



SILVANA RAMLOW OTTO TEIXEIRA DA LUZ

POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CULTIVARES F₂ DE *Coffea arabica* L.

**LAVRAS-MG
2024**

SILVANA RAMLOW OTTO TEIXEIRA DA LUZ

POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CULTIVARES F₂ DE *Coffea arabica* L.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho
Orientador

Dr. Vinícius Teixeira Andrade
Coorientador

Dra. Sônia Maria de Lima Salgado
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Luz, Silvana Ramlow Otto Teixeira da.

Potencial de utilização de cultivares F₂ de *Coffea arabica* L. /
Silvana Ramlow Otto Teixeira da Luz. - 2024.
95 p.

Orientador(a): Gladyston Rodrigues Carvalho.

Coorientador(a): Vinícius Teixeira Andrade, Sônia Maria de
Lima Salgado.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. populações F₂. 2. heterose. 3. resistência genética. I.
Carvalho, Gladyston Rodrigues. II. Andrade, Vinícius Teixeira. III.
Salgado, Sônia Maria de Lima. IV. Título.

SILVANA RAMLOW OTTO TEIXEIRA DA LUZ

POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO DE CULTIVARES F₂ DE *Coffea arabica* L.

POTENTIAL USE OF F₂ CULTIVARS OF *Coffea arabica* L.

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 29 de abril de 2024.

Dr. Vinícius Teixeira Andrade	EPAMIG
Dra. Flávia Maria Avelar Gonçalves	UFLA
Dr. Tiago Teruel Rezende	UFLA
Dr. César Elias Botelho	EPAMIG

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho
Orientador

Dr. Vinícius Teixeira Andrade
Coorientador

Dra. Sônia Maria de Lima Salgado
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2024**

*Aos meus pais, Daído e Lusine,
aos meus irmãos Vanderlei e Ana Vitória,
ao meu esposo Diego, com amor.
Dedico*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela proteção e por me guiar em todos os momentos da minha vida. Dou graças em todas as circunstâncias.

Aos meus pais e aos meus irmãos, pelo exemplo de vida, fé e coragem, e que mesmo longe, estavam sempre comigo.

Ao meu esposo Diego Teixeira da Luz, por todo o amor, compreensão nos momentos de ausência e, principalmente, pelo incentivo. Essa conquista também é sua!

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, pela oportunidade de realização do curso.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) pela parceria, disponibilização da estrutura e recursos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Consórcio Pesquisa Café, Fapemig, INCT-Café e CNPq pelo apoio financeiro para a execução do projeto.

Ao meu orientador, Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho, agradeço pela orientação prestada, pelos conhecimentos transmitidos, disponibilidade em todos os momentos, dedicação, incentivo, paciência, amizade, por ser um exemplo de profissional e por ter confiado em meu trabalho. Agradeço ainda, por ter me acompanhado durante toda a minha trajetória na UFLA, contribuindo para o meu crescimento pessoal e profissional. Eternamente grata por todo o apoio.

Ao meu coorientador, Dr. Vinícius Teixeira Andrade, agradeço pelos conhecimentos, orientação, dedicação, paciência, amizade e comprometimento com o desenvolvimento do trabalho. Por estar sempre disposto a ajudar e por ser um exemplo de profissional. Eu realmente aprendi muito com você.

A minha coorientadora, Dra. Sônia Maria de Lima Salgado, por toda a ajuda e ensinamentos.

Ao pesquisador, Dr. André Domingueti Ferreira, agradeço pela amizade, incentivo, conhecimentos transmitidos e por ser um exemplo de profissional. Muito obrigada!

Ao meu amigo, Mateus Ribeiro Piza, agradeço pelo convívio e parceria na realização de todos os experimentos e pela ajuda nas análises estatísticas. Obrigada pelo apoio, amizade, por ser um exemplo de profissional e de ser humano. Você é uma pessoa admirável!

Ao Departamento de Fitopatologia, em especial a Dra. Deila Magna dos Santos Botelho agradeço por toda ajuda e por não medir esforços para a realização do experimento, pela amizade e boas conversas.

Aos bolsistas da Epamig agradeço pela presença constante, sempre proativos e dispostos a ajudar. Agradeço o auxílio na realização do trabalho.

A todos os funcionários da Epamig – Lavras pela amizade, disponibilidade e convivência, em especial o Sr. Valter que por inúmeras vezes me socorreu com os problemas na casa de vegetação.

À Marli dos Santos Túlio, por toda ajuda, disponibilidade e conselhos durante todo o período da pós-graduação.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho, Dr. Vinícius Teixeira Andrade, Dra. Flávia Maria Avelar Gonçalves, Dr. Tiago Teruel Rezende e Dr. César Elias Botelho, pela disponibilidade e por terem aceitado o convite.

Por fim, expresso minha gratidão a todos que de alguma forma ajudaram na realização desse trabalho.

Muito obrigada!

RESUMO

Na espécie *Coffea arabica* L. as cultivares desenvolvidas são linhagens propagadas por sementes. O desenvolvimento de uma nova linhagem é um processo longo, sendo necessário de 25 a 30 anos de pesquisa, recursos e dedicação dos pesquisadores. Além do tempo, as sucessivas gerações de autofecundação reduzem o vigor híbrido ou heterose impactando na produtividade da linhagem. Dessa forma, novas estratégias devem ser desenvolvidas visando a redução do tempo e a exploração da heterose em café arábica por meio da propagação seminal. Assim foram realizados três trabalhos para avaliar o potencial de populações F₂ de *C. arabica* para resistência a ferrugem alaranjada do cafeeiro, nematoides das galhas, desenvolvimento vegetativo e produtivo. No primeiro trabalho o objetivo foi avaliar o nível de resistência a ferrugem em plantas em geração F₂. Adicionalmente, procurou-se verificar a ação da ferrugem na eficiência fotoquímica e na atividade enzimática das plantas. Populações F₂ de café arábica podem apresentar resistência completa e incompleta a ferrugem, viabilizando o seu uso como cultivares comerciais. A ferrugem do cafeeiro reduz a eficiência dos parâmetros fotossintéticos em plantas com resistência incompleta. A infecção do fungo *Hemileia vastatrix* aumenta a expressão das enzimas SOD e CAT em plantas de *C. arabica* L. No segundo trabalho o objetivo foi avaliar a resistência de populações F₂ de café arábica aos nematoides *Meloidogyne exigua* e *Meloidogyne paranaensis*. Populações F₂ de café arábica podem apresentar 100% de plantas resistentes ao nematoide *Meloidogyne exigua*. Em relação ao nematoide *Meloidogyne paranaensis* o percentual de plantas resistentes obtidas na geração F₂ variaram de 66,7% a 70%. No terceiro trabalho o objetivo foi verificar a potencial produtivo e a heterose dos híbridos F₁ que deram origem às populações F₂ estudadas e avaliar o desempenho e a preservação da heterose de plantas de café arábica em geração F₂. Os híbridos F₁ EPAMIG 36, EPAMIG 02, EPAMIG 44 e EPAMIG 43 apresentaram as maiores produtividades acumuladas nas três safras e a heterose variou de 17,2% a 95,5%. As populações F₂ apresentaram um desenvolvimento inicial satisfatório. Diante dos resultados obtidos conclui-se que é possível obter populações F₂ de *C. arabica* resistentes a ferrugem e aos nematoides das galhas e com bom desenvolvimento inicial.

Palavras-chave: populações F₂; heterose; resistência genética; *Hemileia vastatrix* Berk & Broome; nematoides das galhas.

ABSTRACT

In the species *Coffea arabica* L., the cultivars developed are lines propagated by seeds. The development of a new lineage is a long process, requiring 25 to 30 years of research, resources and dedication from researchers. In addition to time, successive generations of self-fertilization reduce hybrid vigor or heterosis, impacting the productivity of the lineage. Therefore, new strategies must be developed aiming to reduce time and explore heterosis in Arabica coffee through seminal propagation. Thus, three studies were carried out to evaluate the potential of F₂ populations of *C. arabica* for resistance to coffee orange rust, root-knot nematodes, vegetative development and productive. In the first work, the objective was to evaluate the level of resistance to rust in plants in the F₂ generation. Additionally, we sought to verify the effect of rust on the photochemical efficiency and enzymatic activity of plants. F₂ populations of Arabica coffee may present complete and incomplete resistance to rust, making their use as commercial cultivars viable. Coffee rust reduces the efficiency of photosynthetic parameters in plants with incomplete resistance. Infection of the fungus *Hemileia vastatrix* increases the expression of SOD and CAT enzymes in *C. arabica* L plants. In the second work, the objective was to evaluate the resistance of F₂ populations of Arabica coffee to the nematodes *Meloidogyne exigua* and *Meloidogyne paranaensis*. F₂ populations of Arabica coffee may have 100% plants resistant to the nematode *Meloidogyne exigua*. In relation to the nematode *Meloidogyne paranaensis*, the percentage of resistant plants obtained in the F₂ generation ranged from 66,7% to 70%. In the third work, the objective was to verify the productive potential and heterosis of the F₁ hybrids that gave rise to the F₂ populations studied and to evaluate the performance and preservation of heterosis of Arabica coffee plants in the F₂ generation. The F₁ hybrids EPAMIG 36, EPAMIG 02, EPAMIG 44 and EPAMIG 43 presented the highest accumulated productivity in the three harvests and heterosis varied from 17.2% to 95.5%. The F₂ populations showed satisfactory initial development. Given the results obtained, it is concluded that it is possible to obtain F₂ populations of *C. arabica* resistant to rust and root-knot nematodes and with good initial development.

Keywords: F₂ populations; heterosis; genetic resistance; *Hemileia vastatrix* Berk & Broome; root-knot nematodes.

INDICADORES DE IMPACTO

A definição de novas estratégias de melhoramento genético para o cafeeiro arábica resulta em impactos diretos para toda a sociedade. Com a validação da técnica das cultivares F_2 o tempo para o lançamento de uma nova cultivar passará de 25 a 30 anos com a utilização dos métodos convencionais para 10 a 12 anos, o que significa que mais tecnologias serão disponibilizadas aos cafeicultores em um menor período de tempo resultando em economia de recursos, o que impacta diretamente a economia brasileira. Outro ponto relevante em relação as cultivares F_2 é a garantia da sustentabilidade ambiental, social e econômica da cafeicultura. Os resultados encontrados neste estudo demonstram que é possível desenvolver cultivares F_2 com resistência múltipla as principais pragas e doenças que acometem a cafeicultura, o que reduzirá o número de aplicações de agroquímicos na lavoura cafeeira. Além disso, as cultivares F_2 podem apresentar produtividades superiores as linhagens tradicionais resultando em aumento da produção brasileira sem a necessidade de expandir a área plantada, melhorando assim, a rentabilidade do cafeicultor. Cultivares F_2 é uma tecnologia que apresenta um desempenho superior em relação as linhagens tradicionais sob a ótica ambiental, social e econômica. O que as tornam mais sustentáveis, na medida em que aumentam a renda, melhoram as condições sociais e contribuem para a redução dos impactos ambientais da produção agrícola.

IMPACT INDICATORS

The definition of new genetic improvement strategies for the Arabica coffee tree results in direct impacts on society as a whole. With the validation of the F_2 cultivar technique, the time to launch a new cultivar will go from 25 to 30 years using conventional methods to 10 to 12 years, which means that more technologies will be made available to coffee growers in a shorter period of time. time resulting in resource savings, which directly impacts the Brazilian economy. Another relevant point in relation to F_2 cultivars is the guarantee of environmental, social and economic sustainability of coffee farming. The results found in this study demonstrate that it is possible to develop F_2 cultivars with multiple resistance to the main pests and diseases that affect coffee farming, which will reduce the number of agrochemical applications in coffee crops. Furthermore, F_2 cultivars can present higher productivity than traditional strains, resulting in an increase in Brazilian production without the need to expand the planted area, thus improving the profitability of the coffee grower. Cultivars F_2 is a technology that presents superior performance compared to traditional strains from an environmental, social and economic perspective. This makes them more sustainable, as they increase income, improve social conditions and contribute to reducing the environmental impacts of agricultural production.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE.....	12
1	INTRODUÇÃO GERAL	13
	REFERÊNCIAS.....	15
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*.....	17
	ARTIGO 1 – CULTIVARES F₂ DE <i>Coffea arabica</i> L.? POTENCIAL PARA RESISTÊNCIA A FERRUGEM.....	18
1	INTRODUÇÃO.....	20
2	DESENVOLVIMENTO.....	22
3	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42
	ANEXO A.....	48
	ARTIGO 2 - POPULAÇÕES F₂ DE <i>Coffea arabica</i> L. RESISTENTES AOS NEMATÓIDES DAS GALHAS.....	52
1	INTRODUÇÃO.....	54
2	DESENVOLVIMENTO.....	56
3	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	67
	ARTIGO 3 – POTENCIAL DE HÍBRIDOS F₁ E DE POPULAÇÕES F₂ DE <i>Coffea arabica</i> L.....	71
1	INTRODUÇÃO.....	73
2	DESENVOLVIMENTO.....	75
3	CONCLUSÃO.....	90
	REFERÊNCIAS.....	91
	ANEXO A.....	94

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

O gênero *Coffea* pertence à família Rubiaceae e contém 124 espécies descritas (Davis *et al.*, 2011). Dentre essas espécies, somente o *Coffea arabica* L. e o *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner, possuem expressão econômica e são cultivadas em grande escala (Davis *et al.*, 2006). Na espécie *Coffea arabica* L. as plantas são autógamas, alotetraplóides e originadas da hibridação natural de *C. canephora* e *C. eugenoides* (Lashermes *et al.*, 1999). Devido à predominância de autopolinização na espécie, as cultivares desenvolvidas são linhagens, que propagadas por sementes dão origem a lavouras uniformes (Andreazi *et al.*, 2015, Medina Filho; Bordignon, 2008). O desenvolvimento de uma linhagem é um processo longo, sendo necessário de 25 a 30 anos de pesquisa, recursos e dedicação dos pesquisadores (McCook; Montero-Mora, 2024). O processo para a obtenção de uma nova linhagem requer a escolha dos genitores, hibridação e sucessivos ciclos de autofecundação e seleção para a fixação das características de interesse na nova cultivar, permitindo a propagação por meio de sementes de plantas homogêneas e estáveis (Queiroga *et al.*, 2021).

Aumentos significativos nas características de interesse agrônomico constituem-se de um dos principais objetivos dos programas de melhoramento, sendo o aumento de produtividade um dos caracteres mais almejados pelos melhoristas (Suárez; Ramos, 2023). Em outras culturas agrícolas as maiores produtividades foram alcançadas com a exploração da heterose pelo plantio comercial de híbridos F₁ (Schnable; Springer, 2013). A heterose é a superioridade das plantas F₁ em relação aos seus genitores para as características em consideração (Shull, 1908; Lui *et al.*, 2019). Em *C. arabica* L., a heterose já foi observada por diversos autores (Andreazi *et al.*, 2015; Bertrand *et al.*, 2005, 2021; Etienne *et al.*, 2002; Kahsay *et al.*, 2023) e os resultados obtidos foram aumentos expressivos na produtividade em relação as cultivares homozigotas.

Além de maiores produtividades, outras vantagens dos híbridos F₁ são a redução do tempo para disponibilizar novas cultivares, de 8 a 10 anos (Caixeta *et al.*, 2008; McCook; Montero-Mora, 2024) e a resistência múltipla a pragas e doenças do cafeeiro (Andreazi *et al.*, 2015). O desenvolvimento de cultivares com resistência genética a ferrugem alaranjada do cafeeiro (*Hemileia vastatrix*) e aos nematoides das galhas (*Meloidogyne* spp.) por exemplo, tem sido um desafio para os pesquisadores ao longo dos anos. E por meio de cruzamentos entre genótipos complementares para estas características é possível obter plantas, já na geração F₁, com resistência simultânea a

esses fitopatógenos que causam sérios prejuízos aos cafeicultores (Ito *et al.*, 2004; Sera *et al.*, 2005).

Em *C. arabica* L., a comercialização de sementes híbridas é inviável e antieconômica, devido ao reduzido número de sementes obtidas por meio dos cruzamentos manuais (Sera; Alves, 1999). Desta forma, técnicas como a embriogênese somática, miniestacas, estaquia caulinar e macho esterilidade tem sido estudada por pesquisadores no Brasil e em outros países do mundo (Georget *et al.*, 2019; Matamoros-Quesada *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2019; Rezende *et al.*, 2017) visando viabilizar a propagação comercial dos híbridos F₁, assim como a adesão dos cafeicultores a essa tecnologia. Em países da América Central mudas de híbridos F₁ produzidas via embriogênese somática têm sido disponibilizadas para os produtores (McCook; Montero-Mora, 2024). Entretanto, no Brasil a produção de mudas clonais via embriogênese somática é uma técnica que ainda não foi explorada comercialmente.

Nesse sentido, outras alternativas devem ser desenvolvidas e testadas pelos programas de melhoramento genético de *C. arabica* L. como por exemplo, a viabilidade do plantio de lavouras comerciais com plantas em geração F₂. Neste aspecto, a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) têm conduzido trabalhos com populações F₂ de *C. arabica* L., visando a utilização deste tipo de cultivares de forma comercial pelos cafeicultores.

Portanto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o potencial de populações F₂ de *C. arabica* L. para resistência a ferrugem alaranjada do cafeeiro, nematoides das galhas e maior produtividade em relação às linhagens homozigotas. Essa tecnologia já se mostrou viável em outras espécies de plantas e precisa ser verificada para o cafeeiro arábica pois pode-se, teoricamente, explorar metade da heterose via propagação seminal.

2 REFERÊNCIAS

- ANDREAZI, Elder *et al.* Desempenho de híbridos F₁ de café arábica com resistência simultânea a ferrugem, mancha aureolada e bicho mineiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 375 - 382, jul./set. 2015.
- BERTRAND, Benoit *et al.* *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. **Euphytica**, Dordrecht, v. 141, n. 3, p. 255-262, Jan. 2005.
- BERTRAND, Benoit *et al.* Breeding for the Main Agricultural Farming of Arabica Coffee. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, volume 5, august 2021. doi: 10.3389/fsufs.2021.709901
- CAIXETA, Eveline Teixeira *et al.* Biotecnologia aplicada ao melhoramento genético do cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. de. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: EMBRAPA Café, v. 1, p. 101-125, 2008.
- DAVIS, Aaron P. *et al.* An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**. Londres, 152(4):465-512, 2006.
- DAVIS, Aaron P. *et al.* Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data: implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**. 167:357-377, 2011.
- ETIENNE, Hervé *et al.* Biotechnological application for the improvement of coffee (*Coffea arabica* L.). **Vitro Cellular & Developmental Biology**, v. 38. p. 129-138, 2002.
- GEORGET, Frédéric *et al.* Starmaya: The First Arabica F₁ Coffee Hybrid Produced Using Genetic Male Sterility. **Front. Plant Sci.** 10: 1344. doi: 10.3389/fpls.2019.01344, 2019.
- ITO, Dhalton Shiguer *et al.* Identificação de cafeeiros resistentes à mancha aureolada em genótipos portadores de genes de *Coffea racemosa* e SH1. **SBPN - Scientific Journal**, São Paulo, v. 8, p. 19, 2004.
- KAHSAY, Goytom Abraha *et al.* New coffee varieties as a climate adaptation strategy: Empirical evidence from Costa Rica. **World Development Sustainability** 2, 2023.
- LASHERMES, P. *et al.* Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica*, L. **Genome. Mol. Gen. Genet**, 1999.
- LUI, Jie *et al.* Exploring the molecular basis of heterosis for plant breeding. **Journal of Integrative Plant Biology**, 2019.

MCCOOK, Stuart.; MONTERO-MORA, Andrea. Coffee breeding in a time of crisis: F₁ hybrids in Central America since 1990. **Plants People Planet**, 1-10, 2024. DOI: 10.1002/ppp3.10480

MATAMOROS-QUESADA, Andrey; MESÉN-SEQUEIRA, Francisco; JIMÉNEZ-ALVARADO, Luis Diego. Efecto de fitohormonas y fertilizantes sobre el enraizamiento y crecimiento de mini-estaquillas de híbridos F₁ de café (*Coffea arabica*). **Revista de Ciencias Ambientales**, 54(1), 58–75, 2020. <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.4>

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R. Melhoramento do café arábica ao longo dos anos. In: CARVALHO, C. H. S. de. (Org.). Cultivares de café. Brasília: Embrapa Café, p. 65-82, 2008.

OLIVEIRA, Kenia Carvalho de *et al.* Effects of somatic embryogenesis on gene expression of cloned coffee heterozygous hybrids. **Acta Physiologiae Plantarum**, 41:118, 2019.

QUEIROGA, Vicente de Paula *et al.* Sistema produtivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado. In: QUEIROGA, V. A. et al. (ed.). Cultivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado para produção de grãos de alta qualidade. 1ª ed. Campina Grande: AREPB, 2021.

REZENDE, Tiago Teruel *et al.* Propagação vegetativa do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) por miniestacas. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 1, p. 91 - 99, jan./mar. 2017.

SCHNABLE, Patrick. S.; SPRINGER, Nathan. M. Progress toward understanding heterosis in crop plants. **Annu Rev Plant Biol.** 2013; 64: 71–88. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103827>

SERA, T.; ALVES, S. J. Melhoramento genético de plantas perenes. In: Destro, D.; MONTALVÁN, R. (Org.). Melhoramento genético de plantas. Editora UEL, Londrina, p.369- 422, 1999.

SERA, Gustavo Hiroshi *et al.* Identificação de híbridos de café com resistência múltipla à ferrugem, bicho-mineiro e nematoides. SPCB (04.: 2005: Londrina, PR) - Resumos Expandidos 348, 2005.

SHULL, George. H. The composition of a field maize. Report American Breeders Association, 4:296-301, 1908.

SUÁREZ, Juan Carlos Arias; RAMOS, Cláudia Patricia Flórez. Identification of sources of male sterility in the Colombian Coffee Collection for the genetic improvement of *Coffea arabica* L. **PLOS ONE**, 18(9): e0291264, 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0291264>

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*

ARTIGO 1 - CULTIVARES F₂ DE *Coffea arabica* L.? POTENCIAL PARA A RESISTÊNCIA A FERRUGEM

RESUMO

O nível de resistência a ferrugem alaranjada do cafeeiro, o efeito na eficiência fotoquímica e a atividade enzimática em plantas em geração F₂ de *Coffea arabica* foi avaliado objetivando-se selecionar populações F₂ resistentes a ferrugem e com potencial para serem utilizadas como cultivares. Para a avaliar o nível de resistência a ferrugem do cafeeiro foram realizados dois experimentos em delineamento em blocos casualizados com nove populações F₂ e cinco cultivares, totalizando 14 tratamentos, com 30 repetições e uma planta na parcela. Quando as plantas atingiram de quatro a seis pares de folhas foi realizada a inoculação para a ferrugem com uma suspensão na concentração de $2,3 \times 10^{-6}$ urediniósporos mL⁻¹. Foram realizadas avaliações para severidade, semanalmente, a partir dos primeiros sintomas da doença, sendo a primeira avaliação aos 22 dias após a inoculação, totalizando cinco avaliações. Aos 50 dias após a inoculação foram avaliadas a eficiência fotoquímica máxima do PSII (Fv/Fm), taxa de transporte de elétrons (ETR), eficiência quântica da antena do PSII (Fv'/Fm'), quenching fotoquímico (qP), quenching não-fotoquímico (qN e NPQ), eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII), quenching fotoquímico (qL) por meio do MINI PAN em cinco tratamentos contrastantes para a resistência à ferrugem o T32, T144, MGS Aranãs, IAC 125 RN e Catuaí Vermelho IAC 99. Para a extração e quantificação das enzimas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) mudas de cinco tratamentos sendo o T32, T144, MGS Aranãs, IAC 125 RN e Catuaí Vermelho IAC 99 foram inoculadas com uma suspensão na concentração de 3×10^{-6} urediniósporos mL⁻¹ e as folhas coletadas em seis tempos sendo, 0 (sem inoculação), 24, 36, 48, 72, 96 e 120 horas após a inoculação. Populações F₂ de café arábica podem apresentar resistência completa e incompleta a ferrugem. A ferrugem do cafeeiro reduz a eficiência dos parâmetros fotossintéticos em plantas com resistência incompleta. A infecção do fungo *Hemileia vastatrix* aumenta a expressão das enzimas SOD e CAT em plantas de *C. arabica* L.

Palavras-chave: populações F₂; *Hemileia vastatrix*; melhoramento genético.

F₂ CULTIVARS OF *Coffea arabica* L.? POTENTIAL FOR RUST RESISTANCE

ABSTRACT

The level of resistance to orange rust in coffee trees, the effect on photochemical efficiency and enzymatic activity in plants in the F₂ generation of *Coffea arabica* were evaluated with the aim of selecting F₂ populations resistant to rust and with the potential to be used as cultivars. To evaluate the level of resistance to coffee rust, two experiments were carried out in a randomized block design with nine F₂ populations and five cultivars, totaling 14 treatments, with 30 replications and one plant in the plot. When the plants reached four to six pairs of leaves, rust was inoculated with a suspension at a concentration of $2,3 \times 10^{-6}$ urediniospores mL⁻¹. Severity assessments were carried out weekly from the first symptoms of the disease, with the first assessment being 22 days after inoculation, totaling five assessments. At 50 days after inoculation, the maximum photochemical efficiency of PSII (Fv/Fm), electron transport rate (ETR), quantum efficiency of the PSII antenna (Fv'/Fm'), photochemical quenching (qP), quenching non-photochemical (qN and NPQ), effective quantum efficiency of PSII (Φ PSII), photochemical quenching (qL) using MINI PAN in five contrasting treatments for rust resistance: T32, T144, MGS Aranãs, IAC 125 RN and Catuaí Vermelho IAC 99. For the extraction and quantification of the enzymes superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), seedlings from five treatments being T32, T144, MGS Aranãs, IAC 125 RN and Catuaí Vermelho IAC 99 were inoculated with a suspension at the concentration of 3×10^{-6} urediniospores mL⁻¹ and the leaves collected at six times, 0 (without inoculation), 24, 36, 48, 72, 96 and 120 hours after inoculation. F₂ populations of Arabica coffee may present complete and incomplete resistance to rust. Coffee rust reduces the efficiency of photosynthetic parameters in plants with incomplete resistance. Infection with the fungus *Hemileia vastatrix* increases the expression of SOD and CAT enzymes in *C. arabica* L.

Keywords: F₂ populations; *Hemileia vastatrix*; genetical enhancement.

1 INTRODUÇÃO

Os programas de melhoramento genético do cafeeiro contribuíram significativamente para o desenvolvimento da cafeicultura no Brasil e em diversos países do mundo. Em relação a espécie *Coffea arabica* L. foram desenvolvidas cultivares com importantes características agronômicas e adaptadas as mais diversas regiões produtoras. Devido às suas particularidades, como a predominância de autofecundação, as cultivares desenvolvidas são do tipo linhagens, com características homogêneas e propagadas por sementes (Andreazi *et al.*, 2015).

Para o desenvolvimento de uma linhagem são realizados cruzamentos intra ou interespecíficos para a obtenção de populações segregantes, seguida de sucessivas autofecundações, teste de progênies e seleções (Carvalho, 2008; Sakiyama *et al.*, 1999). Trata-se de um processo demorado, devido à necessidade de se avaliar as progênies no decorrer do tempo e do período juvenil longo do cafeeiro. Há estimativas de que para o lançamento de uma nova cultivar de café, sejam necessários de 25 a 30 anos de pesquisas, recursos e dedicação dos pesquisadores, até que as características desejadas sejam fixadas (Mccook; Montero-Mora, 2024; Queiroga *et al.*, 2021). Além do tempo, com as sucessivas gerações de autofecundação ocorre a redução da produtividade, devido a perda do vigor híbrido ou heterose (Borém; Miranda, 2009).

A heterose consiste na superioridade dos híbridos F_1 em relação aos seus genitores para as características em consideração (Lui *et al.*, 2019; Shull, 1908). Além de maiores produtividades, pode promover maior facilidade de combinar diferentes alelos de resistência a pragas e doenças (Andreazi *et al.*, 2015; Ito *et al.*, 2004). Pela piramidação de alelos é possível acumular em um único genótipo a resistência contra as mesmas ou diferentes doenças (Fuchs, 2017; Lui *et al.*, 2020; Saavedra *et al.*, 2023). Essa estratégia, facilitaria o desenvolvimento de cultivares com resistência durável a ferrugem do cafeeiro, por exemplo, devido a possibilidade da combinação de diferentes genes de resistência (Sera *et al.*, 2005) aumentando-se as chances de promover maior durabilidade da resistência genética (Fuchs, 2017; Lui *et al.*, 2020).

A ferrugem causada pelo fungo *Hemileia vastatrix* Berk. et Br., é considerada a mais importante doença do cafeeiro (Alfonsi *et al.*, 2019). Embora, já tenham sido desenvolvidas várias cultivares de *C. arabica* resistentes ao patógeno, os trabalhos do melhoramento genético nessa área, devem ser contínuos. Visto que, o fungo *H. vastatrix*, apresenta grande variabilidade genética e o aparecimento de novas raças

fisiológicas tem causado a quebra de resistência das cultivares, sendo difícil prever a durabilidade da resistência nas cultivares atuais (Cabral *et al.*, 2016; Talhinhos *et al.*, 2017; Várzea *et al.*, 2002).

Embora a utilização de híbridos de *C. arabica* represente uma estratégia para a obtenção de maiores produtividades, resistência a pragas e doenças e redução do tempo para a obtenção de novas cultivares, a comercialização de sementes híbridas F₁ para os produtores é antieconômica (Sera; Alves, 1999) e a multiplicação clonal em alta escala ainda possui algumas particularidades para o domínio de uma metodologia que viabilize a produção em escala comercial (Andrade *et al.*, 2023; Rezende *et al.*, 2017).

Devido os entraves para a exploração comercial de híbridos F₁, outras estratégias devem ser desenvolvidas pelos programas de melhoramento genético do café. Nesse aspecto, o programa de melhoramento genético do cafeeiro da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) têm estudado a viabilidade de desenvolver cultivares F₂ de *C. arabica* visando explorar certa proporção da heterose propagada por meio de sementes.

Diante do exposto, o objetivo foi avaliar o nível de resistência a ferrugem em plantas de *C. arabica* em geração F₂ visando verificar o potencial das populações para serem utilizadas como cultivares. Adicionalmente, procurou-se verificar a ação da ferrugem na eficiência fotoquímica e na atividade enzimática da planta. No futuro, caso a hipótese da possibilidade da exploração da heterose para produtividade via semente for confirmada, já possuímos resultados promissores para a resistência a essa importante doença.

2 DESENVOLVIMENTO

MATERIAL E MÉTODOS

Foram avaliadas nove populações em geração F₂ visando verificar o potencial de resistência a ferrugem do cafeeiro e cinco cultivares como padrões suscetíveis (Catuaí Vermelho IAC 99) e resistentes (Acauã Novo, MGS Paraíso 2, MGS Aranãs e IAC 125 RN) totalizando 14 tratamentos (Tabela 1). Foi realizado dois experimentos. Os experimentos foram instalados em delineamento em blocos casualizado (DBC) com 30 repetições cada, sendo uma planta na parcela.

Tabela 1 – Características dos cruzamentos e relação das populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. avaliadas quanto a resistência a ferrugem do cafeeiro.

Item	Identificação	Características dos cruzamentos
1	T15	Suscetível x Resistente
2	T17	Resistente x Moderadamente Resistente
3	T28	Suscetível x Resistente
4	T32	Resistente x Resistente
5	T44	Moderadamente Resistente x Resistente
6	T89	Suscetível x Resistente
7	T103	Resistente x Resistente
8	T105	Moderadamente Resistente x Moderadamente Resistente
9	T144	Resistente x Moderadamente Resistente
10*	Acauã Novo	-
11*	MGS Paraíso 2	-
12*	MGS Aranãs	-
14*	IAC 125 RN	-
14*	Catuaí Vermelho	-
	IAC 99	

*Cultivares utilizadas como testemunhas

Para a produção de mudas, foram coletados frutos maduros das cultivares e dos híbridos F₁ em uma mistura proporcional das 18 plantas contidas no experimento para a produção das sementes. As sementes foram semeadas em caixas de areia. Quando as plântulas atingiram a fase cotiledonar foram transplantadas para tubetes de 120ml com substrato Tropstrato HT e fertilizante de liberação controlada Osmocote Plus 4M 15-09-12 e conduzidas com sombreamento de 50% em casa de vegetação no Campo Experimental de Lavras-MG (CELA) da Epamig até atingirem de quatro a seis pares de folhas.

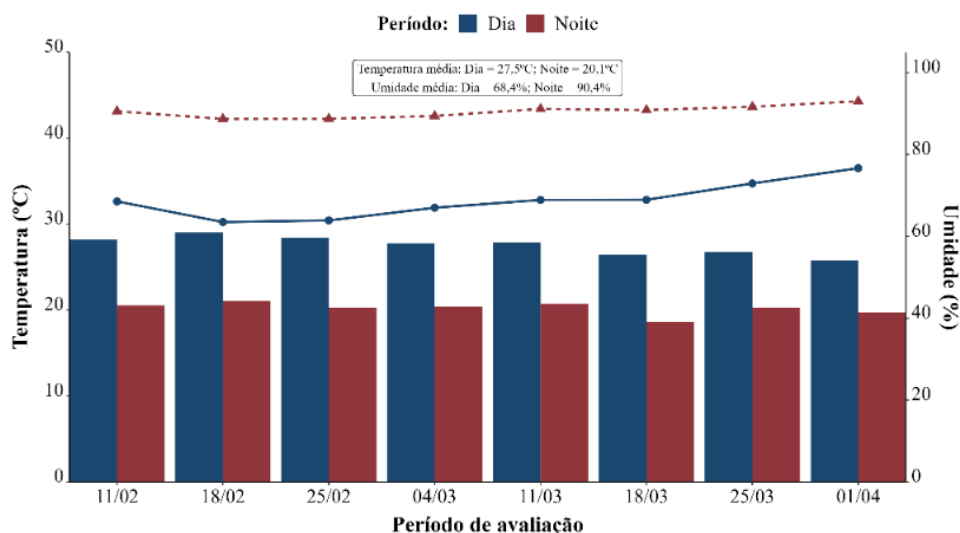
Para a obtenção do inóculo de *H. vastatrix*, foram coletadas folhas de cafeeiro infectadas, naturalmente, em uma lavoura sem controle químico. A coleta dos

urediniósporos foi realizada com auxílio de cápsula e, em seguida, acondicionados em microtubos de 2 mL até o momento da inoculação.

O experimento foi instalado em casa de vegetação no Departamento de Fitopatologia na Universidade Federal de Lavras. A viabilidade dos uredósporos de *H. vastatrix* foi avaliada pelo teste de germinação em meio ágar- água 2%, usando o método descrito por Zambolim e Chaves (1974), antes da inoculação nas plantas das populações de cafeeiros. Somente os uredósporos com viabilidade superior a 30% foram considerados adequados para os testes de inoculação.

A inoculação foi realizada quando as plantas apresentaram de quatro a seis pares de folhas, com uma suspensão na concentração de $2,3 \times 10^{-6}$ urediniósporos mL⁻¹, aplicada em dois pares de folhas da planta com o auxílio de borrifador, na face abaxial das folhas. Imediatamente após a inoculação, as mudas foram mantidas em câmara úmida no escuro, por 72 horas, visando propiciar molhamento foliar para facilitar o processo de infecção. Durante o período experimental, as plantas foram mantidas com uma temperatura média de 24,3°C, umidade relativa média de 79,4% e tempo médio diário com temperatura em ponto de orvalho de 13 horas (Figura 1). Após a inoculação as plantas foram monitoradas diariamente até o aparecimento dos primeiros sintomas. As avaliações da severidade da ferrugem foram realizadas, semanalmente, a partir dos primeiros sintomas da doença, aos 22 dias após a inoculação, totalizando cinco avaliações por meio de escala diagramática proposta por Capucho *et al.* (2011).

Figura 1 – Temperatura e umidade relativa do ar durante o período de condução do experimento.



Posteriormente foi calculada a área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) (Shaner; Finney, 1977), segundo a fórmula:

$$AACPD = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{Y_i + Y_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i)$$

Em que:

AACPD = área abaixo da curva de progresso da doença (severidade);

n: número total de avaliações;

y_i: proporção da doença em porcentagem de severidade na i-ésima observação;

t_i = tempo em dias na i-ésima observação.

Para a classificação de resistência, utilizou-se metodologia de Conceição, Fazuoli e Braghini (2005), na qual os acessos foram classificados como imunes quando não ocorrer qualquer sinal de infecção visível; resistente quando acessos apresentarem flecks (reação de hipersensibilidade) visíveis macroscopicamente; lesões cloróticas; pequenas tumefações sem ocorrência de esporulação. Moderadamente resistente quando acessos com flecks; lesões cloróticas, pequenas tumefações e início de esporulação. Moderadamente susceptível quando acessos apresentarem flecks; tumefações lesões cloróticas, associadas com tumefações com pouca, média ou maior esporulação. Susceptível, acessos com esporulações intensas ocorrendo muitas pústulas por folha.

Parâmetros fotossintéticos

Aos 50 dias após a inoculação, ocasião da quinta e última avaliação de severidade a ferrugem foram selecionados cinco tratamentos (T32, T144, MGS Aranãs, IAC 125 RN e Catuaí Vermelho IAC 99) contrastantes para a severidade ao fungo e avaliados os parâmetros fotossintéticos com o fluorímetro portátil de luz modulada MINI-PAM (Walz, Effeltrich, Germany) no par de folhas mais jovem completamente expandido e que tinha sido inoculado inicialmente com o fungo.

Os parâmetros fotossintéticos foram avaliados entre 8 e 11h, por meio do fluorímetro portátil de luz modulada MINI-PAM. Em folhas adaptadas ao escuro por meia-hora foram avaliadas as fluorescências mínimas (F_o) e máxima (F_m). Assim foi possível calcular o máximo eficiência fotoquímica máxima do fotossistema II (PSII),

$F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$. Foram obtidos os parâmetros de eficiência quântica efetiva do fotossistema II ($\Phi_{FSII} = [DF/FM' = FM' - (F/FM')]$), taxa de transporte de elétrons ($ETR = \Phi_{FSII} \times RFA \times 0,5 \times 0,84$), quenching fotoquímico ($qP = (F_m' - F)/(F_m' - F_0')$), quenching não-fotoquímico ($qN = F_m - F_m'/F_v$), quenching fotoquímico baseado no modelo lake ($qL = (F_m' - F) \cdot F_0' / (F_m' - F_0')$) e quenching não-fotoquímico ($NPQ = (F_m - F_m') / F_m'$) (Henriques, 2009).

Extração e quantificação das Enzimas

Para a avaliação da resposta de defesa das plantas a ação do fungo *Hemileia vastatrix* sementes de cinco tratamentos ((T32, T144, MGS Aranhãs, IAC 125 RN e Catuaí Vermelho IAC 99) foram semeadas em tubetes de 120ml com substrato Tropstrato HT e fertilizante de liberação controlada Osmocote Plus 4M 15-09-12 e conduzidas com sombreamento de 50% em casa de vegetação no Campo Experimental de Lavras-MG (CELA) da Epamig até atingirem de quatro a seis pares de folhas. Em seguida foram levadas para o Departamento de Fitopatologia na Universidade Federal de Lavras dispostas em delineamento em blocos casualizados com quatro repetições e inoculadas com uma suspensão na concentração de 3×10^{-6} urediniosporos mL⁻¹. As folhas foram coletadas e condicionadas em pacotes de papel alumínio em nitrogênio líquido, logo após a coleta, para impedir a oxidação, posteriormente, as amostras foram armazenadas a -80°C. As coletas foram realizadas em seis tempos sendo, 0 (sem inoculação), 24, 36, 48, 72, 96 e 120 horas após a inoculação. As coletas das folhas em cada tempo foram realizadas em plantas diferentes.

Para extrações das enzimas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), amostras de 100 mg de folhas frescos foram maceradas em nitrogênio líquido com 50% de PVPP e homogeneizado com 1,5 mL de tampão fosfato de potássio (400 mM, pH 7,8) contendo ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) 10 mM e ácido ascórbico 200 mM (Biemelt; Keetman; Albrecht, 1998). O extrato foi centrifugado a 13.000 g por 10 min a 4°C e o sobrenadante foi coletado para quantificar a atividade enzimática. A dosagem proteica foi determinada pelo método de Bradford (1976). Todas as atividades das enzimas foram realizadas em triplicata.

A atividade da SOD foi quantificada segundo metodologia descrita por Giannopolitis e Ries (1977), que se baseia na capacidade de inibir a fotorredução do

azul de nitrotetrazólio (NBT). Uma alíquota da amostra foi adicionada ao meio de incubação contendo 100 μL de tampão fosfato de potássio (100 mM, pH 7,8), 40 μL de L-metionina (70 mM), 3 μL de EDTA (10 mM), 15 μL de NBT. (10 mM), 2 μL de riboflavina (0,2 mM) e 30 μL de água deionizada. A reação foi realizada sob luz fluorescente (20 W) durante sete minutos, sendo o branco composto por água deionizada mais meio de incubação. A formação do formazan azul, derivado da redução do NBT, foi determinada pela leitura do espectrofotômetro a 560 nm. Uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir a redução do NBT em 50%.

A atividade da CAT foi quantificada segundo Havir e Mchale (1987). Alíquotas do extrato enzimático foram adicionadas ao meio de incubação, contendo 90 μL de tampão fosfato de potássio (200 mM, pH 7,0) e 72 μL de água deionizada e incubadas a 30 °C em banho-maria. No momento da leitura foram adicionados 9 μL de H_2O_2 (250 mM). Em seguida, a atividade da CAT foi medida pela diminuição da absorbância a 240 nm a cada 15s durante um período de 3 min, monitorada pelo consumo de peróxido de hidrogênio.

Analises estatísticas

Os dados foram analisados utilizando a abordagem de modelos mistos. Os experimentos foram analisados individualmente com o modelo um e a normalidade dos resíduos avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965) e a significância das variâncias testada com base no teste de razão de verossimilhança (LRT).

(1)

$$\bar{y} = \mu + X_r \tau_r + X_p u_p + \varepsilon$$

em que:

\bar{y} : valor observado para a característica em avaliação;

μ : Constante associada a todas as observações;

$X_r \tau_r$: vetor do efeito fixo de repetições;

$X_p u_p$: vetor do efeito de progênie (aleatório), $p \sim N(0, I\sigma_p^2)$.

ε : vetor de erros associado (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

Posteriormente, a avaliação da homogeneidade das variâncias residuais foi realizada conforme Pimentel-Gomes (2015) e em seguida, procedeu-se com a análise conjunta entre os dois experimentos, conforme equação dois.

(2)

$$\bar{y} = \mu + X_{r(b)}\tau_{r(b)} + X_b\tau_b + X_p u_p + X_{pb}u_{pb} + \varepsilon$$

em que:

\bar{y} : valor observado para a característica em avaliação;

μ : Constante associada a todas as observações;

$X_{r(b)}\tau_{r(b)}$: vetor dos efeitos fixos de repetição alinhados com as repetições dos experimentos;

$X_b\tau_b$: vetor dos efeitos fixos de repetição do experimento;

$X_p u_p$: vetor do efeito de progênies (aleatório), $p \sim N(0, I\sigma_p^2)$;

$X_{pb}u_{pb}$: vetor da interação de progênies e repetições do experimento (aleatório), $pb \sim N(0, I\sigma_{pb}^2)$;

ε : vetor de erros associado (aleatório), $\varepsilon \sim N(0, I\sigma_\varepsilon^2)$.

Em um segundo passo, foram realizadas análises exploratórias em que se quantificou o progresso da ferrugem ao longo das avaliações realizadas, com base na porcentagem de infecção, a porcentagem de desfolha, incidência de ferrugem nas folhas inoculadas e a classificação fenotípica da resistência ao nível de plantas, mensurada em porcentagem entre as 30 plantas avaliadas para cada tratamento, totalizando 60 plantas.

Os dados fisiológicos obtidos pelo equipamento mini-pan foram analisados utilizando o modelo da equação três, em que se adequou os dados a um esquema de parcela subdividida no tempo, em função da coleta de dados para os nove pulsos. As médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974) ao nível de 0,05 de significância.

(3)

$$\bar{y}_{ijk} = \mu + r_k + p_j + rp_{k(j)} + g_i + gp_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

em que:

\bar{y}_{ijk} : Valor da variável avaliada na progênie i no pulso j e na repetição k ;

μ : Constante associada a todas as observações;

r_k : Efeito fixo da repetição k ;

p_j : efeito fixo do pulso j ;

$rp_{k(j)}$: erro entre a repetição k e o pulso j ;

g_i : Efeito fixo da progênie i ;

gp_{ij} : efeito da interação entre a progênie i e o pulso j ;

ε_{ijk} : erro experimental aleatório da variável na progênie i no pulso j e repetição k .

As análises dos dados das diferentes enzimas mensuradas foram realizadas utilizando o modelo da equação quatro e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974) ao nível de 0,05 de significância.

(4)

$$\bar{y}_{ij} = \mu + r_j + g_i + \varepsilon_{ij}$$

em que:

\bar{y}_{ij} : Valor da variável avaliada na progênie i na repetição j ;

μ : Constante associada a todas as observações;

r_j : Efeito fixo da repetição j ;

g_i : Efeito fixo da progênie i ;

ε_{ij} : Erro experimental aleatório da variável avaliada na progênie i na repetição j .

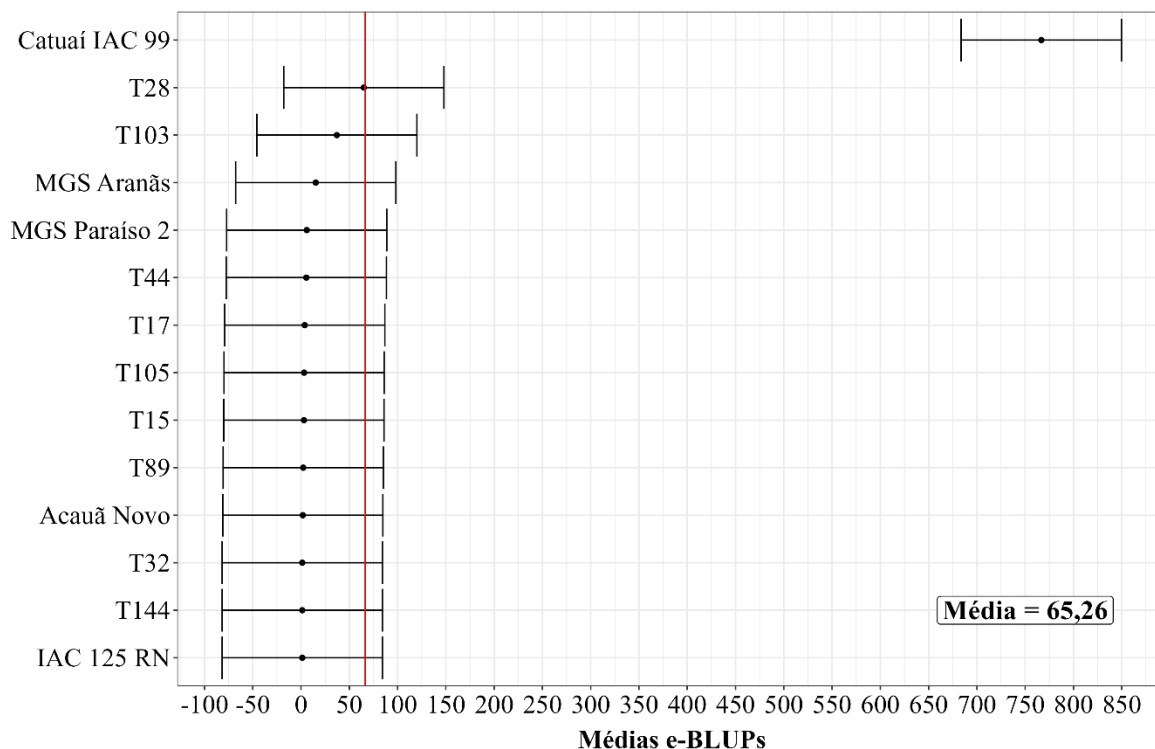
O software R (R Core Team, 2020) versão 4.1.3 foi utilizado para o tratamento dos dados e para o ajuste dos modelos utilizados. Utilizou-se o pacote sommer (Covarrubias-Pazaran, 2016) para o ajuste do modelo linear misto. Os modelos fixos foram ajustas com as funções do pacote stats. As ferramentas disponíveis no pacote Tydiverse (Wickham *et al.*, 2019) foram utilizadas para a manipulação dos dados e para a elaboração dos gráficos apresentados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste da razão de verossimilhança (LRT) indicou significância estatística ($p < 0,01$) para a variável área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD). Diante da correlação positiva (0,86) entre as repetições dos experimentos (Anexo – Tabela 1) serão apresentados e discutidos os resultados da análise conjunta dos experimentos (Figura 2). O desempenho das populações F_2 e cultivares comerciais para a AACPD^c foi plotado em um gráfico do tipo *caterpillar plot*, em que o ‘ponto’ representa o valor predito mais a média (e-BLUP) de cada população e as linhas apresentam o erro associado à estimativa (Figura 2).

A partir da avaliação do ranqueamento das progênieis quanto à predição das médias e-BLUPs, foi verificado que as populações F_2 se destacaram nos caracteres para a AACPD, apresentando maior resistência à ferrugem, assim como, as cultivares comerciais IAC 125 RN, Acauã Novo, MGS Paraíso 2 e MGS Aranãs, indicando o potencial das populações no controle genético da ferrugem. Destaca-se, a alta severidade observada na cultivar suscetível Catuaí Vermelho IAC 99 que apresentou valor médio de e-BLUP de 766,74 (Anexo – Tabela 1). Ressalta-se que, a cultivar Catuaí Vermelho IAC 99 apresentou uma evolução crescente na severidade a ferrugem durante a condução do experimento (Figura 3), chegando a apresentar 19,92% de desfolha aos 50 dias após a inoculação (DAI) (Figura 4A), confirmando a sua alta suscetibilidade ao patógeno.

Figura 1 - Intervalo da predição dos valores genéticos (e-BLUPs) de populações F_2 e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. para Área Abaixo da Curva de Progresso da Doença (AACPD^c) para severidade a ferrugem.



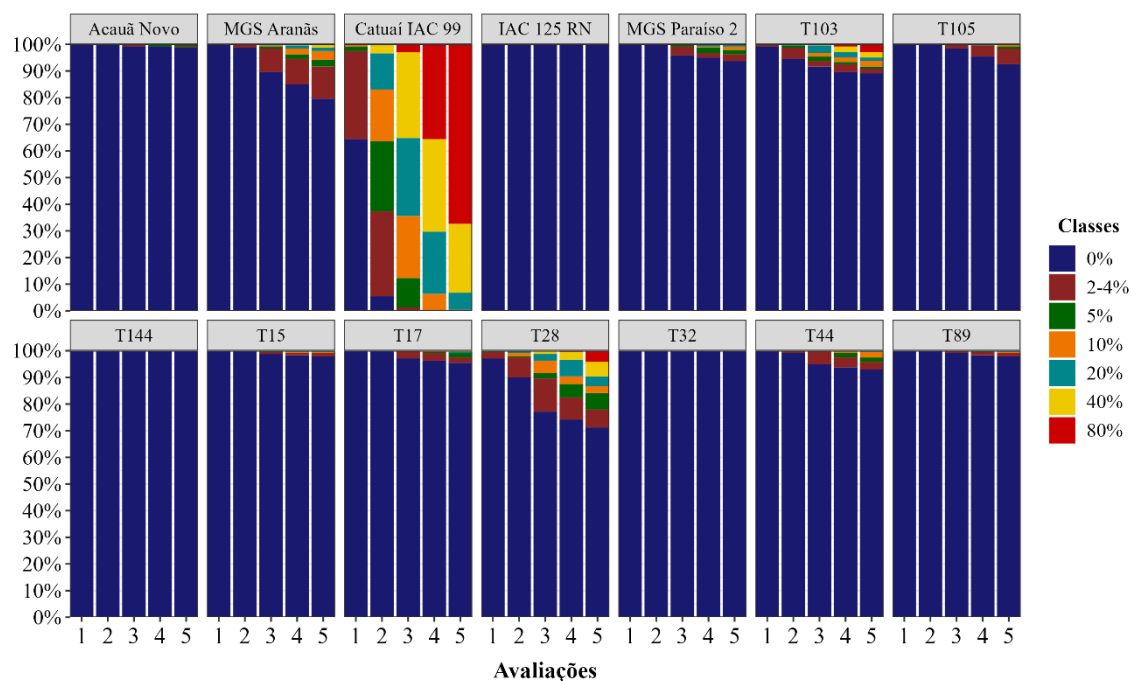
Em relação ao progresso da severidade da doença nas populações F_2 e nas demais cultivares comerciais avaliadas, pode-se fazer algumas inferências observando a figura 3. Nota-se que as populações F_2 T32 e T144 e a cultivar padrão resistente IAC 125 RN, não apresentaram percentual de severidade, plantas sem esporulação (Figura 3) e incidência (Figura 4B) a ferrugem do cafeeiro durante todo o período de avaliação, evidenciando a resistência completa.

No que se refere ao tipo de resistência da planta hospedeira, são consideradas duas categorias, sendo a resistência vertical ou qualitativa (também chamada de resistência completa ou monogênica) e a resistência horizontal ou quantitativa (também conhecida como resistência parcial ou poligênica) (Almeida *et al.*, 2021; Flor, 1971; Willocquet *et al.*, 2017). Em geral, a resistência qualitativa é governada por um gene de resistência principal de efeito pronunciado e evita a multiplicação da população do patógeno (Burbano-Figueroa, 2020; Silva *et al.*, 2021; Willocquet *et al.*, 2017). Enquanto a resistência quantitativa é, geralmente, determinada por vários genes de resistência menor cuja expressão reduz a eficiência de um ou vários processos envolvidos no ciclo da doença do patógeno (Pilet-Nayel *et al.*, 2017; Willocquet *et al.*, 2017). Pode ser observado menor número de lesões, lesões de menor tamanho e com menos esporos, maior período de incubação e menor desfolha (Van Der Pank, 1968). De acordo com as definições de

Parlevliet (1978) a resistência quantitativa retarda o desenvolvimento da epidemia no campo, embora a planta mostre um aspecto suscetível. Sendo assim, plantas com resistência quantitativa apresentam uma redução na intensidade da doença sem impedir sua presença.

Desta forma, pode-se inferir que as populações F₂ T103, T105, T15, T17, T28, T44 e T89 e as cultivares comerciais Acauã Novo, MGS Aranãs e MGS Paraíso 2 possuem resistência quantitativa fundamentando-se, principalmente, no tempo entre a inoculação e o aparecimento dos primeiros sintomas. Com exceção as populações F₂ T28, T44 e T103, as primeiras folhas com esporos nas demais populações F₂ foram observadas a partir da terceira avaliação, aos 36 DAI. Desta forma, percebe-se que além de uma menor capacidade de penetração e colonização do patógeno nos tecidos foliares, quando comparado o progresso da severidade com a cultivar suscetível Catuaí Vermelho IAC 99, todas as populações F₂ e cultivares comerciais que segregaram, apresentaram evolução mais lenta da doença, característica típica de resistência quantitativa.

Figura 3 – Progresso da severidade da ferrugem do cafeeiro em populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. em função do período de avaliação com intervalo de sete dias.

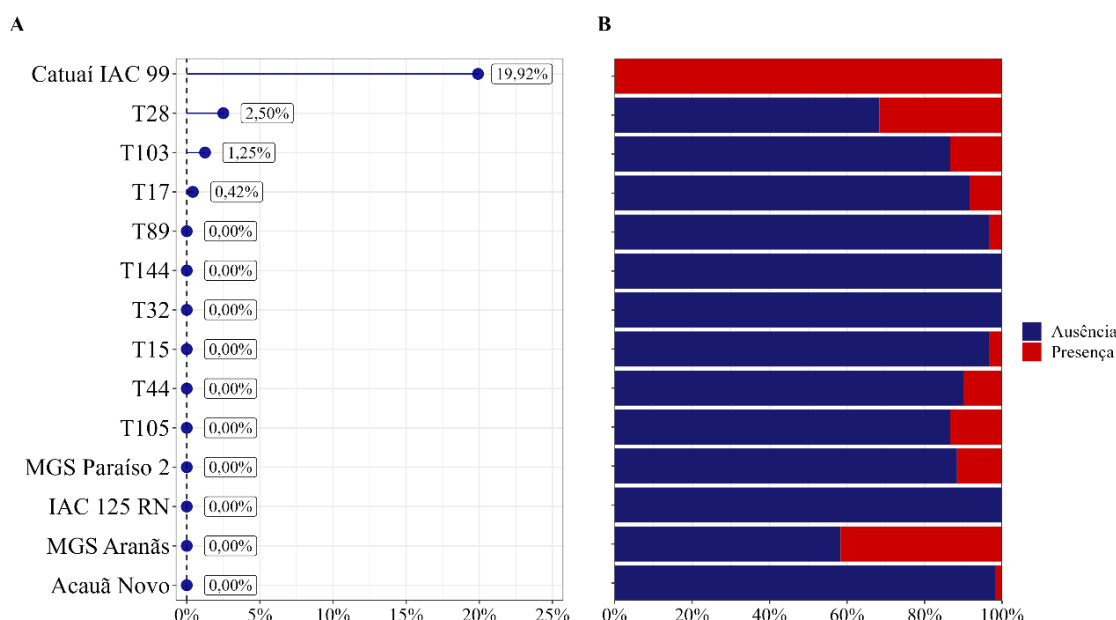


Classes: Porcentagem (%) da área foliar com sintomas da doença de acordo com a escala de notas proposta por Capucho et al. (2011). Início das avaliações: 22 dias após a inoculação.

Para realizar a classificação fenotípica do nível de resistência das populações F₂ de forma detalhada foi verificado o percentual de incidência de ferrugem nas folhas aos 50

dias após a inoculação, considerando todas as folhas inoculadas. Nota-se que a cultivar testemunha suscetível Catuaí Vermelho IAC 99 expressou intensamente a doença e não apresentou nenhuma planta com folhas sem o sintoma da doença (Figura 4B). Dessa forma, confirmou-se sua suscetibilidade e permitiu a realização de inferências sobre a resistência das populações F₂ estudadas (Figura 5).

Figura 4 – Percentual médio de desfolha (A) e percentual de incidência por ferrugem nas folhas inoculadas em populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. aos 50 dias após a inoculação



Na figura 5, foi realizada a classificação fenotípica do nível de resistência das plantas individualizadas para quantificar o possível percentual de segregação das populações F₂ para a resistência a ferrugem alaranjada do cafeeiro. Conforme mencionado anteriormente, a testemunha suscetível Catuaí Vermelho IAC 99 obteve alta severidade da ferrugem e 100% das plantas avaliadas foram classificadas como suscetíveis, segundo a classificação realizada de acordo com a descrição do tipo de reação proposta por Conceição *et al.* (2005). Em relação ao padrão resistente, a cultivar IAC 125 RN, 100% de suas plantas avaliadas foram classificadas como imunes ou resistentes. De acordo com Fazuoli *et al.* (2018) a cultivar IAC 125 RN é resistente a todas as raças de ferrugem do cafeeiro atualmente presentes no Brasil.

Destaca-se o desempenho obtido para resistência a ferrugem das populações F₂ T32 (Icatu x Híbrido de Timor) e T144 (Sarchimor x Icatu) com 100% de plantas classificadas

como imunes ou resistentes. Esses resultados podem ser explicados devido a genealogia dos seus parentais. O germoplasma Híbrido de Timor (HT) é a principal fonte de resistência ao fungo *H. vastatrix* (Diola *et al.*, 2013). Sendo que, a resistência conferida pode ser monogênica (BRITO *et al.* 2010) e/ou poligênica (Capucho *et al.*, 2009) dependendo do genótipo da planta. O HT possui pelo menos cinco genes dominantes S_{H5}, S_{H6}, S_{H7}, S_{H8}, S_{H9} (Bettencourt *et al.*, 1992), sendo S_{H6} a S_{H9} originados de *C. canephora* (Bettencourt; Rodrigues-Junior, 1988). Petek *et al.* (2008) relatam a resistência monogênica (qualitativa) do Sarchimor à ferrugem, entretanto Sera *et al.* (2010) observaram resistência incompleta em progênies derivadas do Sarchimor. Assim como o Icatu que apresenta os dois tipos de resistência, segundo Costa, Ribeiro (1975) e Eskes, Costa (1983). Sendo assim, pode-se inferir que as populações F₂ T32 e T144 herdaram de seus parentais alelos que conferem resistência completa a ferrugem.

Já as populações F₂ T103, T105, T15, T17, T28, T44 e T89 apresentaram baixa incidência de ferrugem em associação a um baixo nível de severidade da doença. Essas populações apresentaram 86,7%, 88,3%, 96,7%, 91,6%, 68,3%, 91,7% e 98,3% de plantas classificadas como imunes ou resistentes ao patógeno, ou seja, altas porcentagens de plantas com resistência completa. As demais plantas apresentaram resistência incompleta, sendo que apenas populações F₂ T28 e T103 apresentaram plantas suscetíveis com 13,3% e 8,3%, respectivamente, caracterizando a ausência de genes que conferem resistência nessas plantas. De um modo geral, a resistência incompleta observada nessas populações F₂ a raça local da ferrugem pode ter ocorrido devido a ação de genes de menores efeitos, visto que, essas plantas possuem pelo menos um de seus genitores com resistência poligênica (Tabela 1).

A resistência a ferrugem em progênies F₂ de *C. arabica* já foi analisada por alguns autores. Capucho *et al.* (2009) avaliaram 246 plantas F₂ oriundas do cruzamento de Híbrido de Timor UFV 443-03 x Catuaí Amarelo IAC 64 e observaram resistência em 235 (95,5%) e suscetibilidade em 11 plantas (4,5%). Prakash *et al.* (2004) avaliaram 101 plantas F₂ oriundos do cruzamento entre duas linhagens de *Coffea arabica*, Matari (Suscetível) e S.288 (resistente a S_{H3}) e observaram 79 plantas resistentes (78%) e 22 plantas suscetíveis (22%), um padrão de segregação que se ajusta à proporção de 3:1 esperada para um único gene dominante.

Diante dos resultados obtidos podemos inferir que é possível obter populações F₂ de *C. arabica* L. resistentes a ferrugem com baixa taxa de segregação para suscetibilidade se

os genitores utilizados nos cruzamentos forem portadores de genes com grande efeito para a resistência.

Figura 5 – Classificação fenotípica do nível de resistência das populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. para a ferrugem do cafeeiro aos 50 dias após a inoculação.



Classificação realizada de acordo com a descrição do tipo de reação proposta por Conceição et. al. (2005). I (imune), R (resistente), MR (moderadamente resistente), MS (moderadamente susceptível) e S (susceptível).

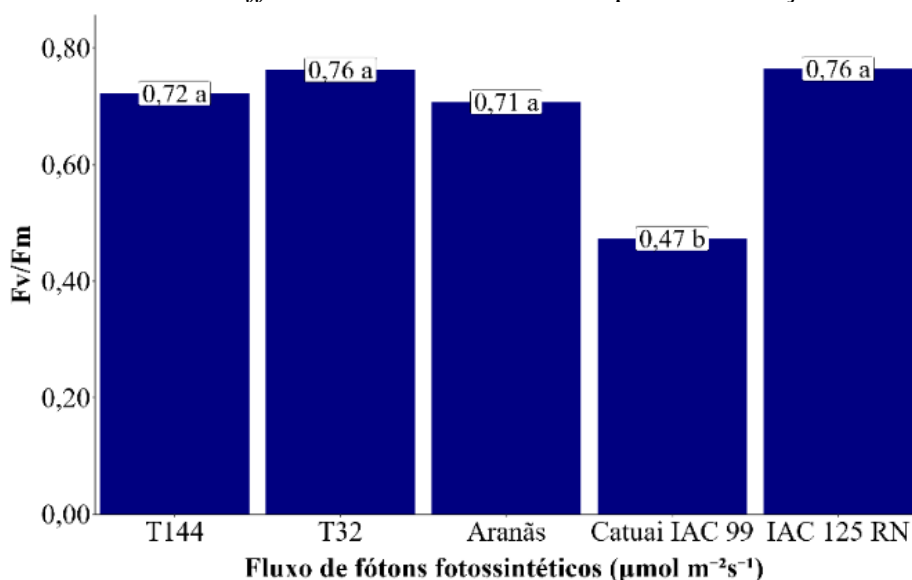
A infecção por agentes patogênicos em plantas pode afetar a taxa de fotossíntese e consequentemente, causarem redução da produção. Em cafeeiros a colonização das folhas por ferrugem provoca danos severos ao fotossistema II (PSII) (Voegelé *et al.*, 2009), resultando em queda das folhas. Um dos parâmetros utilizados frequentemente para detectar perturbações no sistema fotossintético das plantas causado por estresses ambientais e bióticos é eficiência fotoquímica máxima do PSII (Fv/Fm), visto que a sua diminuição indica inibição da atividade fotoquímica (Konrad *et al.*, 2005). A razão (Fv/Fm) indica a máxima eficiência na qual a luz é absorvida pelo PSII e que efetivamente será aproveitada em processos fotoquímicos, quando todos os centros de reação do PSII estão abertos (Baker; Rosenqvist, 2004).

Os valores referentes a eficiência fotoquímica máxima do PSII (Fv/Fm) estão dispostos na Figura 6. É importante ressaltar que, esta avaliação ocorreu aos 50 DAI.

Observa-se que, em cultivares suscetíveis a ferrugem do cafeeiro, como a cultivar Catuaí Vermelho IAC 99, a presença do fungo nas folhas causa danos ao aparato fotossintético da planta, resultando em uma eficiência fotoquímica máxima do PSII (Fv/Fm) de 0,47, valor que estaria muito abaixo dos preconizados como normais (0,75 e 0,85) em plantas que o aparelho fotossintético se encontra intacto (Bolhar-Nordenkampf *et al.*, 1989; Soares *et al.*, 2018).

Em relação aos demais tratamentos, as populações F₂ T32 e T144 e as cultivares MGS Aranãs e IAC 125 RN não se diferenciaram estatisticamente para a eficiência fotoquímica máxima do PSII (Fv/Fm) (Figura 6). Entretanto, a cultivar MGS Aranãs e a população F₂ T144 apresentaram valores inferiores (0,71 e 0,72) aos esperados (0,75 e 0,85) para plantas em que o aparelho fotossintético esteja intacto (Bolhar-Nordenkampf *et al.*, 1989; Soares *et al.*, 2018).

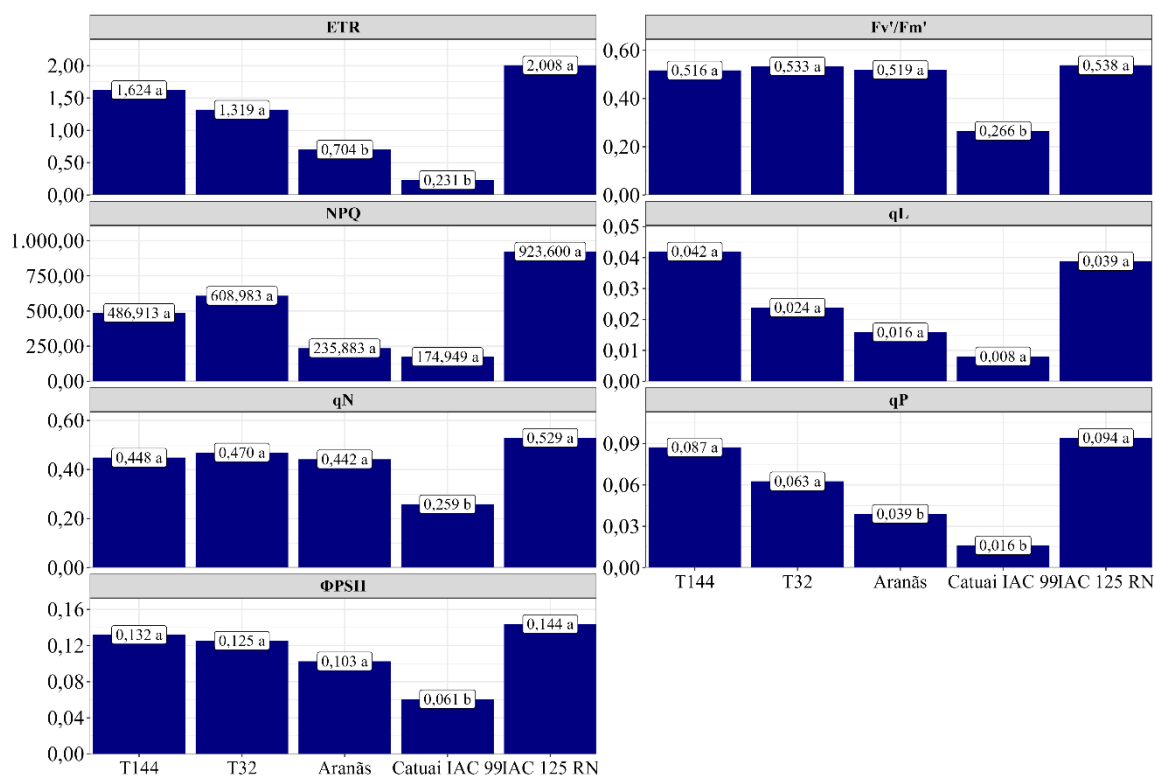
Figura 6 – Eficiência fotoquímica do PSII (Fv/Fm) de populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. aos 50 dias após a inoculação.



Em cultivares suscetíveis como o Catuaí Vermelho IAC 99 os danos provocados pela colonização do fungo *H. vastatrix* em outros parâmetros fotossintéticos podem ser observados na figura 7. Analisando conjuntamente os parâmetros fotossintéticos avaliados, percebe-se que a cultivar suscetível apresenta sérios danos ao aparato fotossintético. Foram encontrados baixos valores para a taxa de transporte de elétrons (ETR), resultando em baixa eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII). Observou-se baixos valores de qP, o que indica que uma menor proporção de energia luminosa absorvida está sendo usada para

conduzir reações fotoquímicas nos centros de reação do PSII (Losciale *et al.*, 2011). Entretanto, não está ocorrendo a dissipação de energia não absorvida nas reações fotoquímicas na forma de calor, demonstrado pelos baixos valores de qN e NPQ, ou seja, todo o processo fotossintético na cultivar suscetível com alta severidade a ferrugem está comprometido.

Figura 7 - Taxa de transporte de elétrons (ETR), eficiência quântica da antena do PSII (F_v'/F_m'), quenching fotoquímico (qP), quenching não-fotoquímico (qN e NPQ), eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII), quenching fotoquímico (qL) de populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. aos 50 dias após a inoculação com *Hemileia vastatrix*.



Danos na eficiência do aparato fotossintético podem ser observados pela redução da taxa de transporte de elétrons (ETR) e eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII) (Figura 7). Para a realização da fotossíntese a cadeia transportadora de elétrons deve estar trabalhando satisfatoriamente e caso ocorra alguma interferência ou danos no transporte de elétrons, a produção de ATP e NADPH será afetada e a continuidade do processo fotossintético será comprometida. Observando os demais tratamentos nota-se que a cultivar MGS Aranãs, possivelmente sofreu algum dano na eficiência do aparato fotossintético pois, apresentou uma ETR muito inferior aos demais tratamentos resistentes ao fungo, se assemelhando estatisticamente a cultivar suscetível Catuaí Vermelho IAC 99.

Paralelamente, a cultivar MGS Aranãs apresentou uma redução da eficiência do transporte de elétrons muito acentuada, demonstrado pelo baixo valor quenching fotoquímico (qL). Embora, a cultivar MGS Aranãs não tenha diferenciado estatisticamente dos tratamentos resistentes ao fungo para a Φ PSII, percebeu-se, que houve uma redução na eficiência quântica efetiva do PSII (Φ PSII) quando comparado a cultivar resistente IAC 125 RN de 28,47%, o que é um indicativo de diminuição na atividade fotossintética (Tatagiba *et al.*, 2015) causada provavelmente, pela ação do fungo da ferrugem ao aparato fotossintético. Os danos provocados pela ferrugem ao aparelho fotossintético da cultivar MGS Aranãs ocorreram provavelmente devido a sua resistência poligênica ou quantitativa observada anteriormente.

Considerando as demais variáveis avaliadas como o quenching fotoquímico (qP), destacam-se as populações F₂ T32 e T144 e a cultivar IAC 125 RN que apresentaram os maiores valores, indicando que uma maior porcentagem da energia foi direcionada para os processos fotoquímicos (Silva *et al.*, 2015). Menores valores de qP relacionam-se com uma menor proporção de energia luminosa absorvida usada para conduzir reações fotoquímicas nos centros de reação do PSII (Losciale *et al.*, 2011). A cultivar MGS Aranãs e a cultivar suscetível obtiveram os menores valores de qP, caracterizando-se como cultivares capazes de transferirem de forma menos eficiente a energia absorvida para o processo fotossintético. Parte da energia absorvida nas reações fotoquímicas pela cultivar MGS Aranãs está sendo dissipada em forma de calor, demonstrado pelo alto valor de qN.

As populações F₂ T32 e T144 e a cultivar IAC 125 RN apresentaram os maiores valores de qP, qN e NPQ. Uma elevada dissipação não fotoquímica (NPQ) indica alta capacidade fotoprotetora, pois representa a dissipação da energia na forma de calor pelo mecanismo fotoprotetor regulador, o que evita danos provocados pelo excesso de fótons (Sacramento *et al.*, 2018). Os maiores valores de qN e NPQ protegem os centros de reação do PSII, dissipando o excesso de energia na forma de calor (Li *et al.*, 2013; Ruban, 2016).

Portanto, a alta severidade a ferrugem, causa sérios danos ao aparato fotossintético das folhas do cafeeiro, reduzindo significativamente todos os parâmetros envolvidos na realização da fotossíntese em cultivares suscetíveis. Entretanto, em cultivares com resistência incompleta com a presença de flecks acentuados (reações de hipersensibilidade), possivelmente, ocorrem danos ao aparato fotossintético, embora menos acentuado.

Quando as plantas sofrem estresses bióticos ou abióticos, a primeira resposta de defesa é a explosão oxidativa, o que corresponde à geração de espécies reativas de

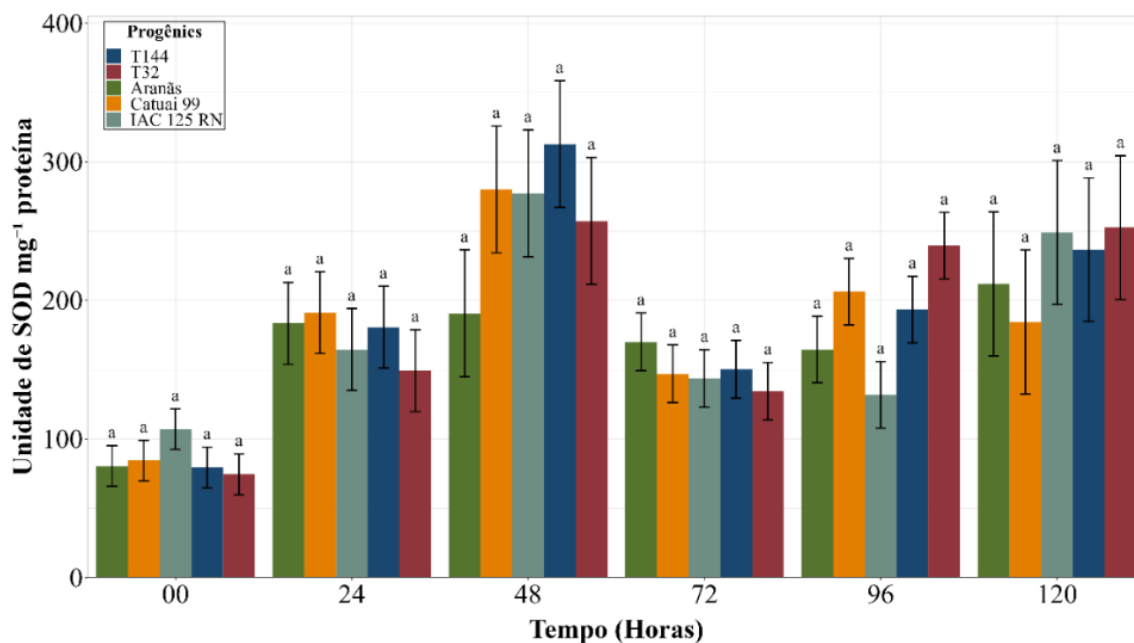
oxigênio (EROs) (H_2O_2 , O_2^- , OH^-) (Resende *et al.*, 2003; Barbosa *et al.*, 2014). A superprodução de EROs pode causar danos as estruturas celulares (Sachdev *et al.*, 2021). No entanto, as plantas possuem mecanismos de defesa enzimáticos e não enzimáticos para manter as EROs em níveis não prejudiciais (Barbosa *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2022), dentre os quais envolvem as atividades das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), dentre outras.

Na figura 8 estão dispostos os resultados para a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) em diferentes tempos de coleta após a inoculação do fungo *Hemileia vastatrix* em populações F_2 e cultivares comerciais de *C. arabica*. De modo geral, independente do tempo de coleta não houve diferença estatística entre os tratamentos para a expressão das enzimas SOD e CAT. Entretanto, analisando a expressão da enzima SOD, percebe-se que 24 horas após a inoculação com o fungo houve um aumento na atividade da enzima intensificando-se às 48 horas em todos os tratamentos.

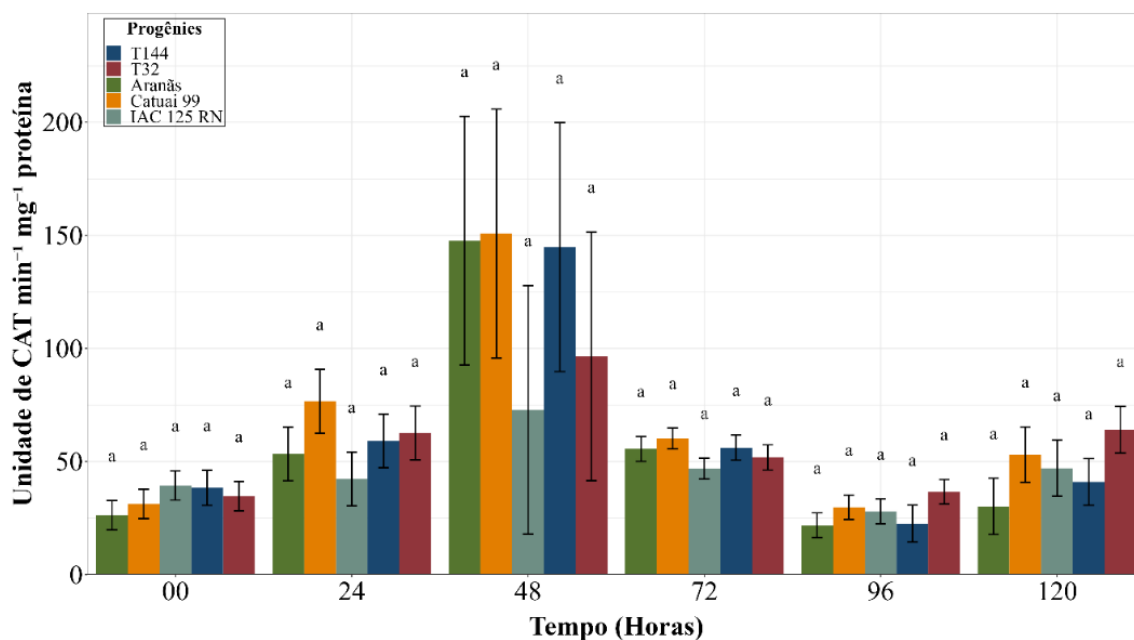
Em resposta ao estresse biótico provocado pela infecção do fungo, uma reação direta da planta é a explosão oxidativa, resultando no aumento da atividade das enzimas envolvidas na eliminação de EROs (Nowogórska; Patykowski, 2015). A SOD é a primeira enzima a atuar no sistema antioxidante, realizando a conversão ou dismutação do superóxido em oxigênio e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em plantas (Bhosle *et al.*, 2019; Gill *et al.*, 2015). Entretanto, o acúmulo do seu produto H_2O_2 também é prejudicial e precisa ser eliminado, o que pode ser realizado tanto por catalases quanto por peroxidases (Willekens *et al.*, 1995).

A catalase aumentou consideravelmente às 48 horas após a inoculação nas cultivares Catuaí Vermelho IAC 99, MGS Aranãs e nas populações F_2 T144 e T32 (Figura 8). Esse resultado pode ser atribuído a eliminação do H_2O_2 produzido pela SOD. Entretanto na cultivar IAC 125 RN o aumento da CAT foi muito inferior durante todo o período de avaliação. A atividade da catalase é fundamental na eliminação da H_2O_2 , quando o seu excesso é prejudicial, o que pode não ser o caso para a cultivar IAC 125 RN.

Figura 8 - Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) em populações F_2 e cultivares de *Coffea arabica* L. inoculadas com o fungo *Hemileia vastatrix*.



Letras iguais não diferem os tratamentos ao nível de 5% pelo teste de Scott Knott.



Letras iguais não diferem os tratamentos ao nível de 5% pelo teste de Scott Knott.

O aumento da atividade de enzimas antioxidantes já foi observado por outros autores em diversas culturas, em plantas inoculadas com patógenos. Debona *et al.* (2012) verificaram aumento da atividade de CAT em plantas de trigo inoculadas com *P. oryzae* em comparação com plantas não inoculadas às 48 horas após a inoculação. Andrade *et al.* (2016) avaliaram as alterações no metabolismo antioxidante do café com folhas infectadas por *Cercospora coffeicola* e observaram que a SOD aumentou às 48 horas após a

inoculação e a CAT às 24 horas. Entretanto, esses autores não avaliaram a relação entre a expressão das enzimas e a resistência das plantas. Fonseca *et al.* (2022) avaliaram resposta bioquímica das enzimas peroxidase (POX) e fenilalanina-amônia-liase (PAL) em acessos de *Coffea canephora* quanto a resistência à ferrugem do cafeeiro e observaram a indução da atividade e a intensidade das enzimas sendo maiores em clones resistentes.

3 CONCLUSÃO

Populações F₂ de café arábica podem apresentar resistência completa e incompleta a ferrugem, viabilizando o seu uso como cultivares comerciais.

A ferrugem do cafeeiro reduz a eficiência dos parâmetros fotossintéticos em plantas com resistência incompleta.

A infecção do fungo *Hemileia vastatrix* aumenta a expressão das enzimas SOD e CAT em plantas de *C. arabica* L.

REFERÊNCIAS

ALFONSI, Waldenilza Monteiro Vital *et al.* Período de incubação da ferrugem do cafeeiro. *Summa Phytopathologica*, v.45, n.2, p.134-140, 2019.

ALMEIDA, Larissa Cavalcante *et al.* Aspectos epidemiológicos da resistência de hospedeiro. In: **Resistência de plantas a patógenos**. ISBN 978-65-00-20814-6, 2021.

ANDRADE, Camila Cristina Lage de *et al.* Alterations in antioxidant metabolism in coffee leaves infected by *Cercospora coffeicola*. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n.10, p.1764-1770, out, 2016.

ANDRADE, Francisco Hélio Alves de *et al.* IBA and melatonin increase trigonelline and caffeine during the induction and initiation of adventitious roots in *Coffea arabica* L. cuttings. **Scientific Reports**, 13:15151, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41288-x>

ANDREAZI, Elder *et al.* Desempenho de híbridos F₁ de café arábica com resistência simultânea a ferrugem, mancha aureolada e bicho mineiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 375 - 382, jul./set. 2015.

BAKER, Neil R.; ROSENQVST, Eva. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, London, v. 55, p. 1607-1621, 2004.

BARBOSA, Marta Ribeiro *et al.* Geração e desintoxicação enzimática de espécies reativas de oxigênio em plantas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.3, p.453-460, mar, 2014.

BETTENCOURT, A. J.; RODRIGUES JUNIOR, C. J. Principles and practices of coffee breeding for resistance to rust and other diseases. In: Clarke, R.J. & Macrae, R. (Eds.) **Coffee Agronomy**. London. Elsevier, pp. 199-234, 1988.

BETTENCOURT, A. J.; LOPES, J.; PALMA, S. Factores genéticos que condicionam a resistência às raças de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. dos clones-tipo dos grupos 1, 2 e 3 de derivados de Híbrido de Timor. **Brotéria Genética**, Lisboa, XIII (LXXX), pp. 185-194, 1992.

BIEMELT, Sofia; KEETMAN, Ulrich; ALBRECHT, Gerd. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, 116(2), 651-658, 1998.

BOLHAR-NORDENKAMPF, H. R. *et al.* Chlorophyll fluorescence as probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: a review of current instrument. **Functional Ecology**, v.3, p.497-514, 1989.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. Recursos Genéticos. In: **Melhoramento de Plantas**. 5. ed., Viçosa: UFV, 2009.

BURBANO-FIGUEROA, Óscar. Plant resistance to pathogens: A review describing the vertical and horizontal resistance concepts. **Revista Argentina de Microbiología**. (52) 245:255, 2020.

- BRADFORD, Marion. M. A rapid and sensitive method for quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, New York, v. 72, p. 248-254, 1976.
- BRITO, Giovani Greigh de *et al.* Inheritance of coffee leaf rust resistance and identification of AFLP markers linked to the resistance gene. **Euphytica** 1:1–14, 2010.
- BHOSLE, Sheetal. M.; MARATHE, Nitinkumar.; MAKANDAR, Ragiba. The er2 gene resistance against powdery mildew infection is associated with enhanced antioxidative protection and defense gene expression. **Physiological and molecular plant pathology**, v.106, p. 253-262, 2019.
- CABRAL, P. G. C. *et al.* Genetic Diversity and Structure of *Hemileia vastatrix* Populations on *Coffea* spp. **Plant Pathol.** 65, 196–204, 2016.
- CAPUCHO, Alexandre Sandri *et al.* Herança da resistência do Híbrido de Timor UFV 443-03 à ferrugem-do-cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 44:276–282, 2009.
- CAPUCHO, Alexandre Sandri *et al.* Development and validation of a standard area diagram set to estimate severity of leaf rust in *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. **Plant Pathology**, 60, p.1144 –1150, 2011.
- CARVALHO, C. H. S de. Cultivares de café: origem, características e recomendações. Embrapa, Brasília-DF, Brasil, 2008.
- CARVALHO, Samuel Pereira de *et al.* Meta-análise para estimativas de herdabilidade de caracteres vegetativos e reprodutivos de *Coffea arabica* L. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1291-1298, jul./ago. 2012.
- CONCEIÇÃO, Albano Silva da; FAZUOLI, Luiz Carlos; BRAGHINI, Masako Toma. Avaliação e seleção de progênies F3 de cafeeiros de porte baixo com o gene *sh3* de resistência a *Hemileia Vastatrix* BERK. ET BR. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.4, p.547-559, 2005.
- COSTA, W. M.; RIBEIRO, I. J. A. Resistência a *H. vastatrix* observada no café Icatu. In: 3º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, Curitiba. Resumos, **IBC-GERCA**. p.113, 1975.
- COVARRUBIAS-PAZARAN, Giovanny. Genome-Assisted Prediction of Quantitative Traits Using the R Package sommer. **Plos One**, v. 11, n. 6, p. 1-14, 6 jun. 2016.
- CUNHA, Samuel Henrique Braga *et al.* Transfer of clonal coffee seedlings from the conventional system to the modified hydroponic system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.18, n.3, e2851, 2023.
- DEBONA, Daniel *et al.* Biochemical changes in the leaves of wheat plants infected by *Pyricularia oryzae*. **Phytopathology**, v.102, p.1121-1129, 2012.

- DIOLA, Valdir *et al.* A new set of differentially expressed signaling genes is early expressed in coffee leaf rust race II incompatible interaction. **Funct Integr Genomics**, 13:379-389, 2013. DOI 10.1007/s10142-013-0330-7
- ESKES, A.; COSTA, W. M. Characterization of incomplete resistance to *Hamileia vastatrix* in Icatu coffee population. **Euphytica**, 32:649-655, 1983.
- FAZUOLI, Luiz Carlos *et al.* IAC 125 RN – A dwarf coffee cultivar resistant to leaf rust and root-knot nematode. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** 18: 237-240, 2018.
- FONSECA, Aline Souza da *et al.* Caracterização da resposta bioquímica de acessos de *Coffea canephora* quanto a resistência à ferrugem alaranjada. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, e56211730171, 2022.
- FUCHS, Marc. Pyramiding Resistance-Confering Gene Sequences in Crops. **Curr. Opin. Virol**, 36–42, 2017.
- FLOR, H. H. Current status of gene-for-gene concept. **Annual Review Phytopathology**, v. 9, p. 275-296, 1971.
- GIANNOPOLITIS, Constantine N.; RIES, Stanley K. Superoxide dismutases. I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiol**. 59(2), 309-314, 1977. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>.
- GILL, Sarvajeet Singh *et al.* Superoxide dismutase-mentor of abiotic stress tolerance in crop plants. **Environ Sci Pollut R**, v. 22, n.14, p. 10375–10394, 2015.
- HAVIR, Evelyn A.; MCHALE, Neil A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiol**. 84(2), 450-455, 1987.
- HENRIQUES, Fernando S. Leaf chlorophyll fluorescence: background and fundamentals for plant biologists. **Botanical Review**, Bronx, v. 75, n. 3, p. 249-270, 2009.
- KONRAD, Maria Luiza Freitas *et al.* Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em seis cultivares de cafeeiro sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.64, n.3, p.339-347, 2005.
- LUI, Jie. Exploring the molecular basis of heterosis for plant breeding. **Journal of Integrative Plant Biology**, 2019.
- LUI, Rong *et al.* Developing Stripe Rust Resistant Wheat (*Triticum aestivum* L.) Lines with Gene Pyramiding Strategy and Marker-Assisted Selection. **Genet. Resour. Crop Evol**, 67, 381–391, 2020.
- LI, G. L. *et al.* Response of chlorophyll fluorescence parameters to drought stress in sugar beet seedlings. **Russ. J. Plant Physiol**. 60, 337–342, 2013.
- LOSCIALE, Pasquale *et al.* Quenching partitioning through light-modulated chlorophyll fluorescence: a quantitative analysis to assess the fate of the absorbed light in the field. **Environmental and Experimental Botany**, Paris, v. 73, p. 73-79, 2011.

MCCOOK, Stuart; MONTERO-MORA, Andrea. Coffee breeding in a time of crisis: F1 hybrids in Central America since 1990. **Plants People Planet**, 1-10, 2024. DOI: 10.1002/ppp3.10480.

NOWOGÓRSKA, Agata; PATYKOWSKI, Jacek. Selected reactive oxygen species and antioxidant enzymes in common bean after *Pseudomonas syringae* pv. *Phaseolicola* and *Botrytis cinerea* infection. **Acta Physiol Plant**, v.37, p. 1725, 2015.

PARLEVLJET, J. E. Race-specific aspects of polygenic resistance of barley to leaf rust, *Puccinia hordei*. **Netherlands Journal of Plant Pathology**, v. 84, p. 121-126, 1978.

PILET-NAYEL, Marie-Laure *et al.* Quantitative resistance to plant pathogens in pyramiding strategies for durable crop protection. **Frontiers in Plant Science** 8:1838. 2017.

PIMENTEL-GOMES, Frederico. **Curso de estatística Experimental**. 15. ed. Piracicaba: FEALQ, 2015. 451 p.

PRAKASH, N. S. *et al.* Introgression molecular analysis of a leaf rust resistance gene from *Coffea liberica* into *C. arabica* L. **Theor Appl Genet**. 109: 1311-1317, 2004. DOI 10.1007/s00122-004-1748-z

QUEIROGA, Vicente de Paula *et al.* Sistema produtivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado. In: QUEIROGA, V. A. et al. (ed.). Cultivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado para produção de grãos de alta qualidade. 1ª ed. Campina Grande: AREPB, 2021.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2020. URL <https://www.R-project.org/>.

RESENDE, Mário Lúcio Vilela de; SALGADO, Sônia Maria de Lima; CHAVES, Zuleide. M. Espécies Ativas de Oxigênio na Resposta de Defesa de Plantas a Patógenos. **Fitopatologia Brasileira** 28:123-130. 2003.

RESENDE, M. D. V; SILVA, F. F.; AZEVEDO, C. F. **Estatística matemática, biométrica e computacional**: modelos mistos, multivariados, categóricos e generalizados (REML/BLUP), inferência bayesiana, regressão aleatória, seleção genômica, QTL-GWAS, estatística espacial e temporal, competição, sobrevivência. 21. ed. Viçosa: Suprema, 2014. 881 p.

REZENDE, Tiago Teruel *et al.* Propagação vegetativa do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) por miniestacas. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 1, p. 91 - 99, jan./mar. 2017.

RUBAN, Alexander. V. Nonphotochemical chlorophyll fluorescence quenching: Mechanism and effectiveness in protecting plants from photodamage. **Plant Physiol**. **170**, 1903–1916, 2016.

SAAVEDRA, Laura Maritza *et al.* Marker-Assisted Recurrent Selection for Pyramiding Leaf Rust and Coffee Berry Disease Resistance Alleles in *Coffea arabica* L. **Genes** 2023, 14, 189. <https://doi.org/10.3390/genes14010189>

SANTOS, Cyntia Stephânia dos *et al.* Adaptations to the drought season and impacts on the yield of ‘Híbrido de Timor’ coffee tree in the Minas Gerais State Cerrado (Brazilian Savanna). **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 52, e72448, 2022.

SACHDEV, Swati *et al.* Abiotic stress and reactive oxygen species: generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, v. 10, e277, 2021.

SACRAMENTO, Bárbara Lima do *et al.* Photosynthetic parameters as physiological indicators of tolerance to cadmium stress in sunflower genotypes. **Revista Caatinga**, v.31, p.907-916, 2018.

SAKIYAMA, N. S.; PEREIRA, A. A.; ZAMBOLIM, L. Melhoramento do café arábica. In: Borém, A. (ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa. Editora UFV. p.189-204, 1999.

SERA, T.; ALVES, S. J. Melhoramento genético de plantas perenes. In: Destro, D.; MONTALVÁN, R. (Org.). **Melhoramento genético de plantas**. Editora UEL, Londrina, p.369- 422, 1999.

SERA, Gustavo Hiroshi *et al.* Identificação de híbridos de café com resistência múltipla à ferrugem, bicho-mineiro e nematoides. SPCB (04.: 2005: Londrina, PR) - Resumos Expandidos 348, 2005.

SERA, Gustavo Hiroshi *et al.* Seleção para a resistência à ferrugem em progênies das cultivares de café IPR 99 E IPR 107. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p547-554, 2010.

SILVA, Vânia Aparecida *et al.* Uso de características fisiológicas na identificação de genótipos de café arábica tolerantes ao *Meloidogyne paranaensis*. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 2, p. 242 - 250, abr./jun. 2015.

SILVA, J. A. *et al.* Componentes de resistência parcial de plantas a doenças. In: **Resistência de plantas a patógenos**. ISBN 978-65-00-20814-6, 2021.

SOARES, Lauriane Almeida dos Anjos *et al.* Physiology and production of naturally-colored cotton under irrigation strategies using salinized water. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.53, p.746-755, 2018.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512, 1974.

SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, 52, 3/4, 591–611, 1965.

SHULL, George. H. The composition of a field maize. **Report American Breeders Association**, 4:296-301, 1908.

TALHINHAS, Pedro *et al.* The Coffee Leaf Rust Pathogen *Hemileia vastatrix*: One and a Half Centuries around the Tropics. *Mol. Plant Pathol*, 18, 1039–1051, 2017.

TATAGIBA, Sandro Dan; DAMATTA, Fábio Murilo; RODRIGUES, Fabrício Ávila. LEAF gas exchange and chlorophyll *a* fluorescence imaging of rice leaves infected with *Monographella albescens*. *Phytopathology* 105:180-188, 2015.

VAN DER PLANK, J. E. Disease resistance in plants. New York, **Academic Press**. 206 p. 1968.

VÁRZEA, V. M. P. *et al.* In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa: UFV, p.297-320, 2002.

VOEGELE, Ralf. T.; HAHN, Matthias; MENDGEN Kurt. The Uredinales: cytology, biochemistry, and molecular biology. In: Deising HB (ed) and Esser K (Ser ed) Plant relationships. **The Mycota**, vol. 5. 2nd ed, 2009.

WICKHAM, Hadley *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal Of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 21, nov. 2019.

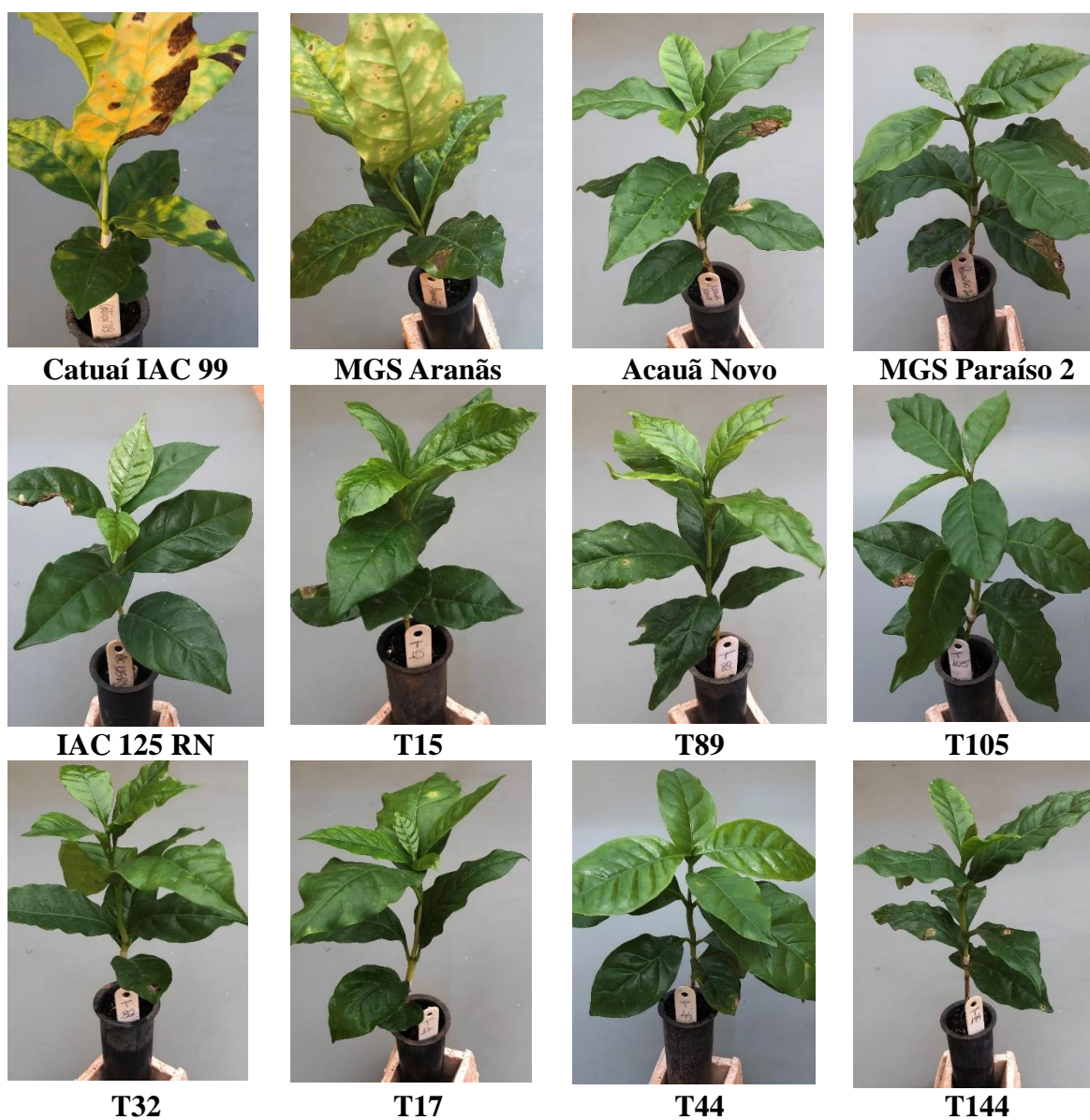
WILLEKENS, H. *et al.* Catalases in plants. **Moleculr Breeding**, v. 1, n. 3, p. 207-228, 1995.

WILLOCQUET, Laetitia; SAVARY, Serge; YUEN, Jonathan. Multiscale phenotyping and decision strategies in breeding for resistance. **Trends in Plant Science**, v. 22, p. 420-432, 2017.

ZAMBOLIM, L.; CHAVES, G.M. Efeito de baixas temperaturas e do binômio temperatura-umidade relativa sobre a viabilidade dos uredosporos de *Hemileia vastatrix* Berk. et Br. e *Uromyces phaseolityca* Arth. **Experientiae**, v.17, p.151-184, 1974.

T15	5	97.92	1.25	0.00	0.42	0.42	0.00	0.00
T17	5	95.42	2.08	1.67	0.00	0.42	0.42	0.00
T28	5	71.25	6.67	6.25	2.50	3.75	5.42	4.17
T32	5	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T44	5	92.92	2.92	1.67	2.08	0.42	0.00	0.00
T89	5	97.92	1.25	0.00	0.42	0.42	0.00	0.00

Figura 1A – Imagens das populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. aos 50 dias após a inoculação com o fungo *Hemileia vastatrix*.





T103



T28

ARTIGO 2 – POPULAÇÕES F₂ DE *Coffea arabica* L. RESISTENTES AOS NEMATOIDES DAS GALHAS

RESUMO

A utilização de cultivares de *Coffea arabica* L. resistentes é a principal alternativa para áreas infestadas por nematoides das galhas. No entanto, o desenvolvimento de uma nova linhagem demora de 25 a 30 anos de pesquisa. Desta forma, outras estratégias devem ser desenvolvidas pelos programas de melhoramento visando a redução de tempo para disponibilizar novas cultivares. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência de populações F₂ de café arábica aos nematoides *M. exigua* e *M. paranaensis* visando avaliar o potencial dessas plantas para serem utilizadas como cultivares pelos produtores. Foram realizados quatro experimentos em casa de vegetação, em delineamento inteiramente casualizado com 30 repetições e uma planta na parcela, entre julho de 2021 a dezembro de 2023. Em 2021 foram instalados dois experimentos. Sendo, o primeiro com 10 populações F₂ e 4 cultivares testemunhas, sendo Catuaí Vermelho IAC 99, IPR 100, MGS Aranãs e IAC 125 RN, totalizando 14 tratamentos para avaliar a resistência ao *M. exigua*. As plantas foram inoculadas com 5.000 ovos + J2 propriamente a duas raças de *M. exigua*. O segundo experimento foi realizado para verificar a resistência ao nematoide *M. paranaensis* onde, foram avaliados cinco tratamentos, sendo três populações F₂ e duas cultivares comerciais, Catuaí Vermelho IAC 99 e IPR 100. Foram inoculados 2.000 ovos + J2 por planta. As avaliações do número de ovos + J2 por planta foram realizadas onze meses após a inoculação em ambos os experimentos. Em 2022 os experimentos foram repetidos para ambas as espécies de nematoides. Populações F₂ de café arábica pode apresentar 100% de plantas resistentes na geração F₂, viabilizando a sua utilização como cultivares. Para *Meloidogyne paranaensis* o percentual de plantas resistentes na geração F₂ variou de 66,7% a 70%.

Palavras-chave: cultivares F₂; nematoides do cafeeiro; melhoramento genético.

F₂ POPULATIONS OF *Coffea arabica* L. RESISTANT TO ROOT-KNOT NEMATODES

ABSTRACT

The use of resistant *Coffea arabica* L. cultivars is the main alternative for areas infested by root-knot nematodes, however, the development of a new strain takes 25 to 30 years of research. Therefore, other strategies must be developed by breeding programs aiming to reduce the time to make new cultivars available. Thus, the objective of this work was to evaluate the resistance of F₂ populations of Arabica coffee to the nematodes *M. exigua* and *M. paranaensis* in order to evaluate the potential of these plants to be used as cultivars by producers. Four experiments were carried out in a greenhouse, in a completely randomized design with 30 replications and one plant in the plot, between July 2021 and December 2023. In 2021, two experiments were installed. The first with 10 F₂ populations and 4 control cultivars, being Catuaí Vermelho IAC 99, IPR 100, MGS Aranãs and IAC 125 RN, totaling 14 treatments to evaluate resistance to *M. exigua*. The plants were inoculated with 5.000 eggs + J2 from two races of *M. exigua*. The second experiment was carried out to verify resistance to the nematode *M. paranaensis*, where five treatments were evaluated, three F₂ populations and two commercial cultivars, Catuaí Vermelho IAC 99 and IPR 100. 2.000 eggs + J2 were inoculated per plant. Assessments of the number of eggs + J2 per plant were carried out eleven months after inoculation in both experiments. In 2022 the experiments were repeated for both nematode species. F₂ populations of Arabica coffee can present 100% resistant plants in the F₂ generation, making their use as cultivars viable. For *Meloidogyne paranaensis*, the percentage of resistant plants in the F₂ generation ranged from 66.7% to 70%.

Keywords: F₂ cultivars; coffee plant nematodes; genetical enhancement.

1 INTRODUÇÃO

Os nematoides fitoparasita de plantas representam um dos maiores desafios fitossanitários para a cultura do café em nível mundial. No Brasil os nematoides das galhas *Meloidogyne exigua* e *Meloidogyne paranaensis* são as espécies mais importantes para a cultura (Salgado *et al.*, 2014; Villain *et al.*, 2018), pois estão disseminados nas principais regiões produtoras do país (Barros *et al.*, 2011; Carneiro *et al.*, 2005; Castro *et al.*, 2008; Terra *et al.*, 2019) causando reduções significativas no rendimento e produtividade da cultura (Salgado *et al.*, 2015).

O controle dos nematoides é um desafio para pesquisadores e produtores, pois ainda não se dispõe de alternativas para erradicar o parasita do solo (Sera *et al.*, 2020; Shigueoka *et al.*, 2022) e sim estratégias de manejo integrados que visam reduzir a sua população. Dentre as alternativas de manejo disponíveis, a resistência genética das cultivares é o método mais eficaz e viável economicamente (Holderbaum *et al.*, 2020). Diante disso, a demanda dos produtores por novas cultivares resistentes é constante em função principalmente, da presença de diferentes populações virulentas, que podem afetar a durabilidade dos genes de resistência (Shigueoka *et al.*, 2022) e de misturas populacionais dos nematoides intra e interespecíficas. Nesse aspecto, várias instituições de pesquisa têm conduzido programas de melhoramento genético de forma contínua visando o desenvolvimento de novas cultivares resistentes a esses fitoparasitas.

Entretanto, na espécie *C. arabica*, as principais estratégias de melhoramento genético para a obtenção de uma nova cultivar, visam o desenvolvimento de cultivares do tipo linhagens homozigotas, que são propagadas por sementes e dão origem a lavouras uniformes (Medina Filho; Bordignon, 2008). Trata-se de um processo longo sendo necessário de 25 a 30 anos de pesquisas para desenvolver uma nova cultivar utilizando os métodos tradicionais (Queiroga *et al.*, 2021; Mccook; Montero-Mora *et al.*, 2024). Além do tempo, no melhoramento convencional do café arábica as sucessivas gerações de autofecundação durante a condução da população segregante reduzem o vigor híbrido ou heterose nos caracteres de interesse (Borém; Miranda, 2009).

A heterose é o incremento de vigor de uma planta oriunda de um cruzamento, de tal modo que se diferencie da média dos pais. Em híbridos de *C. arabica*, existem muitos relatos de exploração de heterose (Divya *et al.*, 2021; Etienne *et al.*, 2002; Ito *et al.*, 2011) com aumentos de produtividade significativos, quando comparado com a média dos parentais. Além das vantagens relacionadas ao incremento produtivo dos híbridos,

podemos ressaltar outras características importantes como, a possibilidade de se obter resistência simultânea para pragas e doenças já na geração F₁ (Andreazi *et al.*, 2015) e a redução significativa no tempo de obtenção de cultivares de *C. arabica*, para cerca de 8 a 10 anos (Caixeta *et al.*, 2008; Mccook; Montero-Mora *et al.*, 2024).

Embora a utilização de híbridos apresente várias vantagens, em *C. arabica* a exploração comercial requer o domínio de uma metodologia de multiplicação clonal em larga escala (Andreazi *et al.*, 2015). Nos últimos anos, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de viabilizar a exploração comercial de híbridos de café arábica por diferentes métodos de propagação vegetativa, como a estaquia (Andrade *et al.*, 2023; Azevedo *et al.*, 2020; Cunha *et al.*, 2023) ou a embriogênese somática (Oliveira *et al.*, 2019; Aguilar *et al.*, 2022; Ávila-Victor *et al.*, 2023). Entretanto, ainda não se dispõe de uma metodologia consolidada que viabilize a produção de mudas de híbridos F₁ de *C. arabica* em larga escala. Apesar dos grandes avanços obtidos com a multiplicação via embriogênese somática, seu alto custo econômico e técnico continua sendo um dos maiores obstáculos à sua utilização (Etienne *et al.*, 2018; Georget *et al.*, 2017).

Em função dos entraves para a exploração comercial de híbridos F₁ e da demanda constante dos produtores por cultivares resistentes aos nematoides das galhas aliada a alta produtividade, outras estratégias que visem a redução do tempo para a obtenção de novas cultivares e que possibilitem a exploração da heterose devem ser desenvolvidas pelos melhoristas. Nesse aspecto, o programa de melhoramento genético do cafeeiro da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) têm estudado a viabilidade de desenvolver cultivares em F₂ de *C. arabica* para se aproveitar a metade da heterose da geração F₁ via propagação seminal. Assim, vários trabalhos estão sendo conduzidos para verificar o comportamento das plantas em geração F₂ para diversas características de interesse agrônomo, como por exemplo a resistência a nematoides das galhas e assim concluir sobre a viabilidade de utilização dessas populações F₂ como cultivares comerciais.

Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo avaliar a reação das populações F₂ de *C. arabica* aos nematoides *M. exigua* e *M. paranaensis* visando avaliar a segregação e o potencial dessas plantas para serem utilizadas como cultivares pelos produtores.

2 DESENVOLVIMENTO

MATERIAL E MÉTODOS

Para a obtenção das populações F₂ foram realizados cruzamentos entre linhagens de *Coffea arabica* L. de acordo com as características de interesse do programa de melhoramento genético do cafeeiro (Tabela 1 e 2). Os cruzamentos foram realizados manualmente em 2017, e as mudas dos híbridos F₁ foram plantadas no município de Patrocínio no estado de Minas Gerais – Brasil (18°59'31.9''S 46°59'15.2''W). Em 2021 e 2022 as sementes dos híbridos F₁ foram colhidas para avaliação das populações F₂ em casa de vegetação.

Tabela 1 – Características dos cruzamentos e relação das populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. avaliadas quanto a resistência ao nematoide *Meloidogyne exigua*.

Item	Identificação	Características dos cruzamentos
1	T15	Resistente x Resistente
2	T17	Resistente x Moderadamente Resistente
3	T28	Suscetível x Resistente
4	T32	Suscetível x --
5	T44	Suscetível x Resistente
6	T88	Suscetível x Resistente
7	T89	Suscetível x Resistente
8	T103	Suscetível x Resistente
9	T105	Suscetível x Suscetível
10	T144	Resistente x Resistente
11*	IPR 100	-
12*	MGS Aranãs	-
14*	IAC 125 RN	-
14*	Catuai Vermelho IAC 99	-

*Cultivares utilizadas como testemunhas;

-- Não há informações sobre a resistência ou suscetibilidade do genitor ao *M. exigua*.

Tabela 2 – Características dos cruzamentos e relação das populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. avaliadas quanto a resistência ao nematoide *Meloidogyne paranaensis*.

Item	Identificação	Características dos cruzamentos
1	T15	Resistente x Suscetível
2	T88	Resistente x Suscetível
3	T89	Resistente x Suscetível
4*	IPR 100	-
5*	Catuai Vermelho IAC 99	-

*Cultivares utilizadas como testemunhas

Condução e instalação dos experimentos de populações F₂

Os experimentos foram realizados em casa de vegetação no Campo Experimental de Lavras-MG (CELA) da Eпамig, entre julho de 2021 a dezembro de 2023. Os experimentos foram instalados em delineamento inteiramente casualizado com 30 repetições e uma planta na parcela. Foram avaliados a resistência a *M. exigua* e *M. paranaensis*, sendo realizadas dois experimentos para cada, totalizando quatro experimentos.

Para avaliação de resistência ao nematoide *M. exigua* foram avaliadas 10 populações F₂ e 4 cultivares testemunhas, sendo Catuaí Vermelho IAC 99, IPR 100, MGS Aranãs e IAC 125 RN, totalizando 14 tratamentos (Tabela 1). E para verificar a resistência ao nematoide *M. paranaensis* foram avaliados cinco tratamentos, sendo três populações F₂ e duas cultivares comerciais, Catuaí Vermelho IAC 99 e IPR 100 (Tabela 2).

Para o preparo das mudas, as sementes F₂ foram colocadas para germinar em recipientes próprios contendo areia lavada. Após germinadas, as plântulas serão repicadas para vaso plástico com capacidade de um litro, contendo solo areia 1:1, esterilizado e autoclavado e posteriormente fertilizada de acordo com recomendações para a cultura. Ao atingir de quatro a cinco pares de folhas, as plantas foram inoculadas com a respectiva espécie de nematoide a ser avaliada.

Meloidogyne Exigua

O inóculo de *M. exigua* foi obtido de raízes de cafeeiros de lavouras naturalmente infestada nos municípios de Campos Altos (Minas Gerais/Brasil) e Santo Antônio do Amparo (Minas Gerais/Brasil). A espécie e as raças foram identificadas através de eletroforese (Carneiro; Almeida, 2001) como *M. exigua* de raça 1 e raça 2. Para a inoculação os ovos e J2 de ambas as raças foram extraídos de raízes do cafeeiro (Boneti; Ferraz, 1981), e a suspensão foi calibrada para 1.000 ovos e J2 por mL, proporcionalmente as raças. Sendo inoculados 5.000 (ovos + J2) por planta em três furos de aproximadamente 1 cm de profundidade no experimento 1 e 2.000 (ovos + J2) por planta no experimento 2.

Meloidogyne paranaensis

O inóculo de *M. paranaensis* foi multiplicado em tomate cultivar Santa Clara. Os ovos e J2 foram extraídos de raízes de tomateiro (Boneti; Ferraz, 1981) e a suspensão foi calibrada para 1.000 ovos e J2 por mL. Sendo inoculados 2.000 (ovos + J2) por planta em três furos de aproximadamente 1 cm de profundidade nos dois experimentos.

Avaliação de resistência

As avaliações dos experimentos de *M. exigua* e *M. paranaensis* foram realizadas 11 meses após a inoculação para o primeiro experimento e 8 meses para o segundo experimento para ambas as espécies de nematoides. A parte aérea foi descartada e os sistemas radiculares foram coletados, lavados em água corrente e pesados. As raízes foram submetidas ao método de extração de Hussey e Barker (1973). Após a extração, a população final (FP) foi medida contando o número de ovos e J2 por sistema radicular, utilizando a câmara de Peters sob um microscópio óptico. Com os dados de peso fresco de raízes e da quantificação de nematoides, foi determinado o número de ovos e J2 por grama de raízes (NOJ2.g⁻¹).

O Fator de Reprodução (FR) foi calculado através da razão entre a população final e a população inicial (RF = Pf/Pi) (Oostenbrink, 1966).

Classificação dos níveis de resistência

Para classificar o nível de resistência das populações F₂ e das cultivares utilizadas como testemunha, utilizou-se a redução do fator de reprodução (RFR), que foi calculada através da seguinte fórmula:

$$RFR = \frac{Frp - Frt}{Frp} \times 100$$

Em que:

Frp: fator de reprodução do padrão suscetível

Frt: fator de reprodução do tratamento

Com base na RFR, conforme adaptação de Moura (1997), citada por Ribeiro *et al.* (2005) os genótipos serão classificados em imunes (RFR = 100), altamente resistente (99,99 ≤ RFR ≥ 96,00), resistentes (95,99 ≤ RFR ≥ 90,00), moderadamente resistente (89,99 ≤ RFR ≥ 75,00) e suscetíveis (RFR < 75,00).

Resistência homozigótica e heterozigótica

A resistência homozigota e heterozigota foi identificada pelo cálculo da porcentagem de plantas com diferentes níveis de resistência (%PNR). A % PNR é baseada nos níveis de resistência (I, AR, R, MR, S,) de cada planta, classificados pelos valores de RFR (Moura *et al.*, 1997).

Análise estatística

Para atender os pressupostos da análise de variância, os dados referentes ao fator de reprodução foram transformados usando raiz quadrada e a variável número de ovos e J2 por grama de raízes com a função logarítmica e a normalidade dos resíduos avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965).

Em seguida os dados dos dois experimentos de cada espécie de nematoide foram submetidos a análise de variância, de forma individual, pelo modelo da equação um, e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott (1974) ao nível de 0,05 de significância. Vale ressaltar que o teste de médias foi feito na escala transformada enquanto as médias apresentadas estão na escala real da experimentação.

(1)

$$\bar{y}_i = \mu + g_i + \varepsilon$$

em que:

\bar{y}_i : Valor observado para a característica avaliada;

μ : Constante associada a todas as observações;

g_i : Efeito fixo do genótipo i ;

ε : Erro experimental (aleatório).

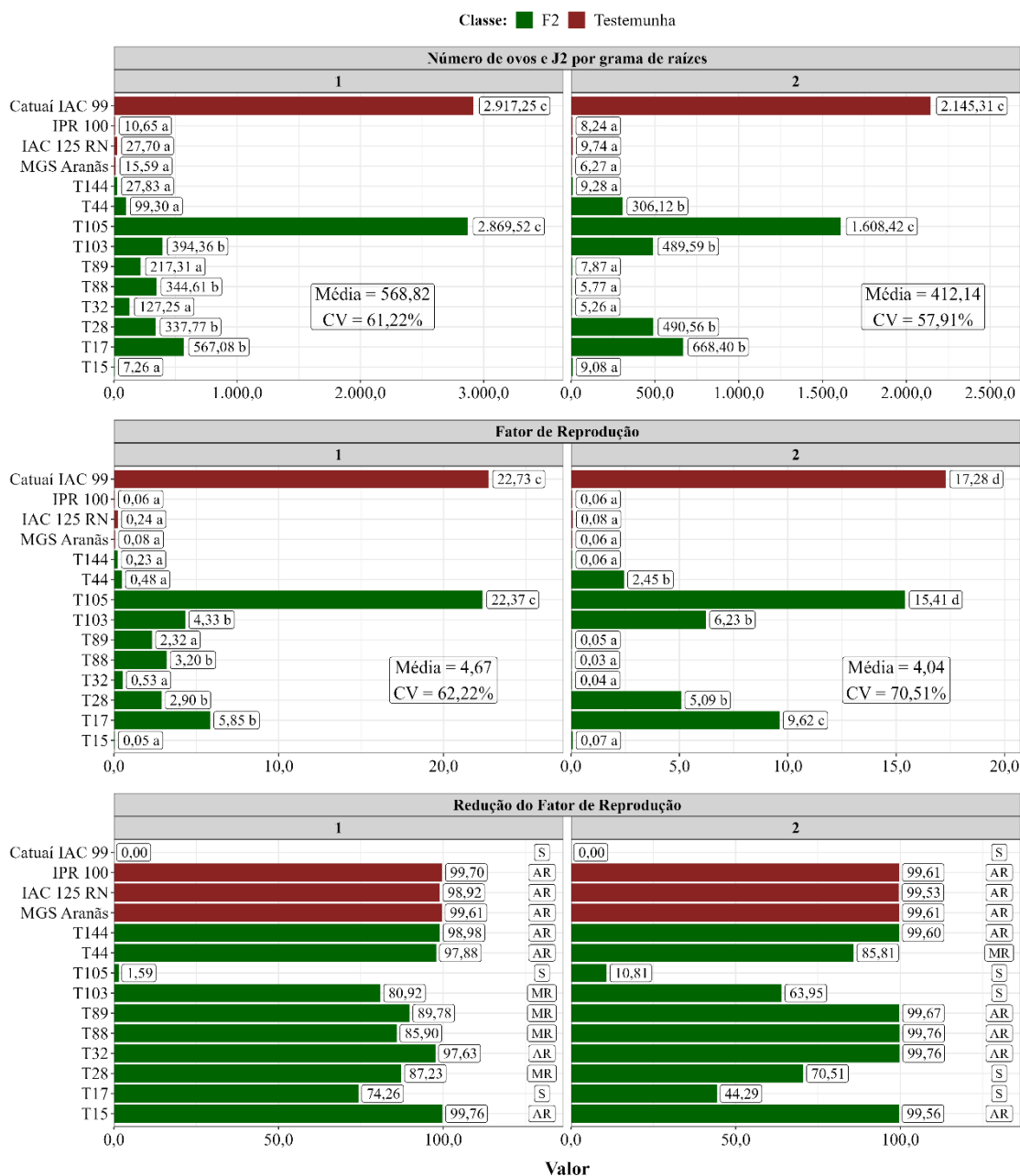
O software R (R Core Team, 2020) versão 4.1.3 foi utilizado para o tratamento dos dados e para o ajuste dos modelos utilizados. As ferramentas disponíveis no pacote Tydiverse (Wickham *et al.*, 2019) foram utilizadas para a manipulação dos dados e para a elaboração dos gráficos apresentados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de variância dos dados obtidos para cada carácter evidenciam a existência de efeitos significativos dos tratamentos, sendo esses efeitos de elevada magnitude com base na análise estatística F ($p \leq 0,01$). Na figura 1 estão dispostos os resultados para os caracteres avaliados em relação ao comportamento das populações F₂ ao nematoide *M. exigua*, assim como a classificação do nível de resistência.

Ambos os experimentos mostraram alta multiplicação do nematoide no controle suscetível (Catuaí Vermelho IAC 99), apresentando altas médias de NOJ2.g⁻¹ e FR. Todas as populações F₂ apresentaram menores valores de NOJ2.g⁻¹ e FR, em comparação com a cultivar Catuaí Vermelho IAC 99, com exceção do T105, que não diferiu estatisticamente. As populações F₂ T15, T32 e T144 apresentaram FR inferior a 1,0 em ambos os experimentos, assim como as cultivares resistentes MGS Aranãs, IPR 100 e IAC 125 RN e foram classificadas como altamente resistentes ao nematoide *M. exigua* com base na RFR (Figura 1).

Figura 1 - Número de ovos e J2 por grama de raízes (NOJ2.g⁻¹) de *Meloidogyne exigua*, fator de reprodução (FR), redução do fator de reprodução (RFR) e níveis de resistência (NR) de populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. avaliados em dois experimentos em casa de vegetação.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade; 1 e 2: experimentos realizados.

Em experimentos com populações F₂ além dos resultados médios dos caracteres avaliados é fundamental a observação do comportamento individual das plantas e assim verificar qual a proporção de plantas que está em segregação. Na figura 2 estão dispostos o percentual de plantas classificadas de acordo com o nível de resistência (%PNR) com base na RFR. Observa-se que as populações F₂ T15 e T144 e as cultivares MGS Aranãs, IAC 125 RN e IPR 100 não apresentaram percentual de plantas classificadas como suscetíveis ao nematoide *M. exigua*. Destacaram-se a população F₂ T15 e a cultivar IPR 100 que apresentaram 100% de plantas I e AR. Já a população F₂ T144 apresentou 96,6% de plantas

I e AR e 3,3% MR. As demais populações F₂ avaliadas apresentaram algum percentual de plantas suscetíveis (Figura 2).

Figura 2 - Porcentagem de plantas com diferentes níveis de resistência (%PNR) ao nematoide *Meloidogyne exigua* com base na redução do fator de reprodução (RFR).



I = Imune; AR = Altamente Resistente, R = Resistente; MR = Moderadamente Resistente; S = Suscetível

Estudos anteriores demonstraram que a resistência a nematoides em café é monogênica dominante para o *M. exigua* (Alpizar *et al.*, 2007) ou devido a dois genes (Anzueto *et al.*, 1995). Em genótipos segregantes, a frequência de plantas suscetíveis para o caráter monogênico seria de 25% e no caso de dois genes a frequência esperada seria de 43,75 % de suscetíveis (Kanayama *et al.*, 2009). Noir *et al.* (2003) avaliaram a segregação de população F₂ derivada do cruzamento entre a linhagem de introgressão resistente T5296 e o acesso suscetível Et6 e observaram segregação próxima de 3:1, herança mendeliana simples, controlada por um gene maior dominante para a resistência, designado no loco *Mex - 1*. No presente estudo foram avaliadas populações F₂ oriundas de cruzamentos entre linhagens resistentes e suscetíveis. A exemplo das populações F₂ T28, T44, T88, T89 e T103 (Tabela 1) que de acordo com a classificação baseada na RFR proposta por Moura (1997) apresentaram um percentual de plantas suscetíveis de 13,3%, 5%, 8,3%, 3,3% e 13,3%, respectivamente.

Na literatura alguns autores analisaram a segregação de populações F₂ de *C. arabica* para doenças como a ferrugem (*Hemileia vastatrix*) (Brito *et al.*, 2010; Diola *et al.*, 2011, 2013; Pestana *et al.*, 2015), antracnose dos frutos (*Colletotrichum kahawae*) (Gimase *et al.*, 2019) e ao *Meloidogyne incógnita* (Anzuetto *et al.*, 2001). E em comum, todos os estudos avaliaram populações F₂ oriundas de cruzamentos entre parentais resistentes e suscetíveis e observaram segregação na geração F₂, assim como, observado nesse estudo.

As populações F₂ T15 e T144 são oriundas de cruzamentos em que ambos os parentais são resistentes ao nematoide *M. exigua* (Tabela 1). Conforme observado na Figura 2, essas populações F₂ não apresentaram percentual de plantas suscetíveis. Nota-se que os alelos que governam a expressão de resistência ao *M. exigua* foram efetivamente transferidos aos seus descendentes, pois nenhuma das plantas foram classificadas como suscetíveis ao nematoide, ou seja, esses resultados demonstram que é possível obter na geração F₂ 100% das plantas resistentes ou com alto grau de resistência ao *M. exigua*, quando o cruzamento for realizado com ambos os parentais resistentes.

Como a resistência ao nematoide *M. exigua* ocorre devido a expressão de gene dominante é provável que com a combinação de parentais resistentes os seus descendentes sejam resistentes e transmitam essa resistência para a geração F₂. Anzuetto *et al.* (2001) avaliaram a resistência ao nematoide *M. incognita* de híbridos F₁ e populações F₂ de acessos de *C. arabica* da Etiópia e observaram que a resistência foi dominante na F₁ e transmitida para as gerações F₂. Segundo os resultados encontrados pelos autores, nas populações F₂ em que apenas um dos parentais é resistente ao nematoide a segregação observada foi de 3:1. Porém quando ambos os parentais eram resistentes a segregação foi de 1:0, ou seja, 100% das plantas foram resistentes na geração F₂ corroborando com os resultados deste trabalho.

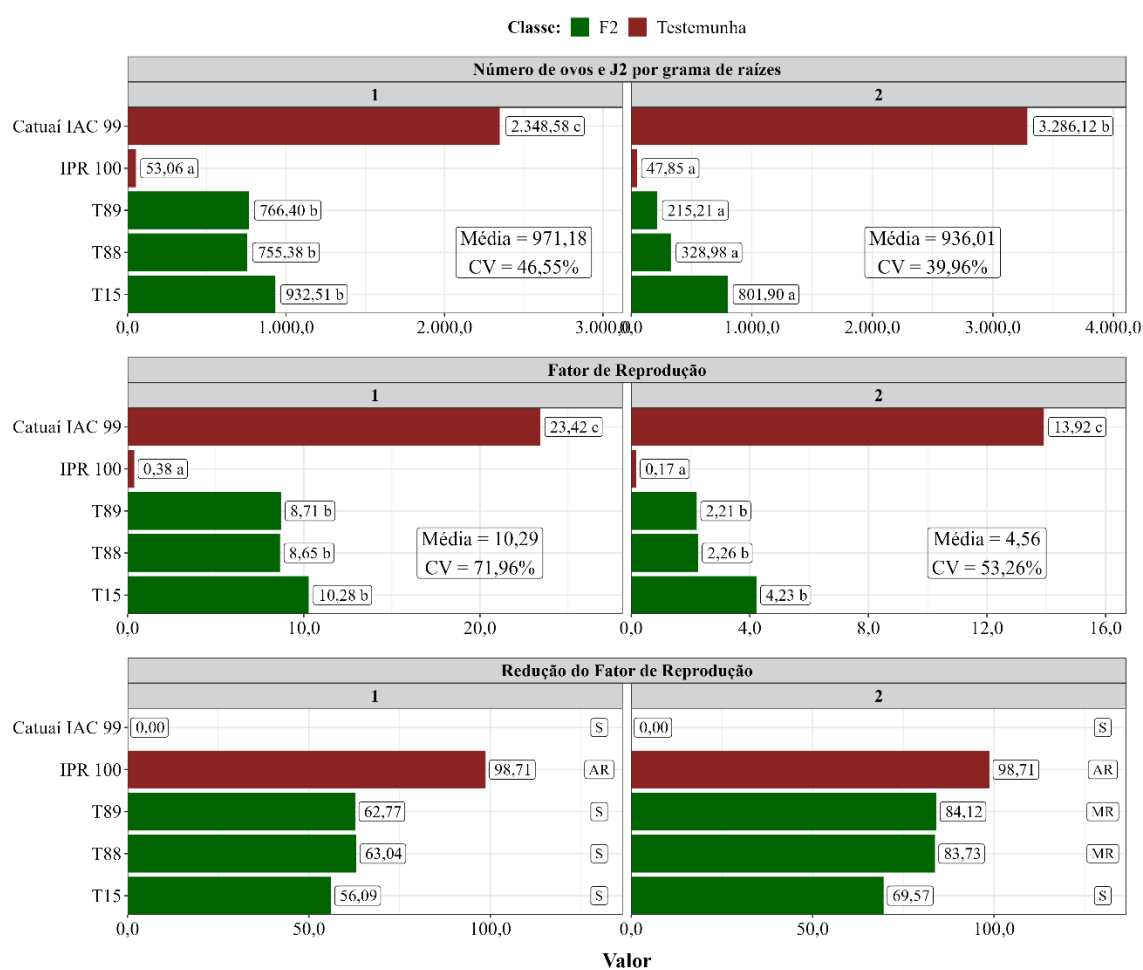
Em relação a população F₂ T105, na figura 2 é possível verificar que 83,3% das plantas foram classificadas como suscetíveis com média de NOJ2.g⁻¹ estatisticamente igual a cultivar suscetível Catuaí Vermelho IAC 99 (Figura 1). Observando a tabela 1, percebe-se que ambas as linhagens que foram utilizadas nos cruzamentos que deu origem a população F₂ T105 são suscetíveis ao nematoide *M. exigua*. E assim por não possuir alelos de resistência, essas cultivares não são capazes gerar descendentes resistentes, o que explica a alta suscetibilidade da população F₂ T105.

Em função da crescente disseminação dos nematoides nas principais regiões produtoras de café no Brasil é desejável que as novas cultivares possuam resistência múltipla principalmente, ao nematoide *M. exigua* e *M. paranaensis*, que são as principais

espécies que ocorrem na cafeicultura brasileira. Diante dessa necessidade as populações F₂ T15, T88 e T89 testadas para *M. exigua* possuem um dos parentais com genes de resistência ao nematoide *M. paranaensis* e dessa forma também foram avaliadas quanto a resistência a este fitoparasita.

Nota-se que em ambos os experimentos as populações F₂ se diferenciaram estatisticamente da cultivar suscetível Catuaí Vermelho IAC 99 quanto ao NOJ2.g⁻¹ e FR. Entretanto, apresentaram FR superiores a 1,0 e foram classificadas segundo a RFR em suscetíveis, com exceção da T88 e T89 no experimento 2 que foram classificadas como MR (Figura 3).

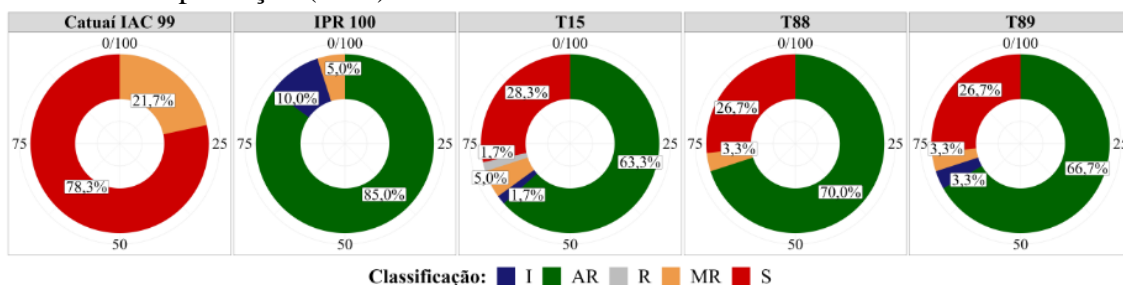
Figura 3 - Número de ovos e J2 por grama de raízes (NOJ2.g⁻¹) de *Meloidogyne paranaensis*, fator de reprodução (FR), redução do fator de reprodução (RFR) e níveis de resistência de populações F₂ e cultivares comerciais de *Coffea arabica* L. avaliados em dois experimentos em casa de vegetação.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott Knott a 5% de probabilidade; 1 e 2: experimentos realizados

Analisando a porcentagem de plantas com diferentes níveis de resistência (%PNR), observa-se que as populações F₂ T15, T88 e T89 apresentaram 66,7%, 70%, 70% das plantas classificadas como I, AR e R ao nematoide *M. paranaensis* (Figura 4).

Figura 4 - Porcentagem de plantas com diferentes níveis de resistência (%PRL) ao nematoide *Meloidogyne paranaensis* com base na redução do fator de reprodução (RFR).



I = Imune; AR = Altamente Resistente, R = Resistente; MR = Moderadamente Resistente; S = Suscetível

As populações F₂ T15, T88 e T89 são oriundas de cruzamentos em que apenas um dos parentais possuem alelos de resistência ao nematoide *M. paranaensis*. Sendo assim, as proporções de plantas resistentes e suscetíveis ficaram próximas de 3:1 conforme as hipóteses formuladas por Noir *et al.* (2003). Baseando nos resultados, a resistência a *M. paranaensis* provavelmente é conferida por um ou mais genes dominantes, assim como verificado para o *M. exigua*.

Diante dos resultados obtidos nesse estudo para diferentes combinações de populações F₂ é possível concluir que a definição dos parentais a serem utilizados nos cruzamentos determinam a taxa de segregação na geração F₂ para a resistência aos nematoides *M. exigua* e *M. paranaensis*. Conforme verificado para o nematoide *M. exigua*, é possível obter alto percentual de plantas resistentes chegando até 100% de plantas com resistência a esse fitonematoide na geração F₂.

Esse resultado é de grande importância para o melhoramento genético do cafeeiro e para a cafeicultura e evidencia que o cruzamento entre parentais que possuem alelos de resistência pode resultar em plantas em geração F₂ com taxa de segregação baixa ou nula e ainda permite a exploração da heterose com a utilização dessas populações F₂ como cultivares pelos produtores. Segundo Sera e Alves (1999) é possível explorar a metade da heterose em lavouras comerciais com híbridos em F₂. Essa possibilidade resultaria em aumentos expressivos da produtividade do *C. arabica* e ainda reduziria de forma significativa o tempo para a obtenção de novas cultivares.

3 CONCLUSÃO

Populações F₂ de café arábica podem apresentar 100% de plantas resistentes ao nematoide *Meloidogyne exigua*, viabilizando sua utilização como cultivar comercial.

Em relação ao nematoide *Meloidogyne paranaensis* o percentual de plantas resistentes obtidas na geração F₂ variaram de 66,7% a 70%.

REFERÊNCIAS

AGUILAR, María Elena *et al.* Somatic embryogenesis of Arabica coffee in temporary immersion culture: Advances, limitations, and perspectives for mass propagation of selected genotypes. **Front. Plant Sci.** 13:994578. 2022. doi: 10.3389/fpls.2022.994578

ANDRADE, Francisco Hélio Alves de *et al.* IBA and melatonin increase trigonelline and caffeine during the induction and initiation of adventitious roots in *Coffea arabica* L. cuttings. **Scientific Reports**, 13:15151, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41288-x>.

ANDREAZI, Elder *et al.* Desempenho de híbridos F1 de café arábica com resistência simultânea a ferrugem, mancha aureolada e bicho mineiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 375 - 382, jul./set. 2015.

ANZUETO, Francisco *et al.* Estudio de la resistencia a *Meloidogyne* spp. en descendencias de *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. In: **SIMPOSIO SOBRE CAFICULTURA LATINOAMERICANA**, 16., 1993, Manágua, Nicarágua. Anais... Tegucigalpa, Honduras: IICA/PROMECAFÉ, v.1., p.399-411, 1995.

ANZUETO, Francisco *et al.* Resistance to *Meloidogyne incognita* in Ethiopian *Coffea arabica* accessions. **Euphytica**, [S.l.], v. 118, p. 1-8, 2001.

ÁVILA-VICTOR, Consuelo Margarita *et al.* *In Vitro* Mass Propagation of Coffee Plants (*Coffea arabica* L. var. Colombia) through Indirect Somatic Embryogenesis. **Plants**, 12, 1237, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12061237>

AZEVEDO, Harianna Paula Alves de *et al.* Rooting biostimulants for *Coffea arabica* L. cuttings. **Coffee Science**, e151635, 2020. Doi: <https://doi.org/10.25186/cs.v15i.1635>

ALPIZAR, E.; ETIENNE, H.; BERTRAND, B. Intermediate resistance to *Meloidogyne exigua* root-knot nematode in *Coffea arabica*. **Crop Protection**, Guildford, v. 26, p. 903-910, 2007.

BARROS, Aline Ferreira *et al.* *Meloidogyne paranaensis* attacking coffee trees in Espírito Santo State, Brazil. **Aust Plant Dis Notes**. 6:43- 45, 2011.

BONETI, J. I.; FERRAZ, S. Modificações no método Hussey & Barker para extração de ovos de *Meloidogyne exigua*, em raízes de cafeeiro. **Fitopatologia Brasileira**, [S.l.], v. 6. n. 553, 1981.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. Recursos Genéticos. In: **Melhoramento de Plantas**. 5. ed., Viçosa: UFV, 2009.

BRITO, Giovani Greigh *et al.* Inheritance of coffee leaf rust resistance and identification of AFLP markers linked to the resistance gene. **Euphytica** 173:255-264, 2010.

CAIXETA, E. T. *et al.* Biotecnologia aplicada ao melhoramento genético do cafeeiro. In: CARVALHO, C. H. S. de. (Ed.). **Cultivares de café: origem, características e recomendações**. Brasília: EMBRAPA Café, v. 1, p. 101-125, 2008.

CARNEIRO, R. M. D. G; ALMEIDA, M. R. A. Técnica de eletroforese usada no estudo de enzimas dos nematoides de galhas para a identificação de espécies. **Nematologia Brasileira**, [S.l.], v. 25, p. 35-44, 2001.

CARNEIRO, Regina M. D. G. *et al.* Identificação e caracterização de espécies de *Meloidogyne* em cafeeiros nos estados de São Paulo e Minas Gerais através dos fenótipos de esterase e SCAR, Multiplex- PCR. **Nematologia Brasileira**, Piracicaba, v. 29, n. 2, p. 233-241, dez. 2005.

CASTRO, José. M. C. *et al.* Levantamento de fitonematoides em cafezais do Sul de Minas Gerais. **Nematologia Brasileira**. 32:56-64, 2008.

CUNHA, Samuel Henrique Braga da *et al.* Transfer of clonal coffee seedlings from the conventional system to the modified hydroponic system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.18, n.3, e2851, 2023.

DIOLA, Valdir *et al.* High-density genetic mapping for coffee leaf rust resistance. **Tree Genetics and Genomes** 7(6): 1199-1208, 2011.

DIOLA, Valdir *et al.* A new set of differentially expressed signaling genes is early expressed in coffee leaf rust race II incompatible interaction. **Functional and Integrative Genomics** 13(3):379-389, 2013.

DIVYA, K. das; SHIVANNA, M. B.; PRAKASH, N. S. Vegetative vigour, yield and field tolerance to leaf rust in four F 1 hybrids of coffee (*Coffea arabica* L.) in India. **J. Hortl. Sci.** Vol. 16(2): 301-308, 2021.

ETIENNE, Hervé. *et al.* Biotechnological application for the improvement of coffee (*Coffea arabica* L.). **Vitro Cellular & Developmental Biology**, v. 38. p. 129-138, 2002.

ETIENNE, Hervé *et al.* Coffee somatic embryogenesis: how did research, experience gained and innovations promote the commercial propagation of elite clones from the two cultivated species? **Front. Plant Sci.** 9 (1630) 1-21, 2018. doi:10.3389/fpls.2018.01630.

GIMASE, James M. *et al.* Evaluation of coffee berry disease resistance (*Colletotrichum kahawae*) in F2 populations derived from Arabica coffee varieties Rume Sudan and SL 28. **Journal of Plant Breeding and Crop Science**. Vol. 11(9), pp. 225-233, October-December 2019. DOI: 10.5897/JPBCS2019.0829

HOLDERBAUM, Melina Marques *et al.* Arabica coffee accessions originated from Ethiopia with resistance to nematode *Meloidogyne paranaensis*. **Australian Journal of Crop Science**, [S.l.], v. 14, p. 08, p. 1209-1213, 2020.

GEORGET, Frédéric *et al.* Somatic embryogenesis-derived coffee plantlets can be efficiently propagated by horticultural rooted mini-cuttings: a boost for somatic embryogenesis. **Sci. Hortic.** 216, 177–185, 2017. doi:10.1016/j.scienta.2016.12.017.

HUSSEY, R. S.; BARKER, K. R. A comparison of methods of collecting inocula of *Meloidogyne* spp. including a new technique. **Plant Disease Reporter**, Washington, v. 57, p. 1025-1028, 1973.

ITO, Dhalton Shiguer *et al.* Heterose em híbridos de café arábicos com resistência à ferrugem, mancha aureolada e aos nematoides. SPCB, Araxá, MG – **Resumos Expandidos**, 356, 2011.

KANAYAMA, Fabio Seidi *et al.* Progenies de *Coffea arabica* CV. IPR 100 com resistência ao nematoide *Meloidogyne Incognita* raça 1. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1321-1326, set./out., 2009.

MEDINA FILHO, Herculano Pena; BORDIGNON, Rita. Melhoramento do café arábica ao longo dos anos. In: CARVALHO, C. H. S. de. (Org.). **Cultivares de café**. Brasília: Embrapa Café, p. 65-82, 2008.

MOURA, Romero Marinho de. O gênero *Meloidogyne* e a meloidoginose – Parte II. **Revisão Anual de Patologia de Plantas**, 5:281-315. 1997.

MCCOOK, Stuar; MONTERO-MORA, Andrea. Coffee breeding in a time of crisis: F1 hybrids in Central America since 1990. **Plants People Planet**, 1-10, 2024. DOI: 10.1002/ppp3.10480

NOIR, S. *et al.* Identification of a major gene (*Mex-1*) from *Coffea canephora* conferring resistance to *Meloidogyne exigua* in *Coffea arabica*. **Plant Pathology** 52:97-103. 2003.

OLIVEIRA, Kenia Carvalho de *et al.* Effects of somatic embryogenesis on gene expression of cloned coffee heterozygous hybrids. **Acta Physiologiae Plantarum**, 41:118, 2019.

OOSTENBRINK, M. Major characteristics of the relation between nematodes and plants. Mededelingen Van De landbouwhogeschool Te Wageningen, v.66, p.1-46, 1966.

PESTANA, Kátia Nogueira *et al.* Inheritance study and linkage mapping of resistance loci to *Hemileia vastatrix* in Híbrido de Timor UFV 443-03. **Tree Genetics and Genomes** 11:72, 2015.

QUEIROGA, Vicente de Paula *et al.* Sistema produtivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado. In: QUEIROGA, V. A. et al. (ed.). Cultivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado para produção de grãos de alta qualidade. 1ª ed. Campina Grande: AREPB, 2021.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2020. URL <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO, Regina Cássia Ferreira *et al.* Resistência de progênies de híbridos interespecíficos de *Coffea arabica* e *Coffea canephora* a *Meloidogyne exigua*. **Nematologia Brasileira**, v. 29, n. 1, p. 11-16, 2005.

SALGADO, Sônia Maria de Lima; REZENDE, Juliana Costa; NUNES, José Airton Rodrigues. Selection of coffee progenies for resistance to nematode *Meloidogyne paranaensis* in infested area. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v. 14, p. 94-101, 2014.

SALGADO, Sônia Maria de Lima *et al.* *Meloidogyne paranaensis* e *Meloidogyne exigua* em lavouras cafeeiras na região sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 4, p. 475 - 481, out./dez. 2015.

SERA, T.; ALVES, S. J. Melhoramento genético de plantas perenes. In: Destro, D.; MONTALVÁN, R. (Org.). Melhoramento genético de plantas. Editora UEL, Londrina, p.369- 422, 1999.

SERA, Gustavo Hiroshi *et al.* Resistance to nematode *Meloidogyne paranaensis* in Arabica coffee genotypes introgressed with *Coffea liberica*. **Australian Journal of Crop Science**. AJCS 14(08):1236-1241, 2020.

SHIGUEOKA, Luciana Harumi *et al.* Virulence and reproductive fitness of *Meloidogyne paranaensis* field populations in Coffee genotypes. **Plant Disease**, 106:2618-2624, 2022.

SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, 52, 3/4, 591–611, 1965.

TERRA, Willian César *et al.* Expanded geographic distribution of *Meloidogyne paranaensis* confirmed on coffee in Brazil. **Plant Disease** **103**: 589, 2019.

VILLAIN L.; SALGADO S. M. L.; TRINH P. Q. Nematode parasites of coffee and cocoa. In: SIKORA R. A. (Ed.), COYNE, D. (Ed.), HALLMANN, J. (Ed.), TIMPER, P. (Ed.). **Plant parasitic nematodes in subtropical and tropical agriculture**. Wallingford: CABI, 2018. p. 536-583.

WICKHAM, Hadley *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal Of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 21, nov. 2019.

ARTIGO 3 - POTENCIAL DE HÍBRIDOS F₁ E DE POPULAÇÕES F₂ DE *Coffea arabica* L.

RESUMO

Conhecer o potencial produtivo dos híbridos F₁ e avaliar a possibilidade de utilização de populações F₂ de *Coffea arabica* L. como cultivares comerciais pelos produtores representa um avanço para a cafeicultura. Neste aspecto, o objetivo deste estudo é verificar a potencial produtivo e a heterose de híbridos F₁ *Coffea arabica* L. e avaliar o desempenho e a heterose de plantas de café arábica em geração F₂. Os experimentos foram instalados no Campo Experimental da Epamig, em Patrocínio-MG. O primeiro experimento com híbridos F₁ foi implantado em 2019 em delineamento em blocos casualizado (DBC) com três repetições e seis plantas por parcela. Os tratamentos foram constituídos de nove híbridos e dez cultivares, sendo avaliado a produtividade (sacas ha⁻¹) em 2021, 2022 e 2023. Em 2022 foi implantado dois experimentos com populações F₂. Sendo o primeiro instalado em DBC com quatro blocos e 28 tratamentos sendo, 14 populações F₂ e 14 cultivares genitores em sistema de irrigação por gotejamento. E o segundo foi instalado em sistema de irrigação por pivô e constituído por 9 populações F₂. Em 2023 foram avaliados os parâmetros de desenvolvimento vegetativo como, altura de planta, diâmetro de caule, número de ramos plagiotrópicos, diâmetro de copa e vigor vegetativo em ambos os experimentos de populações F₂. Em relação a produtividade (sacas ha⁻¹) foi calculado a produtividade esperada para as populações F₂ para a primeira colheita. Os híbridos F₁ EPAMIG 36, EPAMIG 02, EPAMIG 44 e EPAMIG 43 apresentaram as maiores produtividades acumulada e a heterose variou de 17,2% a 95,5%. As populações F₂ apresentaram um desenvolvimento inicial satisfatório.

Palavras-chave: heterose; cultivares F₂; melhoramento genético.

POTENTIAL OF F₁ HYBRIDS AND F₂ POPULATIONS OF *Coffea arabica* L.

ABSTRACT

Knowing the productive potential of F₁ hybrids and evaluating the possibility of using F₂ populations of *Coffea arabica* L. as commercial cultivars by producers represents an advance for coffee farming. In this aspect, the objective of this study is to verify the productive potential and heterosis of F₁ *Coffea arabica* L. hybrids and to evaluate the performance and heterosis of Arabica coffee plants in F₂ generation. The experiments were installed at the Epamig Experimental Field, in Patrocínio-MG. The first experiment with F₁ hybrids was implemented in 2019 in a randomized block design (DBC) with three replications and six plants per plot. The treatments consisted of nine hybrids and ten cultivars, with productivity (bags ha⁻¹) being evaluated in 2021, 2022 and 2023. In 2022, two experiments were implemented with F₂ populations. Being the first installed in DBC with four blocks and 28 treatments, 14 F₂ populations and 14 parent cultivars in a drip irrigation system. And the second was installed in a pivot irrigation system and consisted of 9 F₂ populations. In 2023, vegetative development parameters such as plant height, stem diameter, number of plagiotropic branches, crown diameter and vegetative vigor were evaluated in both F₂ population experiments. In relation to productivity (bags ha⁻¹), the expected productivity was calculated for the F₂ populations for the first harvest. The F₁ hybrids EPAMIG 36, EPAMIG 02, EPAMIG 44 and EPAMIG 43 presented the highest accumulated productivity and heterosis varied from 17,2% to 95.5%. The F₂ populations showed satisfactory initial development.

Keywords: heterosis; F₂ cultivars; genetical enhancement.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se na produção mundial de café, em função principalmente das condições climáticas favoráveis para o desenvolvimento da cultura e da atuação dos programas de melhoramento genético no país (Oliveira *et al.*, 2023). Dentre as espécies cultivadas, destaca-se o *Coffea arabica* L. uma espécie alotetraplóide, autógama com $2n=4x=44$ cromossomos (Lashermes *et al.*, 1999), capaz de se autopolinizar naturalmente em campo. Em função da autofecundação, as cultivares desenvolvidas são linhagens homozigotas que tradicionalmente são multiplicadas por sementes e dão origem a lavouras uniformes (Andreazi *et al.*, 2015; Georget *et al.*, 2019).

Entretanto, para que uma nova linhagem seja disponibilizada aos produtores é necessário de 25 a 30 anos de pesquisas pelos programas de melhoramento genético do cafeeiro (Queiroga *et al.*, 2021; Mccook; Montero-Mora, 2024). Além do tempo, as linhagens possuem menor capacidade produtiva em razão da perda do vigor híbrido resultado das sucessivas gerações de autofecundação (Borém; Miranda, 2009).

Assim como em outras plantas híbridas, os híbridos F_1 de *C. arabica* L. possuem vantagens genéticas e agronômicas (Gallais, 2009), como rendimentos maiores e mais estáveis, frutificação precoce, rápido crescimento das plantas, maior vigor, melhor qualidade de bebida, adaptabilidade a sistemas agroflorestais e menos riscos, pois são mais resistentes a pragas e doenças (Bertrand *et al.*, 2011; Georget *et al.*, 2019; Marie *et al.*, 2020; Turreira-García, 2022). Além disso, uma nova variedade F_1 pode ser selecionada, testada e lançada em apenas 8 a 10 anos (Mccook; Montero-Mora, 2024).

Apesar das vantagens, a utilização dos híbridos F_1 está condicionada à descoberta de soluções técnicas de custo moderado que permitam a sua utilização em escala comercial (Huang *et al.*, 2014). Dentre as técnicas estudadas destaca-se a embriogênese somática (Etienne *et al.*, 2018; Molina *et al.*, 2002; Gatica-Arias *et al.*, 2008;), miniestacas enraizadas (Georget *et al.*, 2017; Matamoros-Quesada *et al.*, 2020) e a esterilidade masculina (Georget *et al.*, 2019). Em alguns países da América Central, híbridos F_1 de *C. arabica* L. propagados por embriogênese somática têm sido disponibilizados comercialmente desde 2008 (Mccook; Montero-Mora, 2024) e desde então, vários fatores têm dificultado a sua adoção. Turreira-García (2022) analisaram a percepção de agricultores a adoção dos híbridos F_1 na América Central e concluíram que o acesso às mudas, tanto física como financeiramente, maior necessidade de mão-de-obra e falta de serviço de extensão são os principais determinantes para a adoção da tecnologia.

Após os entraves encontrados com a disponibilização e adesão dos F_1 via embriogênese somática, os pesquisadores estão buscando formas mais econômicas de propagar as plantas F_1 , a exemplo da técnica das miniestacas enraizadas, que tem sido avaliada e otimizada na América Central. Matamoros-Quesada *et al.* (2020) avaliaram o enraizamento e crescimento de miniestacas de híbridos F_1 na Costa Rica e alcançaram porcentagens de enraizamento superiores a 83% e um bom desenvolvimento das plantas no viveiro. De acordo com McCook e Montero-Mora (2024) a propagação dos híbridos F_1 por miniestacas representa a melhor oportunidade de redução de custos de produção de mudas até o momento e esperam que o aprimoramento desta tecnologia resulte em uma maior adesão dos cafeicultores as plantas F_1 .

No Brasil, alguns trabalhos foram desenvolvidos nos últimos anos visando a propagação dos híbridos F_1 por embriogênese somática (Oliveira *et al.*, 2019) e estaquia caulinar (Andrade *et al.*, 2023; Azevedo *et al.*, 2020; Cunha *et al.*, 2023; Rezende *et al.*, 2017) técnica já utilizada em *Coffea canephora*, porém os resultados não são satisfatórios para a espécie *C. arabica* L. Desta forma, as novas lavouras continuam sendo plantadas com linhagens, por meio da propagação por sementes pois, não há uma metodologia consolidada que permite a propagação de híbridos F_1 em escala comercial no país.

Diante das dificuldades para a utilização dos híbridos F_1 , outras estratégias devem ser desenvolvidas pelos programas de melhoramento genético do cafeeiro, visando não só a redução do tempo para disponibilizar novas cultivares, como também incrementos de produtividade com a exploração da heterose e resistência múltipla a pragas e doenças. Nesse aspecto, a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) têm conduzido trabalhos visando avaliar o desempenho das características de interesse agrônomo não só de híbridos F_1 como também de populações F_2 , visando a utilização destas como cultivares comerciais pelos cafeicultores.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é verificar a heterose para produtividade de híbridos F_1 e avaliar o desempenho vegetativo e produtivo de populações F_2 de *Coffea arabica* L. visando analisar o potencial das populações F_2 para serem utilizadas como cultivares pelos produtores.

2 DESENVOLVIMENTO

MATERIAL E MÉTODOS

Experimento com híbridos F₁

Foram avaliados 9 híbridos F₁ resultantes dos cruzamentos envolvendo 14 linhagens de *Coffea arabica* L. (Tabela 1) escolhidas de acordo com as características de interesse do programa de melhoramento genético da EPAMIG.

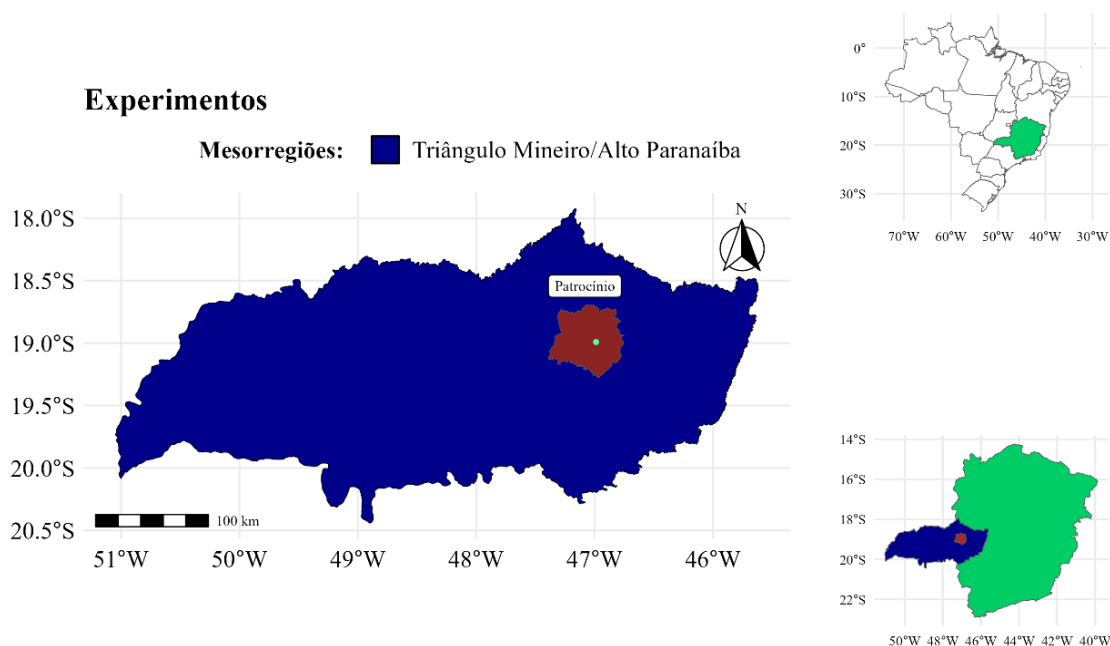
Tabela 1 - Relação, genealogia e instituição dos genitores de *Coffea arabica* L. utilizados nos cruzamentos.

Genitores	Genealogia	Instituição
MGS Aranãs*	Catimor UFV 1603-215 x Icatu IAC H3851-2	EPAMIG
MGS Epamig 1194	Catuaí Amarelo x Mundo Novo	EPAMIG
MGS Paraíso 2	Catuaí Amarelo IAC 30 x Híbrido de Timor UFV 445-46	EPAMIG
Catiguá MG2*	Catuaí Amarelo IAC 86 x Híbrido de Timor UFV 440-10	EPAMIG
H493	Catuaí Vermelho IAC 44 x Híbrido de Timor UFV 446-08	EPAMIG
H516	Catuaí Amarelo IAC 86 x Híbrido de Timor UFV 446-08	EPAMIG
Acauã Novo*	Mundo Novo IAC 388-17 x Sarchimor IAC 1668	PROCAFÉ
Guará*	Catuaí Vermelho 20/15 cv 476	PROCAFÉ
Azulão*	Catuaí 36/6 cv 366	PROCAFÉ
Catuaí 24-137*	Icatu Vermelho x Catuaí	PROCAFÉ
IAC 125 RN*	Villa Sarchi e Híbrido de Timor CIFC 832/2	IAC
Catuaí IAC 99*	Caturra Amarelo IAC 476-11 x Mundo Novo IAC 374-19	IAC
IPR 102*	Catuaí Vermelho IAC 99 x Icatu	IDR-Paraná
IPR 100*	Catuaí Vermelho IAC 81 x IAC 1110-8 (BA-10)	IDR-Paraná
Tratamentos	Híbridos F₁	Instituição
1	EPAMIG 44	EPAMIG
2	EPAMIG 36	EPAMIG
3	EPAMIG 24	EPAMIG
4	EPAMIG 46	EPAMIG
5	EPAMIG 02	EPAMIG
6	EPAMIG 43	EPAMIG
7	EPAMIG 41	EPAMIG
8	EPAMIG 28	EPAMIG
9	EPAMIG 01	EPAMIG
Tratamentos	Populações F₂	Instituição
1	T15	EPAMIG
2	T17	EPAMIG
3	T28	EPAMIG
4	T32	EPAMIG
5	T44	EPAMIG
6	T88	EPAMIG
7	T89	EPAMIG
8	T103	EPAMIG
9	T105	EPAMIG
10	T144	EPAMIG
11	H1097 PL 2	EPAMIG
12	H1097 PL 7	EPAMIG
13	H1097 PL 17	EPAMIG
14	H1097 PL 25	EPAMIG

*Linhagens avaliadas no experimento dos híbridos F₁

Os cruzamentos foram realizados no ano de 2017. Em 2018 os frutos foram colhidos e as sementes foram colocadas em estufas para a germinação e produção das mudas. Posteriormente, as mudas foram levadas à campo em fevereiro de 2019 na estação experimental da EPAMIG localizada em Patrocínio no estado de Minas Gerais (18°59'31.9"S 46°59'15.2"W).

Figura 1 - Localização dos experimentos de híbridos F₁ e de populações F₂ na Fazenda Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) no município de Patrocínio-MG, Brasil.

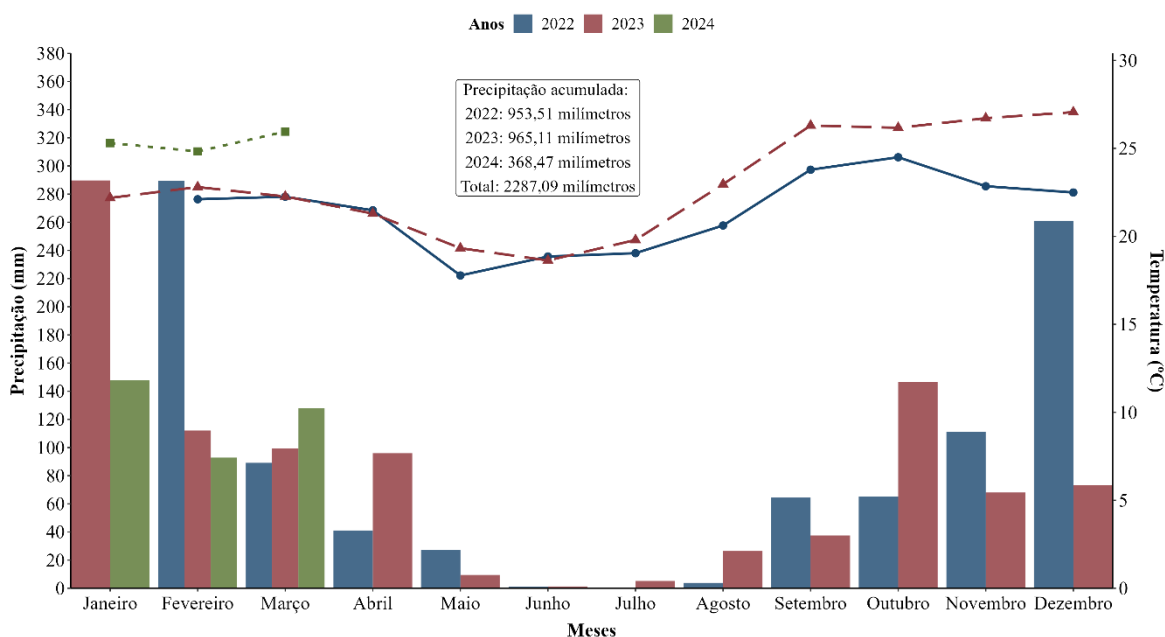


O ensaio foi instalado no delineamento de blocos casualizados (DBC) com três repetições, sendo os tratamentos compostos pelos 9 híbridos de *Coffea arabica* L. e 10 linhagens (Tabela 1). Utilizou-se o espaçamento de 3,5 metros (m) x 1,0 m (três metros e meio entre sulcos de plantio por um entre plantas) o que culminou em uma densidade final de 2.857 plantas por hectare. A avaliação dos tratamentos foi realizada pela quantificação da produção dos frutos colhidos nas seis plantas que constituíram a parcela experimental. A primeira colheita ocorreu em junho de 2021, sendo posteriormente realizadas novas colheitas nos anos seguintes de 2022 e 2023. Durante o processo de colheita uma amostra representativa da produção da parcela foi separada, seca ao sol e beneficiada, o que possibilitou calcular a produtividade de café beneficiado por hectare de cada um dos genótipos.

Experimentos com Populações F₂

No ano de 2021 foram retiradas sementes de 14 híbridos, escolhidos de acordo com as características de interesse do programa de melhoramento genético da EPAMIG, para compor o experimento das populações F₂. As mudas foram produzidas em viveiro e o experimento foi implantado na Fazenda Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais – EPAMIG, situada no município de Patrocínio, Estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 1) em fevereiro de 2022. A precipitação (mm) e a temperatura (°C) média entre fevereiro de 2022 e março de 2024 (período de condução do experimento com populações F₂) estão apresentados na figura 2.

Figura 3 - Precipitação (mm) e temperatura (°C) média no município de Patrocínio-MG, no período de fevereiro de 2022 a março de 2024.



O experimento com as populações F₂ foi implantado em sistema de irrigação por gotejamento e é composto por 14 tratamentos em geração F₂ e 14 cultivares de *C. arabica* utilizadas como genitores (Tabela 1), totalizando 28 tratamentos. O delineamento experimental utilizado é o em blocos casualizados (DBC) com quatro repetições e 20 plantas por parcela para as populações F₂ e 10 plantas por parcelas para os genitores, totalizando 112 parcelas experimentais. O espaçamento utilizado foi de 3,5 x 0,6 m, totalizando um estande de 4.629 plantas/ha.

As populações F₂ T15, T17, T32, T44, T88, T89, T103, T105 e T144 também foram avaliadas em experimento com sistema de irrigação por pivô central. O espaçamento adotado foi de 1,75 x 0,5 m, totalizando um estande de 11.428 plantas ha⁻¹.

Em agosto de 2023 foram realizadas as avaliações de altura de planta, diâmetro de caule, diâmetro da copa, número de ramos plagiotrópicos e vigor vegetativo em ambos os experimentos.

A altura de planta foi realizada com auxílio de uma régua graduada em centímetros, medindo-se a distância entre o nível do solo até o par de folha terminal do ramo ortotrópico; o diâmetro de caule foi medido com auxílio de um paquímetro, à 10 cm acima do nível do solo; o diâmetro de copa foi determinado no terço médio da planta com auxílio de uma régua graduada em centímetros; o número de ramos plagiotrópicos foi avaliado pela contagem direta dos ramos plagiotrópicos em cada planta; o vigor vegetativo foi avaliado através de uma escala de notas variando de 1 a 10, sendo: 1 = planta depauperada e 10 = planta com vigor vegetativo máximo.

Para as populações F₂ T15, T17, T28, T32, T44, T88, T89, T103 e T105 foi calculada a produtividade média esperada (sacas ha⁻¹) para a primeira colheita que ocorrerá no ano de 2024 pela expressão:

$$\overline{F2} = \overline{F1} - \frac{h}{2}$$

Em que:

$\overline{F2}$ = Produtividade média esperada para a população F₂ (sacas ha⁻¹);

$\overline{F1}$ = Produção média (sacas ha⁻¹) do híbrido F₁;

h = Heterose do híbrido F₁.

Análises Estatísticas

Experimento híbridos F1

A produtividade (sacas ha⁻¹) para os anos de 2021, 2022, 2023 e acumulada do experimento dos híbridos F₁ e genitores foram analisados separadamente com base no modelo da equação um e a normalidade dos resíduos, foi verificada usando o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965). Os BLUEs (*Best Linear Unbiased Estimator*) estimados foram agrupados com base no teste de Scott-Knott (1974).

$$\bar{y}_{ij} = \mu + r_j + g_i + \varepsilon$$

em que:

\bar{y}_{ij} : Valor da variável avaliada no genótipo i na repetição j ;

μ : Constante associada a todas as observações;

g_i : Efeito fixo do genótipo i ;

r_j : Efeito fixo da repetição j ;

ε : Erro experimental aleatório da variável avaliada no genótipo i na repetição j .

Cálculo da heterose

Com base nos BLUEs estimados, foi então calculada a heterose para os híbridos F₁ com relação a seus respectivos genitores, conforme a equação dois.

(2)

$$H_i = \frac{mh_i - mp_{jk(i)}}{mp_{jk(i)}} * 100$$

em que:

H_i : heterose, em porcentagem, do híbrido F₁ i ;

mh_i : BLUE do híbrido F₁ i ;

$mp_{jk(i)}$: BLUE médio entre os genitores j e k do híbrido F₁ i .

Experimentos de gotejo e pivô com populações F₂

Os experimentos em cada uma das condições de irrigação foram analisados separadamente com base no modelo da equação um e a normalidade dos resíduos, foi verificada usando o teste de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk, 1965). Os BLUEs (*Best Linear Unbiased Estimator*) estimados foram agrupados com base no teste de Scott-Knott (1974).

(1)

$$\bar{y}_{ij} = \mu + r_j + g_i + \varepsilon$$

em que:

\bar{y}_{ij} : Valor da variável avaliada no genótipo i na repetição j ;

μ : Constante associada a todas as observações;

g_i : Efeito fixo do genótipo i ;

r_j : Efeito fixo da repetição j ;

ε : Erro experimental aleatório da variável avaliada no genótipo i na repetição j .

Cálculo da heterose

Com base nos BLUEs estimados no experimento conduzido sob gotejamento, foi então calculada a heterose para as variáveis vegetativas entre as populações F_2 com relação a seus respectivos genitores, conforme a equação dois.

(2)

$$H_i = \frac{mh_i - mp_{jk(i)}}{mp_{jk(i)}} * 100$$

em que:

H_i : heterose, em porcentagem, do material $F_2 i$;

mh_i : BLUE do material $F_2 i$;

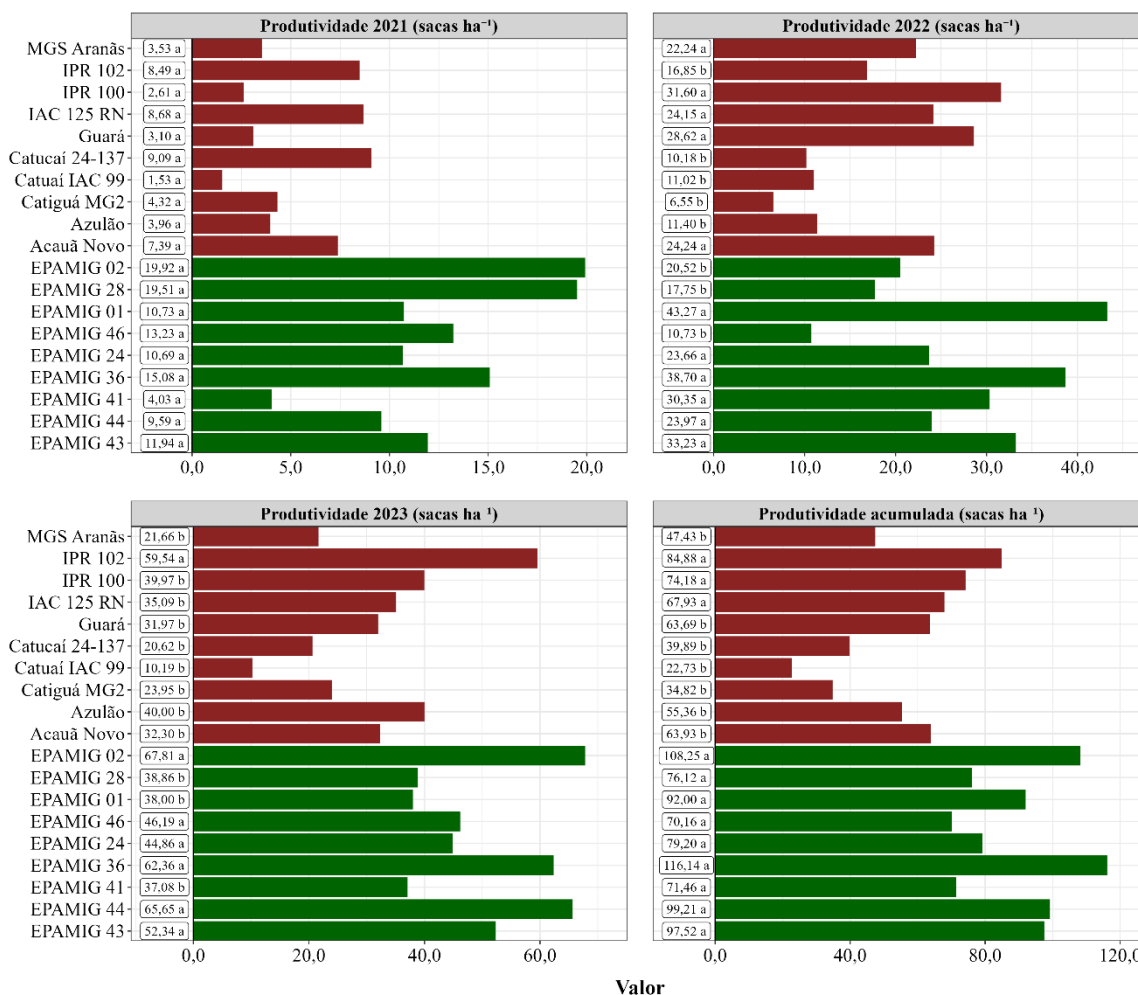
$mp_{jk(i)}$: BLUE médio entre os genitores j e k do material $F_2 i$.

O software R (R Core Team, 2020) versão 4.1.3 foi utilizado para o tratamento dos dados e para o ajuste dos modelos utilizados. As ferramentas disponíveis no pacote Tydiverse (Wickham *et al.*, 2019) foram utilizadas para a manipulação dos dados e para a elaboração dos gráficos apresentados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

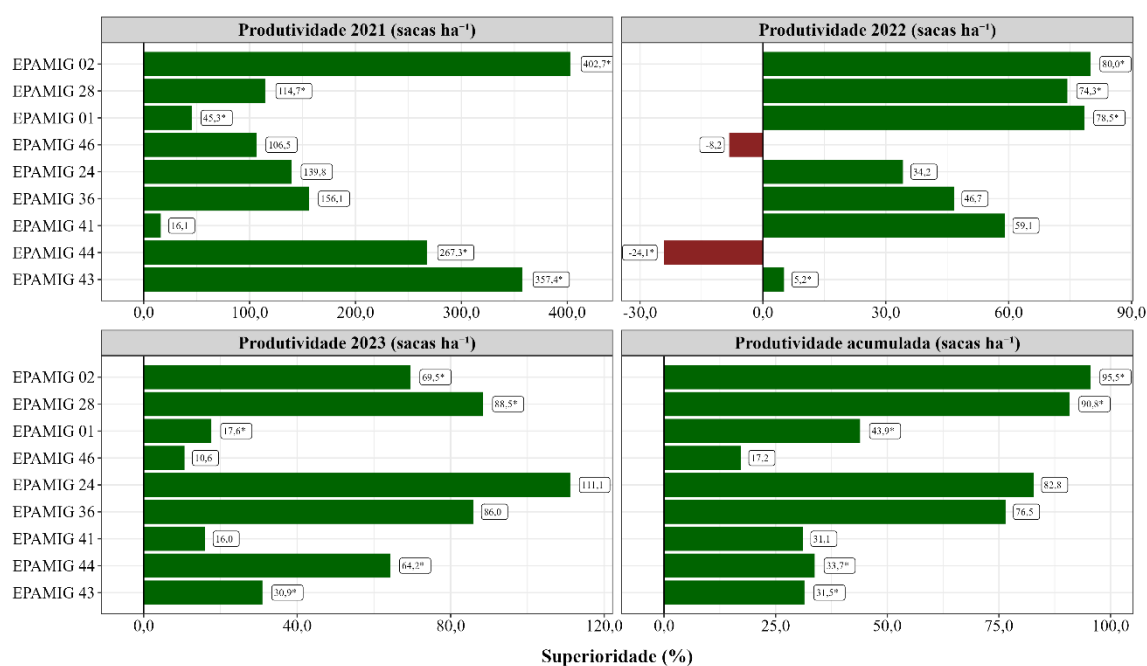
Os dados sobre a produção anual e acumulada dos híbridos F₁ e dos genitores estão dispostos na figura 3. Em geral, houve um aumento de produtividade (sacas ha⁻¹) tanto para os genitores quanto para os híbridos F₁ ao longo dos anos. Analisando a produtividade nos anos 2021, 2022 e 2023 nota-se que os híbridos EPAMIG 24, EPAMIG 36, EPAMIG 44 e EPAMIG 43 se destacaram estatisticamente e apresentaram uma tendência de produtividade crescente durante as três safras, com menor tendência de ser afetado pelo efeito de bienalidade. Em relação a produtividade acumulada, todos os híbridos se destacaram, assim como as cultivares IPR 102, IPR 100 e IAC 125 RN. Entre os nove híbridos F₁, o EPAMIG 36 registrou desempenho produtivo superior, seguido do EPAMIG 02, EPAMIG 44 e EPAMIG 43.

Figura 3 – Produtividade (sacas ha⁻¹) de híbridos F₁ de *Coffea arabica* L. e genitores nos anos 2021, 2022, 2023 e produtividade acumulada avaliados em experimento conduzido no município de Patrocínio-MG, Brasil.



No melhoramento genético de plantas, o cálculo da heterose representa uma das formas de se verificar a superioridade dos F_1 em relação à média dos genitores. Na figura 4 estão representados os resultados da heterose (%) observada para os híbridos F_1 nas safras de 2021, 2022, 2023 e para a produtividade acumulada nos três anos. Nota-se que a heterose foi positiva para todos os híbridos nas três safras e na produtividade acumulada, com exceção dos híbridos EPAMIG 46 e EPAMIG 41 que no ano de 2022 apresentaram produtividades inferiores aos seus genitores. Considerando a produtividade acumulada (sacas ha^{-1}) a heterose variou de 17,2% a 95,5% entre os híbridos.

Figura 4 – Heterose de híbridos F_1 de *Coffea arabica* L. para a produtividade de café beneficiado (sacas ha^{-1}) produzidos nos anos 2021, 2022, 2023 e produtividade acumulada em experimento conduzido no município de Patrocínio-MG, Brasil.



* Heterose (calculada com a média de apenas um dos genitores presente no experimento)

A superioridade dos híbridos F_1 de *C. arabica* L. em função da expressão da heterose já foi observada por diversos autores com aumentos expressivos de produtividade quando comparado com a média dos parentais (Bertrand *et al.*, 2005, 2011, 2021; Andreazi *et al.*, 2015). Na Costa Rica Kahsay *et al.* (2023) avaliaram o desempenho de híbridos F_1 de *C. arabica* L. e verificaram uma produção superior dos híbridos em relação as variedades de café tradicionais variando de 29% a 61%. No Brasil, Andreazi *et al.* (2015) avaliaram o desempenho de híbridos F_1 em três municípios do estado do Paraná e observaram que a produção relativa de alguns híbridos em relação a cultivar linhagem pura mais produtiva variou de acordo com o município de 50,80 a 184,05%. Esses resultados demonstram a superioridade dos híbridos F_1 , e a sua utilização em lavouras comerciais de

C. arabica L. resultariam em incrementos significativos de produtividade em relação as linhagens tradicionais atualmente cultivadas pelos cafeicultores.

Além de maiores produtividades, outro ponto em destaque dos híbridos F_1 é a rapidez no retorno dos investimentos já nos primeiros anos após o plantio além de produzirem de forma mais uniforme ao longo dos anos, o que representa uma vantagem em comparação com as variedades tradicionais (Bertrand *et al.*, 2011; Turreira-García, 2022). Observando a produtividade dos híbridos F_1 em 2021, ocasião da primeira colheita, nota-se que apesar de não ter sido detectado diferença estatística todos os híbridos, com exceção do EPAMIG 41, apresentaram produtividade superior as cultivares utilizadas como genitores, garantindo assim, mais rapidamente o retorno dos investimentos aos cafeicultores.

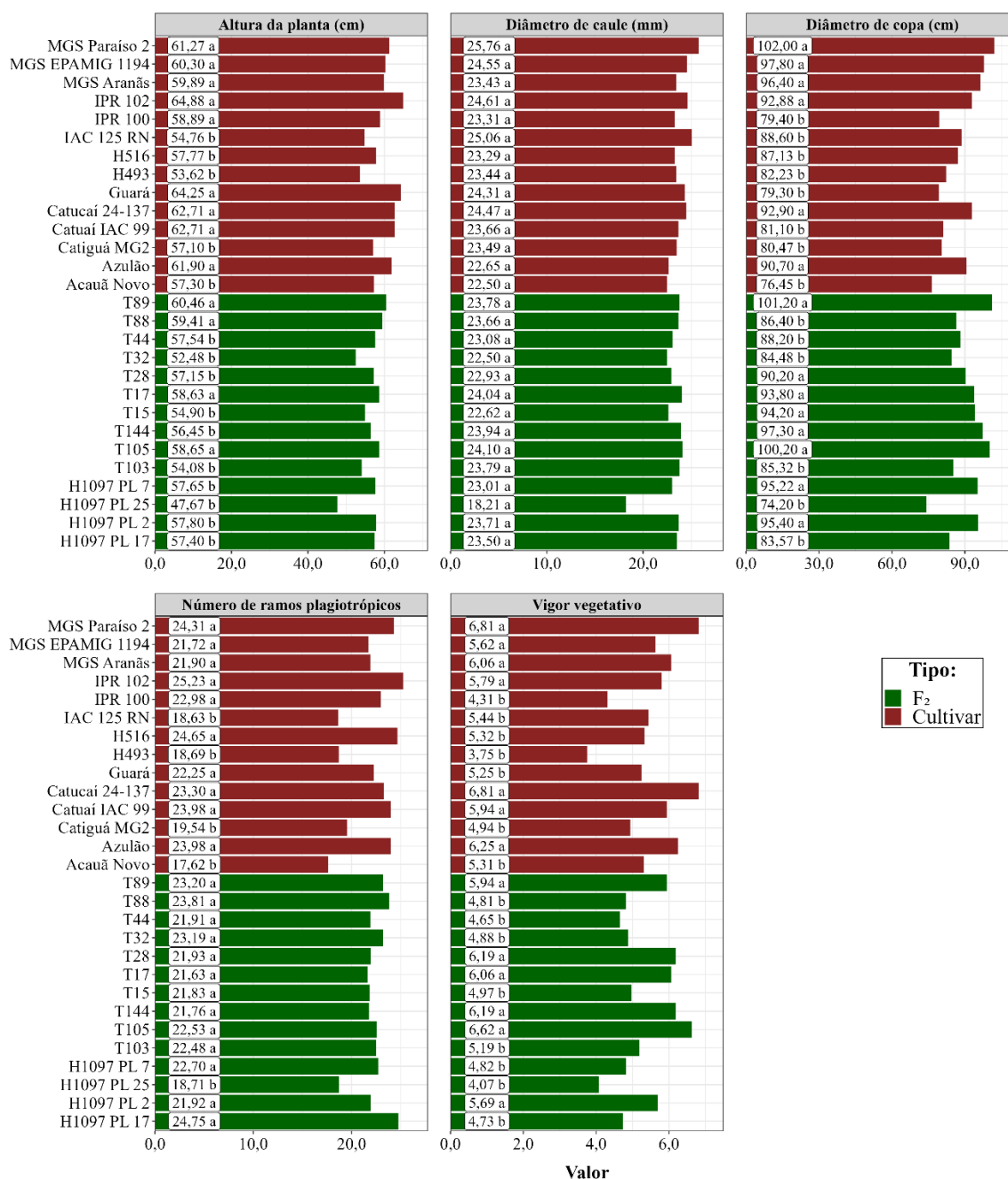
Apesar das vantagens apresentadas pelo plantio e cultivo dos híbridos F_1 em lavouras de *C. arabica* L., a utilização desta tecnologia requer o domínio de um desafio tecnológico significativo, a propagação. Desta forma, os pesquisadores buscam encontrar uma maneira de propagar as plantas F_1 em escala comercial. Dentre as técnicas testadas destaca-se a embriogênese somática (Etienne *et al.*, 2018; Gatica-Arias *et al.*, 2008; Molina *et al.*, 2002), miniestacas enraizadas (Georget *et al.*, 2017; Matamoros-Quesada *et al.*, 2020) e a esterilidade masculina (Georget *et al.*, 2019). No Brasil, nos últimos anos muitas pesquisas tem sido realizadas com o objetivo de desenvolver uma técnica que permita propagar de forma comercial os híbridos F_1 . Entretanto, apesar dos esforços ainda não se dispõe de uma metodologia consolidada, que permite a propagação dos F_1 em larga escala, inviabilizando assim, o cultivo de lavouras comerciais com plantas F_1 e a exploração da heterose nessas plantas.

Nesse aspecto, diante do incremento de produtividade dos híbridos F_1 outras alternativas devem ser desenvolvidas e avaliadas visando explorar a heterose e assim obter lavouras com maiores desempenhos produtivos. Sera e Alves (1999) relataram que uma alternativa seria utilizar a metade da heterose dos híbridos F_1 em lavouras comerciais de plantas em geração F_2 . Assim sendo, na figura 5 estão dispostas as médias referentes aos caracteres vegetativos avaliados em populações F_2 de *C. arabica* L. e em cultivares utilizadas como genitores.

De um modo geral, as populações F_2 apresentaram desenvolvimento vegetativo vigoroso, superando ou se assemelhando as cultivares genitoras. A análise de variância realizada para cada variável revelou que as médias dos caracteres entre as diferentes populações F_2 e seus parentais são significativas ($p \leq 0,01$), exceto para o diâmetro de

caule (Figura 5). Entre as populações F₂ o T89 registrou crescimento superior em termos de altura de planta (60,46 cm) e diâmetro de copa (101,20 cm). Em contraste, o H1097 PL 25 registrou padrão de crescimento mais compacto, conforme refletido na maioria dos parâmetros de crescimento registrados, em comparação com as outras populações F₂.

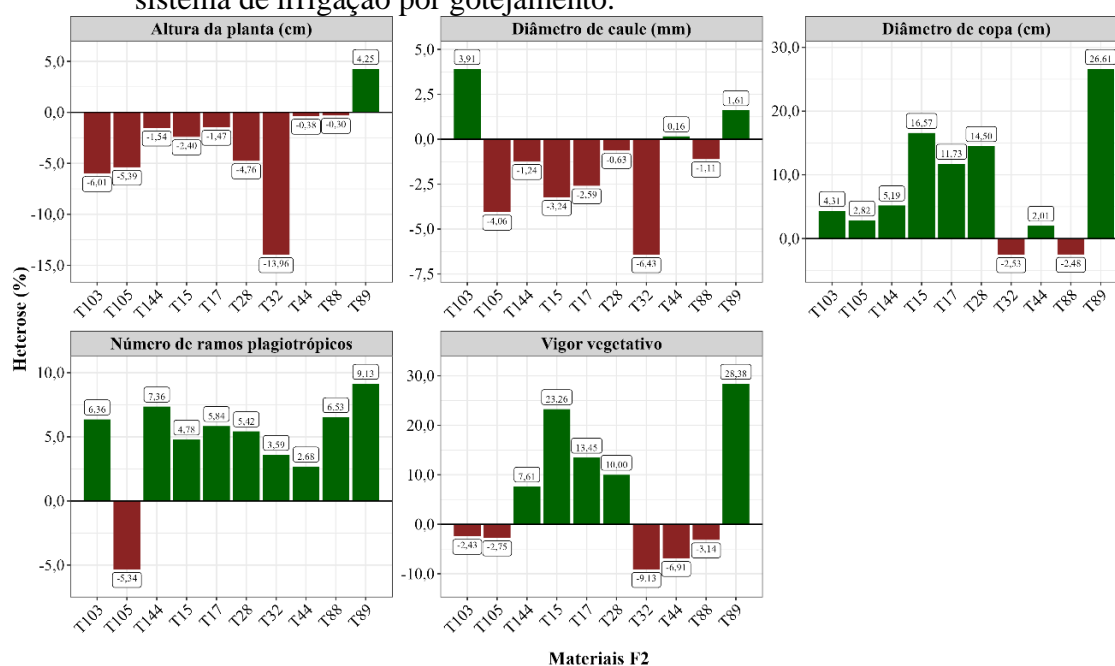
Figura 5 – Médias de altura de planta (AP), diâmetro de caule (DC), número de ramos plagiotrópicos (NRP), diâmetro de copa (DCO) e vigor vegetativo (nota de 0 a 10) de populações F₂ e genitores conduzidos em experimento com sistema de irrigação por gotejamento.



** Letras iguais não diferem os tratamentos ao nível de 1% pelo teste de Scott Knott.

Visando verificar o desempenho das populações F_2 em relação aos genitores, foi calculada a heterose das populações F_2 para os caracteres vegetativos avaliados. Os dados sobre a heterose para o desenvolvimento vegetativo das populações F_2 de *C. arabica* L. estão apresentados na figura 6. Destaca-se a população F_2 T89 que apresentou heterose positiva para todos os caracteres vegetativos avaliados. Além de apresentar os maiores percentuais de heterose, exceto para o diâmetro de caule. Em contrapartida as populações F_2 T105, T32, T88 apresentaram heterose negativa para um maior número de caracteres vegetativos avaliados.

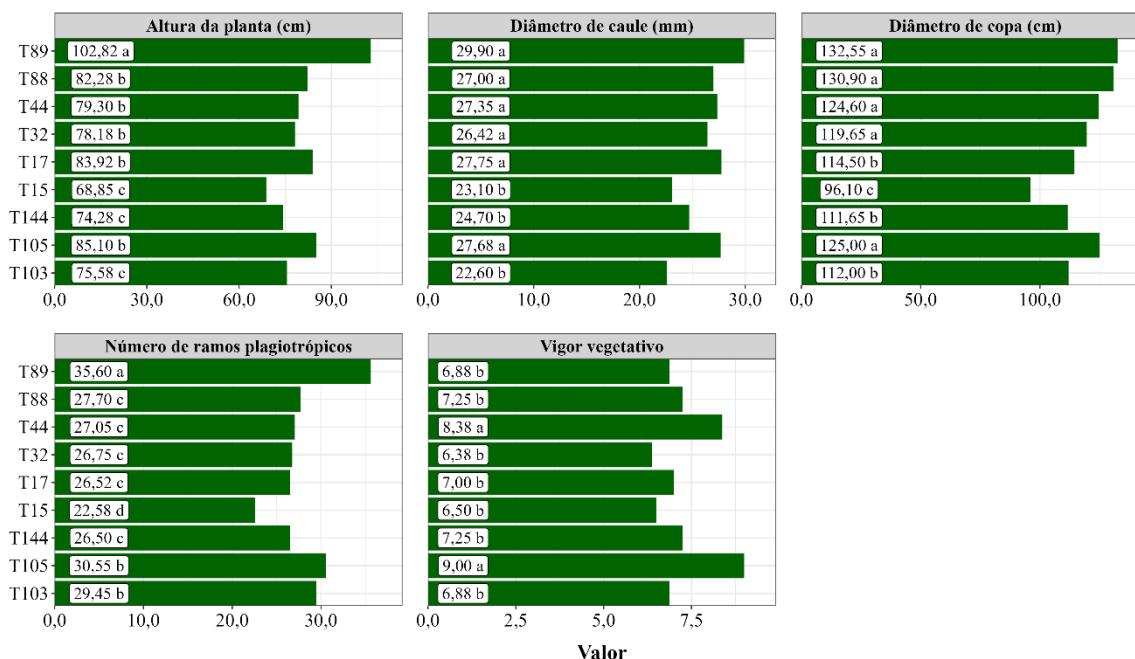
Figura 6 – Heterose (%) de populações F_2 de *Coffea arabica* L. para as variáveis altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de ramos plagiométricos (NRP), diâmetro de copa (DCO) e vigor vegetativo conduzidos em experimento com sistema de irrigação por gotejamento.



O desempenho superior quanto aos caracteres vegetativos da população F_2 T89 também pode ser observado no experimento conduzido em sistema de irrigação por pivô (Figura 7). Nota-se que a população F_2 T89 apresentou os maiores valores altura de planta, diâmetro de caule, número de ramos plagiométricos e diâmetro de copa. Em contraste, o T15 registrou padrão de crescimento mais compacto neste sistema de produção, conforme refletido em todos os parâmetros de crescimento registrados, em comparação com as outras populações F_2 .

Figura 7 – Médias de altura de planta (AP), diâmetro de caule (DC), número de ramos plagiométricos (NRP), diâmetro de copa (DCO) e vigor vegetativo (nota de 0 a

10) de populações F₂ conduzidas em experimento com sistema de irrigação por pivô.



** Letras iguais não diferem os tratamentos ao nível de 1% pelo teste de Scott Knott.

De um modo geral, o desenvolvimento vegetativo das populações F₂ conduzidas em sistema de irrigação por gotejamento e pivô foram satisfatórios. Apesar de se observar diferença para alguns caracteres entre as plantas em geração F₂ e as cultivares comerciais a maioria das características avaliadas foram estatisticamente semelhante ou superior para as populações F₂ o que demonstra um desenvolvimento vegetativo similar entre as plantas em geração F₂ e as cultivares geneticamente estáveis.

Para o cultivo comercial de plantas em geração F₂ de *C. arabica* L. a avaliação do desenvolvimento das principais características vegetativas e principalmente da segregação entre elas pelo melhorista é extremamente importante, pois as linhagens de café arábica são homogêneas (geneticamente estáveis) (Medina Filho *et al.*, 2008) e fenotipicamente semelhantes, ou seja, muito uniformes quanto à expressão dos caracteres agrônômicos, gerando lavouras onde o padrão de uniformidade é muito elevado (Antunes, 1962).

Entretanto, no café arábica a maioria dos caracteres de interesse, como porte baixo, resistência a ferrugem e outras doenças, o fenótipo favorável parece ser controlado por alelo dominante (Melo; Sousa, 2010), o qual está presente na geração F₁ e provavelmente é transmitido para a geração F₂ quando o cruzamento é realizado entre genótipos complementares para a característica. Nota-se na figura 8 o porte muito semelhante entre as plantas na geração F₂, ou seja, baixa segregação, o mesmo pode ser verificado através

do coeficiente de variação experimental (CV%) relativamente baixo (Tabela 2 - Anexo) reflexo da baixa variação encontrada nas plantas para cada tratamento. Sendo assim, em relação ao desenvolvimento vegetativo, os resultados encontrados dão suporte a hipótese sobre a possibilidade de utilização de cultivares F₂ em escala comercial pelos produtores.

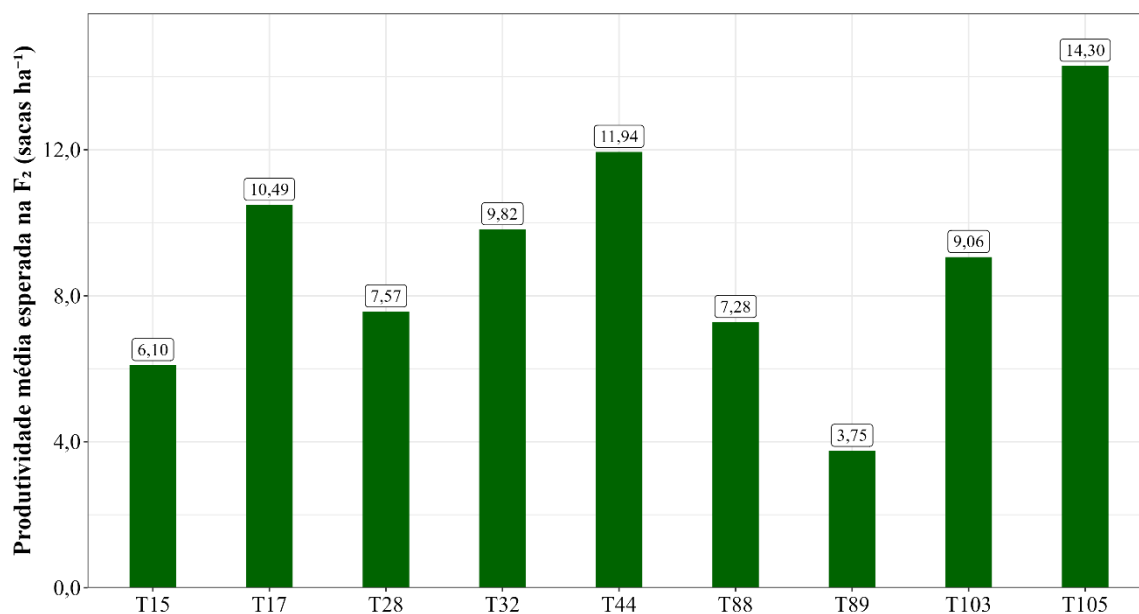
Figura 8 - Desenvolvimento vegetativo de populações F₂ de *Coffea arabica* L. em experimento conduzido com irrigação por gotejamento no município de Patrocínio, MG.



Imagens: Da autora, 2024

Além de apresentar um desenvolvimento vegetativo satisfatório e com baixa segregação, as plantas em geração F₂ serão avaliadas quanto a capacidade produtiva nos próximos anos. O presente estudo traz a produtividade média esperada (sacas ha⁻¹) (Figura 9) para a primeira colheita calculada com base na primeira produção dos híbridos F₁ (Figura 3 - produtividade 2021) e a metade da heterose esperada para a geração F₂. Dentre as populações F₂ avaliadas destaca-se, o T105 que apresentou a maior produtividade média esperada para a primeira colheita com 14,30 sacas por hectare.

Figura 9 – Produtividade média esperada (sacas ha⁻¹) na primeira colheita para populações F₂ de *Coffea arabica* L. em experimento conduzido no município de Patrocínio, MG.



No melhoramento genético de plantas, a heterose, isto é, o desempenho superior dos F₁ em relação ao valor médio dos pais, trouxe avanços no potencial de produtividade de diversas culturas economicamente importantes, incluindo o café (Ayano *et al.*, 2018). Em populações F₂ espera-se a metade da heterose observada nos F₁ (Sera; Alves, 1999). Sendo assim, devido ao efeito da heterose as plantas em geração F₂ podem apresentar produtividade superior à média dos parentais. Entretanto, na literatura não há trabalhos sobre a seleção ou desempenho produtivo de populações F₂ de *C. arabica* L. visando a sua utilização como cultivares comerciais. No entanto, conforme apresentado neste estudo, populações F₂ podem apresentar bom desenvolvimento vegetativo e maiores produtividades do que os seus genitores devido a expressão da heterose, enfatizando assim o potencial dessas plantas para a exploração comercial como cultivares.

Além do potencial produtivo devido ao efeito da heterose, alguns trabalhos observaram que em plantas em geração F₂ de *C. arabica* L. é possível manter caracteres que tem o fenótipo favorável condicionado por alelo dominante, como já observado para a resistência a nematoides. Anzueto *et al.* (2001) avaliaram a resistência a *Meloidogyne incognita* em acessos de *C. arabica* L. e observaram que o cruzamento entre dois acessos resistentes produziu 100% de plantas resistentes na geração F₂. Outros caracteres de interesse como resistência a ferrugem, uniformidade de maturação dos frutos e porte baixo também são condicionados por alelos dominantes (Melo; Sousa, 2010). Dessa forma, podemos inferir essas características podem ser passadas para a geração F₂ sendo que, a definição dos genitores para os cruzamentos podem ser determinantes na obtenção de populações F₂ que atendam as características de interesse.

Outra grande vantagem das populações F_2 é a propagação por sementes o que viabilizaria o cultivo em escala comercial dessas plantas. Em relação a produtividade (sacas ha^{-1}) das populações F_2 resultados mais concluintes serão divulgados nos próximos anos. Entretanto, é fato que devido ao efeito da heterose as populações F_2 podem apresentar maior capacidade produtiva que as linhagens tradicionalmente cultivadas pelos produtores e o seu método de propagação torna viável o seu cultivo em larga escala.

3 CONCLUSÕES

Entre os híbridos F_1 avaliados o EPAMIG 36, EPAMIG 02, EPAMIG 44 e EPAMIG 43 apresentaram as maiores produtividades acumuladas.

A heterose entre os híbridos F_1 , considerando as três safras acumuladas, variou de 17,2 a 95,5%.

As populações F_2 apresentaram um desenvolvimento inicial satisfatório.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Francisco Hélio Alves de *et al.* IBA and melatonin increase trigonelline and caffeine during the induction and initiation of adventitious roots in *Coffea arabica* L. cuttings. **Scientific Reports**, 13:15151, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41288-x>

ANDREAZI, Elder *et al.* Desempenho de híbridos F₁ de café arábica com resistência simultânea a ferrugem, mancha aureolada e bicho mineiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 10, n. 3, p. 375 - 382, jul./set. 2015.

ANZUETO, Francisco *et al.* Resistance to *Meloidogyne incognita* in Ethiopian *Coffea arabica* accessions. **Euphytica**, [S.l.], v. 118, p. 1-8, 2001.

AZEVEDO, Harianna Paula Alves de *et al.* Rooting biostimulants for *Coffea arabica* L. cuttings. **Coffee Science**, e151635, 2020. Doi: <https://doi.org/10.25186/cs.v15i.1635>

ANTUNES, C. S. N. Melhoramento do cafeeiro: produtividade de progênies e híbridos de café. **Bragantia**, Campinas-SP, v.21, n.33, p.591-615, 1962.

AYANO, Ashenafi *et al.* Heterosis and Combining Ability of Coffee Quality Traits in Southwestern Ethiopian Origin Coffee Hybrids. **Ethiop. J. Appl. Sci. Technol.** Vol.9 (1): 60-70, 2018.

BERTRAND, Benoit *et al.* *Coffea arabica* hybrid performance for yield, fertility and bean weight. **Euphytica**, Dordrecht, v. 141, n. 3, p. 255-262, Jan. 2005.

BERTRAND, Benoit *et al.* Performance of *Coffea arabica* F1 hybrids in agroforestry and full-sun cropping systems in comparison with American pure line cultivars: a review. **Euphytica** 181, 1471–1458, 2011. doi: 10.1007/s10681-011- 0372-7.

BERTRAND, Benoit *et al.* Breeding for the Main Agricultural Farming of Arabica Coffee. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, volume 5, august 2021. doi: 10.3389/fsufs.2021.709901

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. Recursos Genéticos. In: **Melhoramento de Plantas**. 5. ed., Viçosa: UFV, 2009.

CUNHA, Samuel Henrique Braga *et al.* Transfer of clonal coffee seedlings from the conventional system to the modified hydroponic system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.18, n.3, e2851, 2023.

GALLAIS, André. Hétérosis et variétés hybrides em amélioration des plantes. **Editions Quae**, 156–162, 2009.

GATICA-ARIAS, Andrés M.; ARRIETA-ESPINOZA, Griselda; ESQUIVEL, Ana M. Espinoza. Plant regeneration via indirect somatic embryogenesis and optimization of genetic transformation in *Coffea arabica* L. cvs, caturra and catuaí. **Electron. J. Biotechnol.** 11, 1–12, 2008. doi: 10.2225/vol11-issue1-fulltext-9.

GEORGET, Frédéric *et al.* Somatic embryogenesis-derived coffee plantlets can be efficiently propagated by horticultural rooted mini-cuttings: a boost for somatic embryogenesis. **Sci. Hortic.** 216, 177–185, 2017. doi:10.1016/j.scienta.2016.12.017.

GEORGET, Frédéric *et al.* Starmaya: The First Arabica F1 Coffee Hybrid Produced Using Genetic Male Sterility. **Front. Plant Sci.** 10: 1344. doi: 10.3389/fpls.2019.01344, 2019.

HUANG, Jian-Zhong *et al.* Workable male sterility systems for hybrid rice: Genetics, biochemistry, molecular biology, and utilization. *Rice*, 7:13, 2014.

ETIENNE, Hervé *et al.* Coffee somatic embryogenesis: how did research, experience gained and innovations promote the commercial propagation of elite clones from the two cultivated species? **Front. Plant Sci.** 9 (1630) 1-21, 2018. doi:10.3389/fpls.2018.01630.

KAHSAY, Goytom Abraha *et al.* New coffee varieties as a climate adaptation strategy: Empirical evidence from Costa Rica. **World Development Sustainability** 2, 2023.

LASHERMES, P. *et al.* Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica*, L. **Genome. Mol. Gen. Genet**, 1999.

MARIE, Lison *et al.* G× E interactions on yield and quality in *Coffea arabica*: new F1 hybrids outperform American cultivars, **Euphytica** 216 (5) 1–17, 2020. doi:10.1007/s10681-020-02608-8

MATAMOROS-QUESADA, Andrey; MESÉN-SEQUEIRA, Francisco; JIMÉNEZ-ALVARADO, Luis Diego. Efecto de fitohormonas y fertilizantes sobre el enraizamiento y crecimiento de mini-estaquillas de híbridos F1 de café (*Coffea arabica*). **Revista de Ciencias Ambientales**, 54(1), 58–75, 2020. <https://doi.org/10.15359/rca.54-1.4>

MEDINA FILHO, H. P.; BORDIGNON, R.; CARVALHO, C. H. S. de. Desenvolvimento de novas cultivares de café arábica. In: CARVALHO, C. H. S. de. (Ed.). *Cultivares de café: origem características e recomendações*. Brasília: EMBRAPA Café, 2008. v. 1, p. 79-101.

MELO, Benjamim de; SOUSA, Larissa Barbosa de. BIOLOGIA DA REPRODUÇÃO DE *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre. **Revista Verde** (Mossoró – RN – Brasil) v.5, n.3, p. 05 – 11 julho/setembro de 2010.

MOLINA, Diana M. *et al.* The effect of genotype and explant age on somatic embryogenesis of coffee. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, vol. 71, no. 2, p. 117-123, 2002.

MCCOOK, Stuart.; MONTERO-MORA, Andrea. Coffee breeding in a time of crisis: F1 hybrids in Central America since 1990. **Plants People Planet**, 1-10, 2024. DOI: 10.1002/ppp3.10480

OLIVEIRA, Kenia Carvalho de *et al.* Effects of somatic embryogenesis on gene expression of cloned coffee heterozygous hybrids. **Acta Physiologiae Plantarum**, 41:118, 2019.

OLIVEIRA, Kellen Kauanne Pimenta de; OLIVEIRA, Raphael Ricon; CHALFUN-JUNIOR, Antonio. Small RNAs: Promising Molecules to Tackle Climate Change Impacts in Coffee Production. *Plants*, 12, 3531, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12203531>

QUEIROGA, Vicente de Paula *et al.* Sistema produtivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado. In: QUEIROGA, V. A. et al. (ed.). Cultivo do café (*Coffea arabica* L.) orgânico sombreado para produção de grãos de alta qualidade. 1ª ed. Campina Grande: AREPB, 2021.

REZENDE, Tiago Teruel *et al.* Propagação vegetativa do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) por miniestacas. *Coffee Science*, Lavras, v. 12, n. 1, p. 91 - 99, jan./mar. 2017.

R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria, 2020. URL <https://www.R-project.org/>.

SERA, T.; ALVES, S. J. Melhoramento genético de plantas perenes. In: Destro, D.; MONTALVÁN, R. (Org.). Melhoramento genético de plantas. Editora UEL, Londrina, p.369- 422, 1999.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. *Biometrics*, Washington D.C., v.30, n.3, p.507-512, 1974.

SHAPIRO, A. S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52, 3/4, 591–611, 1965.

WICKHAM, Hadley *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal Of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 21, nov. 2019.

TURREIRA-GARCÍA, Nerea. Farmers' perceptions and adoption of *Coffea arabica* F₁ hybrids in Central America, **World Development Sustainability** 1, 2022.

ANEXO A

Tabela 1. Resumo da análise de variância ($prob > Fc$), para a produtividade dos híbridos F_1 e genitores nos anos de 2021, 2022, 2023 e acumulada.

Fonte de variação	$prob > Fc$			
	Prod. 2021	Prod. 2022	Prod. 2023	Prod. acumulada
Tratamento	89,21*	309,65**	757,19**	1861,34**
Média	8,81	22,58	40,44	71,84
CV(%)	69,61	40,51	38,2	32,35

** e * significativos a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 2. Resumo da análise de variância ($prob > Fc$), para altura da planta (AP), diâmetro de caule (DC), número de ramos plagiotrópicos (NRP), diâmetro de copa (DCO) e vigor de populações F_2 e genitores conduzidos em experimento em sistema de irrigação por gotejamento.

Fonte de variação	$prob > Fc$				
	AP	DC	NRP	DCO	Vigor
Tratamento	50,6**	5,54 ^{ns}	14,23**	226,99**	2,36**
Média	58,25	23,53	22,09	89,59	5,5
CV(%)	7,09	9,32	11,05	11,07	15,45

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

Tabela 3. Resumo da análise de variância ($prob > Fc$), para altura da planta (AP), diâmetro de caule (DC), número de ramos plagiotrópicos (NRP), diâmetro de copa (DCO) e vigor de populações F_2 conduzidos em experimento em sistema de irrigação por pivô.

Fonte de Variação	$prob > Fc$				
	AP	DC	NRP	DCO	Vigor
Tratamento	368,1**	22,5**	51,36**	519,4**	2,99**
Média	81,14	26,28	28,08	118,55	7,28
CV(%)	5,85	6,21	8,68	6,46	5,97

** significativos a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A possibilidade de utilização de cultivares F_2 representa um avanço no melhoramento genético do café arábica. Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que é possível desenvolver cultivares F_2 com resistência múltipla a ferrugem e ao nematoide *M. exigua*. Além da maior facilidade para desenvolver cultivares com resistência múltipla as principais pragas e doenças que acometem a cultura, essa estratégia permite a redução do tempo para o lançamento de uma nova cultivar para 10 a 12 anos.

Em relação a produtividade das cultivares F_2 , a literatura afirma que a metade da heterose observada nos híbridos F_1 pode ser explorada em lavouras comerciais com plantas em geração F_2 . Para os próximos anos, o estudo da capacidade produtiva das cultivares F_2 irá confirmar a sua viabilidade para serem utilizadas como cultivares pelos produtores e a validação desta nova estratégia de melhoramento genético do café arábica.