UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

IMPACTO DAS ADVERSIDADES CLIMÁTICAS NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS EM CAFÉ ARÁBICA.

Jeane de Sousa Ferreira

Engenheira Agrônoma

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

IMPACTO DAS ADVERSIDADES CLIMÁTICAS NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS EM CAFÉ ARÁBICA.

Discente: Jeane de Sousa Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Alex Mendonça de Carvalho

Coorientador: Prof. Dr. Júlio César Mistro

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas).

2026

F383i

Ferreira, Jeane de Sousa

Impacto das Adversidades Climáticas na Seleção de Genótipos em Café Arábica / Jeane de Sousa Ferreira. -- , 2026

54 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal,

1. Coffea arabica. 2. interação genótipo × ambiente. 3. mudanças climáticas.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: IMPACTO DAS ADVERSIDADES CLIMÁTICAS NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS EM CAFÉ ARÁBICA

AUTORA: JEANE DE SOUSA FERREIRA
ORIENTADOR: ALEX MENDONÇA DE CARVALHO
COORIENTADOR: JULIO CESAR MISTRO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEX MENDONÇA DE CARVALHO (Participaçao Presencial)
Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão - FEPE / UNESP / Câmpus de Registro - FCAVR

gov.br Documento assinado digitalmente
ANTONIO CARLOS BAIAO DE OLIVEIRA
Data: 31/07/2026 15:13:02 -0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Pesquisador Dr. ANTÔNIO CARLOS BAIÃO DE OLIVEIRA (Participaçao Virtual)
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Café) / Brasília/DF

Prof. Dr. PABLO TORLAN VARGAS (Participaçao Presencial)
Departamento de Produção Vegetal / UNESP / Câmpus de Jaboticabal - FCAV

Jaboticabal, 31 de julho de 2026.

DADOS CURRICULARES DA AUTORA

Jeane de Sousa Ferreira, nascida em Limeira – SP, em 13 de abril de 1994, é graduada em Licenciatura e Bacharelado em Educação Física pelas Faculdades Integradas Einstein de Limeira (FIEL), concluído em 2015, e em Engenharia Agronômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira, concluído em 2024. Durante a graduação em Engenharia Agronômica, construiu uma formação diversificada, participando de grupos de estudo e pesquisa, com destaque para o Grupo de Estudos em Manejo Florestal e Agroecologia (GEMFLOR) e o Grupo de Estudos e Pesquisas em Bananicultura: Adubação, Nutrição e Solos (GEBAN), desenvolvendo atividades voltadas ao manejo sustentável, fertilidade do solo e sistemas produtivos. Em 2021, recebeu premiação no Congresso de Iniciação Científica da UNESP pelo trabalho intitulado “Diagnóstico da produção de mudas no Vale do Ribeira em 2021”, desenvolvido a partir de ações vinculadas ao projeto de extensão da Rede de Viveiros de Mudas Nativas do Vale do Ribeira, inserido no maior remanescente de Mata Atlântica protegida do país. No estágio curricular, direcionou suas atividades à área de plantas medicinais, acompanhando todo o processo produção de fitoterápicos à base de *Cannabis spp.*, desde o cultivo até o processamento, em uma associação de caráter social. Como trabalho de conclusão de curso de graduação, desenvolveu o estudo intitulado “Resíduos da Agroindústria do palmito na composição de substratos para o cultivo de *Dendrobium nobile* (mini)”, com enfoque na utilização de resíduos agroindustriais como alternativa sustentável na produção de substratos para plantas ornamentais. Em agosto de 2024, ingressou no curso de Mestrado em Agronomia (Genética e Melhoramento de Plantas) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da UNESP, Câmpus de Jaboticabal, com conclusão prevista para agosto de 2026.

AGRADECIMENTOS

Expresso meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Alex Mendonça de Carvalho e ao Prof. Dr. Júlio César Mistro pela receptividade, apoio, disponibilidade e valiosas contribuições científicas ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Agradeço pela confiança depositada, pelos ensinamentos compartilhados e pela oportunidade de aprendizado proporcionada durante a condução das atividades junto ao Instituto Agronômico de Campinas (IAC) especialmente aos dados fornecidos pelo Centro de Café “Alcides Carvalho”.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2020/07042-4.

SUMÁRIO

RESUMO.....I

ABSTRACT.....II

1. INTRODUÇÃO.....1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....4
   2.1 A cultura do café arábica.....4
   2.2 Mudanças climáticas e a agricultura.....5
   2.3. Impactos das mudanças climáticas na cafeicultura.....6
   2.4. Déficit hídrico e altas temperaturas no cafeeiro.....8
   2.5. Interações genótipo × ambiente (G×A) 11
   2.6. Seleção de genótipos em espécies perenes e a aplicação da metodologia REML/BLUP.....12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....15
4. RESULTADOS.....20
   4.1. Precipitação pluviométrica.....20
   4.2. Temperatura Máxima.....22
   4.3. Análises estatísticas e biométricas.....23
5. DISCUSSÃO.....33
6. CONCLUSÕES.....47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....48

IMPACTO DAS ADVERSIDADES CLIMÁTICAS NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS EM CAFÉ ARÁBICA

RESUMO – As mudanças climáticas têm intensificado as condições adversas, aumentando a frequência e a variabilidade de eventos extremos, o que representa um dos principais desafios para a cafeicultura mundial. Nesse contexto, o melhoramento genético de *Coffea arabica* assume maior responsabilidade estratégica ao conciliar a seleção de materiais genéticos com a forte influência de estresses abióticos, como déficit hídrico e temperaturas elevadas, sobre o desempenho agronômico e a estabilidade produtiva dos genótipos. O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos das adversidades climáticas na seleção de genótipos de café arábica com o intuito de propor uma estratégia de seleção que possa minimizar efeitos da interação genótipos × ambiente, aumentando a eficiência do processo seletivo. O experimento foi conduzido no município de Campinas, SP, Brasil, em delineamento de blocos ao acaso, avaliando 31 genótipos F3 e quatro cultivares controles com quatro repetições e cinco plantas por parcela. Foram analisadas cinco safras, totalizando vinte e seis combinações de anos, sendo as análises genético-estatísticas realizadas por meio de modelos mistos REML/BLUP. Durante o período experimental, ocorreram condições climáticas atípicas, caracterizadas por baixos índices de precipitação e temperaturas elevadas nos principais estádios de desenvolvimento da cultura, antecipando a bienalidade produtiva e ocasionando o aparecimento de interação genótipo × ambiente de natureza complexa. As combinações de anos com interações simples apresentaram estimativas de parâmetros genéticos mais favoráveis, permitindo uma seleção mais segura dos genótipos. As melhores condições para seleção ocorreram em combinações de anos com condições climáticas semelhantes, independentemente dos níveis de produtividade. As estimativas mais favoráveis foram obtidas em combinações de média e baixa produtividade, enquanto combinações com altas produtividades aumentaram a complexidade da interação genótipo × ambiente, interferindo negativamente na estimativa dos parâmetros genéticos. Algumas combinações preservaram a expressão dos efeitos genéticos aditivos e estabilidade de ordenamento dos genótipos. Esses resultados indicam que a seleção baseada exclusivamente em anos de alta produtividade pode comprometer a eficiência do melhoramento genético em cenários de variabilidade climática, uma vez que a eficiência da seleção depende principalmente da capacidade dos ambientes em revelar e preservar diferenças genéticas entre os genótipos, permitindo a identificação mais precisa de materiais superiores sob condições de adversidade climática.

Palavras-chave: *Coffea arabica*, interação genótipo × ambiente, mudanças climáticas, REML/BLUP, seleção de genótipos.

IMPACT OF CLIMATIC ADVERSITIES ON THE SELECTION OF ARABICA COFFEE GENOTYPES

ABSTRACT – Climate change has intensified adverse environmental conditions, increasing the frequency and variability of extreme events, which represents one of the major challenges facing the global coffee industry. In this context, the genetic improvement of Coffea arabica has assumed a greater strategic role in reconciling the selection of superior genetic materials with the strong influence of abiotic stresses, such as water deficit and high temperatures, on the agronomic performance and yield stability of genotypes. The present study aimed to evaluate the effects of climatic adversities on the selection of Arabica coffee genotypes in order to propose a selection strategy capable of minimizing the effects of genotype × environment interaction and increasing the efficiency of the selection process. The experiment was conducted in Campinas, São Paulo State, Brazil, using a randomized complete block design and evaluating 31 F3 progenies and four check cultivars, with four replications and five plants per plot. Five harvest seasons were evaluated, totaling twenty-six year combinations, and the genetic-statistical analyses were performed using mixed models based on REML/BLUP methodology. During the experimental period, atypical climatic conditions were observed, characterized by low precipitation levels and high temperatures during the main developmental stages of the crop, leading to the anticipation of bienniality bearing and the occurrence of complex genotype × environment interactions. Year combinations associated with simple interactions showed more favorable estimates of genetic parameters, allowing a more reliable selection of genotypes. The best conditions for selection occurred in year combinations with similar climatic conditions, regardless of productivity levels. The most favorable estimates were obtained in combinations with medium and low productivity, whereas combinations with high productivity increased the complexity of genotype × environment interactions, negatively affecting the estimation of genetic parameters. Some year combinations preserved the expression of additive genetic effects and the stability of genotype ranking. These results indicate that selection based exclusively on years with high productivity may compromise the efficiency of breeding programs under scenarios of increasing climatic variability, since selection efficiency depends primarily on the ability of environments to reveal and preserve genetic differences among genotypes, enabling a more accurate identification of superior materials under adverse climatic conditions.

Keywords: *Coffea arabica*, climate change, genotype × environment interaction, REML/BLUP, genotype selection

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de cultivares de café arábica é um processo longo, podendo demandar mais de 40 anos de pesquisa (Sera, 2001), como observado para as cultivares IAC 125 RN e IAC Catuí SH3 (Fazuoli et al., 2018; Fazuoli et al., 2019). Isso ocorre porque o cafeeiro, sendo uma espécie perene, requer de quatro a cinco colheitas por geração para a seleção de indivíduos superiores.

Fatores ambientais adversos podem prolongar ainda mais este processo ao interferirem diretamente na expressão fenotípica. As alterações climáticas decorrentes do aquecimento global, como anos com déficits hídricos prolongados e/ou temperaturas elevadas, tornam o processo seletivo mais complexo e podem comprometer a eficiência do melhoramento genético (Kahsay et al., 2023; Chalchissa et al., 2022; Pour-Aboughadareh et al., 2022; Bocianowski et al., 2019). Estas condições não só depauperam e reduzem a produção das plantas, como também antecipam a bienalidade, que é a alternância entre safras de altas e baixas produções, que normalmente ocorre a partir da sexta colheita (Sera, 2001). A bienalidade, quando intensa, não é desejável durante a seleção pois contribui para a heterogeneidade das variâncias, que por sua vez altera as estimativas dos componentes de variâncias, médias e parâmetros genéticos interferindo na interação genótipo × ambiente e consequentemente na seleção (Andrade et al., 2016).

A interação genótipo × ambiente constitui um dos principais fatores que afetam a eficiência dos programas de melhoramento genético. Esse fenômeno ocorre quando diferentes genótipos apresentam respostas distintas às variações ambientais, fazendo com que o desempenho observado dependa das condições sob as quais a avaliação é realizada. De acordo com Vencovsky e Barriga (1992), a interação pode ser classificada como simples ou complexa. Na interação simples, os genótipos mantêm, de maneira geral, a mesma classificação nos diferentes ambientes, ocorrendo apenas alterações na intensidade de suas respostas. Por outro lado, a interação complexa promove mudanças no posicionamento relativo dos genótipos, dificultando a identificação daqueles com desempenho superior e reduzindo a confiabilidade das decisões de seleção.

A presença da interação genótipo × ambiente tem sido amplamente relatada em estudos com café arábica, especialmente para produtividade e características agronômicas relacionadas ao desempenho vegetativo e produtivo das plantas (Bekisisa et al., 2018; Tefera et al., 2020; Marie et al., 2020; Merga et al., 2021; Sakata, 2021; Moreira et al., 2022). Nesses casos, a magnitude da interação pode influenciar diretamente a estimativa dos parâmetros genéticos e a predição dos ganhos obtidos com a seleção, tornando mais complexa a recomendação de genótipos para diferentes condições de cultivo.

Apesar dos avanços obtidos na compreensão da interação genótipo × em cafeeiro, ainda são limitados os estudos que avaliam o efeito de diferentes combinações de anos agrícolas sobre a expressão dessa interação. Essa abordagem assume importância crescente diante das mudanças climáticas, uma vez que a ocorrência mais frequentes de eventos extremos, como secas prolongadas e temperaturas elevadas, pode alterar significativamente as condições de avaliação dos genótipos e comprometer a precisão do processo seletivo.

Nesse contexto a identificação de combinações de anos que permitam estimativas genéticas mais consistentes e preservem a classificação dos genótipos torna-se uma ferramenta importante para aumentar a eficiência dos programas de melhoramento. Além de reduzir incertezas associadas à seleção, essa estratégia pode contribuir para otimizar o tempo necessários ao desenvolvimento de novas cultivares e aumentar a probabilidade de identificação de materiais com desempenho estável em diferentes condições ambientais.

Diferentemente das abordagens tradicionalmente baseadas apenas na magnitude da produtividade observada, este estudo considera que a eficiência da seleção está associada à capacidade dos ambientes em expressar a variabilidade genética existente entre os genótipos. Assim, busca-se compreender de que forma as condições ambientais influenciam a discriminação dos materiais avaliados e como essas relações podem ser utilizadas para aperfeiçoar as estratégias de seleção em cenários de adversidades climáticas.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos das adversidades climáticas sobre a seleção de genótipos de café arábica, investigando a influencia de

diferentes combinações de anos na interação genótipo × ambiente, com o propósito de propor estratégias capazes de aumentar a eficiência do processo seletivo e auxiliar o desenvolvimento de cultivares mais adaptadas às condições ambientais futuras.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura do café arábica no Brasil

O café é a segunda bebida mais consumida no mundo e ocupa posição de destaque como commodity agrícola, devido à sua grande relevância econômica, social e cultural em escala global. O consumo mundial de café tem apresentado crescimento contínuo nas últimas décadas, alcançando em torno de 177 milhões de sacas de 60 kg na safra 2023/24 (International Coffee Organization, 2024), sendo o Brasil o maior produtor com 55,2 milhões de sacas na safra 2024/25 (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025).

Coffea arabica L., descrita originalmente por Linnaeus em *Species Plantarum* (1753), é uma espécie perene da família *Rubiaceae*, originária dos planaltos montanhosos do sudoeste da Etiópia (Almeida e Antar, 2026). Atualmente, representa a principal espécie utilizada na produção mundial de café, sendo amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais. O gênero *Coffea* possui 131 espécies distribuídas principalmente na África, Madagascar e ilhas do Oceano Índico (Davis et al., 2012).

O café possui elevada importância econômica, histórica e social para o Brasil, sendo uma das principais commodities agrícolas produzidas e exportadas pelo país, ocupando posição de destaque como maior produtor e exportador de café, com predominância do cultivo de café arábica responsável por aproximadamente 63% da produção nacional na safra 2025 (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025).

A cafeicultura brasileira ocupa aproximadamente 2,25 milhões de hectares cultivados, distribuídos entre as espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, com produção concentrada principalmente nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Bahia. Minas Gerais destaca-se como principal produtor nacional de café arábica, respondendo por mais de 65% da produção brasileira da espécie (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025).

A espécie *Coffea arabica* apresenta hábito perene, crescimento contínuo e reprodução predominantemente autógama, caracterizando-se geneticamente como uma espécie alotetraploide (2n = 4x = 44 cromossomos), originada da hibridização

natural entre *Coffea canephora* e *Coffea eugenioides* (Lashermes, et al., 1999). Essa constituição genética contribui para relativa estabilidade genotípica, embora a base genética estreita da espécie represente um desafio aos programas de melhoramento vegetal (Scalabrin et al., 2020). Além disso, sua reprodução autógama favorece elevados níveis de homozigose e endogamia ao longo das gerações, reduzindo a variabilidade genética disponível para seleção.

A elevada sensibilidade fisiológica de Coffea arabica às variações ambientais torna a cultura particularmente vulnerável às alterações climáticas globais. Estudos demonstram que o aumento da temperatura média do ar, associado à irregularidade das precipitações e à maior ocorrência de eventos extremos, pode comprometer significativamente a produtividade, a qualidade dos grãos e a sustentabilidade das regiões produtoras de café arábica (Ovalle-Rivera et al., 2015; Kath et al., 2022). Além dos efeitos diretos sobre os processos fotossintéticos e o balanço hídrico das plantas, condições de elevada demanda evaporativa atmosférica intensificam os efeitos do déficit hídrico, promovendo fechamento estomático, redução da assimilação de carbono e aumento do estresse oxidativo (Rodrigues et al., 2016). Modelos climáticos recentes indicam ainda redução da aptidão climática para o cultivo do café arábica em importantes regiões produtoras brasileiras ao longo das próximas décadas, especialmente em áreas de menor altitude e maior temperatura média anual, evidenciando a necessidade de estratégias adaptativas voltadas ao manejo e ao melhoramento genético da cultura (Dias, Martins, Martins, 2024). Nesse contexto, compreender os impactos das mudanças climáticas sobre a cafeicultura torna-se fundamental para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais resilientes e sustentáveis.

2.2. Mudanças climáticas e a agricultura

As mudanças climáticas têm promovido alterações significativas nos sistemas agrícolas globais, afetando a produtividade, a estabilidade produtiva e a segurança alimentar. O aumento da temperatura média global, associado às alterações nos regimes de precipitação e à maior frequência de eventos climáticos extremos, tem intensificado os riscos à produção agrícola em diferentes regiões do mundo. Estudos recentes demonstram que a agricultura está entre os setores mais vulneráveis às

mudanças climáticas devido à forte dependência das condições ambientais para o desenvolvimento vegetal (Rattis, et al., 2021).

Os impactos climáticos sobre a agricultura estão diretamente associados à ocorrência de eventos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor, geadas atípicas e precipitações intensas (Rattis, et al., 2021). Essas alterações comprometem processos fisiológicos essenciais das plantas, incluindo fotossíntese, transpiração, absorção de nutrientes, florescimento e enchimento de grãos (Ortiz-Bobea, et al., 2021). Como consequência, observa-se a redução da produtividade agrícola, aumento da variabilidade produtiva e maior instabilidade dos sistemas alimentares globais, ampliando também os desafios fitossanitários favorecendo a expansão de pragas e doenças agrícolas (Ortiz-Bobea, et al., 2021)

Além dos impactos diretos sobre a produtividade, as mudanças climáticas também afetam a disponibilidade de recursos hídricos utilizados na agricultura. A irregularidade das chuvas e o aumento da evapotranspiração elevam a demanda por irrigação, intensificando a pressão sobre os sistemas hídricos (Santos et al., 2022). Os efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura têm se tornado cada vez mais evidentes, dos quais a expansão agrícola já ocorre próxima aos limites climáticos de tolerância em diversas regiões, especialmente em áreas tropicais sujeitas a elevadas temperaturas e déficit hídrico (Ortiz-Bobea, et al., 2021).

Entre as culturas agrícolas mais vulneráveis as mudanças climáticas, destaca-se o cafeeiro, cuja produção apresenta elevada sensibilidade às variações térmicas e hídricas (Xiao, Boucher e Sexton, 2025). Dessa forma os cenários climáticos futuros indicam redução da aptidão climática para o cultivo do café arábica em importantes regiões produtoras do Brasil, reforçando a necessidade de estratégias adaptativas, desenvolvimento de genótipos mais tolerantes ao estresse climático e adoção de sistemas agrícolas mais resilientes.

2.3. Impactos das mudanças climáticas na cafeicultura

No Brasil, projeções climáticas baseadas nos cenários mais recentes do Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) indicam tendência de aquecimento em todas as regiões do país, embora com diferentes magnitudes

regionais (Eyring et al., 2016). Além da elevação da temperatura média do ar, os modelos projetam alterações na distribuição temporal das precipitações e aumento da frequência de eventos extremos relacionados à disponibilidade hídrica (IPCC, 2023). Essas alterações têm sido associadas ao aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa e representam um dos principais desafios para a sustentabilidade da produção agrícola ao longo do século XXI (IPCC, 2023).

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios para a sustentabilidade da cafeicultura brasileira, especialmente para o cultivo de *Coffea arabica*, espécie altamente dependente de condições térmicas e hídricas específicas. Nas principais regiões produtoras do Brasil, alterações na temperatura média do ar, irregularidade das precipitações e maior frequência de eventos climáticos extremos têm sido associadas à redução da aptidão climática e ao aumento da vulnerabilidade dos sistemas produtivos cafeeiros (DaMata et al., 2019).

Nas regiões Sudeste e Nordeste, responsáveis por grande parte da produção brasileira de café arábica, estudos recentes apontam aumento da temperatura média anual e maior irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ciclo produtivo. Projeções climáticas elaboradas a partir dos modelos CMIP6 indicam tendência de intensificação dos riscos climáticos associados ao cultivo de café arábica, especialmente em áreas já sujeitas a elevadas temperaturas e limitações hídricas (Dias, Martins e Martins, 2024).

As alterações projetadas para o clima brasileiro tendem a modificar significativamente a distribuição geográfica das áreas aptas ao cultivo do café arábica. A estreita relação entre a cultura e condições específicas de temperatura e disponibilidade hídrica faz com que pequenas alterações climáticas possam resultar em mudanças expressivas na aptidão agrícola das regiões produtoras. Nesse contexto, estudos de modelagem agroclimática indicam tendência de deslocamento das áreas mais favoráveis ao cultivo para regiões de maior altitude, onde temperaturas mais amenas podem atenuar parcialmente os efeitos do aquecimento observado nas últimas décadas (Coltri et al., 2019).

Além das mudanças na aptidão climática, os cenários futuros sugerem aumento da instabilidade produtiva da cafeicultura. Diferentemente de culturas anuais, o

cafeeiro apresenta ciclo perene e depende da ocorrência sincronizada de condições ambientais adequadas durante diferentes fases fenológicas (Camargo e Camargo, 2001). Dessa forma, alterações na sazonalidade climática podem comprometer a regularidade produtiva das lavouras, aumentando a variabilidade entre safras e elevando os riscos associados à produção agrícola (Freitas et al., 2024).

A crescente exposição da cafeicultura aos riscos climáticos tem motivado o desenvolvimento de estratégias de adaptação envolvendo manejo, sistemas de cultivo e recursos genéticos. Contudo, a limitada disponibilidade de informações sobre o comportamento de diferentes genótipos em condições ambientais cada vez mais instável ainda constitui um dos principais desafios para os programas de melhoramento. Nesse contexto, a identificação de materiais genéticos mais adaptados e estáveis frente às adversidades climáticas tornam-se fundamental para a sustentabilidade futura da cafeicultura.

2.4. Déficit hídrico e altas temperaturas no cafeeiro

Entre os fatores ambientais associados às mudanças climáticas, o déficit hídrico e as altas temperaturas destacam-se como os principais estresses abióticos que limitam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade do cafeeiro (DaMatta et al., 2019; Rodrigues et al., 2016). Nas principais regiões produtoras de *Coffea arabica*, esses fatores podem ocorrer de forma simultânea em decorrência da elevação da temperatura do ar e da maior irregularidade dos regimes pluviométricos, aumentando a exposição das lavouras a condições ambientais desfavoráveis (Bunn et al, 2015; Kath et al., 2022). Em razão da elevada dependência da cultura por condições climáticas adequadas ao longo do seu ciclo fenológico, alterações na disponibilidade hídrica e no regime térmico podem comprometer processos fundamentais relacionados ao crescimento vegetativo, florescimento, frutificação e enchimento dos grãos (Camargo e Camargo, 2001; Ovalle-Rivera et al, 2015).

O déficit hídrico constitui um dos principais fatores limitantes à produção cafeeira em regiões tropicais, afetando diretamente as relações hídricas e o funcionamento fisiológico das plantas. A redução da disponibilidade de água no solo promove diminuição do potencial hídrico foliar e induz mecanismos de conservação de água, especialmente por meio do fechamento estomático, reduzindo as perdas por

transpiração (Cavatte et al., 2012). Entretanto, essa resposta também restringe a assimilação de dióxido de carbono e limitando a produção de fotoassimilados necessários ao crescimento e desenvolvimento vegetal (Chaves et al, 2009). Em condições de estresse prolongado, podem ainda ocorrer reduções na expansão foliar, no crescimento dos ramos e no acumulo de biomassa, comprometendo o potencial produtivo da cultura (Cavatte et al., 2012).

Segundo Camargo e Camargo (2001), o ciclo fenológico do cafeeiro arábica tem duração de dois anos e é constituído por dois períodos distintos: vegetativo, composto por duas fases (1 e 2), e o reprodutivo composto por quatro fases (3 a 6). Esses períodos ocorrem de forma simultânea ao longo do ano agrícola, conforme esquematizado na Figura 1. A primeira fase do período vegetativo corresponde à formação das gemas foliares e o desenvolvimento de novos ramos e folhas, predominantemente nos meses de setembro a março. A segunda fase refere-se à indução e maturação das gemas florais, que se estende de abril a agosto. A terceira fase compreende a florada, o estádio de chumbinho e a expansão dos frutos, ocorrendo de setembro a dezembro. A quarta fase corresponde à granação dos frutos, de janeiro a março. A quinta fase corresponde à maturação dos frutos, de abril a junho. Por fim, a sexta fase é caracterizada pelo repouso da planta e senescência dos ramos produtivos. Segundo Camargo e Camargo (2001), o início da safra ocorre em setembro de um ano e o término em junho do ano subsequente.

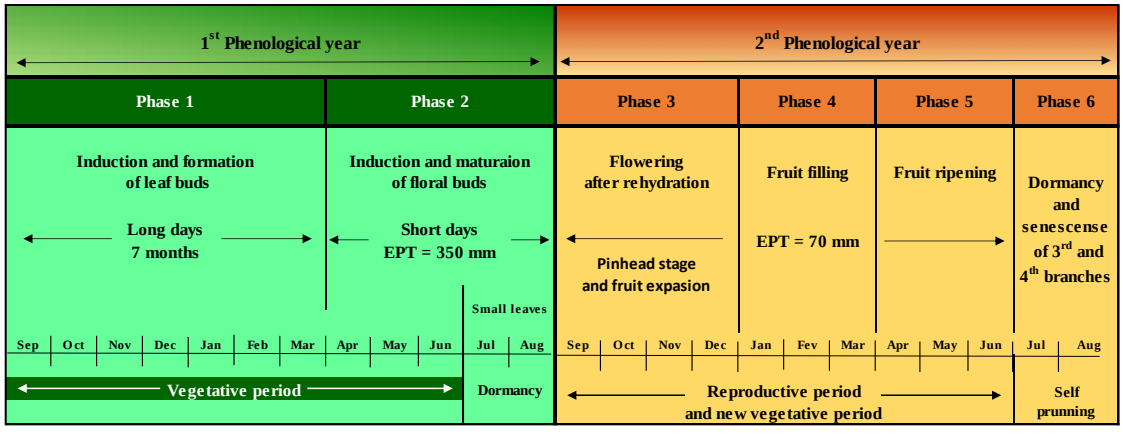


Figura 1 – Ciclo fenológico do cafeeiro adaptado de Camargo e Camargo (2001).

Além dos efeitos sobre as relações hídricas, a deficiência de água afeta diretamente o aparato fotossintético. Estudos demonstram que a seca pode promover limitações não estomáticas associadas à redução da eficiência fotoquímica, alterações no transporte de elétrons e comprometimento da atividade metabólica relacionada à fixação do carbono (Gomes et al., 2008; Avila et al., 2020). Essas alterações tendem a reduzir a eficiência do uso da energia luminosa e aumentar a susceptibilidade dos tecidos vegetais aos danos provocados pelo estresse oxidativo, especialmente quando associado a condições de elevada temperatura.

As altas temperaturas exercem efeitos adicionais sobre o metabolismo do cafeeiro, afetando processos bioquímicos e fisiológicos essenciais para o desenvolvimento da cultura. Temperaturas acima da faixa considerada adequada para *Coffea arabica* podem alterar a estabilidade das membranas celulares, comprometer a atividade de enzimas relacionada à fotossíntese e reduzir a eficiência do fotossistema II (Martins et al., 2016; Ramalho et al., 2013). Além disso, o aumento da demanda evaporativa atmosférica intensifica os efeitos do déficit hídrico, ampliando as restrições às trocas gasosas e ao balanço hídrico das plantas.

A combinação entre déficit hídrico e altas temperaturas promove alterações no metabolismo oxidativo celular, sob condições de estresse combinado, observa-se aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), moléculas capazes de causar danos estruturais às membranas, proteínas e pigmentos fotossintéticos (Martins et al., 2016), Como resposta, o cafeeiro ativa mecanismos antioxidantes envolvendo enzimas como peróxido dismutase, catalase e peroxidases, cuja eficiência pode influenciar diretamente a capacidade de tolerância dos diferentes materiais genéticos aos estresses ambientais (Dubberstein et al., 2021).

A intensidade dessas respostas varia entre genótipos, evidenciando a existência de diferenças genéticas relacionadas à adaptação ambiental. Materiais distintos podem apresentar estratégias contrastantes de controle estomático, manutenção da atividade fotossintética, eficiência antioxidante e capacidade de recuperação após períodos de estresse (Dubberstein et al., 2021). Essa variabilidade torna-se particularmente relevante diante dos cenários climáticos futuros, uma vez que o desempenho agronômico dos genótipos depende da interação entre seu potencial

genético e as condições ambientais às quais são submetidos, aspecto diretamente relacionado à interação genótipo × ambiente.

2.5. Interações genótipo × ambiente (GxA)

A expressão fenotípica de características quantitativas resulta da ação conjunta dos efeitos genéticos, ambientais e da interação entre esses componentes. Dessa forma, o desempenho observado de um genótipo em determinado ambiente representa o resultado da sua constituição genética associada às condições ambientais às quais está submetido (Allard, 1971; Falconer,1987). Quando diferentes genótipos respondem de maneira distinta às variações ambientais ocorre a interação genótipo × ambiente (G × A), fenômeno amplamente reconhecido como uma das principais fontes de variação em programas de melhoramento vegetal (Cruz e Regazzi, 1997; Cruz e Carneiro, 2004).

A interação G × A assume papel fundamental no processo de seleção, pois pode alterar o desempenho relativo dos genótipos entre ambientes distintos, dificultando a identificação de materiais genéticos superiores e a recomendação de cultivares para diferentes regiões de cultivo (Fehr, 1987; Cruz e Carneiro, 2004). A magnitude dessa interação tende a ser maior em espécies cultivadas sob ampla diversidade de condições edafoclimáticas, situação frequentemente observada em culturas perenes de importância econômica, como o cafeeiro.

Em cafeeiro, estudos sugerem que a produtividade, o vigor vegetativo e as características relacionadas à qualidade dos grãos são fortemente influenciadas pela interação entre fatores genéticos e ambientais (Partelli et al., 2022). A expressão dessas características pode variar significativamente em função das condições de cultivo fornecidas como altitude, temperatura, disponibilidade hídrica, fertilidade do solo e manejo adotado (Partelli et al., 2022). Como consequência, genótipos que apresentam elevado desempenho em determinado ambiente nem sempre mantêm essa superioridade quando cultivados em outras regiões ou sob diferentes condições climáticas (Weldemichael Abrha et al., 2022).

Em espécies perenes como o cafeeiro, a magnitude da interação genótipo × ambiente tende a ser ampliada em razão da exposição contínua das plantas às

variações climáticas ao longo de sucessivos ciclos produtivos (Ovalle-Rivera et al, 2015). Diferente de culturas anuais, nas quais a avaliação do desempenho ocorre em um período relativamente curto, o cafeeiro permanece em produção por vários anos, sendo submetido a diferentes combinações de temperatura, precipitação, disponibilidade hídrica e condições edáficas (Covre et al., 2022).

A presença da interação genótipo × ambiente representa um dos principais desafios para o melhoramento de cafeeiro, uma vez que condições ambientais podem influenciar significativamente a expressão fenotípica das características de interesse agronômico (Partelli et al., 2022). Em um cenário de crescente variabilidade climática, a compreensão da interação G × A torna-se fundamental para o avanço dos programas de melhoramento do cafeeiro. Dessa maneira, a identificação de materiais genéticos capazes de expressar características agronômicas favoráveis sob diferentes condições climáticas constitui uma estratégia importante para aumentar a resiliência da cafeicultura frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Assim, o conhecimento da magnitude e dos efeitos da interação genótipo × ambiente fornece subsídios para a seleção de genótipos mais promissores e para o desenvolvimento de cultivares com maior potencial de adaptação às futuras condições de cultivo (DaMatta et al., 2019).

Apesar da reconhecida importância da interação genótipo × ambiente na cultura do café, ainda são escassos estudos avaliando como diferentes combinações de colheitas influenciam as estimativas de parâmetros genéticos em condições de crescente instabilidade climática. Dessa forma, torna-se necessário investigar quais períodos de avaliação permitem maior eficiência na seleção de progênies de *Coffea arabica* submetidas a condições ambientais contrastantes.

2.6 Seleção de genótipos em espécies perenes e a aplicação da metodologia REML/BLUP

A seleção de genótipos superiores em espécies perenes apresenta desafios específicos em razão da natureza do ciclo produtivo, da necessidade de avaliações ao longo de vários anos e da influencia acumulativa das condições ambientais sobre a expressão das características agronômicas. Em culturas como o cafeeiro, características de interesse econômico, como produtividade, estabilidade produtiva e

adaptação ambiental, são expressas ao longo de sucessivos ciclos de produção, tornando necessária a utilização de estratégias de avaliação capazes de considerar a variação temporal e ambiental dos experimentos (Piepho e Eckl, 2014).

Em programas de melhoramento genético, o fenótipo observado resulta da combinação dos efeitos genéticos, ambientais e da interação entre genótipo e ambiente, sendo fundamental a separação adequada desses componentes para aumentar a eficiência da seleção (Allard, 1971; Falconer, 1987). Dessa forma, a seleção baseada apenas em medias fenotípicas pode apresentar limitações, especialmente em espécies perenes submetidas a diferentes condições ambientais, nas quais efeitos temporários do ambiente podem influenciar o desempenho observado dos genótipos (Vencovsky e Barriga, 1992; Cruz e carneiro, 2004).

Na cultura do café arábica, a avaliação de progênies e genótipos em diferentes ambientes e anos é uma estratégia essencial para identificar materiais geneticamente superiores e com maior estabilidade produtiva (Resende 2007a). Estudos demonstram que a produtividade e outras características agronômicas do cafeeiro apresentam significativa influencia da interação genótipo × ambiente, tornando necessária a utilização de metodologias estatísticas que considerem simultaneamente os efeitos genéticos e ambientais durante o processo de seleção (Bonomo et al., 2004; Andrade et al., 2016). Além disso, a identificação de genótipos adaptados a diferentes condições de cultivo representa uma etapa fundamental para o desenvolvimento de cultivares mais eficientes e resilientes frente aos desafios impostos pela variabilidade climática (Oliveira et al., 2011; Moreira et al., 2022).

Nesse contexto, os modelos lineares mistos associados à metodologia de máxima verossimilhança restrita (Restricted Maximum Likelihood – REML) e predição linear não viesada (Best Linear Unbiased Prediction – BLUP) têm sido amplamente empregados no melhoramento de espécies perenes. O método REML permite estimar com maior precisão os componentes de variância associados aos efeitos genéticos, ambientais e à interação genótipo × ambiente, enquanto o BLUP possibilita a predição dos valores genéticos dos indivíduos ou progênies, permitindo uma seleção mais eficiente baseada no potencial genético dos genótipos avaliados (Resende, 2007a; Resende 2007b).

A principal vantagem da abordagem REML/BLUP está na capacidade de analisar dados provenientes de experimentos com estruturas complexas, incluindo avaliações realizadas em diferentes anos, ambiente e repetições, considerando os efeitos aleatórios associados aos genótipos e reduzindo a influencia de variações ambientais não controladas (Resende e Duarte, 2007; Resende e Alves, 2020). Dessa maneira, essa metodologia permite obter estimativas mais confiáveis de parâmetros genéticos, como variabilidade genética, herdabilidade, acurácia seletiva e ganho esperado com a seleção.

A aplicabilidade da metodologia REML/BLUP tem demonstrado eficiência na seleção de progênies superiores em café arábica, possibilitando maior precisão na identificação de materiais genéticos promissores mesmo em condições de elevada influencia ambiental (Pereira et al., 2013). Assim, considerando a natureza perene do cafeeiro, a ocorrência de interação genótipo × ambiente e os cenários futuros de maior instabilidade climática, a utilização de modelos baseados em REML/BLUP constitui uma ferramenta estratégica para o melhoramento genético da cultura (Andrade et al., 2016). A aplicação dessa abordagem permite identificar genótipos com potencial produtivo, estabilidade e adaptação ambiental, contribuindo para o desenvolvimento de materiais geneticamente superiores e mais resilientes às condições futuras de cultivo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em 14/04/2015, denominado ensaio de progênies 573, sob condições de sequeiro, no Centro Experimental Central (CEC) do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), localizado no município de Campinas, São Paulo, Brasil (22º54'S, 47º05'W; 674 m de altitude). O delineamento experimental adotado foi o de blocos ao acaso, composto por 35 genótipos de *Coffea arabica* L., sendo 31 progênies F_3 e quatro cultivares utilizadas como controles (Tabela 1). O experimento foi conduzido com quatro repetições, cinco plantas por parcela e espaçamento de 3,5 m entre linhas e 0,70 m entre plantas.

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos avaliados no EP 573.

Gen	Nº híbrido	Origem	Trat	Nº híbrido	Origem
1	H 20141-21-10	Obatã x IAC 045125	19	H 20141-12-21	Obatã x IAC 045125
2	H 20152-1-4	Catuaí 81 x IAC 045125	20	H 20141-21-12	Obatã x IAC 045125
3	H 20141-21-12	Obatã x IAC 045125	21	H 20144-3-9	Catuaí 144 x IAC 045125
4	H 20135-12-18	MN_2 x IAC 045125	22	H 20141-5-6	Obatã x IAC 045125
5	H 20141-12-21	Obatã x IAC 045125	23	H 20133-40-2	MN_1 x IAC 045127
6	H 20140-32-20	MN_1 x IAC 045125	24	H 20141-5-3	Obatã x IAC 045125
7	H 20140-32-10	MN_1 x IAC 045125	25	H 20155-1-1	IAC 045125 x MN_1
8	H 20140-32-31	MN_1 x IAC 045125	26	H 20149-6-12	Ouro Verde x IAC 045125
9	H 20155-1-6	IAC 045125 x MN_1	27	H 20131-4-8	MN_3 x IAC 045125
10	H 20149-6-12	Ouro Verde x IAC 045125	28	H 20131-21-12	IAC 045125 x MN_3
11	H 20136-17-4	MN_4 x IAC 045125	29	H 20136-17-4	MN_4 x IAC 045125
12	H 20141-27-8	Obatã x IAC 045125	30	H 20141-27-8	Obatã x IAC 045125
13	H 20149-6-1	Ouro Verde x IAC 045125	31	H 20144-3-9	Catuaí 144 x IAC 045125
14	H 20152-1-4	Catuaí 81 x IAC 045125	32	IAC 045125	
15	H 20140-32-10	MN_1 x IAC 045125	33	Catuaí Vermelho	
16	H 20131-4-8	MN_3 x IAC 045125	34	Mundo Novo	
17	H 20131-4-11	MN_3 x IAC 045125	35	Obatã Vermelho	
18	H 20135-12-18	MN_2 x IAC 045125			

*AC_3 = IAC 045127; MN_1 = IAC 364-4; MN_2 = IAC 374-19; MN_3 = 388-17-1; MN_4 = IAC 501 5.

A definição dos materiais genéticos a serem utilizados como parentais foi em transferir uma característica para as principais cultivares utilizadas na época. Para essa característica a ser transferida foi utilizado um material silvestre pertencente ao Banco de Germoplasma do IAC.

Foram realizadas cinco colheitas nos anos 2017, 2018, 2020, 2021 e 2022. Os dados obtidos foram organizados em 26 diferentes combinações temporais, resultando em dez biênios (combinações duas a duas), dez triênios (combinações três a três), cinco quadriênios (combinações quatro a quatro) e uma combinação envolvendo as cinco colheitas. Para quantificar a produtividade, os frutos colhidos por cada planta individualizada serão pesados em quilogramas de café da roça, transformados para produtividade em sacas/hectare, de acordo com o número de plantas por hectare e rendimento de 5, que é a quantidade de café da roça necessária para se obter uma saca de café beneficiado, utilizando-se a seguinte fórmula:

$$Produtividade = \frac{\left(\frac{café\ da\ roça}{5}\right)\ x\ n°\ de\ plantas.ha^{-1}}{60}$$

O Centro de Ecofisiologia e Biofísica do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) forneceu, no período de 2016 a 2022, dados meteorológicos de precipitação pluviométrica (mm) e temperatura máxima média (ºC), apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Precipitações pluviométricas[1], em mm, e temperaturas máximas[1], em ºC, fornecidos pelo Centro de Ecofisiologia e Biofísica do IAC, de 1991 a 2021 (30 anos) e entre 2016 e 2022 registradas em Campinas (SP, Brasil).

Meses/ Anos	30 anos		2016		2017		2018		2019		2020		2021		2022	
			-		7,5 sc. ha^{-1}		32,6 sc. ha^{-1}		0 sc. ha^{-1}		18,5 sc. ha^{-1}		4,3 sc. ha^{-1}		17,8 sc. ha^{-1}	
	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T	P	T
	mm	ºC	mm	ºC	mm	ºC	mm	ºC	mm	ºC	mm	ºC	mm	ºC	mm	ºC
Janeiro	264	27,9	274	29,7	270	29,6	195	29,3	225	32,4	198	30,4	248	30,8	294	29,1
Fevereiro	178	28,4	226	31,3	98	31,3	119	29,2	165	29,8	215	28,5	164	29,9	75	30,3
Março	149	27,5	256	29,6	225	29,7	119	31,7	116	30,0	57	29,8	80	30,4	125	30,8
Abril	74	26,8	7	31,0	94	27,6	87	29,1	116	29,4	0	28,4	15	27,2	30	28,9
Maio	70	24,2	79	25,0	161	25,3	7	27,3	28	27,3	12	25,7	22	26,2	42	26,5
Junho	48	23,7	0	24,4	39	24,3	6	26,4	11	26,4	85	26,2	27	25,0	12	25,8
Julho	48	23,9	2	26,2	0	24,3	1	27,7	60	25,2	8	26,5	26	24,6	9	28,6
Agosto	37	25,8	58	27,3	35	25,7	98	24,5	4	26,7	54	26,3	16	27,2	24	26,5
Setembro	89	27,6	35	27,5	12	31,1	47	27,9	43	30,3	18	31,8	6	32,0	80	27,0
Outubro	132	28,3	144	29,3	101	29,2	137	28,1	51	32,2	41	31,3	121	28,2	103	29,8
Novembro	167	27,4	154	29,4	220	29,0	245	28,6	115	30,3	90	30,3	107	29,5	122	28,9
Dezembro	206	28,0	146	30,4	190	30,0	93	31,3	149	29,7	192	30,4	166	29,5	413	29,2
Totais/Médias	1.462	26,6	1.381	28,4	1.445	28,1	1.154	28,4	1.083	29,1	970	28,8	998	28,4	1.329	28,4

P = precipitação pluviométrica; T = média da temperatura máxima.

Para a análise dos dados, foram empregados modelos mistos, uma vez que essa abordagem reduz distorções nas estimativas dos parâmetros genéticos e no processo de seleção. A utilização desses modelos justifica-se pela: (i) Realização de medições repetidas em um mesmo indivíduo ao longo de vários anos, o que resulta em observações correlacionadas e viola os pressupostos de independência e homogeneidade dos erros; (ii) redução na taxa de sobrevivência dos experimentos ao longo de sua condução, levando à ocorrência de dados desbalanceados; e (iii) presença simultânea de efeitos fixos e aleatórios no mesmo modelo (Resende e Alves,2020; Piepho e Eckl, 2014).

As análises estatísticas, para cada combinação de anos, foram realizadas utilizando o software Selegen (REML/BLUP) (Resende, 2007b), com base na abordagem de modelos lineares mistos. As estimativas dos componentes de variância foram obtidas pelo método de Máxima Verossimilhança Restrita (REML), enquanto as predições dos valores genéticos médios foram realizadas por meio do Melhor Preditor Linear Não Viesado (BLUP). Foi adotado o modelo 171 (Resende, 2017), descrito a seguir:

$$\mathbf{y = Xm + Za + Wp + Ts + Qi + e}$$

Em que *y* é o vetor de observações fenotípicas; *m* é o vetor dos efeitos das combinações medição-repetição, assumidos como fixos; *a* é o vetor dos efeitos genéticos aditivos individuais, assumidos como aleatórios, *p* é o vetor dos efeitos de parcela, assumidos como aleatórios; *s* é o vetor dos efeitos permanentes, assumidos como aleatórios; *i* é o vetor dos efeitos da interação genótipo × medição, assumidos como aleatórios; *e* é o vetor de resíduo, assumidos como aleatórios. As letras maiúsculas representam as matrizes de incidência associadas aos respectivos efeitos. O vetor *m* contempla todas as medições em todas as repetições e ajusta simultaneamente os efeitos de repetição, medição e da interação repetição × medição.

Os efeitos incluídos no modelo foram avaliados por meio do teste da razão da verossimilhança (Likelihood Ratio Test – LRT), calculado a partir da diferença entre as deviances do modelo completo e do modelo reduzido, sem o efeito a ser testado. Os valores obtidos foram comparados à distribuição do qui-quadrado, com 1 grau de

liberdade, aos níveis de significância de 1 e 5 %, a fim de verificar a significância estatística dos efeitos do modelo (Resende, 2007).

Com base nos componentes de variância estimados pelo modelo linear misto, foram obtidos os coeficientes de determinação e os parâmetros genéticos utilizados para avaliar a variabilidade genética, a precisão experimental e a eficiência da seleção. Fatores estimados: V_a , variância genética aditiva; c^2_{parc}, Coeficiente de determinação dos efeitos de parcela; c^2_{perm}, coeficiente de determinação dos efeitos do ambiente permanente; c^2_{ga}, coeficiente de determinação dos efeitos da interação genótipo × ano; h^2_i, herdabilidade individual no sentido restrito; h^2_m, herdabilidade baseada na média dos genótipos; CV_g, coeficiente de variação genotípica entre genótipos; CV_e, coeficiente de variação experimental; $CV_{e\text{-}lim}$, coeficiente de variação experimental limite; CV_r, coeficiente de variação relativa; e r_{gc}, correlação genotípica entre colheitas, conforme proposto por Resende (2007a; 2016). Os coeficientes de variação experimental limite ($CV_{e\text{-}lim}$) e de variação relativa ideal ($CV_{r\text{-}id}$) foram calculados conforme as equações propostas por Resende e Duarte (2007), considerando-se uma acurácia seletiva de 0,87 para estimativa do $CV_{r\text{-}id}$.

Além da estimação dos componentes de variância e dos parâmetros genéticos, os valores genéticos aditivos preditos (BLUP) dos indivíduos foram utilizados para a classificação das plantas em cada combinação de colheitas avaliadas. A comparação entre diferentes combinações temporais foi realizada considerando a correlação genotípica entre colheitas r_{gc} e a estabilidade da posição relativa dos indivíduos no ranking de seleção, permitindo avaliar a consistência dos genótipos selecionados ao longo dos diferentes períodos de avaliação. Para verificar o efeito de diferentes magnitudes de r_{gc} sobre a manutenção da classificação dos indivíduos, foram selecionadas nove combinações representativas entre as 18 combinações que apresentaram significância estatística, contemplando a amplitude dos valores de correlação observados. A concordância entre os ordenamentos foi avaliada pela comparação das posições relativas ocupadas pelos indivíduos nas diferentes combinações de colheitas em relação à combinação utilizada como referência.

4 RESULTADOS

Na Figura 2 podemos observar as medias das produtividades, seguida das suas respectivas classificações, obtidas dentro do EP 573 sendo: 7,5 sc. ha^{-1} em 2017 (muito baixa), 32,6 sc. ha^{-1} em 2018 (média-alta), 18,5 sc. ha^{-1} em 2020 (média-baixa), 4,3 sc. ha^{-1} em 2021 (muito baixa) e 17,8 sc. ha^{-1} em 2022 (média-baixa). As produtividades médias brasileiras foram: 23,1 sc. ha^{-1} em 2017 (média), 31,7 sc. ha^{-1} em 2018 (média-alta), 32,2 sc. ha^{-1} em 2020 (média-alta), 21,9 sc. ha^{-1} em 2021 (média) e 22,5 sc. ha^{-1} em 2022 (média).

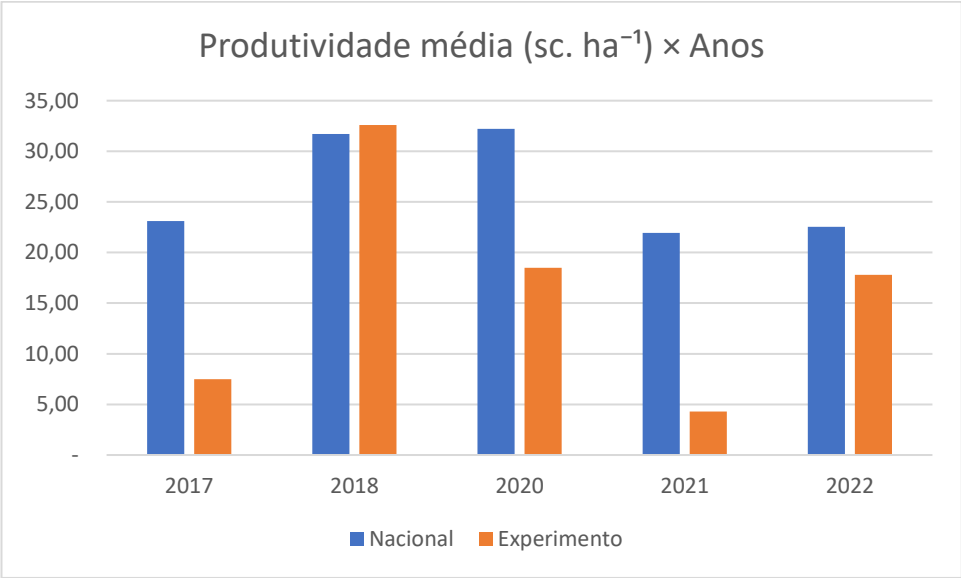


Figura 2 – Produtividades médias (sc. ha^{-1}) no Brasil e no experimento EP 573 entre 2017 e 2022.

4.1. Precipitação pluviométrica

A média histórica da precipitação anual dos últimos 30 anos em Campinas foi em torno de 1,462 mm. Em todos os anos avaliados, os volumes anuais de precipitação ficaram abaixo dessa média histórica, registrando 1,381 mm em 2016, 1,445 mm em 2017, 1,154 mm em 2018, 1,083 mm em 2019, 970 mm em 2020, 998 mm em 2021 e 1,329 mm em 2022. Destacam-se os anos de 2020 e 2021 como os mais secos do período experimental, apresentando reduções próximas a 35% em relação à média histórica do município.

Considerando a distribuição mensal das chuvas, aproximadamente 73% dos meses apresentaram precipitações inferiores à média histórica. Em diversos períodos, esses déficits coincidiram com fases fenológicas críticas do cafeeiro arábica, conforme descrito a seguir:

Na safra de 2016/ 2017, foram observados déficits hídricos durante a 1ª fase fenológica correspondente ao período vegetativo e à formação das gemas foliares (setembro a dezembro de 2016), bem como na 3ª fase relacionada à florada (setembro de 2016) e na 4ª fase, referente à granação dos frutos (fevereiro de 2017).

Na safra de 2017/ 2018, os déficits hídricos concentram-se na 3ª fase fenológica, associada à florada (setembro de 2017), e na 4ª fase, correspondente à granação dos frutos período (janeiro a março de 2018).

No ano agrícola de 2018/ 2019, foram observados déficits durante a 1ª fase vegetativa e formação das gemas foliares (janeiro a março de 2018), a 2ª fase de indução e maturação das gemas florais (maio a julho de 2018), e a 3ª fase de florada, chumbinho e expansão dos frutos (setembro a dezembro de 2018).

Na safra de 2020/ 2021, foram observados déficits hídricos na 1ª fase relacionada a vegetação e formação das gemas foliares (setembro a dezembro de 2019 e janeiro a março de 2020), na 2ª fase de indução e maturação das gemas florais (abril a julho de 2020), na 3ª fase de florada, chumbinho e expansão dos frutos (setembro a novembro de 2020), e na 4ª fase de granação dos frutos (março de 2021).

Por fim, na safra de 2021/ 2022 ocorreram déficits hídricos na 1ª fase vegetativa e formação das gemas foliares (setembro a novembro de 2020 e março de 2021), na 2ª fase de indução e maturação das gemas florais (abril a agosto de 2021), na 3ª fase de florada, chumbinho e expansão dos frutos (setembro a dezembro de 2021) e na 4ª fase de granação dos frutos (fevereiro de 2022).

O balanço hídrico, apresentado na Figura 3, mostra a predominância dos períodos de déficit hídrico, em vermelho, bem como as suas altas intensidades e longas durações em praticamente todos os anos experimentais. Pouco excedentes hídricos ocorreram neste período.

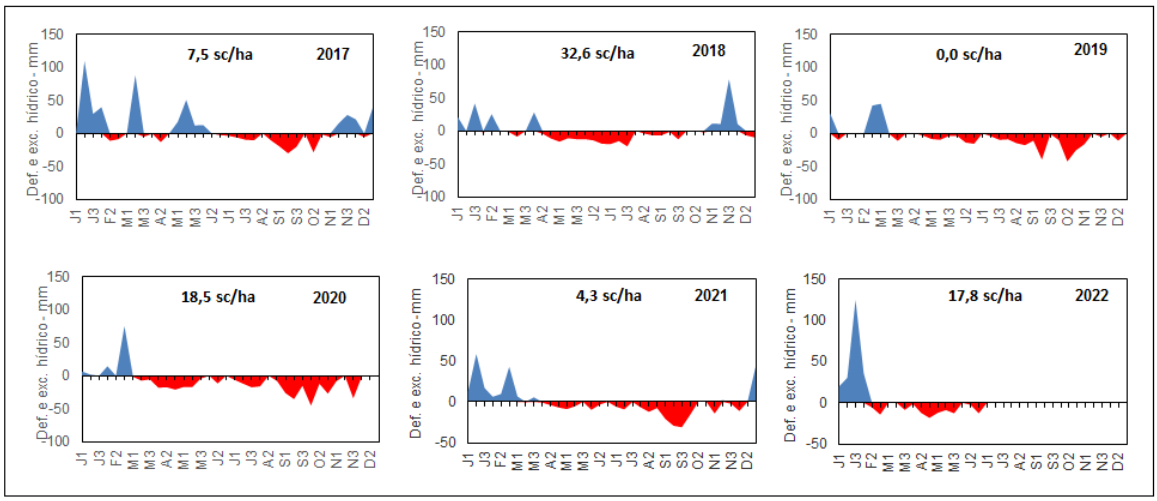


Figura 3 – Balanço hídrico histórico de 30 anos e durante a execução do experimento.

4.2. Temperatura máxima

A média histórica da temperatura máxima nos últimos 30 anos em Campinas foi de 26,6 ºC. Em todos os anos experimentais, as temperaturas máximas médias anuais permaneceram acima desse valor, variando de 28,1 ºC em 2017 a 29,1 em 2019 (Tabela 2). Apenas cinco de 84 meses avaliados apresentaram temperaturas máximas inferiores as medidas mensais históricas de 30 anos, indicando a predominância de condições térmicas elevadas ao longo do período experimental.

Essas temperaturas elevadas ocorreram em diferentes fases fenológicas do cafeeiro, conforme descrito a seguir. Na safra de 2016/ 2017, os maiores valores de temperatura máxima foram registrados durante a 3ª fase, correspondente à expansão dos frutos (novembro a dezembro de 2016), e durante a 4ª fase, relacionada à granação dos frutos (janeiro a março de 2017).

Na safra de 2017/ 2018, temperaturas máximas elevadas ocorreram na 1ª fase, associada a vegetação e a formação das gemas foliares (novembro e dezembro de 2016 e janeiro a março de 2017), na 3ª fase, correspondente à florada, ao estádio de chumbinho e à expansão dos frutos (setembro, novembro e dezembro de 2017), e na 4ª fase, referente à granação dos frutos (março de 2018).

Na safra 2018/ 2019, temperaturas elevadas foram observadas na 1ª fase vegetativa e de formação das gemas foliares (novembro a dezembro de 2017 e março de 2018), na 2ª fase de indução e maturação das gemas florais (abril a julho de 2018)

e na 4ª fase, correspondente à granação dezembro de 2018 e janeiro a março de 2019).

Na safra de 2019/ 2020, as temperaturas máximas elevadas ocorreram predominantemente na 1ª fase vegetativa e de formação de gemas foliares (dezembro de 2018, janeiro, março a junho de 2019), bem como na 3ª fase, associada à florada, ao chumbinho e à expansão dos frutos (setembro a novembro de 2019), e na 4ª fase de granação dos frutos (janeiro e março de 2020).

Durante a safra de 2020/ 2021, temperaturas elevadas foram registradas na 1ª fase vegetativa e de formação de gemas foliares (setembro a novembro de 2019, janeiro, março, junho e julho de 2020), na 3ª fase de florada, chumbinho e expansão dos frutos (setembro a dezembro de 2020) e na 4ª fase, correspondente à granação dos frutos (janeiro a março de 2021).

Por fim, na safra de 2021/ 2022, temperaturas máximas elevadas ocorreram na 1ªfase vegetativa e de formação das gemas foliares (setembro a dezembro de 2020 e janeiro, março e maio de 2021), na 3ª fase de florada, chumbinho e expansão dos frutos (setembro e novembro de 2021) e na 4ª fase de granação dos frutos (fevereiro e março de 2022).

A condição climática torna-se ainda mais crítica quando associada à ocorrência simultânea de déficit hídrico e temperaturas elevadas. Nesse contexto, o ano de 2021 apresentou maior número de meses caracterizados por altas temperaturas combinadas com baixos volumes de precipitação (10 meses), seguida pelos anos de 2020 (9 meses), 2022 (8 meses) e 2019 (7 meses). Os anos de 2017 e 2018 apresentaram menor frequência dessa associação, com dois e três meses, respectivamente.

Estas adversidades ambientais ocorridas durante o período experimental promoveram reduções expressivas nas produtividades e anteciparam a manifestação da bienalidade a partir da segunda colheita (Figura 2).

4.3. Análises estatísticas e biométricas

Na Tabela 3 são apresentados os valores do teste da razão da verossimilhança (LRT), obtidos a partir das análises de deviance, para o efeito da variância genética aditiva (V_a) nas diferentes combinações de anos avaliados no experimento conduzido

Das 26 combinações de anos analisados, doze apresentaram significância estatística a $p \leq 0,01$, seis a $p \leq 0,05$, enquanto oito combinações não foram significativas pelo LRT. As estimativas da variância genética aditiva (V_a)apresentaram ampla variação entre as combinações de anos. A maior variabilidade genética foi observada no biênio 2020-2022 (V_a = 0,6872**), em seguida pelos triênios 2017-2020-2022 (V_a 0,3681**), 2020-2021-2022 (V_a = 0,3369**) e 2018-2020-2022 (V_a =0,3178**). Considerando o conjunto de todas as colheitas (2017-2018-2020-2021-2022), a estimativa de V_a foi de 0,1902**. Por outro lado, não foi detectada variabilidade genética nas combinações 2017-2018-2021, 2017-2018-2022, 2018-2021-2022, 2017-2018, 2018-2021, 2018-2022 e 2021-2022. Observa-se ainda que combinações envolvendo simultaneamente os anos de 2020 e/ou 2022, inclusive aqueles que incluíram o ano de 2018, tenderam a apresentar as maiores estimativas de V_a.

Tabela 3 - Estimativas das variâncias genéticas aditivas (V_a) e significâncias pelo teste de razão da verossimilhança (LRT) referentes às análises das combinações de anos realizadas no EP 573.

Anos	V_a[1]	Anos	V_a[1]	Anos	V_a[1]
2017-18-20-21-22	0,1902**	**2017-20-21**	0,1359**	**2017-21**	0,0470*
2017-18-20-21	0,1208**	**2017-20-22**	0,3681**	**2017-22**	0,2134*
2017-18-20-22	0,2406**	**2017-21-22**	0,1441**	**2018-20**	0,0186ns
2017-20-21-22	0,2493**	**2018-20-21**	0,1340*	**2018-21**	0,0380ns
2017-18-21 -22	0,1059**	**2018-20-22**	0,3178**	**2018-22**	0,0617ns
2018-20-21-22	0,2269**	**2018-21-22**	0,0949ns	**2020-21**	0,1524*
2017-18-20	0,1481*	**2020-21-22**	0,3369**	**2020-22**	0,6872**
2017-18-21	0,0532ns	**2017-18**	0,0544ns	**2021-22**	0,1561ns
2017-18-22	0,1158ns	**2017-20**	0,1951*		

* e **: significativos a 5% (3,84) e 1% (6,63) de probabilidade a 1 grau de liberdade, pelo Teste de Razão da Verossimilhança, havendo distribuição com 1 grau de liberdade para o X^2; ns: não significativo.
V_a = variância genética aditiva.

Na Tabela 4 são apresentadas as significâncias dos testes de razão da verossimilhança (LRT), bem como as estimativas dos coeficientes de determinação associados aos efeitos de parcela (c_{parc}^2), ambiente permanente (c_{perm}^2), e interação genótipo × ambiente (c_{ga}^2) para cada um dos efeitos das 18 combinações de colheitas.

Os coeficientes de determinação dos efeitos de parcela (c_{parc}^2) variaram de 0,0472, na combinação 2017-2018-2021-2022, a 0,1255, considerando o conjunto de cinco colheitas (2017-2018-2020-2021-2022) (Tabela 4). Adotando-se o limite de 5% como indicativo de reduzida interferência ambiental entre parcelas, apenas as combinações 2017-2018-2021-2022 (0,0473) e 2017-2021-2022 (0,0491) atenderam a esse critério. Os coeficientes de determinação dos efeitos permanentes (c_{perm}^2) apresentaram significância a 1% de probabilidade em todas as combinações avaliadas, variando de 0,0822 (2017-2022) a 0,4039 (2020-2022). Considerando o limite de 10%, apenas as combinações 2017-2020 (0,0822), 2017-2021-2022 (0,0877) e 2017-2021 (0,0929) apresentaram reduzida influência ambiental permanente. Entre todas as combinações analisadas, apenas 2017-2021-2022 atendeu simultaneamente aos critérios de c_{parc}^2 inferior a 5% e c_{perm}^2 inferior a 10%, indicando maior uniformidade experimental e menor interferência ambiental nas estimativas dos parâmetros genéticos.

Os efeitos da interação genótipo × anos (c_{ga}^2) foram significativos ($p \leq 0,01$) em todas combinações avaliadas. As estimativas variaram de 0,0207 (combinação 2020-2022) a 0,1471 (combinação 2020-2021). Em termos relativos, quatro combinações apresentaram valores inferiores a 10% (2017-2020-2022, 2020-2021, 2017-2021 e 2020-2022), sugerindo menor participação da interação genótipos × anos na variância fenotípica nessa situação específicas. Destaca-se a combinação 2020-2022, que apresentou simultaneamente a menor proporção relativa de variação atribuída aos efeitos genéticos aditivos nesse conjunto de dados.

Tabela 4 – Estimativas dos coeficientes de determinação de parcela (c^2_{parc}), permanente (c^2_{perm}) e da interação genótipos × ambientes (c^2_{ga}) e significâncias pelo teste de razão da verossimilhança (LRT) referentes às análises das combinações de anos realizadas no EP 573.

Anos	c^2_{parc}	c^2_{perm}	c^2_{ga}	Anos	c^2_{parc}	c^2_{perm}	c^2_{ga}
17-18-20-21-22	0,1255**	0,1840**	0,1255**	**17-21-22**	0,0491**	0,0877**	0,1279**
17-18-20-21	0,0574**	0,1463**	0,1394**	**18-20-21**	0,0662**	0,1666**	0,1420**
17-18-20-22	0,0705**	0,2121**	0,1241**	**18-20-22**	0,0867**	0,2737**	0,1144**
17-18-21-22	0,0473**	0,1121**	0,147**	**20-21-22**	0,0726**	0,2426**	0,0833**
17-20-21-22	0,0586**	0,1971**	0,1011**	**17-20**	0,0771**	0,1217**	0,1427**
18-20-21-22	0,0672**	0,2126**	0,1216**	**17-21**	0,0905**	0,0929**	0,0941**
17-18-20	0,0746*	0,1641**	0,1458**	**17-22**	0,0559**	0,0822**	0,1307**
17-20-21	0,0535**	0,1288**	0,1375**	**20-21**	0,0591**	0,1132**	0,1471**
17-20-22	0,0733**	0,2465**	0,0835**	**20-22**	0,1002**	0,4039**	0,0207**

* e **: significativos a 5% (3,84) e 1% (6,63) de probabilidade a 1 grau de liberdade, pelo Teste de Razão da Verossimilhança, havendo distribuição com 1 grau de liberdade para o X^2. c^2_{parc} = coeficiente de determinação dos efeitos de parcela; c^2_{perm} = coeficiente de determinação dos efeitos do ambiente permanente; c^2_{ga} = coeficiente de determinação dos efeitos da interação genótipos × anos

A herdabilidade individual no sentido restrito (h_i^2) apresentou baixa magnitude na maioria das combinações avaliadas (Tabela 5). Apenas duas combinações apresentaram valores superiores a 15%: 2020-2022 (21,44%) e 2017-2020-2022 (15,87%), enquanto a combinação 2020-2021-2022 apresentou valor próximo a esse limite (14,85%). Das oito combinações que incluíram o ano de 2018, sete apresentaram h_i^2 inferiores a 10%. Considerando conjuntamente as cinco colheitas, a estimativa de h_i^2 foi de 9,27%

A herdabilidade média dos genótipos (h_m^2) variou entre 34,56% e 83,15%. Dez combinações apresentaram valores superiores a 50%, destacando-se 2020-2022 (83,15%), 2017-2020-2022 (68,51%), 2020-2021-2022 (66,30%) e 2017-2020-2021-2022 (61,66%). A estimativa de h_m^2 considerando as cinco colheitas foi de 50,76%. Por outro lado, oito combinações apresentaram h_m^2 inferiores a 50%, correspondendo às combinações 2017-2018-2021-2022, 2017-2018-2020-2021, 2017-2018-2020, 2017-2022, 2018-2020-2021, 2017-2020,2017-2021 e 2017-2022.

O coeficiente de variação genética (CV_g) variou de 27,11% a 62,80%. Cinco combinações apresentaram valores superiores a 50%: 2017-2020-2021-2022 (56,74%), 2017-2020-2022 (56,70%), 2017-2021-2022 (51,30%), 2020-2021-2022 (58,63%) e 2020-2022 (62,80%). As combinações que incluíram o ano de 2018 apresentaram estimativas inferiores a 50%, variando de 27,11% (2017-2018-2020) a 37,28% (2017-2018-2020-2021-2022).

Os coeficientes de variação experimental (CV_e) variaram entre 38,53% e 72,07%, enquanto os coeficientes de variação experimental limite ($CV_{e\text{-}lim}$) oscilaram de 30,15% a 69,78%. Apenas a combinação 2020-2022 apresentou valor de CV_e inferior ao respectivo $CV_{e\text{-}lim}$ (38,53% e 69,78%, respectivamente). Os maiores valores de $CV_{e\text{-}lim}$ foram observados nas combinações 2020-2022 (69,78%), 2020-2021-2022 (65,15%), 2017-2020-2021-2022 (63,04%) e 2017-2020-2021 (62,18%), enquanto as menores estimativas ocorreram em 2017-2018-2020 (30,15%) e 2018-2020-2021 (30,57%). De modo geral, as combinações que incluíram o ano de 2018 apresentaram valores de CV_e inferiores a 50%.

Tabela 5 - Estimativas de parâmetros genéticos relativos às análises das combinações de anos de colheitas realizadas no EP 573.

Anos/[1]Parâmetros	h_i^2	h_m^2	CV_g	$CV_{e\text{-}lim}$	CV_e	^2CV_r	r_{gc}	$\bar{X}$
	———		%	———				sc/ha
				5 colheitas				
2017-18-20-21-22	9,27	50,76	37,28	41,42	50,39	0,74	0,53	15,9
				4 colheitas				
2017-18-20-21	7,39	43,21	30,23	33,59	47,80	0,63	0,44	15,6
2017-18-20-22	9,75	54,12	35,54	39,49	46,02	0,77	0,54	18,8
2017-18-21-22	5,63	34,65	28,81	32,01	53,12	0,54	0,36	15,4
2017-20-21-22	13,60	61,66	56,74	63,04	60,67	0,94	0,67	12,0
2018-20-21-22	9,33	52,56	35,82	39,80	47,62	0,75	0,53	18,1
				3 colheitas				
2017-18-20	7,24	44,44	27,11	30,12	42,79	0,63	0,43	19,3
2017-18-21[ns]	4,18	26,41	21,36	42,71	71,30	0,29	0,31	14,7
2017-18-22[ns]	4,86	32,33	24,31	48,61	70,32	0,35	0,31	19,0
2017-20-21	11,21	54,23	49,15	54,61	62,98	0,78	0,55	10,2
2017-20-22	15,87	68,51	56,70	63,00	52,84	1,07	0,74	14,6
2017-21-22	9,37	46,69	51,30	57,00	72,07	0,71	0,52	10,1
2018-20-21	6,69	41,84	27,31	30,34	44,68	0,61	0,41	18,2
2018-20-22	10,22	59,17	33,96	37,73	40,88	0,83	0,57	22,6
2018-21-22[ns]	4,06	28,02	23,33	46,66	74,79	0,31	0,28	18,0
2020-21-22	14,85	66,30	58,63	65,14	56,55	1,04	0,73	13,5
				2 colheitas				
2017-18[ns]	3,18	21,61	15,97	31,95	60,85	0,26	0,24	19,9
2017-20	12,01	49,72	46,01	51,12	57,10	0,81	0,56	13,1
2017-21	10,30	49,92	48,17	53,52	60,18	0,80	0,62	6,10
2017-22	10,06	48,92	46,67	51,86	66,87	0,70	0,54	13,5
2018-20[ns]	6,57	56,98	23,17	46,33	49,85	0,46	0,40	25,2
2018-21[ns]	2,31	16,01	14,54	29,09	66,62	0,22	0,20	18,2
2018-22[ns]	1,86	16,84	13,65	27,31	60,69	0,23	0,13	24,8
2020-21	9,83	50,31	46,47	51,63	64,70	0,72	0,50	11,4
2020-22	21,44	83,15	62,80	69,78	38,53	1,63	0,94	18,0
2021-22[ns]	7,62	41,12	48,18	96,37	115,32	0,42	0,46	11,2

[1]ns = não significativo; h_i^2 = herdabilidade individual no sentido restrito; h_m^2 = herdabilidade com base na média de genótipos; CV_g = coeficiente de variação genotípica entre genótipos; $CV_{e\text{-}lim}$ = coeficiente

de variação experimental limite; CV_e = coeficiente de variação experimental; CV_r = coeficiente de variação relativa; r_{gc} = correlação genotípica entre as colheitas; $\bar{X}$ = produtividade média, em sacas/ha. ^2CV_r = ideal para a seleção = 0,90, com uma acurácia seletiva de 87%.

O coeficiente de variação relativa (CV_r) apresentou valor ideal estimado de 0,90 para o experimento. Apenas quatro combinações atingiram ou superaram esse valor: 2020-2022 (1,63), 2017-2020-2022 (1,07), 2020-2021-2022 (1,04) e 2017-2020-2021-2022 (0,94). A menor estimativa foi observada na combinação 2017-2018-2021-2022 (0,36). Observou-se que os quatro menores valores de CV_r foram obtidos em combinações que incluíram o ano de 2018, enquanto as cinco maiores estimativas ocorreram em combinações que não incluíram esse ano.

A correlação genética entre colheitas (r_{gc}) variou de 0,36 a 0,94. Apenas três combinações apresentaram valores superiores a 0,70: 2020-2022 (0,94), 2017-2020-2022 (0,74) e 2020-2021-2022 (0,73). A combinação 2017-2020-2021-2022 apresentou valor próximo a esse limite (0,67). A maioria das combinações apresentou r_{gc} inferior a 0,55, sendo a menor estimativa observada na combinação 2017-2018-2021-2022 (0,36). As produtividades médias associadas às combinações de colheitas variaram de 6,10 sc ha^{-1} (2017-2021) a 22,60 sc ha^{-1} (2018-2020-2022).

As posições das plantas variaram entre as combinações, sendo observadas diferenças na concordância do ordenamento em relação à combinação C1 (2020-2022; r_{gc} = 0,94), adotada como referencia (Tabela 6). As combinações C2 (2017-2020-2022; r_{gc} = 0,74) e C9 (2020-2021-2022; r_{gc} = 0,73) apresentaram maior coincidência com a classificação observada em C1, com reduzidas alterações nas posições relativas das plantas ao longo do ranking. Nessas combinações, as plantas mais bem classificadas em C1 permaneceram entre as primeiras posições, destacando-se as plantas 361,369,653, 371 e 590. A planta 361 ocupou a 2ª posição em C1 e permaneceu entre as primeiras posições na maioria das combinações avaliadas. A planta 653 permaneceu entre as 15 primeiras posições em todas as combinações de anos.

Alterações mais expressivas no ordenamento foram observadas nas combinações C3, C4, C5, C6 e C7, nas quais diversas plantas apresentaram mudanças substanciais de posição em relação à classificação obtida em C1. A planta

402, por exemplo, ocupou a 24ª Posição em C1 e passou para as posições 66ª, 150ª, 63ª,60ª e 86ª em C3, C4, C5, C6 e C7, respectivamente. Comportamento semelhante foi observado para as plantas 616 e 414, que também apresentaram variações acentuadas de posição entre as combinações avaliadas.

Tabela 6 - Ordenamento das plantas com base nas estimativas dos valores dos efeitos genéticos aditivos em nove combinações de anos no EP 573.

Planta	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
361	2º	9º	7º	22º	2º	5º	14º	9º	4º
369	7º	15º	9º	13º	4º	4º	15º	15º	7º
653	8º	8º	12º	46º	10º	15º	11º	8º	8º
470	17º	17º	11º	11º	5º	28º	16º	18º	19º
371	19º	20º	19º	14º	13º	13º	18º	19º	18º
472	20º	19º	21º	42º	17º	4º	22º	20º	22º
372	21º	22º	28º	40º	24º	12º	23º	24º	21º
93	22º	34º	56º	98º	56º	43º	83º	39º	23º
366	23º	25º	26º	32º	20º	19º	25º	33º	26º
402	24º	21º	66º	150º	63º	60º	86º	26º	24º
377	25º	32º	27º	41º	23º	22º	32º	35º	25º
379	26º	37º	33º	36º	26º	14º	29º	37º	28º
374	27º	35º	37º	71º	28º	36º	64º	38º	32º
616	28º	23º	47º	114º	53º	70º	72º	28º	33º
590	29º	30º	10º	4º	7º	34º	46º	25º	29º
363	30º	40º	30º	31º	39º	6º	30º	21º	20º
414	31º	28º	63º	119º	80º	41º	58º	23º	27º
375	33º	42º	41º	60º	32º	27º	31º	43º	36º
364	34º	33º	40º	73º	37º	45º	43º	40º	38º
581	35º	31º	8º	2º	9º	31º	36º	22º	31º
660	10º	131º	3º	38º	1º	10º	1º	1º	2º
687	98º	1º	43º	37º	8º	92º	9º	42º	107º
675	97º	90º	161º	224º	103º	129º	114º	95º	103º
624	684º	691º	685º	686º	687º	667º	685º	691º	683º

C_1 = 2020-22 (r_{gc} = 0,94); C_2 = 2017-20-22 (r_{gc} = 0,74); C_3 = 2017-18-20-21-22 (r_{gc} = 0,53); C_4 = 2017-18-20-21 (r_{gc} = 0,44); C_5 = 2017-21 (r_{gc} = 0,62); C_6 = 2020-21 (r_{gc} = 0,50); C_7 = 2017-20 (r_{gc} = 0,56); C_8 = 2017-20-21-22 (r_{gc} = 0,67); C_9 = 2020-21-22 (r_{gc} = 0,73).

5 DISCUSSÃO

No melhoramento genético de espécies perenes de produção anual, como o cafeeiro, a estabilidade da produtividade ao longo dos anos é tão importante quanto a estabilidade entre locais. A compreensão da relação entre produção e variação temporal é essencial para o delineamento de estratégias de seleção que minimizem a interferência ambiental sobre a expressão da variabilidade genética. Entretanto, grande parte dos estudos em cafeeiro tem priorizado a seleção com base nos níveis médios de produtividade, com menor ênfase na influência das variações climáticas entre anos sobre os parâmetros genéticos e a eficiência da seleção. Dessa forma, a definição de quais colheitas devem compor a avaliação de genótipos superiores permanece uma questão relevante, principalmente em experimentos conduzidos sob ambientes sujeitos a elevada instabilidade climática.

Carvalho (1952) e Bonomo et al. (2004) recomendaram que a seleção fosse realizada em anos de maior produção, na média de colheitas, em quatro colheitas consecutivas ou em biênios formados por safras altas. Entretanto, esses estudos não tiveram como objetivo avaliar a influencia da interação genótipo × anos sobre a eficiência da seleção. Posteriormente, Andrade et al. (2016), verificaram que anos de elevada produtividade proporcionaram maior eficiência de seleção, contudo, essa condição foi observada apenas na oitava colheita, evidenciando a limitação prática de estratégias baseadas exclusivamente em safras altamente produtivas. Por outro lado, Moreira et al. (2022) observaram que a seleção baseada em colheitas isoladas, mesmo em anos de elevada produtividade, pode reduzir a eficiência seletiva, uma vez que os efeitos específicos de cada ano podem influenciar as estimativas das variâncias genética e residual.

Nos últimos anos, a maior frequência de condições climáticas atípicas tem comprometido não apenas a produção de café no Brasil, mas também a condução dos programas de melhoramento genético, uma vez que déficits hídricos prolongados, temperaturas elevadas e o aumento da variabilidade ambiental reduzem a eficiência da seleção e intensificam a interação genótipo × ambiente (DaMatta et al., 2019; IPCC, 2021; Kahsay et al., 2023). Nesse contexto, estratégias de seleção que dependam exclusivamente da ocorrência de anos altamente produtivos podem tornar-se cada

vez mais limitadas, sobretudo em cenários de maior instabilidade climática. Assim, torna-se relevante avaliar se as colheitas obtidas sob diferentes condições ambientais podem preservar informações genéticas suficientes para a seleção, desde que a variabilidade genética seja mantida e a interação genótipo × anos não comprometa a identificação de indivíduos superiores. Com base nesse pressuposto, o presente estudo testou a hipótese de que determinadas combinações de colheitas, independentemente da magnitude da produtividade observada, seriam capazes de preservar a expressão da variabilidade genética e proporcionar maior eficiência na seleção de genótipos superiores.

As condições climáticas adversas observadas durante o período experimental não apenas reduziram a produtividade das plantas, mas também anteciparam a manifestação da bienalidade produtiva, que passou a ser evidenciada já a partir da segunda colheita. Em condições normais de cultivo, a alternância entre safras de alta e baixa produção tendem a ocorrer somente após a quinta ou sexta colheita, quando o esgotamento fisiológico decorrente da elevada carga de frutos compromete o crescimento vegetativo e a formação de novos ramos produtivos (Sera,2001). Entretanto, a ocorrência sucessiva de déficits hídricos e temperaturas elevadas intensificara esse processo ao limitar simultaneamente o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo das plantas, favorecendo oscilações mais acentuadas na produção entre anos consecutivos. Esse comportamento foi evidenciado no presente estudo, em que a alternância entre anos de maior e menor produtividade ocorreu precocemente, indicando que as adversidades climáticas atuaram como fatos de intensificação da bienalidade.

A antecipação da bienalidade possui implicações que vão além da redução da produtividade, pois aumenta a heterogeneidade entre as avaliações realizadas ao longo dos anos e modifica a magnitude dos componentes de variância estimados. Segundo Andrade et al. (2016), bienalidades mais intensas promovem heterogeneidade entre variâncias, alterando as estimativas dos parâmetros genéticos e intensificando a interação genótipo × ambiente, o que reduz a eficiência da seleção. Dessa forma, em experimentos conduzidos sob condições climáticas adversas, torna-se essencial avaliar se as diferentes combinações de colheitas preservam a

expressão da variabilidade genética ou se predominam os efeitos ambientais, comprometendo a identificação de genótipos superiores.

A significância dos efeitos genéticos observada na maior parte das combinações de colheitas indica a existência de variabilidade genética entre os genótipos avaliados, condição indispensável para o sucesso dos programas de melhoramento. Segundo Resende (2007a), a presença de variabilidade genética constitui o pressuposto básico para que a seleção promova ganhos genéticos consistentes, uma vez que somente diferenças de origem genética podem ser transmitidas às gerações subsequentes. Entretanto, em espécies perenes cultivadas sobre condições ambientais heterogêneas, a expressão dessa variabilidade pode ser parcialmente mascarada pelos efeitos ambientais e pela interação genótipo × ambiente, reduzindo a eficiência do processo seletivo (Resende, 2007a; Resende e Alves, 2020). Nesse contexto, a avaliação conjunta dos componentes de variância e dos parâmetros genéticos permite distinguir se as diferenças fenotípicas observadas refletem, predominantemente, efeitos genéticos ou ambientais, fornecendo informação mais consistentes para a tomada de decisão nos programas de melhoramento.

Os coeficientes de determinação associados aos efeitos de parcela (c_{parc}^2) e aos efeitos permanentes dentro da progênie (c_{perm}^2) fornecem informações importantes sobre a influência das condições experimentais na expressão fenotípica dos genótipos. O coeficiente c_{parc}^2 representa a proporção da variância atribuída às diferenças permanentes entre parcelas dentro dos blocos, indicando o nível de heterogeneidade espacial do experimento. Por outro lado, o c_{perm}^2 representa a contribuição dos efeitos ambientais permanentes associados às parcelas ao longo das avaliações, refletindo a estabilidade das condições experimentais entre os anos. Segundo Resende (2007a), valores reduzidos desses coeficientes indicam menos interação ambiental sobre a expressão dos genótipos, favorecendo maior precisão na estimação dos parâmetros genéticos. Neste estudo, apenas a combinação 2017-2021-2022 apresentou simultaneamente valores inferiores aos limites considerados desejáveis para ambos os coeficientes, indicando que a maioria das combinações de anos apresentou alguma influência das condições ambientais sobre as estimativas obtidas.

A ocorrência de bienalidade produtiva constitui um dos fatores associados ao aumento da interação genótipo × anos, cuja magnitude pode ser avaliada pelo coeficiente de determinação dos efeitos da interação genótipo × anos (c_{ga}^2). Embora não existam valores de referencia amplamente estabelecidos para esse coeficiente em *Coffea arabica*, estimativas reduzidas indicam menor contribuição da interação para a variação fenotípica total e maior estabilidade da expressão genética dos genótipos ao longo das avaliações. Entre as combinações analisadas, destacam-se 2017-2020, 2020-2022, 2017-2020-2022 e 2020-2021-2022, que apresentaram valores de inferiores a 10%, indicando menor influencia da interação genótipo × anos e maior consistência das informações obtidas nessas combinações de colheitas.

Foi interessante o comportamento da combinação 2020-2022, que apresentou o menor valor de c_{ga}^2 entre todas as combinações avaliadas (2,07%). Esse resultado, à primeira vista, poderia parecer contraditório, considerando que essa combinação também apresentou elevada estimativa de c_{perm}^2, indicando maior contribuição de efeitos permanentes associados às parcelas na variação observada. Entretanto, a elevada variância genética aditiva estimada para 2020-2022, a maior entre as combinações avaliadas, contribuiu para aumentar a proporção da variação atribuída aos efeitos genéticos, reduzindo a contribuição relativa da interação genótipo × anos. Assim, mesmo sob condições ambientais contrastantes, essa combinação foi capaz de preservar maior consistência na expressão genética dos genótipos.

Os coeficientes de herdabilidade são parâmetros fundamentais para determinar a eficiência esperada da seleção e auxiliar na definição da unidade seletiva mais adequada. Segundo Vencovsky e Barriga (1992) e Resende (2007a), caracteres quantitativos geralmente apresentam herdabilidades individuais de baixa a moderada magnitude, devido à elevada influência ambiental sobre sua expressão. Resende e Alves (2020) classificaram a herdabilidade individual como baixa ($0,01 \leq h_i^2 \leq 0,15$), média ($0,15 \leq h_i^2 \leq 0,50$), alta ($0,50 \leq h_i^2 \leq 0,80$) e muito alta ($h_i^2 \geq 0,80$). Neste estudo, apenas as combinações 2020-2022 (21,44%) e 2017-2020-2022 (15,87%) apresentaram valores classificados como médios, indicando maior potencial para seleção baseada no desempenho individual dos genótipos nessas condições. Nas demais combinações, os baixos valores de herdabilidade indicam maior influência

ambiental sobre a expressão do caráter, reduzindo a proporção da variabilidade fenotípica atribuída aos efeitos genéticos.

A ocorrência de déficits hídricos sucessivos, temperaturas elevadas e a antecipação da bienalidade produtiva provavelmente contribuíram para a redução das estimativas da herdabilidade, considerando que a produtividade é um caráter quantitativo fortemente influenciado pelo ambiente, especialmente em populações segregantes em geração F_3. Entretanto, esses resultados não indicam ausência de variabilidade genética, uma vez que outras combinações apresentaram valores expressivos para componentes genéticos e parâmetros associados à seleção, os quais serão discutidos posteriormente. Herdabilidades individuais de baixa magnitude também foram observadas em estudos conduzidos com cafeeiro, com valores de 4% e 7% relatados por Saavedra et al. (2023) e Pereira et al. (2013), respectivamente, além de outras espécies perenes, como pinhão-manso (8%) (Cardoso et al. 2018), goiaba (1%) (Almeida, 2017) e mamão (7%) Ramos et al., 2014). Entretanto, esses resultados não indicam ausência de variabilidade genética, uma vez que outras combinações apresentaram estimativas expressivas para componentes genéticos associados ao potencial de seleção

Essa interpretação é corroborada pelas estimativas de variância genética aditiva (V_a), que variaram entre as combinações de anos, evidenciando que a expressão da variabilidade genética diferiu entre os conjuntos de anos avaliados. Entretanto, esse parâmetro, quando considerado isoladamente, não foi suficiente para identificar as combinações mais promissoras para a seleção. Assim, a interpretação dos resultados foi fundamentada na análise conjunta da variância genética aditiva, da herdabilidade, do coeficiente de variação relativa (CV_e), das correlações genéticas e da estabilidade na classificação das progênies, proporcionando uma avaliação mais consistente da eficiência das diferentes combinações de anos para a seleção.

Valores mais elevados de herdabilidade foram obtidos quando a unidade de seleção considerada foi a média entre genótipos. Segundo Vencovsky e Barriga (1992), a herdabilidade baseada em médias tende a ser superior à herdabilidade individual, uma vez que a utilização de repetições reduz a influência dos erros experimentais sobre a estimativa da variância genética. No presente estudo, dez

combinações apresentaram herdabilidade média superior a 50%, indicando condições favoráveis para a seleção de genótipos. Destacou-se a combinação 2020-2022, que apresentou a maior estimativa (h_m^2 = 83,15%), seguida pelas combinações 2017-18-20-21-22, 2017-20-21-22, 2017-18-20-22, 2018-20-21-22, 2017-20-21, 2017-20-22, 2018-20-22, 2020-21-22, 2020-21 e 2020-22.

Embora seja esperado que o aumento do número de colheitas proporcione estimativas mais precisas e, consequentemente, maiores valores de herdabilidade média, essa tendencia não foi confirmada neste estudo. Resende (2007a) Ressalta que a repetição de avalições tende a aumentar a precisão da estimação dos valores genéticos, entretanto, esse ganho depende da magnitude da variabilidade ambiental presente nas avaliações. Entre as 18 comparações significativas realizadas entre combinações com diferentes números de colheitas, 14 apresentaram herdabilidade média superior nas combinações compostas por menor numero de anos. Esses resultados demonstram que o aumento do número de avaliações, por si só, não garante maior herdabilidade, uma vez que esse parâmetro depende da relação entre as variâncias genética e ambiental (Vencovsky e Barriga, 1992; Pereira et al., 2013). Assim, a inclusão de colheitas adicionais somente contribui para aumentar a eficiência da seleção quando os ganhos em precisão decorrente do maior numero de avaliações supera o incremento da variabilidade ambiental incorporada às estimativas. Esse comportamento evidencia que a eficiência de seleção depende não apenas da quantidade de avaliações realizadas, mas também da qualidade das informações obtidas em casa colheita.

Observou-se também que a inclusão do ano de 2018 promoveu tendencia de redução da herdabilidade média nas diferentes combinações de colheitas, como evidenciado pelas comparações entre 2017-2020-2021 (54,23%) e 2017-2018-2020-2021 (43,21%), 2017-2020-2022 (68,51%) e 2017-2018-2020-2022 (54,12%), e 2017-2020-2021-2022 (61,66%) e 2017-2018-2020-2021-2022 (50,76%). Embora 2018 tenha sido o ano de maior produtividade, sua inclusão aumentou a heterogeneidade entre as avaliações, reduzindo a proporção da variação fenotípica atribuída aos efeitos genéticos. Esse comportamento reforça que a eficiência da seleção depende da relação entre as variâncias genética e ambiental, e não apenas da magnitude da produtividade observada (Vencovsky e Barriga, 1992; Resende 2007a). Considerando

conjuntamente as estimativas de herdabilidade individual (h_i^2) e herdabilidade média (h_m^2), as combinações 2020-2022 e 2017-2020-2022 destacaram-se por possibilitar tanto a seleção entre genótipos quanto a seleção de indivíduos superiores dentro das progênies.

O coeficiente de variação genética (CV_g) complementa a interpretação da variabilidade genética disponível para seleção. Entretanto, por representar a razão entre o desvio-padrão genético e a média fenotípica da característica, sua interpretação deve ser realizada em conjunto com a variância genética e a produtividade média, uma vez que ambas influenciam diretamente sua magnitude (Resende, 2002; Resende 2007a). Os resultados obtidos neste estudo evidenciam claramente essa relação. Combinações contendo o ano de 2018, como 2018-2020-2022, 2017-2018-2020 e 2017-2018-2020-2022, apresentaram elevada produtividade e variâncias genéticas expressivas, porem valores relativamente reduzidos de CV_g. Em contra partida, combinações como 2017-2021 e 2017-2021-2022 apresentaram produtividades muito baixas e variâncias genéticas reduzidas, mas exibiram valores elevados de CV_g. Esses exemplos demonstram que o coeficiente da variação genética pode ser influenciado tanto pela magnitude da variância genética quanto pela média fenotípica da população.

Por outro lado, as combinações 2020-2022 e 2017-2020-2022 reuniram simultaneamente elevados valores de variância genética aditiva e de CV_g, indicando que a superioridade observada não decorreu apenas da redução da produtividade média, mas principalmente da maior expressão da variabilidade genética entre os genótipos. Esse resultado é consistente com as elevadas estimativas de herdabilidade obtidas para essas combinações e reforça seu potencial para a seleção de indivíduos superiores. Assim o CV_g não deve ser interpretado de forma isolada, mas integrado aos demais parâmetros genéticos, especialmente à variância genética e à herdabilidade, permitindo uma avaliação mais consistente do potencial de ganho genético nos programas de melhoramento (Resende, 2007a, Resende e Alves, 2020).

O coeficiente de variação experimental (CV_e) é tradicionalmente utilizado como indicador da precisão experimental. Entretanto, sua interpretação baseada apenas em classificações gerais apresenta limitações para experimentos de melhoramento

genético, por desconsiderar as particularidades da população avaliada, da característica estudada e do delineamento experimental. Nesse contexto, Resende (2002;2007a) e Resende e Duarte (2007) propuseram que o CV_e fosse interpretado em conjunto com o coeficiente de variação experimental limite ($CV_{e\text{-}lim}$), calculado especificamente para cada experimento com base no numero de repetições e no coeficiente de variação relativa (CV_r), proporcionando uma avaliação da precisão experimental mais adequada às condições de cada estudo.

Com base nessa abordagem, verificou-se ampla variação entre os valores de CV_e e seus respectivos $CV_{e\text{-}lim}$ nas diferentes combinações de colheitas. A maioria das combinações apresentou valores de CV_e superiores ao respectivo $CV_{e\text{-}lim}$,indicando condições experimentais compatíveis com a obtenção de estimativas genéticas confiáveis segundo o critério proposto por Resende e Duarte (2007). Apenas as combinações 2017-2020-2021-2022, 2017-2020-2022, 2020-2022, 2020-2021-2022 e 2020-2022 apresentaram comportamento distinto, destacando-se a combinação 2020-2022 pela maior diferença entre os dois coeficientes. Esses resultados evidenciam que a qualidade experimental variou entre as combinações de colheitas, refletindo a influencia das condições ambientais ocorridas ao longo dos anos de avaliação, já caracterizadas pela ocorrência de déficits hídricos sucessivos, temperaturas elevadas e antecipação da bienalidade.

O coeficiente de variação relativa (CV_r) constitui um dos parâmetros mais informativos para a avaliação da eficiência da seleção, pois expressa diretamente a relação entre as variabilidades genética e ambiental presentes no experimento. Diferentemente do CV_g, sua magnitude não é influenciada pela média fenotípica da característica, permitindo avaliar de forma mais consistente o equilíbrio entre a variabilidade genética disponível para seleção e a variabilidade residual (Vencovsky e Barriga, 1992; Resende e Duarte, 2007). Embora Vencovsky e Barriga (1992) tenham sugerido que valores de CV_r iguais ou superiores a 1,0 indiquem condições favoráveis à seleção, Resende e Duarte (2007) demonstram que essa interpretação deve ser ajustada às características de cada experimento, considerando o numero de repetições e a acurácia seletiva. Para o presente estudo, o valor de referência estimado foi de 0,90, correspondendo à acurácia seletiva de 87%.

Com base nesse critério, apenas as combinações 2020-2022 (1,63), 2017-2020-2022 (1,07), 2020-2021-2022 (1,04) e 2017-2020-2021-2022 (0,94) apresentaram valores superiores ao limite estabelecido. Esse resultado reforça o padrão observado anteriormente para os componentes de variância, herdabilidade e coeficiente de variação genética, indicando que essas combinações preservaram uma relação mais favorável entre a variabilidade genética e a influencia ambiental. Em contrapartida, observou-se que as menores estimativas de CV_r ocorreram, predominantemente, em combinações que incluíram o ano de 2018, sugerindo que esse ano contribuiu para aumentar a participação da variabilidade ambiental nas estimativas, reduzindo a eficiência da seleção. Esse comportamento corrobora as evidencias anteriormente discutidas de que anos de elevada produtividade não necessariamente proporcionam maior eficiência seletiva, uma vez que a superioridade da seleção depende da manutenção da expressão da variabilidade genética e da redução da influencia ambiental (Resende, 2007a; Moreira et al., 2022).

As estimativas de CV_r obtidas neste estudo apresentaram magnitude compatível cm resultados anteriores relatados para o cafeeiro. Moreira et al. (2022) encontraram valores próximos de 0,21, enquanto Bonomo et al. (2004) relataram estimativas variando entre 0,64 e 0,83 para diferentes agrupamentos de colheitas. Oliveira et al. (2011) obtiveram valores de 4,01 em anos de baixa produção, 1,40 em anos de alta produção e 1,23 considerando quatro colheitas. Entretanto, esses estudos utilizam critérios distintos para interpretação do CV_r e não empregaram a abordagem proposta por Resende e Duarte (2007), o que limita comparações diretas com os resultados aqui preservados. Ainda assim, em conjunto com as elevadas estimativas de herdabilidade média, variância genética e acurácia seletiva, os elevados valores de CV_r observados para as combinações 2020-2022, 2017-2020-2022, 2020-2021-2022 e 2017-2020-2021-2022 reforçam que essas combinações proporcionaram as condições mais favoráveis para a identificação de genótipos superiores, corroborando a hipótese central deste estudo de que a eficiência da seleção depende da qualidade da informação genética contida nas colheitas, e não exclusivamente da magnitude da produtividade observada.

A natureza da interação genótipo × anos observada neste estudo possui implicações diretas para a condução dos programas de melhoramento do cafeeiro.

Segundo Resende (2007a), interações predominantemente simples são caracterizadas pela manutenção da superioridade relativa dos genótipos entre os diferentes ambientes de avaliação, permitindo que a seleção realizada em uma condição seja eficiente nas demais. Em contrapartida, quando predominam interações complexas, ocorrem alterações no ordenamento dos genótipos entre as avaliações, reduzindo a correlação entre os valores genéticos e dificultando a identificação de indivíduos consistentemente superiores (Resende, 2007a; Resende e Alves, 2020). Nessa situação, torna-se necessário aumentar o numero de avaliações para elevar a confiabilidade da seleção, o que implica maior custo experimental e maior tempo para obtenção de novas cultivares, aspecto particularmente relevante para o cafeeiro devido ao seu longo ciclo de avaliação.

Os resultados obtidos indicam que as combinações que apresentaram maiores estimativas de herdabilidade média, coeficiente de variação relativa, variância genética e qualidade experimental foram também aquelas que exibiram as maiores correlações genéticas entre colheitas, destacando-se 2020-2022, 2017-2020-2022 e 2020-2021-2022. Essa convergência entre os parâmetros confirma que, nessas combinações, predominou uma interação do tipo simples, preservando o posicionamento relativo dos genótipos entre as colheitas e aumentando a confiabilidade da seleção. Esse comportamento reforça a hipótese central deste estudo de que a eficiência da seleção está mais relacionada à estabilidade da expressão da variabilidade genética entre os anos do que à magnitude da produtividade observada em cada colheita.

Observou-se ainda redução progressiva da correlação genética entre colheitas à medida que novos anos foram incorporados às analises conjuntas. Esse comportamento evidencia que o aumento da amplitude temporal tende a intensificar a heterogeneidade ambiental e, consequentemente, a participação da interação genótipo × anos na expressão fenotípica dos genótipos, reduzindo a previsibilidade dos valores genéticos entre as avaliações. Resultado semelhante foi discutido por Andrade et al. (2016), que demonstraram que a intensificação da bienalidade modifica a magnitude dos parâmetros genéticos e reduz a eficiência da seleção quando as diferenças entre os anos se tornam mais pronunciadas.

Entre os anos avaliados, 2018 destacou-se por estar frequentemente associado à redução da correlação genética entre colheitas e ao aumento da interação genótipo × anos. Embora tenha apresentado a maior produtividade do período experimental, sua inclusão reduziu a herdabilidade média, o coeficiente de variação relativa e a correlação genética em diversas combinações, indicando que a elevada produção não foi acompanhada por maior estabilidade da expressão genética. Esse resultado corrobora as evidencias discutidas anteriormente de que anos altamente produtivos nem sempre representam as condições mais favoráveis para a seleção, concordando com as observações de Moreira et al. (2022), que demonstraram que avaliações isoladas podem ser fortemente influenciadas pelos efeitos específicos de cada ano.

Além das diferenças ambientais entre as colheitas, deve-se considerar que os genótipos avaliados pertencem à geração F_3, fase em que ainda ocorre elevada segregação genética e heterogeneidade fenotípica. Em populações segregantes, a ação simultânea da variabilidade genética e dos efeitos ambientais tende a ampliar as diferenças de desempenho entre os indivíduos, especialmente dependente das condições ambientais (Resende, 2007; Resende e Alves, 2020). Assim, a ocorrência de interações complexas observada em parte das combinações provavelmente resultou da ação conjunta da variabilidade climática durante o período experimental e da própria constituição genética da população avaliada.

Os resultados obtidos sugerem que, nas condições deste estudo, anos submetidos a condições ambientais mais restritivas apresentaram maior capacidade de discriminar as diferenças genéticas entre os genótipos. Embora 2018 tenha registrado a maior produtividade média, esse ano esteve frequentemente associado a menores estimativas de herdabilidade, coeficiente de variação relativa e correlação genética entre colheitas. Em contraste, as combinações envolvendo os anos 2020, 2021 e 2022, caracterizados por condições climáticas mais adversas e menores produtividades, apresentaram as melhores estimativas para grande parte dos parâmetros genéticos avaliados. Esses resultados indicam que o efeito das adversidades climáticas não se refletiu apenas na redução da produção, mas também na maior capacidade dos ambientes em evidenciar diferenças genéticas entre os materiais avaliados, favorecendo a identificação de genótipos capazes de mantes desempenho relativamente superior sob condições limitantes.

Essa interpretação adquire especial relevância diante do cenário de mudanças climáticas observado nas ultimas décadas. Conforme discutido por DaMatta et al. (2019), o aumento da frequência de déficits hídricos e temperaturas elevadas tem alterado o desempenho produtivo do cafeeiro, enquanto o IPCC (2021) e Kahsay et al (2023) projetam que eventos climáticos extremos tendem a se tornar mais frequentes nas principais regiões produtoras de café. Nesse contexto, ambientes com maior restrição hídrica e térmica deixam de representar apenas uma condição desfavorável à experimentação e passam a constituir cenários capazes de revelar diferenças adaptativas entre os genótipos, fornecendo informações relevantes para a seleção de materiais mais resilientes.

A identificação de combinações de colheitas que preservam a expressão da variabilidade genética e mantem o ordenamento relativo dos genótipos representa, portanto, uma estratégia promissora para aumentar a eficiência dos programas de melhoramento. Os resultados obtidos demonstram que a eficiência da seleção esteve mais relacionada à capacidade das combinações de anos em reduzir os efeitos da interação genótipo × ambiente e preservar a expressão dos valores genéticos do que à magnitude da produtividade observada. Essa conclusão é consistente com as maiores estimativas de herdabilidade, coeficiente de variação relativa, variância genética e correlação genética obtidas para as combinações 2020-2022, 2017-2020-2022 e 2020-2021-2022.

Tradicionalmente, recomenda-se que a seleção em cafeeiro seja realizada após sucessivas colheitas ou em anos de elevada produção, visando aumentar a confiabilidade da identificação de genótipos superiores (Carvalho, 1952; Bonomo et al., 2004). Entretanto, os resultados obtidos neste estudo, em concordância com as observações de moreira et al. (2022), demonstram que a simples inclusão de novas colheitas ou a utilização de anos altamente produtivos não garante maior eficiência da seleção. A qualidade da informação genética obtida em cada avaliação mostrou-se mais importante que o numero de colheitas ou a produtividade isoladamente considerada.

Assim, a principal contribuição deste trabalho não consiste em demonstrar que duas colheitas sejam suficientes para selecionar genótipos superiores, mas em

evidenciar que determinadas combinações de anos podem preservar de forma mais eficiente a expressão da variabilidade genética e reduzir os efeitos da interação genótipo x anos. Sob essa perspectiva, a escolha criteriosa das colheitas a serem utilizadas nos processos seletivos pode representar uma alternativa para aumentar a eficiência dos programas de melhoramento, reduzindo tempo, custos experimentais e o risco de descarte de genótipos promissores.

Considerando a tendencia de intensificação das mudanças climáticas nas próximas décadas (IPCC, 2021; Kahsay et al., 2023), estratégias de seleção baseadas exclusivamente na expectativa de sucessivas safras altamente produtivas podem tornar-se progressivamente menos representativas das condições enfrentadas pelos programas de melhoramento e pelos sistemas comerciais de cultivo. Nesse cenário, a avaliação de genótipos sob condições ambientais restritivas deixa de representar apenas uma limitação experimental e passa a constituir uma oportunidade para identificar materiais capazes de mates desempenho e estabilidade em ambientes que provavelmente serão cada vez mais frequentes nas regiões produtoras de café.

Além das estimativas dos parâmetros genéticos, o ranqueamento dos valores dos efeitos genético aditivos obtidos por REML/BLUP (Tabela 6) permitiu identificar as plantas com maior potencial genotípico em casa combinação de colheitas e comparar seu desempenho com parcelas das testemunhas sendo 660, 687, 675 e 624. Essa abordagem possibilitou avaliar a consistência do desempenho das plantas ao longo das combinações e verificar se os materiais genéticos provenientes da população segregante apresentam valores genotípicos superiores aos das cultivares utilizadas como referência.

Entretanto, a classificação das plantas não foi constante entre as combinações de anos, especialmente naquelas que apresentaram menores correlações genéticas. As alterações mais expressivas observadas em C3, C4, C5, C6 e C7 indicam que o desempenho relativo de determinados genótipos foi fortemente condicionado pelas condições especificas de cada combinação. A planta 402 constitui um exemplo dessa resposta, apresentando grande alteração de posicionamento entre C1 e as combinações supracitadas. Esse comportamento também foi observado para as plantas 616 e 414, evidenciando que materiais genéticos com desempenho

intermediário ou elevado em uma determinada combinação não necessariamente mantiveram a mesma posição nas demais.

Em contraste, algumas plantas apresentaram maior consistência no ranqueamento. A planta 361 manteve-se entre as primeiras posições na maioria das combinações, assim como a 369, indicando maior estabilidade de desempenho relativo. Esse comportamento é particularmente relevante quando comparado ao das testemunhas, pois demonstra que determinadas plantas da população segregante não apenas alcançaram posições superiores às cultivares de referencia em condições específicas, mas também apresentaram desempenho competitivo em diferentes combinações de colheitas.

A resposta das próprias testemunhas também variou entre as combinações de anos, com destaque para a 660, que apresentou posições elevadas em algumas situações e posições inferiores em outras. Essa variação reforça que a classificação dos materiais genéticos depende das condições ambientais representadas pelas diferentes combinações de colheitas. Portanto, a identificação de plantas promissoras não desse ser baseada exclusivamente em uma única combinação, mas na consistência de seu desempenho ao longo dos anos.

Assim, os resultados do ranqueamento por RML/BLUP reforçam a importância da avaliação conjunta das colheitas para a seleção. Embora algumas plantas tenham apresentado superioridade especifica em determinadas combinações de colheitas, aquelas que mantiveram posições elevadas em maior numero de combinações, como 361 e 369, apresentaram maior interesse para continuidade do processo seletivo. Dessa forma, o BLUP permitiu integrar a informação genética das diferentes colheitas e auxiliar na identificação de plantas promissoras dentro da população segregante, considerando simultaneamente o desempenho relativo e sua comparação com as cultivares de referência.

5 CONCLUSÕES

As adversidades climáticas intensificaram a interação genótipos × anos e influenciaram a eficiência da seleção. Determinadas combinações de colheitas apresentaram maior expressão da variabilidade genética aditiva e estabilidade do ordenamento dos genótipos. A eficiência seletiva esteve mais associada à magnitude da variância genética entre colheitas do que à produtividade média das safras.

Ambientes com maior restrição climática favoreceram a discriminação dos genótipos, evidenciando diferenças na capacidade de manutenção do desempenho sob condições adversas. Assim, a definição das combinações de colheitas com base em parâmetros genéticos mostrou-se mais adequada do que a utilização isolada da produtividade ou do número de anos avaliados, contribuindo para maior confiabilidade na seleção de genótipos superiores e estáveis de café arábica.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allard RW (1971) *Princípios do melhoramento genético das plantas*. São Paulo: Editora Edgard Blücher.

Almeida CLP (2017) *Índices multivariados e BLUP multissafras na seleção de genótipos de goiabeira*. 99 f. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes.

Almeida RBP, Antar GM (2026) *Coffea* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB24410. Acesso em: 19 maio 2026.

Andrade VT, Gonçalves FMA, Nunes JAR, Botelho CE (2016) Statistical modeling implications for coffee progenies selection. **Euphytica** 207:177–189. DOI: https://doi.org/10.1007/s10681-015-1561-6.

Avila RT, Almeida WL, DaMatta FM (2020) Elevated air [CO_2] improves photosynthetic performance and alters biomass accumulation and partitioning in drought-stressed coffee plants. **Environmental and Experimental Botany** 177:e104137. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104137.

Beksisa L, Alamerew S, Ayano A, Daba G (2018) Genotype × environment interaction and yield stability of Arabica coffee genotypes. **African Journal of Agricultural Research** 13:210–219. DOI: https://doi.org/10.5897/AJAR2017.12788.

Bocianowski J, Księżak J, Nowosad K (2019) Genotype by environment interaction for seed yield in pea. **Euphytica** 215:e191. DOI: https://doi.org/10.1007/s10681-019-2515-1.

Bonomo P, Cruz CD, Viana JMS, Pereira AA, Oliveira VR, Carneiro PCS (2004) Avaliação de progênies de cafeeiro. **Bragantia** 63:207–219. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052004000200006.

Bunn C, Läderach P, Ovalle Rivera O et al. (2015) A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change** 129:89–101. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x.

Camargo AP, Camargo MBP (2001) Definição das fases fenológicas do cafeeiro. **Bragantia** 60:65–68. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008.

Cardoso PMR, Dias LAS, Resende MDV, Freitas RG, Corrêa TR, Muniz DR, Zaidan IR (2018) Genetic evaluation and selection in *Jatropha curcas* L. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 18:192–199. DOI: https://doi.org/10.1590/1984-70332018v18n2a29.

Cavatte PC, Oliveira AA, Morais LE, Martins SCV, Sanglard LMVP, DaMatta FM (2012) Could shading reduce the negative impacts of drought on coffee? A morphophysiological analysis. **Physiologia Plantarum** 144:111–122. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2011.01525.x.

Chalchissa FB, Diga GM, Feyisa GL, Tolossa AR (2022) Impacts of extreme agroclimatic indicators. **Heliyon** 9:e10136. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10136.

Chaves MM, Flexas J, Pinheiro C (2009) Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany** 103:551–560. DOI: https://doi.org/10.1093/aob/mcn125.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) (2025) *Acompanhamento da safra brasileira de café: safra 2025*. Brasília: CONAB. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/3o-levantamento-de-cafe-safra-2025/3o-levantamento-de-cafe-safra-2025. Acesso em: 15 jan. 2026.

Coltri PP, Pinto HS, Gonçalves RRDV, Zullo Junior J, Dubreuil V (2019) Low levels of shade and climate change adaptation of Arabica coffee in southeastern Brazil. **Heliyon** 5:e01263. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01263.

Covre AM, Silva FA, Oliosi G, Correa CCG, Viana AP, Partelli FL (2022) Abordagem de análise Bayesiana multiambiental e multianual em *Coffea canephora*. **Plants** 11:3274. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11233274.

Cruz CD, Carneiro PCS (2004) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. v. 2. Viçosa: Editora UFV. 585 p.

Cruz CD, Regazzi AJ (1997) *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa: Editora UFV. 390 p.

Davis AP, Gole TW, Baena S, Moat J (2012) The impact of climate change on indigenous *Coffea arabica*: predicting future trends and identifying priorities. **PLoS ONE** 7:e47981. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047981.

DaMatta FM, Rahn E, Läderach P et al. (2019) Why could the coffee crop endure climate change and global warming to a greater extent than previously estimated? **Climatic Change** 152:167–178. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-018-2346-4.

Dias CG, Martins FB, Martins MA (2024) Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of the Total Environment** 907:167753. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167753.

Dubberstein D, Lidon FC, Rodrigues AP et al. (2020) Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed

exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science** 11:1049. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01049.

Eyring V, Bony S, Meehl GA et al. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development** 9:1937–1958. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016.

Falconer DS (1987) *Introdução à genética quantitativa*. Viçosa: Editora UFV.

Fazuoli LC, Braghini MT, Silvarolla MB, Gonçalves W, Mistro JC, Gallo PG, Guerreiro Filho O (2019) IAC Catuí SH3 – a dwarf *Coffea arabica* cultivar with leaf rust resistance and drought tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 19:356–359. DOI: https://doi.org/10.1590/1984-70332019v19n3c48.

Fazuoli LC, Braghini MT, Silvarolla MB, Gonçalves W, Mistro JC, Gallo PG, Guerreiro Filho O (2018) IAC 125 RN – a dwarf coffee cultivar resistant to leaf rust and root-knot nematode. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 18:237–240. DOI: https://doi.org/10.1590/1984-70332018v18n2c35.

Fazuoli LC (1991) *Metodologia, critérios e resultados da seleção em progênies do café Icatu com resistência a Hemileia vastatrix*. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Fehr WR (1987) *Principles of cultivar development: theory and technique*. New York: Macmillan Publishing Company. Cap. 11, p. 247–260.

Gomes IAC, Campostrini E, Leal NR et al. (2008) Alterações morfofisiológicas em folhas de *Coffea arabica* L. cv. Oeiras sob influência do sombreamento por *Acacia mangium* Willd. **Ciência Rural** 38:109–115. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000100018.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009325844.

International Coffee Organization (ICO) (2024) *Annual Review 2023/2024*. London: International Coffee Organization. Disponível em: https://www.ico.org/documents/cy2024-25/annual-review-2023-2024-e.pdf. Acesso em: 15 jan. 2026.

Kahsay GA, Garcia NT, Gonzalo DO, Georget F, Bosselmann AS (2023) New coffee varieties as a climate adaptation strategy: empirical evidence from Costa Rica. **World Development Sustainability** 2:100046. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wds.2023.100046.

Kath J, Craparo A, Fong Y et al. (2022) Vapour pressure deficit determines critical thresholds for global coffee production under climate change. **Nature Food** 3:871–880. DOI: https://doi.org/10.1038/s43016-022-00614-8.

Lashermes P, Combes MC, Robert P, Trouslot P, D'Hont A, Anthony F, Charrier A (1999) Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. **Molecular and General Genetics** 261:259–266. DOI: https://doi.org/10.1007/s004380050965.

Marie L, Abdallah C, Campa C, Courtel P, Bordeaux M, Navarini L, Lonzarich V, Bosselmann AS, Garcia NT, Alpizar E, Georget F, Breitler JC, Etienne H, Bertrand B (2020) G × E interactions on yield and quality in *Coffea arabica*: new F1 hybrids outperform American cultivars. **Euphytica** 216:78. DOI: https://doi.org/10.1007/s10681-020-02608-8.

Martins MQ, Rodrigues WP, Fortunato AS et al. (2016) Protective response mechanisms to heat stress in interaction with high [CO_2] conditions in *Coffea* spp. **Frontiers in Plant Science** 7:947. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00947.

Merga W, Gebreselassie W, Garedew W (2021) Genotype × environment interaction studies of promising Teppi coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes in Southwestern Ethiopia. **International Journal of Agronomy** 2021:1–9. DOI: https://doi.org/10.1155/2021/5519467.

Merga D, Etana D (2023) Influences of salient agronomic practices for mitigation of biennial bearing in coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Plant Sciences** 11:136–143. DOI: https://doi.org/10.11648/j.jps.20231104.15.

Merga D, Beksisa L, Merga W, Alemayehu D (2023) Genetic variability of coffee (*Coffea arabica* L.) germplasm in biennial bearing and its influence on selection efficiency. **International Journal of Agronomy** 2023:9995531. DOI: https://doi.org/10.1155/2023/9995531.

Moreira PC, Abrahão JCR, Porto ACM, Nadaleti DHS, Gonçalves FMA, Carvalho GR, Botelho CE (2022) Progeny selection to develop a sustainable Arabica coffee cultivar. **Agronomy** 12:1144. DOI: https://doi.org/10.3390/agronomy12051144.

Oliveira ACB, Pereira AA, Silva FLS, Rezende JC, Botelho CE, Carvalho GR (2011) Prediction of genetic gains from selection in Arabica coffee progenies. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 11:106–113. DOI: https://doi.org/10.1590/S1984-70332011000200002.

Ortiz-Bobea A, Ault TR, Carrillo CM et al. (2021) Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change** 11:306–312. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1.

Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M, Schroth G (2015) Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PLoS ONE** 10:e0124155. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155.

Partelli FL, Silva FA, Covre AM et al. (2022) Adaptabilidade e estabilidade de *Coffea canephora* a ambientes dinâmicos usando a abordagem Bayesiana. **Scientific Reports** 12:11608. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-15190-x.

Pereira TB, Carvalho JPF, Botelho CE, Resende MDV, Rezende JC, Mendes ANG (2013) Eficiência da seleção de progênies de café F4 pela metodologia de modelos mistos (REML/BLUP). **Bragantia** 72:230–236. DOI: https://doi.org/10.1590/brag.2013.031.

Piepho HP, Eckl T (2014) Analysis of series of variety trials with perennial crops. **Grass and Forage Science** 69:431–440. DOI: https://doi.org/10.1111/gfs.12054.

Pour-Aboughadareh A, Khalili M, Poczai P, Olivoto T (2022) Stability indices to deciphering the genotype-by-environment interaction (GEI) effect: an applicable review for use in plant breeding programs. **Plants** 11:414. DOI: https://doi.org/10.3390/plants11030414.

Ramos HCC, Pereira MG, Viana AP, Luz LN, Cardoso DL, Ferreguetti GA (2014) Combined selection in backcross population of *Carica papaya* L. by the mixed model methodology. **American Journal of Plant Sciences** 5:2973–2983. DOI: https://doi.org/10.4236/ajps.2014.520314.

Rattis L, Brando PM, Macedo MN, Spera SA, Castanho ADA, Marques EQ, Costa NQ, Silverio DV, Coe MT (2021) Climatic limit for agriculture in Brazil. **Nature Climate Change** 11:1098–1104. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01214-3.

Resende MDV (2002) *Genética biométrica e estatística no melhoramento de plantas perenes*. Colombo: Embrapa Florestas; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 975 p.

Resende MDV (2007a) *Matemática e estatística na análise de experimentos e no melhoramento genético*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

Resende MDV (2007b) *SELEGEN-REML/BLUP: sistema estatístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.

Resende MDV, Alves RS (2020) Linear, generalized, hierarchical, Bayesian and random regression mixed models in genetics/genomics in plant breeding. **Functional Plant Breeding Journal** 2:121–152. DOI: https://doi.org/10.35418/2526-4117/v2n2a1.

Resende MDV, Duarte JB (2007) Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 37:182–194. Disponível em: https://revistas.ufg.br/pat/article/view/1867. Acesso em: 15 jun. 2024.

Rodrigues WP, Martins MQ, Fortunato AS et al. (2016) Long-term elevated air [CO_2] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in tropical *Coffea arabica* and *Coffea canephora* species. **Global Change Biology** 22:415–431. DOI: https://doi.org/10.1111/gcb.13088.

Saavedra LM, Caixeta ET, Barka GD, Borém A, Zambolim L, Nascimento M, Cruz CD, Oliveira ACB, Pereira AA (2023) Marker-assisted recurrent selection for pyramiding leaf rust and coffee berry disease resistance alleles in *Coffea arabica* L. **Genes** 14:189. DOI: https://doi.org/10.3390/genes14010189.

Sakata WM (2021) An overview of genotype × environment interaction and yield stability analysis in applied plant breeding: great emphasis given to coffee (*Coffea arabica* L.). **International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology** 11:117–123. DOI: https://doi.org/10.3329/ijarit.v11i2.57264.

Santos BP, Siqueira RAG, Villar JAA, Freitas MAV (2022) Agricultura e irrigação no Brasil no cenário das mudanças climáticas. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável** 1(2). DOI: https://doi.org/10.17271/rtgs.v1i2.3158.

Scalabrin S, Toniutti L, Di Gaspero G et al. (2020) A single polyploidization event at the origin of the tetraploid *Coffea arabica* genome is responsible for the extremely low genetic variation in wild and cultivated germplasm. **Scientific Reports** 10:4642. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-61216-7.

Sera T (2001) Coffee genetic breeding at IAPAR. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 1:179–199. Disponível em: https://periodicos.ufv.br/CBAB/article/view/18103. Acesso em: 15 jun. 2025.

Tefera F, Alamerew A, Wegary D (2020) Genetic variation, heritability and genotype × environment interaction of yield and various agronomic traits of hybrid coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes grown under Jimma–Tepi environments. **International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation** 1:13–18.

Vencovsky R, Barriga P (1992) *Genética biométrica no fitomelhoramento*. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética. Disponível em: https://repositorio.usp.br/item/000829514. Acesso em: 15 jun. 2025.

Weldemichael Abrha G, Kebede SA, Bedada LT, Berecha Yadessa G, Adugna Gutu A (2022) Genotype by environment interaction and yield stability of coffee (*Coffea arabica* L.) genotypes evaluated in Western Ethiopia. **Plant Production Science** 25:467–483. DOI: https://doi.org/10.1080/1343943X.2022.2136722.

Xiao W, Boucher SR, Sexton RJ (2025) Local conditions matter: climate change and coffee production in Brazil. **Climatic Change** 178:183. DOI: https://doi.org/10.1007/s10584-025-04037-9.