

DANIEL SOARES FERREIRA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO E QUALIDADE SENSORIAL DE
GENÓTIPOS DE *Coffea arabica* L. CULTIVADOS EM ALTITUDE DE TRANSIÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de Doctor Scientiae.

Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez

Coorientadores: Lucas Louzada Pereira

Dalyse Toledo Castanheira

Marcelo Antonio Tomaz

VIÇOSA - MINAS GERAIS

2023

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

T

F383d
2023
Ferreira, Daniel Soares, 1993-
Desempenho agrônômico e qualidade sensorial de
genótipos de *Coffea arabica* L. cultivados em altitude de
transição / Daniel Soares Ferreira. – Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (104 f.): il. (algumas color.).

Texto inglês.

Orientador: Hermínia Emília Prieto Martinez.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Agronomia, 2023.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.731>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Café - Genética. 2. Maceração. 3. Café - Irrigação .
I. Martinez, Hermínia Emília Prieto, 1956-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de
Pós-Graduação em Fitotecnia. III. Título.

CDD 22. ed. 633.732

DANIEL SOARES FERREIRA

**DESEMPENHO AGRONÔMICO E QUALIDADE SENSORIAL DE
GENÓTIPOS DE *Coffea arabica* L. CULTIVADOS EM ALTITUDE DE TRANSIÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa,
como parte das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de
Doctor Scientiae.

Aprovada em: 25 de agosto de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL SOARES FERREIRA**
Data: 24/11/2023 09:34:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Soares Ferreira

Autor

Documento assinado digitalmente
 **HERMINIA EMILIA PRIETO MARTINEZ**
Data: 24/11/2023 10:22:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Hermínia Emília Prieto Martinez

Orientadora

Dedico esta tese de doutorado, primeiramente a Deus, aos meus irmãos e irmãs, bem como aos meus pais, Djalma Santos Ferreira e Lúcia de Fátima Soares Ferreira, esposa Ana Caroline Figueiredo e Filho Miguel Figueiredo Ferreira, que sempre me apoiaram e incentivaram a cada passo dado em minha jornada pessoal e profissional.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por me guiar e proteger todos os dias, por me conceder saúde, me dando força, coragem e discernimento para encarar todos os desafios que apareceram.

Aos meus pais Lúcia de Fátima Soares Ferreira e Djalma Santos Ferreira, à minha esposa Ana Caroline Figueiredo por toda paciência e apoio sempre ao meu filho Miguel Figueiredo Ferreira, maior presente da minha vida e a meus irmãos, sobrinhos e cunhados, por todo o apoio e amparo nos momentos difíceis;

A UFV, e ao PPG Fitotecnia, pela oportunidade de realização do curso, a CAPES e ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos e apoio financeiro, bem como a FAPES pelo apoio financeiro para a condução do experimento (FAPES 535/2020). E, ao IFES-Venda Nova do Imigrante, por me auxiliar e me ajudar na nas etapas de processamento do café;

Agradeço à professora Herminia Emilia Prieto Martinez, pela orientação, conselhos e sugestões, pelo apoio e confiança concedida. Ao professor Marcelo Antonio Tomaz, prof. Lucas Louzada Pereira e Profa. Dalysse Toledo Castanheira pela coorientação, pelo apoio e sugestões; Agradeço a valorosa contribuição dos professores e pesquisadores que aceitaram o convite para participar desta defesa de Tese de doutorado;

Ao cafeicultor José Augusto Dermatini Landi e toda a sua família, pelo auxílio, amparo e paciência na condução do experimento em sua propriedade particular;

Sou grato aos membros do Laboratório de Análise e Pesquisa em Café – LAPC, do IFES-Venda Nova do Imigrante, e a todos os membros do *Coffee Design Group* em especial a pessoa da Cristhiane Altoé Filete pela amizade e amparo sempre;

Aos amigos, João Marcos, Oséias, Laryssa, Brunno, Wilian, Cristhiane e Leonan, pela amizade, companheirismo e ajuda no desenvolvimento do experimento e aos demais colegas de pós-graduação em especial aos membros do NEPFIT pelo convívio, ajuda e troca de experiências; A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização do presente trabalho.

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

BIOGRAFIA

Daniel Soares Ferreira, filho de Djalma Santos Ferreira e Lúcia de Fátima Soares Ferreira, nasceu em 20 de julho de 1993, em Manhumirim, estado de Minas Gerais. Coursou da primeira à quarta série na Escola Municipal Bonfim I (Acácio da Silva Guimarães) na Zona rural de Manhumirim-MG, a quinta série na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Maria Barros Horths no distrito de Príncipe, cidade de Iúna-ES, da sexta a oitava série na Escola Municipal Doutora Maria da Conceição Oliveira Ribeiro na Cidade de Manhumirim-MG. Começou a caminhada na área das ciências agrárias no ano de 2009, quando ingressou no curso técnico em agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de Alegre, atualmente Instituto Federal do Espírito Santo, campus de Alegre (IFES-Alegre). No ano de 2012, ingressou no curso de graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES) em Alegre-ES. Durante a graduação, participou como pesquisador de iniciação científica com auxílio financeiro da EMBRAPA, FAPES e CNPq. No ano de 2019 tornou-se mestre em Produção Vegetal junto ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da UFES, no mesmo ano iniciou o Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em 25 de agosto de 2023.

RESUMO

FERREIRA, Daniel Soares, Dr.Sc.; Universidade Federal de Viçosa, Agosto de 2023. **DESEMPENHO AGRONÔMICO E QUALIDADE SENSORIAL DE GENÓTIPOS de *Coffea arabica* L. CULTIVADOS EM ALTITUDE DE TRANSIÇÃO.** Orientadora: Herminia Emilia Prieto Martinez. Coorientadores: Dalysse Toledo Castanheira; Lucas Louzada Pereira e Marcelo Antônio Tomaz.

A globalização e o acesso facilitado à informação, tem proporcionado o surgimento de um mercado consumidor mais exigente quanto à qualidade superior dos cafés e a sustentabilidade dos sistemas de produção. Esses fatores exigem que a cafeicultura, principalmente de Arábica (*Coffea arabica* L.), tenha que se reinventar quanto à escolha de genótipos superiores, e o manejo pré colheita e pós colheita. Desta forma, objetivou-se com os trabalhos produzidos nesta tese, estudar o comportamento morfológico, produtivo e o perfil sensorial de genótipos de *Coffea arabica* em região de altitude de transição. Para atender os objetivos propostos foram realizados dois ensaios experimentais, utilizando genótipos promissores de cafeeiro Arábica, cultivados no distrito de Lagoa Seca, no município de Alegre, sul do estado do Espírito Santo, Brasil. O primeiro experimento propôs caracterizar e selecionar genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos e em altitude de transição, quanto às características de crescimento e morfologia dos ramos, bem como pela produtividade e qualidade dos grãos. Para tanto foram avaliados dez genótipos de cafeeiro Arábica (Paraíso H 419-3-3-7-16-2; Catuaí Vermelho IAC 44; Paraíso MG/H 419-1; Catucaim 24137; Sacramento MG1; Catuaí Vermelho IAC 144; Catucaí 2-SL; Oeiras MG-6851; MGS Turmalina e Paraíso Híbrido) e três regimes hídricos (Irigado, Sequeiro e Fertirrigado). O experimento foi estabelecido em delineamento em blocos casualizados no esquema de parcela subdivididas. Nesse experimento percebe-se que altas produtividades aliadas a boas qualidades sensoriais do café podem ser alcançadas em cultivos em altitude de transição, desde que, se utilize a combinação correta entre genótipo e o fornecimento de irrigação às plantas de café. Constata-se ainda que, alta qualidade sensorial de café Arábica em altitude de transição pode ser alcançada com maior facilidade quando utiliza-se o genótipo MGS Turmalina no regime irrigado, Sacramento MG1 no regime fertirrigado e Catuaí Vermelho IAC 44 e Paraíso Híbrido em sequeiro. Percebe-se também que existe grande variabilidade fenotípica para as características de morfologia dos ramos e produtividade para os diferentes regimes hídricos e genótipos em estudo. O segundo experimento propôs analisar o perfil sensorial e químico de cafés cultivados em altitude de transição e submetidos a diferentes tempos e temperatura de fermentação pelo método de

maceração carbônica. Utilizou-se para atender os objetivos propostos, cafés oriundos do genótipo MGS Turmalina, cultivado no regime irrigado. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, no esquema fatorial 2x4 em parcelas subdivididas, sendo que as parcelas foram compostas por duas temperaturas (30 e 60°C) em BOD's e as subparcelas compostas por cinco tempos de fermentação, pelo método de maceração carbônica (24, 72, 126 e 162 horas de fermentação). A maceração carbônica potencializa positivamente os atributos sensoriais e químicos de cafés cultivados em altitude de transição, sendo que a fermentação por pelo menos 120 horas a 30°C é capaz de melhorar o perfil sensorial dos cafés. Neste estudo, o tratamento envolvendo 30 °C e 162 h proporcionou pontuação de 84,76 pontos, em contraste com a pontuação de 82,14 promovida pelo menor tempo (24 h) em temperatura (60 °C).

Palavras-chave: Variabilidade genética; Maceração carbônica; Manejo hídrico; Irrigação do cafeeiro; Fertirrigação.

ABSTRACT

FERREIRA, Daniel Soares, Dr.Sc.; Universidade Federal de Viçosa, August, 2023. **AGRONOMIC PERFORMANCE AND SENSORY QUALITY OF *Coffea arabica* L. GENOTYPES GROWN AT TRANSITIONAL ALTITUDE.** Advisor: Herminia Emilia Prieto Martinez. Co-advisers: Dalysse Toledo Castanheira; Lucas Louzada Pereira e Marcelo Antônio Tomaz.

Globalization and easier access to information have led to the emergence of a more demanding consumer market regarding the superior quality of coffees and the sustainability of production systems. These factors require that coffee farming, especially Arabica (*Coffea arabica* L.), has to reinvent itself in terms of choosing superior genotypes, and pre-harvest and post-harvest management. Therefore, the aim of the work produced in this thesis was to study the morphological, productive behavior and sensory profile of *Coffea arabica* genotypes in a transitional altitude region. To meet the proposed objectives, two experimental trials were carried out, using promising genotypes of Arabica coffee, cultivated in the district of Lagoa Seca, in the municipality of Alegre, south of the state of Espírito Santo, Brazil. The first experiment proposed to characterize and select Arabica coffee genotypes grown in different water regimes and at transition altitudes, in terms of growth characteristics and branch morphology, as well as grain productivity and quality. To this end, ten genotypes of Arabica coffee were evaluated (Paraíso H 419-3-3-7-16-2; Catuaí Vermelho IAC 44; Paraíso MG/H 419-1; Catucaim 24137; Sacramento MG1; Catuaí Vermelho IAC 144; Catucaí 2 -SL; Oeiras MG-6851; MGS Turmalina and Paraíso Híbrido) and three water regimes (Irrigated, Rainfed and Fertirrigated). The experiment was established in a randomized block design in a split-plot scheme. In this experiment it is clear that high productivity combined with the good sensorial qualities of coffee can be achieved in crops at transition altitudes, as long as the correct combination between genotype and irrigation supply to the coffee plants is used. It is also clear that high sensorial quality of Arabica coffee at transitional altitude can be achieved more easily when using the genotype MGS Turmalina in the irrigated regime, Sacramento MG1 in the fertirrigated regime and Catuaí Vermelho IAC 44 and Paraíso Híbrido in the rainfed regime. It is also clear that there is great phenotypic variability for the characteristics of branch morphology and productivity for the different water regimes and genotypes under study. The second experiment proposed analyzing the sensorial and chemical profile of coffees grown at

transitional altitudes and subjected to different fermentation times and temperatures using the carbonic maceration method. To meet the proposed objectives, coffees from the MGS Turmalina genotype, cultivated under irrigated conditions, were used. The experiment was conducted in a randomized block design, with four replications, in a 2x4 factorial scheme in subdivided plots, with the plots consisting of two temperatures (30 and 60°C) in BOD's and the subplots consisting of five fermentation times, by the carbonic maceration method (24, 72, 126 and 162 hours of fermentation). Carbonic maceration positively enhances the sensorial and chemical attributes of coffees grown at transitional altitudes, with fermentation for at least 120 hours at 30°C being able to improve the sensorial profile of the coffees. In this study, the treatment involving 30 °C and 162 h provided a score of 84.76 points, in contrast to the score of 82.14 promoted by the shorter time (24 h) at temperature (60 °C).

Keywords: Genetic variability; Carbonic maceration; Water management; Coffee tree irrigation; Fertigation.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

- Figura 1. Representação geográfica da área do estudo.....26
- Figura 2. Temperaturas máxima, mínima e média (A) e precipitação (B) mensais da região do estudo para o período de novembro de 2020 e maio de 2023.....27
- Figura 3. Processo de análise das unidades experimentais, biometria dos ramos ortotrópicos (A), plagiotrópico (B), avaliação do ponto de colheita (C), café cereja descascado (D), secagem em terreiro suspenso com cobertura plástica (E), e processamento de extração.....29
- Figura 4. Diagrama de dispersão dos dois primeiros componentes principais referentes à biometria dos ramos de diferentes genótipos de cafeeiro Arábica cultivados nos regimes fertirrigado (A), irrigado (B) e sequeiro (C).....39
- Figura 5. Agrupamento de genótipos de cafeeiro Arábica quanto às características de crescimento vegetativo e produtividade em ambientes fertirrigado, irrigado e sequeiro para o ano agrícola de 2020-2021.....40
- Figura 6. Agrupamento de genótipos de cafeeiro Arábica quanto às características de crescimento vegetativo e produtividade em ambientes fertirrigado, irrigado e sequeiro para o ano agrícola de 2021-2022.....41
- Figura 7. Agrupamento de genótipos de cafeeiro Arábica quanto a produção média dos anos de 2021 e 2022 em ambientes fertirrigado, irrigado e sequeiro.....43

Capítulo 2

- Figura 1. Temperatura máxima, mínima e média (A) e precipitação (B) mensais da região do estudo para o período de novembro de 2020 e maio de 2023.....57
- Figura 2. Produtividade média das safras de 2021 e 2022 (A) e análise sensorial do ano de 2021 (B) de dez genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em altitude de transição e em diferentes regimes hídricos.....62

Figura 3. Análise sensorial do ano de 2022 (B) e análise sensorial média dos anos de 2021 e 2022 (B) de dez genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em altitude de transição e em diferentes regimes hídricos.....	63
Figura 4. Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson com dados fenotípicos entre as variáveis que compõem as características sensoriais: aroma, sabor, acidez, corpo, geral, sabor residual, score final e produtividade.	64
Figura 5. Dispersão gráfica de dez genótipos de cafeeiro Arábica* em três diferentes regimes hídricos (irrigado, sequeiro e fertirrigado), em relação aos primeiros componentes principais com base nas características sensoriais para as colheitas referentes aos anos de 2021 e 2022..	65
Figura 6. Dispersão gráfica de dez genótipos de cafeeiro Arábica* em três diferentes regimes hídricos (irrigado, sequeiro e fertirrigado), em relação aos 2 primeiros componentes principais com base nas características sensoriais para a média das colheitas referentes aos anos de 2021 e 2022.....	67

Capítulo 3

Figura 1. Agrupamento hierárquico e dispersão gráfica dos dois primeiros componentes principais, dos diferentes atributos sensoriais de cafeeiro Arábica cultivado em altitude de transição e submetido a diferentes tempos (24 hrs, 72 hrs, 120 hrs e 162 hrs) e temperaturas (30°C e 60°C) de fermentação, pelo método de maceração carbônica.....	85
Figura 2. Dispersão gráfica dos dois primeiros componentes principais, associados compostos químicos de cafés oriundo de cafeeiro Arábica cultivado em altitude de transição e submetidos a diferentes tempos (24 hrs, 72 hrs, 120 hrs e 162 hrs) e temperaturas (30°C e 60°C) de fermentação, pelo método de maceração carbônica, e contribuição dos 86 compostos químicos para a formação dos dois primeiros componentes principais.....	88
Figura 3. Diagrama de dispersão dos dois primeiros componentes principais associados a quatro tempos de fermentação (24; 72; 120 e 196 horas) e duas temperaturas (30°C e 60°C), de cafés Arábicas cultivados em altitude de transição e fermentados pelo método de maceração carbônica.....	90

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1. Análise de variância das características produção do ano agrícola 2020-2021; produção do ano agrícola 2021-2022; produção média; Número de ramos plagiotrópico ano agrícola 2020-2021; Número de ramos plagiotrópico ano agrícola 2021-2022; Crescimento do ramo ortotrópico; Proporção entre o número de frutos e folhas no ano agrícola 2020-2021; Proporção entre o número de frutos e folhas no ano agrícola 2020-2021.....	34
Tabela 2. Crescimento do ramo ortotrópico e crescimento da copa de cafeeiros Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos entre outubro de 2020 e outubro de 2022, em região de altitude de transição.....	33
Tabela 3. Número de ramos plagiotrópico de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos para o ano agrícola de 2020-2021 e 2022 respectivamente, em região de altitude de transição.....	34
Tabela 4. Produtividade de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos para o ano agrícola de 2020-2021 e 2022, em região de altitude de transição.....	35
Tabela 5. Produtividade média nas safras de 2021 e 2022 de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos, em região de altitude de transição.....	36
Tabela 6. Proporção entre o número de frutos e o número de folhas de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos para os anos agrícolas de 2021 e 2022 respectivamente, em região de altitude de transição.....	37
Tabela 7. Influência das características morfológicas dos ramos e da produtividade nos dois primeiros componentes principais sob diferentes condições de manejo hídrico: fertirrigação, honestidade e sequeiro.....	41

Capítulo 3

Tabela 1. Modelos de regressão da característica score final em função da temperatura e tempo de fermentação e respectivos coeficientes de determinação R^2	84
Tabela 2. Compostos voláteis identificados em café Arábica fermentado por 24, 72, 120 e 162 horas à 30°C e 60°C.....	86
Tabela 3. Correlação de Person entre os grupos de compostos químicos e as análises sensoriais de cafés submetidos a diferentes tempos e temperaturas de fermentação, pelo método de maceração carbônica.....	89

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	15
REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 1.....	24
Morfologia dos ramos e produtividade de genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em diferentes manejos hídricos e altitude de transição	24
1. INTRODUÇÃO	24
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
2.1 Época e local de estudo	26
2.2. Tratamentos e delineamento experimental	27
2.4. Colheita e pós colheita do cafeeiro.....	30
2.5. Análise estatística	31
3. RESULTADOS.....	31
4. DISCUSSÃO.....	43
5. CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	48
CAPÍTULO 2.....	55
Produção e qualidade sensorial de genótipos de <i>Coffea arabica</i> L. cultivados em diferentes regimes hídricos e em altitude de transição	55
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
2.1. Época e local de estudo	56
2.2. Tratamentos e delineamento experimental.....	57
2.3. Práticas agronômicas e condução do experimento.....	57
2.4. Colheita e pós colheita dos frutos.....	59
2.5. Torra e análise sensorial do cafeeiro	59
2.6. Análise estatística	60
3. RESULTADOS.....	61
4. DISCUSSÃO:.....	67
REFERÊNCIAS	71
CAPÍTULO 3.....	78
Caracterização química e sensorial de grãos de café Arábica cultivados em altitude de transição e fermentados em maceração carbônica.	78
1. INTRODUÇÃO	78
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	80
2.1. Época e local da colheita dos frutos	80
2.2. Matérias primas, Tratamentos e delineamento experimental.....	81
2.3. Características sensoriais dos grãos	81

2.4. Análise de Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas	82
2.5. Análise estatística	83
3. RESULTADOS.....	84
4. DISCUSSÃO	91
5. CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS	96
CONCLUSÕES GERAIS	103

1. INTRODUÇÃO GERAL

Estudos têm evidenciado uma eminente alteração na aptidão agroclimática para o cafeeiro em virtude das possíveis mudanças climáticas globais (PINTO et al.; 2008; CAMARGO, 2010; BUNN et al.; 2015; BRAGANÇA et al.; 2016; MARTINS et al.; 2018; COLODETTI et al.; 2020). Essas variações tendem a ocasionar dificuldades para a cafeicultura moderna atender as demandas atuais e futuras do mercado, não somente quanto aos parâmetros produtivos, mas também quanto a qualidade sensorial e à sustentabilidade do empreendimento cafeeiro (GLOESS et al.; 2013; GUIMARÃES et al.; 2016; GUIMARÃES et al.; 2018; VELOSO et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a).

Nesse contexto de mudanças e considerando as variações climáticas anuais que vêm acometendo a agricultura brasileira (MARTINS et al.; 2015; RODRIGUES et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2018), torna-se essencial a promoção de estudos que possibilitem a maximização da expressão da produtividade e da qualidade sensorial do cafeeiro Arábica em condições agroclimáticas marginais ou de transição para o seu cultivo (RODRIGUES et al.; 2016b; COLODETTI et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b).

Destaca-se que o cafeeiro Arábica é classificado como uma planta tropical de altitude, tendo o seu desenvolvimento mais acentuado em condições de altitudes elevadas e baixa deficiência hídrica (MATIELLO, 1991; DaMATTA e RAMALHO, 2006). Assim, conforme destacado por Camargo (2010), Luppi et al.; (2014), Bragança et al. (2016) as regiões que são classificadas como marginais ou de altitude de transição para o cultivo do cafeeiro Arábica são aquelas onde é possível cultivar tanto a espécie *Coffea arabica* quanto a *Coffea canephora*. Contudo, para se obter sucesso na produção é necessário promover práticas agrícolas, além da escolha geográfica adequada da área, dado que, essas regiões tendem a apresentar temperatura média entre 22°C a 24°C e restrição hídrica entre 100 mm e 200 mm (BRAGANÇA et al.; 2016), condições essas que podem resultar em perdas de produção e qualidade do café colhido para a espécie *Coffea arabica*, principalmente quando as plantas não são manejadas de forma correta.

Uma alternativa que tem se mostrado eficiente para a produção do cafeeiro Arábica nestas regiões de menor aptidão agroclimática para o café é a utilização da irrigação (RODRIGUES et al.; 2016a; FERREIRA et al.; 2021b). Tal procedimento se justifica em razão da maior garantia de balanço hídrico ideal para a planta de café que ocorre por meio da absorção, transporte e perda de água (MARTINS et al.; 2015), sendo esses processos essenciais para o funcionamento de mecanismos bioquímicos e fisiológicos que afetam não somente o

desenvolvimento, como também a produtividade e a qualidade sensorial da bebida café (FAGAN et al.; 2011; TAIZ et al.; 2017).

Assim, perdas ligadas ao déficit hídrico ocorrem principalmente em virtude da complexidade vinculada à periodicidade do crescimento vegetativo e desenvolvimento reprodutivo do cafeeiro, que estão associados ao fotoperíodo, temperatura, irradiância e fornecimento hídrico (RENA e MAESTRI, 2000; DaMATTA e RENA, 2002). Ademais, em função de que nas principais regiões produtoras de café no Brasil, o crescimento ocorre de forma mais acentuada nos meses mais quentes e de dias mais longos (PEREIRA, 2015), a deficiência hídrica nesses períodos pode resultar em perdas (de produtividade, de crescimento vegetativo e de qualidade de bebida) cruciais para a lavoura cafeeira cultivada atualmente em baixas altitude ou em região que podem perder a aptidão para o cultivo do cafeeiro em função das mudanças climáticas globais (COLODETTI et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a).

Assim ressalta-se que a seca se enquadra como um dos fatores abióticos mais impactante à produção cafeeira (PIZETA et al.; 2016; RODRIGUES et al.; 2016a; RIBEIRO et al.; 2019), de modo que, mesmo em regiões que apresentem condições térmicas e fotoperíodo adequado, a restrição hídrica decorrente de veranicos intensos e prolongados pode culminar em perdas significativas de produção (RODRIGUES et al.; 2016a), sendo a irrigação uma forma eficiente de mitigar seu efeito (RODRIGUES et al.; 2016b, FERREIRA et al.; 2021b).

Tais prejuízos muitas das vezes são mais acentuados em decorrência da relação fonte-dreno no cafeeiro, uma vez que a fase reprodutiva (florada e desenvolvimento dos grãos) e a vegetativa (crescimento) da planta de café ocorrem ao mesmo tempo (CAMARGO e CAMARGO, 2001; COLODETTI et al.; 2020). Desta forma, para que não ocorram danos na qualidade dos grãos e na produtividade da cultura, a planta fica dependente da disponibilidade e da capacidade de produzir fotoassimilados necessários para suprir ambas as demandas, haja vista que essas necessidades se tornam muito influenciadas pelas relações que ocorrem entre as fontes e os drenos (FAGAN et al.; 2011).

Neste sentido, Fagan et al. (2011) e Veloso et al. (2020) destacam que principalmente no período de crescimento e enchimento dos grãos a redução no acúmulo de fotoassimilados decorrente de períodos de estresses bióticos e abióticos estão vinculados a danos severos à qualidade de bebida, microbiota do solo e na produtividade do cafeeiro.

Deste modo, avaliar a qualidade do café em lavouras cafeeiras localizadas em baixa altitude, bem como propor estratégias que contribuam para maximizar a expressão da planta para a produção e qualidade de cafés, é de fundamental importância econômica e social (FERREIRA et al.; 2021a) Tal fenômeno ocorre pelo fato, de que o café *Arábica* cultivado em

altitudes vem sendo destacado quanto à produção de cafés especiais (AVELINO et al.; 2005; SILVA et al.; 2016; SOBREIRA et al.; 2016; ZAIDAN et al.; 2017; TOLESSA et al.; 2017; WORKU et al.; 2018), ou em virtude da eminente alteração na aptidão agroclimática para o cafeeiro proveniente das possíveis mudanças climáticas globais (PINTO et al.; 2008; CAMARGO, 2010; BUNN, 2015; BRAGANÇA et al.; 2016; MARTINS et al.; 2018; COLODETTI et al.; 2020).

De modo geral, uma série de fatores de produção (genótipo, altitude, nutrição, irrigação, espaçamento, face de exposição da lavoura ao sol, entre outros), de pós-colheita (processamento via seca ou via úmida), secagem dos grãos, beneficiamento e de industrialização (torra, moagem, método de extração, entre outros) podem influenciar a qualidade do café (GUERRA et al.; 2005; DaMATTA et al.; 2007; FAGAN et al.; 2011; MARSETTI et al.; 2013; MARTINEZ et al.; 2014; ASSIS et al.; 2015; SOBREIRA et al.; 2016; PEREIRA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2019; JAEGGI et al.; 2019; FERREIRA et al.; 2021a; BRIOSCHI JUNIOR et al.; 2021).

Assim, além de compreender o comportamento da planta de cafeeiro Arábica em altitude de transição, propor estratégias de pós-colheita pode contribuir de forma significativa para obter melhor qualidade dos grãos do cafeeiro nessa região de cultivo. Normalmente existem duas formas de se processar café após a colheita: processamento via seca, trabalhando com os frutos intactos, sem a retirada do exocarpo (café natural ou em coco), ou o processamento via úmida, que pode dar origem ao café cereja descascado (quando se retira o exocarpo dos frutos mas se mantém a mucilagem no momento da secagem) ou cereja desmucilado (quando se retira o exocarpo e a mucilagem dos grãos de café), sendo que o processo de retirada da mucilagem pode ser feito de forma mecânica ou biológica com auxílio de fermentação (PEREIRA et al.; 2019; BRIOSCHI JUNIOR et al.; 2021).

Entretanto, é necessário salientar que estudos mais aplicados aos efeitos da fermentação devem ser realizados, tendo em vista que muitas vezes os produtores utilizam apenas procedimentos empíricos, aplicados unicamente pelo potencial que a técnica tem em retirar a mucilagem, negligenciando seus efeitos no perfil sensorial do café (LEE et al.; 2015; PEREIRA et al.; 2019). Portanto, estudos que buscam compreender, ampliar e promover conhecimento quanto ao efeito da ação de microrganismos benéficos na qualidade de café, tornam-se fundamentais para auxiliar na otimização dos processos de produção (LEE et al.; 2015; PEREIRA et al.; 2019). Desta forma, objetivou-se com os trabalhos produzidos nesta tese, estudar o comportamento morfológico, produtivo, nutricional e o perfil sensorial de genótipos de *Coffea arabica* em região de altitude de transição.

REFERÊNCIAS

ASSIS, G.A.; GUIMARÃES, R.J.; COLOMBO, A.; SCALCO, M.S.; DOMINGHETTI, A.W. Faixas críticas de teores foliares de nitrogênio e potássio para o cafeeiro em produção fertirrigado. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.1, p.126-134, 2015.

AVELINO, J.; BARBOZA, B.; ARAYA, J.C.; FONSECA, C.; DAVRIEUX, F.; GUYOT, B. (2005) Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of Costa Rica, Orosí and Santa María de Dota. **Journal of the Science of Food and Agriculture** v.85, p.1869–1876. 2005.

BARBOSA, I. P.; COSTA W. G.; NASCIMENTO M.; CRUZ C. D.; OLIVEIRA A. C. B.. Recommendation of *Coffea arabica* genotypes by factor analysis. **Euphytica**, v. 215, n.178, p.1-10. 2019.

BRAGANÇA, R.; DOS SANTOS, A. R.; DE SOUZA, E. F.; DE CARVALHO A. J. C.; LUPPI, A. S. L.; DA SILVA, R. G. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimatológico do café Arábica no Espírito Santo. **Revista Agroambiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 77-82, 2016.

BRIOSCHI JUNIOR, D.; GUARÇONI, R.C.; SILVA, M.C.S.; VELOSO, T.G.R.; KASUYA, M.C.M.; OLIVEIRA, E.C.S.O.; LUZ, J.M.R.; MOREIRA, L.R.; DEBONA, D.G.; PEREIRA, L.L. Microbial fermentation affects sensorial, chemical, and microbial profile of coffee under carbonic maceration. **Food Chemistry**, v. 9, p. 128296, 2021.

BUNN C.; LÄDERACH, P.; RIVERA, O.O.; KIRSCHKE, D. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. **Climatic Change**, v. 129, n. 1- 2, p. 89-101, 2015.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro Arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v.60 n.1, p.65-68, 2001.

CAMARGO, M.B.P. The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010.

COLODETTI, T.V.; RODRIGUES, W.N.; CAVATTE, P.C.; REIS, E.F.; VERDIN FILHO, A.C.; BRINATE, S.V.B.; MARTINS, L.D.; CHRISTO, B.F.; ANDRADE JUNIOR, S.; TOMAZ, M.A. Managing the number of orthotropic stems in *Coffea arabica* as strategy for cultivation at low-altitude regions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, p. 447-454, 2020.

DAMATTA, F.M.; RAMALHO, J.D.C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.18, n.1, p.55-81, 2006.

DaMATTA, F.M.; RENA, A.B. Relações hídricas no cafeeiro. **Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, p. 44, 2002.

DaMATTA, F.M.; RONCHI, C.P.; MAESTRI, M.; BARROS, R.S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**. v.19 n.4 p.485- 510, 2007.

FAGAN, E.B.; SOUZA, C.H.E.; PEREIRA, N.M.B.; MACHADO, V.J. Efeito do tempo de formação do grão de café (*coffea* sp) na qualidade da bebida. **Bioscience Journal**. v.27, n.5, p.729-738, 2011.

FERREIRA, D.S.; AMARAL, J.F.T; PERERIRA, L.L.; FERREIRA, J.M.S.F.; GUARÇONI, R.C.; MOREIRA, T.R.; OLIVEIRA, A.C.; RODRIGUES, W.N.; ALMEIDA, S.L.H.; RIBEIRO, W.R.; TOMAZ, M.A.; CASTANHEIRA, D.T.; LIMA FILHO, T. Physico-chemical and sensory interactions of arabica coffee genotypes in different water regimes. **The Journal of Agricultural Science**. V. 159, n.1-2, p.50-58. 2021b.

FERREIRA, D.S.; CANAL, G.B.; NASCIMENTO, M.; NASCIMENTO, A.C.C.; FERREIRA, J.M.S.; AMARAL, J.F.T.; PEREIRA, L.L.; RODRIGUES, W.N.; RIBEIRO, W.R.; CASTANHEIRA, D.T.; TOMAZ, M.A. Exploring the multivariate technique in the discrimination of *Coffea arabica* L. cultivars regarding the production and quality of grains under the effect of water management. **Euphytica**. V.217, n.118. 2021a.

FERREIRA, D.S.; RIBEIRO, W.R.; GONÇALVES, M.S. PINHEIRO, A.A.; SALES, R.A.; REIS, E.F. Cenário da área irrigada por pivô central no Triângulo Mineiro, no Estado de Minas Gerais, Brasil. **Nativa**, v.6, n.6, p.613-618, 2018.

GLOESS, A.N.; SCHÖNBÄCHLE. B.; KLOPPROGGE, B.; D'AMBROSSIO, L; CHATELAIN, K.; BONGARTZ, A.; STRITTMATTER, A.; YERETZIAN, M.R.C. Comparison of nine common coffee extraction methods: instrumental and sensory analysis. **European Food Research and Technology**, v. 236, p.607-627, 2013.

GUERRA, A.F.; ROCHA, O.C.; RODRIGUES, G.C.; SANZONOWICZ, C.; SAMPAIO, J.B.R.; SILVA, H.C.; ARAÚJO, M.C. Irrigação do cafeeiro no Cerrado: Estratégia de manejo de água para uniformização de florada. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados, Comunicado Técnico 122**. 4p. 2005.

GUIMARÃES, E.V.; CATRO JUNIOR, L.G.; ANDRADE, H.C.C. A terceira onda do café em Minas Gerais. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, v.18, n.3, p.214-227, 2016.

GUIMARÃES, E.V.; LEME, P.H.M.V.; REZENDE, D.C.; PEREIRA, S.P.; SANTOS, A.C. The brand new Brazilian specialty coffee Market. **Journal of food products marketin**. v.25, n.1, p.49-71. 2018.

JAEGGI, M.E.P.C.; COELHO, F.C.; PEREIRA, I.M.; ZACARIAS, A.J.; GRAVINA, G.A.; LIMA, W.L.; PEREIRA, L.L.; MOREIRA, T.R.; SILVA, S.F.; PARAJARA, M.C. Path Analysis of Vegetative Characteristics in Conilon Coffee Production Consortiated with Green Fertilizers in Tropical Climate. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 40, p. 1-11, 2019.

LEE, L.W.; CHEONG, M.W.; CURRAN, P.; YU, B.; LIU S.Q. Coffee fermentation and flavour - An intricate and delicado relacionamento **Food Chemistry** , vol. 185, pp. 182–191, 2015.

LUPPI A. S. L.; SANTOS, A. R.; EUGÊNIO, F. C.; BRAGANÇA, R.; PELÚZIO, J. B. E.; DALFI, R. L.; SILVA, R. G. Metodologia para Classificação de Zoneamento Agroclimatológico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 2014.

MARSETTI, M.M.S.; BONOMO, R. PARTELLI, F.L.; SARAIVA, G.S. Déficit hídrico e fatores climáticos na uniformidade da florada do cafeeiro Conilon irrigado. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 7, p. 371-380, 2013.

MARTINEZ, H.E.P.; CLEMENTE, J.M.; LACERDA, J.S.; NEVES, Y.P.; PEDROSA, A.W. Nutrição mineral do cafeeiro e qualidade da bebida. **Revista Ceres**, v.61, supl. p. 838-848, 2014

MARTINS, E.; APARECIDO, L.E.O.; SANTOS, L.P.S.; MENDONÇA, J.M.A.; SOUZA, P.S. Influência das condições climáticas na produtividade e qualidade do cafeeiro produzido na região sul de Minas Gerais. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 499 - 506, 2015.

MARTINS, L. D.; EUGENIO, F. C.; RODRIGUES, W.N. ; TOMAZ, M. A. ; SANTOS, A. R. ; RAMALHO, J. D. C. . Carbon and water footprints in Brazilian coffee plantations - the spatial and temporal distribution. **Journal of Food and Agriculture (EJFA)**, v. 30, p. 482-482, 2018.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo, Globo, 320 p. 1991.

PEREIRA, L.L.; GUARÇONI, R.C.; MOREIRA, T.R.; BRIOSCHI JR.; D.; MARCATE, J.P.P.; SOUSA, L.H.B.P.; MORELI, A.P.; DEBONA, D.G.; CATEN, C.S.T. Sensory Profile of Fermented Arabica Coffee in the Perception of American Cupping Tasters. **Agricultural Sciences**, v. 10, p. 321-329, 2019.

PEREIRA, L.R. **Crescimento , produção e rendimento dos clones da variedade ‘ conilon vitória**. Dissertação (Mestrado), Programa de pós graduação em Produção Vegetal, Universidade federal do espírito santo, 2015.

PINTO, H.S.; ASSAD, E.D.; ZULLO JUNIO, R.J.; EVANGELISTA, S.E.M.; OTAVIAN, A.F.; ÁVILA, A.M.H.; EVANGELISTA, B.A.; MARIN, F.; MACEDO JUNIOR, C.; PELLEGRINO, G.; COLTRI, P.P.; CORAL, G. Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil. **Embrapa-Cepagri**, São Paulo, 2008.

PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; RIBEIRO, W. R.; REIS, E. F.; COLODETTI, T. V. Análise do crescimento do cafeeiro Arábica, em relação à fração de água transpirável do solo. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 46–54, 2016.

RENA, A.B.; MAESTRI, M. Relações hídricas no cafeeiro. Irrigação & tecnologia moderna. Brasília: **ABID**, p. 34–41.; 2000.

RIBEIRO, W.R.; CAPELINI, V.A.; FERREIRA, D.S.; GONÇALVES, M.S.; Dos REIS, E.F. Crescimento do cafeeiro conilon cultivar “ES 8122-Jequitibá” em função da fração de água transpirável no solo. **IRRIGA**, v.24, n. 3 p.512-526, 2019.

RODRIGUES, R.R.; PIZETTA, S.C.; SILVA, N.K.C.; RIBEIRO, W.R.; REIS, E.F. Crescimento inicial de cafeeiro conilon sob déficit hídrico no solo. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.33-38, 2016.

RODRIGUES, R.R.; PIZETTA, S.C.; SILVA, N.K.C.; RIBEIRO, W.R.; REIS, E.F. Crescimento inicial de cafeeiro conilon sob déficit hídrico no solo. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.33-38, 2016a.

RODRIGUES, W.N.; BRINATE, S.B.V.; MARTINS, L.D.; COLODETTI, T.V.; TOMAZ, M.A. Genetic variability and expression of agromorphological traits among genotypes of *Coffea arabica* being promoted by supplementary irrigation. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n.2, p.1-12. 2016b.

SILVA, A.S.; QUEIROZ, D.M.; FERREIRA, W.P.; RUFINO, J,L. Mapping the potential beverage quality of coffee produced in the Zona da Mata, Minas Gerais, Brazil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.97, p.3098–3108. 2016.

SOBREIRA, F.M.; OLIVEIRA, A.C.B.; PEREIRA, A.A.; GONÇALVES, M.A.; SAKIYAMA, N.S. Divergence among arabica coffee genotypes for sensory quality. **Australian Journal of Crop Science**. v.10 n.10 p. 1442–1448, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MAX, I.; ANGUS, M. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6° ed. 59 Porto Alegre : Artmed, 2017.

TOLESSA, K.; D'HEER, J.; DUCHATEAU, L.E.; BOECKX, P. Influence of growing altitude, shade and harvest period on quality and biochemical composition of Ethiopian specialty coffee. **Journal of the Science of Food and Agriculture** v.97, p.2849 – 2857. 2017.

VELOSO, T.G.R.; SILVA, M.C.E.; CARDOSO, W.S.; KASUYA, M.C.; PEREIRA, L.L. Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, p. 14692, 2020.

WORKU, M.; MEULENAER, B.; DUCHATEAU, L.; BOECKX, P. Effect of altitude on biochemical composition and quality of green arabica coffee beans can be affected by shade and postharvest processing method. **Food Research International**, v.105, p.278–285. 2018.

ZAIDAN UR, CORRÊA PC, FERREIRA WPM, CECON, PR. Environment and varieties influence the quality of coffees in Matas de Minas. **Coffee Science**. V.12, p.240 – 247. 2016.

CAPÍTULO 1

Morfologia dos ramos e produtividade de genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em diferentes manejos hídricos e altitude de transição

RESUMO

O cultivo de cafeeiro Arábica em condições restritivas ou de transição surge como desafio de grande interesse para a cafeicultura moderna, principalmente quando se considera os efeitos adversos que as mudanças climáticas globais proporcionam à região produtora desta cultura. Objetivou-se com este estudo avaliar a variabilidade das características morfológicas e produtivas de dez diferentes genótipos de cafeeiro e três regimes hídricos em cultivo de altitude de transição. O experimento foi conduzido no município de Alegre, no estado do Espírito Santo, Brasil. Para o ensaio experimental foram empregados os genótipos Paraíso MG/H 419-1; Paraíso H 419-3-3-7-16-2; MGS Turmalina; Paraíso Híbrido; Catuaí Vermelho IAC 44C; atuaí 144 CCF; Catucaim 24137; Catucaí 2-SL Sacramento MG1 e Oeiras MG-6851, todos da espécie *Coffea arabica* L. e três regimes hídricos (irrigado, sequeiro e fertirrigado) em delineamento em blocos casualizados no esquema de parcelas subdivididas com três repetições. Observou-se que existe grande variabilidade fenotípica para as características de morfologia dos ramos e produtividade dos genótipos nos diferentes regimes hídricos. Os genótipos Sacramento MG1 e MGS Turmalina no regime sequeiro, MGS Turmalina, e Paraíso Híbrido no regime fertirrigado e Paraíso Híbrido, Catucaí 24-137 MGS Turmalina e Oeiras MG 6851 no regime irrigado apresentam grande capacidade de servir como genitores para o desenvolvimento de futuros genótipos com alto potencial de crescimento e produção para a condição de cultivo em altitude de transição.

Palavras chave: *Coffea arabica* L.; mudanças climáticas, irrigação, variabilidade fenotípica

1. INTRODUÇÃO

As variações agroclimáticas inerentes às mudanças climáticas globais já causam danos e preocupações na agricultura mundial (IPCC, 2022). Dentre os distúrbios ambientais causados pelas mudanças climáticas o aumento da concentração de CO₂ da atmosfera, aumento da temperatura do ar e eventos de seca mais frequentes e prolongados associados a precipitações imprevisíveis tem se destacado (IPCC, 2022; RODRIGUES et al.; 2021; MARQUES et al.; 2021).

Destaca-se que em condição de campo e em função do estado sésil que a plantas possuem, essas estão constantemente expostas a uma combinação de diferentes mudanças ambientais. Ademais, conforme destacado por Dubberteïn et al. (2020), Ramalho et al. (2018) e Martins et al. (2019), para adaptar-se à instabilidade climática diária, as plantas de café desenvolveram durante a sua evolução, um conjunto de mecanismos de respostas que lhes condiciona ativar mecanismos de tolerância a condições de estresses, tais como seca, frio, calor e altas irradiâncias.

Ressalta-se que, mecanismos capazes de reduzir a condutância estomática para evitar a transpiração excessiva bem como desencadear a síntese de moléculas antioxidantes, são comumente encontrados em genótipos de cafeeiro tolerantes a seca e a temperaturas mais elevadas (DIAS et al.; 2007; MARTINS et a.; 2019; DUBBERTEIN et al.; 2020). Desta forma, fica evidente que a seleção de materiais genéticos que carreguem genes capazes de proporcionar maior tolerância aos estresses abióticos oriundos da mudança climática global surge como ferramenta promissora para os programas de melhoramento genético do cafeeiro (DUBBERTEIN et al.; 2020; RODRIGUES et al.; 2021; MARQUES et al.; 2021).

A irrigação também surge como alternativa promissora para atenuar os impactos das mudanças climáticas (SEMEDO et al.; 2018; ALMEIDA et al.; 2021; MARQUES et al.; 2021). Ressalta-se que o impacto isolado de um estresse abiótico nas plantas de café tende a ser superado por meio de mecanismos de defesa presentes no perfil genético da planta, enquanto que estresses conjuntos geram impactos muitas vezes de difícil reversão no metabolismo vegetal (MARTINS et al.; 2014; SCOTTI et al.; 2019; DUBBERTEIN et al.; 2020; RODRIGUES et al.; 2021; MARQUES et al.; 2021).

A utilização de irrigação, juntamente com o aumento do CO₂ atmosférico podem auxiliar à melhor condição de superar problemas associados aos demais impactos agroclimáticos (MARTINS et al.; 2014; WANG et al.; 2018; DaMATTA et al.; 2018; RAMALHO et al.; 2018; GAMAR et al.; 2019; ÁVILA et al.; 2020A; MARQUES et al.; 2021; OLIVEIRA et al.; 2020; SEMEDO et al.; 2018), tendo em vista que estudos recentes têm demonstrado que o aumento do CO₂ tem sido capaz de mitigar o efeito nocivos da seca na fotossíntese, no crescimento e no rendimento de plantas (MARTINS et al.; 2014; WANG et al.; 2018; DaMATTA et al.; 2018; RAMALHO et al.; 2018; ÁVILA et al.; 2020A; OLIVEIRA et al.; 2020; SEMEDO et al.; 2018; MARQUES et al.; 2021).

Deste modo, embora seja evidente que as mudanças climáticas globais vêm causando danos severos à cafeicultura, pesquisas demonstram que é possível conviver com essas mudanças, por meio da escolha e utilização conjunta de práticas agrônômicas adequadas,

principalmente com o auxílio da irrigação, juntamente com a seleção de genótipos que carreguem genes que codificam melhor a adaptação metabólica a eventos de seca e aumento de temperatura.

Outrossim, objetivou-se com este trabalho avaliar a variabilidade das características morfológicas e produtivas de dez genótipos de cafeeiro Arábica submetido aos regimes hídricos irrigado, sequeiro e fertirrigado em cultivo de altitude de transição.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Época e local de estudo

O estudo foi desenvolvido no período de março de 2021 a outubro de 2022, no distrito de Lagoa Seca, interior do município de Alegre (Figura 1), no sul do estado do Espírito Santo (20° 52' 07" S e 41° 28' 43" W).



Figura 1. Representação geográfica da área do estudo.

A região, cuja altitude é de 640 m, está localizada na zona de transição entre o cultivo de cafeeiro Arábica (*Coffea arabica* L.) e do cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre). A precipitação média anual foi de 1350.92 mm e temperatura média anual de 24,18 °C entre os meses de novembro de 2020 e maio de 2023 (Figura 2).

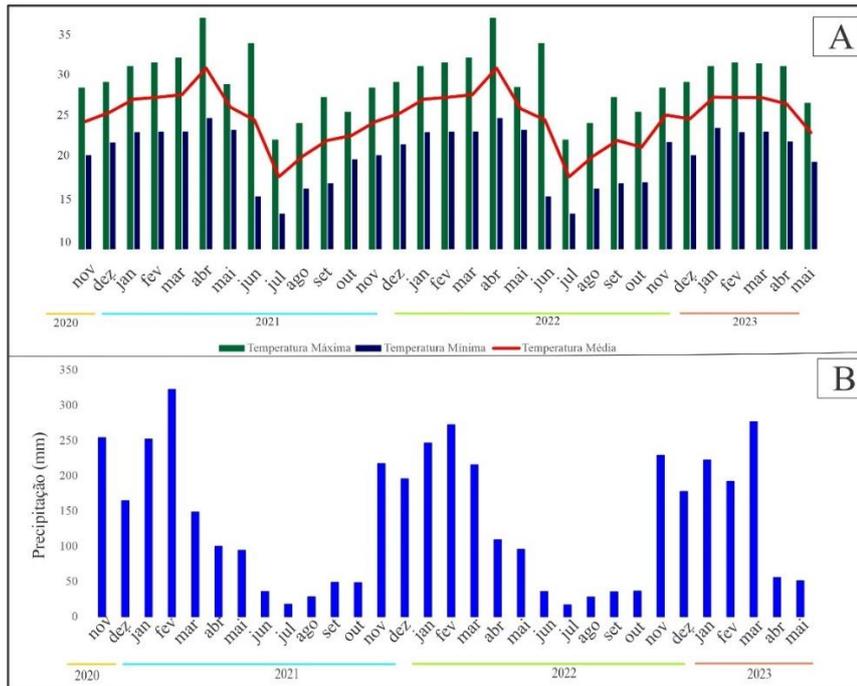


Figura 2. Temperatura máxima, mínima e média (A) e precipitação (B) mensais da região do estudo para o período de novembro de 2020 a maio de 2023.

2.2. Tratamentos e delineamento experimental

No total, dez genótipos de *Coffea arabica* implantados no ano de 2012 compuseram o ensaio experimental, sendo distribuídos em três manejos de irrigação (fertirrigado, irrigado e sequeiro). Para o ensaio experimental foram utilizados dez genótipos de cafeeiro Arábica sendo eles: Paraíso MG H419-1, H419-3-3-7-16-2; MGS Turmalina, Paraíso Híbrido, Catucaí Vermelho IAC 44, Catucaí Vermelho IAC 144, Catucaiam 24137, Catucaí Amarelo 2SL, Sacramento MG1 e Oeiras MG-6851. Esses materiais genéticos foram escolhidos em virtude de seu caráter produtivo, porte baixo e por serem potencialmente favoráveis para plantios na região em estudo (RODRIGUES et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b).

O experimento foi conduzido em Delineamento de Blocos Casualizados (DBC) em esquema de parcelas subdivididas, com dez genótipos de cafeeiro Arábica (considerados no estudo como subparcelas) e três regimes hídricos (considerados como parcelas), com três repetições, de modo que cada unidade experimental foi composta por três plantas úteis. Os cafeeiros foram implantados com espaçamento de 2,5 m x 1,0 m, totalizando uma população de 4000 plantas por hectare.

O fornecimento de água foi realizado por meio de três regimes hídricos. O primeiro regime hídrico caracterizou-se pela condução das plantas sem irrigação (sequeiro), com entrada

de água somente em função da ocorrência de precipitação no local, sendo monitorado pela estação meteorológica automática modelo Irriplus E 3000. O segundo (irrigado), foi caracterizado pelo fornecimento de água por irrigação com uso do sistema de gotejamento. Já o terceiro regime hídrico estudado (fertirrigado), foi caracterizada pelo fornecimento da água acrescida de fertilizantes minerais, também com o uso do sistema de gotejamento.

No regime irrigado e fertirrigado foram feitos monitoramentos diários da tensão de água do solo com auxílio de tensiômetros instalados na lavoura. A determinação da tensão adequada para a irrigação foi obtida por meio da curva característica do solo gerada pelos pontos referentes às tensões de 10 kPa; 30 kPa; 60 kPa; 100 kPa; 300 kPa e 1500 kPa, destacando-se que os pontos referentes à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP) foram de 0,2308 m³/m³ e 0,1561 m³/m³, respectivamente. Assim, a irrigação nos sistemas irrigados era realizada sempre que a umidade do solo se encontrasse entre 70% e 80% de água disponível.

A adubação de produção foi realizada conforme recomendação proposta por Martinez e Neves (2015). Para tanto, padronizaram-se as doses de nutrientes a serem fornecidas para as plantas em todos os regimes hídricos estudados, variando apenas o número de eventos de adubações durante o ano. Tanto para o tratamento sequeiro quanto para o irrigado a adubação foi realizada a lanço em quatro aplicações entre os meses de outubro e março, enquanto que para o tratamento fertirrigado a adubação foi fornecida juntamente com a água em doze parcelas também compreendidas no mesmo período, em intervalos superiores a 15 dias.

As plantas de café foram recepadas no ano de 2018 e, posteriormente, conduzidas sob o manejo de poda programada de ciclo para o cafeeiro Arábica (PPCA), proposta por Verdin Filho et al. (2016), que recomendada manter entre 10.000 e 12.000 hastes ortotrópicas por hectare.

Para tanto, assim que se iniciou a brotação dos ramos recepados realizou-se a desbrota e seleção das hastes ortotrópicas que iriam permanecer na planta durante quatro a cinco colheitas, sendo que, a partir de no máximo a quinta colheita iniciou-se a remoção de 50% a 75% das hastes ortotrópicas para se prosseguir com a PPCA (COLODETTI et al.; 2020; VERDIN FILHO et al.; 2016). Anualmente, logo após a colheita, realizou-se a eliminação dos ramos plagiotrópicos que apresentavam 70% ou mais de sua capacidade produtiva esgotada. Também foi realizada a desbrota dos ramos ortotrópicos não selecionados que porventura vieram a aparecer (VERDIN FILHO et al.; 2016).

As demais práticas agronômicas (controle de plantas daninhas, calagem, controle de pragas e doenças) foram conduzidas conforme a necessidade da lavoura e considerando a

análise química do solo, seguindo as recomendações para o cultivo do cafeeiro Arábica no Brasil propostas por Sakiyama et al. (2015).

2.3. Biometria da copa das plantas

As avaliações biométricas da copa das plantas ocorreram a cada três meses no período compreendido entre os meses de outubro de 2020 e outubro de 2022. De cada uma das seis plantas útil da parcela, um ramo ortotrópico mediano foi marcado e utilizado para avaliações. Para caracterizar o crescimento final dos ramos ortotrópicos de cada genótipo (Figura 2A), avaliou-se antes da poda programada de ciclo do cafeeiro Arábica as seguintes variáveis: crescimento do ramo ortotrópico (CRO; m), por meio da medição da superfície do solo até o ápice do ramo ortotrópico e calculado-se a diferença entre as medições no mês de outubro de 2022 e outubro de 2021 com uso de trena graduada em mm.



Figura 3. Processo de avaliação da biometria dos ramos ortotrópicos (A), plagiotrópico (B), avaliação do ponto de colheita (C), café cereja descascado (D), secagem em terreiro suspenso com cobertura plástica (E), e processamento de extração

Foram avaliadas ainda as variáveis: número de ramos plagiotrópicos (unidades) do ramo ortotrópico marcado, por meio de contagem direta; comprimento do ramo plagiotrópico (cm), por meio de trena graduada em mm (Figura 2B); número total de folhas (unidade); número de frutos (unidade) por ramos plagiotrópico, por meio de contagem direta; bem como a razão entre número de frutos e o número de folhas.

Considerando que a copa do cafeeiro Arábica era renovada sempre após a safra em função das retiradas anuais de ramos plagiotrópicos após as colheitas (operação denominada desrrama e necessária no manejo de poda programada de ciclo do cafeeiro Arábica (VERDIN FILHO et al.; 2016)), analisaram-se os dados de três avaliações por ano dos anos de 2021 e 2022 para as variáveis: comprimento do ramo plagiotropico, número de ramos plagiotrópicos, número total de folhas, número de frutos e razão entre número de frutos e folhas, com a finalidade de caracterizar o comportamento anual das características em estudo durante o período de cultivo até a finalização do ciclo de colheita.

2.4. Colheita e pós colheita do cafeeiro.

A colheita dos frutos a cada ano foi padronizada de modo que a atividade tinha início somente quando pelo menos 80% dos frutos da planta atingiam o estágio cereja (Figura 2C). No momento da colheita, com o uso de um recipiente graduado, foi determinado o volume de produção de frutos de cada unidade experimental. Uma amostra de frutos de cada unidade experimental com volume conhecido foi coletada. Posteriormente foi estimado, através da relação entre a massa de café “cereja” da amostra e a massa de café beneficiado resultante desta mesma amostra, do volume de café colhido e da população de plantas da área, a produtividade em sacas por hectare.

Imediatamente após a colheita, 5 litros de frutos de café cereja de cada unidade experimental foram encaminhados para a unidade de beneficiamento localizada no Laboratório de Análise e Pesquisa do Café – LAPC do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Campus Venda Nova do Imigrante.

Nessa etapa, procedeu-se a separação dos frutos que boiavam (secos, brocados, imaturos e malformados), dos frutos cerejas e frutos verdes. Após a lavagem, procedeu-se a separação do exocarpo dos frutos do endocarpo e endosperma, com auxílio do equipamento BLASI-10 (descascador de café), da marca Blasi©, produzindo assim o café conhecido como cerejas descascadas (Figura 3D).

As cerejas descascadas foram submetidas ao processo de secagem (Figura 3E). Os cafés foram secos ao sol até atingirem aproximadamente 12% de umidade (base úmida) por um período que variou de 15 a 18 dias em ambiente coberto com cobertura plástica em sistema conhecido como terreiro suspenso (Figura 3E).

2.5. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software livre R (R Core Team, 2022). Cada característica foi analisada mediante a análise de variância (ANOVA) em esquema de parcela subdividida, testando-se a significância da interação entre o fator genótipo e o fator manejo de irrigação. Havendo efeito significativo dos fatores em estudo as médias das variáveis foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, em 5% de probabilidade para os genótipos e Tukey, em 5% de probabilidade para os regimes hídricos.

Visando observar a dispersão dos genótipos para cada um dos regimes hídricos estudados, procedeu-se a análise de componentes principais considerando os dois primeiros componentes principais que explicassem pelo menos 60% da variação total dos dados, conforme recomendado por Cruz et al (2015) e Ferreira (2018). Em seguida, buscando agrupar os genótipos em função de suas respostas fenotípicas aos diferentes regimes hídricos para cada ano agrícola em estudo, foi utilizado o método do vizinho mais distante, considerando a distância média de Mahalanobis como métrica.

3. RESULTADOS

Na Tabela 1, encontra-se a análise de variância das diversas características de crescimento e produtividade de genótipos de cafeeiro arábica submetidos a tratamentos de irrigação, sequeiro e fertirrigação. Ao analisar os resultados, observa-se que todas as características estudadas exibiram uma interação significativa entre o genótipo e o ambiente em estudo.

Tabela 1. Análise de variância das características produção do ano agrícola 2020-2021; produção do ano agrícola 2021-2022; produção média; Número de ramos plagiotrópico ano agrícola 2020-2021; Número de ramos plagiotrópico ano agrícola 2021-2022; Crescimento do ramo ortotrópico; Proporção entre o número de frutos e folhas no ano agrícola 2020-2021; Proporção entre o número de frutos e folhas no ano agrícola 2020-2021.

FV	GL	Quadrado médio			
		Produção ano agrícola 2020-2021	Produção ano agrícola 2021- 2022	Produção média	Número de ramos Plagiotrópicos 2020-21
Regime Hídrico (RH)	2	2777,8*	1108,31*	204,14*	71,40*
Bloco	2	38,90	12,32	9,70	18,68
Erro A	4	185,74	46,80	10,87	17,98
Genótipo	9	30026,15*	2357,95*	1937,10*	244,67*
Interação G*RH	18	12860,15	723,13*	370,684*	455,56*
Erro B	54	4611,83	34,13	31,69	701,91
CV1	-	7,64	20,17	5,35	8,05
CV 2	-	10,35	17,23	9,14	13,69

FV	GL	Quadrado médio			
		Número ramos Plagiotrópicos 2020-21	Crescimento do ramo ortotrópico	Proporção Fruto/folha 2020-2021	Proporção Fruto/folha 2021-2022
Regime Hídrico (RH)	2	94,033*	990,93*	49,472*	11,75*
Bloco	2	1,158	353,20	6,682	0,4059
Erro A	4	1,679	65,90	11,35	0,8196
Gennótipo	9	79,189*	1464,54*	82,031*	40,463*
Interação G*RH	18	81,1320*	734,96*	62,152*	2,6992*
Erro B	54	7,530	116,05	5,86	0,369
CV1	-	2,93	13,14	39,27	22,29
CV 2	-	13,69		28,23	29,89

*F significativo em nível de 5% de probabilidade; ns não significativo.

Na Tabela 2, é possível notar que a alteração do regime hídrico proporcionou mudanças no número de grupos de genótipos formados para a variável crescimento do ramo ortotrópico. Ademais, constata-se que para o regime fertirrigado formaram-se quatro grupos de genótipos, sendo que o grupo composto pelo genótipo Sacramento MG1 foi o que apresentou o maior crescimento e o grupo formado pelos genótipos Paraíso MG H419-1 e Catucaí Amarelo 2SL foi o que apresentou o menor crescimento do ramo ortotrópico.

Tabela 2. Crescimento do ramo ortotrópico de cafeeiros Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos entre outubro de 2020 e outubro de 2022, em região de altitude de transição

Genótipos	Crescimento do ramo ortotrópico (cm)					
	Fertirrigado		Irigado		Sequeiro	
H 419-3-3-7-16-2	66,3	Cb	41,0	Ca	61,5	Aab
Catuaí Vermelho IAC 144	59,0	Cab	73,5	Ba	38,1	Bb
Paraíso MG H419-1	43,0	Db	70,3	Ba	42,1	Bb
Catucaiam 24137	67,7	Ca	54,3	Ca	58,1	Aa
Sacramento MG1	114,7	Aa	114,7	Aa	50,1	Bb
Catuaí Vermelho IAC 44	59,1	Ca	62,6	Ba	60,0	Aa
Catucaí Amarelo 2SL	43,5	Da	49,3	Ca	52,5	Ba
Oeiras MG 6851	83,7	Ba	50,5	Cb	60,8	Ab
MGS Turmalina	57,0	Ca	52,3	Ca	50,7	Ba
Paraíso Híbrido	69,7	Ca	67,3	Ba	71,1	Aa

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey respectivamente.

No regime irrigado, ocorreu a formação de três grupos de genótipos, sendo que, assim como para o fertirrigado o genótipo Sacramento MG1 foi o que apresentou o maior crescimento enquanto que o grupo formado pelos genótipos MGS Turmalina, Oeiras MG 6851, Catucaiam 24137 e H419-3-7-16-2 foi o que apresentou o menor crescimento do ramo ortotrópico. No regime sequeiro ocorreu a formação de apenas dois grupos de genótipos, sendo que o que apresentou maior crescimento foi o grupo composto pelos genótipos H419-3-7-16-2, Catucaiam 24137, Catucaí 144 CCF, Oeiras MG 6851 e Paraíso Híbrido (Tabela 2).

Percebe-se ainda que a prática de irrigação e/ou fertirrigação favoreceu o crescimento dos ramos ortotrópico em grande número dos genótipos estudados, sendo que o Paraíso Híbrido, MGS Turmalina, Catuaí Vermelho IAC 144 e Catucaiam 24137 foram os genótipos que não apresentaram diferença estatística em virtude do manejo de irrigação aplicado (Tabela 2).

No ano agrícola de 2020-2021, percebe-se que os maiores números de ramos plagiotrópicos (Tabela 3), quando se comparam os regimes hídricos aplicados, foram apresentados pelos genótipos MGS Turmalina no regime irrigado e Paraíso MG H419-1 no regime irrigado e fertirrigado e Catucaí Amarelo 2SL no regime sequeiro.

Tabela 3. Número de ramos plagiotrópicos de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos para o ano agrícola de 2020-2021 e 2021-2022 respectivamente, em região de altitude de transição

Genótipos	Número de Ramos Plagiotrópicos 2020-2021					
	Fertirrigado		Irigado		Sequeiro	
H 419-3-3-7-16-2	27	Aa	27	Aa	27	Ba
Catuai Vermelho IAC 44	22	Ba	25	Aa	27	Ba
Paraíso MG/ H419-1	31	Aab	25	Ab	33	Aa
Catuciam 24137	25	Ba	25	Aa	26	Ba
Sacramento MG1	27	Aa	23	Aa	29	Aa
Catuai Vermelho IAC 144	22	Ba	22	Aa	25	Ba
Catucá Amarelo 2SL	22	Bb	24	Ab	31	Aa
Oeiras MG 6851	29	Aa	27	Aa	24	Ba
MGS Turmalina	25	Bb	32	Aa	26	Bab
Paraíso Híbrido	27	Aa	26	Aa	26	Ba
Genótipos	Número de Ramos Plagiotrópicos 2021-2022					
	Fertirrigado		Irigado		Sequeiro	
H 419-3-7-16-2	43	Bb	51	Aa	42	Ab
Catuai Vermelho IAC 44	43	Ba	45	Ba	44	Ba
Paraíso MG H419-1	45	Bb	55	Aa	50	Bb
Catuciam 24137	44	Ba	37	Cb	46	Ba
Sacramento MG1	43	Ba	40	Ca	43	Aa
Catuai Vermelho IAC 144	40	Cb	46	Ba	44	Bab
Catucá Amarelo 2SL	36	Cb	43	Ba	45	Aa
Oeiras MG 6851	32	Db	44	Ba	47	Ba
MGS Turmalina	51	Aa	53	Aa	41	Ab
Paraíso Híbrido	51	Aa	46	Ba	35	Cb

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey, respectivamente.

Analisando o número de ramos plagiotrópicos dos genótipos para cada um dos regimes hídricos estudados (Tabela 3), percebe-se que no regime irrigado não ocorreu diferença estatística entre os genótipos. Para o regime fertirrigado os maiores números de ramos plagiotrópicos foi alcançado pelos genótipos H 419-3-3-7-16-2, Paraíso MG/H419-1, Sacramento MG1, Oeiras MG 6851 e Paraíso Híbrido, enquanto que para o regime sequeiro as maiores médias foram alcançadas para os genótipos Paraíso MG//H419-1, Sacramento MG1 e Catucá Amarelo 2SL.

Para o ano agrícola 2021-2022 constata-se um aumento no número de ramos plagiotrópicos comparativamente ao ano agrícola anterior (Tabela 3). Comparando o crescimento isolado de cada genótipo em função dos regimes hídricos estudados, percebe-se que os genótipos MGS Turmalina e Paraíso Híbrido apresentaram o menor número de ramos plagiotrópicos para o regime sequeiro. Por outro lado, os genótipos H 419-3-3-7-16-2, Paraíso

MG H419-1, Catuaí Vermelho IAC 144, Catucaí Amarelo 2SL, Oeiras MG 6851 apresentaram os menores números de ramos plagiotrópicos quando cultivados no regime fertirrigado.

Quando se analisa a produtividade do cafeeiro, nota-se que os diferentes genótipos apresentaram produtividades diferenciadas quando cultivados nos regimes irrigado, sequeiro e fertirrigado, independentemente da safra estudada (Tabela 4). Percebe-se ainda, que o ano agrícola de 2020-2021 foi representado por um ano de bialidade positiva, enquanto que no ano agrícola de 2021-2022 a bialidade foi negativa

Tabela 4. Produção de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos para o ano agrícola de 2020-2021 e 2021-2022, em região de altitude de transição

Genótipos	Produção 2020-2021 (sc/ha)					
	Fertirrigado		Irigado		Sequeiro	
H 419-3-3-7-16-2	95	Ca	72	Cb	59	Db
Catuaí Vermelho IAC 44	95	Ca	75	Cb	43	Dc
Paraíso MG/ H419-1	86	Da	82	Ca	87	Ba
Catucaiam 24137	126	Aa	104	Bb	80	Cc
Sacramento MG1	78	Da	78	Ca	92	Ba
Catuaí Vermelho IAC 144	82	Da	64	Cb	59	Db
Catucaí Amarelo 2SL	115	Ba	71	Cb	125	Aa
Oeiras MG 6851	78	Da	80	Ca	56	Bb
MGS Turmalina	113	Ba	91	Cb	117	Aa
Paraíso Híbrido	134	Aa	122	Aa	118	Aa

Genótipos	Produção 2021-2022 (sc/ha)					
	Fertirrigado		Irigado		Sequeiro	
H 419-3-7-16-2	55	Aa	23	Db	27	Cb
Catuaí Vermelho IAC 44	8	Db	18	Db	30	Ca
Paraíso MG H419-1	55	Aa	51	Cb	54	Aa
Catucaiam 24137	14	Db	43	Ba	32	Cb
Sacramento MG1	17	Cc	30	Cb	52	Aa
Catuaí Vermelho IAC 144	5	Db	19	Da	13	Bab
Catucaí Amarelo 2SL	3	Db	18	Da	10	Db
Oeiras MG 6851	33	Bb	50	Ba	23	Cc
MGS Turmalina	46	Ab	75	Aa	43	Bb
Paraíso Híbrido	27	Cb	56	Ba	50	Aa

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey, respectivamente.

Para o ano agrícola de 2020-2021, os genótipos Paraíso Híbrido, Catucaiam 24137 destacaram-se quando cultivados em regime fertirrigado, produzindo 134 e 126 sacas por hectare (sc/ha) respectivamente. Percebe-se ainda que os genótipos Paraíso Híbrido, Sacramento MG 1 e Paraíso MG H419-1 apresentaram produtividades estatisticamente iguais independentemente do manejo de irrigação aplicado (Tabela 4).

Observa-se ainda, que o genótipo Paraíso Híbrido apresentou as maiores produtividades para os regimes hídricos irrigado, sequeiro e fertirrigado. Para o regime hídrico sequeiro os

genótipos Catucaí Amarelo 2SL e o MGS Turmalina e no regime fertirrigado o genótipo Catucaiam 24137, também se destacaram no ano safra 2020-2021 (Tabela 4).

Para o ano agrícola de 2021-2022 (Tabela 4), percebe-se uma redução acentuada na produtividade para todos os genótipos em estudo, em virtude do efeito da bienalidade de produção do cafeeiro Arábica. Para a safra em questão constata-se que o genótipo MGS Turmalina para o regime irrigado, Paraíso MG H 419-1, Paraíso Híbrido e Sacramento no regime sequeiro bem como os genótipos Paraíso MG H 419-1, H419-3-3-7-16-2 e MGS Turmalina no regime fertirrigado destacaram-se por apresentar as maiores produtividades.

Por outro lado, os genótipos Catucaí Amarelo 2SL e Catuaí Vermelho IAC 14 apresentaram as mais baixas produtividades nos regimes hídricos fertirrigados, irrigados e sequeiro, enquanto o Catuaí Vermelho IAC 44 registrou produtividade mais baixa nos regimes irrigados e fertirrigados. O H419-3-3-7-16, no regime irrigado, também apresentou um rendimento inferior. Esses resultados foram inferiores à produtividade de 29 sacas/ha, registrados na safra de 2023, conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023).

Quando analisada a produtiva média das duas safras agrícolas percebe-se que os genótipos MGS Turmalina e Paraíso Híbrido apresentaram as maiores produtividades independentemente do regime hídrico em estudo, sendo ainda superiores a 79 sacas por hectare (Tabela 5). Por outro lado, os genótipos Catuaí Vermelho IAC 144 e Catuaí Vermelho IAC 44 apresentaram as menores produtivas médias em todos os regimes hídricos estudado.

Tabela 5. Produção média nas safras de 2020-2021 e 2021-2022 de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos, em região de altitude de transição

Genótipos	Produção média 2020-2021 e 2021-2022 (sc/ha)					
	Fertirrigado		Irrigado		Sequeiro	
H 419-3-7-16-2	75	Aa	48	Db	43	Db
Catuaí Vermelho IAC 44	51	Da	46	Dab	36	Db
Paraíso MG H419-1	71	Ba	67	Cb	71	Ba
Catucaiam 24137	70	Ba	74	Ba	56	Cb
Sacramento MG1	48	Db	54	Cb	72	Ba
Catuaí Vermelho IAC 144	43	Da	41	Da	36	Da
Catucaí Amarelo 2SL	59	Ca	44	Db	67	Ba
Oeiras MG 6851	56	Ca	65	Ba	39	Db
MGS Turmalina	80	Aa	83	Aa	80	Aa
Paraíso Híbrido	80	Aa	89	Aa	84	Aa

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey respectivamente.

Os genótipos MGS Turmalina, Paraíso Híbrido e Catuaí Vermelho IAC 144 não apresentaram diferença estatística em função do regime hídrico aplicado. O Sacramento MG1

apresentou a maior produtividade média em cultivo de sequeiro, enquanto Oeiras MG 6851 e Catucaiam 24137 produziram menos quanto cultivados no regime sequeiro.

Com relação à proporção entre o número de frutos e o número de folhas (Tabela 6), percebe-se que para o ano agrícola de 2020-2021 no regime fertirrigado a relação foi estatisticamente igual para todos os genótipos em estudo. Para o regime irrigado a maior relação é observada para o genótipo Paraíso Híbrido e a menor relação pode ser observada para os genótipos H 419-3-3-7-16-2, Paraíso MG/ H419-1, Catuaí Vermelho IAC 144, Catucaí Amarelo 2SL e MGS Turmalina, enquanto que no regime sequeiro Catuaí Vermelho IAC 144, Catuaí Vermelho IAC 144 FSC, H 419-3-3-7-16-2, Catucaiam 24137 e Sacramento MG 1 foram os que apresentaram as maiores proporções (Tabela 5).

Tabela 6. Proporção entre o número de frutos e o número de folhas de genótipos cafeeiro Arábica cultivados em diferentes regimes hídricos para o ano agrícola de 2020-2021 e 2021-2022 respectivamente, em região de altitude de transição

Genótipos	Proporção entre frutos e folhas 2020-2021					
	Fertirrigado		Fertirrigado		Fertirrigado	
H 419-3-3-7-16-2	6,90	Aa	6,70	Ca	9,00	Aa
Catuaí Vermelho IAC 44	7,20	Aa	10,3	Ba	9,10	Aa
Paraíso MG/ H419-1	9,40	Aa	3,90	Cb	5,50	Bab
Catucaiam 24137	7,40	Ab	12,7	Ba	11,0	Aab
Sacramento MG1	7,40	Ab	12,5	Ba	12,9	Aa
Catuaí Vermelho IAC 144	12,2	Aa	5,10	Cb	8,30	Aab
Catucaí Amarelo 2SL	5,00	Aa	3,30	Ca	6,30	Ba
Oeiras MG 6851	8,90	Aa	9,90	Ba	7,60	Ba
MGS Turmalina	4,90	Aa	6,20	Ca	2,60	Ba
Paraíso Híbrido	7,00	Aa	29,4	Ab	7,50	Ba

Genótipos	Proporção entre frutos e folhas 2021-2022					
	Fertirrigado		Fertirrigado		Fertirrigado	
H 419-3-7-16-2	4,65	Aa	2,22	Ab	1,34	Bb
Catuaí Vermelho IAC 44	1,97	Cab	2,47	Aa	1,21	Bb
Paraíso MG H419-1	2,86	Bab	3,75	Aa	2,07	Ab
Catucaiam 24137	1,15	Db	2,85	Aa	1,92	Aab
Sacramento MG1	0,80	Db	2,70	Aa	3,66	Aa
Catuaí Vermelho IAC 144	0,44	Db	2,21	Aa	0,56	Bb
Catucaí Amarelo 2SL	0,89	Da	1,48	Aa	0,85	Ba
Oeiras MG 6851	1,58	Cab	2,34	Aa	0,65	Bb
MGS Turmalina	0,98	Db	2,52	Aa	1,34	Bab
Paraíso Híbrido	2,21	Cb	3,75	Aab	3,92	Aa

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey respectivamente.

O ano agrícola de 2021-2022, neste estudo foi associado com a bienalidade de produção negativa. Ademais, percebe-se a ocorrência de menores número de frutos por número de folhas

no cafeeiro (Tabela 6). Percebe-se que no regime irrigado a proporção entre frutos e folhas foi igual para todos os genótipos em estudo, enquanto para o regime sequeiro ocorreu a formação de dois grupos de genótipos, sendo que o Paraíso Híbrido, Sacramento MG1, Catucaiam 24137, Paraíso MG H419-1 foi o que apresentou a maior proporção entre folhas e fruto. No regime fertirrigado ocorreu a formação de quatro grupos de genótipos, sendo que o H419-3-7-16-2 foi o que apresentou a maior proporção.

A distribuição das contribuições percentuais de cada variável na formação da dispersão dos dois primeiros componentes principais está detalhada na Tabela 7. É notável que as variáveis com menor influência na formação dos dois primeiros componentes principais são as seguintes: no regime de fertirrigação o crescimento do ramo ortotrópico, o crescimento do ramo plagiotrópico no ano agrícola 2021-2022 e no ano agrícola 2020-2021 foram os que menos contribuíram para a formação dos componentes; enquanto nos regimes irrigado e sequeiro, o número de folhas em 2021-2022 e 2020-2021 foram as variáveis que apresentaram menor contribuição.

Tabela 7. Influência das características morfológicas dos ramos e da produtividade nos dois primeiros componentes principais sob diferentes condições de manejo hídrico: fertirrigação, honestidade e sequeiro

Variáveis*	Fertirrigado		Irigado		Sequeiro	
	PC1 (%)	PC2 (%)	PC1 (%)	PC2 (%)	PC1 (%)	PC2 (%)
Ortotrópico	1,671	3,3219	0,1197	20,192	20,447	0,9295
Folhas 21/22	1,909	35,379	4,6012	12,615	6,4129	0,3156
Plagiotropico 21/22	11,977	9,7572	0,5220	22,012	18,254	14,473
Frutos 21/22	26,522	0,0358	23,795	0,0124	0,9910	29,571
Frutos 20/21	9,2405	29,215	26,102	4,7341	19,822	5,1160
Folha 20/21	15,984	9,2072	14,417	11,725	7,2618	1,1783
Plagiotrópico 20/21	7,8242	4,8495	6,7038	25,327	26,043	5,2783
Produtividade	24,869	8,2339	23,738	3,3801	0,7622	43,137

*Crescimento do ramo ortotrópico (ortotrópico), número de folhas ano agrícola 2021- 2022 (folhas 21/22), crescimento do ramo plagiotrópico 2021-2022 (plagiotrópico 21/22), número de frutos ano agrícola 2021-2022 (frutos 21/22), número de folhas ano agrícola 2020- 2021 (folhas 20/21), crescimento do ramo plagiotrópico 2020-2021 (plagiotrópico 21/22), número de frutos ano agrícola 2020-2021 (frutos 20/21).

Na análise multivariada das variáveis morfológicas do cafeeiro, é possível perceber que o diagramas de dispersão referentes aos dois primeiros componentes principais foram capazes de explicar 63,2 %, 71,6% e 63,8 % da variação total dos dados para os regimes fertirrigado, irrigado e sequeiro respectivamente (Figura 4).

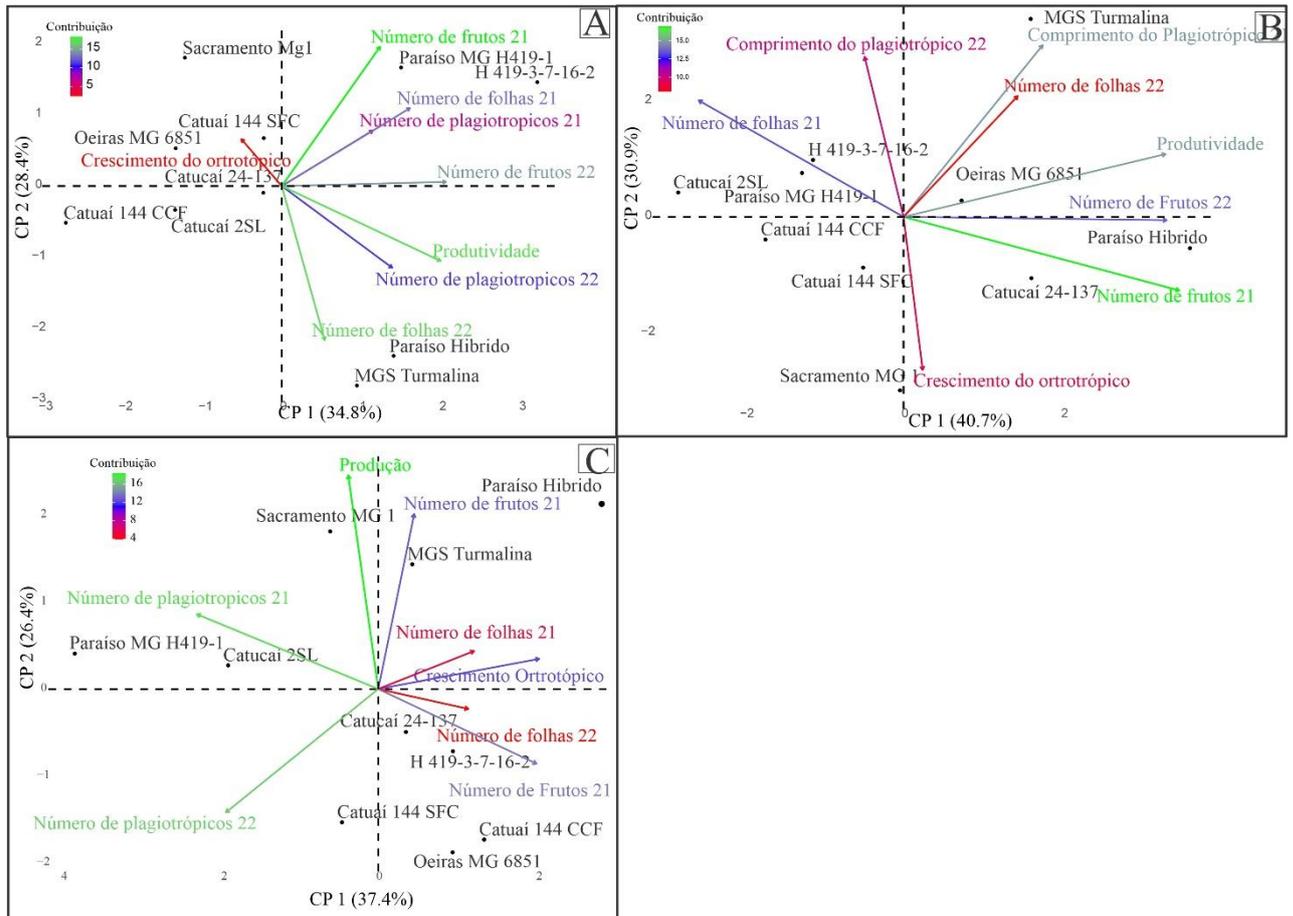


Figura 4. Diagramas de dispersão dos dois primeiros componentes principais referentes a biometria dos ramos de diferentes genótipos de cafeeiro Arábica cultivados no regime fertirrigado (A), irrigado (B) e sequeiro (C).

Pelo diagrama de dispersão é possível notar que os genótipos se mostraram bem dispersos independentemente do regime hídrico estudado (Figura 4). Para todos os regimes em estudo percebe-se que os genótipos MGS Turmalina e Paraíso Híbrido estiveram próximos e com boa associação com a variável produtividade. Juntamente com o MGS Turmalina e o Paraíso Híbrido, os genótipos Oeiras MG 6851 e Catucaiam 24137 no regime irrigado (Figura 4B) e o Sacramento MG 1 no regime sequeiro (Figura 4C), também apresentaram boa associação com a variável produtividade.

Constata-se que o crescimento do ramo ortotrópico para todos os regimes hídricos apresentou vetor em sentido contrário ao da variável produtividade, demonstrando que existe uma influência direta entre a produtividade e o crescimento das plantas de café. Ademais, os genótipos Catuai Vermelho IAC 44, Catuai Vermelho IAC 144, Catucaí Amarelo 2SL, Catucaiam 24137, Oeiras MG 6851 e Sacramento MG 1 no regime fertirrigado (Figura 4A), Catuai Vermelho IAC 44, Catuai Vermelho IAC 144 e Sacramento MG 1 no regime irrigado (Figura 4B) e Catucaiam 24137, H419-3-3-7-16-2, Catuai Vermelho IAC 144, Catucaí Amarelo

2SL e Oeiras MG 6851 no regime sequeiro (Figura 4C), foram os genótipos que se associaram melhor com as variáveis de crescimento do ramo.

Percebe-se ainda, que embora fossem oriundos de mesmos genitores, os genótipos do grupo Paraíso apresentaram grande variabilidade entre eles, situando-se distantes um do outro no diagrama de dispersão (Figura 4), sendo que os genótipos mais próximos independentemente do regime hídrico foram o MGS Turmalina e o Paraíso Híbrido.

No dendograma hierárquico considerando o método do vizinho mais distante e a métrica de Mahalanobis percebe-se a formação de cinco grupos de genótipos, com base nas características morfoagronômicas e os regimes hídricos estudados (Figura 5). Nota-se que, assim como observado pelo método de componentes principais vários genótipos se situaram em grupos distintos em função do regime hídrico aplicado.

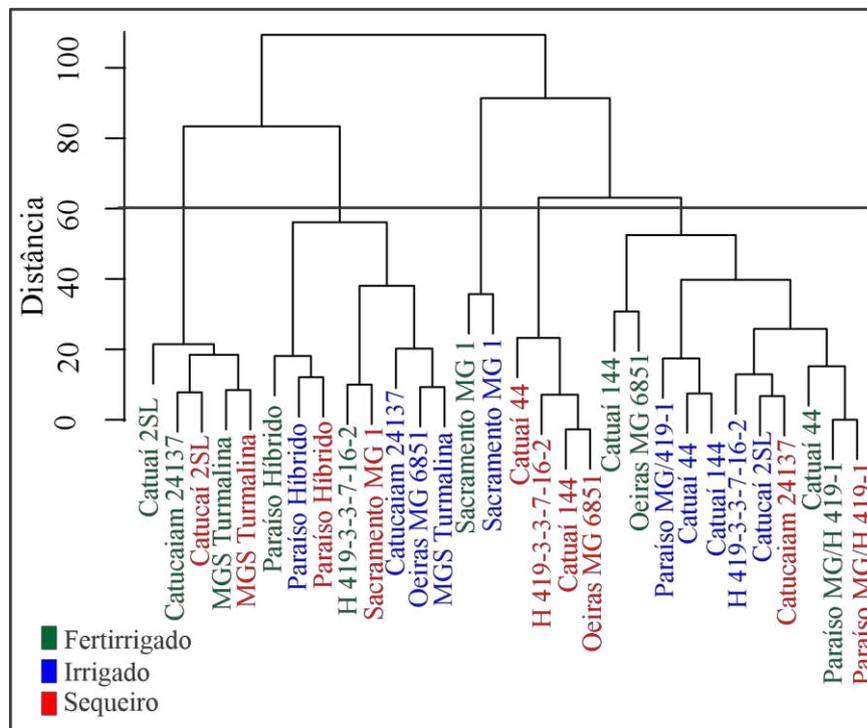


Figura 5. Agrupamento de genótipos de café Arábica quanto ao crescimento do ramo ortotrópico, número de folhas ano agrícola, crescimento do ramo plagiotrópico, número de frutos ano agrícola, número de folhas e produtividade em ambientes fertirrigado, irrigado e sequeiro para o ano agrícola de 2020-2021, segundo o método de agrupamento do vizinho mais distante, com base na distância de Mahalanobis.

Ressalta-se que dos cinco grupos formados, três não tiveram a presença dos genótipos do grupo Catuaí (Figura 5). O primeiro grupo foi formado pelos genótipos Catucaí Amarelo 2SL, Catucaiam 24137 e MGS Turmalina no regime fertirrigado, bem como pelos genótipos Catucaí Amarelo 2SL e MGS Turmalina no regime sequeiro. O segundo grupo foi formado pelos genótipos Paraíso Híbrido nos três regimes hídricos estudados, bem como pelos genótipos Catucaiam 24137, Oeiras MG 6851 e MGS Turmalina no regime irrigado, Sacramento MG 1

no regime sequeiro e H 419-3-3-7-16-2 no regime fertirrigado. Já o terceiro grupo que não teve a presença dos genótipos Catuaí foi formado pelo genótipo Sacramento MG 1 nos regimes Fertirrigado e irrigado. Ressalta-se que grande parte dos genótipos que compuseram esses três grupos estão associados as maiores produtividades para a safra em questão (Tabela 4).

Dos cinco grupos que foram formados apenas um foi composto exclusivamente por genótipos em um mesmo regime hídrico, sendo esse formado pelos genótipos Catuaí Vermelho IAC 44, H 419-3-3-7-16-2, Catuaí Vermelho IAC 144 e Oeiras MG 6851 todos no regime sequeiro. Os demais genótipos em estudo situaram-se no quinto e maior grupo plotado (Figura 5).

Para o ano agrícola de 2021-2022 (Figura 6), percebe-se a formação de apenas quatro grupos de genótipos para os regimes hídricos estudados. O primeiro grupo foi composto pelos genótipos MGS Turmalina nos três regimes hídricos, bem como pelo Sacramento MG 1 e Paraíso MG H419-1, no regime sequeiro, genótipos os quais apresentaram as maiores produtividades médias para o ano agrícola de 2021-2022 (Tabela 3).

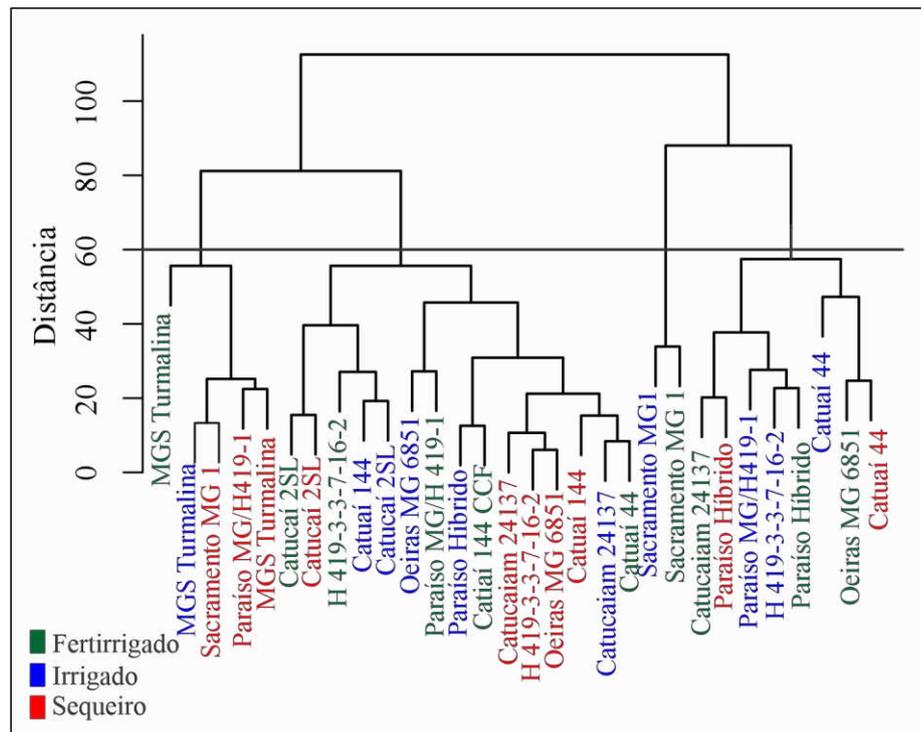


Figura 6. Agrupamento de genótipos de café Arábica quanto ao crescimento do ramo ortotrópico, número de folhas ano agrícola, crescimento do ramo plagiotrópico, número de frutos ano agrícola, número de folhas e produtividade em ambientes fertirrigado, irrigado e sequeiro para o ano agrícola de 2021-2022, segundo o método de agrupamento do vizinho mais distante, com base na distância de Mahalanobis.

O segundo grupo, assim como observado para o ano agrícola de 2020-2021 (Figura 5), foi formado pela cultivar Sacramento MG 1 no regime Irrigado e Sequeiro. O terceiro grupo foi composto pelos genótipos Catuaí Vermelho IAC 44 e Paraíso Híbrido no regime sequeiro,

Catucaiam 24137, Paraíso Híbrido e Oeiras no regime fertirrigado e pelos genótipos Catuaí Vermelho IAC 44, H 419-3-3-7-16-2, Paraíso MG/H419-1 no regime irrigado. O último e maior grupo foi composto pelos demais genótipos e regimes hídricos estudados.

Analisando a dissimilaridade dos genótipos em estudos em função da produção média dos anos agrícolas de 2021 e 2022 considerando o método do vizinho mais distante e a métrica de Mahalanobis (Figura 7), percebe-se a ocorrência de três grupos de genótipos.

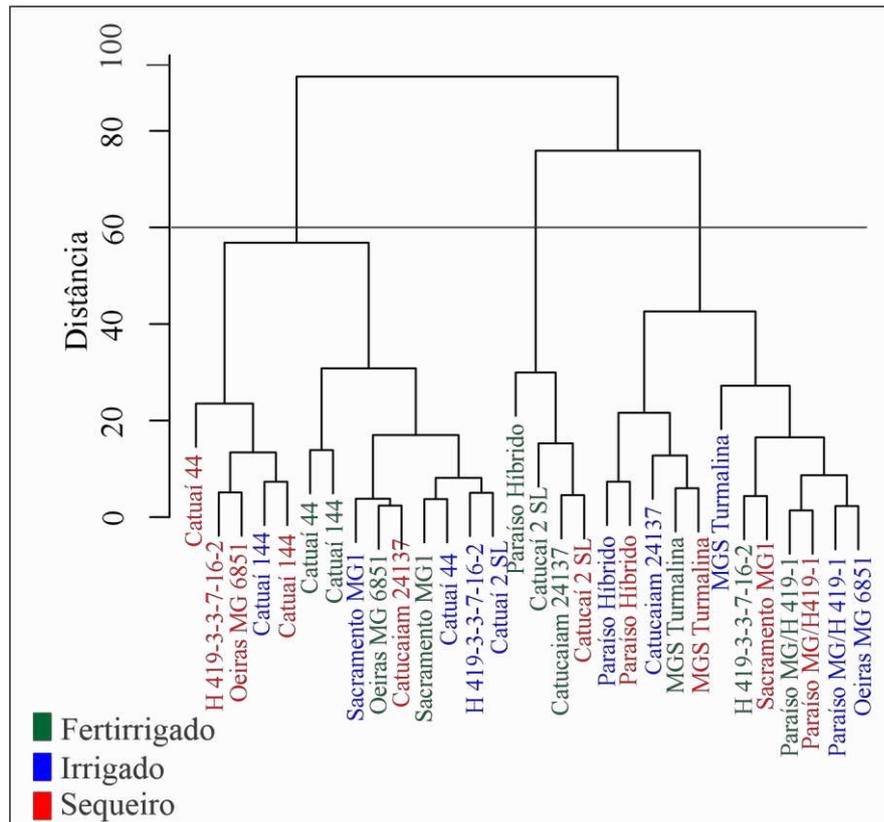


Figura 7. Agrupamento de genótipos de café Arábica referente a produção média dos anos agrícolas 2020-2021 e 2021-2022 nos ambientes fertirrigado, irrigado e sequeiro, segundo o método de agrupamento do vizinho mais distante, com base na distância de Mahalanobis.

O primeiro grupo de genótipos foi composto pelo Catuaí Vermelho IAC 144 e Catuaí Vermelho IAC 44 em todos os regimes estudados, Catuaí Amarelo 2SL no regime irrigado, Catucaiam 24137 no regime sequeiro, Sacramento MG1 nos regimes irrigado e fertirrigado, H419-3-3-7-16-2 nos regimes sequeiro e irrigado, bem como o Oeiras MG 6851 nos regimes sequeiro e fertirrigado (Figura 7). O Segundo grupo foi composto pelos genótipos MGS Turmalina no regime sequeiro, bem como pelos genótipos Paraíso Híbrido, Catucaí 2SL e Catucaiam 24137 no regime fertirrigado. Por fim, o terceiro grupo foi composto pelos demais genótipos e regimes hídricos em estudo (Figura 7).

4. DISCUSSÃO

Percebe-se que os genótipos de cafeeiro em estudo apresentaram uma grande variabilidade fenotípica para as características de crescimento dos ramos plagiotrópicos e ortotrópicos, independentemente do regime hídrico estudado (Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Figura 4). Variabilidade entre genótipos de cafeeiro tem sido amplamente relatado para biometria de ramos produtivos (RODRIGUES et al.; 2014; RODRIGUES et al.; 2016; RODRIGUES et al.; 2017) COLODETTI et al.; 2020), tolerância a seca (DIAS et al.; 2007; DaMATTA et al.; 2018; GAMAR et al.; 2019; RIBEIRO et al.; 2019; ÁVILA et al.; 2020; DUBBERTEIN et al.; 2020), qualidade sensorial da bebida (SOBREIRA et al.; 2016; BARBOSA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b) e rendimento da cultura (RODRIGUES et al.; 2017; COLODETTI et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; RODRIGUES et al.; 2014), demonstrando que de fato existe uma tendência para respostas diferenciadas em virtude das diferentes características que são estudados.

O fornecimento de irrigação e fertirrigação favoreceu a expressão de maior variabilidade para os genótipos em estudo (Figura 4). Conforme destacado por Rodrigues et al. (2017), a irrigação de plantas de café cultivadas em altitude de transição pode funcionar como um amortecedor para atenuar o efeito negativo que o ambiente exerce sobre as características genéticas da planta, alterando assim, a expressão fenotípica das características de crescimento.

Corroborando com tal informação, Ferreira et al. (2021a) destacam que genótipos oriundos de pais semelhantes cultivados em altitude de transição apresentaram maior variabilidade fenotípica quando cultivados em condição irrigada, demonstrando que o sucesso dos cultivos de cafeeiro em altitude de transição é fortemente dependente do binômio genótipo, regime hídrico.

Percebe-se que o componente genético do cafeeiro é fundamental para o cultivo em altitude de transição (RODRIGUES et al.; 2017), principalmente quando se considera a condição fenológica da planta de café. Fenologicamente sabe-se que as plantas de cafeeiro Arábica apresentam o crescimento das gemas reprodutivas (drenos) juntamente com o período de crescimento das gemas vegetativas (fontes), resultando muitas vezes em bienalidades acentuadas na produção (CAMARGO e CAMARGO, 2001; FERRÃO et al.; 2017). Em anos de altas produtividades as plantas tendem a favorecer o estabelecimento dos frutos, reduzindo assim a taxa de crescimentos dos ramos (DaMATTA al.; 2004; FERRÃO et al.; 2017). Neste

trabalho essa ocorrência é notada quando analisado o crescimento dos ramos plagiotrópico nos anos agrícolas de 2020-2021 e 2021-2022 (Tabela 3).

Destaca-se ainda, que apenas o genótipo Catucaí Amarelo 2SL no ano agrícola de 2020-2021 teve o crescimento do ramo plagiotrópico, no regime sequeiro, superior ao dos regimes irrigado e fertirrigado (Tabela 3). Genótipos tolerantes a condições adversas do ambiente normalmente apresentam mecanismos capazes de reduzir a condutância estomática, bem como desencadeiam a síntese de moléculas antioxidantes (DIAS et al.; 2007; MARTINS et al.; 2020; DUBBERTEIN et al.; 2020). Ademais, pode-se pressupor que o Catucaí Amarelo 2SL possivelmente apresente pelo menos um destes mecanismos que lhe proporcionou crescimento vegetativo superior aos demais regimes hídricos estudados no regime de sequeiro

Considerando que para o período em estudo o efeito nocivo da condição climática da região de altitude de transição foi mais expressivo pela temperatura supra ótima em comparação à disponibilidade hídrica (Figura 2), pode-se presumir que grande parte dos genótipos em estudo apresentaram algum mecanismo que lhe possibilitou tolerar o efeito adverso da temperatura (Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Figura 4).

Ressalta-se que, genótipos modernos de cafeeiro (como os do grupo Catucaí, Paraíso, Oeiras MG 6851 e Sacramento MG1 estudados neste trabalho), tendem a apresentar mecanismo que proporciona a manutenção da atividade fotossintética quando a planta é submetida a temperaturas mais elevadas (DIAS et al.; 2007; MARTINS et al.; 2019; DaMATTA et al.; 2018; DUBBERTEIN et al.; 2020). Em estudo conduzido por DaMatta et al. (2018), os autores demonstraram que a atividade fotossintética de genótipos de cafeeiros tolerantes a ferrugem do cafeeiro (*Hemileia vastratix*), se manteve em bom desempenho até a temperatura de 37°C. Tal fenômeno pode ser atribuído à maior expressão do sistema antioxidante, do controle enzimático e não enzimático que sequestram as espécies reativas de oxigênio já produzidas e ao ajuste do perfil lipídico das membranas do cloroplasto das plantas (MARTINS et al.; 2019; RODRIGUES et al.; 2021; SCOTTI et al.; 2019; MOAT et al.; 2017).

Ademais, fica evidente que a seleção de materiais genéticos que carreguem genes capazes de proporcionar maior tolerância aos estresses abióticos oriundos da mudança climática global surge como ferramenta promissora para os cultivos de cafeeiros em regiões consideradas restritivas ou de transição ao cultivo do cafeeiro Arábica (DUBBERTEIN et al.; 2020; RODRIGUES et al.; 2021; MARQUES et al.; 2021).

Percebe-se por meio da análise da produtividade que os genótipos apresentaram produtividades diferenciadas quando cultivados nos regimes irrigado, sequeiro e fertirrigado independente da safra (Tabela 4 e Tabela 5). Ressalta-se que, como anteriormente visto, quando

as plantas são cultivadas fora de suas zona de transição o investimento em mecanismos para tolerar as condições adversas, como redução da transpiração, reforço do sistema antioxidante, maior eficiência do sistema radicular, entre outros podem proporcionar uma redução consideradas em termos de qualidade e de produtividade ao cafeeiro (RODRIGUES et al.; 2017; DUBBERTEIN et al.; 2020; RODRIGUES et al.; 2021; MARQUES et al.; 2021; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b; COLODETTI et al.; 2020).

Desta forma, a escolha de genótipos recentes, que foram melhorados com a proposta de suportar melhor as condições de estresses abióticos e bióticos, tendem a ser favoráveis para o sucesso da cafeicultura em altitude de transição (SOBREIRA et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2021a; BARBOSA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2020; DUBBERTEIN et al.; 2020; RODRIGUES et al.; 2021). Esse fato pode ser observado neste estudo, tendo em vista que os genótipos do grupo Paraíso e do grupo Catuaí foram os que situaram entre os que apresentaram as maiores produtividade médias para ambos os anos estudados (Tabela 4).

Destaca-se que os genótipos do grupo Catuaí embora tenham alcançado boas produtividade médias para o ano de 2021 (95 e 82 sacas por hectare para os genótipos Catuaí SFC e Catuaí CCF respectivamente), apresentaram uma redução de 91, 57% da produtividade para o Catuaí Vermelho IAC 44 e de 93,90% da produtividade para o Catuaí Vermelho IAC 144 em relação aos anos de 2021 e 2022. Ademais, é importante ressaltar que, mesmo apresentando acentuada bienalidade produtiva cerca de 50% dos plantios de cafeeiro no Brasil são feitos com as cultivares do grupo Mundo Novo e cultivares do grupo Catuaí (BARBOSA et al.; 2020). Embora sejam muito plantadas, esses genótipos não apresentam genes de resistência a ferrugem do cafeeiro (BARBOSA et al.; 2020), sendo este, um dos motivos da acentuada bienalidade para a cultura do cafeeiro Arábica (SILVA e MAZZAFERA, 2008; RODRIGUES et al.; 2013; ANDRADE et al.; 2022).

Pela análise do dendrograma hierárquico para o ano agrícola de 2020-2021 (Figura 5), três dos cinco grupos formados não contaram com a presença de genótipos do grupo Catuaí, concomitantemente, percebe-se que os genótipos presentes nestes três grupos foram os que apresentaram as maiores produtividades para os seus respectivos regimes hídricos em estudo (Tabela 4), justificando a premissa de que, materiais genéticos mais antigos são menos favoráveis para a produção em altitude de transição (FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b)

Observa-se pela análise da relação entre frutos e folhas que os genótipos do grupo Catuaí apresentaram uma maior relação entre frutos e folhas para o ano de 2021, demonstrando que de

fato, ocorreu uma desfolha, possivelmente em virtude da ação da ferrugem do cafeeiro nestes genótipos, dado que em anos de altas safras o fruto constitui-se em dreno prioritário.

Conforme destacado por DaMatta et al. (2018), a maioria das cultivares de cafeeiro modernas registradas atualmente, tem potencial para tolerar pequenos intervalos de estresses abióticos. Esse fato se deve, principalmente, aos esforços que os programas de melhoramento genético do cafeeiro têm para o desenvolvimento de cultivares adaptadas às condições adversas do clima (DUBBERTEIN et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; MARQUES et al.; 2021).

Progênies que apresentam ancestrais oriundos de cruzamentos espontâneos ou hibridação com o *Coffea canephora* tem se destacado dentre os materiais com capacidade de suportar eventos de estresse abiótico em regiões restritivas ao cultivo do cafeeiro Arábica (DUBBERTEIN et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; MARQUES et al.; 2021). Em trabalho conduzido por Marques et al. (2021), estudando a proteômica para revelar respostas antioxidantes à seca em cafeeiro Arábica e conilon, foi descrita a boa resposta do genótipo Icatu (oriundo do cruzamento entre *Coffea arabica* e *Coffea canephora*) em suportar níveis mais severos de déficit hídrico. Em outro estudo utilizando o genótipo Icatu, Dubberteín et al. (2020), destacaram que o material apresentou boa recuperação ao efeito do estresse simultâneo de seca e temperatura, demonstrando a potencialidade deste material para o cultivo em condições marginais, bem como seu potencial como acesso para programas de melhoramento genético.

Dentre os genótipos de cafés Arábica em estudo o MGS Turmalina e Paraíso Híbrido que possuem como ancestral o Híbrido Timor, que se originou por cruzamento natural em *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* (SAKIYAMA et al.; 2015; PELEGRINI et al.; 2021), apresentaram produtividade média superior a 80 sacas por hectare para as duas safras em estudo (Tabela 5).

Destaca-se ainda, que tão importante quanto apresentar altas produtividade é apresentar boa estabilidade produtiva. Genótipos que apresentam uma maior estabilidade produtiva são desejados pelos produtores, dado que, muitas vezes os cafeeiros são produzidos em padrão de monoculturas, sendo que a produção do ano é única fonte de renda dos produtores. Neste sentido, mesmo tendo apresentado altas produtividade no ano de 2021 (superiores a 70 sc/ha), os genótipos do grupo Catuaí e do grupo Catucaí apresentaram acentuadas reduções de produtividade entre as colheitas, sendo menos favoráveis para pequenas propriedades em altitude de transição.

Por outro lado, é possível notar que genótipos melhorados, como o MGS Turmalina, Paraíso Híbrido, Paraíso MG H419-1 apresentaram uma maior estabilidade de produção entre os anos consecutivos (Tabela 4, Figura 7), demonstrando o seu potencial de adaptação a

estresses bióticos e abióticos, bem como a sua potencialidade para produção de cafés em quantidade e estabilidade entre as safras (SOUZA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2020, FERREIRA et al.; 2021a).

Percebe-se ainda pela análise de componentes principais (Figura 4) e pelo agrupamento hierárquico (Figura 5, Figura 6 e Figura 7), que os genótipos apresentaram grande variabilidade fenotípica para os caracteres de crescimento e produtividade, demonstrando que, assim como apresentado na literatura, o desempenho dos cultivares de cafeeiro Arábica principalmente em condição restritivas são fortemente afetados pelo manejo que a cultura recebe (PEZZOPANE et al.; 2009; RODRIGUES et al.; 2014; ZAIDAN et al.; 2017; CALDAS et al.; 2018; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b).

Também é possível contatar pela análise dos agrupamentos hierárquicos (Figura 5, Figura 6 e Figura 7) em conjunto com a análise de componentes principais (Figura 4) que os genótipos Sacramento MG1 e MGS Turmalina apresentam grande capacidade de serem indicados como possíveis genitores para o desenvolvimento de materiais genéticos com alto potencial biométrico e produtivo para o ambiente sequeiro. Essa informação é possível pelo fato de que ambos os genótipos apresentarem forte associação com a produtividade e estão dispostos em grupos diferentes (para quase todos os regimes hídricos em estudo), indicando complementaridade entre as cultivares (CRUZ et al. 2015; PEREIRA et al. 2013).

Nos regimes irrigados e fertirrigado em função boa associação entre os genótipos com as características produtivas e em virtude do efeito de complementariedade (CRUZ et al. 2015; PEREIRA et al. 2013), os mais indicados são o MGS Turmalina, e Paraíso Híbrido no regime fertirrigado e Paraíso Híbrido, Catucaí 24-137, MGS Turmalina e Oeiras MG 6851 no regime irrigado. Esse fato indica a possibilidade de obter gerações avançadas de linhagens futuras, superiores para as características de produtividade em altitude de transição (CRUZ et al. 2015; PEREIRA et al. 2013).

5. CONCLUSÕES

Existe grande variabilidade fenotípica para as características de morfologia dos ramos e produtividade para os diferentes regimes hídricos e genótipos em estudo, demonstrando que o desempenho dos cultivares de cafeeiro Arábica principalmente em condições restritivas são fortemente afetados pelo manejo que a cultura recebe.

Genótipos mais modernos apresentaram maior estabilidade produtiva entre as safras de 2021 e 2022 em altitude de transição, apresentando menor efeito da bienalidade de produção

entre as safras, enquanto os genótipos do grupo Catuaí apresentaram redução de produtividade entre as safras em estudo.

O crescimento e produtividade de genótipos de cafeeiro Arábica em altitude de transição é viável, desde que se escolha a combinação adequada entre genótipos e regimes hídricos.

Os genótipos Sacramento MG1 e MGS Turmalina apresentam no regime sequeiro, MGS Turmalina, e Paraíso Híbrido no regime fertirrigado e Paraíso Híbrido, Catucaí 24-137 MGS Turmalina e Oeiras MG 6851 no regime irrigado apresentam grande capacidade de serem indicados como possíveis genitores para o desenvolvimento de materiais genéticos com alto potencial biométrico e produtivo para condição de cultivo de cafeeiro Arábica em altitude de transição.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, W.L.; ÁVILA, R.T.; MOLINA, J.P.P.; BARBOSA, M.L.; MARÇAL, D.M.S.; SOUZA, R.P.B.; MARTINO, P.B.; CARDOSO, A.A.; MARTINS, S.C.V.; DaMATTa, F.M. The interplay between irrigation and fruiting on branch growth and mortality, gas exchange and water relations of coffee trees. **Tree Physiology**. V.41, n.1, p. 35-49. 2021.

ANDRADE, L.I.F.; LINHARES, P.C.A.; FONSECA, T.M.; SILVA, A.A.; SANTOS, L.P.; PEREIRA, M.P.; SILVA, V.A.; RIBEIRO, P.E. Photosynthetic efficiency and root plasticity promote drought tolerance in coffee genotypes. **Acta Physiologiae Plantarum**. V.44, n.109, 2022.

AVILA, R.T.; ALMEIDA, W.L.; COSTA, L.C.; MACHADO, K.L.G.; BARBOSA, M.L.; SOUZA, R.P.B.; MARTINO, P.B.; JUÁREZ, M.A.T.; MARÇAL, D.M.S.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO, J.D.C.; DaMATTa, F.M. Elevated air [CO₂] improves photosynthetic performance and alters biomass accumulation and partitioning in drought-stressed coffee plants. **Environmental and Experimental Botany**. V.177, n.104137. 2020A.

BARBOSA, I. P.; COSTA W. G.; NASCIMENTO M.; CRUZ C. D.; OLIVEIRA A. C. B. Recommendation of *Coffea arabica* genotypes by factor analysis. **Euphytica**, v. 215, n.178, p.1-10. 2019.

BARBOSA, I.P.; De OLIVEIRA, A.C.B.; ROSADO, R.D.S.; SAKIYAMA, N.S.; CRUZ, C.D.; OEREIRA, A.A. Sensory analysis of arabica coffee: cultivars of rust resistance with potential for the specialty coffee market. **Euphytica**, v. 216, p. 165, 2020.

CALDAS, A.L.D.; LIMA, E.M.C.; REZENDE, F.C.; FARIA, M.A.; DIOTTO, A.V.; LEITE JUNIOR, M.C.R. Produtividade e qualidade de café cv. Travessia em resposta à irrigação e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.12, n.1, p. 2357- 365, 2018.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro Arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, v.60 n.1, p.65-68, 2001.

COLODETTI, T.V.; RODRIGUES, W.N.; CAVATTE, P.C.; REIS, E.F.; VERDIN FILHO, A.C.; BRINATE, S.V.B.; MARTINS, L.D.; CHRISTO, B.F.; ANDRADE JUNIOR, S.; TOMAZ, M.A. Managing the number of orthotropic stems in *Coffea arabica* as strategy for cultivation at low-altitude regions. **Australian Journal of Crop Science**. V.10, n.03, p.447-454. 2020.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira de café, primeiro levantamento/ janeiro 2023**. Brasília, v. 10, n. 1, p.1-42. 2023.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2°ed. Viçosa: UFV, Imprensa universitária, 2015. v.1. 520p.

DaMATTA F.M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**. V.83, n.2-3, p. 99-114. 2004.

DaMATTA, F.M.; ÁVILA, R.T.; CARDOSO, A.A.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO, J.C. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. V.66, n.21, p.1883. 2018.

DIAS, P.C.; ARAUJO, W.L.; MORAES, G.A.B.K.; BARROS, R.S.; DaMATTA, F.M. Morphological and physiological responses of two coffee progenies to soil water availability. **Journal of Plant Physiology**. V.164, n.12, p.1639-1647. 2007.

DUBBERTEIN, D.; LIDON, F.C.; RODRIGUES, A.P.; SEMEDO, J.N.; MARQUES, I.; RODRIGUES, W.P.; GOUVEA, D.; ARMENGAUD J.; SEMEDO, M.C.; MARTINS, S.; COSTA, M.C.S.; MOURA, I.; PAIS, I.P.; CAMPOS, O.S.; PARTELLI, F.L.; CAMPOSTRINI, E.; BARROS, A.I.R.; DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C. Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea spp.* to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses. **Frontiers in Plant Science**. V.11, p.1049. 2020.

FERRÃO, M.A.G.; FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; VERDIN FILHO, A.C.; VOLPI, P.S. Origem, Dispersão Geográfica, Taxonomia e Diversidade Genética de *Coffea canephora*. IN: FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; MUNER, L.H. **Café Conilon**. Vitoria-ES, editoria INCAPER, 2 ed. 786p. 2017.

FERREIRA, D.F. **Estatística Multivariada**, 3ºed, Editora UFLA, 2018. p.642.

FERREIRA, D.S.; AMARAL, J.F.T; PERERIRA, L.L.; FERREIRA, J.M.S.F.; GUARÇONI, R.C.; MOREIRA, T.R.; OLIVEIRA, A.C.; RODRIGUES, W.N.; ALMEIDA, S.L.H.; RIBEIRO, W.R.; TOMAZ, M.A.; CASTANHEIRA, D.T.; LIMA FILHO, T. Physico-chemical and sensory interactions of arabica coffee genotypes in different water regimes. **The Journal of Agricultural Science**. V. 159, n.1-2, p.50-58. 2021.

FERREIRA, D.S.; CANAL, G.B.; NASCIMENTO, M.; NASCIMENTO, A.C.C.; FERREIRA, J.M.S.; AMARAL, J.F.T.; PEREIRA, L.L.; RODRIGUES, W.N.; RIBEIRO, W.R.; CASTANHEIRA, D.T.; TOMAZ, M.A. Exploring the multivariate technique in the discrimination of *Coffea arabica* L. cultivars regarding the production and quality of grains under the effect of water management. **Euphytica**. V.217, n.118. 2021a.

GAMAR, M.I.A.; KISIALA, A.; EMERY, R.J.N.; YEUNG, E.C.; STONE, S.L.; QADERI, M.M. Elevated carbon dioxide decreases the adverse effects of higher temperature and drought

stress by mitigating oxidative stress and improving water status in *Arabidopsis thaliana*. **Plant**. V.250, p.1191-1214. 2019.

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, DC Roberts, M. Tignor, ES Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. **Cambridge University Press**. Na Imprensa. 2022.

MARQUES, I.; FERNANDES, I.; DAVID, P.H.C.; PAULO, O.S.; GOULAO, L.F.; FORTUNATO, N.A.; LIDON, F.C.; DaMATTa, F.M.; RAMALHO, J.C.; BARROS, A.I.R. Transcriptomic leaf profiling reveals differential responses of the two most traded coffee species to elevated [CO₂]. **International Journal of Molecular Sciences**. V.21, n.23, p.9211. 2021.

MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; LIDON, F.C.; DaMATTa, F.M.; RAMALHO, J.C. Combined effects of elevated [CO₂] and high temperature on leaf mineral balance in *Coffea* spp. plants. **Climatic Change**. V.126, p.365-379. 2014.

MARTINS, S.C.V.; SANGLARD, M.L.; MORAIS, L.E.; MENEZES-SILVA, P.E.; MAURI, R.; AVILA, R.T.; VITAL, C.E.; CARDOSO, A.A.; DaMATTa, F.M. How do coffee trees deal with severe natural droughts? An analysis of hydraulic, diffusive and biochemical components at the leaf level. **Trees** v.33, p.1679–1693. 2019

MOAT, J.; WILLIAMS, J.; BAENA, S.; WILKINSON, T.; GOLE, T.W.; CHALLA, Z.K.; DEMISSESW, S.; DAVIS, A.P. Resilience potential of the Ethiopian coffee sector under climate change. **Nature Plants**. V.3, p.17081, 2017.

OLIVEIRA, R.R.; RIBEIRO, T.H.; CORDON, C.H.; FEDENIA, L.; MAIA, V.A.; BARBOSA, B.C.F.; CALDEIRA, C.F.; KLEIN, P.E.; CHALFUN JUNIOR, A. Elevated temperatures impose transcriptional constraints and elicit intraspecific differences between coffee genotypes. **Frontiers in Plant Science**. V.11, p.1113. 2020.

PELEGRINI, D.F.; SIMÕES, J.G.; SANTOS, S.R.C.; OLIVEIRA, P.; CARVALHO, G.A. Características agronômicas da cultivar Paraíso MG H419-1 e o controle da ferrugem do cafeeiro. **Agropecuária Técnica**, v. 42, n. 1-4, p. 1–8, 2021.

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

PEZZOPANE, G.C.; FAVARIN, J.C.; MALUF, M.P.; PEZZOPANE, J.C.M.; GUERREIRO, F.O. Atributos fenológicos e agronômicos em cultivares de cafeeiro Arábica. **Ciência Rural** v.39, n.3, p.711–717. 2009.

R Core Team. **R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.** 2022. Available online: <https://www.R-project.org> (accessed on 10 January 2022).

RAMALHO, J.C.; RODRIGUES, A.P.; LIDON, F.C.; MARQUES, L.M.C.; LEITÃO, A.E.; FORTUNATO, A.S.; PAIS, I.P.; SILVA, M.J.; CAMPOS, O.S.; LOPES, A.; REBOREDO, F.H.; BARROS, A.I.R. Stress cross-response of the antioxidative system promoted by superimposed drought and cold conditions in *Coffea spp.* **Plos One.** V.13, v.6, p.0198694. 2018.

RIBEIRO, W.R.; CAPELINI, V.A.; FERREIRA, D.S.; GONÇALVES, M.S.; Dos REIS, E.F. Crescimento do cafeeiro conilon cultivar “ES 8122-Jequitibá” em função da fração de água transpirável no solo. **IRRIGA**, v.24, n. 3 p.512-526, 2019.

RODRIGUES, A.M.; JORGE, T.; OSORIO, S.; POTT, D.M.; LIDON, F.C.; DaMATTA, F.M.; MARQUES, I.; BARROS, A.I.R.; RAMALHO, J.C.; ANTONIO, C. Primary metabolite profile changes in *Coffea spp.* promoted by single and combined exposure to drought and elevated CO₂ concentration. **Metabolites.** V.11, n.7, p.427. 2021.

RODRIGUES, R.R.; PIZETTA, S.C.; SILVA, N.K.C.; RIBEIRO, W.R.; REIS, E.F. Crescimento inicial de cafeeiro conilon sob déficit hídrico no solo. **Coffee Science**, v.11, n.1, p.33-38, 2016.

RODRIGUES, W.N.; TOMAZ, M.A.A.; AMARAL, J.F.T.; FERRAO, M.A.G.; COLODETTI, T.V.; APOSTOLICO, M.A.; CHRISTO, L.F. Biometrical studies on characteristics of plagiotropic branches in “*Coffea arabica*” L. cultivated with high plant density. **Australian Journal of Crop Science**, v.8, n.8, p.1239–1247. 2014.

RODRIGUES, W.N.; BRINATE, S.B.V.; MARTINS, L.D.; COLODETTI, T.V.; TOMAZ, M.A. Genetic variability and expression of agromorphological traits among genotypes of *Coffea arabica* being promoted by supplementary irrigation. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n.2, p.1-12. 2016.

RODRIGUES, W.N.; BRINATE, S.B.V.; MARTINS, L.D.; COLODETTI, T.V.; TOMAZ, M.A. Genetic variability and expression of agromorphological traits among genotypes of *Coffea arabica* being promoted by supplementary irrigation. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n.2, p.1-12. 2017.

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

SAKIYAMA, N.; MARTINEZ, H.E.P.; TOMAZ, M.A.; BOREM, A. **Café Arábica - do plantio à colheita**. 1ed.Viçosa: Editora UFV, 2015, v. 1, p. 64-103.

SCOTTI, P.C.; PAIS, I.P.; BARROS, A.I.R.; MARTINS, L.D.; TOMAZ, M.A.; RODRIGUES, W.P.; CAMPOSTRINI, E.; SEMEDO, J.N.; FORTUNATO, A.S.; MARTINS, M.Q.; PARTELLI, F.L.; LIDON, F.C.; DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C. Lipid profile adjustments may contribute to warming acclimation and to heat impact mitigation by elevated [CO₂] in *Coffea* spp. **Environmental and Experimental Botony**. V.167, n.103856. 2019.

SEMEDO, J.N., RODRIGUES, W.P.; DUBBERTEIN, D.; MARTINS, M.Q.; MARTINS, L.D.; PAIS, I.P.; RODRIGUES, A.P.; LEITÃO, A.E.; PARTELLI, F.L.; CAMPOSTRINI, E.; TOMAZ, M.A.; ROBOREDO, F.H.; CAMPOS, O.S.; BARROS, A.I.R.; LIDON, F.C.; DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C. **Coffee responses to drought, warming and high [CO₂]**

in a context of future climate change scenarios. In: Alves, F.; Leal Filho, W.; Azeiteiro, U. (eds) **Theory and Practice of Climate Adaptation.** Climate Change Management. Springer, Cham. 2018.

SILVA, E.A.; MAZZAFERA, P. Influence of Temperature and Water on Coffee Culture. **The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology.** V.2, n.2, p.32-41. 2008.

SOBREIRA, F.M.; OLIVEIRA, A.C.B.; PEREIRA, A.A.; GONÇALVES, M.A.; SAKIYAMA, N.S. Divergence among arabica coffee genotypes for sensory quality. **Australian J Crop Sci.** v.10 n.10 p. 1442–1448, 2016.

SOUZA B.P.; MARTINEZ, H.E.P.; CARVALHO, F.P.; LOUREIRO, M.E.; STURIAÑO, W.P. Gas exchanges and chlorophyll fluorescence of young coffee plants submitted to water and nitrogen stresses. **Journal of Plant Nutrition.** 43:16, 2455-2465, 2019.

VERDIN FILHO, A.C.; VOLPI, P.S.; FERRAO, M.A.G.; FERRAO, R.G.; MAURI, A.L.; FONSECA, A.F.A.; TRISTAO, F.A.; ANDRADE, S. New management technology for arabica coffee: the cyclic pruning program for arabica coffee. **Coffee Science**, v. 11, p. 475-483, 2016.

WANG, Q.L.; CHEN, J.H.; HE, N.Y.; GUO, F.Q. Metabolic Reprogramming in Chloroplasts under Heat Stress in Plants. **International Journal of Molecular Sciences.** V.19, n.3, p.848. 2018.

ZAIDAN, U.R.; CORRÊA, P.C.; FERREIRA, W.P.M.; CECON, P.R. Ambiente e Variedades influenciam a qualidade de cafés das Matas de Minas. **Coffee Science** v.12, n.2: p.240–247, 2017.

CAPÍTULO 2

Produção e qualidade sensorial de genótipos de *Coffea arabica* L. cultivados em diferentes regimes hídricos e em altitude de transição

Resumo

O mundo passa por mudanças climáticas significantes, que por ventura promovem danos severos à cafeicultura moderna, proporcionando mudanças nas matrizes de aptidão agroclimática para a cultura cafeeira. Deste modo, o plantio do café em regiões de altitude de transição surge como uma alternativa promissora para gerar diretrizes que podem mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Outrossim, o estudo abordou a análise de dez genótipos de *Coffea arabica* L. submetidos aos regimes sequeiro, irrigado e fertirrigado em região de altitude de transição para o cultivo do cafeeiro Arábica. O ensaio experimental foi realizado em delineamento em blocos casualizados no esquema de parcelas subdivididas, com três repetições. Os frutos do café foram colhidos com 70% a 80% de maturação e processados pela via úmida. Posteriormente, foram avaliadas as características sensoriais dos frutos do café. Mediante os resultados verificou-se que alta produtividade aliada a boa qualidade sensorial do café pode ser alcançada em cultivos em altitude de transição, desde que, se utilize a combinação correta entre genótipo e fornecimento de irrigação, e que genótipos modernos são aptos a tolerar os efeitos nocivos da temperatura em região de altitude de transição, bem como possíveis efeitos de variações agroclimáticas em região atualmente aptas ao cultivo do cafeeiro Arábica.

Palavras chaves: Cafés especiais; qualidade sensorial; mudanças climáticas;

1. INTRODUÇÃO

O agronegócio do café desempenha grande relevância econômica e social em todo mundo. A cultura encontra-se implantada em mais de 80 países, ocupando uma área de plantio superior a 11 milhões de hectares (DENOEUDE et al.; 2014; MOHANAN et al.; 2014), sendo que a bebida café se destaca como uma das mercadorias mais valiosas e mais consumidas em todo mundo (PETERSON et al.; 2014).

O gênero *Coffea*, possui mais de 100 espécies catalogadas, dentre elas a *Coffea arabica* (café Arábica) e a *Coffea canephora* (café Conilon ou café Robusta), se destacam como as mais plantadas e comercializadas (OIC, 2021). A espécie *C. canephora* é oriunda de regiões mais

baixas e quentes do Congo, enquanto que a *C. arabica* tem sua origem nas encostas mais altas e frias da Etiópia (FERRÃO et al.; 2017). Deste modo, conforme destacado por Camargo (2010), Luppi et al. (2014) e Bragança et al. (2016) o cafeeiro Arábica apresenta bom desempenho quando plantado entre 600 e 1200 metros de altitude em relação ao nível médio dos mares. Além disso exige temperaturas médias anuais entre 18 e 22°C baixa restrição hídrica e precipitação de 1200 mm bem distribuída ao longo do ano.

Embora o cafeeiro Arábica tenha melhor desenvolvimento em regiões com menos restrições térmicas e hídricas, condições prevalentes muitas das vezes em regiões de maiores altitudes (CAMARGO, 2010; LUPPI et al.; 2014), seu plantio pode ocorrer em regiões de altitude mais baixa, as denominadas zonas restritivas ou de altitudes de transição (BRAGANÇA et al.; 2016; COLODETTI et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b).

Desta forma, o desenvolvimento de pesquisas que objetivam atender tanto os produtores, que atualmente cultivam suas lavouras de café em região de transição, como gerar diretrizes para mitigar os efeitos das variações climáticas em regiões que, em virtude da modificação climática podem se tornar restritivas ou de transição, são fundamentais para a cafeicultura moderna (COLODETTI et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b).

A qualidade sensorial do café é oriunda da interação entre o genótipo, o ambiente de cultivo e o tipo de processamento pós colheita do café (BARBOSA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2020; BRIOSCHI JUNIOR et al.; 2021; FERREIRA et al.; 2021a; GOMES et al.; 2022; FERREIRA et al.; 2022), de modo que, a importância do componente genético para que se obtenham ganhos de qualidade sensorial da bebida café é evidente. Conforme destacado por Barbosa et al. (2019), os programas de melhoramento genético de plantas surgem como ferramenta promissora para o desenvolvimento de cultivares que sejam capazes de manter altas produtividades e boa qualidade de bebida nas diferentes regiões produtoras.

Outrossim, o objetivo deste estudo consiste em avaliar o comportamento fenotípico de genótipos de café Arábica em relação à produtividade e à qualidade sensorial dos grãos. Essas análises podem fornecer orientações para a produção de café em regiões de altitude de transição, capazes de enfrentar os desafios impostos pelas variações agroclimáticas globais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.Época e local de estudo

O estudo foi realizado nos anos de 2021 e 2022, no distrito de Lagoa Seca, Alegre, Espírito Santo, Brasil (20° 52' 07" S e 41° 28' 43" W). A região, possui altitude de 640 m e está localizada na zona de transição entre o cultivo de cafeeiro Arábica (*Coffea arabica* L.) e do cafeeiro Conilon (*Coffea canephora* Pierre) (BRAGANÇA et al.; 2016). No período compreendido entre os meses de novembro de 2020 e maio de 2023 a precipitação média anual foi de 1350,92 mm e temperatura média anual de 24,18°C (Figura 1).

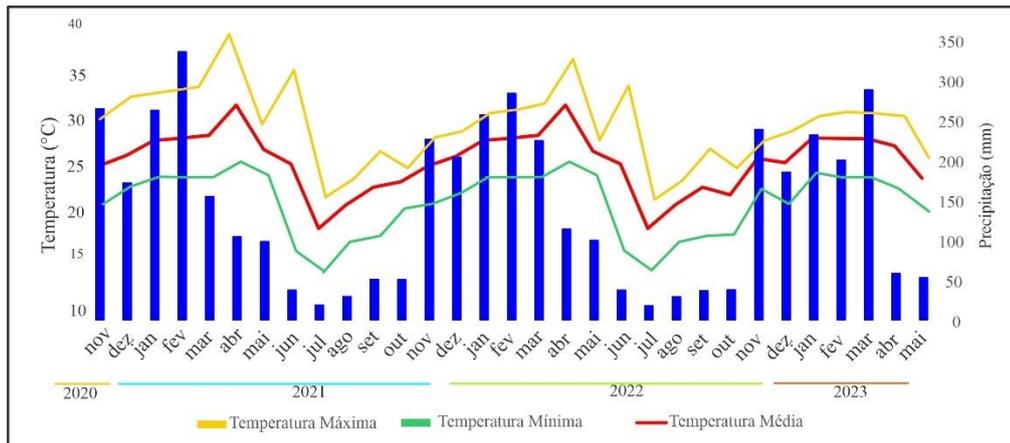


Figura 0:1. Temperatura máxima, mínima e média e precipitação mensais da região do estudo para o período de novembro de 2020 e maio de 2023.

2.2. Tratamentos e delineamento experimental

O experimento foi instalado em propriedade particular, em lavoura plantada no ano de 2012 no espaçamento de 2,5 m x 0,8 m, totalizando uma população de 5000 plantas por hectare. Dez genótipos de *Coffea arabica* L. constituíram as parcelas, sendo eles: Paraíso MG/H 419-1; Paraíso H 419-3-3-7-16-2; MGS Turmalina e o Paraíso Híbrido, Catuaí Vermelho IAC 44 e Catuaí Vermelho IAC 144, Catucaim 24137 e Catucaí 2-SL, Sacramento MG1 e Oeiras MG-6851. Esses materiais genéticos foram escolhidos em virtude de seu caráter produtivo, porte baixo e por serem potencialmente favoráveis para plantios na região em estudo (RODRIGUES et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2021a).

O experimento foi estabelecido em Delineamento de Blocos Casualizados (DBC) em esquema de parcelas subdivididas, com dez genótipos de cafeeiro Arábica (considerados no estudo como parcelas) e três regimes hídricos (considerados como subparcelas), com três repetições, de modo que cada unidade experimental foi composta por três plantas.

2.3. Práticas agrônomicas e condução do experimento

O fornecimento de água foi realizado por meio de três regimes hídricos. O primeiro regime hídrico caracterizou-se pela condução das plantas sem irrigação (sequeiro), com entrada

de água somente em função da ocorrência de precipitação no local, sendo monitorado por uma estação meteorológica automática modelo Irriplus E 3000. O segundo (irrigado), foi caracterizado pelo fornecimento de água por irrigação com uso do sistema de gotejamento. Já o terceiro regime hídrico avaliado (fertirrigado), foi caracterizado pelo fornecimento da água acrescida de fertilizantes minerais, também com o uso do sistema de gotejamento.

Tanto no regime irrigado quanto no fertirrigado foram feitos monitoramentos diários da tensão de água do solo com auxílio de tensiômetros instalados na lavoura. A determinação da tensão adequada para a irrigação foi obtida por meio da curva de retenção de água do solo gerada pelos pontos referentes às tensões de 10 kPa; 30 kPa; 60 kPa; 100 kPa; 300 kPa e 1500 kPa. Destaca-se que os pontos referentes à capacidade de campo (CC) e ao ponto de murcha permanente (PMP) foram de 0,2308 m³/m³ e 0,1561 m³/m³, respectivamente. Assim, a irrigação do sistema irrigado e fertirrigado era realizada sempre que a umidade se situava entre 70% a 80% da capacidade de retenção de água disponível no solo.

A recomendação da adubação foi feita conforme Martinez e Neves (2015). Para tanto, padronizaram-se as doses de nutrientes a serem fornecidas para as plantas em todos os regimes hídricos estudados, variando apenas o número de eventos de adubações durante o ano. Deste modo, tanto para o tratamento sequeiro quanto para o irrigado a adubação foi realizada a lanço em quatro aplicações entre os meses de outubro e março, enquanto para o tratamento fertirrigado a adubação foi feita juntamente com a água em 12 parcelamentos realizados no mesmo período, e em intervalos de 15 dias entre as aplicações.

As plantas de café da lavoura onde foi instalado o experimento, haviam sido recepadas no ano de 2018 e, posteriormente, conduzidas sob o manejo de poda programada de ciclo para o cafeeiro Arábica (PPCA), conforme proposto por Verdin Filho et al. (2016) sendo recomendada entre 10.000 e 12.000 hastes ortotrópicas por hectare.

Anualmente, logo após a colheita, realizou-se a eliminação dos ramos plagiotrópicos que apresentavam 70% ou mais de sua capacidade produtiva esgotadas, conforme preconiza a PPCA. Também foi realizada a desbrota dos ramos ortotrópicos não selecionados que porventura brotaram (VERDIN FILHO et al.; 2016).

As demais práticas agronômicas (controle de plantas daninhas, calagem, controle de pragas e doenças) foram conduzidas conforme a necessidade da lavoura e de acordo com a análise química do solo, seguindo as recomendações para o cultivo do cafeeiro Arábica no Brasil propostas por Sakiyama et al. (2015).

2.4. Colheita e pós colheita dos frutos.

A colheita dos frutos a cada ano foi padronizada de modo que a atividade tinha início somente quando pelo menos 70% dos frutos da planta atingiam o estágio cereja. No momento da colheita, com o uso de um recipiente graduado, foi determinado o volume de frutos produzidos em cada unidade experimental. Uma amostra de frutos de cada unidade experimental com volume conhecido foi coletada. Posteriormente foi estimada a relação entre a massa de café “cereja” da amostra e a massa de café beneficiado resultante desta mesma amostra. Essa relação foi aplicada ao do volume de café colhido da parcela e de posse da população de plantas estimou-se a produtividade em sacas por hectare.

Imediatamente após a colheita, 5 litros de frutos de café cereja de cada unidade experimental foram encaminhados para a unidade de beneficiamento localizada no Laboratório de Análise e Pesquisa do Café – LAPC do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Campus Venda Nova do Imigrante.

No LAPC, procedeu-se a separação dos frutos que boiavam (secos, brocados, imaturos e malformados), dos frutos cerejas e frutos verdes. Após a lavagem, procedeu-se a separação do exocarpo dos frutos do endocarpo e endosperma, com auxílio do equipamento BLASI-10 (descascador de café), da marca Blasi©, produzindo assim o café conhecido como cereja descascado.

As cerejas descascadas foram submetidas ao processo de secagem ao sol em terreiro suspenso e coberto. Os cafés foram secos até atingirem aproximadamente 12% de umidade (base úmida) por um período que variou de 15 a 20 dias. No período de secagem a temperatura foi monitorada pelo sistema Arduino Uno R3—Bluetooth Module Hc-06 Rs232—Humidity and Temperature Sensor Dht22 Am2302—SD Card Module, sendo que a temperatura média foi de 19,33 °C, com máxima de 27,75 °C (dia) e mínima de 13,00 °C (noite). Os grãos secos foram beneficiados removendo-se o endocarpo (pergaminho) do endosperma.

2.5. Torra e análise sensorial do cafeeiro

Após o beneficiamento dos grãos ainda no LAPC, as amostras foram submetidas ao procedimento de torra. A torra foi realizada com o auxílio do torrador Probatino da Probat© com conjunto de discos Agrtron-SCAA, sendo que o ponto de torra das amostras ficou entre as cores determinadas pelos discos #75 e #45 para cafés especiais (SCA, 2013)

A torra foi realizada com um período de 24 horas de antecedência da análise sensorial e a moagem respeitou o tempo de descanso de 8 h após a torra. Todas as amostras foram torradas entre 8,5 min e 12 min e, com temperatura inicial de 160 °C e temperatura final de torrefação de 192 °C. Após torrefação e resfriamento, as amostras permaneceram lacradas, conforme metodologia de análise sensorial estabelecida pela Associação de Cafés Especiais (SCA, 2013).

Os grãos de café torrado foram moídos em moinho elétrico Bunn G3, com granulometria média/grossa. As análises sensoriais foram realizadas seguindo a metodologia proposta por Pereira et al. (2018), alinhado ao protocolo oficial da Associação de Cafés Especiais (SCA, 2013). Logo, amostras de 8,25 g café moído e torrado de cada tratamento foram distribuídas nas xícaras preparadas para degustação, nas quais foram adicionados 150 ml de água fervente ao ponto de infusão de 92 a 95 °C, em conformidade com o ponto médio do gráfico de equilíbrio ótimo para obtenção do *Golden Cup* (SCA, 2013). Cinco xícaras foram preparadas para cada amostra, conforme proposto. Uma equipe de degustadores, composta por seis provadores profissionais (*Q-Graders*), procedeu a análise sensorial. As avaliações tiveram início quando a temperatura das xícaras atingia 55 °C, respeitando o tempo de quatro minutos para a degustação após a infusão (SCA 2013).

Seguindo o formulário de degustação, foram avaliados onze importantes atributos para o café: fragrância/aroma, uniformidade, ausência de defeitos (xicara limpa), doçura, sabor, acidez, corpo, sabor residual, equilíbrio, defeitos e score final.

2.6. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software livre R (R Core Team, 2020). Cada característica foi submetida a análise de variância (ANOVA) em esquema de parcela subdividida, testando-se a significância da interação entre o fator genótipo e o fator manejo de irrigação.

Havendo efeito significativo dos fatores em estudo as médias das variáveis foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, em 5% de probabilidade para os genótipos e Tukey, em 5% de probabilidade para os regimes hídricos.

Com o propósito de analisar a ocorrência de correlação entre a produção das plantas e os atributos sensoriais analisados, as estimativas de correlação foram obtidas pelo método de Pearson, com teste “t” para avaliar sua significância ao nível de 0,1% (***), 1% (**) e 5% (*) de probabilidade.

Visando analisar a dispersão gráfica e a dissimilaridade entre os genótipos em função dos regimes hídricos estudados foi realizada a análise de componentes principais das características sensoriais dos grãos de café, selecionando-se os dois primeiros componentes principais que explicassem pelo menos 60% da variação total dos dados, conforme proposto por Cruz et al. (2015).

3. RESULTADOS

Na Figura 2 são apresentados os resultados obtidos da produtividade média das safras 2020-2021 e 2021-2022 (Figura 2A) e para a avaliação sensorial para o ano de 2021 (Figura 2B) de dez genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em altitude de transição sob diferentes regimes hídricos. Como pode ser verificado na Figura 2A, os genótipos em todos os regimes hídricos estudados apresentaram produtividade média superior a 35 sc/ha, sendo que o Paraíso Híbrido e o MGS Turmalina foram os que se destacaram, apresentando produtividades médias superiores a 80 sc/ha para os regimes hídricos sequeiro, irrigado e fertirrigado

Analisando os efeitos isolados dos genótipos para os regimes hídricos, é possível observar que apenas o H 419-3-3-7-16-2 apresentou maiores produtividades para o regime fertirrigado, enquanto o Sacramento MG1 foi o material que apresentou maior produtividade quando cultivado em sequeiro (Figura 2A). Percebe-se ainda por meio da análise da Figura 2A que os dois genótipos que compõem o grupo Catuaí (Catuaí Vermelho IAC 144 e Catuaí Vermelho IAC 44) apresentaram produtividades médias muito baixas independentemente do regime hídrico estudado.

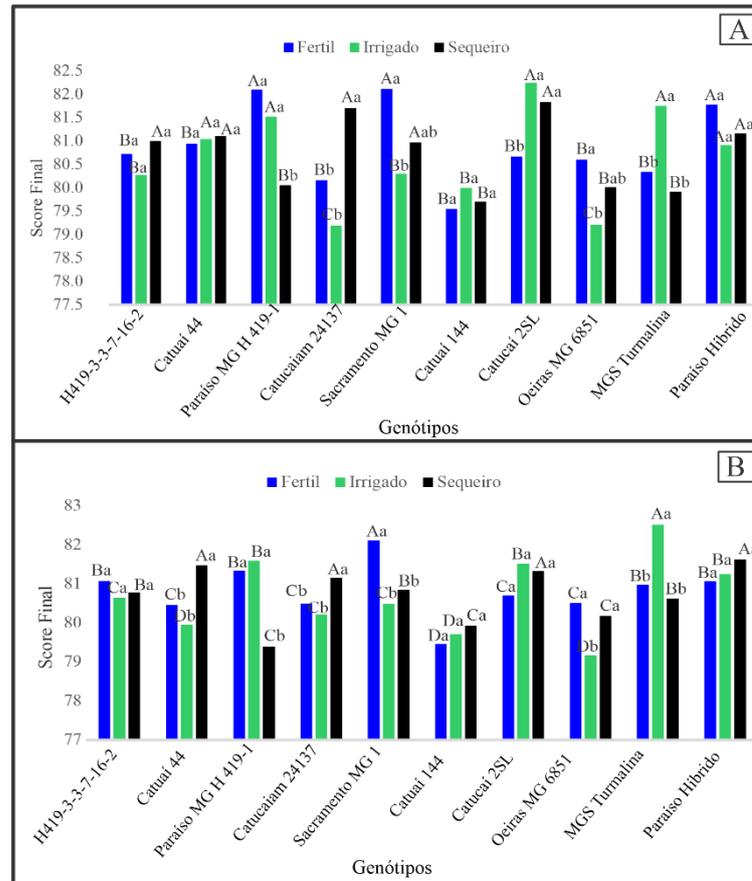


Figura 2. Produtividade média das safras de 2020-2021 e 2021-2022 (A) e análise sensorial do ano de 2021 (B) de dez genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em altitude de transição e em diferentes regimes hídricos. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey respectivamente.

Para as características sensoriais dos genótipos de cafeeiro Arábica na safra de 2021 é possível constatar pela Figura 2 B que poucos genótipos apresentaram score sensorial inferior a 80 pontos sendo, portanto, categorizados como cafés especiais. Os melhores desempenhos sensoriais foram apresentados pelos genótipos MGS Turmalina (83,27) em regime hídrico irrigado, Paraíso Híbrido (82,08) e Catuai Vermelho IAC 44 (81,83), em regime de sequeiro, bem como o genótipo Sacramento MG 1 (82,11) no regime fertirrigado (Figura 2B). Em contrapartida, o genótipo Paraíso MG H 419-1 em regime sequeiro (78,71); Catuai Vermelho IAC 144 (79,43), Catuai Vermelho IAC 44 (78,87) e Oeiras MG 6851 (79,13) em regime irrigado e os genótipos Catuai Vermelho IAC 144 (79,97) e Catuai Vermelho IAC 44 (79,36) no regime fertirrigado, não foram tipificados como cafés especiais.

O painel sensorial dos genótipos para o ano agrícola de 2021-2022 apresentou mudanças em relação ao ano de 2021 (Figura 3A), para 2022 é possível observar que o Genótipo Catuai Vermelho IAC 144 para todos os regimes hídricos estudados, bem como os genótipos Oeiras

MG 6851 e Catucaiam 24137 no regime irrigado e MGS Turmalina no regime sequeiro, apresentaram score sensorial inferior aos 80 pontos.

Contudo, percebe-se que assim como ocorrido na safra de 2020-2021 o genótipo MGS Turmalina no regime irrigado se destacou por apresentar o maior Score sensorial também no ano de 2022 (81,75), juntamente com o Catucaí Amarelo 2SL (82,25) e Paraíso MG H 419-1 (81,53) (Figura 3A). No regime sequeiro o H 419-3-3-7-16-2 (81), Catuaí Vermelho IAC 44 (81,11), Catucaiam 24137 (81,71), Sacramento MG1 (80,9), Catucaí Amarelo 2SL (81,83) e Paraíso Híbrido (81,17) apresentaram os maiores Scores sensoriais. No regime fertirrigado, assim como para a colheita de 2021 o genótipo Sacramento MG1 apresentou o maior Score sensorial (82,12), juntamente com o Paraíso MG H 419-1 (82,11) e Paraíso Híbrido (81,78).

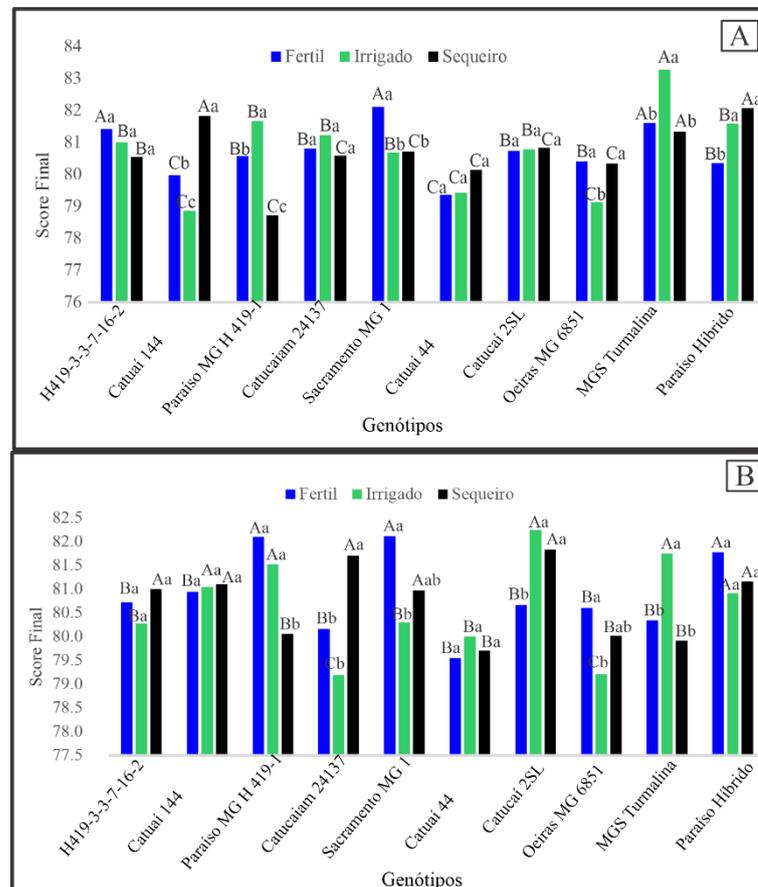


Figura 3. Análise sensorial do ano de 2022 (A) e análise sensorial média dos anos de 2021 e 2022 (B) de dez genótipos de cafeeiro Arábica cultivados em altitude de transição e em diferentes regimes hídricos. Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula entre os genótipos e minúscula entre os regimes hídricos não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelos testes de Scott-Knott e Tukey respectivamente.

Analisando o desempenho sensorial médio dos genótipos para as colheitas estudadas (Figura 3B), percebe-se que o genótipo MGS Turmalina no regime irrigado (82,51), o Sacramento MG 1 no regime fertirrigado (82,12) e os genótipos Catuaí Vermelho IAC 44 (81,47), Catucaiam 24137 (81,15), Catucaí Amarelo 2SL (81,33) e Paraíso Híbrido (81,66) no

regime sequeiro foram os que apresentaram maiores Scores sensoriais. Por outro lado, percebe-se que os genótipos Catuaí Vermelho IAC 144 e Oeiras MG 6851 para todos os regimes hídricos estudados, Catuaí SFC para os regimes irrigado e fertirrigado, Paraíso MG H 419-1 para o cultivo sequeiro apresentaram os menores scores sensoriais para a média das duas safras (Figura 3B).

Por meio da análise de correlação de Pearson para as variáveis sensoriais e a produção média dos dois anos, é possível constatar que, com exceção da variável sabor que só apresentou correlação significativa pelo teste t com a variável Score final, as demais variáveis sensoriais apresentaram correlação positiva e significativa entre elas (Figura 4). Percebe-se ainda que a magnitude da variável produção não apresentou efeito com as variáveis sensoriais estudadas.

Constata-se ainda, que o atributo sabor apresentou baixa correlação com os atributos acidez (0,1), corpo (0,01), geral (0,07), sabor residual (0,15) e balanço (0,16), obtendo correlação significativa e positiva apenas com o atributo score final (0,61). Percebe-se também que o atributo balanço apresentou correlação de 0,9 com sabor residual e geral, 0,8 com fragrância e 0,82 com acidez e corpo. Percebe-se ainda que o atributo acidez também apresentou correlações superiores a 0,75 com todos os atributos sensoriais, sendo juntamente com o balanço um dos atributos mais impactantes para a confecção do perfil sensorial dos cafés (Figura 4).

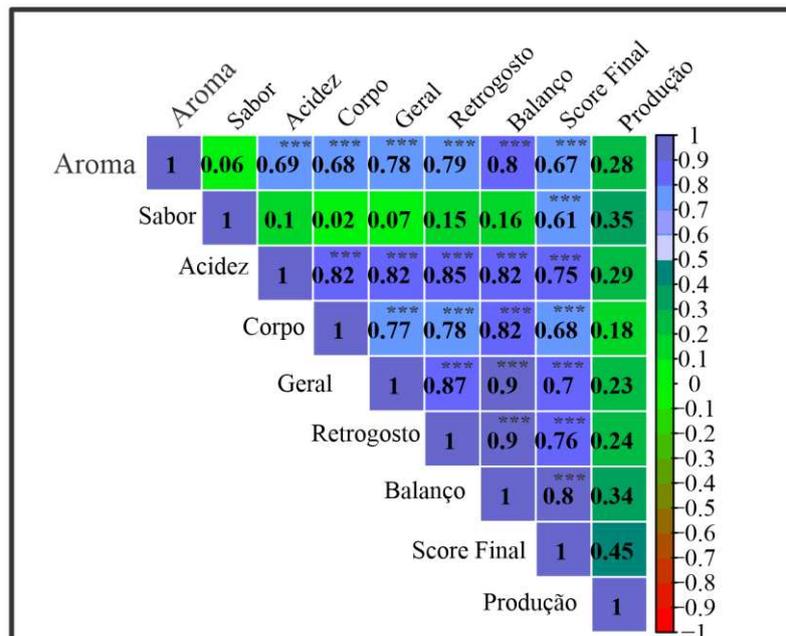


Figura 4. Estimativas dos coeficientes de correlação de Pearson com dados fenotípicos entre as variáveis que compõem as características sensoriais: aroma, sabor, acidez, corpo, geral, sabor residual, Score final e produtividade. Na diagonal superior, as tonalidades das cores, as

estimativas de correlação e a significância são representadas pelo teste t, significativo a 5% (*), a 1% (**) e a 0,1% (***). Na diagonal, estão representadas as variáveis dos grupos de análise.

As correlações apresentadas pelas variáveis que compõem a matriz sensorial do cafeeiro asseguram a utilização da análise de componentes principais. Ademais, percebe-se que o diagrama de dispersão dos genótipos em função das variáveis sensoriais, extraído pelo método de componentes principais (Figura 5), foi capaz de explicar 91,7%, 86,5% e 91,5% da variação total dos dados para o ano agrícola de 2020-2021 (Figura 5A), 2021- 2022 (Figura 5B) e a média dos dois anos (Figura 6) respectivamente.

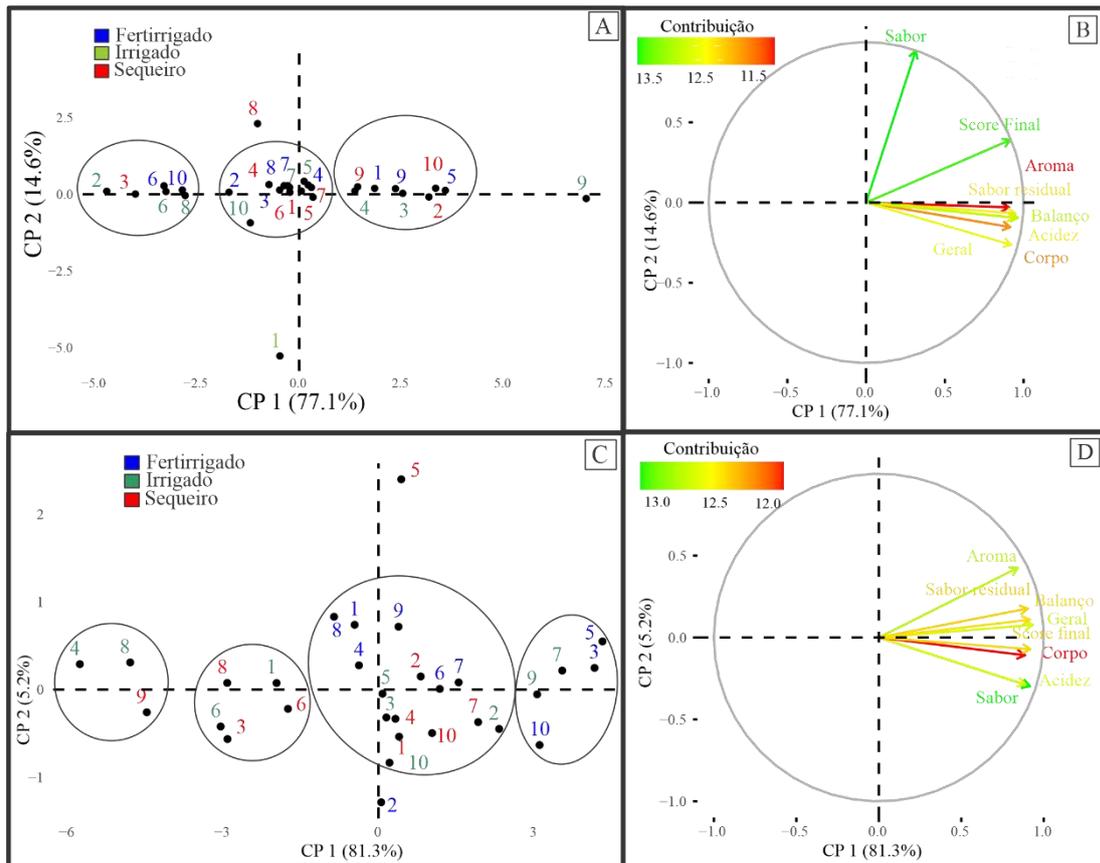


Figura 5. Dispersão gráfica de dez genótipos de cafeeiro Arábica* em três diferentes regimes hídricos (irrigado, sequeiro e fertirrigado), em relação aos dois primeiros componentes principais com base nas características sensoriais para as colheitas referentes ao ano de 2021 (A e B) e 2022 (C e D). (*) (1) Paraíso H 419-3-3-7-16-2; (2) Catuaí Vermelho IAC 44; (3) Paraíso MG/H 419-1; (4) Catucaim 24137; (5) Sacramento MG1; (6) Catuaí Vermelho IAC 144; (7) Catucaí 2-SL; (8) Oeiras MG-6851; (9) MGS Turmalina e (10) Paraíso (Híbrido).

Para o ano de 2021 é possível observar pela Figura 5A, que ocorreu a formação de três grandes grupos de genótipos. O grupo formado pelos genótipos Catuaí 144 CCF (6), nos regimes irrigado e fertirrigado, Catuaí Vermelho IAC 44 (2) no regime irrigado, Paraíso MG 419-1 (3) no regime sequeiro, Oeiras MG 6851 (8) no regime irrigado e Paraíso Híbrido (10) no regime fertirrigado, apresentaram a menor associação com os atributos sensoriais do café.

Os genótipos Paraíso Híbrido (10) sequeiro, H 419-3-3-7-16-2 (1) fertirrigado, Catucaí 144 SFC (2) sequeiro, Paraíso MG H 419-1 (3) Irrigado, Catucaiam 24137 (4) irrigado, Sacramento MG1 (5) fertirrigado, MGS Turmalina (9) nos regimes fertirrigado e sequeiro e Paraíso Híbrido (10) no regime sequeiro apresentaram as maiores associações com as variáveis de qualidade sensorial (Figura 5A e Figura 5B). Percebe-se ainda que o genótipo MGS Turmalina (9) foi o que apresentou a maior associação com as variáveis sensoriais no regime irrigado enquanto que o genótipo menos similar a ele foi o Catucaí Vermelho IAC 44 (2) no regime irrigado (Figura 5A).

Para a safra de 2022 percebe-se que ocorreu a formação de 4 grupos de genótipos (Figura 5C), sendo que o Catucaiam 24137 (4) e Oeiras MG 6851 (8) no regime irrigado e o MGS Turmalina (9) no regime sequeiro perfizeram o grupo com a menor associação com as variáveis sensoriais. Por outro lado, os genótipos Paraíso Híbrido (10), Paraíso MG H419-1 (3) e Sacramento MG1 (5) no regime fertirrigado, Catucaí Amarelo 2SL (7) e MGS Turmalina (9) no regime irrigado, apresentaram as maiores associações com as variáveis sensoriais.

Constata-se ainda por meio da Figura 5C, que o genótipo MGS Turmalina (9) apresentou uma grande divergência para qualidade sensorial entre os regimes hídricos estudados, demonstrando que o melhor desempenho sensorial para esse genótipo ocorreu quando o mesmo era suprido com o auxílio da irrigação. Percebe-se ainda que para a colheita referente ao ano de 2022 nenhum dos materiais que apresentaram maiores associações com as variáveis de qualidade sensorial foram compostas pelo tratamento sequeiro (Figura 5C).

Na Figura 6 por meio da análise da média das safras de 2021 e 2022 para a qualidade sensorial, percebe-se que a maior distância entre os genótipos ocorreu entre dois genótipos do grupo Paraíso, o MGS Turmalina (9) no regime irrigado como o que possui maior similaridade com as variáveis sensoriais e o Paraíso MG H 419-1 (3), que apresentou similaridade opostas as variáveis sensoriais.

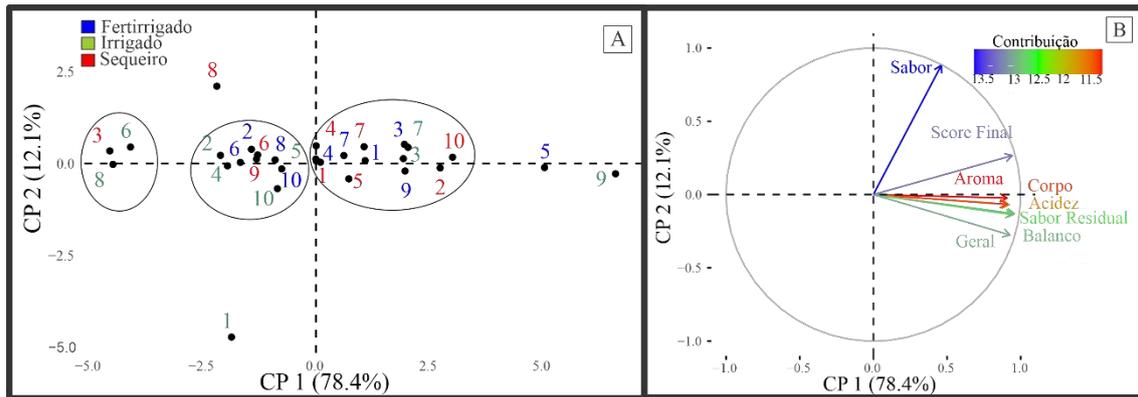


Figura 6. Dispersão gráfica de dez genótipos de cafeeiro Arábica* em três diferentes regimes hídricos (irrigado, sequeiro e fertirrigado), em relação aos 2 primeiros componentes principais com base nas características sensoriais para a média das colheitas referentes ao ano de 2021 e 2022. (*) (1) Paraíso H 419-3-3-7-16-2; (2) Catuaí Vermelho IAC 44; (3) Paraíso MG/H 419-1; (4) Catucaim 24137; (5) Sacramento MG1; (6) Catuaí Vermelho IAC 144; (7) Catucaí 2-SL; (8) Oeiras MG-6851; (9) MGS Turmalina e (10) Paraíso (Híbrido).

Percebe-se que o genótipo MGS Turmalina (9) quando irrigado e o Sacramento MG1 em sequeiro se destacaram por serem os genótipos mais promissores para a produção de cafés especiais em zona de altitude de transição, enquanto que os genótipos Paraíso MG H 419-1 (3) em cultivo sequeiro, Catuaí Vermelho IAC 144 (6) e Oeiras MG 6851 (8) no cultivo irrigado foram os materiais que apresentaram atributos sensoriais menos desenvolvidos com os parâmetros de qualidade em altitude de transição.

4. DISCUSSÃO:

Para os dois anos em estudo (2021 e 2022), todos os genótipos em todos os regimes hídricos analisados apresentaram produtividade média superior a 35 sc/ha. Essa resposta é importante, tendo em vista que o ensaio experimental em questão se encontra em uma região restritiva para o cultivo do cafeeiro Arábica e mesmo assim forneceu produções superiores à média nacional do ano de 2022 (25 sc/ha) conforme destacado pela CONAB (2023).

Outro ponto de importância é que os estresses abióticos aplicados nas plantas de cafeeiro quando cultivadas fora das suas zonas de aptidão climática tendem a ser muito intensas, proporcionando assim reduções consideráveis em termos de qualidade e de produtividade (RODRIGUES et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b; COLODETTI et al.; 2020). No entanto, percebe-se que os genótipos Paraíso Híbrido e o MGS Turmalina apresentaram produtividades médias superiores a 80 sc/ha independentemente do regime hídrico e da safra, demonstrando assim a importância do componente genético para alcançar boas produções nas zonas de transição para a produção do cafeeiro Arábica.

Além dos genótipos Paraíso Híbrido e MGS Turmalina apresentarem, as maiores produtividades para os diferentes regimes hídricos estudados, percebe-se que esses genótipos se encontraram entre os materiais com os maiores scores sensoriais (Figura 3 e Figura 4) e com a melhor associação com os atributos sensoriais do café (Figura 6). Esse fato contrapõe-se às premissas populares das principais regiões produtoras de cafés do Brasil (os produtores enfatizam que em anos de safras altas dificilmente se alcança cafés de qualidade superior), bem como as informações apresentadas na literatura, as quais destacam que a magnitude da produção do cafeeiro afeta negativamente os atributos sensoriais do café (MATIELO 1991; AVELINO et al. 2005; BASTIAN et al.; 2021; FAGAN et al. 2011; CALDAS et al.; 2018).

Não foi possível observar correlações significativas entre os parâmetros de qualidade sensorial do cafeeiro e a produção (Figura 4). Considerando-se que quando os frutos se encontram no ponto ideal de colheita, as cerejas de café atenderam a todas as suas necessidades fisiológicas para desenvolver uma semente de qualidade (FAGAN et al.; 2011; GEROMEL et al.; 2008; PEREZ et al.; 2021), assume-se que o efeito da produção não se mostrara tão impactante para a qualidade e que independentemente do volume de produção, a qualidade do fruto no momento da colheita não necessariamente é afetada.

Ressalta-se, que a partir do momento em que o exocarpo dos frutos do cafeeiro altera a sua coloração do verde para o vermelho ou o amarelo por meio da degradação das clorofilas do fruto e do aumento do teor de antocianinas, ocorre um aumento considerável de compostos químicos e bioquímicos que conferem a qualidade sensorial ao café (KOSHIRO et al.; 2015; RAWEL et al.; 2019; BASTIAN et al.; 2021). Desta forma, fica evidente que o tempo e o ponto de maturação dos grãos de café no momento da colheita se destacam como critério para conferir qualidade química, bioquímica e sensorial superiores ao café que independe da carga de frutos produzida.

Ressalta-se ainda, que de maneira geral o conhecimento de genótipos adequados para plantio em cafeicultura de baixa altitude é de fundamental importância para a cafeicultura moderna, tendo em vista que cada vez mais a produção do café Arábica em cultivos de altitude tem sido priorizada no tocante a cafés de qualidade superior (ZAIDAN et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2022). Vários relatos da literatura enfatizam que a produção de cafés especiais, ocorre com maior facilidade em cultivos oriundos de regiões frias e altas em comparação as regiões mais baixas e quentes (SOBREIRA et al.; 2016; BARBOSA et al.; 2019; BERTRAND et al.; 2012b; SETOTAW et al.; 2013, FERREIRA et al.; 2022).

No entanto, pesquisas recentes têm demonstrado que a combinação dos genótipos selecionados aliados a práticas agrícolas na lavoura, na colheita, no pós colheita e no preparo

da bebida são capazes de maximizar o potencial produtivo da lavoura e dos grãos para a produção de cafés especiais (FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b; VELOSO et al.; 2020; FILETE et al.; 2022). Esses achados corroboram com as informações contidas neste trabalho, no qual se observa que apenas seis das 30 combinações de genótipos e regimes hídricos para o ano de 2021 e quatro das 30 combinações de genótipos e regimes hídricos para o ano de 2022, não alcançaram score sensorial superior a 80 pontos e não podem ser considerados cafés especiais (Figura 2B e Figura 3), conforme a metodologia SCA (2013).

Fato interessante, é que mesmo quando cultivado em regime sequeiro e estando situado em região restritiva para o cultivo do cafeeiro Arábica, os genótipos Catuaí Vermelho IAC 44 no ano de 2021 (Figura 2B) e na média de dois anos (Figura 3B) e Catucaiam 24137 no ano de 2022 (Figura 3A), apresentaram scores sensoriais superiores aos dos cafés produzidos no regime irrigado e fertirrigado. Esses resultados contrapõem-se as informações contidas na literatura as quais destacam que a qualidade do cafeeiro Arábica em regiões restritivas tende a ser prejudicada, dado que no momento de enchimento dos grãos a produção e distribuição de fotoassimilados em regiões restritivas é limitante para a qualidade sensorial (FAGAN et al.; 2011).

Esse achado também não corrobora com as informações descritas por Ferreira et al. (2021a), Ferreira et al. (2021b) e Sobreira et al. (2016), que destacam que genótipos de cafeeiro Arábica mais antigos tendem a apresentar maior propensão a qualidade quando cultivados em condições agronômicas e climáticas mais favoráveis para o seu desenvolvimento. Deste modo, esperava-se maiores scores sensoriais para esses genótipos nos cultivos irrigado e fertirrigado não no cultivo sequeiro.

No entanto, percebe-se que o enchimento mais lento dos frutos oriundo da redução do efeito do estresse hídrico foi capaz de maximizar os efeitos isolados do genótipo Catuaí Amarelo 2SL para o ano de 2022 e para os genótipos Paraíso MG H 419-1, Sacramento MG1, MGS Turmalina, Paraíso Híbrido para ambos os anos produtivos, aferindo o efeito do componente ambiental na expressão genica dos genótipos para a produção de cafés especiais (RODRIGUES et al.; 2016; BARBOSA et al.; 2019; BARBOSA et al.; 2020).

Outro fato interessante que se percebe na análise sensorial dos genótipos de cafeeiro Arábica é que com exceção dos genótipos do grupo Catuaí todos os demais genótipos são caracterizados por serem tolerantes ou moderadamente tolerantes a ferrugem do cafeeiro. Essas características podem ser atribuídas à herança genética proveniente de *Coffea canephora*, conforme discutido em estudos anteriores (SOBREIRA et al., 2016; BARBOSA et al., 2019; SAKIYAMA et al., 2015).

Vale ressaltar que a incorporação de genes de *Coffea canephora* em programas de melhoramento genético desempenha um papel crucial na criação de resistência à ferrugem do cafeeiro em genótipos de café Arábica modernos, principalmente os que possuem descendentes oriundos do Híbrido Timor (SETOTAW et al.; 2013).

Deste modo, grande parte dos genótipos que possuem tolerância a ferrugem foram desenvolvidos usando germoplasma oriundo da hibridação possivelmente ocorreu do cruzamento entre *Coffea arabica* e *Coffea canephora* (SETOTAW et al.; 2013). Conforme destacado por Kitzberger et al. (2014) e Wang et al. (2021), genótipos que possuem descendentes oriundos do Híbrido Timor ou outros Híbridos interespecíficos tendem a carregar alguns genes de resistência do *Coffea canephora*, tolerando melhor alguns estresses bióticos e abióticos, podendo justificar a produtividade e qualidade sensorial dos genótipos em estudo para o cultivo em altitude de transição.

Pesquisas recentes têm demonstrado que genótipos descendentes do Híbrido Timor possuem grande potencial sensorial de seus grãos, iguais ou até mesmo superiores a cultivares antigas e tipicamente conhecidas por apresentar excelente qualidade, como é o caso das cultivares do grupo Bourbon (SETOTAW et al.; 2010; MALTA et al.; 2021). Adicionalmente, Sobreira et al. (2016) destacam que o risco de perdas em qualidade de cultivares modernas tende a ser reduzido, em virtude do alto rigor de seleção adotado pelos melhoristas, principalmente no que se trata de produtividade e qualidade sensorial dos cafés.

Os genótipos melhorados a partir do germoplasma oriundo do Híbrido Timor se destacaram quanto a qualidade sensorial em todos os regimes hídricos estudados. Pela análise de componentes principais é possível constatar ainda que os genótipos que apresentaram atributos sensoriais superiores para os anos de 2021, 2022 e, conseqüentemente, a média dos dois anos é oriunda dos genótipos que possuem descendência com o híbrido Timor (Figura 4 e Figura 5).

Barbosa et al. (2020) avaliaram 11 cultivares de cafeeiro Arábica resistentes às ferrugens enfatizaram que mesmo quando cultivado em altitudes menos elevadas, todos os cultivares apresentaram grande potencial para a produção de cafés de qualidade. Em outro estudo, Barbosa et al. (2019) destacaram que dentre os genótipos testados, Catucaí Amarelo 24/137 e H419-3-3-7-16-4-1, apresentaram grande potencial para a qualidade de bebida nas regiões em estudo.

Resultado semelhante também foi apresentado por Ferreira et al. (2021b) analisando diferentes genótipos de cafeeiro Arábica e regime hídrico em altitude de transição, onde os autores destacaram que, em cultivo sequeiro os genótipos H 419-3-3-7-16-2, MGS Turmalina

e Catuaí Amarelo 24-137 foram os que apresentaram maior potencial para a produção de café especial.

Ressalta-se que tanto nos estudos de Barbosa et al.; (2020) como nos de Ferreira et al. (2021a), os genótipos promissores e as produções de café de qualidade, independentemente da altitude, são materiais que possuem ancestrais oriundos do Híbrido Timor. Esse comportamento demonstra que genótipos modernos oriundos do Híbrido Timor não somente são eficientes em tolerar os danos bióticos da ferrugem do cafeeiro, como também são promissores para a produção de cafés especiais (SOBREIRA et al.; 2016; MARIE et al.; 2020), principalmente quando se visa o cultivo em altitude de transição.

O desempenho promissor dos genótipos do grupo Paraíso e do grupo Catucaí, também foi observado neste trabalho (Figura 4 e Figura 5), com destaque especial para os genótipos MGS Turmalina (9) e do Sacramento MG1 (5), que sempre estiveram situados entre os grupos que apresentam atributos de qualidade sensorial superiores.

5. CONCLUSÕES

Altas produtividades aliadas a qualidade sensorial do café, podem ser alcançadas em cultivos em altitude de transição, desde que, se utilize a combinação correta entre genótipo e o fornecimento de irrigação às plantas de café.

A alta qualidade sensorial de café Arábica em altitude de transição pode ser alcançada com maior facilidade quando utiliza-se o genótipo MGS Turmalina no regime irrigado, Sacramento MG1 no regime fertirrigado e Catuaí Vermelho IAC 44 e Paraíso Híbrido em sequeiro.

A irrigação aliada à escolha de genótipos e a práticas agronômicas modernas é capaz de mitigar os efeitos nocivos da temperatura em região de altitude de transição, bem como serve como base para minimizar os efeitos futuros das variações agroclimáticas em regiões atualmente aptas ao cultivo do cafeeiro Arábica.

REFERÊNCIAS

AVELINO, J.; BARBOZA, B.; ARAYA, J.C.; FONSECA, C.; DAVRIEUX, F.; GUYOT, B. (2005) Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of Costa Rica, Orosi and Santa María de Dota. **Journal of the Science of Food and Agriculture** v.85, p.1869–1876. 2005.

BARBOSA, I. P.; COSTA W. G.; NASCIMENTO M.; CRUZ C. D.; OLIVEIRA A. C. B. Recommendation of *Coffea arabica* genotypes by factor analysis. **Euphytica**, v. 215, n.178, p.1-10. 2019.

BARBOSA, I.P.; De OLIVEIRA, A.C.B.; ROSADO, R.D.S.; SAKIYAMA, N.S.; CRUZ, C.D.; OEREIRA, A.A. ensory analysis of arabica coffee: cultivars of rust resistance with potential for the specialty coffee market. **Euphytica**, v. 216, p. 165, 2020.

BASTIAN, F.; HUTABARAT, O.S.; DIRPAN, A.; NAINU, F.; HARAPAN, H.; EMRAN, T.B.; SIMAL-GANDARA, J. From Plantation to Cup: Changes in Bioactive Compounds during Coffee Processing. **Foods**, v. 10, n. 2827. 2021.

BRAGANÇA, R.; DOS SANTOS, A. R.; DE SOUZA, E. F.; DE CARVALHO A. J. C.; LUPPI, A. S. L.; DA SILVA, R. G. Impactos das mudanças climáticas no zoneamento agroclimatológico do café Arábica no Espírito Santo. **Revista Agroambiente On-line**, v. 10, n. 1, p. 77-82, 2016.

BRIOSCHI JUNIOR, D.; GUARÇONI, R.C.; SILVA, M.C.S.; VELOSO, T.G.R.; KASUYA, M.C.M.; OLIVEIRA, E.C.S.O.; LUZ, J.M.R.; MOREIRA, L.R.; DEBONA, D.G.; PEREIRA, L.L. Microbial fermentation affects sensorial, chemical, and microbial profile of coffee under carbonic maceration. **Food Chemistry**, v. 9, p. 128296, 2020.

CALDAS, A.L.D.; LIMA, E.M.C.; REZENDE, F.C.; FARIA, M.A.; DIOTTO, A.V.; LEITE JUNIOR, M.C.R. Produtividade e qualidade de café cv. Travessia em resposta à irrigação e adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.12, n.1, p. 2357- 365, 2018.

CAMARGO, M.B.P. The impact of climatic variability and climate change on Arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010.

COLODETTI, T.V.; RODRIGUES, W.N.; CAVATTE, P.C.; REIS, E.F.; VERDIN FILHO, A.C.; BRINATE, S.V.B.; MARTINS, L.D.; CHRISTO, B.F.; ANDRADE JUNIOR, S.; TOMAZ, M.A. Managing the number of orthotropic stems in *Coffea arabica* as strategy for

cultivation at low-altitude regions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, p. 447-454, 2020.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira de café, primeiro levantamento/ janeiro 2023**. Brasília, v. 10, n. 1, p.1-42. 2023.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: UFV, Imprensa universitária, v.1, 2º ed. 2015.

DENOEUDE, F.; CARRETERO-PAULET, L.; DEREPPER, A.; DROC, G.; GUYOT, R.; PIETRELLA, M.; ZHENG, C.; ALBERTI, A.; ANTHONY, F.; APREA G. 2014. The coffee genome provides insight into the convergent evolution of caffeine biosynthesis. **Science**. V.345, p.1181-1184. 2014.

FAGAN, E.B.; SOUZA, C.H.E.; PEREIRA, N.M.B.; MACHADO, V.J. Efeito do tempo de formação do grão de café (*coffea* sp) na qualidade da bebida. **Bioscience Journal**. v.27, n.5, p.729-738, 2011.

FERRÃO, M.A.G.; FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; VERDIN FILHO, A.C.; VOLPI, P.S. Origem, Dispersão Geográfica, Taxonomia e Diversidade Genética de *Coffea canephora*. IN: FERRÃO, R.G.; FONSECA, A.F.A.; FERRÃO, M.A.G.; MUNER, L.H. **Café Conilon**. Vitoria-ES, editoria INCAPER, 2 ed. 2017, 786p.

FERREIRA, D.S.; AMARAL, J.F.T; PERERIRA, L.L.; FERREIRA, J.M.S.F.; GUARÇONI, R.C.; MOREIRA, T.R.; OLIVEIRA, A.C.; RODRIGUES, W.N.; ALMEIDA, S.L.H.; RIBEIRO, W.R.; TOMAZ, M.A.; CASTANHEIRA, D.T.; LIMA FILHO, T. Physico-chemical and sensory interactions of arabica coffee genotypes in different water regimes. **The Journal of Agricultural Science**. V. 159, n.1-2, p.50-58. 2021.

FERREIRA, D.S.; CANAL, G.B.; NASCIMENTO, M.; NASCIMENTO, A.C.C.; FERREIRA, J.M.S.; AMARAL, J.F.T.; PEREIRA, L.L.; RODRIGUES, W.N.; RIBEIRO, W.R.; CASTANHEIRA, D.T.; TOMAZ, M.A. Exploring the multivariate technique in the discrimination of *Coffea arabica* L. cultivars regarding the production and quality of grains under the effect of water management. **Euphytica**. V.217, n.118. 2021a.

FERREIRA, D.S.; OLIVEIRA, M.E.S.; RIBEIRO, W.R.; FILETE, C.A.; CASTANHEIRA, D.T.; ROCHA, B.C.P.; MORELI, A.P.; OLIVEIRA, E.C.S.; GGUARÇONI, R.C.; PARTELLI, F.L.; PEREIRA, L.L. Association of altitude and solar radiation to understand coffee quality. **Agronomy**, v.12, n.8, p. 1885, 2022.

FILETE, C.A.; MOREIRA, T.R.; SANTOS, A.R.; GOMES, W.S.; GUARÇONI, R.C.; MORELI, A.P.; AUGUSTO, M.I.; ABREU, R.O.; SIMMER, M.M.B.; CALIMAN, A.D.C.; GUIMARÃES, C.V.; BERLLI, S.S.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; PARTELLI, F.L.; BERLLI, A.P.C.G.; OLIVEIRA, E.C.S.; PEREIRA, L.L. The New Standpoints for the Terroir of *Coffea canephora* from Southwestern Brazil: Edaphic and Sensorial Perspective. **Agronomy**. V.12, n.; p. 1931. 2022.

GEROMEL, C.; FERREIRA, L.P.; DAVRIEUX, F.; GUYOT, B.; RIBEYRE, F.; SCHOLZ, M.B.S.; PEREIRA, L.F.P.; VASST, P.; POT, D.; LEROY, T.; ANDROCIOLI FILHO, A.; VIEIRA, L.G.E.; MAZZAFERA, P.; MARRACCINI, P. Effects of shade on the development and sugar metabolism of coffee (*Coffea arabica* L.) fruits. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.46, n.5, p.569-579, 2008.

GOMES, W.S.; PEREIRA, L.L.; FILETE, C.A.; MOREIRA, T.R.; GUARÇONI, R.C.; OLIVEIRA, E.C.S.; MORELI, A.P.; GUIMARÃES, C.V.; SIMMER, M.M.B.; LACERDA JUNIOR, V.; RAMÃO, W.; CASTRO, E.V.R.; PARTELLI, F.L. Changes in the Chemical and Sensory Profile of *Coffea canephora* var. Conilon Promoted by Carbonic Maceration. **Agronomy**, v. 12, n. 10, p. 2265, 2022.

KITZBERGER CSG. SCHOLZ MBD, BENASSI MD. Bioactive compounds content in roasted coffee from traditional and modern *Coffea arabica* cultivars grown under the same edapho-climatic conditions. **Food Research International**, 61, 61-66. 2014.

KOSHIRO, Y.; JACKSON, M.C.; NAGAI, C.; ASHIHARA, H. Changes in the Content of Sugars and Organic Acids During Ripening of *Coffea arabica* and *Coffea Canephora* **Fruits**. **Eur. Chem. Bull**, v. 4, p. 378–383. 2015.

LUPPI A. S. L.; SANTOS, A. R.; EUGÊNIO, F. C.; BRAGANÇA, R.; PELÚZIO, J. B. E.; DALFI, R. L.; SILVA, R. G. Metodologia para Classificação de Zoneamento Agroclimatológico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 2014.

MALTA MR, OLIVEIRA ACB, LISKA GR, CARVALHO GR, PEREIRA AA, SILVA AD, ALVARO LN, MOTA DM. Selection of Elite Genotypes of *Coffea arabica* L. to Produce Specialty Coffees. **Frontiers in Sustainable Food Systems**. 5, 715385. 2021

MARIE L, ABDALLAH C, CAMPA C, COURTEL P, BORDEUAX M, NAVARINI L, LONZARICH V, BOSSELMANN AS, GARCÍA NT, ALPZAR E, GEORGET F, BREITLER JC, ETIENNE H, BERTRAND B. G × E interactions on yield and quality in *Coffea arabica*: new F1 hybrids outperform American cultivars. **Euphytica**. 216(78), 2020.

MARTINEZ, H.E.P.; NEVES, J.C.L. Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação. In: Sakiyama N.S.; Martinez, H.E.P.; Tomaz, M.A.; Borem A. (Org.). **Café Arábica - do plantio à colheita**. 1ed. Viçosa: Editora UFV, v. 1, p. 64-103. 2015.

MATIELLO, J.B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo, Globo, 320 p. 1995.

MOHANAN, S.; SATYANARAYANA, K.V.; SRIDEVI, V.; GOWDA K.; GIRIDHAR, P.; CHANDRASHEKAR, A.; RAVISHANKAR, G.A. Evaluating the effect and effectiveness of different constructs with a conserved sequence for silencing of *Coffea canephora* N-methyltransferases. **J Plant Biochem Biotechnol**, v.23 p.399-409. 2014.

OIC, Organização Internacional do café. 2021. **Relatório sobre o mercado de café**. <http://consorciopesquisacafe.com.br/arquivos/consorcio/publicacoes_tecnicas/relatorio_oic_agosto_2021.pdf>, Acesso: 13/09/2021.

PEREIRA, L.L.; GUARÇONI, RC.; SOUZA, G.S.; BRIOSCHI JUNIOR, D.; MOREIRA, T.R.; CATEN, C.T.S. Propositions on the Optimal Number of QGraders and R-Graders. **Journal Of Food Quality**, v. 2018, p. 1-7, 2018.

PEREZ, O.V.; MATALLANA, P.L.G; FERNANDEZ, A.M.R; ALVAREZ, B.C.I; GALEGO, A.C.P; MONTOYA R.EC. Chemical Composition and Sensory Quality of Coffee Fruits at Different Stages of Maturity. **Agronomy** v. 13, n. 341. 2023.

PETERSON, R.R.M.; LIMA, N.; TANIWAKI, M.H. Coffee, mycotoxins and climate change. **Food Research International**. V. 61, p. 1-15, 2014.

R core team **R language and enviromental for statitiscal computing**, 2021. R core team. R language and enviromental for statitiscal computing. R Foundation for Statistical, Vienna, Austria. <http://www.r-project.org>. 2021.

RAWEL, H.M.; HUSCHEK, G.; SAGU, S.T.; HOMANN, T. Cocoa Bean Proteins—Characterization, Changes and Modifications due to Ripening and Post-Harvest Processing. **Nutrition**. V.11 p.428. 2019.

RODRIGUES, W.N.; BRINATE, S.B.V.; MARTINS, L.D.; COLODETTI, T.V.; TOMAZ, M.A. Genetic variability and expression of agromorphological traits among genotypes of *Coffea arabica* being promoted by supplementary irrigation. **Genetics and Molecular Research**, v.16, n.2, p.1-12. 2016.

SAKIYAMA, N.; MARTINEZ, H.E.P.; TOMAZ, M.A.; BOREM, A. **Café Arábica - do plantio à colheita**. 1ed.Viçosa: Editora UFV, 2015, v. 1, p. 64-103.

SCAA- Specialty Coffee Association Of American. **Protocols 23**, 2013. Disponível em: . Acesso em: 10/01/2021. 2013.

SETOTAW T.A.; PENA GF.; ZAMBOLIN, E.M.; PEREIRA, A.A.; SAKIYAMA, N.S. Breeding potential and genetic diversity of “Híbrido do Timor” coffee evaluated by molecular markers. **Crop Breed Appl Biot**, v.10, p. 298–304. 2010.

SETOTAW TA, CAIXETA ET, PEREIRA AA, OLIVEIRA ACB, CRUZ CD, ZAMBOLIM, EM, SAKIYAMA NS. Coefficient of Parentage in *Coffea arabica* L. Cultivars Grown in Brazil. **Crop Science**, 53(4), 1237-1247, 2013.

SOBREIRA, F.M.; OLIVEIRA, A.C.B.; PEREIRA, A.A.; GONÇALVES, M.A.; SAKIYAMA, N.S. Divergence among arabica coffee genotypes for sensory quality. **Australian J Crop Sci.** v.10 n.10 p. 1442–1448, 2016.

VELOSO, T.G.R.; SILVA, M.C.E.; CARDOSO, W.S.; KASUYA, M.C.; PEREIRA, L.L. Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in **Brazil**. **Scientific Reports**, v. 10, p. 14692, 2020.

VERDIN FILHO, A.C.; VOLPI, P.S.; FERRAO, M.A.G.; FERRAO, R.G.; MAURI, A.L.; FONSECA, A.F.A.; TRISTAO, F.A.; ANDRADE, S. New management technology for arabica coffee: the cyclic pruning program for arabica coffee. **Coffee Science**, v. 11, p. 475-483, 2016.

WANG Y, WANG X, HU G, HONG D, BAI X, GUO T, ZHOU H, LI Z, GIU M. Chemical ingredients characterization basing on ¹H NMR and SHS-GC/MS in twelve cultivars of *Coffea arabica* roasted beans. **Food Research International**. 147, 110544. 2021.

ZAIDAN UR, CORRÊA PC, FERREIRA WPM, CECON, PR. Environment and varieties influence the quality of coffees in Matas de Minas. **Coffee Science**. V.12, p.240 – 247. 2016.

CAPÍTULO 3

Caracterização química e sensorial de grãos de café Arábica cultivados em altitude de transição e fermentados em maceração carbônica.

Resumo

Com as mudanças climáticas e o aumento das áreas restritivas ao cultivo do cafeeiro Arábica atrelado a exigência crescente do mercado consumidor quanto qualidade sensorial dos cafés, fica evidente que a cafeicultura moderna terá que passar por mudanças estruturais e filosóficas importantes. Práticas de manejos na colheita e na pós colheita são ferramentas importantes para atender essas mudanças, principalmente quando se trata do cultivo de cafeeiro em altitude de transição. Desta forma, objetivou-se com este estudo, analisar o perfil sensorial e químico de cafés cultivados em altitude de transição e submetidos a diferentes tempos e temperaturas de fermentação pelo método de maceração carbônica. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições, no esquema fatorial 2 x 4 em parcelas subdivididas, sendo que as parcelas foram compostas por duas temperaturas (30 e 60°C) em BOD's e as subparcelas compostas por cinco tempos de fermentação (24, 72, 126 e 162 horas de fermentação). Os resultados do ensaio experimental evidenciaram, que a maceração carbônica potencializa os atributos sensoriais e químicos de cafés cultivados em altitude de transição, sendo que a fermentação por pelo menos 120 horas a 30°C é capaz de melhorar o perfil sensorial dos cafés. Constata-se ainda, que existe uma melhora na qualidade sensorial à medida que os tempos e as temperaturas empregadas aumentam. Neste estudo, o tratamento de 30 °C e 162 h favoreceu pontuação de 84,76 pontos, em contraste com a pontuação de 82,14 promovida pelo menor tempo (24 h) em temperatura (60 °C).

Palavras Chave: Fermentação microbiana, *Coffea arabica* L.; mudanças climáticas, fermentação termofílica, cafés especiais.

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura moderna passa por mudanças importantes quanto ao modo de se produzir o café, tanto a nível agrônômico, com a modernização dos tratos culturais das lavouras (VERDIN FILHO et al.; 2016; FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b; COLODETTI et al.;

2020), ambiental com as mudanças climáticas associadas ao aumento de temperatura e intensidade de secas nas regiões produtoras (BERTRAND et al.; 2012a; SEMEDO et al.; 2018; RONCHI e MIRANDA, 2020; AVILA et al.; 2020; MARQUES et al.; 2022), bem como pela maior exigência e demanda do mercado consumidor por cafés que apresentem elevados padrões sensoriais e, que são produzidos de forma sustentável (FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b; BRIOSCHI JUNIOR et al.; 2021; FERREIRA et al.; 2022; SOUZA et al.; 2023).

Ademais, a produção de cafés especiais em zonas que hoje são consideradas restritivas ou de transição para o cultivo de cafeeiro Arábica (que normalmente apresentam altitude mais baixa, associada a secas mais intensas e temperaturas supra ótimas para o cultivo) é ainda mais desafiadora e necessária para atender a crescente demanda eminente por cafés especiais (FERREIRA et al.; 2021a; FERREIRA et al.; 2021b; SOUZA et al.; 2023).

Destaca-se que a escolha do genótipo adequado à região (BARBOSA et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a) e o processo pós colheita como a fermentação microbiana controlada são considerados estratégias promissoras para maximizar o potencial sensorial dos cafés destas regiões (BRIOSHI JÚNIOR et al.; 2021; AGNOLETTI et al.; 2022; SOUZA et al.; 2023; FERREIRA et al.; 2023).

A qualidade sensorial do café, é decorrente de uma complexa combinação de constituintes químicos que conferem aroma e sabor para a bebida (OLIVEIRA et al.; 2022; GE et al.; 2023; FILETE et al.; 2023; DUQUE et al.; 2022). Essa composição química dos frutos é afetada pela ação conjunta das características genéticas da planta, dos tratos culturais da lavoura, do ambiente no qual o plantio se encontra (*terroir*), bem como, pelos métodos de colheita, pós colheita, torra e preparo a que os grãos são submetidos (BARBOSA et al.; 2019; VELOSO et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2021a; BRIOSHI JUNIOR et al.; 2020; FERREIRA et al.; 2022; SILVA et al.; 2022; FILETE et al.; 2022).

A fermentação por meio da ação de microrganismos, tende a proporcionar ao café notas de sabor adicionais (BRIOSCHI JUNIOR et al.; 2021; ELHALIS e ZHAO, 2023; SOUZA et al.; 2023; GE et al.; 2023; FERREIRA et al.; 2022), conferindo, deste modo, padrões únicos de sabor a bebida. Ressalta-se que, de maneira geral, em algum momento após a maturação, todos os frutos possivelmente vão passar por algum processo de fermentação (PEREIRA et al.; 2020a). Esse fenômeno ocorre em resposta às reações de catabolismo ou anabolismo que ocorrem durante a pós-colheita nas quais o substrato (açúcares) são consumidos, podendo resultar em produtos que são interessantes ou não para a qualidade sensorial da bebida (CARDOSO et al.; 2020).

Considerando que a qualidade do café está intrinsecamente relacionada aos seus componentes físico-químicos, como açúcares, lipídios, proteínas, enzimas, ácidos graxos, cafeína e compostos voláteis, que prejudicam o sabor e o aroma da bebida, e tendo em mente que esses elementos podem sofrer variações devido aos métodos de processamento e produção utilizados pelo produtor (PEREIRA et al., 2020a), é razoável supor que a percepção de nuances sensoriais exclusivas, ou seja, únicas, possam estar ligadas à influência da microbiota. Essa microbiota desempenha um papel crucial na formação de compostos específicos que são produzidos como resultado de técnicas particulares de fermentação (BRIOSHI JUNIOR et al., 2020; GOMES et al., 2022; SILVA et al., 2022).

Dentre as técnicas de fermentação, a maceração carbônica tem se destacado. Essa técnica, explora a resposta dos frutos intactos de café a um meio com ausência de oxigênio e enriquecido com dióxido de carbono, o qual resulta em transição de um metabolismo respiratório anaeróbico para um meio fermentativo dentro de cada fruto (TESNIERE e FLANZY, 2011; GOMES et al.; 2022). Esse fenômeno tende a melhorar o perfil sensorial e químico dos cafés (BRIOSHI JUNIOR et al.; 2020; GOMES et al.; 2022). Demanda, no entanto, melhor compreensão do efeito que o binômio tempo e temperatura exercem na qualidade dos cafés submetidos a este procedimento.

Ademais, considerando a hipótese de que a maceração carbônica aplicada aos frutos de café contribui para a melhoria da qualidade sensorial e química de café Arábica de altitude de transição, objetivou-se, com este estudo, avaliar o perfil sensorial e químico de cafés cultivados em altitude de transição e submetidos a diferentes tempos e temperaturas de fermentação pelo método de maceração carbônica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1.Época e local da colheita dos frutos

Os frutos de café da espécie *Coffea arabica* L. cultivar MGS Turmalina foram colhidos em junho de 2022 em plantas cultivadas em sistema irrigado localizadas no distrito de Lagoa Seca, interior do município de Alegre, no sul do estado do Espírito Santo, Brasil (20°52'07"S e 41°28'43"W), em região considerada de altitude de transição, entre o cultivo das espécies *C. arabica* e *C. canephora* (640 metros de altitude em relação ao nível médio dos mares). Para o ano agrícola de 2021-2022 a região apresentou uma precipitação acumulada de 1250 mm e temperatura média anual de 24,18 °C.

2.2. Matérias primas, Tratamentos e delineamento experimental

Os frutos do cafeeiro Arábica foram colhidos de forma manual e encaminhados para a unidade de beneficiamento de café localizada no Laboratório de Análise e Pesquisa do Café – LAPC do Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Campus Venda Nova do Imigrante. Posteriormente foi realizado o processo de separação das impurezas, gravetos, folhas e dos frutos que boiavam (secos, brocados, imaturos e malformados) dos frutos cerejas e verdes.

Quatro litros de cafés maduros (2,6 kg) foram acondicionados em sacos plásticos liso de polipropileno apresentando as dimensões de 40 cm x 50 cm de largura e comprimento e 18 mm de espessura e posteriormente submetidos ao processo de fermentação.

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições, no esquema fatorial 2x4 em parcelas subdivididas, sendo que as parcelas foram compostas por duas temperaturas (30 e 60°C) em BOD's e as subparcelas compostas por cinco tempos de fermentação, pelo método de maceração carbônica (24, 72, 126 e 162 horas de fermentação).

Para remover o ar atmosférico das unidades experimentais utilizou-se uma seladora a vácuo (modelo ROBOTIC 900/1200 PLACAS) por 20 segundos com CO₂ (pureza de 99,9%) injetado com 20 kgf cm⁻² de pressão. As unidades experimentais foram colocadas em quatro incubadoras verticais BOD modelo NL 161/01, com temperatura programável entre -10 a 700 °C, variação de ± 0,1 °C e circulação forçada de ar por ventilação interna. Ao final de cada fermentação, foi verificada a integridade física dos sacos plásticos, de forma a garantir que não ocorreu contaminação com o ar atmosférico, sendo estes então, encaminhados para a unidade de secagem, previamente higienizada (BRIOSCHI JUNIOR et al.; 2021).

Os cafés de cada unidade experimental foram secos ao sol até atingirem aproximadamente 12% de umidade (base úmida) por um período que variou de 30 a 45 dias em ambiente coberto com cobertura plástica, em sistema conhecido como terreiro suspenso. No período de secagem a temperatura foi monitorada pelo sistema Arduino Uno R3—Bluetooth Module Hc-06 Rs232—Humidity and Temperature Sensor Dht22 Am2302—SD Card Module, sendo que a temperatura média foi de 19,33 °C, com máxima de 27,75 °C (dia) e mínima de 13,00 °C (noite).

2.3. Características sensoriais dos grãos

Os grãos retidos nas peneiras de granulometria de 16 a 18, foram utilizados para realização das avaliações referentes a qualidade da bebida, seguindo o protocolo SCA. A torra foi realizada com o auxílio do torrador Probatino da Probat© com conjunto de discos Agrtron-SCAA. Para o processo de torra adotou-se o padrão em que as amostras localizavam-se entre as cores determinadas pelos discos #75 e #45 para cafés especiais (SCA, 2013).

Após o período de descanso de oito horas, posterior ao processo de torra, foi realizada a moagem das amostras de cafés em moedor elétrico Bunn G3, com granulometria média/grossa. Após o resfriamento, as amostras moídas foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados e armazenadas conforme a metodologia de análise sensorial estabelecida pela SCA (SCA, 2013).

As análises sensoriais foram realizadas seguindo a metodologia proposta por Pereira et al. (2018), alinhado ao protocolo oficial da Associação de Cafés Especiais (SCA, 2013). Logo, amostras de 8,25 g café moído e torrado de cada tratamento foram distribuídas nas xícaras preparadas para degustação, nas quais foram adicionados 150 ml de água fervente ao ponto de infusão de 92 a 95 °C, em conformidade com o ponto médio do gráfico de equilíbrio ótimo para obtenção do *Golden Cup* (SCA, 2021). Cinco xícaras foram preparadas para cada amostra, conforme proposto. A equipe de degustadores, composta por seis provadores profissionais (*Q-Graders*), procedeu a análise sensorial. As avaliações tiveram início quando a temperatura das xícaras atingiu 55 °C, respeitando o tempo de 4 minutos para a degustação após a infusão (SCA, 2013).

Seguindo o formulário de degustação, foram avaliados onze importantes atributos para o café: Fragrância/Aroma, Uniformidade, Ausência de Defeitos (Copo Limpo), Doçura, Sabor, Acidez, Corpo, Sabor residual, Equilíbrio, Pontuação Geral e Score Final.

2.4. Análise de Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas

Para a extração dos compostos voláteis, 3 g de cada amostra de café fermentado foram transferidos para um frasco headspace de 20 mL, selado com tampa metálica e septo de silicone. As amostras foram aquecidas a 95 °C por 15 minutos, posteriormente uma alíquota contendo 1 mL da fração volátil foi coletada dos frascos com o auxílio de uma seringa de headspace de 2,5 mL aquecida a 100 °C e, em seguida, injetada no sistema cromatógrafo.

Foram aplicados procedimentos de separação para os compostos, usando capilares VB-WAX e VB-5, fornecidos pela Valco Bond (Valco Instruments, EUA). Hélio serviu como gás de arraste, com uma taxa de 1,5 mL/min, fornecida pela White Martins (6,0). O injetor foi

operado a uma temperatura de 240 °C no modo splitless por um período de 0,20 minutos (LYRIO et al., 2023)

A programação da temperatura da coluna teve início a 40°C, aumentando a uma taxa de aquecimento de 4°C/min até 120°C. Em seguida, a taxa de aquecimento foi ajustada para 10°C/min até atingir 230°C, mantendo-se nessa temperatura por 8 minutos. O espectrômetro de massas operou utilizando ionização por elétrons, com uma faixa de massas de m/z 35–300. O intervalo de aquisição foi de 0,03 segundos, e o solvente foi cortado após 2,5 minutos (LYRIO et al., 2023).

Para identificar os compostos presentes nas amostras de café, foram comparados os espectros de massa experimentais com informações das bibliotecas espectrais (NIST11 e WILEY7). O do índice de retenção linear (LRI) foi realizado com a ajuda de uma série de n-alcenos (C8-C40), seguindo as mesmas condições das análises das amostras. Os valores do LRI foram então comparados com referências literárias para colunas polares de polietilenoglicol (Wax) e fases estacionárias equivalentes na biblioteca NIST11.148.

Enquanto a coluna VB-5 foi utilizada como reforço adicional para confirmar a identificação dos compostos, a coluna VB-Wax foi empregada para analisar todo o volume das amostras. A avaliação da abundância relativa dos compostos baseou-se na integração individual dos picos em relação à área total nos cromatogramas de íons totais (TIC) e íons específicos (EIC). O processamento dos dados do GCMS foi realizado utilizando o software Labsolutions (solução GCMS 68 versão 4.20).

2.5. Análise estatística

Após a obtenção dos resultados foi realizada uma análise estatística usando o método de classificação supervisionada Análise Discriminante Linear (ADL) usando o software Matlab®. Os modelos ADL foram construídos com os resultados de compostos químicos visando uma classificação em relação ao tempo e temperatura de fermentação. Os espectros de RMN de 1 H foram integrados e o conjunto de áreas obtido para cada amostra foi utilizado na construção do modelo ADL. As amostras foram divididas em dois grupos utilizando o algoritmo de Kennard e Stone (1969) para construção e validação do modelo.

Os dendrogramas foram construídos no software Bionumeric versão 6.0 (Applied Maths, Inc.; Austin, Texas, EUA) utilizando o índice de similaridade de Dice e análise de agrupamento com o método de variância mínima de Ward.

A análise de coordenadas principais (PCoA) foi calculada com base na distância de Bray-Curtis entre os valores e o ajuste das variáveis sensoriais feito pela função disponível na biblioteca vegana 2.5.6. Cálculos de variação de riqueza, uniformidade (Pielou) e diversidade (Simpson) foram usados no pacote disponível no vegano 2.5.6 (OKSANEN, et al 2019). Todas as análises foram realizadas usando o software R (R Core Team, 2019) e as visualizações gráficas no ggplot2 (WICKHAM, 2016).

Os modelos de regressão e coeficientes de determinação (R^2) foram testados pelo teste F e teste 't'. Também foi realizada a análise de componentes principais explorando a dispersão dos diferentes tempos e temperaturas de fermentação em função dos diferentes atributos sensoriais utilizando o programa estatístico R Core team (2019).

Para avaliar as semelhanças entre as interações temperatura e fermentação, foram feitas matrizes com as médias das variáveis sensoriais (fragrância/aroma, sabor, sabor residual, acidez, corpo, equilíbrio, doçura, xícara limpa, uniformidade e score final) e, posteriormente, foram construídos dendrogramas usando a distância Euclidiana média para medir as distâncias entre temperatura e tempo de fermentação, utilizando o programa estatístico R Core team (2019).

3. RESULTADOS

Percebe-se pelo teste "F", que em 24 horas e 72 horas de fermentação, o Score total para as temperaturas de fermentação de 30°C e 60°C foram estatisticamente iguais (Tabela 1). No entanto, quando se empregava a fermentação em 120 horas e 162 horas, o café fermentado a 30°C apresentava Score total significativamente superior ao obtido na temperatura de 60°C.

Tabela 1. Modelos de regressão da característica score final (pontos) em função da temperatura e tempo de fermentação e respectivos coeficientes de determinação R^2

Tempo de fermentação (h)	Temperatura de fermentação (°C)	
	30	60
24	82,68 ± 0,37 ^{ns}	82,14 ± 0,57 ^{ns}
72	82,46 ± 0,31 ^{ns}	82,32 ± 0,45 ^{ns}
120	84,31 ± 1,22*	82,64 ± 0,42*
162	84,76 ± 0,72*	82,61 ± 0,76*
R^2	0,9371*	0,8952*
Equação de regressão	$y = 0,0219x + 81,313^*$	$y = 0,0036x + 82,082^*$

* Significativo e ^{ns} não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F.

Para ambas as temperaturas de fermentação estudadas o modelo estatístico que melhor se ajustou foi o modelo linear, apresentando uma tendência de incremento de qualidade à medida que se aumentava o tempo de fermentação. Desta forma, é possível notar que quando os grãos de café foram submetidos a temperatura de fermentação de 60°C, correu um

incremento no Score sensorial de 0,47 pontos entre 24 horas e 162 horas de fermentação, enquanto que para o mesmo café fermentado a 30°C ocorreu um incremento mais acentuado de qualidade sensorial alcançando um Score de 2,08 pontos entre o tempo de 24 horas e 162 horas de fermentação.

Pela análise do dendograma hierárquico (Figura 1A), percebe-se a formação de três grupos de tratamentos, sendo que o primeiro grupo foi formado pelos cafés que ficaram submetidos a 120 horas e 162 horas de fermentação por maceração carbônica e uma temperatura de 30°C, o segundo grupo foi formado pelos cafés oriundos do tempo de fermentação de 24 horas a uma temperatura de 30°C, bem como nos tempos de 24 horas e 72 horas a 60°C, enquanto que o terceiro grupo formou-se pela junção dos cafés oriundos do tempo de fermentação de 72 horas a 30°C, 120 horas a 60°C e 162 horas a 60°C.

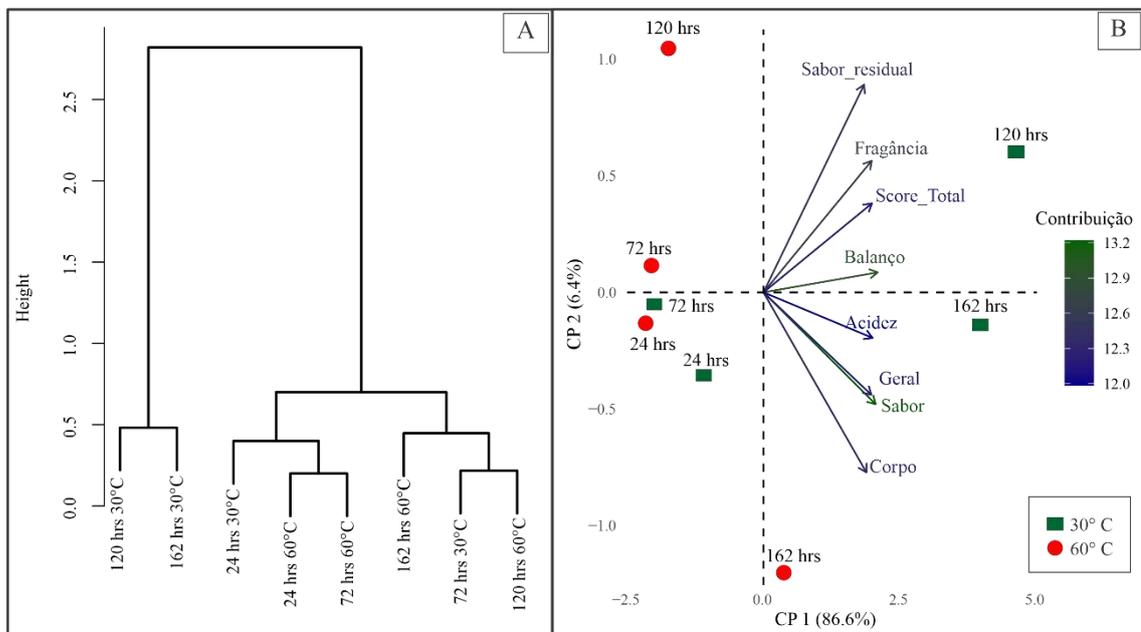


Figura 1. Agrupamento hierárquico (A) e dispersão gráfica dos dois primeiros componentes principais (B), dos diferentes atributos sensoriais de cafeeiro *Arábica* cultivado em altitude de transição e submetido a diferentes tempos (24; 72; 120; e 162 horas) e temperatura (30°C e 60°C) de fermentação, pelo método de maceração carbônica.

O agrupamento hierárquico apresentou respostas similares às extraídas da análise de componentes principais, onde pode-se observar que as maiores associações entre os tratamentos e os atributos de qualidade sensorial foram encontradas nos tempos de 120 horas e 162 horas quando submetidos a uma temperatura de 30°C durante o período de fermentação (Figura 1B).

Percebe-se por meio da dispersão gráfica dos dois primeiros componentes principais, que os menores tempos de fermentação por maceração carbônica, independentemente da temperatura na qual o processo ocorreu, apresentaram menor associação com todos os atributos sensoriais do cafeeiro (Figura 1B). Ademais, pode-se presumir que existe uma tendência para

melhorar a qualidade sensorial à medida em que se aumenta o tempo de fermentação dos cafés pelo método de maceração carbônica. Percebe-se ainda, que essa tendência é menos significativa quando a temperatura de fermentação é de 60°C.

Ressalta-se ainda pela interpretação da Figura 1B, que os cafés fermentados por 120 horas e 162 horas a 30°C apresentaram a maior associação com os componentes sensoriais do cafeeiro. Por outro lado, os cafés fermentados pelo mesmo tempo de fermentação, porém a uma temperatura de 60°C, localizaram-se distantes entre si no dendrograma e com menor proximidade com as características sensoriais, demonstrando que embora o ajuste linear crescente fosse significativo (Tabela 1), a associação com a qualidade é menos expressiva nesses cafés.

Na Tabela 2 encontram-se os 86 compostos voláteis identificados nas amostras de cafés submetidos a diferentes tempos e temperaturas de fermentação. Na Figura 2 encontra-se disposto o diagrama de dispersão dos cafés submetidos a diferentes tempos e temperaturas de fermentação para os 86 compostos químicos.

Tabela 2. Compostos voláteis identificados em café Arábica fermentado por 24, 72, 120 e 162 horas a 30°C e 60°C

Nun.	Composto	Nun.	Composto	Nun.	Composto
1	Ácido acético	31	3-Penten-2-ona, (E)-	61	Fenol, 2-metoxi-
2	Ácido butanoico	32	1-butanol, 3-metil-, acetato	62	4-(hidroximetil) dihidro-2H-piran-3(4H) -ona
3	Ácido butanóico, 3-metil-	33	Ácido benzóico, 2-hidroxi-, éster metílico	63	4H-Piran-4-ona, 2,3-di-hidro-3,5-di-hidroxi-6-metil-
4	Ácido fórmico	34	Ácido butanóico, éster 2-propenílico	64	1-(2-Pirazinil) etanona
5	ácido propanoico	35	Ácido butanóico, 3-metil-, éster etílico	65	2,6-Dimetil pirazina
6	(R, R) -butano-2,3-diol	36	Butirolactona	66	2-Metil pirazina
7	1-butanol, 3-metil-	37	Acetato de isobutila	67	pirazina
8	1-Penten-3-ol	38	Triacetina	68	Pirazina, 2,3-dimetil-
9	2-Heptanol	39	butirato de vinil	69	Pirazina, 2,5-dimetil-
10	3-Buten-1-ol, 3-metil-	40	(furan-2-il) metanol	70	Pirazina, 2-etil-3-metil-
11	Benzenoetanol	41	1-(2-Furil) -2-propanona	71	Pirazina, 2-etil-5-metil-
12	Álcool benzílico	42	1-(5-Metil-2-furil) -2-propanona	72	Pirazina, 2-etil-6-metil-
13	Butenol, metil-	43	2(5H) –furanona	73	pirazina, etenil-
14	álcool isoamílico	44	2,5-Dimetil-3(2H) furanona	74	pirazina, etil-
15	álcool isobutílico	45	2,5-Dimetil-4-hidroxi-3(2H) –furanona	75	pirazina, trimetil-
16	Linalol	46	2,5-Furandiona	76	3-Piridinol
17	Maltol	47	2-Furancarboxaldeído, 5-metil-	77	4(H)-Piridina, N-acetil-
18	2-Butenal, 2-metil-	48	2-Furanmetanol, 5-metil-	78	piridina
19	Hexanal	49	2-Furanmetanol, acetato	79	Piridina, 2-metil-
20	1,2-Yclopentanodiona,3metil-	50	2-Furanona,2,5-dihidro-3,5-imetil	80	1H-Pirrol, 1-(2-furanilmetil) -
21	1-Aza-2,4-ciclopentadieno	51	2-Vinil-5-metilfurano	81	1H-Pirrol, 1-metil-
22	1-hidroxi-2-butanona	52	2-Vinilfurano	82	1H-Pirrol, 2,5-dimetil-
23	2,3-Butanodiona	53	5-hidroximetil-2-furaldeído	83	1H-Pirrol-2-carboxaldeído
24	2,3-Hexanodiona	54	5-Hidroximetilfurfural	84	Etanona, 1-(1H-pirrol-2-il) -
25	2,3-Pentanodiona	55	Etanona, 1-(2-furanil) -	85	1,2-Dimetilsulfeto

26	2-Butanona, 3-hidroxi-	56	Furfural	86	4-Metiltiazol
27	2-Ciclopenten-1-ona	57	Furano, 2,5-dimetil-	87	tiazol
28	2-hidroxi-3-pentanona	58	Furano, 2-(metoximetil)-	88	tiofeno
29	2-Propanona, 1-(acetiloxi)-	59	Hidroperóxido, 1,1-dimetiletil		
30	2-Propanona, 1-hidroxi-	60	2-Metoxi-4-vinil-fenol		

Constata-se uma tendência de agrupamento dos cafés fermentados a 30°C, assim como o café fermentado por 24 horas a 60°C para a região negativa do principal componente 1 (PC1) e positiva para o componente principal 2 (PC2). Destaca-se que para essa região específica os compostos Ácido butanóico, 3-metil; 2,3-Butanodiona; 2,3-Pentanodiona; 2-Propanona, 1-hidroxi; 3-Penten-2-ona, (E); Ácido benzóico, 2-hidroxi-, éster metílico; 2,5-Furandiona; 5-hidroximetil-2-furaldeído; Etanona, 1-(2-furanil)-; Furfural; 4H-Piran-4-ona, 2,3-di-hidro-3,5-di-hidroxi-6-metil-e o 1,2-Dimetilsulfeto, compuseram a maior participação na composição desta região do diagrama (Figura 3A, Figura 3 B e Tabela 2).

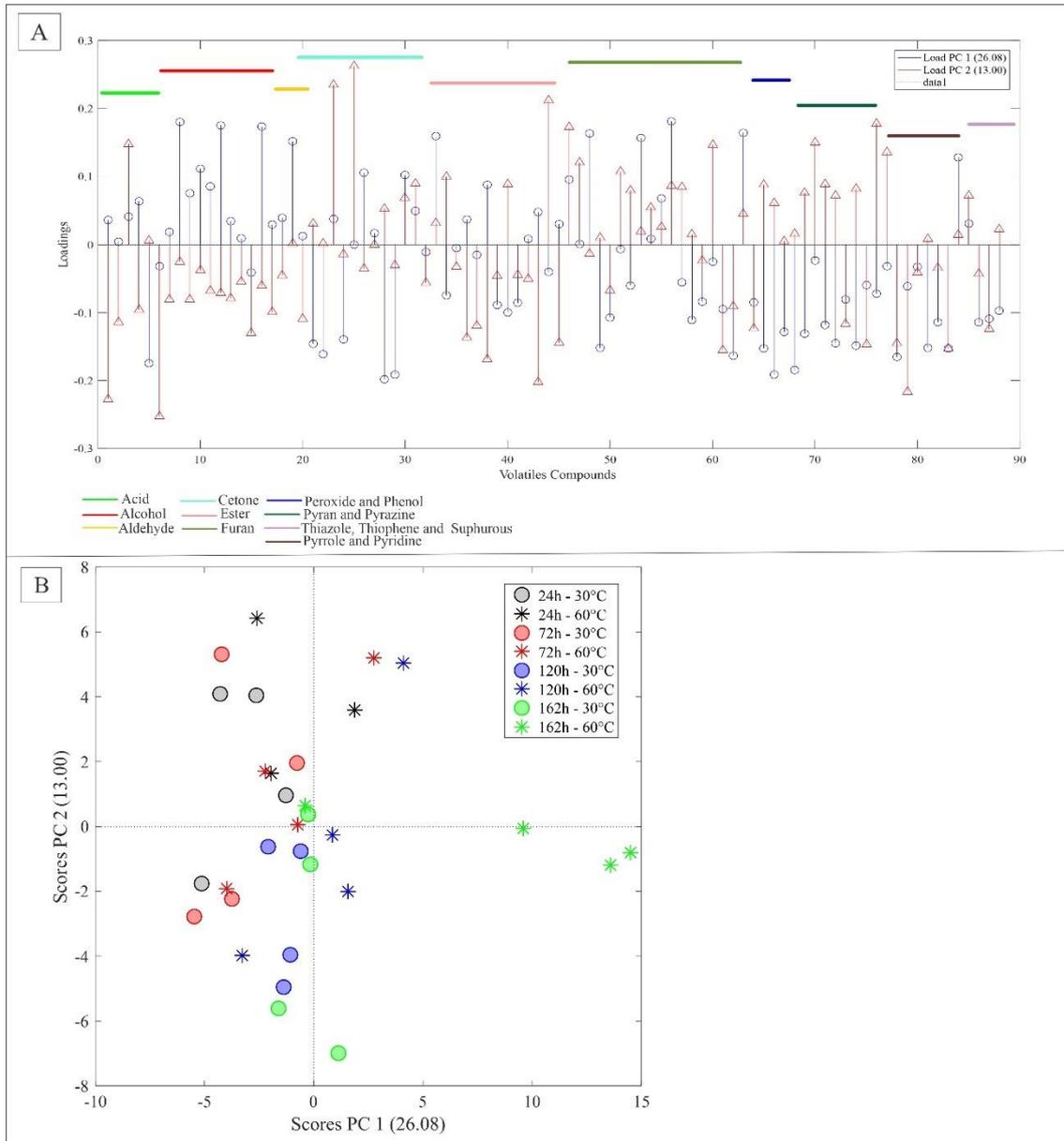


Figura 2. Dispersão gráfica dos dois primeiros componentes principais, associados compostos químicos de cafés oriundo de cafeeiro Arábica cultivado em altitude de transição e submetido a diferentes tempos (24 hrs, 72 hrs, 120 hrs e 162 hrs) e temperatura (30°C e 60°C) de fermentação, pelo método de maceração carbônica (A) e contribuição dos 86 compostos químicos para a formação dos dois primeiros componentes principais (B).

Para os cafés que apresentaram maior tendencia a fornecer boa qualidade sensorial quando fermentados a 120 horas e 162 horas a 30°C (Tabela 1), a localização no diagrama de dispersão ocorreu nas regiões negativas para o PC1 e PC2. Essa região específica foi mais associada aos compostos (R,R)-Butano-2,3-diol; álcool isobutílico; 2-Propanona, 1-(acetiloxi); Acetato de isobutila; butirato de vinil; 1-(2-Furil)-2-propanona; 1-(5-Metil-2-furil)-2-propanona; 2-furanmetanol, acetato; 2-furanona, 2,5-di-hidro-3,5-dimetil; 4-(hidroximetil)di-hidro-2H-piran-3(4H)-ona; 4H-Piran-4-ona, 2,3-di-hidro-3,5-di-hidroxi-6-metil; 2,6-dimetil pirazina; Pirazina, etenil-; Pirazina, trimetil-; 3-Piridinol; 4(H)-Piridina, N-acetil-; piridina;

Piridina, 2-metil-; 1H-Pirrol, 1-(2-furanilmetil)-; 1H-Pirrol, 1-metil-; Etanona, 1-(1H-pirrol-2-il)-e o 1,2-Dimetilsulfeto (Figura 2 e Tabela 2).

Outra informação interessante que se pode extrair da Figura 3 é que os cafés fermentados a 162 horas a 60°C agruparam-se na região positiva para os componentes PC1 e PC2, situando-se distantemente dos demais cafés. Para essa região do diagrama de dispersão os compostos ((R,R)-Butano-2,3-diol; 1-butanol, 3-metil-; 1-Penten-3-ol; 2-Heptanol; 3-Buten-1-ol, 3-metil; Benzenoetanol, 2-Metilpirazina, H, Hexanal e Álcool Isobutílico foram os que apresentaram maior participação na formação do diagrama (Figura 3 B e Tabela 2).

Pela análise de correlação de Person entre os grupos de compostos e os atributos sensoriais analisados, percebe-se que os álcoois, os ácidos e os ésteres apresentaram correlação superior a 0,50 com o atributo Score total. Os álcoois apresentaram ainda, correlação de 0,8025 com a fragrância dos cafés, 0,6714 com o sabor, 0,5493 com o corpo, 0,7358 com o sabor residual, 0,7171 com balanço e 0.6940 com o score total, sendo o composto que apresentou as maiores correlações com os atributos sensoriais positivos (Tabela 3).

Tabela 3. Correlação de Person entre os grupos de compostos químicos e as análises sensoriais de cafés submetidos a fermentação por maceração carbônica por diferentes tempos e temperaturas.

	Fragrance	Flavor	Acidity	Body	Overall	Aftertaste	Balance	Total Score
Acid	0,5046	0,4975	0,4008	0,2812	0,5766	0,4906	0,5502	0,5430
Alcohol	0,8025	0,6714	0,4745	0,5493	0,7358	0,5036	0,7271	0,6940
Aldehyde	-0,0358	-0,2043	-0,2730	-0,3633	-0,1228	-0,2924	-0,2461	-0,2084
Cetone	-0,4022	-0,3698	-0,2900	-0,3120	-0,4170	-0,4214	-0,4664	-0,4270
Ester	0,7111	0,5079	0,3416	0,4196	0,5460	0,4137	0,4981	0,5118
Furan	-0,4378	-0,4094	-0,4450	-0,4573	-0,4179	-0,3687	-0,5351	-0,4659
Peroxide	-0,0201	-0,0947	-0,0226	0,0180	-0,0487	0,0313	-0,0112	-0,0302
Phenol	-0,5579	-0,5752	-0,4999	-0,4988	-0,6153	-0,3398	-0,5723	-0,5724
Pyran	-0,1518	-0,1702	-0,3590	-0,4095	-0,2164	-0,1953	-0,3583	-0,2881
Pyrazine	-0,2284	-0,1896	-0,0011	0,0702	-0,2292	-0,1094	-0,0810	-0,1535
Pyridine	0,0608	0,1088	0,1151	0,3236	0,0356	0,1574	0,1847	0,1633
Pyrrrole	-0,1686	-0,1300	-0,0649	0,0726	-0,3040	-0,1762	-0,0932	-0,1175
Sulphurous	-0,2266	-0,2055	0,0208	-0,2598	-0,2134	-0,1865	-0,1200	-0,1815
Thiazole	-0,1084	-0,0252	-0,1345	0,1209	-0,0652	0,0109	0,0040	-0,0264
Thiophene	-0,3889	-0,4176	-0,2220	-0,1793	-0,4362	-0,4262	-0,2968	-0,3618

Percebe-se ainda que a correlação entre o score total (Tabela 3), e os compostos cetonas, furanos e fenóis foram respectivamente de -0,4270; -0,4659 e -0,5724, pressupondo que a presença destes compostos nos cafés está diretamente associada a degradação da qualidade sensorial. Os compostos fenólicos apresentaram correlação de -0,5579 com a fragrância, -0,5752 com o sabor, -0,4999 com a acidez, -0,4988 com o corpo, -0,6153 com a qualidade geral;

-0,3398 com o sabor residual ou o retrogosto; -0,5723 com o balanço e -0,5724 com o score total, apresentando a maior relação negativa com os atributos sensoriais.

Pela análise da dispersão das unidades experimentais em relação aos grupos de compostos químicos (Figura 3), percebe-se que os cafés fermentados por 120 horas a 30°C e a 60°C e os cafés fermentados por 162 horas a 30°C situam-se dentro de um mesmo grupo e obtiveram boa associação com os ésteres, ácidos e álcool. É interessante destacar, que esses cafés apresentaram o maior score sensorial (Tabela 1) e situaram-se bem associados com os compostos que apresentaram correlação alta (Tabela 3), com os parâmetros de qualidade sensorial.

A região do diagrama de dispersão na qual situavam-se os demais cafés fermentados a 60°C, no entanto, localizou-se em região com uma forte associação com os cetona, furano, sulfuroso, pirano e aldeído. Destaca-se ainda que os compostos do grupo dos piranos e dos aldeídos estão localizados na mesma região gráfica dos cafés fermentados por 162 horas a 60°C.

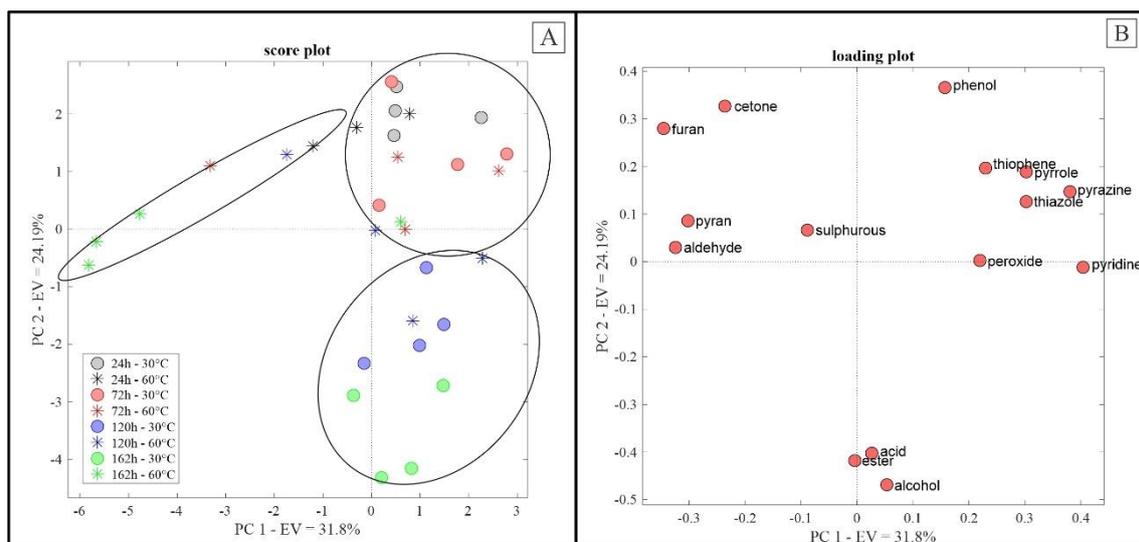


Figura 3. Diagrama de dispersão dos dois primeiros componentes principais associados a quatro tempos de fermentação (24; 72; 120 e 196 horas) e duas temperaturas (30°C e 60°C), de cafés Arábicas cultivados em altitude de transição e fermentados pelo método de maceração carbônica.

Por fim, percebe-se que os cafés oriundos dos demais tempos de fermentação (24 e 72 horas fermentados a 30°C e 60°C), localizam-se na região positiva para os CP1 e CP2, apresentando ainda boa associação com o fenol, tiofeno, pirrol, pirazina, tiazol, peróxido e piridina (Figura 3A e Figura 3B), os cafés que performaram esse grupo apresentaram os scores sensoriais mais baixo (Tabela 1), bem provável em virtude da correlação negativa que grande parte destes compostos apresentam com o score total (Tabela 3).

4. DISCUSSÃO

A fermentação dos frutos de café por maceração carbônica foi capaz de maximizar o potencial de qualidade sensorial de cafés cultivados em altitude de transição, principalmente quando se trabalhou com cafés fermentados a 30°C por um período superior a 120 horas de fermentação (Tabela 2).

Na literatura, é destacado que a produção de cafés especiais em regiões restritivas para a produção de café Arábica tende a ser menos favorecida que em regiões de altitude (SOBREIRA et al.; 2016; BARBOSA et al.; 2019; BERTRAND et al.; 2012b, FERREIRA et al.; 2022). Contudo, os resultados alcançados com o auxílio da técnica de maceração carbônica, embasam a hipótese de que a produção de cafés especiais em altitude de transição é possível.

A maceração carbônica é comumente referida na fermentação de vinhos (AYESTARÁN et al.; 2019), porém nos últimos anos a técnica tem sido testada para o café, sendo necessário, no entanto, mais validações da técnica visando alcançar o padrão adequado do binômio tempo temperatura de fermentação para o café.

Conforme descrito por Brioshi Junior et al. (2020) e por Gomes et al. (2022), a relevância do tempo de fermentação dos frutos de café no método de maceração carbônica é possivelmente atribuída ao enriquecimento do mosto de fermentação com os açúcares provenientes da mucilagem do café. Esse aspecto se manifesta de forma mais acentuada quando a fermentação se prolonga por um período mais longo, criando, dessa forma, um ambiente mais propício para o crescimento microbiano.

Para Gomes et al. (2022) o enriquecimento sensorial da bebida ocorre quando o binômio tempo e temperatura favorecem fermentações alcoólicas por leveduras e maloláticas por bactérias lácticas, beneficiando o perfil sensorial e químico do café, sendo que tempos mais curtos de fermentação podem ser insuficientes para o desenvolvimento dos microrganismos que atuam nestas etapas (BRIOSHI JUNIOR et al.; 2020; GOMES et al.; 2022). De fato, percebe-se que independentemente da temperatura de fermentação, tempos mais elevados foram mais benéficos para a qualidade sensorial.

Percebe-se também pela análise dos resultados alcançados neste trabalho, que diferentes tempos e temperaturas de fermentação por maceração carbônica proporcionaram variabilidade nos perfis sensoriais e químicos do café (Tabela 2, Figura 1, Figura2, Figura 3 e Figura 4), corroborando os relatos recentes da literatura.

Ressalta-se ainda, que os menores tempos de fermentação, independentemente da temperatura utilizada, proporcionaram a menor associação com todos os atributos sensoriais

estudados (Figura 1B). Ademais, percebe-se que assim como descrito por Gomes et al. (2022) para o cafeeiro Conilon, Brioshi Junior et al. (2021), para o cafeeiro Arábica de altitude e por Santamaria et al.; (2022) para vinhos, o binômio tempo/temperatura afetou de forma direta a composição química e sensorial do café tornando-se vital para o processo de fermentação.

O melhor perfil sensorial dos cafés ocorreu quando eles foram fermentados a 30°C por pelo menos 120 horas (Tabela 1, Figura 1A e Figura 1B), sendo que esses cafés apresentaram uma maior associação com os compostos alcoólicos e ácidos, que possivelmente foram favorecidas pela ação dos microrganismos em virtude da melhor extração de açúcares dos frutos para o mosto de fermentação (GOMES et al.; 2022).

Esse comportamento também foi observado por Brioshi Júnior et al. (2021) para o café Arábica, Gomes et al. (2022) para o café conilon e por Ayestarán et al. (2019) para vinhos. Percebe-se que embora tenha ocorrido um padrão entre os diferentes estudos utilizando a técnica de maceração carbônica para o café, o tempo de fermentação mudava em função da espécie e da condição edafoclimática de onde o café foi colhido.

Para o *Coffea canephora* as maiores alterações no perfil sensorial ocorreram quando o café foi fermentado a uma temperatura na faixa dos 38°C por tempo superior 72 horas (Gomes et al.; 2022). No cafeeiro Arábica cultivado a 1050 metros de altitude o melhor perfil sensorial e químico foi alcançado a 38°C por 96 horas (BRIOSHI JÚNIOR et al.; 2021), enquanto para altitude de transição, o melhor perfil sensorial foi encontrado quando o café foi fermentado a 30°C em tempo superior a 120 horas (Tabela 1, Figura 2 e Figura 3).

Desta forma, embora seja notório que o aumento do tempo de fermentação seja fundamental para que ocorra a contribuição direta dos microrganismos na composição química e sensorial do café (BRIOSHI JUNIOR et al.; 2021; GOMES et al.; 2022; CHAN et al.; 2023; FERREIRA et al.; 2023), existe variabilidade entre os tempos de fermentação do café pelo método de maceração carbônica para uma faixa próxima de temperatura. Essa variabilidade possivelmente ocorre em virtude da condição genética da planta e das condições edafoclimáticas e microbiológicas do local de cultivo do cafeeiro (BRIOSHI JUNIOR et al.; 2021; GOMES et al.; 2022; PEREIRA et al.; 2023; FERREIRA et al.; 2023).

Conforme destacado por Veloso et al. (2020), existe uma grande riqueza de microrganismos que se encontram presentes nos frutos do cafeeiro a nível de campo, os microrganismos endofíticos. A riqueza destes microrganismos nos frutos dos cafés varia conforme a origem geográfica da lavoura, método de processamento pós colheita do café, genótipo e espécie de café estudados, e fatores edafoclimáticos da lavoura (VELOSO et al.; 2020), justificando assim,

essa diferença encontrada entre os achados destes trabalhos e os reportados por Brioshe Junior et al. (2021) e Gomes et al. (2022).

No processo de maceração carbônica, quando as cerejas de café são submetidas ao ambiente enriquecido com dióxido de carbono (CO₂) e com restrição de oxigênio, neste ambiente ocorrem processos em que as antocianinas e os taninos da casca migram até a polpa, mudando a cor da casca do café, sendo que, esse momento o ajuste de temperatura é crucial para fornecer condições ideais para que os microrganismos atuem na fermentação (PEREIRA et al.; 2020b), sendo que o bonômio tempo e temperatura tornan-se fundamentais neste processo (GOMES et al., 2022).

Nie et al. (2021) enfatizam ainda, que a temperatura é um dos fatores que afetam de forma direta o metabolismo da comunidade microbiana e sua eficiência e estabilidade no sistema fermentativo em condições anaeróbicas. Ressalta-se que em condição de temperaturas superiores a 60°C prevalece a ação de microrganismos considerados termofílicos (MANDIGOU et al.; 2019; HUPFAUF et al.; 2018). Esses microrganismos são mais sensíveis a compostos antioxidantes, que normalmente são tóxicos para grande parte da comunidade termofílica, inibindo o seu crescimento (RAMOS et al.; 1996; ROS et al.; 2017 LI et al.; 203; VITZOVA et al.; 2020).

Ademais, ressalta-se que uma possível redução no crescimento microbiano pode ter ocorrido neste trabalho, haja vista que é destacado na literatura que a fermentação aumenta a atividade antioxidante do café (BONDAM et al.; 2022; WU et al.; 2022; MYO et al.; 2021). O aumento dos teores de compostos antioxidantes juntamente com o aumento de etanol do mosto e alteração no pH, pode ter ocasionado em uma redução da ação da comunidade microbiana ativa no mosto de fermentação, proporcionando assim efeito direto sobre a qualidade do café fermentado a 60°C.

Como descrito anteriormente o crescimento da comunidade bacteriana no mosto de fermentação varia conforme o tempo e a temperatura (BRIOSHI JUNIOR et al.; 2021). Embora Brioshi Junior et al (2021) não tenham trabalhado na faixa de temperatura que favorecesse a ação dos microrganismos termofílicos, os autores enfatizaram que a etapa do processo de fermentação afeta de forma direta a riqueza microbiana do sistema, sendo que os fungos e as espécies de levedura como *accharomyces kudriavzevii* e *Saccharomyces uvarum* foram os organismos mais sensíveis ao aumento de temperatura (BRIOSHI JUNIOR et al.; 2021).

Destaca-se ainda que a fermentação termofílica dos grãos de café está associada a compostos voláteis que conferem sabor indesejável à bebida. Percebe-se nos cafés fermentados a 60°C a presença de compostos como o Hexanal, (R,R)-Butane-2,3-diol e 2-Methyl pyrazine

(Tabela 2 e Figura 2) que conferem redução da qualidade sensorial do café (VAZZULLI et al. 2023).

A 2-Metil pirazina foi identificada por Cantergiani et al (2001) como um composto que associa a sabores terrosos e de mofado a bebida. O composto (R,R)-butano-2,3-diol é destacado por Toci e Farah (2014) por ser um composto que tem sua prevalência em sistemas de fermentação de alta temperatura e está associado com a acidez dos cafés, a uma redução na qualidade do aroma da bebida e a um aumento nos sabores terrosos e verdes da bebida.

Conforme destacado por Bertrand et al (2012a) e Vazzulli et al. (2022) o Butano-2,3-diol e o Hexanal apresentam correlações altas com atributos terrosos, ácidos e amargos. Esse fato pode ocorrer em função da possibilidade de o Hexanal ser produzido pela degradação oxidativa de ácidos graxos insaturados durante o processo de armazenamento ou fermentação do café.

Os compostos aldeído, cetona, furano, fenol e tiofeno foram os que apresentaram o maior número de correlações negativas com os atributos sensoriais estudados (Tabela 3). Esses compostos foram associados com os cafés fermentados por um período de tempo inferior a 72 horas para ambas temperaturas de fermentação bem como em 120 e 162 horas em cafés fermentados a 60°C.

Conforme destacado por Agnoletti et al (2022) e Caporaso et al. (2018), os compostos fenólicos são produtos originados da degradação de diferentes isômeros dos ácidos clerogênicos. A ação de leveduras em grãos verdes de café, proporcionam a descarboxilação do ácido cumárico formando um composto fenólico que pode afetar os atributos acidez e sabor residual (CAPORASO et al., 2018; AGNOLETTI et al., 2022).

Cafés fermentados por mais de 120 horas a 30°C foram associados aos compostos ácidos ester e álcool (Figura 3), que conseqüentemente apresentaram correlações positivas com os atributos sensoriais positivos do café (Tabela 3). Os álcoois podem ser produzidos pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* a partir de acil-CoA ou ácidos graxos livres nas amostras de café (TEIXEIRA et al.; 2017). Essa levedura é comumente encontrada em processos fermentativos de café e as alterações por elas provocadas estão vinculadas a formação de aroma floral a bebida (de BRUYN et al.; 2017; PEREIRA et al.; 2020a). Ademais, possivelmente ocorreu a ação destas leveduras no processo de fermentação favorecendo a formação de compostos ácidos na bebida o que maximizou o perfil sensorial das amostras fermentadas por mais de 120 horas.

Destaca-se que a técnica de maceração carbônica demonstrou ser eficiente em auxiliar no incremento sensorial e químico dos cafés oriundos de região de altitude de transição. Para

Veloso et al. (2020), em cultivos cafeeiros situados em regiões que apresentam condições edafoclimáticas menos favoráveis à produção cafeeira (temperatura, radiação solar, altitude, umidade e proximidade a fragmentos de mata), a comunidade microbiana endofítica tende a ser menor.

Para essas regiões, técnicas de fermentação que exploram o potencial máximo destas comunidades microbianas como a maceração carbônica tornam-se fundamentais (VELOSO et al.; 2020; GOMES et al.; 2022). O efeito do ambiente rico em dióxido de carbono favorece a transição do metabolismo respiratório aeróbico para o metabolismo anaeróbico em cada fruto (TESNIERE e FLANZY, 2011).

A condição de anaerobiose plena favorece a ação dos microrganismos presentes nos frutos à fermentação. Com essa condição mais favorável ocorre a degradação dos açúcares das cerejas de café, que são usados como parte de energia que originam outros produtos metabólicos secundários (PEREIRA et al.; 2020a; SANTAMARIA et al.; 2022), como observado neste estudo (Tabela 2, Figura 2 e Figura 3). Deste modo, essa técnica potencializa a ação da microbiota endofítica presente nas plantas e especialmente nos frutos de café (PEREIRA et al.; 2022; VELOSO et al.; 2020; SILVA et al.; 2022), promovendo ganhos químicos e sensoriais ao café.

5. CONCLUSÕES

O tempo de fermentação e a temperatura de fermentação afetam significativamente a qualidade sensorial do café. A temperatura de fermentação a 30°C por um período superior a 120 horas resulta em um melhor perfil sensorial.

O uso da técnica de maceração carbônica mostrou-se eficiente para melhorar a qualidade sensorial e química dos cafés cultivados em regiões de altitude de transição.

A composição química do café, incluindo compostos voláteis, é influenciada pelo tempo e temperatura de fermentação, essas mudanças químicas estão diretamente relacionadas à qualidade sensorial do café.

A temperatura de 60°C resulta na degradação do perfil sensorial devido à inibição do crescimento microbiano e à presença de compostos indesejáveis na bebida, como o Hexanal e o (R,R)-Butano-2,3-diol.

REFERÊNCIAS

AGNOLETTI, B.Z.; FOLI, G.S.; PEREIRA, L.L.; PINHEIRO, P.F.; GUARÇONI, R.C.; OLIVEIRA, E.C.S.; FILGUEIRAS, P.R. Multivariate calibration applied to study of volatile predictors of arabica coffee quality. **Food Chemistry**. V. 367, n. 15, 130679, 2022.

AVILA, R.T.; ALMEIDA, W.L.; COSTA, L.C.; MACHADO, K.L.G.; BARBOSA, M.L.; SOUZA, R.P.B.; MARTINO, P.B.; JUÁREZ, M.A.T.; MARÇAL, D.M.S.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO, J.D.C.; DaMATTA, F.M. Elevated air [CO₂] improves photosynthetic performance and alters biomass accumulation and partitioning in drought-stressed coffee plants. **Environmental and Experimental Botany**. V.177, n.104137. 2020. doi: [10.1016/j.envexpbot.2020.104137](https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104137)

AYESTARÁN, B.; MARTÍNEZ-LAPUENTE, L.; GUADALUPE, Z.; CANALS, C.; ADELL, E.; VILANOVA, M. Effect of the winemaking process on the volatile composition and aromatic profile of Tempranillo Blanco wines. **Food Chemistry**. v. 276, p. 187-194. 2019.

BARBOSA, I. P.; COSTA W. G.; NASCIMENTO M.; CRUZ C. D.; OLIVEIRA A. C. B. Recommendation of *Coffea arabica* genotypes by factor analysis. **Euphytica**, v. 215, n.178, p.1-10. 2019. [10.1007/s10681-019-2499-x](https://doi.org/10.1007/s10681-019-2499-x)

BARBOSA, I.P.; De OLIVEIRA, A.C.B.; ROSADO, R.D.S.; SAKIYAMA, N.S.; CRUZ, C.D.; OEREIRA, A.A. ensory analysis of arabica coffee: cultivars of rust resistance with potential for the specialty coffee market. **Euphytica**, v. 216, p. 165, 2020. [10.1007/s10681-020-02704-9](https://doi.org/10.1007/s10681-020-02704-9)

BERTRAND, B.; BOULANGER, R.; DUSSERT, S.; RIBEURE, F.; BERTHIOT, L. DESCROIX, F.; JOET, T. Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. **Food Chemistry**. V. 135, n. 4, p. 2575-2583. 2012a.

BERTRAND, B.; BOULANGER, R.; DUSSERT, S.; RIBEYRE, F.; BERTHIOT, L.; DESCROIX, F.; JOËT, T. Climatic Factors Directly Impact the Volatile Organic Compound

Fingerprint in Green Arabica Coffee Bean as Well as Coffee Beverage Quality. **Food Chemich.** N.135, p. 2575–2583. 2012b.

BONDAM, A.F.; SILVEIRA, D.D.; SANTOS, J.P.; HOFFMANN, J.F. Phenolic compounds from coffee by-products: Extraction and application in the food and pharmaceutical industries. **Trends in Food Science & Technology.** V. 123, p. 172-186. 2022.

BRIOSCHI JUNIOR, D.; GUARÇONI, R.C.; SILVA, M.C.S.; VELOSO, T.G.R.; KASUYA, M.C.M.; OLIVEIRA, E.C.S.O.; LUZ, J.M.R.; MOREIRA, L.R.; DEBONA, D.G.; PEREIRA, L.L. Microbial fermentation affects sensorial, chemical, and microbial profile of coffee under carbonic maceration. **Food Chemistry**, v. 9, p. 128296, 2021.

CANTERGIANI, E.; BREVARD, H.; KREBS, Y.; FERIA-MORALES, A.; AMADO, R.; YERETZIAN, C. Characterisation of the aroma of green Mexican coffee and identification of mouldy/earthy defect. **European Food Research and Technology.** V.212, p.648-657. 2001.

CAPORASO, N.; WHITWORTH, M. B.; CUI, C.; FISK, I. D. Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS. **Food Research International**, v.108, p. 628-640. 2018.

CARDOSO, W.S.; AGNOLETTI, B.Z.; FREITAS, R.; PINHEIRO, F.A.; PEREIRA, L.L. **Biochemical Aspects of Coffee Fermentation.** In: PEREIRA, L.L.; MOREIRA, T.R. (eds) **Quality Determinants in Coffee production.** Food engineering series. Springer, Cham. 2020.

CHAN M.Z.A.; TAN, L.T.; HENG, S.W.Q. LIU, S.Q. Effect of Co-Fermentation of *Saccharomyces boulardii* CNCM-I745 with Four Different Probiotic Lactobacilli in Coffee Brews on Cell Viabilities and Metabolic Activities. **Fermentation.** V.9, n.3, p. 2019. 2023.

COLODETTI, T.V.; RODRIGUES, W.N.; CAVATTE, P.C.; REIS, E.F.; VERDIN FILHO, A.C.; BRINATE, S.V.B.; MARTINS, L.D.; CHRISTO, B.F.; ANDRADE JUNIOR, S.; TOMAZ, M.A. Managing the number of orthotropic stems in *Coffea arabica* as strategy for cultivation at low-altitude regions. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, p. 447-454, 2020.

De BRUYN, F.; ZHANG, S. J.; POTHAKOS, V.; TORRES, J.; LAMBOT, C.; MORONI, A. V.; De VUYST, L. Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. **Applied and environmental microbiology**, v.83, n.1, p.e02398-16. 2017.

DUQUE, L.F.C.; BLAIR, M.W. Strategies for Robusta Coffee (*Coffea canephora*) Improvement as a New Crop in Colombia. *Agriculture*. V.12, n.10, p.1576. 2022. Doi: ; [10.3390/agriculture12101576](https://doi.org/10.3390/agriculture12101576)

ELHALIS, H.; ZHAO, J.C.J. Coffee fermentation: Expedition from traditional to controlled process and perspectives for industrialization. **Applied Food Research**. V. 3, n.1, 100253. 2023.

FERREIRA, D.S.; AMARAL, J.F.T; PERERIRA, L.L.; FERREIRA, J.M.S.F.; GUARÇONI, R.C.; MOREIRA, T.R.; OLIVEIRA, A.C.; RODRIGUES, W.N.; ALMEIDA, S.L.H.; RIBEIRO, W.R.; TOMAZ, M.A.; CASTANHEIRA, D.T.; LIMA FILHO, T. Physico-chemical and sensory interactions of arabica coffee genotypes in different water regimes. **The Journal of Agricultural Science**. V. 159, n.1-2, p.50-58. 2021.

FERREIRA, D.S.; CANAL, G.B.; NASCIMENTO, M.; NASCIMENTO, A.C.C.; FERREIRA, J.M.S.; AMARAL, J.F.T.; PEREIRA, L.L.; RODRIGUES, W.N.; RIBEIRO, W.R.; CASTANHEIRA, D.T.; TOMAZ, M.A. Exploring the multivariate technique in the discrimination of *Coffea arabica* L. cultivars regarding the production and quality of grains under the effect of water management. **Euphytica**. V.217, n.118. 2021a.

FERREIRA, D.S.; OLIVEIRA, M.E.S.; RIBEIRO, W.R.; FILETE, C.A.; CASTANHEIRA, D.T.; ROCHA, B.C.P.; MORELI, A.P.; OLIVEIRA, E.C.S.; GGUARÇONI, R.C.; PARTELLI, F.L.; PEREIRA, L.L. **Agronomy**, v.12, n.8, p. 1885, 2022.

FERREIRA, L.J.C.; GOMES, M.S.; OLIVEIRA, L.M. SANTOS, L.D. Coffee fermentation process: A review. **Food Research International**. V.169, 112793. 2023. Doi: [10.1016/j.foodres.2023.112793](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793)

FILETE, C.A.; MOREIRA, T.R.; SANTOS, A.R.; GOMES, W.S.; GUARÇONI, R.C.; MORELI, A.P.; AUGUSTO, M.I.; ABREU, R.O.; SIMMER, M.M.B.; CALIMAN, A.D.C.;

GUIMARÃES, C.V.; BERLLI, S.S.; FERRÃO, M.A.G.; FONSECA, A.F.A.; PARTELLI, F.L.; BERLLI, A.P.C.G.; OLIVEIRA, E.C.S.; PEREIRA, L.L. The New Standpoints for the Terroir of *Coffea canephora* from Southwestern Brazil: Edaphic and Sensorial Perspective. **Agronomy**. V.12, n.; p. 1931. 2022.

GE, Y.; ZHANG, F.; XIE, C.; QU, P.; JIRANG, K.; DU, H.; ZHAO, M.; LU, Y.; WANG, B.; SHI, X.; LI, X.; ZHANG, C. Effects of Different Altitudes on *Coffea arabica* Rhizospheric Soil Chemical Properties and Soil Microbiota. **Agronomy**. V. 13, n.2, 2023.

HUPFAUF, S.; PLATTNER, P.; WAGNER, A.O.; KAUFMANN, R.; INSAM, H.; PODMIRSEG, S.M. Temperature shapes the microbiota in anaerobic digestion and drives efficiency to a maximum at 45 °C. **Bioresource Technology**. V. 269, p. 309-3018. 2018.

KENNARD, R.W.; STONE, L.A. Computer aided design of experiments. **Technometrics**, v. 11, n.1, p. 137-148. 1969.

LI, G.; XU, F.; YANG, T.; WANG, X.; LYU, T.; HUANG, Z. Microbial Behavior and Influencing Factors in the Anaerobic Digestion of Distiller: A Comprehensive Review. **Fermentation**, v. 9, n.3, p. 199, 2023.

LYRIO, M.V.V.; CUNHA, P.H.P.; DEBONA, D.G.; AGNOLETTI, B.Z.; ARAUJO, B.Q.; FRINHANI, R.Q.; FILGUEIRAS, P.R.; PEREIRA, L.L.; CASTRO, E.V.R. SHS-GC-MS applied in *Coffea arabica* and *Coffea canephora* blends assessment. **Analytical Methods**, v.15, p. 3499-3509, 2023.

MADIGOU, C. CAO, K.A.L.; BAREAU, C.; MAZEAS, L.; DEJEAN S.; CHAPLEUR, O. Ecological consequences of abrupt temperature changes in anaerobic digesters. **Chemical Engineering Journal**. V. 361, n.1, p. 266-277. 2019.

MARQUES, I.; FERNANDES, I.; PAULO, O.S.; LIDON, F.C.; DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C.; BARROS, A.I.R. A transcriptomic approach to understanding the combined impacts of supra-optimal temperatures and CO₂ revealed different responses in the polyploid *Coffea arabica* and its diploid progenitor *C. canephora*. **International Journal of Molecular Sciences**. V. 22, n.6, p. 3125. 2022. doi: [10.3390/ijms22063125](https://doi.org/10.3390/ijms22063125)

MYO, H.; NANTARAT, N.; UDOMKIRI, N.K. Changes in Bioactive Compounds of Coffee Pulp through Fermentation-Based Biotransformation Using *Lactobacillus plantarum* TISTR 543 and Its Antioxidant Activities. **Fermentation**. V. 7, n. 4, p. 292. 2021.

NIE, E. HE, P.; ZHANG, H.; HAO, L.; SHAO, L.; LU, F. How does temperature regulate anaerobic digestion?. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 150, N. 111453. 2021.

OKSANEN, J.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; O'HARA, B.; STEVENS, M.H.H.; OKSANEN, M.J.; SUGGESTS, M.A.S.S. The vegan package. **Community ecology package** v.10 p.631-637, 719. 2007.

OLIVEIRA, E.C.S.; LUZ, J.M.R.; CASTRO, M.G.; FILGUEIRAS, P.R.; GUARÇONI, R.C.; CASTRO, E.V.R.; SILVA, M.C.S. PEREIRA, L.L. Chemical and sensory discrimination of coffee: impacts of the planting altitude and fermentation. **European Food Research and Technology**. V.248, p. 659-669. 2022. Doi: [10.1007/s00217-021-03912-w](https://doi.org/10.1007/s00217-021-03912-w)

PEREIRA, L. L.; GUARÇONI, R. C.; PINHEIRO, P. F.; OSÓRIO, V. M.; PINHEIRO, C. A.; MOREIRA, T. R. TEN CATEN, C. S. New propositions about coffee wet processing: Chemical and sensory perspectives. **Food Chemistry**, v.310, p.125943. 2020a.

PEREIRA, L.L.; BRIOSCHI JÚNIOR, D.; SOUSA, L.B.P.; GOMES, W.S.; CARDOSO, W.S.; GUARÇONI, R.C.; CATEN, C.S.T. In: PEREIRA, L.L.; MOREIRA, T.R. (eds) **Quality Determinants In Coffee production**. Food engineering series. Springer, Cham. 2020b.

PEREIRA, L.L.; GUARÇONI, R.C.; LUZ, J.M.R.; OLIVEIRA, A.C.; MORELI, A.P.; FILETE, C.A.; PAIVA, G.; DEBONA, D.G.; GOMES, W.S.; CARDOSO, W.S.; BERLI, S.S.; OLIVEIRA, E.C.S. Impacts of brewing methods on sensory perception and organoleptic compounds of coffee. **Food Chemistry Advances**. V.2, 100185. 2023. Doi: [10.1016/j.focha.2023.100185](https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100185)

PEREIRA, L.L.; GUARÇONI, RC.; SOUZA, G.S.; BRIOSCHI JUNIOR, D.; MOREIRA, T.R.; CATEN, C.T.S. Propositions on the Optimal Number of QGraders and R-Graders. **Journal Of Food Quality**, v. 2018, p. 1-7, 2018.

PEREIRA, T.S.; BATSTA, N.N.; PIMENTA, L.P.S. MARTINEZ, S.J.; RIBEIRO, L.S.; NEVES, J.A.O. SCHWAN, R.F. Self-induced anaerobiosis coffee fermentation: Impact on microbial communities, chemical composition and sensory quality of coffee. **Food Microbiology**. V. 103, p. 103962. 2022.

R core team **R language and enviromental for statitiscal computing**, 2021. R core team. R language and enviromental for statitiscal computing. R Foundation for Statistical, Vienna, Austria. <http://www.r-project.org>. 2021.

RAMOS, C.; JUARÉZ, J.; PEREJA, M.P.G.. Antimicrobial activity of olive mill wastewaters (alpechin) and biotransformed olive oil mill wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, V. 38, N. 3-4, P. 283-290. 1996.

REAL, J.A.; PERIS, M.L.; BARRIO, E.; QUEROL, A. Effect of Temperature on the Prevalence of *Saccharomyces Non cerevisiae* Species against a *S. cerevisiae* Wine Strain in Wine Fermentation: Competition, Physiological Fitness, and Influence in Final Wine Composition. **Frontiers in Microbiology**. V.8 n. 2017, p. 1-15, 2017.

RONCHI, C.P.; MIRANDA, F.R. Flowering percentage in arabica coffee crops depends on the water deficit level applied during the pre-flowering stage. **Revista Caatinga**. V. 33, n. 1, p. 195-204, 2020. doi: [10.1590/1983-21252020v33n121rc](https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n121rc)

ROS, C.D.; CAVINATO, C.; PAVAN, P.; BOLZONEL, D. Mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of winery wastewater sludge and wine lees: An integrated approach for sustainable wine production. **Journal of Environmental Management**. V. 203, n. 2, p. 745-752. 2017.

SANTAMARIA, P.; AREZANA, L.G.; VIANA, R.E.; GARIJO, P.; LOPÉZ, R.; SANZ, S.; GUTIRREZ, A.R. Difficulties Associated with Small-Scale Production of Carbonic Maceration Wines. **Fermentation**. V. 8, n. 1, p. 27. 2022.

SEMEDO. J.N.; RODRIGUES, W.P.; DUBBERTEIN, D.; MARTINS, M.Q.; MARTINS, L.D.; PAIS, I.P.; RODRIGUES, A.P.; LEITÃO, A.E.; PARTELLI, F.L.; CAMPOSTRINI E.;

TOMAZ, M.A.; ROBOREDO, F.H.; CAMPOS, O.S.; BARROS, A.I.R.; LIDON, F.C.; DaMATTA, F.M.; RAMALHO, J.C. **Coffee responses to drought, warming and high [CO₂] in a context of future climate change scenarios**. In: ALVES, F.; LEAL FILHO, W.; AZEITEIRO, U. (eds) **Theory and Practice of Climate Adapatation**. Climate Change Management. Springer, Cham. 2018. doi: [10.1007/978-3-319-72874-2_26](https://doi.org/10.1007/978-3-319-72874-2_26)

SILVA, M.C.S.; LUZ, J.M.R.; VELOSO, T.G.R.; GOMES W.S, OLIVEIRA E.C.S.; ANASTÁCIO, L.M.; NETO, A.C.; MORELI, A.P.; GUARÇONI, R.C.; KASUYA, M.C.M.; PEREIRA, L.L. Processing techniques and microbial fermentation on microbial profile and chemical and sensory quality of the coffee beverage. **European Food Research and Technology**, v. 249, p. 120. 2022.

SOBREIRA, F.M.; OLIVEIRA, A.C.B.; PEREIRA, A.A.; GONÇALVES, M.A.; SAKIYAMA, N.S. Divergence among arabica coffee genotypes for sensory quality. **Australian J Crop Sci.** v.10 n.10 p. 1442–1448, 2016.

SOUZA, L.H.B.P.; LUZ, J.M.R.; SILVA, M.C.S.; MORELI, A.P.; VELOSO, T.G.R.; GUARÇONI, R.C.; MOREIRA, T.R.; BARROS, M.V.P.; KASUYA, M.C.M.; MARCADO, J.P.P.; BRIOSHI JUNIOR, D. GOMES, W.S. PEREIRA, L.P.; OLIVEIRA, E.C.S. Relationship between sensory and microbial profiles of fermented coffee by dry and washed methods. **Food Chemistry Advances.** V.2, N. 100259. 2023. Doi: [10.1016/j.focha.2023.100259](https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100259)

TEIXEIRA, P. G.; FERREIRA, R.; ZHOU, Y. J.; SIEWERS, V.; NIELSEN, J. Dynamic regulation of fatty acid pools for improved production of fatty alcohols in *Saccharomyces cerevisiae*. **Microbial cell factories**, v. 16, n.1, p. 1-11. 2017.

TESNIÈRE, C.; FLANZY, C. **Carbonic Maceration Wines**. In *Advances in Food and Nutrition Research*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2011; pp. 1–15.2011.

TOCI, A.T.; FARAH, A. Volatile Fingerprint of Brazilian Defective Coffee Seeds: Corroboration of Potential Marker Compounds and Identification of New Low Quality Indicators. **Food Chemich.** V.153, p.298–314. 2014.

VAZZULLI, F.; LAMBRI, M.; BERTUZZI, T. Volatile Compounds in Green and Roasted Arabica Specialty Coffee: Discrimination of Origins, Post-Harvesting Processes, and Roasting Level. **Foods**. V. 12, n.3, p. 489. 2023.

VELOSO, T.G.R.; SILVA, M.C.E.; CARDOSO, W.S.; KASUYA, M.C.; PEREIRA, L.L. Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in **Brazil**. **Scientific Reports**, v. 10, p. 14692, 2020.

VERDIN FILHO, A.C.; VOLPI, P.S.; FERRAO, M.A.G.; FERRAO, R.G.; MAURI, A.L.; FONSECA, A.F.A.; TRISTAO, F.A.; ANDRADE, S. New management technology for arabica coffee: the cyclic pruning program for arabica coffee. **Coffee Science**, v. 11, p. 475-483, 2016.

VITEZOVÁ, M.; KOHOTOVÁ, A.; VITEZ, T.; HANISAKOVA, N.; KUSHKEVYCH, I. Methanogenic Microorganisms in Industrial Wastewater Anaerobic Treatment. **Processes**. V. 8, n.12, p. 1546. 2020.

WICKHAM, H. **ggplot2: elegant graphics for data analysis** New York. NY: Springer. 2009.

WU, H.; GU, J.; BK, A.; NAWAZ, M.A.; BARROW, C.J.; DUNSHEA, F.R.; SULERIA, H.A.R. Effect of processing on bioaccessibility and bioavailability of bioactive compounds in coffee beans. **Food Bioscience**. V. 46, n. 101373. 2022.

CONCLUSÕES GERAIS

Conclui-se que, por meio de uma combinação adequada de genótipo e manejo de irrigação é possível alcançar alta produtividade e qualidade sensorial dos cafés, mesmo em regiões de altitude de transição.

Identificou-se uma ampla diversidade fenotípica nos genótipos em estudo, com destaque para a capacidade de adaptação de alguns genótipos sob diferentes regimes hídricos, tanto para o desempenho agrônômico, quanto para a qualidade sensorial. Genótipos como Sacramento MG1 e MGS Turmalina demonstraram potencial para o cultivo em altitude de transição, indicando que o manejo da água pode ser um fator crucial na produção e qualidade sensorial em cultivos de altitudes de transição.

Conclui-se também, que a técnica de maceração pode potencializar atributos sensoriais e químicos dos cafés cultivados em altitude de transição. É importante considerar fatores como tempo e temperatura de fermentação para garantir a qualidade dos grãos de café, evidenciando que a combinação adequada do binômio tempo e temperatura pode melhorar significativamente a qualidade do café produzido em altitude de transição.