (CHARRIER; BERTHAUD, 1985; GUERREIRO FILHO et al., 2008a). Contudo, praticamente, todo o café comercializado no mundo é representado pelas espécies de *C. arabica* e *C. canephora*, com aproximadamente 60% e 40% da produção mundial, respectivamente (DAVIS et al., 2019). A espécie *C. arabica* L., denominada café arábica, é a mais importante economicamente (DAVIS et al., 2006). A grande preferência por essa espécie é decorrente, de modo geral, à sua qualidade de bebida superior às demais (VAN DER VOSSEN, 1985).

2.2.1 *Coffea arabica*

O café arábica é uma planta perene responsável por 60% da produção mundial de café, sendo cultivada em regiões de altitudes mais elevadas e temperaturas mais amenas, entre 18° e 21°C, nos continentes americano, asiático e parte da África (GUERREIRO FILHO et al., 2008a; DAVIS et al., 2019). A espécie é originária do sudoeste da Etiópia, sudeste do Sudão e norte do Quênia, em região restrita e marginal às demais espécies (GUERREIRO FILHO et al., 2008a). Acredita-se que a domesticação dessa espécie ocorreu no lado oeste do *Great Rift Valley*, ao sul da Etiópia. Posteriormente, esses cafeeiros foram introduzidos no Iêmen, de onde foram levados para a Indonésia e para Ilha de Reunião. As plantas introduzidas na Indonésia deram origem à variedade botânica *Typica* (*C. arabica* var. *Typica* Cramer), enquanto o café da Ilha de Reunião deu origem a variedade botânica *Bourbon* (*C. arabica* var. *Bourbon* Rodr. Ex Choussy) (SAKIYAMA, 2015).

Análises associadas à origem geográfica e a compatibilidade em cruzamentos controlados, além de outros estudos realizados, indicam a origem de *C. arabica* pela hibridação natural de gametas não reduzidos das espécies diploides *C. eugenioides* e *C. canephora* (CHARRIER; BERTHAUD, 1985; CARVALHO; MÔNACO, 1968; LASHERMES et al., 1999). Por esse motivo, o café Arábica é um alotetraploide com 44 cromossomos, enquanto as outras espécies de *Coffea* são todas diploides (GUERREIRO FILHO et al., 2008a; SAKIYAMA, 2015). Além disso, a espécie Arábica possui flores hermafroditas

autocompatíveis que, na ocorrência da cleistogamia, faz com que a reprodução seja predominantemente autógama. No entanto, cerca de 10 a 15% de polinização cruzada pode ocorrer em condições naturais, através da ação do vento, insetos ou pela gravidade (SAKIYAMA, 2015).

2.3 MELHORAMENTO GENÉTICO DE CAFEEIROS ARÁBICA

O melhoramento genético de plantas tem sido realizado desde os primórdios da agricultura, através da seleção empírica de espécies e variedades mais desejáveis pelos agricultores (BORÉM; MIRANDA, 2013). Historicamente, a ideia inicial do melhoramento genético é a modificação de plantas, visando o aumento direto da produção (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Entretanto, com o início dos estudos em genética e a subsequente evolução dos métodos de melhoramento com avaliações biométricas, outros critérios passaram a ser considerados, como a resistência a pragas e doenças, aumento da tolerância ou resistência aos fatores adversos de clima e solo, além de outros fatores que influenciavam indiretamente à produção (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; BORÉM; MIRANDA, 2013). Esse panorama também se repete no melhoramento genético de café arábica no Brasil, o qual foi marcado por duas fases distintas, sendo a primeira, baseada no melhoramento genético empírico e, a segunda, pelo estabelecimento de métodos científicos no desenvolvimento de cultivares (MENDES et al., 2008a).

A importância econômica do cultivo de *C. arabica*, tanto no Brasil quanto no mundo, contribuiu para o desenvolvimento de muitas pesquisas nas áreas de fitotecnia e genética (CARVALHO, 1985; CARVALHO et al., 1991; HEIN; GATZWEILLER, 2006; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Até o ano de 2020, somente no Brasil, mais de 130 cultivares de cafeeiros Arábica estavam disponíveis para os agricultores através do Registro Nacional de Cultivares (BRASIL, 2021), evidenciando ainda mais a importância dessa espécie. A disponibilidade de diferentes cultivares foi possível através do sucesso dos programas de melhoramento genético, os quais contribuíram com resultados científicos e tecnológicos. Esses resultados foram fundamentais no melhoramento da espécie arábica, através de mutações, cruzamentos naturais ou artificiais e seleções de plantas identificadas em centros de pesquisa (VAN DER VOSSSEN, 1985; ALVES, 2008).

2.3.1 Histórico do Melhoramento no Brasil

A primeira fase do melhoramento genético de cafeeiros no Brasil teve início com a introdução da espécie arábica no norte do país em 1727, através da variedade Typica, responsável pelo desenvolvimento inicial da cafeicultura brasileira (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; MENDES et al., 2008a). No século seguinte, as mutações de Typica deram origem a outras cultivares, empiricamente selecionadas, como Amarelo de Botucatu e Maragogipe (MENDES et al., 2008a). No entanto, os dois genótipos mutantes possuíam apenas modificações morfológicas, sem alteração no potencial produtivo (MENDES et al., 2008b). Por esse motivo, o governo brasileiro verificou a necessidade de ampliar a base genética e a produção nacional de café e, então, providenciou a introdução da cultivar Bourbon Vermelho e Sumatra, nos anos de 1859 e 1896, respectivamente (MENDES et al., 2008a; FAZUOLI et al., 2008). Porém, acredita-se que Sumatra seja uma linhagem da variedade Typica, em razão de inúmeras semelhanças, oferecendo pouca variabilidade genética (MENDES et al., 2008a).

Alguns anos depois, semelhante ao ocorrido com Typica, as mutações e cruzamentos naturais envolvendo a cultivar Bourbon Vermelho, originaram novos genótipos, como Bourbon Amarelo, Caturra Vermelho e Caturra Amarelo (MENDES et al., 2008a; PEREIRA; BAIÃO, 2015). Nesses mutantes foi verificado um aumento no potencial produtivo, como é o caso do Bourbon Amarelo que superava a produção de Bourbon Vermelho em 32 a 45% (FAZUOLI et al., 2008). Enquanto, para ambas as cultivares Caturra, além de elevada capacidade produtiva, foi identificado o porte reduzido, por meio da redução no comprimento dos internódios, atribuído ao fator dominante ‘Caturra’ (*CtCt*) (CARVALHO et al., 2008).

A partir da década de 1930, o melhoramento genético de cafeeiros foi intensificado com a criação da Seção de Genética do Instituto Agrônomo (IAC), em Campinas, sendo abordado de forma bastante completa com pesquisadores de áreas como a citologia, fisiologia e estatística (CARVALHO; FAZUOLI, 1993; MENDES et al., 2008a). Apesar do melhoramento empírico ter resultado nas primeiras mudanças alélicas dirigidas, o melhoramento de plantas é uma ciência que estabelece hipóteses, avaliadas pelo método científico, baseado no conhecimento de diversas áreas, tornando fundamental esse trabalho em equipes multidisciplinares (BORÉM; MIRANDA, 2013). Dessa forma, o principal objetivo da segunda fase do melhoramento genético de café Arábica foi a obtenção de plantas mais produtivas, vigorosas e, paralelamente, visando a seleção para resistência a pragas e doenças, tamanho da planta, uniformidade de maturação de frutos, entre outros caracteres (MENDES et

al., 2008a).

Nas décadas seguintes, através da identificação de plantas altamente vigorosas e produtivas no município paulista de Mundo Novo em 1943, o IAC analisou 18 plantas e consideraram a hipótese de um cruzamento natural entre as cultivares Sumatra e Bourbon Vermelho (MENDES et al., 2008a). O IAC, então, realizou várias seleções nesses materiais genéticos, até iniciar a multiplicação da cultivar Mundo Novo em 1952 (CARVALHO, 1981; 1985; FAZUOLI et al., 2008). A partir da seleção da cultivar Mundo Novo em lavoura comercial, foram obtidos grandes avanços pelo programa de melhoramento do IAC (MENDES et al., 2008a). Essa cultivar foi responsável por ganhos expressivos na produção nacional de café, visto que as melhores progênies de Mundo Novo chegavam a produzir 80% a mais que o genótipo original; 50% a mais do que as melhores seleções de ‘Bourbon Amarelo’; 95% a mais que as melhores seleções de ‘Bourbon Vermelho’ e 240% a mais do que as progênies de ‘Typica’ (FAZUOLI et al., 2008). Além disso, as cultivares do grupo Mundo Novo estão entre as mais produtivas de *C. arabica*, além de possuir boa longevidade e excelente rusticidade (FAZUOLI et al., 2005).

Posteriormente, no início da década de 1970, a cafeicultura brasileira teve um grande salto em produtividade com as cultivares do grupo Catuaí (MENDES et al., 2008a). Essas cultivares tiveram origem no cruzamento artificial de Caturra Amarelo IAC 476-11 com Mundo Novo IAC 374-19, visando obter cafeeiros produtivos, com porte baixo (tipo “Caturra”) e o vigor da cultivar Mundo Novo (CARVALHO et al., 2008; MENDES et al., 2008a). Além disso, a qualidade de bebida das cultivares do grupo Catuaí é considerada excelente, em função da participação de 75% da cultivar Bourbon Vermelho em sua formação (CARVALHO et al., 2008). A disponibilidade de cultivares altamente produtivas do grupo Catuaí e Mundo Novo, combinada com a efetiva aceitação dos agricultores, fez com que todo o parque cafeeiro do país fosse constituído por esses dois grupos de cultivares, as quais estão entre as mais cultivadas no Brasil (MENDES et al., 2008a; CHALFOUN; REIS, 2010).

Os objetivos até a década de 1960, de forma geral, baseavam-se no desenvolvimento de cultivares com alta produção, vigor, longevidade e ampla adaptação, visando o plantio em diferentes áreas do país. Porém, durante a década de 1970, com o aparecimento da ferrugem, a rápida dispersão na cafeicultura brasileira e a suscetibilidade das cultivares mais plantadas, tornou-se necessário dar maior ênfase no melhoramento para a resistência à essa doença (FAZUOLI et al., 2007; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Portanto, outros institutos intensificaram suas pesquisas no melhoramento genético de *C. arabica*, como a EPAMIG (Empresa de Pesquisa Agropecuária

de Minas Gerais), a UFV (Universidade Federal de Viçosa), o IDR-Paraná (Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER) e o IBC (Instituto Brasileiro do Café) (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Os programas de melhoramento desses institutos passaram a utilizar cafeeiros arábica com introgressão de genes de *C. canephora*, como Icatu e Híbrido de Timor (HdT), e de *C. liberica*, como os derivados da série BA, no desenvolvimento de cultivares com resistência à ferrugem alaranjada (SERA, 2001; PEREIRA et al., 2013a; SERA; SERA; FAZUOLI, 2013; SERA et al., 2017; 2020; FAZUOLI et al., 2019).

O resultado de todas essas décadas de pesquisa foi fundamental para o desenvolvimento científico e tecnológico, resultando em dezenas de cultivares lançadas, visando explorar o potencial da cultura (RESENDE et al., 2001; BRASIL, 2021). Atualmente, a disposição de uma vasta quantidade de cultivares auxilia na tomada de decisão para o agricultor, evitando prejuízos com o plantio de uma cultivar inadequada (GUERREIRO FILHO et al., 2008b; MATIELLO, 2008). Além disso, a expressividade de ganhos em produtividade foi uma das maiores entre todos os programas de melhoramento vegetal, mesmo considerando a base estreita da espécie arábica (CARVALHO, 1993; ANTHONY et al., 2001; MENDES et al., 2008a). Isso pode ser evidenciado no estudo de Carvalho; Costa e Fazuoli (1981), onde o potencial produtivo das cultivares melhoradas foi cerca de 295% superior ao da primeira cultivar introduzida no Brasil.

2.3.2 Diversidade Genética

A caracterização da variabilidade genética é um dos aspectos fundamentais para o melhoramento genético de plantas, pois permite a tomada de decisões na escolha de genitores, estratégias de melhoramento e seleção e a identificação de genes de interesse (CAIXETA et al., 2008). Desse modo, a diversidade presente em bancos de germoplasma tem grande importância para o melhoramento de café arábica, pois possibilitam a ampliação da base genética, além da identificação de genes para resistência a pragas e doenças, condições ambientais adversas, qualidade de bebida e outras características desejáveis (MEDINA FILHO; BORDIGNON, 2007; BORÉM; MIRANDA, 2013).

Embora tenha havido tentativas de ampliação da base genética no início do desenvolvimento da cafeicultura brasileira, muitas não tiveram sucesso em função do desinteresse comercial (MENDES et al., 2008b). Isso ocorreu com as introduções de Murta, Polysperma, Laurina e Mokka, presentes somente em bancos de germoplasma de centros de

pesquisas (SERA, 2001; MENDES et al., 2008a). Outra tentativa de ampliar os recursos genéticos de café arábica ocorreu pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), em meados da década de 1960, nos altiplanos do sudoeste da Etiópia (MEYER et al., 1968). Esse local é caracterizado como centro primário do café arábica, o que torna possível encontrar elevada diversidade genética para a espécie (CHARRIER; BERTHAUD, 1985; BORÉM; MIRANDA, 2013). Por esse motivo, os genótipos provenientes da Etiópia podem ser considerados como grande fonte de alelos para o melhoramento genético (SILVESTRINI et al., 2007; LABOUISSSE et al., 2008).

Durante a expedição organizada pela FAO, foram coletadas sementes de 621 genótipos de *C. arabica* silvestres, originários de vários locais da Etiópia. As amostras coletadas foram encaminhadas para seis institutos, na Índia, Tanzânia, Etiópia, Costa Rica, Peru e Portugal (MEYER et al., 1968). Dos acessos coletados, 308 foram disponibilizados ao IAC pelo Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - CATIE (Costa Rica) (SILVESTRINI et al., 2007). Dentre esses acessos, 144 foram repassados ao programa de melhoramento do IDR-Paraná (SERA, 2001). Esses acessos etíopes, têm sido amplamente utilizados por diversos países, visando a identificação de caracteres de interesse, incremento de produção, qualidade de bebida e hibridações com cultivares conhecidas (LABOUISSSE et al., 2008). O uso desses acessos possui grande relevância para o melhoramento de café arábica, pois a variabilidade genética é muito alta em relação a base estreita das cultivares existentes (BENTI et al., 2020).

Além da introdução de acessos oriundos de centros de diversidade, como ocorreu com os cafeeiros etíopes, a introdução de germoplasma também pode ser realizada com espécies silvestres botanicamente próximas (CAIXETA et al., 2008; BORÉM; MIRANDA, 2013). A utilização de espécies silvestres favorece a doação de novos genes, por meio da hibridação interespecífica com a espécie cultivada. A introgressão de genes por hibridação é considerada uma das estratégias mais importantes no melhoramento genético e foi responsável pela ampliação da base genética de café arábica a partir de cruzamentos, naturais e artificiais, com *C. canephora*, *C. racemosa* e *C. liberica* (VAN DER VOSSSEN, 1985; CAIXETA et al., 2008). Desde a década de 1970, os programas de melhoramento de café arábica utilizam cafeeiros arábica derivados de híbridos interespecíficos com a finalidade de adquirir genes de resistência à ferrugem, como já relatado anteriormente. Porém, outras utilizações desses genótipos foram feitas para transferência de genes que favoreceram o adensamento de plantas, diferentes ciclos de maturação, maior eficiência no sistema radicular e resistência a fatores bióticos e abióticos (SERA, 2001).

O primeiro programa de melhoramento efetivo para a resistência a doenças em cafeeiro foi implantado em 1911, através da seleção de germoplasma resistente a ferrugem alaranjada na Índia. Esses trabalhos deram origem ao grupo de cultivares Kent, na qual substituíram as lavouras suscetíveis da cultivar Coorg (RODRIGUES JUNIOR; BETTENCOURT; RIJO, 1975; TALHINHAS et al., 2017). Essa mesma doença motivou diversas pesquisas durante o século XX, sobretudo pela criação do Centro de Investigação das Ferrugens do Cafeeiro (CIFC) em Portugal, responsável pela identificação e caracterização das populações de HdT (TALHINHA et al., 2017). A população de HdT é derivada de um único genótipo resistente à ferrugem, resultante da hibridação natural entre *C. arabica* e *C. canephora*, identificado em 1927 em meio ao cultivo de Typica na ilha de Timor (BETTENCOURT, 1981). Durante a década de 1960, o CIFC iniciou um programa de melhoramento com a finalidade de transferir genes de resistência à ferrugem do HdT para as principais cultivares de *C. arabica*. As hibridações artificiais entre Caturra x HdT CIFC832/1 e Villa Sarchi 971/10 x HdT CIFC832/2 deram origem às populações de Catimor e Sarchimor, respectivamente (SERA, 2001; TALHINHA et al., 2017).

Nos anos seguintes, o IAC foi responsável por novos estudos envolvendo o cruzamento interespecífico de cafeeiros Arábica e genótipos tetraploides de *C. canephora*. A duplicação cromossômica de *C. canephora* realizada por Mendes (1939), permitiu a transferência de alelos para a obtenção de genótipos arábica vigorosos, produtivos e resistentes à ferrugem (COSTA, 1978; ESKES et al., 1990). Os híbridos resultantes foram retrocruzados com cultivares comerciais da época, como Bourbon e Mundo Novo, dando origem a população de cafeeiros Icatu (ESKES et al., 1990). Entretanto, a população de Icatu apresenta diferentes níveis de resistência à doença, sugerindo a existência de variação quantitativa propiciada por genes de efeito secundário ou poligênicos (ESKES, 1982; ESKES; COSTA, 1983). Os estudos com plantas de Icatu realizadas pelo CIFC encontraram genótipos resistentes à todas as raças de ferrugens conhecidas, denominado grupo fisiológico A, enquanto os genótipos derivados de HdT apresentaram resistência durável por mais de 30 anos (BETTENCOURT; CARVALHO, 1968; MARQUES; BETTENCOURT, 1979; SERA et al., 2010).

A introdução de genes de *C. canephora*, em cultivares derivadas do grupo Icatu e de HdT, possibilitou o desenvolvimento da maioria das cultivares com resistência à ferrugem (MENDES et al., 2008b). Diversos genótipos foram desenvolvidos através do germoplasma de portadores de genes de *C. canephora* derivados de Sarchimor, Catimor, Icatu, Catuaí x Icatu, Sarchimor x Catuaí e Sarchimor x Mundo Novo (SERA, 2001). Várias cultivares de café derivadas desse germoplasma apresentam resistência completa para a maioria das raças

de ferrugem, como IAPAR 59, Obatã IAC 1669-20, Oeiras, Tupi IAC 1669-33, entre outras (SERA et al., 2010). Além da variabilidade genética para resistência à ferrugem, a população de HdT e Icatu tem grande importância na transmissão de genes de resistência à outras doenças como a *Coffee Berry Disease*, causada pelo fungo *Colletotrichum kahawae* (SERA, 2001; MENDES et al., 2008b). Os genótipos de HdT também apresentam genes de resistência para mancha aureolada, alta resistência ao nematoide *Meloidogyne exigua* e resistência intermediária para *M. paranaensis* (MENDES et al., 2008b; SHIGUEOKA et al., 2016).

Cafeeiros com introgressão de genes do *C. liberica*, também foram utilizados como fonte de resistência para a ferrugem em programas de melhoramento (SERA et al., 2017; FAZUOLI et al. 2019). Acredita-se que a ocorrência de hibridação natural, entre as espécies *C. arabica* e *C. liberica* na Índia, tenha transferido o gene *SH3*, na qual nunca foi identificado em variedades de café arábica originadas fora do território indiano (NORONHA WAGNER; BETTENCOURT, 1967). A maioria das plantas resultantes dessa hibridação se mostraram estéreis, até a identificação do tetraploide denominado S.26 (SRINIVASAN; NARASIMHASWAMY, 1975). O genótipo S.26 foi utilizado como parental para o desenvolvimento da variedade S.288 que, após um cruzamento com a cultivar Kent, originou o genótipo S.795, ambas conhecidas por portarem o gene *SH3* de *C. liberica* (CONCEIÇÃO; FAZUOLI; TOMA-BRAGHINI, 2005; RAM, 2017). Em 1960, a Índia iniciou o plantio das cultivares S.288 e S.795, porém, a resistência foi quebrada, na década seguinte, quando ambos os genótipos se mostraram severamente afetados pela ferrugem (VISHVESHWARA, 1974; ESKES, 1989).

Outros genótipos derivados do material genético S.26 foram selecionados na estação experimental de Balehonnur na Índia, denominados como Série BA (Balehonnur Arabica) (SRINIVASAN; NARASIMHASWAMY, 1975). Dentre esses materiais, o IAC recebeu do CATIE (Costa Rica) os acessos BA10 e BA21, pertencentes à Série BA da Índia, que originaram os germoplasmas IAC 1110 e IAC 1107, respectivamente (TOMA-BRAGHINI et al., 2015; FAZUOLI et al., 2019). Além da resistência à ferrugem, foram identificados cafeeiros da série BA com tolerância à seca. Essa tolerância à seca foi verificada também em híbridos, originados do cruzamento entre BA10 com as cultivares Catuaí e Mundo Novo, submetidos ao déficit hídrico em campo. Entretanto, os genótipos derivados de BA10 apresentam diferentes níveis de tolerância (MAZZAFERA; CARVALHO, 1987; QUEIROZ-VOLTAN et al., 2014).

A seleção de uma única planta no acesso BA10 (IAC 1110) deu origem ao IAC 1110-8. Devido a hipótese de que as cultivares do grupo Catuaí poderiam apresentar

resistência duradoura à ferrugem ao portar o gene *SH3*, o acesso IAC 1110-8 foi cruzado artificialmente com a cultivar Catuaí Vermelho IAC 46 (FAZUOLI et al., 2019; TOMA-BRAGHINI et al., 2015). Após sete gerações de seleção pelo método genealógico, o IAC lançou a cultivar IAC Catuaí SH3 em 2016. A denominação do genótipo ocorre em função das seleções para homozigose de *SH3SH3*. Essa cultivar apresenta maior produtividade e vigor em relação à outras cultivares do grupo Catuaí, ciclo de maturação intermediário, resistência à ferrugem e alta tolerância à seca (FAZUOLI et al., 2019).

Alguns dos genótipos derivados de IAC 1110-8 foram repassados ao IDR-Paraná em 1977 na intenção de aumentar a diversidade genética do banco de germoplasma da instituição (ALTEIA et al., 2001; SERA et al., 2017). Isso possibilitou ao IDR-Paraná, o desenvolvimento de cultivares como IPR 100 e IPR 105, derivadas da planta H8721-8 C1420 EP166, na qual é oriunda do cruzamento de Catuaí Vermelho IAC 81 x (Catuaí Vermelho IAC 81 x IAC 1110-8). O genótipo IPR 100, lançado em 2012, é considerado a primeira cultivar de café arábica de porte baixo com resistência aos nematoides *M. paranaensis* e *M. incognita* (SERA et al., 2017). Entretanto, apesar de ser derivada do genótipo portador de *SH3*, a cultivar IPR 100 não possui resistência à ferrugem, apresentando suscetibilidade similar ao seu parental Catuaí Vermelho IAC 81 (DEL GROSSI et al., 2013; SERA et al., 2010). Em contrapartida, IPR 105 é suscetível aos nematoides e altamente resistente à ferrugem, provavelmente, por ser portador do gene *SH3* (SERA et al., 2010). Além disso, Carvalho et al. (2017) demonstraram resultados distintos para a tolerância a seca em mudas de IPR 100 e IPR 105, onde apenas a primeira se destacou para essa característica. É possível que, durante os avanços de geração do genótipo IPR 105, não tenha sido selecionado a característica de tolerância ao déficit hídrico, da mesma forma que não foi realizada a seleção de genótipos com resistência à ferrugem durante o desenvolvimento da cultivar IPR 100 (CARVALHO et al., 2017).

2.3.3 Métodos de Melhoramento

A eficiência de um programa de melhoramento é dependente do estudo do germoplasma da cultura e dos métodos de melhoramento utilizados para o desenvolvimento de cultivares (FEHR, 1991). Os métodos de melhoramento de uma determinada espécie dependem, em parte, do tipo de cultivar que se deseja desenvolver e da fonte de variabilidade genética que se está utilizando (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO; BORÉM; MIRANDA, 2013). Durante muitos anos, devido à ausência de fontes de variabilidade e de conhecimento científico, o método mais utilizado na seleção de *C. arabica* foi a seleção massal,

através da preservação das plantas mais atraentes fenotipicamente ou atípicas nas plantações de Typica e Bourbon (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; MENDES et al, 2008a; 2008b; BORÉM; MIRANDA, 2013).

No melhoramento de plantas autógamas, o método mais utilizado é o pedigree, também chamado de método genealógico (RAMALHO; CARVALHO; NUNES, 2012). No caso do café Arábica, os métodos SSD (*Single Seed Descendent*), Bulk e Genealógico são utilizados com maior frequência. Esses métodos contam com a realização de hibridações, seguidas de autofecundações e seleções, visando a acumulação de genes favoráveis provenientes dos indivíduos parentais. (SERA, 2001; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; BORÉM; MIRANDA, 2013). A utilização do método de seleção recorrente é pouco utilizada no melhoramento de café arábica, mas também pode ser utilizada para o aumento gradual da frequência de alelos favoráveis de características quantitativas (BORÉM; MIRANDA, 2013).

Nas espécies autógamas, como é o caso de *C. arabica*, os indivíduos podem se encontrar em homozigose, produzindo progênies homozigóticas, ou em indivíduos heterozigóticos, que segregam em progênies homozigóticas e heterozigóticas (BORÉM, MIRANDA, 2013). As estratégias de melhoramento em café arábica visam o desenvolvimento de cultivares altamente homozigóticas para que, por sementes, deem origem a lavouras uniformes (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Para que isso ocorra, é necessária a realização de subseqüentes autofecundações nos indivíduos selecionados, para reduzir a heterozigose. Na prática, para a maioria dos caracteres agrônômicos, a uniformidade do fenótipo é atingida após cinco a oito gerações de autofecundação (BORÉM; MIRANDA, 2013). Entretanto, o melhoramento de caracteres quantitativos, como a produtividade, é mais difícil de ser trabalhados em plantas perenes, devido ao longo período juvenil e às oscilações bienais de produção (SERA, 2001). Por esse motivo, os resultados da seleção em *C. arabica* levam, em média, seis anos até permitir que a capacidade produtiva seja avaliada. Além disso, são necessárias entre quatro e cinco gerações para se obter a estabilidade do material genético, seguido pelo estudo de adaptação do genótipo às diversas condições climáticas (CONCEIÇÃO; FAZUOLI; TOMA-BRAGHINI, 2005).

Outras características dificultam o processo de melhoramento da espécie, como os longos períodos para obtenção de flores para cruzamentos e produção de sementes;; necessidade de avaliações em relação a precocidade e longevidade produtiva; disponibilidade de grandes áreas para a instalação de experimentos de campo por longo período de tempo; e a maior facilidade de quebra de resistência às doenças, devido a longa permanência de exposição

do hospedeiro em campo. Portanto, a obtenção de uma nova cultivar de cafeeiro é um processo bastante longo e caro (SERA, 2001). Além disso, é fundamental que o desenvolvimento de uma cultivar seja feito o mais rápido possível, sem dispensar os anos necessários de ensaios de produtividade para a avaliação da interação genótipo x ambiente (BORÉM; MIRANDA, 2013). Esse cenário tende a limitar a eficiência do ganho genético com as seleções, sendo recomendado a utilização métodos alternativos que utilizam a seleção precoce em cafeeiros (SERA, 2001; FAZUOLI et al., 2002; CONCEIÇÃO; FAZUOLI; TOMA-BRAGHINI, 2005).

2.3.4 Objetivos do Melhoramento Genético de Cafeeiros

O planejamento de um programa de melhoramento é uma das principais etapas para a definição específica dos objetivos à curto, médio e longo prazo. Os programas de melhoramento, de maneira geral, têm como objetivo mais comum o desenvolvimento de cultivares adaptados a determinada região geográfica, desenvolvimento de cultivares para determinado nicho de mercado, maior resistência às principais doenças da espécie, entre outros critérios estabelecidos pelos melhoristas (BORÉM; MIRANDA, 2013). Os critérios são estabelecidos pelos próprios melhoristas, têm a função de servir como base para a seleção artificial e são fatores essenciais para o melhoramento genético (RESENDE, 2002a).

Um dos principais objetivos do melhoramento genético é o aumento da rentabilidade da cultura e, por esse motivo, a ideia inicial é baseada, principalmente, na seleção genética de plantas mais produtivas (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Contudo, outras características podem ser avaliadas visando o aumento indireto da rentabilidade da cultura, através da economicidade ao sistema produtivo (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; BORÉM; MIRANDA, 2013). O aumento da produtividade somado à redução de custos de produção são, em geral, consequências do uso de genótipos resistentes às principais pragas e doenças (FREITAS et al., 2007).

As avaliações dos genótipos também costumam considerar características agrônômicas como o vigor das plantas, ciclo e uniformidade de maturação, qualidade, resistência à pragas e doenças, tamanho do grão, entre outras características que possam favorecer o aumento indireto da produtividade (CARVALHO; MÔNACO; FAZUOLI, 1979; SERA, 2001; CONCEIÇÃO; FAZUOLI; TOMA-BRAGHINI, 2005; MATIELLO, 2008). Além disso, as características morfológicas são frequentemente utilizadas por melhoristas para a caracterização de cafeeiros (ALVES, 2008). No programa de melhoramento do IDR-Paraná, por exemplo, é comum a realização de avaliações do potencial produtivo, IDV e INF, ciclo de

maturação, tamanho dos frutos, número de frutos nas ramificações e avaliações da reação à patógenos, como é o caso da ferrugem alaranjada (SERA, 2001).

2.3.4.1 Componentes de produção

O desenvolvimento de cultivares superiores àquelas que já se encontram no mercado é um dos maiores desafios do melhoramento genético (BORÉM; MIRANDA, 2013). No café Arábica, esse desafio é pautado em superar a produtividade das cultivares mais antigas, como as dos grupos Catuaí e Mundo Novo, as quais ainda são as mais plantadas (CHALFOUN; REIS, 2010; FAZUOLI et al., 2007). Esse fator é fundamental para a avaliação de cafeeiros, visto que a bienalidade de produção de *C. arabica* requer que as seleções para esse caráter sejam baseadas no histórico de produção considerando, pelo menos, dois anos consecutivos de produção significativa (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Nesses casos, é possível realizar a seleção através de caracteres correlacionados à produção de grãos, visando a maximização de ganhos de maneira indireta (TEIXEIRA et al., 2012).

De maneira geral, plantas vigorosas são capazes de atender a demanda de teor de amido de reserva dos ramos e das folhas durante a formação dos frutos, recuperando as reservas de crescimento e produção no ciclo subsequente. Em contrapartida, as menos vigorosas ficam exauridas, comprometendo o crescimento, com irregularidades de produção, apresentando padrão bienal e reduzindo a longevidade produtiva (DaMATTA; RENA; CARVALHO, 2008). Diversos autores têm demonstrado a eficiência de seleção para caracteres morfológicos correlacionados positivamente com a produtividade (SEVERINO et al., 2002; TEIXEIRA et al., 2012; FREITAS et al., 2007). Além disso, os caracteres relacionados ao vigor vegetativo e nutricional possuem correlação positiva com as concentrações de potássio, nitrogênio e fósforo na planta (PETEK et al., 2007). A complementação desses caracteres ocorre em razão das notas atribuídas ao vigor estarem correlacionadas à produção do próximo ano (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; TEIXEIRA et al., 2012). Dessa forma, a seleção para avanço de geração pode ser realizada em um ano de safra alta ou biênio, complementado pelas avaliações de caracteres vegetativos e morfológicos (WALYARO; VAN DER VOSSSEN, 1979; BONOMO et al., 2004). Como resultado, é possível identificar genótipos com alto potencial produtivo através da seleção precoce em indivíduos altamente vigorosos, auxiliando os melhoristas nas tomadas de decisão no programa de melhoramento (TEIXEIRA et al., 2012). No entanto, é interessante considerar, também, outros componentes complementares para alta produção, como a ramificação secundária, número de inflorescências

e a porcentagem de frutificação (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008).

2.3.4.2 Ciclo de maturação dos frutos

O ciclo de maturação compreende o período entre a antese e a maturação dos frutos, enquanto o período do ano em que a maioria dos frutos se encontram no estágio cereja é denominado época de maturação. O ciclo e época de maturação são características poligênicas e possuem grande influência do ambiente, como por exemplo, a região de cultivo, exposição à radiação solar, disponibilidade nutricional e incidência de fatores bióticos (GUERREIRO FILHO et al., 2008b). Além disso, a influência ambiental para esse caráter, é variável de acordo com as condições climáticas na fase de formação dos frutos, influenciando a maturação dos frutos de ano para ano (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008).

O ciclo de maturação costuma ser mensurado com base no estágio fenológico da maior parte dos frutos de cada planta, referentes a florada principal, visto que um indefinido número de floradas pode ocorrer devido à fatores ambientais (ALVES, 2008). Desse modo, as avaliações podem ocorrer de acordo com a contagem de dias entre a antese e a maturação completa dos frutos (AGUIAR et al., 2004), determinação do acúmulo de graus-dia (CARAMORI et al., 2007) ou considerando a situação hipotética de que todos os tratamentos tiveram o mesmo período de antese, avaliando o estágio fenológico de frutos no período de colheita (ANDREAZI et al., 2017). Inicialmente, essas características não eram quantificadas de forma adequada, mas atualmente possui grande importância no melhoramento genético de cafeeiros (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; PEREIRA, 2010).

As cultivares de café podem ser classificadas como muito precoce, precoce, semiprecoce, médio, semitardia e tardia, de acordo com a época de maturação de seus frutos (SERA, 2001). Entretanto, a maior parte das cultivares registradas possuem ciclo médio, tardio e precoce (CARVALHO et al., 2008). O período médio de duração do ciclo floração-maturação para café arábica de ciclo médio, semi tardio e tardio é de, aproximadamente, 214, 217 e 234 dias, respectivamente (NUNES et al., 2010). No entanto, o tempo do ciclo de frutificação de *C. arabica* é muito amplo, podendo variar entre 205 e 243 dias (PETEK; SERA; FONSECA, 2009).

As cultivares de ciclo de maturação precoce florescem mais intensamente durante as primeiras floradas, contribuindo para que a época de maturação ocorra mais cedo (GUERREIRO FILHO et al., 2008b). Consequentemente, essas cultivares permitem colheitas antecipadas, por isso são recomendadas para áreas com riscos de geada, evitando o plantio de

cultivares mais tardias nesses locais (SERA, 2001; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; MATIELLO, 2008). A ocorrência de geadas em cafeeiros com frutos verdes pode gerar prejuízos à safra do mesmo ano, visto que os frutos verdes não granados são mais suscetíveis do que as folhas do cafeeiro (SERA, 2001; MATIELLO, 2008). Algumas evidências indicam que cultivares mais precoces tendem a ter maior exigência nutricional em relação às tardias, devido às necessidades de desenvolvimento em período mais curto (MATIELLO, 2008). Além disso, as cultivares de maturação média ou tardia são, geralmente, mais produtivas em comparação as plantas mais precoces (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Isso torna importante o desenvolvimento de cultivares altamente produtivas e com ciclo de maturação precoce ou muito precoce. (ANDREAZI et al., 2017).

Em regiões de altitude elevada, onde a temperatura é mais baixa, a maturação é mais tardia, sendo recomendado também o uso de cultivares com maior precocidade de maturação. No entanto, em relação aos talhões de diferentes relevos dentro da mesma propriedade, é recomendado o plantio de cultivares de maturação tardia para as áreas mais altas, onde há melhor escoamento de ar frio. A utilização de diferentes espaçamentos, associados à constituição genética da cultivar, também é um fator que contribui para o processo de maturação dos frutos. Espaçamentos maiores são recomendados para áreas mais frias, de altitudes elevadas ou com pouca exposição à radiação solar, visando acelerar a maturação. Sendo que, quanto menor for o espaçamento, maior será o tempo para os frutos completarem a maturação (MATIELLO, 2008).

Na mesma propriedade, é possível realizar o plantio de cultivares com maturação em diferentes épocas, caracterizado pela estratégia de manejo denominada escalonamento de colheita (SERA, 2001; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). O escalonamento de colheita permite diminuir os custos de produção, mão de obra, infraestruturas e equipamentos (SERA, 2001). Essas situações estão associadas às melhores condições de planejamento do tempo de colheita e maior eficiência no uso de estruturas de pós colheita e processamento (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Além disso, pode-se reduzir as perdas em relação a chuvas na colheita, que diminuem a qualidade do café e aumentam os custos de produção devido ao recolhimento de frutos no chão (SERA, 2001). Portanto, o escalonamento possibilita a maior quantidade possível de frutos no ponto ideal de maturação na colheita, aumentando a qualidade do café com custos mais baixos (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008).

2.3.4.3 Resistência à ferrugem alaranjada

A seleção de genótipos visando a resistência às principais pragas e doenças, deve dar prioridade às mais problemáticas na cultura ou na região de cultivo (MATIELLO, 2008). Uma das principais doenças do cafeeiro arábica é a ferrugem alaranjada do cafeeiro, causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. (GODOY; BERGAMIN FILHO; SALGADO, 1997). Essa doença tem importância econômica e ecológica para os países produtores, pois permanece nas plantas durante o ano todo, causando maior ou menor dano conforme a produtividade, região e época do ano (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Os prejuízos podem variar de 35 a 50%, devido à queda precoce das folhas e seca dos ramos, diminuindo a produção de frutos no ano seguinte (ZAMBOLIM, 2015). O controle da doença pode ser realizado pelo uso de fungicidas protetores cúpricos ou pelo emprego de fungicidas sistêmicos via foliar ou via solo (ZAMBOLIM, 2015). Porém, o método mais eficiente e apropriado para o controle é o uso de plantas com resistência genética (SILVA et al., 2006). As cultivares com resistência genética dispensam o uso de produtos químicos, reduzindo os custos de produção e riscos de contaminação ambiental, sendo também uma estratégia de produção sustentável (FERNANDEZ et al., 2004; OLIVEIRA; PEREIRA, 2008).

A *H. vastatrix* está presente nas principais regiões produtoras na forma de diferentes misturas de raças (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). As raças se configuram como variantes da mesma espécie, definidas com base no espectro de ação (CAMARGO, 2018). Muitas raças fisiológicas existentes são determinadas por diferentes combinações de seus alelos v (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). A variação da virulência ocorre em função da mutação, principalmente através da pressão de seleção exercida pelos genes de resistência do cafeeiro, denominado *SH* (ZAMBOLIM, 2015). Teoricamente, considerando os genes principais de resistência *SH* e seus correspondentes genes v , é provável a existência de mais de 500 raças do patógeno (SILVA et al., 2006; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). No entanto, apenas 50 raças foram identificadas até o momento pelo CIFC, sendo 17 delas já foram identificadas no Brasil (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; TALHINHAS et al., 2017).

A resistência completa para uma raça específica do patógeno é propiciada através do fator *SH* em condições homozigóticas (ESKES, 1989). De acordo com estudos genéticos do CIFC iniciados na década de 1960, a resistência à ferrugem é condicionada por, pelo menos, nove genes de origem qualitativa, denominados *SH* (*SH1-SH9*) (NORONHA-WAGNER; BETTENCOURT, 1967; RODRIGUES JUNIOR; BETTENCOURT; RIJO, 1975).

De acordo com a teoria de Flor, existe uma reação um-a-um entre os genes do patógeno e do hospedeiro, sendo que para cada alelo v do fungo, existe um correspondente SH na planta (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008; CAMARGO, 2018). Na ausência do gene SH de resistência, o alelo v do patógeno codifica as moléculas efetoras do hospedeiro para promover a virulência. Enquanto, na presença de SH , os genes do patógeno são reconhecidos pelo hospedeiro, resultando na avirulência (CAMARGO, 2018).

Com relação a presença do fator de resistência SH , nas plantas de origem da Etiópia se encontram os alelos $SH1$, $SH2$, $SH4$ e $SH5$. (RODRIGUES JUNIOR; BETTENCOURT; RIJO, 1975; BETTENCOURT; RODRIGUES JUNIOR, 1988), sendo muito comum a presença do $SH5$ em cultivares comerciais do Brasil, em geral (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Os genes de resistência presentes em *C. arabica* não são suficientes para propiciar resistência durável e efetiva ao patógeno (GONZALES-MARTINEZ; CORTINA-GUERRERO; HERRERA-PINILLA, 2009). Por outro lado, os derivados de HdT e cultivares do grupo Icatu, oriundos do cruzamento de *C. arabica* x *C. canephora*, possuem os alelos $SH6$, $SH7$, $SH8$ e $SH9$, devido a introgressão dos genes de *C. canephora* em cafeeiros arábica (RODRIGUES JUNIOR; BETTENCOURT; RIJO, 1975; BETTENCOURT). O gene $SH3$, derivado de *C. liberica*, é considerado importante fonte de resistência à ferrugem no Brasil e, atualmente, vem sendo utilizado em programas de melhoramento para transferir o mesmo para as cultivares tradicionais do país (SERA et al., 2007; MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). As raças fisiológicas existentes de *H. vastatrix* já quebraram quase todos os genes SH de resistência qualitativa do cafeeiro, sendo o $SH3$ um dos únicos que ainda não foi quebrado no Brasil (VÁRZEA et al., 2002). Entretanto, no caso de culturas perenes, o maior período de convívio entre patógeno e hospedeiro facilita a ocorrência da pressão pela quebra dos genes de resistência, em relação as culturas anuais (CAMARGO, 2018).

Apesar da quebra da resistência na Índia, a resistência à ferrugem do gene $SH3$, é usada até hoje no melhoramento de cafeeiros no Brasil, pois ainda não foi quebrada pelas raças fisiológicas presentes no país (SERA et al., 2007; FAZUOLI et al., 2019). Além disso, as progênies derivadas desses materiais genéticos indianos se mantiveram resistentes no Brasil em mais de 50 anos (CONCEIÇÃO; FAZUOLI; TOMA-BRAGHINI, 2005). Dessa forma, o cruzamento de linhagens elite com acessos portadores do gene $SH3$ é uma alternativa interessante para explorar a resistência à ferrugem, visando em conjunto a seleção de outras características agrônômicas para a obtenção de cultivares com elevado valor comercial (GONZALES-MARTINEZ; CORTINA-GUERRERO; HERRERA-PINILHA, 2009).

A resistência qualitativa é quase sempre utilizada pelos melhoristas, devido a maior facilidade de ser trabalhada (CAMARGO, 2018). Os genótipos de Sarchimor, Catimor, Catindu, Icatu, germoplasmas de Catucaí e genótipos portadores de *SH3* de *C. liberica*, são exemplos de fontes de resistência utilizados pela maioria dos institutos de pesquisas do Brasil (NORONHA-WAGNER; BETTENCOURT, 1967; SERA et al., 2007; DEL GROSSI et al., 2013). Porém, ao se transferir genes de resistência de outras espécies, frequentemente, se transfere características indesejáveis de forma involuntária. Isso ocorre devido a ligação genética em função dos cromossomos apresentarem de forma muito próxima os genes de resistência e aqueles de características indesejáveis (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Além disso, esses materiais genéticos estão perdendo a resistência diante de novas raças maior virulência (SHIGUEOKA et al., 2014).

Porém, além dos genes *SH*, existem outros genes de resistência qualitativa e quantitativa em condições de interação planta x patógeno (BETTENCOURT; RODRIGUES JUNIOR, 1988). Na resistência qualitativa, as plantas se apresentam como suscetíveis quando apresentam sintomas ou resistentes quando assintomáticas (CAMARGO, 2018). A resistência quantitativa, controlada por genes de efeito menor, pode ser evidenciada quando a resistência qualitativa é quebrada, gerando a resistência incompleta no genótipo (NELSON, 1978; SERA et al., 2010). Isso pode ser evidenciado em alguns genótipos derivados de Icatu e HdT, os quais apresentam resistência incompleta à ferrugem (ESKES et al., 1990). Consequentemente, é possível classificar em diferentes níveis de resistência, de acordo com o tipo de reação das lesões e intensidade do ataque do fungo (ESKES; BRAGHINI, 1981; GUERREIRO FILHO, 2008b). Assim, é possível encontrar plantas altamente resistentes, medianamente resistentes e pouco resistentes ou suscetíveis (CAMARGO, 2018).

Embora a resistência qualitativa seja identificada mais facilmente, seu caráter monogênico é efetivo apenas para raças específicas do patógeno. Além disso, esse tipo de resistência é pouco durável, pois pode ser quebrada dentro de uma escala microevolutiva do patógeno (CAMARGO, 2018). Por outro lado, a resistência quantitativa, também denominada como poligênica, permite uma resistência mais duradoura contra um amplo espectro de raças (NELSON, 1978). Nesses casos, é correto dizer que os genótipos se diferem quanto a agressividade ao invés da não virulência, como é caracterizada a resistência qualitativa (CAMARGO, 2018). Além disso, a resistência poligênica é possível de ser encontrada na maior parte das cultivares, sendo raros os casos de genótipos que não apresentam nenhuma resistência quantitativa (Do VALE; PARLEVLIET; ZAMBOLIM, 2001). Porém, o melhoramento de genes que conferem resistência quantitativa é mais difícil em função da distinção entre plantas

suscetíveis e resistentes (CAMARGO, 2018).

A melhor alternativa para obter uma resistência durável é através da acumulação de genes de resistência em um único genótipo, denominada como fenômeno de piramidação, ou pelo uso de variedades compostas, onde as linhagens apresentam diferentes combinações de genes (GONZALES-MARTINEZ; CORTINA-GUERRERO; HERRERA-PINILHA, 2009). Por isso, uma das estratégias utilizadas pelos programas de melhoramento é a piramidação de genes de efeito qualitativo em conjunto com os genes de efeito quantitativos, para obtenção de linhagens superiores com resistência durável à ferrugem (VARZEA et al., 2002; PETEK; SERA; FONSECA, 2008). No entanto, a aplicação de métodos que permitam o acúmulo gradual dos alelos favoráveis é um processo lento e que requer várias gerações, a exemplo de outras características quantitativas (CAMARGO, 2018).

2.4 BASE GENÉTICA DE CARACTERES QUANTITATIVOS

A eficiência de um programa de melhoramento depende da adoção de estratégias eficientes, as quais são definidas com base no conhecimento do controle genético dos caracteres alvos do melhoramento. O controle genético é caracterizado por todos os mecanismos genéticos responsáveis pela herança do caráter, tais como o número de genes que governam uma determinada característica, as ações e efeitos gênicos, herdabilidade, repetibilidade na expressão do caráter e as associações genéticas de um gene com outro (RESENDE, 2002a). De acordo com o número de genes envolvidos no controle de um caráter e pela importância do efeito ambiental na expressão do fenótipo, as características são classificadas como qualitativas ou quantitativas (FEHR, 1991). No estudo da herança de algumas características, pode-se observar classes fenotípicas distintas e facilmente separadas uma das outras. Essas características apresentam segregação descontínua e são denominadas qualitativas (RAMALHO et al., 2012b).

Os caracteres qualitativos são aqueles governados por um ou poucos genes, apresentando um pequeno número de fenótipos e são estudados através do procedimento de proporções fenotípicas (RESENDE, 2002a; RAMALHO et al., 2012b). No entanto, a maioria das características de interesse agrônomo, trabalhadas por geneticistas e melhoristas, são de herança quantitativa e apresentam distribuição contínua (RESENDE, 2002a). Esses fatores propiciam a existência de inúmeros fenótipos intermediários durante o estudo de segregação dos genes, dificultando a identificação de efeitos individuais em classes fenotípicas distintas

(RAMALHO et al., 2012b; SNUSTAD; SIMMONS, 2020).

Portanto, o procedimento de proporções fenotípicas, utilizado na genética qualitativa, não pode ser empregado no estudo de caracteres quantitativos (RAMALHO et al., 2012b). Isso ocorre em função dos caracteres qualitativos apresentarem um padrão simples de herança, enquanto os caracteres quantitativos apresentam herança complexa. No estudo de caracteres quantitativos, o efeito é condicionado por muitos genes de efeito pequeno que são muito influenciados pelos efeitos ambientais (CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Nesses casos, é fundamental a utilização de metodologias estatísticas para identificar a distribuição contínua dos fenótipos e a influência ambiental pela estimação de parâmetros genéticos para a característica trabalhada (RAMALHO; FERREIRA; OLIVEIRA, 2005).

2.5 COMPONENTES DE VARIÂNCIA E PARÂMETROS GENÉTICOS

Admitindo que a covariância entre o genótipo e o ambiente é nula, através da casualização dos genótipos no experimento, pode-se dizer que o valor fenotípico é o resultado da ação conjunta dos efeitos genéticos e do ambiente (RESENDE, 2002a; BORÉM; MIRANDA, 2013). É necessário considerar também uma terceira ação, que surge quando a população é avaliada em vários ambientes (locais, colheitas, anos), chamada de interação genótipo x ambiente (FALCONER; MACKAY, 1996). Desse modo, a expressão gênica é modificada pelo ambiente, o qual é considerado perturbador na seleção, tendendo a aumentar ou diminuir o valor fenotípico e dificultando a identificação de genótipos superiores (FALCONER; MACKAY, 1996; BORÉM; MIRANDA, 2013; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Por esse motivo, os componentes da variação fenotípica podem ser determinados, por exemplo, onde a variância fenotípica é o somatório das variâncias genotípica, ambiental e interação genótipo x ambiente (BORÉM; MIRANDA, 2013).

Com a intenção de determinar a fração herdável da variância fenotípica, é importante que o estudo da variação fenotípica seja feito com base nos princípios da genética quantitativa (CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). A variância genotípica é a variação causada por diferenças genéticas entre os indivíduos, composta pelas variâncias aditiva, de dominância e epistática (FEHR, 1991; BORÉM; MIRANDA, 2013). A variância aditiva se refere à fração herdável da variância genotípica, referente aos alelos que serão transmitidos aos descendentes. Uma das utilizações da variância aditiva é na estimação de outros parâmetros genéticos, como a herdabilidade no sentido restrito, os quais possibilitam o conhecimento dos

caracteres sob seleção. Em contrapartida, a variância de dominância é caracterizada pelo resultado da combinação de alelos em cada genótipo, referente a interação intra alélica, não herdável (CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014).

Em espécies autógamas de propagação sexuada, a variância atribuída aos desvios de dominância é indicadora de dificuldade para o melhorista, devido aos efeitos de dominância que se manifestam nas gerações iniciais. No entanto, nas espécies de propagação assexuada, poliploides e algumas situações que trabalham com linhagens endogâmicas para o desenvolvimento de híbridos, a variância de dominância é determinante do ganho obtido por seleção. O terceiro componente, denominado variância epistática, é referente a todo e qualquer tipo de interação interalélica. Através da quantificação dos três componentes, é possível prever as consequências dos diversos esquemas seletivos e facilitar a escolha do método de melhoramento mais eficiente (CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014).

O conhecimento dos componentes de variância é essencial para o entendimento das propriedades genéticas da população a ser melhorada (FALCONER; MACKAY, 1996). Como ponto de partida, os componentes estimados oferecem a possibilidade em estimar os parâmetros genéticos para a população em estudo (BARBIN, 1993). O estudo de parâmetros genéticos estatísticos permite reconhecer os caracteres trabalhados que são herdáveis e identificar a variabilidade existente, para a seleção de indivíduos superiores (PEREIRA et al., 2013b; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Consequentemente, são fornecidos subsídios para a predição dos ganhos com a seleção e a manutenção da variabilidade genética (RESENDE et al., 2001; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Os parâmetros genéticos essenciais ao melhoramento são as herdabilidades no sentido amplo e restrito, as correlações e a repetibilidade (RESENDE, 2002a; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014).

No estudo de cafeeiros, os caracteres de maior interesse agrônomo são, em maior parte, de natureza quantitativa. Por esse motivo, a estimativa de um parâmetro pode apresentar valores variáveis decorrentes da expressão de diferentes genes ao longo do desenvolvimento em plantas perenes (FERRÃO et al., 2008). Desse modo, o efeito ambiental dificulta o estudo desses caracteres pois influencia na expressão de fenótipos, em função do material genético, das condições ambientais, da época e idade de avaliação, entre outros fatores (OLIVEIRA et al., 2011; RAMALHO et al., 2012b). Consequentemente, a veracidade dos parâmetros estimados dependerá do controle experimental, do local e número de anos de experimentação, da característica avaliada, do método de estimação e da unidade de seleção (FALCONER; MACKAY, 1996; FERRÃO et al., 2008).

2.5.1 Coeficiente de Herdabilidade

A estimativa de herdabilidade (h^2) é caracterizada como um dos parâmetros mais importantes ao melhoramento genético, pois reflete a proporção da variação fenotípica que pode ser herdada (RESENDE, 2002a; RAMALHO et al., 2012b). No melhoramento genético, a tomada de decisão na escolha dos procedimentos utilizados será determinada pela magnitude da herdabilidade, a qual oscila entre zero e um (FALCONER; MACKAY, 1996; RODRIGUES et al., 2013). Nesse cenário, quando o valor da herdabilidade é igual à um, significa que o fenótipo é determinado completamente pelo genótipo e o ambiente não afeta a sua expressão. Entretanto, se o valor é igual a zero, significa que a expressão do fenótipo é, totalmente, influenciada pelo ambiente (FALCONER; MACKAY, 1996). De acordo com Resende (2002a), magnitudes de herdabilidades com valores abaixo de 0,15 são considerados baixas; entre 0,15 e 0,50 são médias e acima de 0,50 são altas. Por isso, o valor da estimativa pode ser considerada uma indicação de sucesso quando apresenta alta magnitude, visto que, quanto maior for o seu valor, maior será a transmissão de efeitos genéticos aos seus descendentes (RAMALHO et al., 2012b). Por outro lado, caracteres com baixa herdabilidade demandarão métodos de seleção mais elaborados do que aqueles com herdabilidade alta (RESENDE et al., 2002a).

A herdabilidade pode ser estimada no sentido amplo ou restrito, sendo que a herdabilidade no sentido amplo é a razão da variância genotípica total pela variância fenotípica, enquanto a herdabilidade no sentido restrito compreende a razão entre a variância genética aditiva pela variância fenotípica (FEHR, 1991). Nas espécies de propagação sexuada, a herdabilidade no sentido restrito possui conceito de maior utilidade, devido a mensuração da importância relativa à proporção aditiva da variância genética que será transmitida para a próxima geração (FEHR, 1991; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Entretanto, nas espécies de propagação assexuada, os genótipos são herdados integralmente pelos seus descendentes, utilizando-se a estimativa no sentido amplo (SOUZA JUNIOR, 2001). A herdabilidade no sentido restrito é particularmente importante para a predição de ganhos genéticos para espécies de propagação sexuada (FEHR, 1991). Porém, é necessário estipular a intensidade da seleção para o computo do ganho com a seleção. Assim, será esperado maior ganho com a seleção para os caracteres que apresentarem alto coeficiente de herdabilidade no sentido restrito associado a intensidade de seleção determinada pelo melhorista (FALCONER; MACKAY, 1996).

A magnitude da herdabilidade mostra algumas relações com a natureza do

caráter (BORÉM; MIRANDA, 2013). Acredita-se que os caracteres com menores herdabilidades são aqueles mais ligados com a adaptação produtiva, enquanto àqueles de elevada herdabilidade são referentes ao caráter biológico e com menor importância no valor seletivo natural (FALCONER; MACKAY, 1996). Outra teoria explica que as características que se desenvolvem em curtos períodos tendem a estar menos sujeitas aos efeitos ambientais e, conseqüentemente, podem apresentar maior herdabilidade. Nesse caso, esses caracteres tenderão a apresentar maior herdabilidade em comparação às características que possuem período mais longo de desenvolvimento (BORÉM; MIRANDA, 2013).

Outros fatores podem influenciar a estimativa de herdabilidade, como o método de estimação, o nível de endogamia na população, o tamanho da amostra avaliada, o número e tipo de ambientes considerados, a unidade experimental considerada e a precisão na condução do experimento e da coleta de dados (BORÉM; MIRANDA, 2013). Valores elevados de herdabilidade estão associados com a maior variância genética, menor variação ambiental e menor interação genótipo x ambiente (FEHR, 1991). Além disso, alterações em quaisquer componentes de variância afetam o valor da herdabilidade, visto que ela é dependente da magnitude de todos os componentes de variância (FALCONER; MACKAY, 1996). Por esses motivos, é possível aumentar o valor da estimativa através da utilização de populações com maiores variações genéticas ou pela realização de um efetivo controle do ambiente (RAMALHO et al., 2012b). Assim, o conhecimento dos fatores que contribuem para estimar a herdabilidade permite maximizar o ganho genético com os recursos disponíveis (FEHR, 1991).

2.5.2 Coeficiente de Repetibilidade

O coeficiente de repetibilidade (ρ) é caracterizado pela mensuração da capacidade de um organismo repetir a expressão do caráter, ao longo de vários períodos no decorrer de sua vida (RESENDE, 2002a). No melhoramento de plantas perenes, esse parâmetro é amplamente utilizado como limite superior da herdabilidade, pois expressa a proporção da variância fenotípica que é atribuída aos efeitos genéticos, que podem estar confundidos com os efeitos permanentes (ABEYWARDENA, 1972; FALCONER; MACKAY; 1996; BOTREL et al., 2000). Considerar a influência do efeito permanente é essencial para eliminar os efeitos da correlação residual entre medidas repetidas (RESENDE, 2007). Portanto, a avaliação genética deve se basear em modelos que consideram o efeito de ambiente permanente, além do parâmetro associado à correlação fenotípica entre medidas repetidas do mesmo indivíduo (RESENDE, 2002b). Nesse contexto, a repetibilidade atua como medida para seleção

fenotípica, pois comprova a veracidade de uma determinada característica permanecer constante no desempenho do genótipo durante todo o seu ciclo produtivo (SANTOS et al., 2004; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014).

No melhoramento genético de plantas perenes, a realização de medidas repetidas para um mesmo caráter, é uma prática bastante comum (RESENDE, 2002a). Em cafeeiros, a flutuação bienal de produção é um desses aspectos biológicos que podem influenciar no coeficiente de repetibilidade (SERA, 2001; PEREIRA, 2010). Através da estimativa do coeficiente de repetibilidade, é possível determinar quantas avaliações fenotípicas devem ser feitas, em cada indivíduo, para aumentar a acurácia de seleção (VASCONCELLOS et al., 1985). De acordo com Resende (2002a), a magnitude do coeficiente de repetibilidade pode ser classificada como alta ($\rho \geq 0,60$), média ($0,30 < \rho < 0,60$) e baixa ($\rho \leq 0,30$). Seleções com base em uma única ou poucas medições são válidas se o coeficiente de repetibilidade possuir valor elevado. No entanto, se o valor do coeficiente for baixo, é necessário que o número de avaliações seja maior para realização de seleções acuradas (ABEYWARDENA, 1972). Caracteres com menores valores de repetibilidade tendem a apresentar maior acurácia sob o aumento do número de medições ou safras. No entanto, aumentar o número de medidas repetidas em caracteres com elevada repetibilidade não conduzem ao aumento da acurácia (RESENDE, 2002a). Dessa forma, o coeficiente de repetibilidade permite determinar o número de medições necessárias para seleção de características com maior acurácia (RESENDE, 2002b).

2.6 NATUREZA DOS EFEITOS ESTATÍSTICOS

A definição do modelo estatístico ideal para avaliação genética, exige a caracterização da natureza dos efeitos considerados como fixos ou aleatórios. Um efeito é considerado fixo quando as conclusões a seu respeito forem válidas somente para ele próprio. Assim, quando o objeto de estudo é constituído pelo efeito de natureza fixa, ele não se constitui como uma amostra representativa da população, mas como o próprio material de interesse (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Para os efeitos fixos, deve-se assumir a existência de um conjunto finito de respostas, contendo todos os níveis de interesse ao estudo (DUCHATEAU; JANSSEN, 1997). Por outro lado, quando o material genético avaliado se constitui numa amostra da população, de forma que as informações obtidas têm apenas o interesse de caracterizar a população de trabalho, o efeito é considerado aleatório (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Para os efeitos aleatórios, admite-se há um conjunto infinito

de respostas referentes as amostras da população em estudo (DUCHATEAU; JANSSEN, 1997). Por isso, quando o fator é tomado como aleatório, significa que os níveis observados são assumidos como uma amostra aleatória de uma assumida distribuição de probabilidade (RESENDE, 2004).

O genótipo deve ser considerado como efeito aleatório em estudos de avaliação de progênies derivadas de populações segregantes sob seleção, quando o número de genótipos for maior que dez (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012; RESENDE, 2004). O estabelecimento do efeito do genótipo como aleatório, tornam reprováveis os testes de comparações múltiplas de médias de tratamentos (RESENDE, 2004). Nos ensaios de competição e indicação de cultivares, com o objetivo de eleger o melhor desempenho pela comparação de médias, os genótipos podem ser tratados como efeito fixo (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Entretanto, é recomendado tratar os efeitos dos genótipos sempre como aleatórios, mesmo quando houver menos do que 10 tratamentos, para evitar o uso de estimadores viesados (RESENDE; DUARTE, 2007). Portanto, para o melhoramento genético, é essencial que os efeitos de genótipo sejam considerados como aleatórios, mesmo que os materiais sejam tratados como fixos em outras abordagens padrões (RESENDE, 2004).

Os modelos com o efeito de genótipo tratado como aleatório são mais adequados para obter estimativas mais precisas de média dos tratamentos ou ganho de seleção (TOMÉ; BUENO FILHO; FERREIRA, 2002). Além disso, as abordagens que assumem o genótipo como efeito aleatório tendem a apresentar resultados mais realistas e precisos. Na abordagem Bayesiana, por exemplo, os efeitos de genótipos são sempre considerados como aleatórios, mesmo em número de tratamentos inferior a dez (RESENDE; DUARTE, 2007). De acordo com Resende (2004), considerar os efeitos de tratamentos como aleatório, conduz a maior acurácia preditiva devido às predições de efeito aleatório serem forçadas (*shrinkage*) em direção à média geral, penalizando predições baseadas em pequenas amostras. Por meio do *shrinkage*, os efeitos ambientais residuais embutidos nos fenótipos são eliminados, minimizando o erro de predição, gerando predições não viciadas de valores genéticos e maximizando o ganho genético por ciclo de seleção. Dessa forma, é possível favorecer a seleção genética ao invés da fenotípica (RESENDE, 2004).

É necessário que o vetor de efeito fixo possa abranger os efeitos ambientais identificáveis do experimento. O efeito de blocos possui a maior relevância dentre estes, por ser caracterizado como principal estrato homogêneo para a comparação não enviesada dos tratamentos. Logo, a consideração desse efeito como fixo, torna as avaliações genéticas invariantes aos efeitos de bloco e não viciadas, em função da correlação entre os efeitos de

blocos e do nível genético dos indivíduos (RESENDE, 2002b). No entanto, a definição da natureza de efeito de blocos é muito polêmica, pois, os blocos podem ser assumidos como fixos ou aleatórios, dependendo da situação experimental (RESENDE, 2002b; TOMÉ; BUENO FILHO; FERREIRA, 2002).

De maneira geral, os blocos podem ser tratados como fixos, quando completos, em termos da representatividade dos efeitos de tratamentos em cada um de seus níveis, ou aleatórios, quando incompletos (RESENDE, 2004). É preferível que o efeito dos blocos seja assumido como fixo quando o seu número for menor ou igual a dez, podendo ser tratado como aleatório quando superior a dez (RESENDE; DUARTE, 2007). A suposição de aleatoriedade para os efeitos de bloco e de tratamentos corresponde à adoção de um modelo de análise com recuperação das informações interblocos e intertratamentos (DUARTE; VENCOVSKY, 2001). Essa justificativa também é importante quando se deseja estimar contrastes entre tratamentos de efeito fixos em látices não completamente balanceados. No entanto, quando o interesse maior é o ordenamento dos valores genéticos preditos (aleatórios) para auxiliar a seleção, a recuperação da informação interblocos é inferior, pois considera o tratamento como fixo (TOMÉ; BUENO FILHO; FERREIRA, 2002). Em blocos incompletos (desbalanceados ou não), a realização de ajustes para os efeitos de blocos causa diferenças no ordenamento de médias produzidas pela abordagem de modelo misto e por uma análise convencional intrablocos, onde o modelo é fixo (DUARTE; VENCOVSKY, 2001).

Os modelos com blocos aleatórios costumam ser menos informativos, pois estão associados ao grande número de estimativas de parâmetros de covariância, sem que os modelos tenham qualquer diferença essencial de eficiência (TOMÉ; BUENO FILHO; FERREIRA, 2002). Entretanto, para considerar como efeito fixo, os blocos não devem ser alocados de forma sistemática (GUSMÃO, 1986). Durante a experimentação, os efeitos de blocos e de parcelas, mesmo que sejam no mesmo local ou região experimental, muito provavelmente não se repetirão (RESENDE; DUARTE, 2007). Por esse motivo, ao apresentar conclusões válidas somente ao próprio bloco, esses podem ser considerados fixos, conforme a definição de efeitos fixos de Cruz; Regazzi; Carneiro (2012). Além disso, no delineamento em blocos ao acaso, os tratamentos é que são casualizados e não os blocos (RESENDE, 2002b).

2.7 MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA AVALIAÇÃO GENÉTICA

Os modelos estatísticos possibilitam o estudo das relações entre uma variável

dependente contínua (resposta) e uma ou mais variáveis independentes (DUCHATEAU; JANSSEN, 1997). A especificação apropriada dos modelos e de seus parâmetros é decisiva para a tomada de decisões corretas (DUARTE, 2010). Entretanto, essa especificação é uma das grandes preocupações na área do melhoramento genético (DUARTE; VENCOSKY, 2001). O primeiro passo para a aplicação da metodologia ideal é a definição dos efeitos como fixos ou aleatórios (RESENDE, 2002b). Quando todos os efeitos de um modelo estatístico são aleatórios, com exceção da média geral que é sempre fixa, o modelo é chamado de aleatório. Um modelo fixo é caracterizado por conter todos os elementos fixos, exceto o erro que é sempre aleatório (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2012). Os modelos que contêm efeitos fixos e aleatórios, além da média geral e do erro, são chamados de modelos mistos (RESENDE, 2004).

Durante muitos anos, os melhoristas de plantas basearam suas decisões no ajuste de modelos fixos, associados a análise de variância (ANAVA) e análise de regressão (RESENDE, 2004; DUARTE, 2010). Porém, esse método possui limitações para lidar com dados desbalanceados e com parentescos entre os genótipos. Outra desvantagem dessas técnicas se refere a condução de estimativas imprecisas dos componentes de variâncias e, conseqüentemente, predições inaccuradas dos valores genéticos (RESENDE, 2007). No cenário da pesquisa em melhoramento de plantas, os modelos devem ser sempre aleatórios ou mistos, pois os efeitos genéticos devem ser considerados como aleatórios (RESENDE, 2004). Além disso, o problema central do melhoramento genético é a predição dos valores genéticos de candidatos à seleção, necessitando de componentes de variância conhecidos ou estimados com precisão (RESENDE, 2004; DUARTE, 2010). Assim, nos ensaios de avaliação de tratamentos genéticos em experimentos de campo, não é desejável estimar as suas médias fenotípicas, mas sim os valores genotípicos (RESENDE; DUARTE, 2007).

O uso da metodologia de modelo misto REML/BLUP com tratamentos de efeitos aleatórios fornece resultados mais realistas ao considerar dados desbalanceados e delineamentos não ortogonais (DUARTE; VENCOSKY, 2001; DUARTE, 2010). Estudos de comparações, entre as abordagens de modelos fixos e mistos, demonstram que o uso de modelos mistos permite agregar informações para melhor predizer o valor genético em tratamentos avaliados sem repetição; dos tratamentos com parcela perdidas, incluindo elevados níveis de desbalanceamento; ou de genótipos que sequer foram avaliados, embora ainda relacionados à mesma população (DUARTE, 2010). O procedimento REML/BLUP oferece ótima predição de valores genéticos e estimação de componentes de variância (RESENDE, 2004).

O método ótimo de predição de valores genéticos é o *Best Linear Unbiased Prediction* (BLUP) para designar a “melhor predição linear não viciada” de variáveis aleatórias

(HENDERSON, 1973; RESENDE, 2002). No procedimento REML/BLUP, o BLUP utiliza estimativas de variâncias obtidas pelo método da máxima verossimilhança restrita ou residual (REML) – *Restricted Maximum Likelihood* (RESENDE, 2016). A adoção desse procedimento permite orientar na estratégia de seleção com maior eficiência. Além disso, a utilização de modelos estatísticos à nível de indivíduos é muito importante para obter sucesso no melhoramento de café Arábica (RESENDE, 2002a; PETEK; SERA; FONSECA, 2008; OLIVEIRA et al., 2011).

Resende (2004) considera que as vantagens do uso da metodologia de modelos mistos REML/BLUP em relação ao uso do método de quadrados mínimos na ANAVA são: a produção de estimativas ou predições mais acuradas de efeitos de tratamentos quando existem dados perdidos nos experimentos; as predições forçadas dos efeitos aleatórios em direção à média geral, penalizando estimativas baseadas em pequenas amostras; a possibilidade de permitir o ajuste de diferentes variâncias para cada grupo de tratamentos, permitindo considerar variâncias heterogêneas; a solução para o problema da estimação quando há dados perdidos; a modelagem da estrutura de correlação em experimentos com dependência espacial, medidas repetidas e em múltiplos experimentos para conduzir a estimativas mais precisas (enquanto o modelo de efeitos fixos assume que todas as observações são não relacionadas); a condução a resultados mais apropriados para a inferência requerida quando a estrutura dos dados é hierárquica ou em multi-níveis.

No contexto da metodologia de modelos mistos, a significância dos efeitos aleatórios do modelo estatístico não é testada da mesma maneira como no método da ANAVA. Nesses casos, é cientificamente recomendado o teste da razão de verossimilhança – *Likelihood Ratio Test* (LRT) – por meio de uma análise *deviance* (ANADEV) (RESENDE, 2007; 2016). O LRT é uma estatística derivada da razão entre as verossimilhanças do modelo saturado (ou completo) em relação ao modelo reduzido, isto é, o resultado da diferença das *deviances* do modelo completo em relação ao modelo sem o efeito que se deseja testar. Outra forma de avaliar a significância dos efeitos genéticos, além da ANADEV via LRT, é através da estimativa de herdabilidade e seu desvio padrão. Com a posse desses valores, é possível criar um intervalo de confiança e, então, inferir sobre a significância da variabilidade genotípica (RESENDE, 2007). A significância desse efeito implica na presença de variabilidade genética, viabilizando a seleção dos tratamentos avaliados (NIELSEN et al., 2014).

2.7.1 *Restricted Maximum Likelihood (REML)*

O método REML, desenvolvido por Patterson; Thompson (1971) é caracterizado como uma generalização da ANAVA para situações mais complexas (RESENDE, 2004). Esse método ganhou destaque em razão de suas propriedades ótimas no avanço de estudos que revelaram a baixa precisão das estimativas produzidas pelo método de ANAVA (DUARTE, 2010). Assim, o REML permite a decomposição da variação fenotípica nos seus componentes genético e ambiental e dos componentes de interação genótipo x ambiente (RESENDE, 2016). Além disso, a partir do método REML, é possível obter as estimativas fidedignas dos componentes de variância exigidas para a aplicação no BLUP (RESENDE, 2007; 2016).

2.7.2 *Best Linear Unbiased Prediction (BLUP)*

O BLUP é o procedimento ótimo de seleção para efeitos genéticos aditivos, de dominância e genotípicos, dependendo da situação (RESENDE, 2016). Resende (2004) relata que, para o caso específico de modelos mistos com efeitos aleatórios de genótipos, o BLUP minimiza o erro de predição e permite a predição não viciada de valores genéticos. Esse método também possibilita a maximização do ganho genético por ciclo de seleção e a maximização da probabilidade de selecionar o melhor entre dois genótipos, sendo o mais eficiente índice de seleção em termos de uso de informações de parentes, pois usa todas as informações disponíveis (RESENDE, 2004).

Com base na predição do valor genético dos indivíduos, é possível estimar as médias futuras dos genótipos em novos cultivos (RESENDE; DUARTE, 2007). Entretanto, os valores genotípicos preditos, geralmente, não são iguais aos valores genéticos verdadeiros. A correlação ou proximidade entre esses dois valores pode ser avaliada conforme o parâmetro de acurácia (RESENDE, 2002b; RESENDE; DUARTE, 2007). Por esse motivo, esse é um dos parâmetros mais importantes, dentro do contexto da avaliação genotípica (HENDERSON, 1984). A acurácia tem a propriedade de informar a confiança na avaliação e no valor genético predito para o genótipo (RESENDE, 2002b). De acordo com Resende e Duarte (2007), as magnitudes de acurácia podem ser divididas em classes de precisão muito alta, alta e moderada, quando seus valores forem, respectivamente, maiores ou iguais a 0,9, 0,7 e 0,5; ou ainda como baixa, quando apresentar valor igual ou inferior a 0,49%. Apesar da acurácia seletiva ideal ser àquela com igual ou superior a 0,9, para fins de recomendação, na realidade dos caracteres

quantitativos no melhoramento de plantas, é recomendado que a acurácia seletiva seja igual ou superior a 0,7 (RESENDE; DUARTE, 2007).

Contudo, a acurácia não tem a natureza de informar quais são os melhores candidatos para a seleção e, sim, como um indicativo da intensidade de utilização de um indivíduo. Como essa medida está associada a precisão na seleção, esta pode ser considerada o principal elemento do progresso genético para maximizar o ganho (RESENDE, 2002b). Desse modo, é importante elevar a acurácia, pelo fato de que uma das maiores dificuldades na obtenção de ganhos genéticos expressivos se deve a baixa acurácia seletiva (PIMENTEL et al., 2014). A utilização do BLUP permite maximizar a acurácia seletiva e o uso simultâneo de diversas fontes de informações, como aquelas de vários experimentos instalados em um ou vários locais com avaliações de uma ou mais safras (RESENDE, 2004; 2016). Isso ocorre em razão do modelo misto associar as relações genéticas existentes entre os indivíduos, em razão do parentesco, quantificadas por informações de genealogia, propiciando acurácia mais elevada (NOGUEIRA et al., 2003).

Na abordagem de modelos mistos também é evidente o efeito *shrinkage* das predições BLUP (DUARTE, 2010). Esse efeito é referente ao “encolhimento” das predições dos efeitos aleatórios forçadas em direção à média geral da população, penalizando predições baseadas em pequenas amostras (RESENDE, 2004). Por meio do *shrinkage* ou pela multiplicação do valor fenotípico corrigido por uma função da herdabilidade do caráter sob seleção, é possível eliminar os efeitos ambientais residuais embutidos nos dados fenotípicos (RESENDE, 2004). Por esse motivo, os modelos mistos permitem que os efeitos não genéticos sejam removidos, para a obtenção de predições dos valores genéticos (NOGUEIRA et al., 2003).

2.7.3 Metodologia de Modelos Mistos (REML/BLUP) em Cafeeiros Arábica

A utilização dos procedimentos REML/BLUP tem se mostrado bastante adequada na avaliação genética de cafeeiros (RESENDE et al., 2001; PETEK; SERA; FONSECA, 2008; PEREIRA et al., 2013b). A aplicação de metodologias robustas em espécies perenes costuma ser exigida pois, de maneira geral, apresentam aspectos biológicos peculiares que tendem a gerar dados desbalanceados (RESENDE et al., 2001; RESENDE, 2002a). Além disso, o desbalanceamento também pode ocorrer pela experimentação em campo, através da influência ambiental, competição entre genótipos e heterogeneidade de variâncias entre experimentos de uma rede experimental ou entre as medidas repetidas de uma mesma unidade

experimental (RESENDE, 2004). Nesses casos, os critérios de controle experimental devem ser revistos, como adotar parcelas menores e maior número de repetições ou blocos (RESENDE et al., 2001; RESENDE; DUARTE, 2007; DUARTE, 2010).

Portanto, os ensaios com duas a quatro repetições são inadequados, pois não possibilitam níveis ideais de acurácia seletiva (iguais ou superiores a 0,9). A recomendação é que os ensaios devam ter, pelo menos, seis repetições quando envolverem a avaliação de caracteres de baixa herdabilidade (RESENDE; DUARTE, 2007). Nesses casos, é provável que, com a redução do número de plantas por parcela e o aumento do número de repetições, a própria herdabilidade individual no bloco aumente devido ao menor tamanho e maior homogeneidade do bloco, além de contribuir para o aumento da acurácia seletiva (RESENDE et al., 2001).

Na avaliação genética de cafeeiros, vários modelos estatísticos para estimação de parâmetros genéticos e de predição de valores genotípicos podem ser aplicados (RESENDE et al, 2001). É importante que os modelos considerem a interação genótipo x ambiente, permitindo a seleção de genótipos em ambientes específicos ou ambiente médio, ou pela safra ou colheita, através da análise de medidas repetidas (RESENDE; FERNANDES; SIMEÃO, 1999; RESENDE, 2000). A realização de medidas repetidas ao longo dos anos é comum no melhoramento de plantas perenes, visto que o número de avaliações deve variar entre 3 e 6 anos de colheitas, para não comprometer a eficiência do programa de melhoramento por unidade de tempo (RESENDE, 2002a; MARIGUELE et al., 2011; MISTRO et al., 2008). Nesses casos, é recomendado o uso do modelo de repetibilidade, o qual analisa mensurações repetidas ao longo do tempo (MRODE, 2005). Além disso, dados dessa natureza em parcelas ou indivíduos pode apresentar heterogeneidade de variâncias e covariâncias ou de correlação entre as medições de cada ano, sendo apropriado a utilização de um modelo que considere essas particularidades (MRODE, 2005; RESENDE, 2007). Na metodologia de modelos mistos, diferentes abordagens foram estudadas na predição de efeitos e modelagem da estrutura de correlação entre medidas repetidas (RESENDE; STURION, 2001; GILMOUR et al., 2004; RESENDE, 2007; MARIGUELE et al., 2011).

Desse modo, os procedimentos REML/BLUP têm como principais vantagens: (a) permitir a comparação de indivíduos ou variedades ao longo do tempo (gerações, anos) e do espaço (locais, blocos); (b) permite a correção simultânea dos efeitos ambientais, estimação de componentes de variância e a predição de valores genéticos; (c) permite lidar com estruturas complexas de dados, como medidas repetidas, diferentes anos, locais e delineamentos; (d) pode ser aplicado em dados desbalanceados e delineamentos não ortogonais (RESENDE, 2016). Outra razão que justifica a utilização da metodologia de modelos mistos é

a estimativa de herdabilidade e predição de valores genéticos aditivos e genotípicos, tanto intra quanto interpopulacionais (RESENDE, 2000; RESENDE et al., 2001). Em cafeeiros arábica, a seleção de indivíduos geneticamente superiores tem maior eficiência quando realizada a partir do efeito genético aditivo e, conseqüentemente, promove a maximização do ganho genético, como demonstrado pelo estudo de Petek, Sera e Fonseca (2008).

3 ARTIGO A: ESTIMATIVAS DE PARÂMETROS GENÉTICOS E NÚMERO ÓTIMO DE MEDIDAS PARA A SELEÇÃO DE PROGÊNIES F₄ DE CAFÉ ARÁBICA VIA REML/BLUP

3.1 RESUMO

No melhoramento genético de Coffea arabica, é fundamental o conhecimento das propriedades genéticas em características de herança quantitativa. Entretanto, a ocorrência de desbalanceamento de dados e a realização de medidas repetidas podem dificultar o processo de melhoramento. Nesses casos, é recomendado a adoção de metodologias robustas, como a de modelos mistos (REML/BLUP) e a identificação do número de safras necessárias para a avaliação e seleção genética. Assim, o objetivo desse trabalho foi estimar parâmetros genéticos e determinar o número ótimo de medidas, visando a seleção de progênies F₄ de C. arabica. O experimento foi instalado em 2014, no campo experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER (Londrina, Paraná, Brasil), no delineamento em blocos casualizados, em três repetições e parcelas de 10 plantas. As avaliações fenotípicas foram realizadas, entre 2017 e 2020 em 17 progênies F₄, para índice de desenvolvimento vegetativo (IDV), índice de nutrição foliar (INF), produtividade (PROD), tamanho do fruto (TF), ciclo de maturação dos frutos (M) e resistência à ferrugem (F). Foi utilizada a metodologia REML/BLUP para estimar os parâmetros genéticos e prever os valores genéticos aditivos. Com base no coeficiente de repetibilidade estimado, foi determinado o número ótimo de medidas para cada característica. Posteriormente, os valores genéticos foram ordenados pelo índice de Mulamba e Mock para a seleção de genótipos. Apenas as variáveis M e F apresentaram variabilidade entre os genótipos com nível de significância de 1%, além de magnitudes média e alta para as herdabilidades estimadas. Os coeficientes de repetibilidade em IDV, M e F indicaram a necessidade de, respectivamente, 4, 5 e 2 safras de avaliações para atingirem alta acurácia seletiva ($\geq 0,70$). A seleção ordenada pelo índice de Mulamba e Mock possibilitou ganhos balanceados nos valores genéticos de genótipos com ciclo de maturação precoce e com resistência à ferrugem.

Palavras-chave: *Coffea arabica*. Modelo misto. Valor genético. Herdabilidade. Repetibilidade.

3.2 ABSTRACT

In the genetic breeding of Coffea arabica is essential to understand genetic properties in traits with quantitative inheritance. However, the occurrence of unbalanced data and the performance of repeated measures often difficult the breeding process. In such cases, it is recommended to adopt robust methodologies, such as mixed models (REML / BLUP), and identify the number of harvests necessary for the evaluation and genetic selection. Thus, the aim of this study was to estimate genetic parameters and determine the optimal number of measurements for the selection of F₄ progenies of C. arabica. The experiment was installed in 2014, in the experimental field of the Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER (Londrina, Paraná, Brazil), in a randomized block design, in three replications and plots of 10 plants. Phenotypic evaluations were carried out, between 2017 and 2020 in 17 F₄

progenies, for vegetative development index (IDV), leaf nutrition index (INF), productivity (PROD), fruit size (TF), fruit ripening cycle (M) and rust resistance (F). The REML/BLUP methodology was used to estimate genetic parameters and predict additive genetic values. Based on the estimated repeatability coefficient, the optimal number of measurements for each trait was determined. Subsequently, the genetic values were ordered by the Mulamba and Mock index for the selection of genotypes. Only M and F showed variability between genotypes with a significance level of 1%, in addition to medium and high magnitudes for the estimated heritabilities. The repeatability coefficients in IDV, M and F indicated 4, 5 and 2 harvest evaluations are needed to achieve high selective accuracy (≥ 0.70), respectively. The selection ordered by the Mulamba and Mock index enabled balanced gains in the genetic values of genotypes with an early ripeness cycle and resistance to leaf rust.

Keywords: *Coffea arabica*. Mixed model. Genetic value. Herdability. Repeatability.

3.3 INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma das atividades agrícolas mais importantes mundialmente no âmbito social e econômico, através do cultivo das espécies *Coffea arabica* e *C. canephora* (ICO, 2020). A importância do café, sobretudo de *C. arabica*, contribuiu para que os programas de melhoramento de cafeeiros desenvolvessem dezenas de cultivares no Brasil (CARVALHO et al., 2008; MENDES et al., 2008). Entretanto, apesar do grande número de cultivares desenvolvidas, todo o material genético em *C. arabica* é bastante aparentado, evidenciando a restrita base genética dessa espécie (SILVA et al., 2019).

Uma das estratégias utilizadas para a ampliação da base genética foi a utilização de cafeeiros Arábica com introgressão de genes de *C. canephora*, como Icatu e Híbrido de Timor (HdT), e com introgressão de genes de *C. liberica*, como os derivados da estação experimental de Balehonnur na Índia, denominados como cafeeiros da Série BA (Balehonnur Arabica) (VÁRZEA et al., 2009; SERA et al., 2017; FAZUOLI et al., 2019). Esses genótipos costumam ser utilizados para transmissão de genes de resistência à ferrugem alaranjada, causada por *Hemileia vastatrix* Berk et Br. (SHIGUEOKA et al., 2014; TALHINHAS et al., 2017), resistência à nematoides do gênero *Meloidogyne* (SERA et al., 2017; 2020) e no melhoramento de caracteres agrônômicos (SERA, 2001).

A maioria dessas características de interesse no melhoramento genético de *C. arabica* possui herança quantitativa, o que exige a compreensão das propriedades genéticas da população em estudo (RAMALHO; FERREIRA; OLIVEIRA, 2005). Contudo, por se tratar de uma espécie perene, é comum a utilização do material genético por vários anos e a realização de medidas repetidas em safras consecutivas (SERA, 2001). Essas situações tendem a gerar dados desbalanceados e a demandar longo período para uma acurada avaliação e seleção

genética, exigindo a utilização de metodologias estatísticas robustas, além da determinação do número ideal de safras para otimizar a avaliação e seleção de genótipos (RESENDE, 2002). Entretanto, são escassos os estudos em relação ao número de safras necessárias para a avaliação e seleção genética de cafeeiros, além de não utilizarem modelos estatísticos que considerem a ocorrência de desbalanceamento de dados (FONSECA et al., 2004; MISTRO et al. 2008).

Na avaliação genética de plantas perenes, o uso do procedimento REML/BLUP (*Restricted Maximum Likelihood / Best Linear Unbiased Prediction*) permite fornecer resultados precisos em condições de medidas repetidas e desbalanceamento dos dados (RESENDE, 2007). A partir do método REML, é possível obter as estimativas dos componentes de variância necessárias para a aplicação no BLUP. O BLUP minimiza a variância do erro de predição e permite a predição não viciada de valores genéticos para a avaliação e seleção genética (HENDERSON, 1984; RESENDE, 2016). Consequentemente, os resultados fornecidos pelo REML/BLUP possibilitam aumentar a eficiência na seleção de cafeeiros (RAMALHO; CARVALHO; NUNES, 2012). Por esse motivo, diversos estudos têm utilizado essa metodologia para estimar parâmetros genéticos e prever os valores genéticos no melhoramento de *C. arabica* (RESENDE et al., 2001; PETEK; SERA; FONSECA, 2008; PEREIRA et al., 2013; SALGADO; REZENDE; NUNES, 2014; RODRIGUES et al., 2013; REZENDE et al., 2017).

Portanto, o objetivo desse trabalho foi estimar parâmetros genéticos, determinar o número ótimo de medidas e prever os valores genéticos aditivos, mediante o emprego dos procedimentos REML/BLUP, para a seleção de progênies F₄ de café arábica.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado em 2014 na área experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná – IAPAR-EMATER (IDR-Paraná), na cidade de Londrina, Paraná, Brasil. A área está localizada na latitude 23°21'40"S e longitude 51°09'47"W, com altitude de 585 m e solo do tipo Latossolo Vermelho Distrófico. De acordo com os dados obtidos pela estação meteorológica do IDR-Paraná, durante o período total de condução do experimento (66 meses), a região apresentou precipitação média anual de 1746.3 mm, com média de 71,9% de umidade relativa do ar e temperatura média de 21,9°C, com temperaturas média máxima e mínima de 27,9° e 17,1°C, respectivamente.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso, com 21 tratamentos em três repetições. Cada parcela foi constituída de 10 plantas, no espaçamento de

2,5 m entre linhas e 0,5 m entre plantas. A instalação do ensaio ocorreu em 21 de novembro de 2014, através do plantio de mudas obtidas por sementes. Durante todo o período de condução do experimento, as plantas receberam os tratos culturais necessários conforme Matiello et al. (2016).

3.4.1 Material Genético

Foram avaliados 17 genótipos de *C. arabica* na geração F₄, juntamente com as cultivares IPR 100, IAPAR 59, IPR 107 e Catuaí Vermelho IAC 99, utilizadas como testemunhas. As progênies F₄ foram obtidas pelo método genealógico e originadas de uma hibridação espontânea entre IAPAR 77041-62-6-10-6 e Sarchimor IAC 1669-33. O parental ‘IAPAR 77041-62-6-10-6’ é um genótipo da geração F₅ originada do cruzamento entre Catuaí Vermelho IAC 81 x (Catuaí Vermelho IAC 81 x IAC 1110-8). IAC 1110-8 é um derivado do acesso BA-10, sendo um *C. arabica* com introgressão de *C. liberica* e possui o gene *SH3*, que confere alta resistência à ferrugem para as raças desse fungo existentes no Brasil. No entanto, IAPAR 77041-62-6-10-6 é suscetível à ferrugem e não é portadora do *SH3*. O parental Sarchimor IAC 1669-33 é um genótipo F₅ altamente resistente à ferrugem, originado do cruzamento entre Villa Sarchí CIFC 971/10 e Híbrido de Timor CIFC 832/2, sendo esse último um *C. arabica* com introgressão de *C. canephora*. Catuaí Vermelho IAC 81 e Villa Sarchí CIFC 971/10 são *C. arabica* puros.

3.4.2 Caracteres Avaliados

As avaliações fenotípicas foram realizadas em quatro safras a partir da primeira produção significativa, que ocorreu em 2017. Foram realizadas avaliações fenotípicas à nível de indivíduos para os caracteres de índice de desenvolvimento vegetativo (IDV), índice de nutrição foliar (INF), produção (PROD), tamanho do fruto (TF), ciclo de maturação dos frutos (M) e resistência à ferrugem (F). As avaliações, em cada uma das safras, ocorreram quando cerca de 80% dos frutos estavam em estádios cereja, passa e seco nas cultivares IAPAR 59 e IPR 107, as quais são de ciclo precoce.

Os aspectos vegetativos e nutricionais de cada tratamento foram avaliados, respectivamente, pelas variáveis IDV e INF, pois ambas apresentam correlação positiva com as concentrações de potássio, nitrogênio e fósforo na planta (PETEK et al., 2007). A avaliação de IDV foi realizada com escala de notas de 1 a 10, com base em diferentes aspectos vegetativos

da parte aérea, em que: nota 1 = plantas muito raquíticas de tamanho muito pequeno, com troncos e ramos muito finos, intensidade de ramificação plagiotrópica muito baixa, com folhas muito pequenas e muito finas; nota 2 = plantas muito raquíticas de tamanho muito pequeno com troncos e ramos muito finos, intensidade de ramificação plagiotrópica baixa, com folhas muito pequenas e muito finas; nota 3 = plantas raquíticas de tamanho pequeno com troncos e ramos finos, intensidade de ramificação plagiotrópica baixa, com folhas pequenas e finas; nota 4 = plantas raquíticas de tamanho pequeno com troncos e ramos finos, intensidade de ramificação plagiotrópica média, com folhas de tamanho e espessura médias; nota 5 = plantas de tamanho médio com troncos e ramos de espessura média, intensidade de ramificação plagiotrópica média, com folhas de tamanho e espessura médias; nota 6 = plantas de tamanho médio com troncos e ramos de espessura média, intensidade de ramificação plagiotrópica alta, com folhas de tamanho e espessura médias; nota 7 = plantas grandes com troncos e ramos de espessura média, intensidade de ramificação plagiotrópica alta, com folhas de tamanho e espessura médias; nota 8 = plantas grandes com troncos e ramos grossos, intensidade de ramificação plagiotrópica alta, com folhas grandes e espessas; nota 9 = plantas grandes com troncos e ramos grossos, intensidade de ramificação plagiotrópica muito alta, com folhas grandes e espessas; nota 10 = plantas muito grandes com troncos e ramos muito grossos, intensidade de ramificação plagiotrópica muito alta, com folhas muito grandes e muito espessas. Também foram atribuídas notas de 1 a 10 para o INF, com base na coloração das folhas, as quais: nota 1 = amareladas; nota 2 = entre amareladas e verde-amareladas; nota 3 = verde-amareladas; nota 4 = entre verde-amareladas e verde claras; nota 5 = verde claras; nota 6 = entre verde claras e verde com intensidade média; nota 7 = verde com intensidade média; nota 8 = entre verde com intensidade média e verde escuras; nota 9 = verde escuras; nota 10 = verde escuras com aspecto brilhante.

A variável PROD foi avaliada durante as quatro safras, no volume em litros de frutos cereja por planta. Para a característica TF foram realizadas avaliações no tamanho médio dos frutos no estágio cereja em cada planta. Foram atribuídas notas de 1 a 5, as quais: nota 1 = plantas com frutos muito pequenos; nota 2 = plantas com frutos pequenos; nota 3 = plantas com fruto de tamanho médio; nota 4 = plantas com frutos grandes; nota 5 = plantas com frutos gigantes. Essa avaliação teve como base os frutos da testemunha Catuaí Vermelho IAC 99 como tamanho médio, referente a nota 3.

Foram realizadas avaliações quanto ao ciclo de maturação (M), baseadas no estágio fenológico dos frutos em maior proporção na planta. Cada planta foi avaliada através de notas entre 1,0 e 5,5, com base no estágio fenológico dos frutos, onde: nota 1,0 = frutos em estágio de expansão; nota 1,5 = frutos verdes expandidos em estágio aquoso; nota 2,0 = frutos

verdes granados com endosperma duro; nota 2,5 = frutos com coloração verde cana; nota 3,0 = frutos no estágio verdoengo (entrematuro); nota 3,5 = início da maturação completa, com frutos levemente avermelhados; nota 4,0 = maturação completa com frutos em estágio cereja com coloração vermelha intensa; 4,5 = frutos cereja com coloração vermelho escuro; nota 5,0 = frutos em estágio passa, com coloração muito escura e levemente fosca; 5,5 = frutos em estágio ‘seco’. Através da média das avaliações para os estádios de maturação nas quatro safras, os genótipos foram classificados conforme a escala de Andreazi et al. (2017). De acordo com essa escala, os genótipos com notas médias entre 1,0 e 1,99 foram classificados como ciclo muito tardio; notas 2,0 a 2,99 como tardio; notas 3,0 a 3,99 como ciclo médio; 4,0 a 4,99 como precoce; e acima de 5,0 como muito precoce.

As avaliações com relação a resistência à ferrugem alaranjada (F), em condições naturais para a população de raças local, sem efetuar quaisquer tipos de controle ao patógeno *H. vastatrix*. Foi utilizada uma escala de notas de 1,0 a 5,5 para avaliação da intensidade de sintomas, onde 1,0 = sem lesões nas folhas; nota 1,5 = lesões que variam desde *flecks* até cloroses, na área de infecção, mas sem a formação de uredósporos; nota 2,0 = pústulas uredospóricas em 0,01 a 5,00% das folhas, geralmente, localizadas no terço inferior; nota 2,5 = pústulas uredospóricas em 5,01 a 10,00% das folhas, geralmente, localizadas nos terços inferior e médio; nota 3,0 = pústulas uredospóricas em 10,01 a 20,00% das folhas, geralmente, nos terços inferior e médio; nota 3,5 = pústulas uredospóricas em 20,01 a 35,00% das folhas, localizadas nos terços inferior, médio e superior; nota 4,0 = pústulas uredospóricas em 35,01 a 50,00% das folhas, localizadas nos terços inferior, médio e superior; nota 4,5 = pústulas uredospóricas em 50,01 a 65,00% das folhas, localizadas nos terços inferior, médio e superior; nota 5,0 = pústulas uredospóricas em 65,01 a 80,00% das folhas, localizadas nos terços inferior, médio e superior; nota 5,5 = pústulas uredospóricas em mais de 80,00% das folhas, localizadas nos terços inferior, médio e superior.

3.4.3 Análise Estatística

Os componentes de variância foram estimados pelo REML e os valores genéticos foram preditos pelo BLUP. O seguinte modelo linear misto, implementado no *software* Selegen – REML/BLUP (RESENDE, 2016), foi utilizado:

$$y = Xm + Zg + Wb + Tp + Qi + e,$$

onde, y é o vetor dos dados fenotípicos, m é o vetor dos efeitos das combinações medição-repetição-testemunha (assumidos como fixos) somados à média geral, g

é o vetor dos efeitos genéticos aditivos individuais (assumidos como aleatórios), $g \sim \text{NID}(0, \sigma_a^2)$; b é o vetor dos efeitos das parcelas (aleatórios) $b \sim \text{NID}(0, \sigma_{\text{parc}}^2)$; p é o vetor dos efeitos de ambiente permanente de indivíduos (aleatórios), $p \sim \text{NID}(0, \sigma_{\text{perm}}^2)$; i é o vetor da interação genótipos x medições (aleatórios), $i \sim \text{NID}(0, \sigma_{\text{int}}^2)$; e o e é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios). As letras maiúsculas X, Z, W, T e Q representam as matrizes de incidência para os efeitos m , g , b , p e i , respectivamente.

A significância dos efeitos aleatórios do modelo estatístico foi testada via teste da razão de verossimilhanças (LRT) (WILKS, 1938), considerando 1 grau de liberdade e nível de significância igual a 1%.

As estimativas da variância aditiva (σ_a^2), variância fenotípica (σ_f^2), herdabilidade individual total no sentido restrito entre as famílias (h_{atc}^2), herdabilidade aditiva individual dentro das famílias (h_{ad}^2) correlação genotípica através das safras (r_g), coeficiente de determinação dos efeitos de parcelas (c_{parc}^2), coeficiente de determinação dos efeitos de ambiente permanente (c_{perm}^2) e o coeficiente de determinação da interação genótipos x medições (c_{int}^2), foram obtidos para cada um dos caracteres pelas respectivas expressões (RESENDE, 2002):

$$\sigma_a^2 = \frac{7}{4} \sigma_g^2$$

$$\sigma_f^2 = \sigma_a^2 + \sigma_{\text{parc}}^2 + \sigma_{\text{perm}}^2 + \sigma_{\text{int}}^2 + \sigma_e^2,$$

em que σ_{parc}^2 é a variância do efeito das parcelas; σ_{perm}^2 é a variância do efeito de ambiente permanente; σ_{int}^2 é a variância da interação genótipos x medições; e σ_e^2 é a variância residual, entre as famílias avaliadas.

$$h_{atc}^2 = \frac{\sigma_a^2}{(\sigma_f^2 - \sigma_{\text{parc}}^2 - \sigma_{\text{perm}}^2 - \sigma_{\text{int}}^2)}$$

$$h_{ad}^2 = \frac{\left(\frac{1}{4} \sigma_a^2\right)}{\sigma_f^2},$$

$$r_g = \frac{\sigma_a^2}{\sigma_a^2 + \sigma_{\text{int}}^2},$$

$$c_{\text{parc}}^2 = \frac{\sigma_{\text{parc}}^2}{\sigma_f^2}$$

$$c_{\text{perm}}^2 = \frac{\sigma_{\text{perm}}^2}{\sigma_f^2}$$

$$c_{\text{int}}^2 = \frac{\sigma_{\text{int}}^2}{\sigma_f^2}$$

O coeficiente de repetibilidade (ρ) foi obtido por (RESENDE, 2016):

$$\rho = \frac{(\sigma_a^2 + \sigma_{\text{parc}}^2 + \sigma_{\text{perm}}^2 + \sigma_{\text{int}}^2)}{\sigma_f^2}$$

O número de medidas necessárias (m) para atingir a fração determinada de acurácia ($f = 0,70; 0,75; 0,80; 0,85; \text{ e } 0,90$) foi obtido através da expressão (RESENDE, 2002):

$$m = \frac{f(1 - \rho)}{(1 - f)\rho}$$

Posteriormente, os genótipos foram ordenados com base nos valores genéticos preditos para cada um dos caracteres identificados com variabilidade. Desse modo, foi utilizado o índice de seleção Mulamba e Mock (1978), visando a seleção simultânea para n características, conforme a seguinte equação (RAMALHO et al., 2012a):

$$I_{MM(i)} = \sum_{k=1}^n u_k r_{ik} = u_1 r_{i1} + u_2 r_{i2} + \dots + u_n r_{in},$$

em que $I_{MM(i)}$ é o valor do índice de Mulamba e Mock associado ao genótipo i ; u_k é o peso econômico do caráter k , ($u_k = 1$); r_{ik} é o posto associado ao valor genotípico ajustado do genótipo i relativo ao caráter k .

Após a aplicação do índice de seleção foi adotada a intensidade de seleção de 23,5% entre famílias para obter a predição do ganho com a seleção ($GS\%$) (RESENDE, 2007):

$$GS\%_{(k)} = \frac{(M_s - M_o)_k}{M_o_k} \cdot 100,$$

em que $GS\%$ é o ganho com a seleção para o caráter k ; M_{s_k} é a média dos valores genéticos aditivos dos genótipos selecionados para o caráter k ; e M_{o_k} é a média dos valores genéticos aditivos do caráter k .

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos valores de LRT (Tabela 1), foi observada a significância do efeito de genótipo para as variáveis M e F ($p > 0,01$). Esses resultados revelam a existência de variabilidade genética para as duas características, logo as estimativas de parâmetros genéticos foram significativamente diferentes de zero. Por outro lado, a não significância do efeito de genótipo para a variável IDV, INF, PROD e TF demonstra que os tratamentos não se diferenciam para esses caracteres ao nível de 1% de significância. Apenas M apresentou significância para o efeito de parcela ao nível de 1% de significância. Com relação ao efeito do ambiente permanente e da interação genótipo x medições, houve significância ($p > 0,01$) para as seis características avaliadas.

Com relação às herdabilidades individuais totais no sentido restrito (h^2_{ate}), foram verificados valores de baixa magnitude para os caracteres de IDV, INF, PROD e TF (Tabela 2). Entretanto, para os caracteres M e F foram estimados valores de 0,24 e 0,64, caracterizado por herdabilidades de magnitudes média e alta, respectivamente. De acordo com Resende (2002), magnitudes de herdabilidades individual com valores abaixo de 0,15 são consideradas baixas; entre 0,15 e 0,50 são médias e acima de 0,50 são altas. Já para as estimativas de herdabilidade dentro das famílias (h^2_{ad}), os valores obtidos foram muito próximos a zero para todos os caracteres, exceto para F, a qual apresentou 0,19, a qual favorece a seleção dentro das famílias para esse caráter.

Tabela 1 – Análise de deviance (ANADEV): Deviance (Dev) e teste da razão da verossimilhança (LRT) para os efeitos de genótipos (Gen), de parcela (Parc), de ambiente permanente (Perm), da interação genótipos x medições (GxM) e do modelo completo (C) para as seis variáveis avaliadas em 17 genótipos F₄ de *C. arabica* durante 4 safras.

Efeito	IDV		INF		PROD		TF		M		F	
	Dev	LRT	Dev	LRT	Dev	LRT	Dev	LRT	Dev	LRT	Dev	LRT
Gen	2444,30	1,20 ^{ns}	918,29	3,64 ^{ns}	5340,63	2,67 ^{ns}	-2468,74	5,56 ^{ns}	-217,2	10,62 ^{**}	-144,39	47,20 ^{**}
Parc	2447,15	4,05 ^{ns}	918,2	3,55 ^{ns}	5338,95	0,99 ^{ns}	-2473,34	0,96 ^{ns}	-215,32	12,50 ^{**}	-187,91	3,68 ^{ns}
Perm	2813,04	369,94 ^{**}	942,81	28,16 ^{**}	5380,06	42,10 ^{**}	-2453,99	20,31 ^{**}	-165,17	62,65 ^{**}	-23,88	167,71 ^{**}
GxM	2508,51	65,41 ^{**}	1030,17	115,52 ^{**}	5367,76	29,80 ^{**}	-2371,22	103,08 ^{**}	-65,76	162,06 ^{**}	83,01	274,60 ^{**}
C	2443,10		914,65		5337,96		-2474,30		-227,82		-191,59	

IDV: índice de desenvolvimento vegetativo; INF: índice de nutrição foliar; PROD: produção (litros/planta); TF: tamanho do fruto; M: ciclo de maturação baseado no estágio fenológico; F: reação à ferrugem alaranjada.

** e ^{ns}: resultados significativos ao nível de 1% e não significativos, pelo teste de qui-quadrado, respectivamente.

Tabela 2 – Componentes de variância e parâmetros genéticos e não genéticos para as características índice de desenvolvimento vegetativo (IDV), índice de nutrição foliar (INF), produção (PROD), tamanho do fruto (TF), ciclo de maturação dos frutos (M) e resistência à ferrugem (F) avaliadas nos 17 genótipos F₄ durante quatro safras.

Componente/parâmetro	Variáveis					
	IDV	INF	PROD	TF	M	F
σ^2_a	0,03	0,02	0,07	0,01	0,07	0,39
σ^2_{parc}	0,05	0,02	0,04	0,00	0,03	0,02
σ^2_{perm}	0,40	0,04	0,34	0,01	0,05	0,07
σ^2_{int}	0,09	0,08	0,20	0,02	0,07	0,01
σ^2_e	0,63	0,41	2,56	0,08	0,22	0,22
σ^2_f	1,19	0,58	3,22	0,11	0,44	0,74
h^2_{atc}	0,04	0,06	0,03	0,08	0,24	0,64
h^2_{ad}	0,00	0,01	0,00	0,01	0,04	0,19
c^2_{parc}	0,04	0,03	0,01	0,02	0,07	0,02
c^2_{perm}	0,34	0,08	0,10	0,08	0,12	0,10
c^2_{int}	0,07	0,14	0,06	0,16	0,16	0,13
ρ	0,40	0,15	0,14	0,15	0,33	0,57
r_g	0,22	0,21	0,24	0,24	0,46	0,77
μ	6,89	7,00	2,26	3,32	3,97	2,88

σ^2_a : variância genética aditiva; σ^2_{parc} : variância entre parcelas; σ^2_{perm} : variância de ambiente permanente; σ^2_{int} : variância da interação genótipos x medições; σ^2_e : variância residual; σ^2_f : variância fenotípica; h^2_{atc} : herdabilidade individual total no sentido restrito; h^2_{ad} : herdabilidade aditiva individual dentro das famílias; c^2_{parc} : coeficiente de determinação do efeito das parcelas; c^2_{perm} : coeficiente de determinação do efeito do ambiente permanente; c^2_{int} : coeficiente de determinação do efeito da interação genótipos x medições; ρ : coeficiente de repetibilidade; r_g : correlação genotípica através das safras; μ : média geral.

As magnitudes de herdabilidade estimadas nesse estudo demonstram a natureza quantitativa dos caracteres avaliados. É provável que, o número de repetições e de plantas por parcelas adotados nesse estudo, tenha influenciado na magnitude das herdabilidades estimadas. No estudo de Resende et al. (2001) em café arábica, é sugerido a diminuição do número de plantas por parcelas e o aumento do número de repetições, sem a necessidade de aumentar a área experimental. Assim, a homogeneização dos blocos seria maior e, conseqüentemente, haveria o aumento da magnitude das estimativas de herdabilidade, repetibilidade e da acurácia seletiva (RESENDE, 2002). A recomendação é que os ensaios devam ter, ao menos, seis repetições quando envolverem a avaliação de caracteres de baixa herdabilidade (RESENDE; DUARTE, 2007). A utilização de experimentos com parcelas pequenas tende a gerar baixos coeficientes de variação experimental, conduzindo a melhor estimativa dos parâmetros. Como consequência, as estimativas de herdabilidade poderiam assumir maiores magnitudes.

As características correlacionadas à produtividade tendem a possuir menor herdabilidade, pois estão mais sujeitas ao efeito do ambiente (FALCONER; MACKAY, 1996;

BOREM; MIRANDA, 2013). Esses caracteres costumam apresentar estimativas de herdabilidade de baixa magnitude em *C. arabica*, como evidenciado em outros estudos. As estimativas relatadas por Pereira et al. (2013), obtidas a partir de 33 progênies F₄ de cafeeiros arábica avaliadas por duas safras, apresentaram valores de 0,06 e 0,08 para as características de produção e desenvolvimento vegetativo, respectivamente. No estudo de cafeeiros arábica na geração F₂, Petek, Sera e Fonseca (2008) verificaram estimativas de herdabilidade individual no sentido restrito de 0,07 para tamanho do fruto e de 0,03 para produtividade. As estimativas obtidas por ambos os estudos são caracterizadas como baixa magnitude, conforme a classificação de Resende (2002). Além disso, é importante destacar que, a metodologia realizada por Pereira et al. (2013) e Petek, Sera e Fonseca (2008) foi semelhante a realizada no presente estudo para a avaliação genética.

De maneira geral, as estimativas de herdabilidade individual para caracteres vegetativos também costumam apresentar baixa magnitude em cultivares de café, como reportado por Resende et al. (2001) e por Walyaro e Van der Vossen (1979). Nesse estudo, as estimativas de herdabilidade para M e F foram as únicas que não apresentaram baixas magnitudes. Resultados semelhantes foram constatados por Petek, Sera e Fonseca (2008), os quais verificaram herdabilidade individual no sentido restrito de 0,17 para maturação dos frutos. Com relação a variável F, os valores de herdabilidade estimados nos estudos de Pereira et al. (2013) e Petek, Sera e Fonseca (2008) foram iguais a 0,34 e 0,32, respectivamente. No entanto, os valores mais elevados, obtidos no presente estudo, indicam a existência de maior variabilidade para ambas as características na população avaliada. É possível que a maior variabilidade entre os genitores tenha inferido nas estimativas das herdabilidades de M e F, visto que o genitor IAPAR 77041-62-6-10-6 possui ciclo tardio e é suscetível à ferrugem, enquanto Sarchimor IAC 1669-33 possui ciclo precoce e é altamente resistente à ferrugem (SERA et al., 2017). É conhecido que a resistência à ferrugem pode ser controlada por genes de efeito qualitativo ou quantitativo (ESKES et al., 1990). Como resultado, isso pode ter influenciado para que a herdabilidade de F obtivesse maior magnitude frente às demais. Porém, pouco se sabe sobre o controle genético do ciclo de maturação dos frutos em cafeeiros, o qual parece ser influenciado por maior número de genes do que a resistência à ferrugem.

Os coeficientes de correlação genotípica através das safras (r_g) apresentaram valores variáveis entre, aproximadamente, 0,21 e 0,77 para as seis características avaliadas (Tabela 2). O coeficiente estimado para F foi de 0,77, o qual indica maior concordância no desempenho entre as progênies nos quatro anos de avaliação. Por outro lado, para a variável M foi estimado o valor de 0,46, demonstrando menor coincidência entre os melhores genótipos

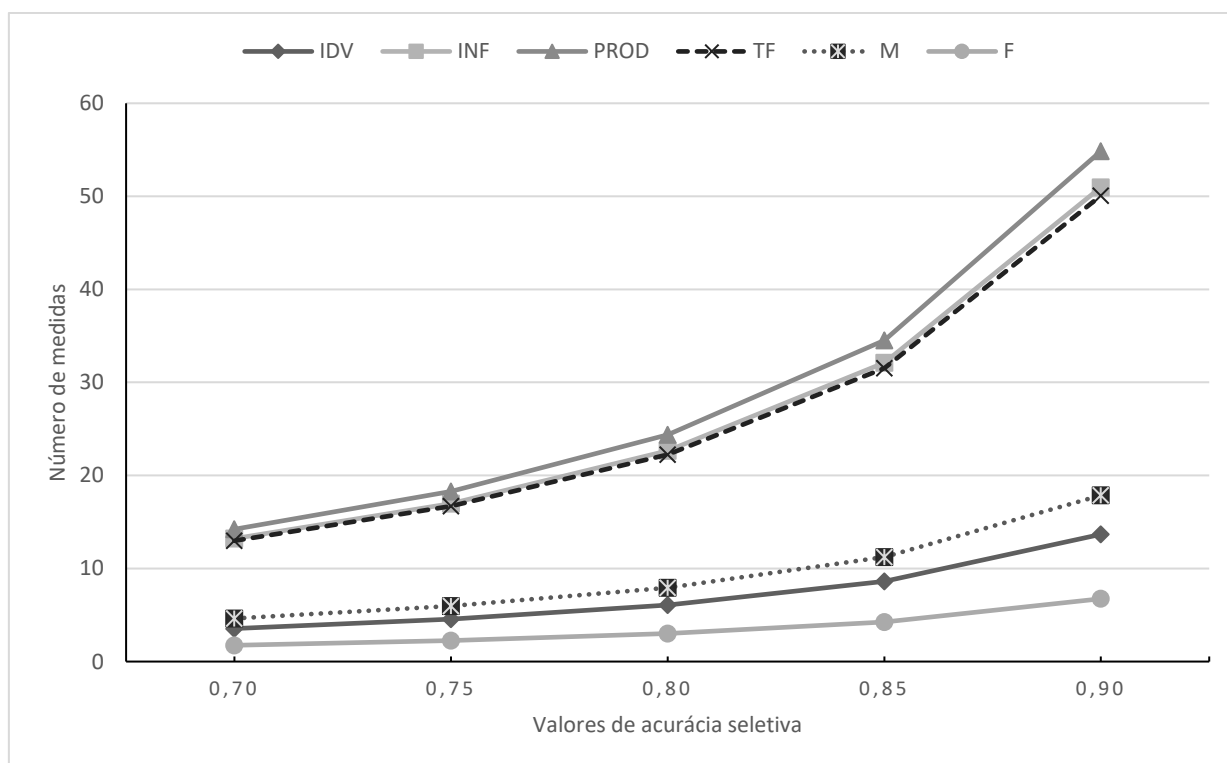
nas diferentes safras. É possível que cada uma das safras tenha influenciado diferencialmente o desempenho dos genótipos, devido à disponibilidade nutricional, incidência de fatores bióticos, exposição à radiação solar e, também, pelas condições climáticas ocorridas durante o desenvolvimento dos estádios fenológicos dos frutos. Esses fatores costumam influenciar a maturação de ano para ano, de acordo com a região de cultivo (GUERREIRO FILHO et al., 2008). Além disso, os valores observados para os caracteres IDV, INF, PROD e TF foram ainda menores, indicando que o ranqueamento dos genótipos difere muito de uma safra para outra. Essa diferença pode estar relacionada a bialidade produtiva de cafeeiros arábica, corroborando com os estudos de caracteres complementares à produtividade de Ferrão et al. (2008) em *C. canephora*. Desse modo, as estimativas obtidas em várias safras foram decorrentes da expressão de diferentes genes ao longo do desenvolvimento, influenciados pelas condições ambientais de cada ano.

As estimativas do coeficiente de repetibilidade (ρ) foram relativamente maiores para as características IDV, M e F, as quais apresentaram valores de 0,40, 0,33, e 0,57, respectivamente. Todavia, as estimativas obtidas para esses caracteres são classificadas com magnitudes moderadas, segundo Resende (2002), visto que os valores se encontram entre 0,30 e 0,60. De acordo com essa mesma classificação, a repetibilidade para os demais caracteres foi considerada como baixa magnitude ($\rho \leq 0,30$). No melhoramento genético de café arábica, é importante considerar o coeficiente de repetibilidade, pois a realização de medidas repetidas é uma prática bastante comum (CONCEIÇÃO; FAZUOLI; TOMA-BRAGHINI, 2005; MISTRO et al., 2008). Além disso, a estimativa do coeficiente de repetibilidade possibilita identificar o número necessário de medições por indivíduo para aumentar a acurácia seletiva (FERREIRA et al., 2020). Quanto maior for a magnitude da acurácia, maior será a confiança na avaliação e no valor genético predito para o genótipo, sendo recomendado buscar valores acima de 0,70 no melhoramento de caracteres de efeito quantitativo (RESENDE, 2002; RESENDE; DUARTE, 2007).

Desse modo, foi verificado que o uso de, aproximadamente, quatro e cinco safras avaliadas para IDV e M, respectivamente, são ideais para obter valores de alta acurácia ($\geq 0,70$) (Gráfico 1). Apesar da acurácia seletiva ideal ser caracterizada por valores iguais ou superiores a 0,90, esse resultado é pouco provável de ser alcançado em caracteres de efeito quantitativo, sob duas a quatro repetições, sem a ocorrência de alta herdabilidade (RESENDE; DUARTE, 2007). Para o caráter F, o qual apresentou alta magnitude de herdabilidade, o uso de seis a sete safras avaliadas permite obter acurácia de magnitude muito alta ($\geq 0,90$). Entretanto, para alcançar valores superiores a 0,70, o uso de apenas duas medidas já é suficiente. Esses

resultados são coerentes com o número de medidas utilizadas em cafeeiros arábica, visto que as avaliações em podem ser realizadas entre três e seis safras (MISTRO et al., 2008; MARIGUELE et al., 2011). Contudo, estudos que desconsideram a aplicação de modelos mistos, sugerem o uso de um ano de safra alta ou um biênio, complementado com a avaliação de caracteres vegetativos e morfológicos para o avanço de gerações em progênies (WALYARO; VAN DER VOSSSEN, 1979; BONOMO et al. 2004).

Gráfico 1 – Relação entre o número de medidas e seus respectivos valores de acurácia obtidos para otimização da seleção de genótipos com base nos caracteres avaliados nas quatro safras.



IDV: índice de desenvolvimento vegetativo; INF: índice de nutrição foliar; PROD: produtividade (litros/planta); TF: tamanho do fruto; M: ciclo de maturação dos frutos; F: resistência à ferrugem alaranjada.

As características de INF, PROD e TF, por outro lado, demandam a realização de mais de 13 safras de avaliação para a obtenção de altos valores de acurácia (Gráfico 1). O número de avaliações necessárias é ainda maior para a obtenção de acurácia muito alta para esses caracteres, necessitando de medições superiores a 50 safras. Consequentemente, o processo de desenvolvimento de cultivares se torna bastante longo e oneroso, em vista do número de avaliações necessárias para obter respostas acuradas para essas características. Além disso, a baixa acurácia seletiva conduz a dificuldades na obtenção de ganhos genéticos expressivos, uma vez que indicam baixa correlação entre os valores genotípicos verdadeiros e

preditos (RESENDE; DUARTE, 2007; PIMENTEL et al., 2014).

Os resultados obtidos demonstraram maior acurácia para a seleção baseada nas variáveis IDV, M e F. Porém, pelo fato dos tratamentos não se diferenciarem para IDV (Tabela 1), não há viabilidade para a seleção de genótipos para esse caráter, assim como os demais considerados nesse estudo. Além disso, a condução de ganhos mais expressivos com a seleção é consequência da seleção baseada em caracteres com maiores estimativas de herdabilidade, as quais foram verificados apenas para M e F. Desse modo, a utilização do procedimento REML/BLUP permitiu estimar os parâmetros genéticos e a predição de valores genéticos aditivos, simultaneamente, para a seleção de genótipos com base no ganho genético para maior precocidade no ciclo de maturação e resistência a ferrugem.

Tabela 3 – Valores fenotípicos (f), valor genético aditivo ($\mu + \hat{a}$), efeito aditivo (\hat{a}) e acurácia seletiva dos genótipos (r_{aa}) para os 17 genótipos (Gen) de progênies de geração F₄ para os caracteres ciclo de maturação dos frutos (M) e resistência à ferrugem (F) ordenados conforme o índice de Mulamba e Mock (1978).

Gen	M				F			
	f	$\mu + \hat{a}$	\hat{a}	% r_{aa}	f	$\mu + \hat{a}$	\hat{a}	% r_{aa}
13	3,91	4,07	0,10	0,84	2,14	2,31	-0,57	0,94
16	4,22	4,35	0,37	0,83	2,25	2,41	-0,47	0,94
7	3,73	4,07	0,09	0,83	2,29	2,39	-0,49	0,94
17	4,02	4,19	0,21	0,84	2,71	2,88	0,00	0,94
3	4,30	4,40	0,43	0,83	3,29	3,41	0,53	0,94
12	3,71	4,02	0,05	0,84	2,48	2,54	-0,34	0,94
10	3,63	3,92	-0,05	0,83	2,01	2,19	-0,69	0,94
5	3,51	3,82	-0,16	0,83	2,17	2,21	-0,67	0,94
14	3,71	4,00	0,03	0,84	2,66	2,70	-0,18	0,94
6	3,52	3,79	-0,18	0,83	2,13	2,32	-0,56	0,94
15	3,76	4,02	0,05	0,84	3,58	3,80	0,92	0,94
9	3,79	4,01	0,04	0,83	3,44	3,53	0,65	0,94
2	3,59	3,83	-0,14	0,94	3,07	3,24	0,36	0,94
8	3,39	3,73	-0,24	0,83	2,75	2,88	0,00	0,94
1	3,61	3,97	0,00	0,84	3,73	3,86	0,98	0,94
11	3,38	3,73	-0,24	0,83	2,83	2,91	0,02	0,94

4	3,18	3,61	-0,36	0,84	3,20	3,40	0,52	0,94
μ_{geral}	3,70	3,97		0,83	2,75	2,88		0,94
μ_s	3,97	4,17	0,19	0,83	2,35	2,50	-0,38	0,94
GS%		4,89				-13,30		

μ_{geral} : média geral dos tratamentos em F₄; μ_s : média dos tratamentos selecionados com intensidade de 23,5%; GS%: porcentagem do ganho com a seleção aplicada.

O uso simultâneo das diferentes informações, fornecidas pelas quatro safras, permitiu a maximização da acurácia seletiva. Como resultado, as médias da acurácia seletiva dos tratamentos em F₄ foram de 83,55% e 94,53%, respectivamente para M e F. Estes respectivos resultados são caracterizados como acurácias de magnitudes alta e muito alta, segundo a classificação de Resende e Duarte (2007). Segundo Resende (2002), é comum elevar o valor da acurácia quando se utilizam medidas repetidas, mesmo quando a herdabilidade e repetibilidade não são altas, como é o caso do ciclo de maturação. As acurácias obtidas nesse estudo indicam alta confiabilidade nos valores genéticos preditos, podendo informar sobre o correto ordenamento dos candidatos à seleção (HENDERSON, 1984; RESENDE; DUARTE, 2007).

O emprego do índice de seleção permitiu a obtenção de ganhos mais balanceados para a seleção de genótipos, baseados nas variáveis M e F (Tabela 3). Desse modo, foi observado que os genótipos com os maiores valores genéticos preditos para apenas uma das variáveis não são interessantes para a seleção. Apesar da seleção direta de um determinado caráter oferecer ganhos maiores, é possível que respostas correlacionadas durante a seleção indireta provoquem alterações indesejáveis para os demais caracteres (BACKES et al., 2002; CRUZ; CARNEIRO; REGAZZI, 2014). Isso pode ser observado, principalmente para os tratamentos 10, 5, 13 e 6, que apresentaram os maiores ganhos genéticos aditivos para a resistência a ferrugem, porém, apenas o tratamento 13 demonstrou resultados satisfatórios quanto ao ciclo de maturação. Portanto, é necessário evitar considerar um único caráter para a seleção de genótipos, visando identificar aqueles que apresentam melhor desempenho para outros caracteres de importância econômica.

O índice de Mulamba e Mock sob intensidade de seleção de 23,5% entre famílias indicaram a seleção dos tratamentos 13, 16, 7 e 17 para a obtenção de ganhos simultâneos para precocidade do ciclo de maturação e maior resistência a ferrugem. Com relação ao caráter M, a seleção desses tratamentos possibilitou aumento de 4,89% da média do valor genético aditivo em relação a média dos tratamentos. Desse modo, enquanto toda a

população F₄ apresentou ciclo médio para maturação ($\mu_{geral} = 3,97$), a média dos genótipos selecionados foi de 4,17 para o valor genético predito. Esse resultado é caracterizado como ciclo precoce de maturação dos frutos, segundo a escala de Andreazi et al. (2017). Enquanto, para a seleção de F, a predição do valor genético dos indivíduos selecionados apresentou média de 2,50, conduzindo ao ganho de -13,30%, em relação a média das 17 progênies, com a seleção. Esse decréscimo representa menor severidade de sintomas causados pela *H. vastatrix*, visto que, na escala utilizada para avaliação, a nota de 2,5 é representada pela presença de pústulas uredospóricas em 5,01 a 10,00% das folhas, geralmente, localizadas nos terços inferior e médio.

A aplicação da intensidade de seleção de 10% dentro das progênies 13, 16, 7 e 17 possibilitou maiores ganhos para resistência à ferrugem (Tabela 4), em razão da variabilidade identificada dentro das famílias para essa variável. O diferencial de ganho com a seleção dentro dos tratamentos teve um decréscimo de 9,34% em relação ao valor obtido com a seleção entre as progênies. Dessa forma, foi observada o ganho de -22,64% em relação à média geral das progênies F₄, conduzindo à média de 2,23 para o valor genético dos indivíduos selecionados. Esses valores demonstram que os genótipos selecionados podem apresentar nível de resistência ainda maior ao patógeno, com menor severidade de sintomas. Além disso, esses indivíduos apresentaram média fenotípica de 1,75, considerando as quatro safras avaliadas. Diversos trabalhos em cafeeiros classificam fenótipos com médias entre 1 e 2 como resistentes à ferrugem alaranjada (SERA et al., 2007; 2010; DEL GROSSI et al., 2013; SHIGUEOKA et al., 2014). Conforme a escala utilizada nesse estudo, notas inferiores a 2,0 são caracterizadas pela ausência de esporulação de *H. vastatrix*. Desse modo, a seleção desses genótipos resistentes é importante para favorecer o aumento da rentabilidade e sustentabilidade na cultura, visto que os genótipos resistentes dispensam o controle químico para o patógeno (FERNANDEZ et al., 2004; SILVA et al., 2006).

Tabela 4 – Valores fenotípicos (f), efeito aditivo (\hat{a}), valor genético aditivo ($\mu + \hat{a}$) para 12 plantas selecionadas para os caracteres de ciclo de maturação (M) e resistência a ferrugem (F), de acordo com os indivíduos (Indv) que apresentaram a melhor predição dos valores genéticos aditivos dentro dos genótipos (Gen) selecionados.

Gen	Parc	Indv	M			F		
			f	$\mu + \hat{a}$	\hat{a}	f	$\mu + \hat{a}$	\hat{a}
7	28	278	3,25	4,06	0,08	1,63	1,96	-0,92
13	34	335	4,50	4,13	0,16	1,75	2,11	-0,77
13	55	542	4,00	4,04	0,07	1,88	2,11	-0,77

16	58	571	4,50	4,35	0,38	1,63	2,12	-0,76
7	7	62	4,00	4,10	0,12	1,50	2,12	-0,76
7	7	61	2,75	4,04	0,07	1,50	2,12	-0,76
13	13	128	4,00	4,10	0,13	1,50	2,12	-0,76
16	37	367	4,17	4,35	0,38	1,75	2,18	-0,70
16	37	362	3,83	4,32	0,35	1,88	2,23	-0,65
17	17	162	3,63	4,18	0,21	1,88	2,48	-0,40
17	17	161	3,63	4,18	0,21	2,00	2,53	-0,35
17	38	378	3,67	4,16	0,19	2,13	2,66	-0,22
μ_s			3,83	4,17	0,20	1,75	2,23	-0,65
GS%				4,90				-22,64

μ_s : média dos tratamentos selecionados; GS%: porcentagem do ganho genético com a seleção dos indivíduos em relação à média geral dos 17 genótipos.

A resistência à ferrugem das progênes em estudo é, provavelmente, devido ao genitor Sarchimor IAC 1669-33, a qual é derivado do cruzamento entre Villa Sarchí CIFC 971/10 e HdT CIFC 832/2. O genótipo HdT foi responsável pelo desenvolvimento de diversas cultivares resistentes devido aos genes *SH* de efeito principal e outros genes oriundos de *C. canephora*. Contudo, os genes *SH* transmitidos pelo HdT podem sofrer quebra de resistência com o aparecimento de novas raças fisiológicas de *H. vastatrix* (VÁRZEA et al., 2002; TALHINHAS et al., 2017). Nos casos de quebra da resistência dos genes *SH*, é evidenciado o caráter quantitativo dos genes, através da resistência parcial (ESKES; COSTA, 1983). Isso foi verificado pelos resultados das avaliações dos 17 tratamentos para a variável F, visto que os genótipos apresentaram diferentes níveis de resistência na média das quatro safras. Assim, através da seleção de genótipos com maior nível de resistência, é possível fixar uma maior quantidade de alelos favoráveis, a fim de dificultar a quebra de resistência pelas raças fisiológicas do patógeno.

Em contrapartida, a relevância da seleção de genótipos com maior precocidade de maturação se refere, principalmente, à possibilidade de antecipação da colheita, diminuindo os riscos com a ocorrência de geadas ou outros fatores climáticos (MATIELLO, 2008). Além disso, o cultivo desses genótipos junto a cultivares com diferentes ciclos de maturação, permite a realização de colheitas em várias épocas. Essa estratégia, denominada escalonamento de colheita, aumenta a eficiência de produção e de mão de obra, além de otimizar

o uso de infraestruturas e equipamentos (SERA, 2001). Entretanto, a maioria das cultivares de ciclo médio e tardio costumam ser mais produtivas, o que torna necessário a seleção de cultivares precoces com alta produtividade (MEDINA FILHO; BORDIGNON; CARVALHO, 2008). Nesse estudo foi necessário desconsiderar a seleção para PROD, visto que os genótipos não se diferenciaram estatisticamente em relação a esse caráter. A média fenotípica dos genótipos em F₄ para esse caráter, no entanto, foi de 2,29 litros, enquanto a cultivar IPR 100 apresentou média de 2,62 litros. Já as testemunhas IAPAR 59, IPR 107 e Catuaí Vermelho IAC 99 apresentaram, respectivamente, produção média de 1,64, 2,40 e 2,38 litros para PROD. Esses valores, embora considerem a comparação fenotípica, demonstram que as progênies F₄ possuem produtividade superior à IAPAR 59 e próxima à Catuaí Vermelho IAC 99, IPR 107 e IPR 100.

Com relação aos genitores dos tratamentos F₄, sabe-se que o IAPAR 77041-62-6-10-6 é uma progênie F₅ derivada da mesma planta-mãe que originou a cultivar IPR 100. Essa cultivar possui alto potencial produtivo, sendo superior a Catuaí Vermelho IAC 81, além de ser uma das únicas opções do mundo com alta resistência aos nematoides *Meloidogyne paranaensis* e *M. incognita* (SERA et al., 2017). As progênies deste estudo já foram previamente avaliadas pelo departamento de Nematologia do IDR-Paraná, na qual identificou resistência simultânea à *M. paranaensis* e à *M. incognita* em homozigose e heterozigose. Uma nova seleção deverá ser realizada, em plantas individuais da próxima geração, a fim de identificar os genótipos com resistência em homozigose para ambas as espécies de nematoides, além da seleção para as mesmas variáveis consideradas nesse estudo.

Os nematoides *M. paranaensis* e à *M. incognita* provocam perdas significativas para cafeicultura mundial, pois as medidas de controle como o cultural, químico e biológico não possuem eficiência muito alta, além de existirem poucas cultivares com resistência. No Brasil, as únicas cultivares resistentes à essas espécies de nematoides são IPR 100 e IPR 106. No entanto, ambas cultivares são suscetíveis à ferrugem e são de ciclo tardio (SERA et al., 2017; 2020). Por esse motivo, é importante que sejam desenvolvidas cultivares com ciclo de maturação mais precoce e, simultaneamente, resistentes à ferrugem e aos nematoides. O desenvolvimento de futuras cultivares com essas características pode reduzir as perdas da produção e redução de aplicações de defensivos. Isso poderá contribuir muito para a cafeicultura mundial, visando a indicação de cultivares de café arábica resistentes a *M. paranaensis* e à *M. incognita*, sem a necessidade de enxertia, com diferentes ciclos de maturação para aplicação do escalonamento de colheita em áreas com alta severidade de ferrugem alaranjada.

3.6 CONCLUSÕES

Os caracteres IDV, INF, PROD e TF obtiveram baixas magnitudes de herdabilidade no sentido restrito e correlação genotípica entre safras. A maior magnitude dessas estimativas para M e F demonstraram que esses caracteres são influenciados por menor número de genes em relação aos demais. Contudo, os valores estimados para as duas variáveis foram menores para M, indicando que essa característica é governada por mais genes em relação à resistência à ferrugem.

As estimativas do coeficiente de repetibilidade para as características IDV, M e F foram as mais elevadas, indicando a necessidade de avaliação de 4, 5 e 2 safras, respectivamente, para a obter respostas de alta acurácia. Por outro lado, para as variáveis INF, PROD e TF, é necessário a utilização de mais de 13 safras de avaliação para alcançar acurácia $\geq 0,70$, devido à baixa repetibilidade desses caracteres.

Apenas os caracteres M e F apresentaram viabilidade para a seleção, devido a presença de variabilidade via LRT. Desse modo, o uso dos valores genéticos preditos pelo BLUP, ordenados pelo índice de Mulamba e Mock, permitiram ganhos mais balanceados para a seleção simultânea de genótipos com maior precocidade do ciclo de maturação e mais resistentes à ferrugem.

4 REFERÊNCIAS (ARTIGO A)

ANDREAZI, E.; CARDUCCI, F.C.; SERA, T.; PEREIRA, C. T. M., MARIUCCI JUNIOR, V.; CARVALHO, F. G.; SHIGUEOKA, L. H.; DOS SANTOS, W. G.; FONSECA, I. C. B.; SERA, G. H. Ciclo precoce de maturação e produtividade em genótipos de café derivados de C1195-5-6-2. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, p. 575-582, 2017.

APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S.; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 405-417, 2016.

BACKES, R. L.; REIS, M. S.; SEDIYAMA, T.; CRUZ, C. D.; TEIXEIRA, R. C. Estimativas de parâmetros genéticos em populações F₅ e F₆ de soja. **Revista Ceres**, v. 49, n. 282, p. 201-216, 2002.

BONOMO, P.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, A. A.; VIANA, J. M. S.; OLIVEIRA, V. R.; CARNEIRO, C. S. Seleção antecipada de progênies de café descendentes de Híbrido de Timor x Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho. **Acta Scientiarum**, v. 26, n. 1, p. 91-96, 2004.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6ª Edição, Viçosa: Ed. UFV, 2013. 523 p.

CARVALHO, A.; MÔNACO, L. C.; FAZUOLI, L. C.; COSTA, W. M.; MEDINA, H. P. Variabilidade na produção em progênies de cafeeiro “Mundo Novo”. **Bragantia**, Campinas, n. 4, v. 32, p. 509-517, 1984.

CARVALHO, C. H. S.; FAZUOLI, L. C.; CARVALHO, G. R.; GUERREIRO FILHO, O.; PEREIRA, A. A.; ALMEIDA, S. R.; MATIELLO, J. B.; BARTHOLO, G. F.; SERA, T.; MOURA, W. M.; MENDES, A. N. G.; REZENDE, J. C.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; NACIF, A. P.; SILVAROLLA, M. B.; BRAGHINI, M. T. Cultivares de Café de porte baixo. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008, p. 157-226.

CONCEIÇÃO, A. S.; FAZUOLI, L. C.; TOMA-BRAGHINI, M. Avaliação e seleção de progênies F₃ de cafeeiros de porte baixo com o gene *SH₃* de resistência a *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 547-559, 2005.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**: volume 2. 3ª Edição, Viçosa: Ed. UFV, 2014. 668 p.

DEL GROSSI, L.; SERA, T.; SERA, G. H.; FONSECA, I. C. B.; ITO, D. S.; SHIGUEOKA, L. H.; ANDREAZI, E.; CARVALHO, F. G. Rust resistance in Arabic coffee cultivars in northern Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 56, n. 1, p. 27-33, 2013.

DUARTE, J. B. VENCOVSKY, R. Estimação e predição por modelo linear misto com ênfase na ordenação de médias de tratamentos genéticos. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 1, p. 109-117, 2001.

ESKES, A. B.; COSTA, W. M. Characterization of incomplete resistance to *Hemileia vastatrix* in the Icatu coffee population. **Euphytica**, v. 32, p. 649-657, 1983.

ESKES, A. B.; HOOGSTRATEN, J. G. J.; TOMA-BRAGHINI, M.; CARVALHO, A. Race-specificity and inheritance of incomplete resistance to coffee leaf rust in some Icatu coffee progenies and derivatives of Híbrido de Timor. **Euphytica**, v. 47, p. 11-19, 1990.

FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to quantitative genetics**. 4th Edition, London: Longman Green, 1996. 464 p.

FAZUOLI, L. C.; TOMA-BRAGHINI, M.; SILVAROLLA, M. B.; GONÇALVES, W.; MISTRO, J. C.; GALLO, P. B.; GUERREIRO FILHO, O. IAC Catuaí SH3 – a dwarf Arabica coffee cultivar with leaf rust resistance and drought tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 3, p. 356-359, 2019.

FERNANDEZ, D.; SANTOS, P.; AGOSTINI, C.; BOM, M.C.; PETITOT, A.N.; SILVA, M. C.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; RIBEIRO, A.; ARGOUT, X. NICOLE, M. Coffee (*Coffea arabica* L.) genes early expressed during infection by the rust fungus (*Hemileia vastatrix*). **Molecular Plant Pathology**. Blackwell Publishing LTD. v. 5, p. 527-536, 2004.

FERRÃO, R. G.; CRUZ, C. D., FERREIRA, A.; CECON, P. R.; FERRÃO, M. A. G.; FONSECA, A. F. A.; CARNEIRO, P. C. S.; SILVA, M. F. Parâmetros genéticos em café Conilon. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 61-69, 2008.

FERREIRA, F. M.; ROCHA, J. R. A. S. C.; ALVES, R. S.; ELIZEU, A. M.; BENITES, F. R. G.; RESENDE, M. D. V.; SOUZA SOBRINHO, F.; BHERING, L. L. Estimates of repeatability coefficients and optimum number of measures for genetic selection of *Cynodon* spp. **Euphytica**, v. 216, n. 70, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02605-x>. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-020-02605-x>. Acesso em 19 jan. de 2021.

FONSECA, A. F. A.; SEDIYAMA, T.; CRUZ, C. D.; SAKIYAMA, N. S.; FERRÃO, R. G.; FERRÃO, M. A. G.; BRAGANÇA, S. M. Repeatability and number of Harvest required for selection in robusta coffee. **Crop Breeding and Apply Biotechnology**, v. 4, p. 324-329, 2004.

GUERREIRO FILHO, O.; SILVAROLLA, M. B.; CARVALHO, C. H. S.; FAZUOLI, L. C. Características utilizadas para a identificação de cultivares de café. In: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 141-156.

HENDERSON, C. R. **Applications of linear models in animal breeding**. Guelph: University of Guelph, 1984. 462 p.

ICO, Internacional Coffee Organization. **Historical data on the global coffee trade**. http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics. Acesso em: 17 jul. 2020.

MATIELLO, J. B. Critérios para escolha da cultivar de café. In: CARVALHO, C. H. S. de. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 129-139.

MATIELLO, J. B.; ALMEIDA, S.; GARCIA, A. W. R.; SANTINATO, R. **Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações**. Ed. Varginha, MG. Futurama Editora, 2016.

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R.; CARVALHO, C. H. S. Desenvolvimento de novas cultivares de café arábica. In: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 79-102.

MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; FAZUOLI, L. C.;

SILVAROLLA, M. B. História das primeiras cultivares de café plantadas no Brasil. *In: CARVALHO, C. H. S. Cultivares de café: origem, características e recomendações*. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 69-78.

MARIGUELE, K. H.; RESENDE, M. D. V.; VIANA, J. M. S.; SILVA, F. F.; SILVA, P. S. L.; KNOP, F. C. Métodos de análise de dados longitudinais para o melhoramento genético da pinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 12, p. 1657-1664, 2011.

MISTRO, J. C.; FAZUOLI, L. C.; GUERREIRO FILHO, O.; SILVAROLLA, M. B.; TOMA-BRAGHINI, M. Determination of the number of years in Arabica Coffee progenies selection through repeatability. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 8, n. 1, p. 79-84, 2008.

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

NOGUEIRA, D. A.; SÁFADI, T.; BEARZOTI, E.; BUENO FILHO, J. S. S. Análises clássica e bayesiana de um modelo misto aplicado ao melhoramento animal: uma ilustração. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, Edição Especial, p. 1614-1624, 2003.

PEREIRA, T. B.; CARVALHO, J. P. F.; BOTELHO, C. E.; RESENDE, M. D. V.; REZENDE, J. C.; MENDES, A. N. G. M. Eficiência da seleção de progênies de café F₄ pela metodologia de modelos mistos (REML/BLUP). **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p. 230-236, 2013.

PETEK, M. R.; FAZUOLI, L. C.; MISTRO, J. C.; OLIVEIRA, A. C. B.; GALLO, P. B. Correlações e análise de trilha entre reação à cercosporiose e outras variáveis em progênies de café arábica. *In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL*, 5, 2007, Águas de Lindóia. **Anais [...]**. Brasília: Embrapa Café, 2007. 5 p.

PETEK, M. R.; SERA, T.; FONSECA, I. C. B. Predição de valores genéticos aditivos na seleção visando obter cultivares de café mais resistentes à ferrugem. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 133-140, 2008.

PIMENTEL, A. J. B.; GUIMARÃES, J. F. R.; SOUZA, M. A.; RESENDE, M. D. V.; MOURA, L. M.; ROCHA, J. R. A. S. C.; RIBEIRO, G. Estimação de parâmetros genéticos e predição de valor genético aditivo de trigo utilizando modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**,

Brasília, v. 49, n. 11, p. 882-890, 2014.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. 1ª Edição, Lavras: Ed. UFLA, 2012a. 522 p.

RAMALHO, M. A. P.; CARVALHO, B. L.; NUNES, J. A. R. Perspectives for the use of quantitative genetics in breeding of autogamous plants. **ISRN Genetics**, v. 2013, p. 1-6, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5402/2013/718127>. Disponível em <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/718127>. Acesso em 12 jan. de 2021.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. **Experimentação em genética e melhoramento de plantas**. 2ª Edição, Lavras: UFLA, 2005. 322 p.

RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B.; PINTO, C. A. B. P.; SOUZA, E. A.; GONÇALVES, F. M. A.; De SOUZA, J. C. **Genética na agropecuária**. 5ª Edição, Lavras: Ed. UFLA, 2012b. 566 p.

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

RESENDE, M. D. V. **Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 57 p.

RESENDE, M. D. V. **Software SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 359 p.

RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, 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.; FURLANI JUNIOR, E.; MORAES, M. L. T.; FAZUOLI, L. C. Estimativas de parâmetros genéticos e predição de valores genotípicos no melhoramento do cafeeiro pelo procedimento REML/BLUP. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 185-193, 2001.

REZENDE, R. M.; ANDRADE, V. T.; SALGADO, S. M. L.; REZENDE, J. C.; MENEZES, J. O.; CARVALHO, G. R. Genetic gain in the resistance of Arabica coffee progênies to root-knot nematode. **Crop Science**, v. 57, p. 1355-1362, 2017.

RODRIGUES, W. P.; VIEIRA, H. D.; BARBOSA, D. H. S. G.; SOUZA FILHO, G. R.; CANDIDO, L. S. Adaptability and genotypic stability of *Coffea arabica* genotypes based on REML/BLUP analysis in Rio de Janeiro State, Brazil. **Genetic and Molecular Research**, v. 12, n. 3, p. 2391-2399, 2013.

SALGADO, S. M. L.; REZENDE, J. C.; NUNES, J. A. R. Selection of coffee progenies for resistance to nematode *Meloidogyne paranaensis* in infested area. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, p. 94-101, 2014.

SANTOS, M. S. M.; MADALENA, J. A.; SOARES, L.; FERREIRA, P. V.; BARBOSA, G. V. S. Repetibilidade de características agroindustriais em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 301-306, 2004.

SERA, G. H.; MACHADO, A. C. Z.; ITO, D. S.; SHIGUEOKA, L. H.; SILVA, S. A.; SERA, T. IPR 106: new Arabica coffee cultivar, resistant to some *Meloidogyne paranaensis* and *M. incognita* nematode populations of Paraná. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, e305520317, 2020.

SERA, G. H.; SERA, T. FONSECA, I. C. B.; ITO, D. S. Resistance to leaf rust in coffee cultivars. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 59-66, 2010.

SERA, G. H.; SERA, T.; ITO, D. S.; AZEVEDO, J. A.; Da MATA, J. S.; DÓI, D. S.; RIBEIRO FILHO, C.; KANAYAMA, F. S. Resistance to leaf rust in coffee carrying SH3 gene and others SH genes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, n. 5, p. 753-757, 2007.

SERA, T. Coffee genetic breeding at IAPAR. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**,

Londrina, v. 1, n. 2, p. 179-199, 2001.

SERA, T.; SERA, G. H.; FAZUOLI, L. C.; MACHADO, A. C. Z.; ITO, D. S.; SHIGUEOKA, L. H.; SILVA, S. A. IPR 100 – Rustic dwarf Arabica coffee cultivar with resistance to nematodes *Meloidogyne paranaensis* and *M. incognita*. **Crop Breeding Applied Biotechnology**, v. 17, n. 2, p. 175-179, 2017.

SHIGUEOKA; L. H.; SERA, G. H.; SERA, T.; FONSECA, I. C. B.; MARIUCCI JUNIOR, V.; ANDREAZI; A.; CARVALHO, F. G.; GARDIANO, C. G.; CARDUCCI, F. C. Selection of Arabic coffee progenies with rust resistance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, p. 88-93, 2014.

SILVA, B. S. R.; SANT'ANA, G. S.; CHAVES, C. L.; ANDROCIOLI, L. G.; FERREIRA, R. V.; SERA, G. H.; CHARMETANT, P.; LEROY, T.; POT, D.; DOMINGUES, D. S.; PEREIRA, L. F. P. Population structure and genetic relationships between Ethiopian and Brazilian *Coffea arabica* genotypes revealed by SSR markers. **Genetica**, v. 147, p. 205-216, 2019.

SILVA, M. C.; VÁRZEA, V.; GUERRA, G. L.; AZINHEIRA, H. G.; FERNANDEZ, D.; PETITOT, A. S.; BERTRAND, B.; LASHERMES, P.; NICOLE, M. Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 18, n. 1, p. 119-147, 2006.

TALHINHAS, P.; BATISTA, D.; DINIZ, I.; VIEIRA, A.; SILVA, D. N.; LOUREIRO, A.; TAVARES, S.; PEREIRA, A. P.; AZINHEIRA, H. G.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; VÁRZEA, V.; SILVA, M. C. The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. **Molecular Plant Pathology**, v. 18, n. 8, p. 1039-1051, 2017.

VÁRZEA, V. M. P.; MARQUES, V. D.; PEREIRA, A. D.; SILVA, M. C. The use of Sarchimor derivatives in coffee breeding resistance to leaf rust. *In: 22nd International Conference on Coffee Science*, 22, 2009, Campinas. **Proceedings [...]**. Campinas, SP: ASIC, 2009. p. 14-19.

VÁRZEA, V. M. P.; RODRIGUES JUNIOR, C. J.; SILVA, M. C. M. L.; GOUVEIA, M.; MARQUES, D. V.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; RIBEIRO, A. Resistência do cafeeiro a *Hemileia vastatrix*. *In: ZAMBOLIM, L. (Eds.). O estado da arte de tecnologias na produção de café*. Viçosa, MG: UFV, 2002. p. 297-320.

WALYARO, D. J.; VAN DER VOSSSEN, H. A. M. Early determination of yield potential in arabica coffee by applying index selection. **Euphytica**, v. 28, n. 2, p. 465-472, 1979.

WILKS, S. S. The large-sample distribution of the likelihood ratio for testing composite hypothesis. **Annals of Mathematical Statistics**, v. 9, p. 60-62, 1938.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Os caracteres IDV, INF, PROD e TF obtiveram baixos valores para as estimativas de herdabilidade no sentido restrito e correlação genotípica entre safras. Enquanto a maior magnitude dessas estimativas para M e F, demonstraram que esses caracteres são influenciados por menor número de genes em relação aos demais. Contudo, os valores estimados para as duas variáveis foram menores para M, indicando que essa característica é governada por mais genes em relação à resistência à ferrugem.

Com relação aos coeficientes de repetibilidade estimados, os valores mais elevados para IDV, M e F, indicaram a necessidade de avaliação de 4, 5 e 2 safras para a obter respostas de alta acurácia. Enquanto para INF, PROD e TF, é necessário a utilização de mais de 13 safras de avaliação para alcançar acurácia $\geq 0,70$, devido à baixa repetibilidade desses caracteres, os quais podem comprometer com a eficiência do programa de melhoramento. Apenas os caracteres M e F apresentaram viabilidade para a seleção, devido a presença de variabilidade via LRT. Os valores genéticos preditos pelo BLUP para as duas características, ordenados pelo índice de Mulamba e Mock, possibilitaram a obtenção de respostas mais acuradas e balanceadas para a seleção simultânea entre progênies com ciclo de maturação precoce e resistência a ferrugem. A seleção dentro das melhores progênies realizadas para F, permitiu ainda a identificação dos genótipos com maior ganho para resistência à ferrugem, em vista da herdabilidade estimada dentro das famílias para essa característica.

Os genótipos selecionados serão avançados para a geração F₅, na qual, novas avaliações serão realizadas, também, para a identificação de genótipos em homozigose para resistência os nematoides *M. paranaensis* e *M. incognita*, derivada do genitor IAPAR 77041-62-6-10-6. Desse modo, futuras cultivares poderão ser desenvolvidas com resistência simultânea à ferrugem alaranjada e nematoides, e com maior precocidade de ciclo de maturação, para a recomendação para áreas infestadas com *M. paranaensis* e *M. incognita* e com alta incidência de ferrugem, visando o escalonamento de colheita.

6 REFERÊNCIAS

ABEYWARDENA, V. An application of principal component analysis in genetics. **Journal of Genetics**, Sadashivanagar, v. 61, p. 27-51, 1972.

AGUIAR, A. T. E.; GUERREIRO-FILHO, O.; MALUF, M. P.; GALLO, P. B.; FAZUOLI, L. C. Caracterização de cultivares de *Coffea arabica* mediante utilização de descritores mínimos. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 2, p. 179-192, 2004.

ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. **FAO: ESA Working Paper No. 12-03**, Rome, Italy, 2012, 154 p.

ALTEIA, M. Z.; SERA, T.; GUERREIRO, A.; AZEVEDO, J. A. D.; COLOMBO, L. A. (2001). Vinte anos de avaliações agronômicas das progênies dos germoplasmas: Catimor, Sarchimor, "Icatu" x 'Catuaí' e 'Catuaí' x SH1, SH2, SH3, SH4, em Londrina-Paraná. *In: II SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL*, 2, 2001, Vitória. **Anais [...]** Brasília: Embrapa Café, 2001, p. 1412-1420.

ALVES, J. D. Morfologia do cafeeiro. *In: CARVALHO, C. H. S. Cultivares de café: origem, características e recomendações*. Brasília: Embrapa Café, 2008, p. 35-58.

ANDREAZI, E.; CARDUCCI, F.C.; SERA, T.; PEREIRA, C. T. M., MARIUCCI JUNIOR, V.; CARVALHO, F. G.; SHIGUEOKA, L. H.; Dos SANTOS, W. G.; FONSECA, I. C. B.; SERA, G. H. Ciclo precoce de maturação e produtividade em genótipos de café derivados de C1195-5-6-2. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, p. 575-582, 2017.

ANTHONY, F.; BERTRAND, B.; QUIROS, O.; WILCHES, A.; LASHERMES, P.; BERTHAUD, J.; CHARRIER, A. Genetic diversity of wild coffee (*Coffea arabica* L.) using molecular markers. **Euphytica**, v. 118, n. 1, p. 53-65, 2001.

APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S.; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 4, p. 405-417, 2016.

BACKES, R. L.; REIS, M. S.; SEDIYAMA, T.; CRUZ, C. D.; TEIXEIRA, R. C. Estimativas de parâmetros genéticos em populações F₅ e F₆ de soja. **Revista Ceres**, v. 49, n. 282, p. 201-

216, 2002.

BENTI, T.; GEBRE, E.; TEFAYE, K.; BERECHA, G.; LASHERMES, P.; KYALLO, M.; YAO, N. K. Genetic diversity among commercial arabica coffee (*Coffea arabica* L.) varieties in Ethiopia using simple sequence repeat markers. **Journal of Crop Improvement**, DOI: 10.1080/15427528.2020.1803169.

BETTENCOURT, A. J. **Melhoramento genético do cafeeiro: transferência de factores de resistência à *Hemileia vastatrix* Berk. and Br. para as principais cultivares de *Coffea arabica* L.** Lisboa: Centro de Investigação das Ferrugens do cafeeiro, CIFC, Oeiras, 1981. 93 p.

BETTENCOURT, A. J.; CARVALHO, A.; Melhoramento visando a resistência do cafeeiro à ferrugem. **Bragantia**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 35-68, 1968.

BETTENCOURT, A. J.; RODRIGUES JUNIOR, C. J. Principles and practice of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. *In*: CLARKE, R. J.; MACRAE, R. (Eds.). **Coffee**. London: Elsevier Applied Science, v. 4, 1988, p. 199-234.

BONOMO, P.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, A. A.; VIANA, J. M. S.; OLIVEIRA, V. R.; CARNEIRO, C. S. Seleção antecipada de progênies de café descendentes de Híbrido de Timor x Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho. **Acta Scientiarum**, v. 26, n. 1, p. 91-96, 2004.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6ª Edição, Viçosa: Ed. UFV, 2013. 523 p.

BOTREL, M. A.; FERREIRA, R. P.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, A. V.; VIANA, M. C. M. ROCHA, R. MIRANDA, M. Estimativas de coeficientes de repetibilidade para produção de matéria seca em cultivar de alfafa, sob diferentes ambientes. **Revista Ceres**, v. 47, p. 651-663, 2000.

BRASIL – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2021. **Registro Nacional de Cultivares** – **RNC**. Disponível em http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 26 jan. de 2021.

BRUINSMA, J. (Ed.). **World agriculture: towards 2015/2030: an FAO perspective**. London: Earthscan Publications Ltd., 2003, 444 p.

CAIXETA, E. T.; CARVALHO, C. H. S.; ZAMBOLIM, E. M.; PEREIRA, L. F. P.; SAKIYAMA, N. S. Biotecnologia aplicada ao melhoramento genético do cafeeiro. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008, p. 103-128.

CAMARGO, L. E. A. Controle genético. *In*: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. **Manual de fitopatologia: volume 1. Ouro Fino**, Agronômica Ceres Ltda., 2018, p. 229-238.

CARAMORI, P. H.; ANDRADE, G. A.; CAVIGLIONE, J. H.; RICCE, W. S. Zonas de maturação dos cultivares de café Catuaí e Mundo Novo no Estado do Paraná baseadas no acúmulo de graus-dia. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5, 2007, Águas de Lindóia, **Anais**. Brasília: Embrapa Café, 2007, 4 p.

CARVALHO, A. Novas variedades mais produtivas. **Agricultura hoje**, São Paulo, v.6, n. 68, p. 32-34, 1981.

CARVALHO, A. Evolução nos cultivares de café. **O Agrônomo**, Campinas, v. 37, n. 1, p. 7-11, 1985.

CARVALHO, A.; COSTA, W. M.; FAZUOLI, L. C. Comportamento do Híbrido de Timor, de híbridos envolvendo esse cultivar e outras combinações com resistência a *Hemileia vastatrix*. *In*: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS EM CAFEEIROS, 9, 1981, Rio de Janeiro, **Anais**. Rio de Janeiro: IBC, 1981, 182 p.

CARVALHO, A.; FAZUOLI, L. C. Café. *In*: FURLANI, A. M. C.; VIÉGAS, G. P. (Ed.). **O Melhoramento de plantas do Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1993, p. 29-76.

CARVALHO, A.; MEDINA FILHO, H. P.; FAZUOLI, L. C.; GUERREIRO FILHO, O.; LIMA, M. M. A. Aspectos genéticos do cafeeiro. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão

Preto, v. 14, n. 1; p. 135-183, 1991.

CARVALHO, A.; MÔNACO, L. C. Relaciones geneticas de especies seleccionadas de *Coffea*. **Cafe**, v. 9, n. 4, 1968.

CARVALHO, A.; MÔNACO, L. C.; FAZUOLI, L. C. Melhoramento do cafeeiro: XL – Estudos de progênies e híbridos de café Catuaí. **Bragantia**, v. 38, n. 22, p. 202-216, 1979.

CARVALHO, C. H. S.; FAZUOLI, L. C.; CARVALHO, G. R.; GUERREIRO FILHO, O.; PEREIRA, A. A.; ALMEIDA, S. R.; MATIELLO, J. B.; BARTHOLO, G. F.; SERA, T.; MOURA, W. M.; MENDES, A. N. G.; REZENDE, J. C.; FONSECA, A. F. A.; FERRÃO, M. A. G.; FERRÃO, R. G.; NACIF, A. P.; SILVAROLLA, M. B.; BRAGHINI, M. T. Cultivares de Café de porte baixo. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café**: origem, características e recomendações. Brasília: Embrapa Café, 2008, p. 157-226.

CARVALHO, F. G.; SERA, G. H.; ANDREAZI, E.; SERA, T.; FONSECA, I. C. B.; CARDUCCI, F. C.; SHIGUEOKA, L. H.; HOLDERBAUM, M. M.; COSTA, K. C. Tolerância ao déficit hídrico em mudas de genótipos de café portadores de genes de diferentes espécies. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 156-163, 2017.

CECAFÉ: Conselho dos Exportadores de Café do Brasil. **Estatísticas**: Exportações brasileiras. Disponível em <https://www.cecafe.com.br/dados-estatisticos/exportacoes-brasileiras>. Acesso em: 17 jul. 2020.

CHALFOUN, S. M.; REIS, P. R. História da cafeicultura no Brasil. *In*: REIS, P.R.; CUNHA, R.L. da. **Café arábica: do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG, v. 1, 2010. p. 23-85.

CHARRIER, A.; BERTHAUD, J. Botanical classification of coffee. *In*: CLIFFORD, M. N.; WILSON, K. C. (Eds). **Coffee**: botany, biochemistry and production of beans and beverage. Croom Helm: London & Sidney, 1985, p. 13-47.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: Café. **Observatório Agrícola**, Brasília, v. 6, n. 1, p. 1-62, 2020.

CONCEIÇÃO, A. S.; FAZUOLI, L. C.; TOMA-BRAGHINI, M. Avaliação e seleção de

progênes F₃ de cafeeiros de porte baixo com o gene *SH₃* de resistência a *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 547-559, 2005.

CONCEIÇÃO, J. C. P. R.; ELLERY JUNIOR, R. G.; CONCEIÇÃO, P. H. Z. Cadeia agroindustrial do café no Brasil: Uma análise do período recente. **Radar**, v. 53, p. 25-29, 2017.

COSTA, W. M. Relação entre grau de resistência a *Hemileia vastatrix* e produtividade no café Icatu. **Bragantia**, Campinas, v. 37, n. 1, p. 1-9, 1978.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**: volume 2. 3ª Edição, Viçosa: Ed. UFV, 2014. 668 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**: Volume 1. 4ª Edição, Viçosa: Ed. UFV, 2012. 514 p.

DaMATTA, F. M.; RENA, A. B.; CARVALHO, C. H. S. Aspectos fisiológicos do crescimento e da produção do cafeeiro. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café**: origem, características e recomendações. Brasília: Embrapa Café, 2008, p. 59-68.

DAVIS, A. P. Six species of *Psilanthus* transferred to *Coffea* (Coffeae, Rubiaceae). **Phytotaxa**, v. 10, p. 41-45, 2010.

DAVIS, A. P. *Psilanthus mannii*, the type species of *Psilanthus*, transferred to *Coffea*. **Nordic Journal of Botany**, v. 29, p. 471-772, 2011.

DAVIS, A. P.; CHADBUM, H.; MOAT, J.; O'SULLIVAN, R.; HARGREAVES, S.; LUGHADHA, E. N. High extinction risk for wild coffee species and implications for coffee sector sustainability. **Science Advances**, v. 5, n. 1, 2019.

DAVIS, A. P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D. M.; STOFFELEN, P. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 152, p. 465-512, 2006.

DAVIS, A. P.; GOVAERTS, R.; BRIDSON, D. M.; RUHSAM, M.; MOAT, J.; BRUMMITT, N. A. A global assessment of distribution, diversity, endemism, and taxonomic effort in the Rubiaceae. **Annals of the Missouri Botanical Garden**, v. 96, n. 1, p. 68-78, 2009.

DAVIS, A. P.; TOSH, J.; RUCH, N. FAY, M. F. Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 167, p. 357-377, 2011.

DEL GROSSI, L.; SERA, T.; SERA, G. H.; FONSECA, I. C. B.; ITO, D. S.; SHIGUEOKA, L. H.; ANDREAZI, E.; CARVALHO, F. G. Rust resistance in Arabic coffee cultivars in northern Paraná. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 56, n. 1, p. 27-33, 2013.

Do VALE; F. X. R.; PARLEVLIT, J. E.; ZAMBOLIM, L. Concepts in plant disease resistance. **Fitopatologia Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 577-589, 2001.

DUARTE, J. B. Biometria em genética e melhoramento de plantas: tendências e inquietações. *In: XIV SIMPÓSIO DE ATUALIZAÇÃO EM GENÉTICA E MELHORAMENTO DE PLANTAS: a genética quantitativa e de populações no Brasil*, 14, 2010, Lavras. **Anais [...]**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010. p. 47-60.

DUARTE, J. B.; VENCOSKY, R. Estimação e predição por modelo linear misto com ênfase na ordenação de médias de tratamentos genéticos. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 1, p. 109-117, 2001.

DUCHATEAU, L.; JANSSEN, P. An example-based in linear mixed models. *In: VERBEKE, G.; MOLENBERGHS, G. (Eds.). Linear mixed models in practice: a SAS-oriented approach*. New York: Springer-Verlag, 1997, p. 11-61.

ESKES, A. B. The use of leaf disk inoculations in assessing resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*). **Netherlands Journal of Plant Pathology**, v. 88, n. 4, p. 127-141, 1982.

ESKES, A. B. Resistance. *In: KUSHALAPPA, A. C.; ESKES, A. B. (Eds.). Coffee rust: epidemiology, resistance and management*. Boca Raton: CRC Press, 1989. p. 171-291.

ESKES, A. B.; COSTA, W. M. Characterization of incomplete resistance to *Hemileia vastatrix* in the Icatu coffee population. **Euphytica**, v. 32, p. 649-657, 1983.

ESKES, A. B.; HOOGSTRATEN, J. G. J.; TOMA-BRAGHINI, M.; CARVALHO, A. Race-specificity and inheritance of incomplete resistance coffee leaf rust in some Icatu coffee progenies and derivatives of Híbrido de Timor. **Euphytica**, Wageningen, v. 47, n. 1, p. 11-19, 1990.

ESKES, A. B.; TOMA-BRAGHINI, M. Assessment methods for resistance to coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix* Berk. & Br.). **Plant Prot. Bulletin FAO**, v. 29, p. 56-66, 1981.

FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to quantitative genetics**. 4th Edition, London: Longman Green, 1996. 464 p.

FAZUOLI, L. C.; MEDINA FILHO, H. P.; GONÇALVES, W.; GUERREIRO FILHO, O.; SILVAROLLA, M. B. Melhoramento do cafeeiro: Variedades Tipo Arábica Obtidas no Instituto Agrônomo de Campinas. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa: UFV, 2002. p. 163-216.

FAZUOLI, L. C.; CARVALHO, C. H. S.; CARVALHO, G. R.; GUERREIRO FILHO, O.; PEREIRA, A. A.; BARTHOLO, G. F.; MOURA, W. M.; SILVAROLLA, M. B.; TOMA-BRAGHINI M. Cultivares de Café arábica de porte alto. In: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 227-254.

FAZUOLI, L. C.; GUERREIRO FILHO, O.; SILVAROLLA, M. B.; MEDINA FILHO, H. P.; CARVALHO, A. Avaliação das cultivares Mundo Novo, Bourbon Amarelo e Bourbon Vermelho de *Coffea arabica* L. em Campinas, SP. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 533-546, 2005.

FAZUOLI L. C.; SILVAROLLA, M. B.; SALVA, T. J. G.; GUERREIRO FILHO, O.; MEDINA FILHO, H. P.; GONÇALVES, W. Cultivares de café arábica do IAC, um patrimônio da cafeicultura brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIIRAS, 33., 2007, Lavras. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2007. p. 1-10.

FAZUOLI, L. C.; TOMA-BRAGHINI, M.; SILVAROLLA, M. B.; GONÇALVES, W.; MISTRO, J. C.; GALLO, P. B. GUERREIRO FILHO, O. IAC Catuaí SH3 – a dwarf Arabica

coffee cultivar with leaf rust resistance and drought tolerance. **Coffee Breeding and Applied Biotechnology**, v. 19, n. 3, p. 356-359, 2019.

FEHR, W. R. **Principles of cultivar development**. New York: Macmillan Publishing Company, 1991. 536 p.

FERNANDEZ, D.; SANTOS, P.; AGOSTINI, C.; BOM, M.C.; PETITOT, A.N.; SILVA, M. C.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; RIBEIRO, A.; ARGOUT, X. NICOLE, M. Coffee (*Coffea arabica* L.) genes early expressed during infection by the rust fungus (*Hemileia vastatrix*). **Molecular Plant Pathology**. Blackwell Publishing LTD. v. 5, p. 527-536, 2004.

FERRÃO, R. G.; CRUZ, C. D., FERREIRA, A.; CECON, P. R.; FERRÃO, M. A. G.; FONSECA, A. F. A.; CARNEIRO, P. C. S.; SILVA, M. F. Parâmetros genéticos em café Conilon. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 43, n. 1, p. 61-69, 2008.

FERREIRA, F. M.; ROCHA, J. R. A. S. C.; ALVES, R. S.; ELIZEU, A. M.; BENITES, F. R. G.; RESENDE, M. D. V.; SOUZA SOBRINHO, F.; BHERING, L. L. Estimates of repeatability coefficients and optimum number of measures for genetic selection of *Cynodon* spp. **Euphytica**, v. 216, v. 70, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02605-x>. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s10681-020-02605-x>. Acesso em 19 jan. de 2021.

FREITAS, Z. M. T. S.; OLIVEIRA, F. J.; CARVALHO, S. P.; SANTOS, V. F.; SANTOS, J. P. O. Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café Arábica de porte baixo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 267-275, 2007.

GILMOUR, A.; CULLIS, B.; WELHAM, S. GOGEL, B.; THOMPSON, R. An efficient computing strategy for prediction in mixed linear models. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 44, p. 571-586, 2004.

GODOY, C. V.; BERGAMIN FILHO, A.; SALGADO, C. L. Doenças do cafeeiro (*Coffea arabica* L.). In: KIMATI H. **Manual de Fitopatologia: Doenças e seu controle**. Volume 2, São Paulo: Agronômica Ceres, 1997. pp. 184-200.

GÖKCEN, B. B.; ŞANLIER, N. Coffee consumption and disease correlations. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 59, n. 2, p. 336-348, 2019.

GONZALES-MARTINEZ, L. F.; CORTINA-GUERRERO, H. A.; HERRERA-PINILHA, J. C. Validación de marcadores moleculares ligados al gen SH3 de resistencia contra la roya em introducciones de la colección colombiana de café. **Cenicafé**, v. 60, n. 4, p. 374-389, 2009.

GUERREIRO FILHO, O.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; SILVAROLLA, M. B.; BOTELHO, C. E.; FAZUOLI, L. C. Origem e classificação botânica do cafeeiro. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008a. p. 27-34.

GUERREIRO FILHO, O.; SILVAROLLA, M. B.; CARVALHO, C. H. S.; FAZUOLI, L. C. Características utilizadas para a identificação de cultivares de café. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008b. p. 141-156.

GUSMÃO, L. Inadequacy of blocking in cultivar yield trials. **Theoretical and Applied Genetics**, New York, v. 72, p. 98-104, 1986.

HENDERSON, C. R. Sire evaluation and genetic trends. **Journal of Animal Science**, v. 1973, p. 10-41, 1973.

HENDERSON, C. R. **Applications of linear models in animal breeding**. Guelph: University of Guelph, 1984. 462 p.

HEIN, L.; GATZWEILLER, F. The economic value of coffee (*Coffea arabica*) genetic resources. **Ecological Economics**, v. 60, p. 176-185, 2006.

ICO, Internacional Coffee Organization. **Historical data on the global coffee trade**. http://www.ico.org/new_historical.asp?section=Statistics. Acesso em: 17 jul. 2020.

LABOUISSSE, J. P.; BELLACHEW, B.; KOTTECHA, S.; BERTRAND, B. Current status of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources in Ethiopia: implications for conservation. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 55, n. 7, p. 1079-1093, 2008.

LASHERMES, P.; COMBES, M. C.; ROBERT, J.; TROUSLOT, P.; HONT, A. D.; ANTHONY, F.; CHARRIER, A. Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica* L. genome. **Molecular and General Genetics MGG**, v. 261, p. 259-266, 1999.

MARIGUELE, K. H.; RESENDE, M. D. V.; VIANA, J. M. S.; SILVA, F. F.; SILVA, P. S. L.; KNOP, F. C. Métodos de análise de dados longitudinais para o melhoramento genético da pinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 12, p. 1657-1664, 2011.

MARQUES, D. V.; BETTENCOURT, A. J. Resistência a *Hemileia vastatrix* numa população de Icatu. Garcia de Orta, **Série Est. Agron**, v. 6, n. 1/2, p. 19-24, 1979.

MATIELLO, J. B. Critérios para escolha da cultivar de café. *In*: CARVALHO, C. H. S. de. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 129-139.

MATIELLO, J. B.; ALMEIDA, S.; GARCIA, A. W. R.; SANTINATO, R. **Cultura de café no Brasil: Manual de recomendações**. Ed. Varginha, MG. Futurama Editora, 2016.

MAZZAFERA, P. I.; CARVALHO, A. Produção e tolerância à seca de cafeeiros. **Bragantia**, Campinas, v. 46, p. 403-415, 1987.

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R. Melhoramento do café arábica ao longo dos anos. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa, 2007. p. 65-82.

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R.; CARVALHO, C. H. S. Desenvolvimento de novas cultivares de café arábica. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008. p. 79-102.

MEYER, F. G.; FERNIE, L. M.; NARASIMHASWAMY, R. L.; MONACO, L. C.; GREATHEAD, D. J. **FAO coffee mission to Ethiopia 1964–1965**. FAO, Rome, 1968.

MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; FAZUOLI, L. C.; SILVAROLLA, M. B. História das primeiras cultivares de café plantadas no Brasil. *In*: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília:

Embrapa Café, 2008a. p. 69-78.

MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; FAZUOLI, L. C.; SILVAROLLA, M. B. Mutantes de *Coffea arabica* L. e cultivares de importância histórica. In: CARVALHO, C. H. S. **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: Embrapa Café, 2008b. p. 281-298.

MENDES, A. J. T. Duplicação do número de cromossomos em café, algodão e fumo pela ação da colchicina. **Boletim Técnico**, Campinas, Instituto Agrônomo, 57, 1939. 21 p.

MILLIGAN, S. B.; BALZARINI, M.; WHITE, W. H. Broad-sense heritabilities, genetic correlations, and selection indices for sugarcane borer resistance and their relation to yield loss. **Crop Science**, v. 43, p. 1729-1735, 2003.

MISTRO, J. C.; FAZUOLI, L. C.; GUERREIRO FILHO, O.; SILVAROLLA, M. B.; TOMA-BRAGHINI, M. Determination of the number of years in Arabica Coffee progenies selection through repeatability. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 8, n. 1, p. 79-84, 2008.

MRODE, R. A. **Linear models for the prediction of animal breeding values**. 2nd ed. Wallingford: CABI Publishing, 2005. 358 p.

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

NELSON, R. R. Genetics of horizontal resistance to plant diseases. **Annual Review of Phytopathology**, v. 16, p. 359-378, 1978.

NOGUEIRA, D. A.; SÁFADI, T.; BEARZOTI, E.; BUENO FILHO, J. S. S. Análises clássica e bayesiana de um modelo misto aplicado ao melhoramento animal: uma ilustração. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, Edição Especial, p. 1614-1624, 2003.

NIELSEN, H. B.; ALMEIDA, M.; JUNCKER, A. S.; RASMUSSEN, S.; LI, J.; SUNAGAWA, S.; PLICHTA, D. R.; GAUTIER, L.; PEDERSEN, A. G.; Le CHATELIER, E.; PELLETIER, E.; BONDE, I.; NIELSEN, T.; MANICHANH, C.; ARUMUGAM, M.; BATTO, J. M.; Dos

SANTOS, M. B. Q.; BLOM, N.; BORRUEL, N.; BURGDORF, K. S.; BOUMEZBEUR, F.; CASELLAS, F.; DORÉ, J.; DWORZYNSKI, P.; GUARNER, F.; HANSEN, T.; HILDEBRAND, F.; KAAS, R. S.; KENNEDY, S.; KRISTIANSEN, K.; KULTIMA, J. R.; LÉONARD, P.; LEVENEZ, F.; LUND, O.; MOUMEN, B.; Le PASLIER, D.; PONS, N.; PEDERSEN, O.; PRIFTI, E.; QIN, J.; RAES, J.; SØRENSEN, S.; TAP, J.; TIMS, S.; USSERY, D. W.; YAMADA, T.; RENAULT, P.; SICHERITZ-PONTEN, T.; BORK, P.; WANG, J. 25, BRUNAK, S.; EHRLICH, S. D. Identification and assembly of genomes and genetic elements in complex metagenomic samples without using reference genomes. **Nature Biotechnology**, v. 32, n. 8, p. 822–828, 2014.

NORONHA WAGNER, M.; BETTENCOURT, A. J. Genetic study of resistance of *Coffea* sp. to leaf rust: I. Identification and behavior of four factors conditioning disease reaction in *Coffea arabica* to twelve physiologic races of *Hemileia vastatrix*. **Canadian Journal of Botany**, v. 45, n. 11, p. 2021-2031, 1967.

NUNES, F. L.; CAMARGO, M. B. P.; FAZUOLI, L. C.; ROLIM, G. S.; PEZZOPANE J. R. M. Modelos agrometeorológicos de estimativa da duração do estágio floração-maturação para três cultivares de café arábica. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 1011-1018, 2010.

OLIVEIRA, A. C. B.; PEREIRA, A. A. Cultivares de café portadoras de fatores de resistência à ferrugem indicadas para plantio em Minas Gerais. Belo Horizonte: **Circular Técnica**, 34, EPAMIG, 2008. 7 p.

OLIVEIRA, A. C. B.; PEREIRA, A. A.; SILVA, F. L.; REZENDE, J. C.; BOTELHO, C. E.; CARVALHO, G. R. Prediction of genetic gains from selection of Arabica coffee progenies. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 2, p. 106-113, 2011.

PATTERSON, H. D.; THOMPSON, R. Recovery of inter-block information when block sizes are unequal. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 545-554, 1971.

PEREIRA, A. A. Cultivares: origem e suas características. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. **Café arábica do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG, 2010. p.161-201.

PEREIRA, A.A.; BAIÃO, A.C. Cultivares. In: SAKIYAMA. Ney et al. **Café arábica: do plantio à colheita**. Viçosa: FUNEP, 2015. p. 24-45.

PEREIRA, A. A.; OLIVEIRA, A. C. B.; BOTELHO, C. E.; CARVALHO, G. R.; REZENDE, J.C. Cultivares de café Arábica desenvolvidas pela EPAMIG e instituições parceiras. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 34, p. 44-53, 2013a.

PEREIRA, T. B.; CARVALHO, J. P. F.; BOTELHO, C. E.; RESENDE, M. D. V.; REZENDE, J. C.; MENDES, A. N. G. M. Eficiência da seleção de progênies de café F₄ pela metodologia de modelos mistos (REML/BLUP). **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 3, p. 230-236, 2013b.

PETEK, M. R.; FAZUOLI, L. C.; MISTRO, J. C.; OLIVEIRA, A. C. B.; GALLO, P. B. Correlações e análise de trilha entre reação à cercosporiose e outras variáveis em progênies de café arábica. *In*: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 5, 2007, Águas de Lindóia. Anais [...]. Brasília: Embrapa Café, 2007. 5 p.

PETEK, M. R.; SERA, T.; FONSECA, I. C. B. Predição de valores genéticos aditivos na seleção visando obter cultivares de café mais resistentes à ferrugem. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 133-140, 2008.

PETEK, M. R.; SERA, T.; FONSECA, I. C. B. Exigências climáticas para o desenvolvimento e maturação dos frutos de cultivares de *Coffea arabica*. **Bragantia**, Campinas, v. 68, p. 169-181, 2009.

PIMENTEL, A. J. B.; GUIMARÃES, J. F. R.; SOUZA, M. A.; RESENDE, M. D. V.; MOURA, L. M.; ROCHA, J. R. A. S. C.; RIBEIRO, G. Estimação de parâmetros genéticos e predição de valor genético aditivo de trigo utilizando modelos mistos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 11, p. 882-890, 2014.

QUEIROZ-VOLTAN, R.B.; NARDIN, C. F.; FAZUOLI, L. C.; BRAGHINI, M. T. Caracterização da anatomia foliar de cafeeiros arábica em diferentes períodos sazonais. **Biotemas**, Florianópolis, v. 27, n. 4, p. 1-10, 2014

RAM, A. S. Durable rust resistance in Arabica coffee. *In*: First Dali Binchuan Zhukula Internacional Coffee Forum, 1, 2017, Zhukula, China. **Conference paper...** Kunming: Specialty Coffee Society of Yunnan. 2017. p. 177-188.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. F. B.; SANTOS, J. B.; NUNES, J. A. R. **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas**. 1ª Edição, Lavras: Ed.

UFLA, 2012a. 522 p.

RAMALHO; M. A. P.; CARVALHO, B. L.; NUNES, A. R. Perspectives for the use of quantitative genetics in breeding of autogamous plants. **ISRN Genetics**, v. 2013, p. 1-6, 2012.

RAMALHO, M. A. P.; FERREIRA, D. F.; OLIVEIRA, A. C. **Experimentação em genética e melhoramento de plantas**. 2ª Edição, Lavras: UFLA, 2005. 322 p.

RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B.; PINTO, C. A. B. P.; SOUZA, E. A.; GONÇALVES, F. M. A.; De SOUZA, J. C. **Genética na agropecuária**. 5ª Edição, Lavras: Ed. UFLA, 2012b. 566 p.

RESENDE, M. D. V. **Análise estatística de modelos mistos via REML/BLUP na experimentação em melhoramento de plantas perenes**. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 101 p.

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

RESENDE, M. D. V. **Efeitos fixos ou aleatórios de repetições no contexto dos modelos mistos no melhoramento de plantas perenes**. Colombo: Embrapa Florestas, 2002b. 23 p.

RESENDE, M. D. V. **Métodos estatísticos ótimos na análise de experimentos de campo**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. 57 p.

RESENDE, M. D. V. **Software SELEGEN-REML/BLUP: Sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 359 p.

RESENDE, M. D. V. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, 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**, Goiânia, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

RESENDE, M. D. V.; FERNANDES, J. S. C.; SIMEÃO, R. M. BLUP individual multivariado em presença de interação genótipo x ambiente para delineamentos experimentais repetidos em vários ambientes. **Revista de Matemática e Estatística**, São Paulo, v. 17, p. 209 – 228, 1999.

RESENDE, M. D. V.; FURLANI JUNIOR, E.; MORAES, M. L. T.; FAZUOLI, L. C. Estimativas de parâmetros genéticos e predição de valores genotípicos no melhoramento do cafeeiro pelo procedimento REML/BLUP. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 3, p. 185-193, 2001.

RESENDE, M. D. V.; STURION, J. A. **Análise genética de dados com dependência espacial e temporal no melhoramento de plantas perenes via modelos geoestatísticos e de séries temporais empregando REML/BLUP ao nível individual**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 80 p.

ROBINSON, G. K. That BLUP is a good thing: the estimation of random effects. **Statistical Science**, v. 6, p. 15-51, 1991.

RODRIGUES, W. P.; VIEIRA, H. D.; BARBOSA, D. H. S. G.; SOUZA FILHO, G. R.; CANDIDO, L. S. Adaptability and genotypic stability of *Coffea arabica* genotypes based on REML/BLUP analysis in Rio de Janeiro State, Brazil. **Genetics and Molecular Research**, v. 12, n. 3, p. 2391-2399, 2013.

RODRIGUES JUNIOR, C. J.; BETTENCOURT, A. J.; RIJO, L. Races of the pathogen and resistance to coffee rust. **Annual review phytopathology**, v. 13, p. 49-70, 1975.

SAKIYAMA, N. S. O café Arábica. In: SAKIYAMA, N. S.; MARTINEZ, H. E. P.; TOMAZ, M. A.; BORÉM, A. (Eds.). **Café Arábica: do plantio à colheita**. Editora UFV: Viçosa, 2015. p. 9-23.

SANTOS, M. S. M.; MADALENA, J. A.; SOARES, L.; FERREIRA, P. V.; BARBOSA, G. V. S. Repetibilidade de características agroindustriais em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 4, p. 301-306, 2004.

SERA, G. H.; MACHADO, A. C. Z.; ITO, D. S.; SHIGUEOKA, L. H.; SILVA, S. A.; SERA, T. IPR 106: new Arabica coffee cultivar, resistant to some *Meloidogyne paranaensis* and *M. incognita* nematode populations of Paraná. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 20, n. 3, e305520317, 2020.

SERA, G. H.; SERA, T. FONSECA, I. C. B.; ITO, D. S. Resistance to leaf rust in coffee cultivars. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 1, p. 59-66, 2010.

SERA, G. H.; SERA, T.; ITO, D. S.; AZEVEDO, J. A.; Da MATA, J. S.; DÓI, D. S.; RIBEIRO FILHO, C.; KANAYAMA, F. S. Resistance to leaf rust in coffee carrying SH3 gene and others SH genes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 50, n. 5, p. 753-757, 2007.

SERA, T. Coffee genetic breeding at IAPAR. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 1, n. 2, p. 179-199, 2001.

SERA, T.; SERA, G. H.; FAZUOLI, L. C. IPR 103 – Rustic dwarf arabic coffee cultivar more adapted to hot regions and poor soils. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 13, p. 95-98, 2013.

SERA, T.; SERA, G. H.; FAZUOLI, L. C.; MACHADO, A. C. Z.; ITO, D. S.; SHIGUEOKA, L. H.; SILVA, S. A. IPR 100 – Rustic dwarf Arabica coffee cultivar with resistance to nematodes *Meloidogyne paranaensis* and *M. incognita*. **Crop Breeding Applied Biotechnology**, v. 17, n. 2, p. 175-179, 2017.

SEVERINO, L. S.; SAKIYAMA, N. S.; PEREIRA, A. A.; MIRANDA, G. V.; ZAMBOLIM, L.; BARROS, U. V. Associações da produtividade com outras características agronômicas de café (*Coffea arabica* L. “Catimor”). **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1467-1471, 2002.

SHIGUEOKA, L. H.; SERA, G. H.; SERA, T.; FONSECA, I. C. B.; MARIUCCI JUNIOR, V.; ANDREAZI, A.; CARVALHO, F. G.; GARDIANO, C. G.; CARDUCCI, F. C. Selection of Arabica coffee progenies with rust resistance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, p. 88-93, 2014.

SHIGUEOKA, L. H.; SERA, G. H.; SERA, T.; SILVA, S. A.; FONSECA, I. C. B.; MACHADO, A. C. Z. Host reaction of arabica coffee genotypes derived from “Sarchimor” to

Meloidogyne paranaensis. **Nematoda**, v. 3, p. 10-16, 2016.

SILVA, M. C.; VÁRZEA, V.; GUERRA, G. L.; AZINHEIRA, H. G.; FERNANDEZ, D.; PETITOT, A. S.; BERTRAND, B.; LASHERMES, P.; NICOLE, M. Coffee resistance to the main diseases: leaf rust and coffee berry disease. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Piracicaba, v. 18, n. 1, p. 119-147, 2006.

SILVESTRINI, M.; JUNQUEIRA, M. G.; FAVARIN, A. C.; GUERREIRO-FILHO, O.; MALUF, M. P.; SILVAROLLA, M. B.; COLOMBO, C. A. Genetic diversity and structure of Ethiopian, Yemen and Brazilian *Coffea arabica* L. accessions using microsatellites markers. **Springer Science + Business Media**, v. 6, p. 1367-1379, 2007.

SNUSTAD, D. P.; SIMMONS, M. J. **Fundamentos de genética**. 7ª edição, Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2020. 579 p.

SOUZA JUNIOR, C. L. Melhoramento de espécies alógamas. *In*: NASS, L.L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso, 2001. p.160-199.

SRINIVASAN, K.H., NARASIMHASWAMY, R.L. A review of coffee breeding work done at the Government Coffee Experiment Station, Balehonnur. **Indian Coffee**, v. 39, p. 311-321, 1975.

TEIXEIRA, A. L.; GONÇALVES, F. M. A.; REZENDE, J. C.; CARVALHO, S. P.; PEREIRA, A. A.; MORAES, B. F. X.; TEIXEIRA, L. G. V. Seleção precoce para produção de grãos em café arábica pela avaliação de caracteres morfológicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 8, p. 1110-1117, 2012.

TALHINHAS, P.; BATISTA, D.; DINIZ, I.; VIEIRA, A.; SILVA, D. N.; LOUREIRO, A.; TAVARES, S.; PEREIRA, A. P.; AZINHEIRA, H. G.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; VÁRZEA, V.; SILVA, M. C. The coffee leaf rust pathogen *Hemileia vastatrix*: one and a half centuries around the tropics. **Molecular Plant Pathology**, v. 18, n. 8, p. 1039-1051, 2017.

THOMPSON, R. The estimation of variance and covariance components when records are subject to culling. **Biometrics**, v. 29, n. 3, p. 527-550, 1973.

THOMPSON, R. The estimation of heritability with unbalanced data. **Biometrics**, v. 33, n. 3, p. 485-504, 1977.

THOMPSON, R. Maximum likelihood estimation of variance components. **Series Statistics**, v. 11, n. 4, p. 545-561, 1980.

TOMA-BRAGHINI, M.; FAZUOLI, L. C.; GUERREIRO FILHO, O.; MISTRO, J. C.; ESKES, A. B. Durabilidade da resistência à ferrugem de cafeeiros portadores do gene SH3. *In*: IX SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 9, 2015, Curitiba, PR. **Anais [...]** Brasília, D.F.: Embrapa Café, 2015.

TOMÉ, M. A.; BUENO FILHO, J. S. S.; FERREIRA, D. F. Blocos fixos ou aleatórios? O caso dos ensaios em látice no melhoramento vegetal. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 26, n. 3, p. 576-584, 2002.

VAN DER VOSSSEN, H. A. M. Coffee selection and breeding. *In*: CLIFFORD, M. N.; WILSON, K. C. (Eds). **Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage**. Croom Helm: London & Sidney, 1985. p. 48-96.

VÁRZEA, V. M. P.; MARQUES, V. D.; PEREIRA, A. D.; SILVA, M. C. The use of Sarchimor derivatives in coffee breeding resistance to leaf rust. *In*: 22nd International Conference on Coffee Science, 22, 2009, Campinas. **Proceedings [...]**. Campinas, SP: ASIC, 2009. p. 14-19.

VÁRZEA, V. M. P.; RODRIGUES JUNIOR, C. J.; SILVA, M. C. M. L.; GOUVEIA, M.; MARQUES, D. V.; GUERRA-GUIMARÃES, L.; RIBEIRO, A. Resistência do cafeeiro a *Hemileia vastatrix*. *In*: ZAMBOLIM, L. (Eds.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa, MG: UFV, 2002. p. 297-320.

VASCONCELLOS, M. E. C.; GONÇALVES, P. S.; De PAIVA, J. R.; VALOIA, A. C. C. Métodos de estimação do coeficiente de repetibilidade no melhoramento da seringueira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, n. 4, p. 433-437, 1985.

VEJA, F. E.; ROSENQUIST, E.; COLLINS, W. Global project needed to tackle coffee crisis. **Nature**, v. 425, p. 343, 2003.

VERBEKE, G. Linear mixed models for longitudinal data. *In*: VERBEKE, G.; MOLENBERGHS, G. (Eds.). **Linear mixed models in practice: A SAS-Oriented approach**. 1997. p. 63-150.

VISHVESHWARA, S. Coffee Breeding in India. **Indian Society of Genetics and Plant Breeding**. v. 34, n. 1, p. 101-109, 1974.

VOLSI, B.; TELLES, T. S.; CALDARELLI, C. E.; CAMARA, M. R. G. The dynamics of coffee production in Brazil. **Plos One**, v. 14, n. 7, e0219742, 2019.

WALYARO, D. J.; VAN DER VOSSSEN, H. A. M. Early determination of yield potential in arabica coffee by applying index selection. **Euphytica**, v. 28, n. 2, p. 465-472, 1979.

ZAMBOLIM, L. *In*: SAKIYAMA, N.; MARTINEZ, H.; TOMAZ, M.; BORÉM, A. **Café arábica: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, p. 129-150, 2015.