



KEILA LIZETH REYES RODRIGUEZ

**ENFOQUE MOLECULAR E ANÁLISE COMPUTACIONAL
RELACIONADOS À QUALIDADE E AMADURECIMENTO
DOS FRUTOS DE CAFÉ**

**LAVRAS-MG
2024**

KEILA LIZETH REYES RODRIGUEZ

**ENFOQUE MOLECULAR E ANÁLISE COMPUTACIONAL RELACIONADOS À
QUALIDADE E AMADURECIMENTO DOS FRUTOS DE CAFÉ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Antonio Chalfun Junior
Orientador

Prof. Dr. Raphael Ricon de Oliveira
Coorientador

**LAVRAS-MG
2024**

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

Reyes Rodríguez, Keila Lizeth.

Enfoque molecular e análise computacional relacionados à qualidade e amadurecimento dos frutos de café / Keila Lizeth Reyes Rodríguez. - 2024.
79 p.: il.

Orientador(a): Antonio Chalfun Junior.

Coorientador(a): Raphael Ricon de Oliveira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. quantificação de frutos. 2. compostos de armazenamento. 3. genes. I. Chalfun Junior, Antonio. II. Oliveira, Raphael Ricon de. III. Título.

KEILA LIZETH REYES RODRIGUEZ

**ENFOQUE MOLECULAR E ANÁLISE COMPUTACIONAL RELACIONADOS À
QUALIDADE E AMADURECIMENTO DOS FRUTOS DE CAFÉ**

**MOLECULAR APPROACH AND COMPUTATIONAL ANALYSIS RELATED TO
THE QUALITY AND RIPENING OF COFFEE FRUIT**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia/Fisiologia Vegetal, área de concentração em Fisiologia Vegetal para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 16 de agosto de 2024.
Dra. Solange Aparecida Ságio UFT
Dra. Ana Carla Marques Pinheiro UFLA
Dr. Antonio Chalfun Junior UFLA

Prof. Dr. Antonio Chalfun Junior
Orientador

Prof. Dr. Raphael Ricon de Oliveira
Coorientador

**LAVRAS-MG
2024**

Aos meus pais, German Reyes Reyes e Hilaria Rodríguez Castellanos, por serem o meu apoio e a minha inspiração. Por acreditarem em mim sempre.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho, por me dar força e coragem para superar diversos obstáculos durante esta etapa de minha vida.

Aos meus pais e irmãos (Alex, Karla, Carlos, Kenia, Kevin e Alisson) pelo apoio incondicional, por acreditarem em mim, hoje posso dizer-lhes que conquistei mais do que um dia sonhei.

Agradeço ao Ricardo por seu apoio incondicional e motivador desde o primeiro dia.

Agradeço ao professor Dr. Antonio Chalfun Junior por me ter permitido fazer parte do seu grupo, pela sua orientação e apoio ao longo do meu mestrado.

Agradeço à Dra. Joyce Pereira Alvarenga e ao Dr. Raphael Ricon de Oliveira pela amizade e orientação em todo momento.

Agradeço aos meus companheiros do Laboratório de Fisiologia Molecular de Plantas (LFMP) e do departamento de Fisiologia Vegetal pela amizade e apoio quando precisei.

Agradeço ao Dr. Marlon, Dr. Emerson e ao M.Sc. Porfirio pelo apoio brindado.

Aos meus amigos Dolores, Ruth, Sara, Ana, Anyela, Karen, Raquel, Francis, Javier e Brayan obrigada por tornarem minha estadia aqui mais agradável.

Aos meus amigos de Honduras Helem, Litzy, Osiris, Carlos, Joel, Max, Kevin e Elmer que apesar da distância sempre estiveram para me dar apoio motivacional.

Agradeço à Universidade Federal de Lavras e ao Programa de Pós-Graduação em Fisiologia Vegetal/Agronomia pela oportunidade de realizar o mestrado. Também expresso minha gratidão às agências de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos do processo 403661/2020-0 - Programa de Mestrado e Doutorado Acadêmico para Inovação MAI/DAI, e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro brindado em atividades acadêmicas ao longo do mestrado.

RESUMO

O café é um dos grãos mais comercializados no mundo, cultivado sob diferentes condições que diferem de uma região para outra, como clima, altitude, solo e luz, condições essas que causam mudanças nas características desejáveis do grão. Outro fator determinante é a espécie, das quais *Coffea arabica* e *Coffea canephora* são as de interesse comercial. Tudo isso causa alterações desde a floração sequencial, com consequente desenvolvimento e amadurecimento desigual dos frutos, até o teor final de compostos de armazenamento nos grãos. Portanto, três capítulos foram desenvolvidos neste trabalho para abordar os problemas mencionados acima. No primeiro, uma revisão geral do assunto, como importância, fenologia, maturação, colheita e ferramentas tecnológicas utilizadas para o monitoramento. No segundo capítulo, foi realizado um estudo com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de etileno para acelerar o amadurecimento dos frutos de café e homogeneizar a colheita, bem como monitorar e comparar este efeito utilizando a contagem visual vs. imagens. A análise da quantificação e do rendimento mostrou que a aplicação de ETEFOM não teve efeito sobre a maturação, o que pode ter sido devido a outros fatores. Apesar disso, foi possível determinar que, por meio da quantificação imagens e de acordo com a classificação agrupada dos frutos, foi obtida uma melhor precisão com uma margem de erro de 4% em relação à colheita, enquanto na quantificação visual foi de 7%. O terceiro capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a qualidade molecular do café, com foco nos principais compostos de armazenamento, bem como nos processos relacionados à maturação do fruto. Essa revisão mostra que há pouca informação disponível sobre a expressão gênica que regula esses processos. Além disso, são necessárias correlações desses genes em estudos futuros para determinar pontos-chave que ajudem a entender as redes de interações que desencadeiam a síntese desses compostos.

Palavras-chave: *Coffea arabica*; *Coffea canephora*; quantificação de frutos; compostos de armazenamento; genes; desenvolvimento.

ABSTRACT

Coffee is one of the most commercialized beans in the world, grown under different conditions that differ from one region to another, such as climate, altitude, soil and light, conditions that cause changes in the desirable characteristics of the bean. Another determining factor is the species, of which *Coffea arabica* and *Coffea canephora* are the ones of commercial interest. All of this causes changes from sequential flowering, with consequent uneven fruit development and ripening, to the final content of storage compounds in the grains. Therefore, three chapters have been developed in this work to address the problems mentioned above. The first provides a general review of the subject, including its importance, phenology, ripening, harvesting and the technological tools used to monitor it. In the second chapter, a study was carried out with the aim of evaluating the effect of applying ethylene to accelerate coffee fruit ripening and homogenize the harvest, as well as to monitor and compare this effect using visual vs. images counting. The analysis of quantification and yield showed that the application of ETEFOM had no effect on ripening, which could be due to other factors. Despite this, it was possible to determine that, by means of images quantification and according to the grouped classification of the fruit, better precision was obtained with a margin of error of 4% in relation to the harvest, while in visual quantification it was 7%. The third chapter presents a review of the literature on the molecular quality of coffee, focusing on the main storage compounds, as well as the processes related to fruit ripening. This review shows that there is little information available on the gene expression that regulates these processes. Furthermore, correlations of these genes are needed in future studies to determine key points that help understand the networks of interactions that trigger the synthesis of these compounds.

Keywords: *Coffea arabica*; *Coffea canephora*; fruit quantification; storage compounds; genes; development.

INDICADORES DE IMPACTO

O cultivo do café é de grande importância econômica e a sua qualidade depende de vários fatores, desde a floração até o processamento. Atualmente, um dos desafios enfrentados pela comunidade científica não é apenas selecionar cultivares que aumentem a produtividade e a produção da cultura, mas também garantir a composição e uniformidade dos frutos durante a colheita, para atender aos padrões de qualidade estabelecidos. Este trabalho traz uma contribuição para toda a comunidade ao usar a avaliação visual como uma ferramenta para coletar dados sobre a maturidade dos frutos no campo, pois torna o processo mais rápido, fácil e econômico. Além disso, as informações reunidas sobre os principais compostos podem ser utilizadas para descobrir novas interações entre eles durante o desenvolvimento. Com base nesses dados, é possível encontrar um ponto-chave decisivo para que eles sejam ativados, e propor uma maneira para manipulá-los. O desenvolvimento do projeto sobre o monitoramento da maturação dos frutos do café traz uma contribuição científica tanto para o setor privado quanto para o acadêmico, pois apresenta informações relevantes sobre um assunto de interesse comercial e, portanto, também de interesse industrial, já que contribui principalmente ao produtor a prever a safra. Além disso, apresenta uma contribuição científica ao reunir informações que facilitarão aos pesquisadores a realização de novas pesquisas relacionadas ao entendimento e a melhoria da qualidade do café.

IMPACT INDICATORS

Coffee cultivation is of great economic importance and its quality depends on several factors, from flowering to processing. Currently, one of the challenges faced by the scientific community is not only to select cultivars that increase the crop's productivity and production, but also to guarantee the composition and uniformity of the fruit during harvest, in order to meet the established quality standards, this work brings a contribution to the entire community by using visual assessment as a tool to collect data on fruit maturity in the field, as it makes the process faster, easier and more economical. In addition, the information gathered on the main compounds can be used to discover new interactions between them during development. Based on this data, it is possible to find a decisive key point for them to be activated, and propose a way to manipulate them. The development of the project on monitoring the ripeness of coffee fruit makes a scientific contribution to both the private and academic sectors, as it provides relevant information on a subject of commercial interest, and therefore, also of industrial interest, as it mainly helps producers to predict the harvest. It also makes a scientific contribution by gathering information that will make it easier for researchers to carry out new research into understanding and improving coffee quality.

SUMÁRIO

SEÇÃO 1	12
Introdução geral	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Importância socioeconômica do café	14
2.2. O cafeeiro: aspectos botânicos	15
2.3. Aspectos fenológicos do cafeeiro	15
2.4. Maturação do fruto	16
2.5. O etileno (C ₂ H ₄)	16
2.6. O etileno e sua relação com amadurecimento de frutos de café	17
2.7. Aplicação de ETEFOM (Ácido 2-cloroetil fosfônico)	18
2.8. Colheita do café e qualidade da bebida	18
2.9. Ferramentas tecnológicas para monitoramento dos frutos de café	19
REFERÊNCIAS	19
SEÇÃO 2	26
Artigo 1: Aplicação de etileno para a acelerar o amadurecimento de frutos de café (<i>coffea arabica</i>) e validação da maturação baseada em imagens	26
1. INTRODUÇÃO	27
2. MATERIAL E MÉTODOS	29
2.1. Localização e condições experimentais	29
2.2. Tratamentos e delineamento experimental	30
2.3. Coleta dos frutos	31
2.4. Avaliações	32
2.4.1. Quantificação, classificação e rendimento dos frutos	32
2.4.2. Análises estatísticas	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1. Quantificação, classificação e rendimento dos frutos	33
4. CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS	39
MATERIAL SUPLEMENTAR	42
SEÇÃO 3	44

	ARTIGO 2: Qualidade a nível molecular dos frutos do café: avanços e perspectivas.....	44
1.	INTRODUÇÃO	45
2.	ANATOMIA E DESENVOLVIMENTO DO FRUTO DE CAFÉ.....	46
3.	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS GRÃOS DE CAFÉ.....	47
4.	METABOLISMO E EXPRESSÃO GENÉTICA ASSOCIADO À QUALIDADE	48
4.1.	Sacarose	48
4.2.	Parede celular	49
4.3.	Os ácidos clorogênicos (ACG)	52
4.4.	Cafeína	53
4.5.	Trigonelina.....	54
4.6.	Lipídios	55
4.7.	Proteínas	57
4.8.	Processo de amadurecimento do fruto	57
4.8.1.	Pigmentos.....	58
4.8.1.1.	Carotenóides	59
4.8.1.2.	Antocianinas	60
4.8.2.	Hormônios	60
4.8.2.1.	Etileno.....	61
4.8.2.2.	Outros hormônios	62
5.	Perspectivas futuras	63
	REFERÊNCIAS	64
	SEÇÃO 4.....	78
	Considerações finais	78

SEÇÃO 1
Introdução geral

1. INTRODUÇÃO

O café é cultivado em mais de 80 países (Murthy e Naidu, 2012), sendo o Brasil o maior produtor e exportador de café do mundo (Embrapa, 2022), o que representa uma importante fonte de empregos (diretos e indiretos) e renda (Silva, Varela e Lezama, 2021).

Atualmente, a área em produção estimada para a cafeicultura brasileira das espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora* é de 1.917.850,9 hectares (ha), sendo a região do Sudeste a maior produtora, ao mesmo tempo, nesta região se tem os três estados que são os mais produtores do país: Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo, com uma produção respectiva de 29.181,3, 13.014,0 e 5.030,7 mil sacas beneficiadas. Minas Gerais além de ser o estado com a maior produção de café do território nacional é o principal produtor de café *C. arabica* com 74,5% do total da área ocupada no país. Por outro lado, em relação a espécie *C. canephora*, o estado do Espírito Santo é aquele com a maior área cultivada, totalizando 292 mil ha, segundo o levantamento estimativo do mês de janeiro realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024).

Embora o Brasil seja o maior abastecedor do grão de café no mundo, deve-se levar em consideração que a cada dia a venda nos mercados internacionais está se tornando mais rigorosa devido às exigências dos consumidores finais. Portanto, o desafio para os produtores e pesquisadores não é apenas aumentar a produtividade e a produção do cultivo, mas também garantir que o café atenda aos padrões de qualidade estabelecidos (Tolessa et al., 2017; Nafisah et al., 2024)

Um dos fatores que influencia a qualidade final do café é o estágio de maturação que se encontram os frutos no momento da colheita por efeito das floradas sequenciais do cafeeiro (Masarirambi, Chingwara e Shongwe, 2009). De modo que, uma mesma planta pode apresentar grãos em diferentes estados fisiológicos, dependendo das condições climáticas de cada região (Casé, 2022). Além disso, sabe-se que a formação dos atributos de qualidade do fruto de café, que se inicia durante o desenvolvimento no tecido do endosperma é o resultado da interação de fatores genéticos (Leroy et al., 2011), ambientais (Ramos et al., 2016) e agrônômicos (Gaspard et al., 2022), os quais podem alterar as características de qualidade tanto física quanto química (Hameed, Hussain e Suleria, 2020).

Neste sentido, é importante conhecer mais sobre o amadurecimento do fruto de café, em função dos fatores internos, assim como homogeneizar e monitorar a maturação em campo.

No segundo capítulo, foi realizado um estudo com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de etileno para acelerar o amadurecimento dos frutos de café e homogeneizar a colheita, bem como monitorar e comparar este efeito utilizando a contagem visual vs. modelagem supervisionado de imagens utilizando um software desenvolvido por nosso grupo de pesquisa (Eron et al., 2024), obtendo resultados precisos, rápidos e confiáveis, os quais podem ser utilizados em outras investigações. No terceiro capítulo, apresentamos uma revisão de literatura sobre a qualidade do café a nível molecular, onde se destaca a importância de vários compostos como fatores determinantes na qualidade (Cheng, Furtado e Henry, 2018; Cheng et al., 2020) segundo os últimos avanços.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Importância socioeconômica do café

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e é o segundo produto mais comercializado depois do petróleo (Mussatto et al., 2011). É também um dos produtos agrícolas mais valiosos comercializados historicamente (Pançsira, 2022), responsável por grande parte da geração de empregos, desde sua produção até a comercialização (Ormond et. al, 1999). O comércio mundial de café é baseado em 2 espécies *C. arabica* que representa 60% da produção e os 40% restantes são de *C. canephora* (Valencia-Lozano, 2021).

O cafeeiro é cultivado em mais de 80 países ao redor do mundo (Murthy e Naidu, 2012). O Brasil é o maior produtor e exportador de café (ICO, 2017; Embrapa, 2022), seguido pelo Vietnã, Colômbia, Indonésia, etc. (Embrapa, 2022). O cultivo é fundamental na economia brasileira, pois tem uma participação importante no equilíbrio comercial agrícola (Medeiros e Rodrigues, 2017). Em 2022, o país atingiu um valor de US \$9,2 bilhões em exportação de café, considerado o maior valor registrado (CONAB, 2023). Portanto, o cultivo de café atua como fonte de emprego e renda, principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e o Espírito Santo, que são os maiores produtores nacionais (CONAB, 2022, 2023, 2024).

2.2. O cafeeiro: aspectos botânicos

A origem do café é do continente africano, é uma planta de porte arbustivo (Davis et al., 2006) da família Rubiaceae e seu gênero, *Coffea* (Davis et al. 2011), é representado por 130 espécies (Davis e Rakotonasolo, 2021), dentre os quais apenas *C. arabica* e *C. canephora*, apresentam importância econômica (Davis et al., 2006).

A nível genético, o *C. arabica* é tetraplóide ($2n=4x=44$ cromossomos), proveniente de um cruzamento natural entre *C. canephora* e *C. eugenoides* (Lashermes et al., 1999, 2000).

Os ramos laterais também chamados de ramos primários, que contém por sua vez ramos secundários e terciários (Murthy, 2012), é onde ocorre a floração e formação de frutos (Vieira, 2008).

O fruto do cafeeiro é considerado uma drupa carnosa, com pericarpo composto por várias camadas. O exocarpo, que corresponde à pele externa do fruto (casca), seguido pelo mesocarpo também conhecido como mucilagem ou polpa e por último, o endocarpo, denominado pergaminho, uma fina capa que envolve as sementes (Esquivel e Jimenez, 2012). A semente, por sua vez, é dividida em perisperma ou pele prateada, que constitui a capa mais externa, o endosperma, é o principal tecido de reserva e o embrião, parte importante para iniciar o processo da germinação (Ferreira et al., 2019; Geromel et al., 2006). Inicialmente, nos primeiros estádios após a fecundação o tecido mais visível é o perisperma, enquanto o endosperma se desenvolve a partir dos 15-150 dias. Entre os 90-120 dias é quando ocorre seu maior crescimento e também a diminuição do perisperma, reduzindo-se a uma película fina, por outro lado, o embrião torna-se visível até os 90-105 dias de desenvolvimento (Dussert et al, 2018; Salazar et al., 1994). De acordo com o desenvolvimento dessas camadas, será determinado o perfil de qualidade e sabor da bebida de café (Vaast et al., 2006).

2.3. Aspectos fenológicos do cafeeiro

O cafeeiro (*C. arabica*) apresenta um ciclo fenológico de dois anos, com as fases vegetativa e reprodutiva, ocorrendo ambas simultaneamente (Camargo e Camargo, 2001). Segundo o modelo revisado por López et al. (2021), no Brasil, esses estádios podem ocorrer em diferentes etapas dependendo do tipo de cultivar precoce

ou tardia. De acordo com essas fases, o desenvolvimento do fruto é um processo que ocorre em vários meses após a antese, cujas etapas são: crescimento, enchimento de grão e maturação do fruto (De Castro e Marraccini, 2006; López et al., 2021). Processos que podem ser comprometidos por períodos curtos ou prolongados de seca e chuvas (Torres et al., 2021).

2.4. Maturação do fruto

A maturação do fruto é um processo biológico natural geneticamente programado na planta (Perotti, Moreno e Podestá, 2014). Durante este processo, são ativadas vias fisiológicas que causam mudanças tanto externas quanto internas no fruto (Barry e Giovannoni, 2007). Essas mudanças incluem alterações no sabor, aroma, textura e cor (Gierson e Kader, 1986). Esta última é um indicador visual amplamente utilizado no campo para determinar a maturação, pois à medida que o processo de maturação avança, a degradação da clorofila se torna evidente (Bi et al., 2023; Eron et al., 2024). A clorofila, responsável pela cor verde nas plantas (Vollmar e Moser, 2023), degrada-se durante a senescência por estímulos externos como luz, temperatura, disponibilidade de água e aumento de hormônios como etileno (Zou et al., 2024; Espley e Jaakola, 2023; Jing, 2005). A degradação permite que outros pigmentos como carotenóides e antocianinas presentes nas frutas se tornem mais visíveis, proporcionando cores como amarelo, laranja, vermelho e roxo (Espley e Jaakola, 2023).

2.5. O etileno (C₂H₄)

O etileno é um hormônio vegetal gasoso que regula muitos aspectos do ciclo de vida da planta, como germinação de sementes, respostas ao estresse, maturação e abscisão de frutos, senescência de órgãos e tecidos (Binder, 2020; Schaller, 2012). Nos frutos climatéricos, observa-se um elevado aumento na biossíntese de etileno, o que implica principalmente um aumento da respiração, alterações na firmeza da parede celular, na síntese de compostos orgânicos voláteis (COV), antocianinas, carotenóides e açúcares (Iqbal et al., 2017; Pereira et al., 2005; Zerbini et al., 2015).

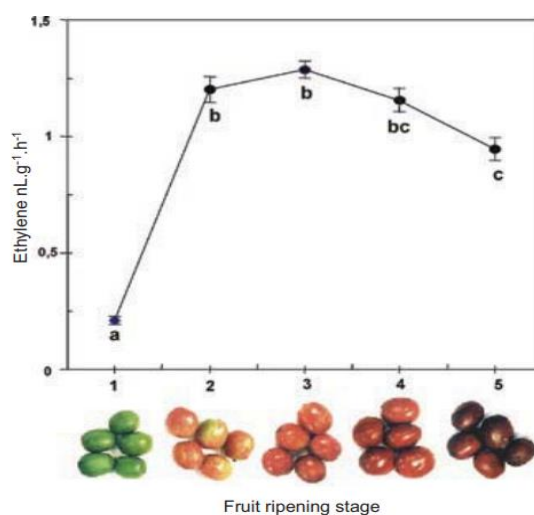
De acordo com Yang (1986), na via de biossíntese do etileno existem três enzimas principais: S-adenosil-L-metionina sintase (SAM sintase), ACC sintase (ACS)

e ACC oxidase (ACO). Na primeira reação, a S-adenosil-L-metionina (SAM) é catalisada pela SAM sintase a partir da metionina (Wang, Li e Ecker, 2002). Posteriormente, a SAM é convertida em ácido l-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) pela ação da enzima ACS. Finalmente, o ACC é transformado em etileno pela enzima ACO (Wang, Li e Ecker, 2002). Essas enzimas variam significativamente sua atividade de acordo com os fatores de desenvolvimento, hormonais e ambientais (Lin et al., 2009).

2.6. O etileno e sua relação com amadurecimento de frutos de café

De acordo com Karlova et al. (2011), o amadurecimento de frutos é um processo geneticamente programado que gera alterações na textura, cor, sabor e aroma. Estudos em frutos climatéricos demonstram que a maturação é induzida pelo etileno, assim como ocorre no fruto do cafeeiro (Carvalho et al., 2003; Scudeler et al., 2004; Bustamante-Porras et al., 2007; Budzinski et al., 2011; Ságio et al., 2013). Nos frutos de café existe um aumento acelerado da concentração interna de etileno nas primeiras etapas de do amadurecimento (Pereira et al., 2005; Saltveit, 1999). O que mostra o papel crucial do etileno no tempo de amadurecimento dos frutos (Ságio et al., 2014).

Figura 1- Produção de etileno em frutos de *Coffea arabica* durante o amadurecimento.

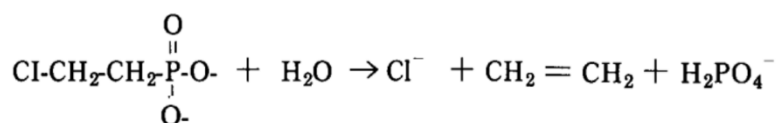


Fonte: Pereira et al. (2005).

2.7. Aplicação de ETEFOM (Ácido 2-cloroetil fosfônico)

O ETEFOM é uma molécula composta (Figura 2) que, ao entrar em contato com o tecido vegetal em um meio de pH neutro a básico, libera ácido fosfórico, cloro e etileno (Dass et al., 1976; Ferrara et al., 2016). É uma molécula estável em uma solução de baixo pH, mas nos tecidos é hidrolisada em meios com o pH mais alto (Dass et al., 1976; Olien e Bukovac, 1978). Os efeitos do etileno exógeno concentram-se em alterar ou acelerar os processos naturais de desenvolvimento, maturação e senescência (Saltveit, 1999).

Figura 2 –Equação química da reação da molécula de ETEFOM.



Fonte: Biddle et al. (1976).

O uso do ETEFOM e seus efeitos em certas frutas são mostrados por alguns estudos, como a aceleração do amadurecimento de frutos (Benassi e Almeida, 2020; Ampa et al., 2016); atua na biossíntese do etileno (Crisosto et al., 1991; Carvalho et al., 2003; Scudeler et al., 2004; Nakayama et al., 2009); diminui a concentração de ácido málico e a firmeza da fruta (Ampa et al., 2016), etc.

2.8. Colheita do café e qualidade da bebida

O início da colheita do café ocorre quando se observa uma maior uniformidade na maturação, porém o percentual de frutos maduros na planta pode variar dependendo da região onde se localiza a lavoura (Silva et al., 2016), assim frutos imaturos ou senescentes (muito maduros) acarretam perdas qualitativas devido a alterações de sabor e aroma (Mesquita et al., 2016, Toci e Farah, 2008). Sendo assim, é de grande importância para o setor conseguir uma alta uniformidade na maturação dos frutos de café no momento da colheita (Pimenta, Angélico e Chalfoun, 2018; Marín et al., 2003).

2.9. Ferramentas tecnológicas para monitoramento dos frutos de café

Os avanços tecnológicos na agricultura de precisão, como sensores, drones, computadores, satélites, dispositivos móveis e software, têm permitido aumentar a produtividade das culturas, melhorar a eficiência no uso de recursos e mitigar as mudanças climáticas, revolucionando os métodos agrícolas tradicionais (Fountas et al., 2020; Chandel et al., 2024; Segarra, 2024; Tyagi e Pandey, 2024). A adoção dessas tecnologias na cafeicultura está cada vez mais sendo utilizada pelos agricultores e estudada pela comunidade científica. Os sistemas computacionais, como métodos não destrutivos para monitorar a maturação dos frutos do café, permitem obter várias características, incluindo quantificação e classificação dos frutos, que são fundamentais quando se refere a custos de produção e tempo de planejamento (Chandel et al., 2024; Bazame et al., 2022; Ramos et al., 2017; Rodríguez et al., 2020).

Apesar de haver muitas pesquisas já disponíveis nesse campo como é mencionado anteriormente, as tecnologias e o conhecimento estão em constante mudança, buscando obter resultados mais precisos e confiáveis. Recentemente, Eron et al. (2024) publicaram um método que usa imagens para quantificar e classificar os frutos do café na planta, o que também permite determinar o momento ideal para a colheita com base na classificação dos frutos para obter maior uniformidade e, assim, melhorar a qualidade. A ferramenta proposta utiliza a versão 7 do algoritmo YOLO (You Only Look Once).

YOLO é um algoritmo de detecção de objetos baseado em imagens (Redmon et al., 2016), que usa uma métrica de precisão média (mAP) com um limite de interseção sobre união (IoU) de 0,5, o que permite avaliar o desempenho do modelo (Bazame et al., 2022; Eron et al., 2024).

REFERÊNCIAS

- AMPA, K. et al. Effects of pre-harvest application of ethephon or abscisic acid on 'Kohi' kiwifruit (*Actinidia chinensis*) ripening on the vine. **Scientia horticultrae**, v. 209, p. 255-260, 2016.
- BARRY, C. S.; GIOVANNONI, J. J. Ethylene and fruit ripening. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 26, p. 143-159, 2007.

BAZAME, H. C. et al. Mapping coffee yield with computer vision. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 6, p. 2372-2387, 2022.

BENASSI, B. J. P. M.; ALMEIDA, G. R. R. **Comportamento do cafeeiro após aplicação de doses de maturador na primeira safra**. 2020. 13 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2020.

BIDDLE, E. et al. Kinetic studies of the thermal decomposition of 2-chloroethylphosphonic acid in aqueous solution. **Plant physiology**, v. 58, n. 5, p. 700-702, 1976.

BINDER, B. M. Ethylene signaling in plants. **Journal of Biological Chemistry**, v. 295, n. 22, p. 7710-7725, 2020.

BI, X. et al. A Systematic Analysis of the Correlation between Flavor Active Differential Metabolites and Multiple Bean Ripening Stages of *Coffea arabica* L. **Molecules**, v. 29, n. 1, p. 180, 2023.

BUDZINSKI, I. G. F. et al. Expression patterns of three α -expansin isoforms in *Coffea arabica* during fruit development. **Plant Biology**, v. 13, n. 3, p. 462-471, 2011.

BUSTAMANTE-PORRAS, J. et al. Molecular characterization of an ethylene receptor gene (CcETR1) in coffee trees, its relationship with fruit development and caffeine content. **Molecular Genetics and Genomics**, v. 277, p. 701-712, 2007.

CARVALHO, G. R. et al. Eficiência do Ethephon na uniformização e antecipação da maturação de frutos de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e na qualidade da bebida. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, p. 98-106, 2003.

CASÉ, I. **Processos alternativos de secagem do café arábica**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (bacharel em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas, 2022.

CHANDEL, N. S. et al. State-of-the-art AI-enabled mobile device for real-time water stress detection of field crops. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 131, p. 107863, 2024.

CHENG, B. et al. Slower development of lower canopy beans produces better coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 14, p. 4201-4214, 2020.

CHENG, B.; FURTADO, A.; HENRY, R. J. The coffee bean transcriptome explains the accumulation of the major bean components through ripening. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 11414, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café, safra 2022, primer levantamento**. v.9, n. 1, 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café, safra 2024, primer levantamento**. v.10, n. 1, 2023.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de café, safra 2024, primer levantamento.** v.11, n. 1, 2024.

CRISOSTO, C. H. et al. Effect of ethephon on ripening, seed development, branch growth and leaf abscission of *Coffea arabica* L. **J Haw Pac Agri**, v. 3, p. 13-17, 1991.

DASS, H. C. et al. Effect of pH and urea on the efficacy of ethephon for induction of flowering in pineapple. **Scientia Horticulturae**, v. 5, n. 3, p. 265-268, 1976.

DAVIS, A. P. et al. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (Rubiaceae). **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 152, n. 4, p. 465–512, 2006.

DAVIS A. P. et al. Growing coffee: *Psilanthus* (Rubiaceae) subsumed on the basis of molecular and morphological data; implications for the size, morphology, distribution and evolutionary history of *Coffea*. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 167, p. 357–377, 2011.

DAVIS, A. P.; RAKOTONASOLO, F. Six new species of coffee (*Coffea*) from northern Madagascar. **Kew Bulletin**, v. 76, n. 3, p. 497-511, 2021.

DE CASTRO, R. D.; MARRACCINI, P. Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 175-199, 2006.

DUSSERT, S. et al. Integrative analysis of the late maturation programme and desiccation tolerance mechanisms in intermediate coffee seeds. **Journal of experimental botany**, v. 69, n. 7, p. 1583-1597, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Exportações de cafés em nível mundial totalizam 78 milhões de sacas de outubro de 2021 a abril de 2022.** 2022.

ERON, F. et al. Computer vision-aided intelligent monitoring of coffee: Towards sustainable coffee production. **Scientia Horticulturae**, v. 327, p. 112847, 2024.

ESPLEY, R. V.; JAAKOLA, L. The role of environmental stress in fruit pigmentation. **Plant, Cell & Environment**, v. 46, n. 12, p. 3663-3679, 2023.

ESQUIVEL, P.; JIMENEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food research international**, v. 46, n. 2, p. 488-495, 2012.

FERREIRA, T. et al. Introduction to coffee plant and genetics. **Coffee: Production, Quality and Chemistry**, p 1-15, 2019.

FERRARA, G. et al. Ethephon as a potential abscission agent for table grapes: effects on pre-harvest abscission, fruit quality, and residue. **Frontiers in plant science**, v. 7, p. 620, 2016.

FOUNTAS, S. et al. The future of digital agriculture: technologies and opportunities. **IT professional**, v. 22, n. 1, p. 24-28, 2020.

GASPARD, B. et al. "Physical and Mechanical Properties of Coffee Cherries and Beans in Africa: Review and the State of Arts," **Food Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 55-74, 2022.

GEROMEL, C. et al. Biochemical and genomic analysis of sucrose metabolism during coffee (*Coffea arabica*) fruit development. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 12, p. 3243-3258, 2006.

GIERSON, D.; KADER, A. A. Fruit ripening and quality. In: The tomato crop: A scientific basis for improvement. Dordrecht: **Springer Netherlands**, p. 241-280, 1986.

HAMEED, A.; HUSSAIN, S. A.; SULERIA, H. A. R. "Coffee Bean-Related" agroecological factors affecting the coffee. **Co-evolution of secondary metabolites**, p. 641-705, 2020.

International Coffee Organization (ICO). **About Statistics of the International Coffee Organization**. 2017.

IQBAL, N. et al. Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 235913, 2017.

KARLOVA, R. et al. Transcriptome and metabolite profiling show that APETALA2a is a major regulator of tomato fruit ripening. **The Plant Cell**, v. 23, n 3, p. 923-941, 2011.

LASHERMES, P. et al. Brief communication. Single-locus inheritance in the allotetraploid *Coffea arabica* L. and interspecific Hybrid *C. arabica* X *C. canephora*. **Journal of Heredity**, v. 91, n. 1, p. 81-85, 2000.

LASHERMES, P. et al. Molecular characterisation and origin of the *Coffea arabica* L. genome. **Molecular and General Genetics MGG**, v. 261, n. 2, p. 259-266, 1999.

LEROY, T. et al. Improving the quality of African robustas: QTLs for yield-and quality-related traits in *Coffea canephora*. **Tree Genetics & Genomes**, v. 7, p. 781-798, 2011.

LIN, Z.; ZHONG, S.; GRIERSON, D. Recent advances in ethylene research. **Journal of experimental botany**, v. 60, n 12, p. 3311-3336, 2009.

LÓPEZ, M. E. et al. An overview of the endogenous and environmental factors related to the *Coffea arabica* flowering process. **Beverage Plant Research**, v. 1, n. 1, p. 1-16, 2021.

NAFISAH, N. et al. Implementation of fuzzy logic control algorithm for temperature control in robusta rotary dryer coffee bean dryer. **MethodsX**, v. 12, p. 102580, 2024.

NAKAYAMA, F. N. et al. Avaliação do momento de aplicação de etephon sobre a qualidade e maturação dos frutos de café cv mundo novo. **Revista OMNIA Exatas**, v. 2, n. 1, p. 7-15, 2009.

MARÍN, L. S. M. et al. Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (*Coffea Arabica* L. var Colombia). **Cenicafé**, v.54, p. 208–225, 2003.

MASARIRAMBI, M. T.; CHINGWARA, V.; SHONGWE, V. D. The effect of irrigation on synchronization of coffee (*Coffea arabica* L.) flowering and berry ripening at Chipinge, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 34, n. 13-16, p. 786-789, 2009.

MEDEIROS, R. de V. V.; RODRIGUES, P. M. A. A economia cafeeira no Brasil e a importância das inovações para essa cadeia. **A Economia em Revista-AERE**, v. 25, n. 1, p. 1-12, 2017.

MESQUITA, C. M. et al. **Manual do café: colheita e preparo (*Coffea arabica* L.)**. Belo Horizonte: EMATER-MG, p. 1-56, 2016.

MURTHY, P. S; NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—a review. **Resour Conserv Recycl**, v. 66, p. 45–58, 2012.

MUSSATTO, S. I. et al. Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. **Food and Bioprocess Technology**, New York, v. 4, n. 5, p. 661-672, 2011.

OLIEN, W. C.; BUKOVAC, M. J. The Effect of Temperature on Rate of Ethylene Evolution from Ethephon and from Ethephon-treated Leaves of Sour Cherry1. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 103, n. 2, p. 199-202, 1978.

ORMOND, J. G. P.; PAULA, S. R. L.; FAVERET FILHO, P. D. S. C. **Café: (Re) conquista dos mercados**. Editora BNDES, n. 10, p. 3-56, 1999.

PANCSIRA, J. International Coffee Trade: a literature review. **Journal of Agricultural Informatics**, v. 13, n. 1, 2022.

PEREIRA, L. F. P. et al. Ethylene production and acc oxidase gene expression during fruit ripening of *Coffea arabica* L. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 283-289, 2005.

PEROTTI, V. E.; MORENO, A. S.; PODESTÁ, F. E. Physiological aspects of fruit ripening: the mitochondrial connection. **Mitochondrion**, v. 17, p. 1-6, 2014.

PIMENTA, C. J.; ANGÉLICO, C. L.; CHALFOUN, S. M. Challenges in coffee quality: Cultural, chemical and microbiological aspects. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 42, p. 337-349, 2018.

RAMOS, M. F. et al. Discrimination of the sensory quality of *Coffea arabica* L. (cv. Yellow Bourbon) produced in different altitudes using decision trees obtained by the CHAID method. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 10, p. 3543-3551, 2016.

RAMOS, P. J. et al. Automatic fruit count on coffee branches using computer vision. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 137, p. 9-22, 2017.

RODRÍGUEZ, J. P. et al. A computer vision system for automatic cherry beans detection on coffee trees. **Pattern Recognition Letters**, v. 136, p. 142-153, 2020.

SÁGIO, S. A. et al. Identification and expression analysis of ethylene biosynthesis and signaling genes provides insights into the early and late coffee cultivars ripening pathway. **Planta**, v. 239, p. 951-963, 2014.

SÁGIO, S. A. et al. Physiological and molecular analyses of early and late *Coffea arabica* cultivars at different stages of fruit ripening. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, p. 3091-3098, 2013.

SALAZAR, M. R. et al. Estudio morfológico anatómico y ultraestructural del fruto de café *Coffea arabica* L. **Cenicafé**, v. 45, n. 3, p. 93-105, 1994.

SALTVEIT, M. E. Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. **Postharvest biology and technology**, v. 15, n. 3, p. 279-292, 1999.

SCHALLER, G. E. Ethylene and the regulation of plant development. **BMC biology**, v. 10, p. 1-3, 2012.

SEGARRA, J. Satellite Imagery in Precision Agriculture. In: Digital Agriculture: A Solution for Sustainable Food and Nutritional Security. **Cham: Springer International Publishing**, p. 325-340, 2024.

SCUDELER, F. et al. Cobertura da pulverização e maturação de frutos do cafeeiro com ethephon em diferentes condições operacionais. **Bragantia**, v. 63, p. 129-139, 2004.

SILVA, F. C. Correlação da força de desprendimento dos frutos em cafeeiros sob diferentes condições nutricionais. **Coffee Science**. v. 11, n. 2, p. 169 - 179, 2016.

SILVA, J.; VARELA, N.; LEZAMA, O. B. P. Multispectral image analysis for the detection of diseases in coffee production. In: Distributed Computing and Artificial Intelligence, 17th International Conference. **Springer International Publishing**, p. 198-205, 2021.

TYAGI, R.; PANDEY, P. C. Applications of drones in precision agriculture: future of smart and sustainable farming. In: Remote Sensing in Precision Agriculture. **Academic Press**, p. 429-453, 2024.

TOCI, A. T.; FARAH, A. Volatile compounds as potential defective coffee beans' markers. **Food chemistry**, v. 108, n. 3, p. 1133-1141, 2008.

TOLESSA, K. et al. 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, n. 9, p. 2849-2857, 2017.

TORRES, G. A. L. et al. *Coffea arabica* L: History, phenology and climatic aptitude of the state of São Paulo, Brazil. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 88, p. e00602020, 2021.

VAAST, P. et al. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 2, p. 197-204, 2006.

VALENCIA-LOZANO, E. et al. *Coffea arabica* L. resistant to coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) mediated by expression of the *Bacillus thuringiensis* Cry10Aa protein. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 765292, 2021.

VIEIRA, H. D. Coffee: The plant and its cultivation. **Plant-parasitic nematodes of coffee**, p. 3-18, 2008.

VOLLMAR, A. M.; MOSER, S. The advent of phyllobilins as bioactive phytochemicals—natural compounds derived from chlorophyll in medicinal plants and food with immunomodulatory activities. **Pteridines**, v. 34, n. 1, p. 20220047, 2023.

WANG, K. L. C.; LI, H. ECKER, J. R. Ethylene biosynthesis and signaling networks. **The plant cell**, v. 14, n. suppl_1, p. S131-S151, 2002.

YANG, S. Regulation of biosynthesis and action of ethylene. **Manipulation of Ethylene Responses in Horticulture, XXII IHC 201**, p. 53-60, 1986.

ZERBINI, P. E. et al. Optical properties, ethylene production and softening in mango fruit. **Postharvest biology and technology**, v. 101, p. 58-65, 2015.

ZOU, S. C. et al. ROS-and CBF-mediated pathways are involved in chlorophyll degradation and anthocyanin accumulation enhanced by cool temperatures in ripening litchi fruits. **Postharvest Biology and Technology**, v. 212, p. 112888, 2024.

SEÇÃO 2

Artigo 1: Aplicação de etileno para a acelerar o amadurecimento de frutos de café (*coffea arabica*) e validação da maturação baseada em imagens

*Artigo preparado de acordo com as diretrizes da norma NBR 6022 (ABNT 2018).

Aplicação de etileno para a acelerar o amadurecimento de frutos de café (*Coffea arabica*) e validação da maturação baseada em imagens

Keila Lizeth Reyes Rodríguez¹, Raphael Ricon de Oliveira¹, Joyce Pereira Alvarenga¹, Francisco Eron¹, Muhammad Noman¹, Antonio Chalfun Junior¹

¹Laboratório de Fisiologia Molecular Vegetal (LFMP), Setor de Fisiologia Vegetal, Departamento de Biologia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, Brasil.

ABSTRACT

Coffee is one of the most traded products in the world, after oil, and it is responsible for generating employment from its production to its commercialization. The final quality of the product can be influenced by many factors, including uneven ripening. Ripening is the final phase of fruit development, a fundamental process for the synthesis of compounds necessary to obtain characteristics such as flavor, aroma, texture, and color. Therefore, to ensure these desirable characteristics for quality, it is important to standardize ripening and harvest the coffee when plants in the field have over 80% mature fruits. The aim of this study was to evaluate the effect of applying ethylene to accelerate coffee fruit ripening and homogenize the harvest, as well as to monitor and compare this effect using visual vs. images counting. The experiment was conducted at Cafuá Farm, located in Ijaci-MG. The experimental period in the field lasted approximately one month, using seven-year-old plants of the Catuaí cultivar (*Coffea arabica*). The experimental design used was randomized blocks, consisting of: C - control, T1 - product application on the entire plant, and T2 - product application on the lower region of the plant. For both treated groups, the same dose of the commercial product IMPULSE (48.0% m/v of ETEFOM) was used at a ratio of 195 mL per 100L of water, following the recommended dose on the product label. visual and images quantification was evaluated. Data collection was done at 0, 15, and 30 days after application. The analysis of quantification and yield showed that the application of ETEFOM had no effect on ripeness, which may have been due to other factors. Despite this, it was possible to determine that the results of visual and images quantification, according to the grouped classification of the fruit, were 84% and 73% of cherry fruit, respectively. The final harvest yield was 77% of the cherry fruit, below the 80% recommended for the start of the harvest. Considering the margin of error in relation to the final harvest, images quantification had a margin of error of 4%, which was closer to the margin of error of 7% obtained in visual quantification. The images method evaluated in this study is a potential tool for obtaining valuable information for producers and researchers about fruit ripening and estimating production yields in the field.

Keywords: quantification; coffee quality; classification; harvest.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do café é um parâmetro muito importante nos mercados internacionais (Nafisah et al., 2024). Esta pode ser comprometida por múltiplos fatores no campo e durante a cadeia de processamento (Hameed, Hussain e Suleria, 2020). No campo, a maturação desigual dos frutos no momento da colheita é provocada pelas florações sequenciais (Masarirambi, Chingwara e Shongwe, 2009) e as mudanças no microclima dentro da mesma planta podem causar alterações genéticas que levam ao amadurecimento tardio na região inferior (Cheng et al., 2020). Atualmente, todos esses fatores continuam sendo um grande desafio no cultivo do café (Cheng et al., 2020; Masarirambi, Chingwara e Shongwe, 2009).

É por isso que alguns produtores no mundo realizam a colheita quando tem o máximo de frutos maduros possíveis ou fazem várias colheitas. No entanto, no Brasil, a colheita é comumente feita uma única vez, seja mecânica ou visualmente, pois a realização em duas ou três vezes aumenta os custos de produção (Da Silva, 2001).

Nos últimos anos, acelerar e padronizar o amadurecimento dos frutos do café para obter café de qualidade tem sido objeto de estudo e discussão, realizando pesquisas sobre a aplicação de produtos que possuem o ETEFOM como princípio ativo, pois atuam na biossíntese do etileno (Crisosto et al., 1991; Carvalho et al., 2003; Scudeler et al., 2004; Nakayama et al., 2009; Benassi e Alma, 2020). Uma vez que a maturação dos frutos climatéricos (banana, maçã, café, kiwi etc.) é induzida por esse hormônio vegetal (Jiang et al., 2000; Harada et al., 2000; Ságio et al., 2013; Ampa et al., 2016). No entanto, para padronizar a maturação ao realizar uma aplicação, é necessário o monitoramento dos frutos. Isso pode ser feito visualmente, quantificando os frutos com base na coloração (Rodríguez et al., 2020), porém isso demanda mais tempo, o que pode aumentar o custo da mão de obra. Monitorar a maturação é uma prática antiga e essencial realizada pelos produtores para estimar a produção e determinar o momento ideal da colheita. Diante da importância dessa prática, novas alternativas tecnológicas foram desenvolvidas; o uso de imagens no campo é uma delas (Ramos et al., 2017; Rodríguez et al., 2020; Bazame et al., 2022; Eron et al., 2024).

Embora muitas pesquisas já estejam disponíveis, algumas das quais foram mencionadas anteriormente neste campo, as tecnologias e o conhecimento estão em constante evolução, buscando obter resultados mais precisos e confiáveis. Recentemente, Eron et al. (2024) desenvolveram um modelo computacional que utiliza imagens para quantificar e classificar os frutos do café na planta.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de etileno na área foliar da planta para acelerar o amadurecimento dos frutos de café e homogeneizar a colheita, bem como monitorar e comparar este efeito utilizando a contagem visual vs. imagens.

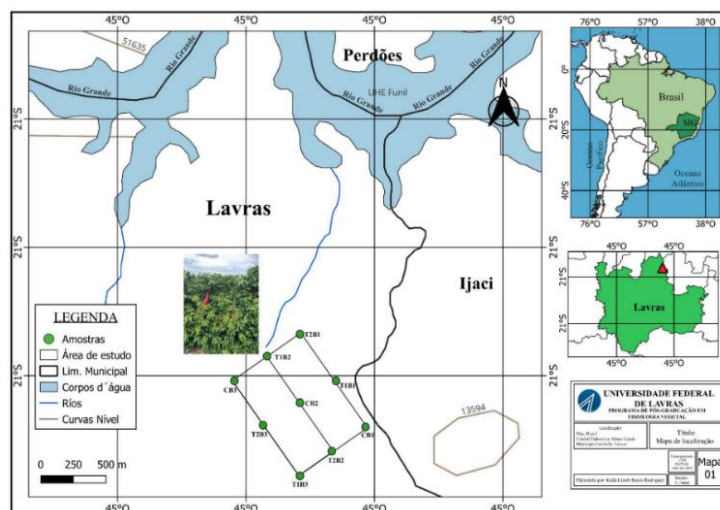
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Localização e condições experimentais

O experimento foi desenvolvido na Fazenda Cafuá, localizada em Ijací, MG – Brasil, com coordenada 21°09'52"S 44°59'31"W, altitude de 933 m acima do nível do mar (figura 1). A região é classificada como subtropical com inverno seco (Cwa) segundo a classificação climática de Köppen Com uma temperatura média anual de 19,4 °C. A precipitação média anual é de 1460 mm e a umidade relativa média anual de 76% (Do Nascimento et al., 2024).

A parcela onde a pesquisa foi instalada possuía as condições ideais (nutricionais e fitossanitárias) recomendadas para o cultivo em produção. O período experimental no campo teve duração aproximada de 1 mês, sendo utilizadas plantas com 7 anos de idade da cultivar Catuaí (*C. arabica*) com espaçamento de 3,60 x 0,80 m.

Figura 1 - Localização experimental em campo na Fazenda Cafuá, Ijací, MG.



Fonte: Do autor (2024).

2.2. Tratamentos e delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, composto por: C- grupo controle sem aplicação de produto, T1- aplicação do produto em toda a planta e T2- aplicação do produto somente na região inferior da planta. Dessa maneira, o experimento foi composto de três tratamentos com três repetições para cada tratamento (cada repetição continha 3 plantas) (Figura 2), mantendo-se uma distância considerável no campo entre cada repetição para que não ocorresse influência na aplicação entre os tratamentos.

Figura 2 - Croqui do experimento conduzido com o *C. arabica* cv. Catuaí Vermelha.

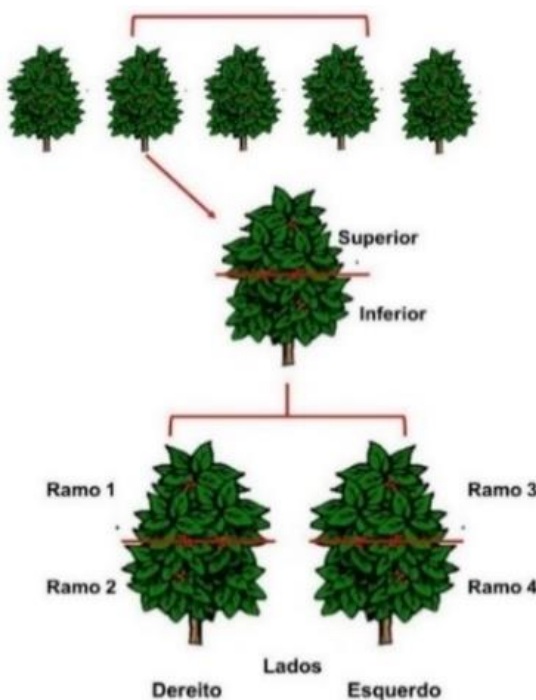


Legenda: C: Controle; T: Tratamento; B: Bloco.

Fonte: Do autor (2024).

As 3 plantas que foram selecionadas por repetição, foram marcadas e cada uma dividida em duas regiões (superior e inferior), também foram marcados 4 ramos por planta, selecionando de cada lado, um ramo na região superior e outro na região inferior (Figura 3). Além disso, foram marcados 3 nós em cada ramo. Dessa forma, foram analisados 12 ramos por repetição.

Figura 3 - Esquema experimental de divisão das plantas que foram avaliadas em *C. arabica* cv. Catuaí Vermelha.



Fonte: Do autor (2024).

Para os dois grupos tratados (T1 e T2) no experimento com o produto comercial IMPULSE (48,0% m/v de ETEFOM) foi utilizada a mesma dose a uma relação de 195 mL.100L-1 de água e uma única aplicação, tomando como referência a dose recomendada pela bula do produto comercial (Sumitomo Chemical, 2023).

Em condições de campo e no período da manhã, a aplicação foi efetuada na área foliar das plantas por meio de um pulverizador costal manual de 20L, abrangendo folhas (região adaxial e abaxial) e frutos que se encontravam em diferentes estágios do amadurecimento principalmente verdes, em menor quantidade verde cana, cereja, passa e seco, tomando como referência a escala da fase fenológica descrita por Moraes et al. (2008).

2.3. Coleta dos frutos

Os frutos foram colhidos 30 dias após a aplicação do produto, de acordo com o intervalo de segurança recomendado para a cultura do café (Sumitomo Chemical, 2023). Em campo, foram colhidos todos os frutos das plantas inicialmente marcadas de todos os tratamentos. Para cada repetição, dos frutos totais foram coletadas

amostras de 1848 gramas (g), as quais foram levadas para o laboratório para classificação e pesagem.

2.4. Avaliações

2.4.1. Quantificação, classificação e rendimento dos frutos

Para registrar a maturação dos frutos desde a aplicação do produto até sua colheita, foi realizada uma contagem visual dos frutos dos nós marcados a cada 15 dias, em função do grau de maturação, estabelecido pela cor do fruto em verde (sem evidências de alteração na cor), verde cana (já iniciaram a maturação), cereja (vermelho-claro e maduros fisiologicamente), passa (vermelho-escuro e com início de desidratação) e seco (desidratados com coloração externa escura) (Morais, 2008).

Todas as avaliações que foram realizadas visualmente também foram realizadas por meio do uso de imagens. Com a ajuda de um telefone (dispositivo móvel), foram tiradas imagens sem flash dos ramos marcados a uma distância de 30 cm aproximadamente e em diferentes condições de luminosidade. As imagens foram nomeadas e armazenadas no computador para posteriormente serem analisadas, utilizado o algoritmo que foi desenvolvido pelo nosso grupo de pesquisa do Laboratório de Fisiologia Molecular de Plantas (LFMP) (Eron et al., 2024). O algoritmo analisou as imagens detectando o número de frutos visíveis em toda a imagem e, no final, foram obtidos dados numéricos da mesma forma que na quantificação visual e, em seguida, analisados entre os tratamentos para cada uma das duas quantificações.

Os frutos da colheita levados ao laboratório para classificação foram separados e pesados de acordo com a classificação mencionada anteriormente. Em seguida, os resultados da colheita foram então comparados com os dados obtidos aos 30 dias por quantificação visual e imagem, mas primeiro foi necessário expressar os dados em porcentagens.

Além disso, com base nos dados coletados, foi feita outra classificação, agrupando os frutos em: verde (verde + verde cana), cereja (cereja + passa) e seco. Utilizando essa classificação, foram feitas as mesmas análises mencionadas anteriormente para comparar as duas classificações de frutos.

2.4.2. Análises estatísticas

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade e submetidos à análise de variância (ANOVA) por meio do software R versão 4.3.3, e as médias de dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Quantificação, classificação e rendimento dos frutos

Para avaliar o grau de maturação dos frutos após a aplicação de ETEFOM ao longo do tempo (0, 15 e 30 dias) foi feita uma avaliação estatística comparando os tratamentos dentro de cada estágio de maturação. Na figura 4, pode-se observar que, para a quantificação visual, em todos os gráficos a escala do número de frutos foi menor do que a escala por imagens, pois esta última levou em conta um número maior de frutos durante a quantificação (Figura S3). Em relação às análises estatísticas da quantificação visual, não foram encontradas diferenças significativas entre os diferentes tratamentos nos diferentes estágios de maturação. O mesmo ocorreu com a quantificação por imagens, onde apenas foram identificadas diferenças significativas entre os tratamentos nos frutos verde cana no dia 0 e nos frutos secos no dia 30 (Figura 4). Estes resultados demonstram que não foi observado nenhum efeito na maturação com a aplicação de ETEFOM. Em contraste com outros estudos em que se constatou que produtos que tem como ingrediente ativo o ETEFOM uniformizam e antecipam de 15 até 30 dias a colheita (Carvalho et al., 2003; 2022; Da Silva et al., 2006; De Negreiros, Nascentes e Brunelli-Nascentes, 2019). Por conseguinte, uma melhor qualidade da bebida (De Negreiros, Nascentes e Brunelli-Nascentes, 2019).

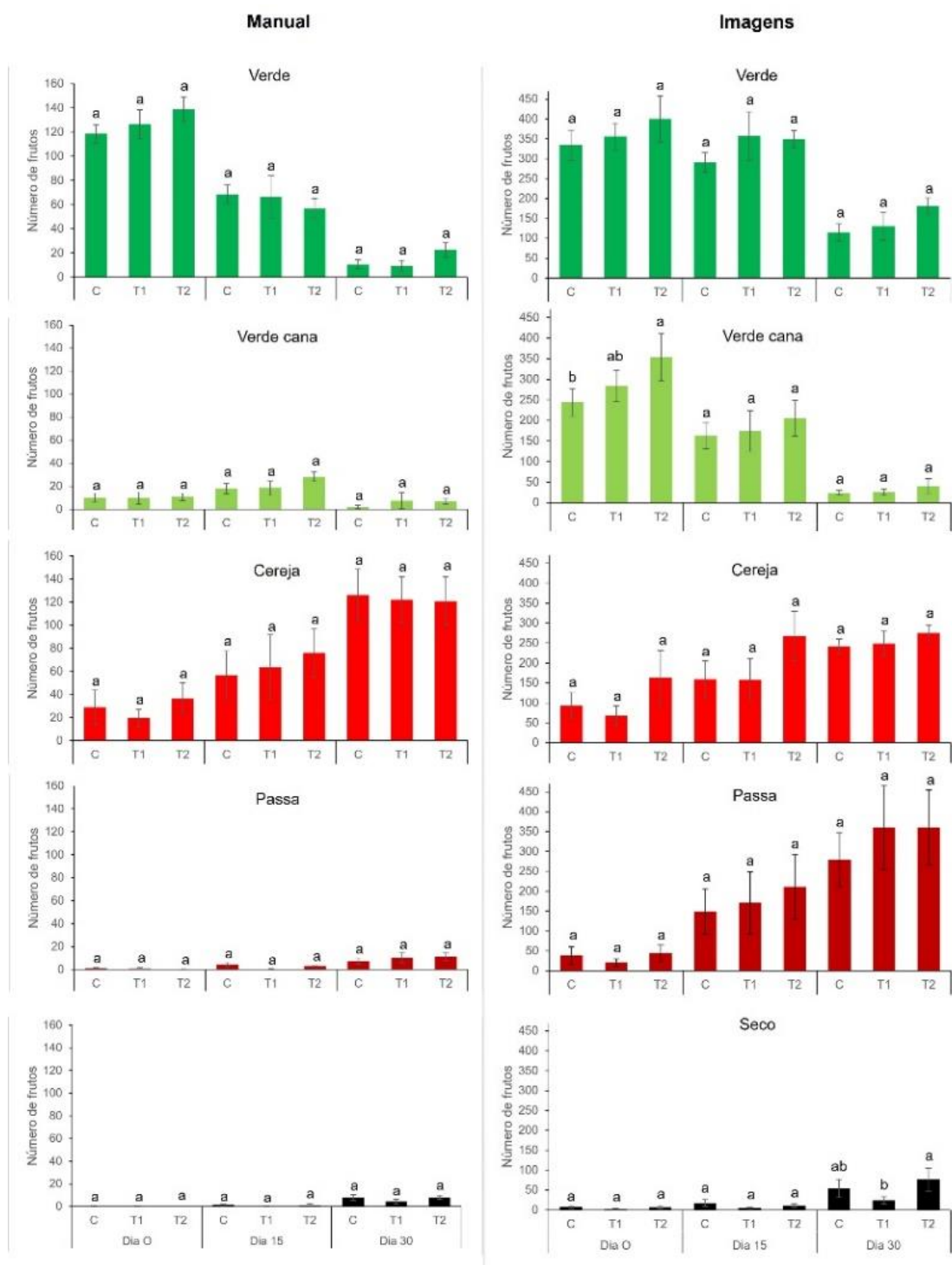
O resultado obtido neste estudo (Figura S2), entre o controle e os tratamentos aos quais foi aplicado o ETEFOM para acelerar o endurecimento, pode ser devido a diversos fatores que comprometem a eficácia do produto. A eficácia da molécula de ETEFOM requer certos cuidados, como o uso de água com baixa alcalinidade para misturar a solução (Walters e Lopez, 2018); o momento da aplicação do produto deve ser quando cerca de 15% dos frutos cereja já estiverem presentes (Winston et al., 1992); e a temperatura ambiente ideal deve ser $\leq 23^{\circ}\text{C}$ (Walters e Lopez, 2018). Neste

estudo, a água da torneira foi usada para misturar com o produto e, em seguida, foi aplicada na área foliar das plantas pela manhã, quando as temperaturas estavam baixas, e momento da aplicação foi realizado quando já tinham frutos cereja (Figura 4).

Além disso, o equipamento utilizado para a aplicação também pode ter influenciado os resultados. Foi utilizado um pulverizador costal, que é menos eficiente em comparação com outros pulverizadores mecanizados (Scudeler et al., 2004). Outro fator relevante é o tipo de cultivar de café (precoce, intermediário e tardio), que pode influenciar a eficácia do ETEFOM. Cultivares intermediários, como a Topázio, não apresentam diferenças na aplicação do produto (Carvalho et al., 2003). No entanto, este estudo usou a cultivar precoce Catuaí, que já demonstrou acelerar o amadurecimento com o ETEFOM (Carvalho et al., 2003).

É importante ressaltar que as condições meteorológicas no campo no dia da aplicação (15/04/2023) não foram favoráveis, foi registrada uma precipitação de 26,9 mm para a região (não estava na previsão), de acordo com a estação meteorológica [83687] LAVRAS - MG (Inmet, 2023). O que pode ter comprometido o efeito do produto. E as diferenças visuais na maturação observadas na Figura S2 entre as regiões superior e inferior são principalmente atribuídas a fatores externos, incluindo a temperatura, como já foi referido por outros autores (Cheng et al., 2020).

Figura 4: Quantificação visual dos frutos de café de toda a planta (à esquerda) e imagens (à direita).



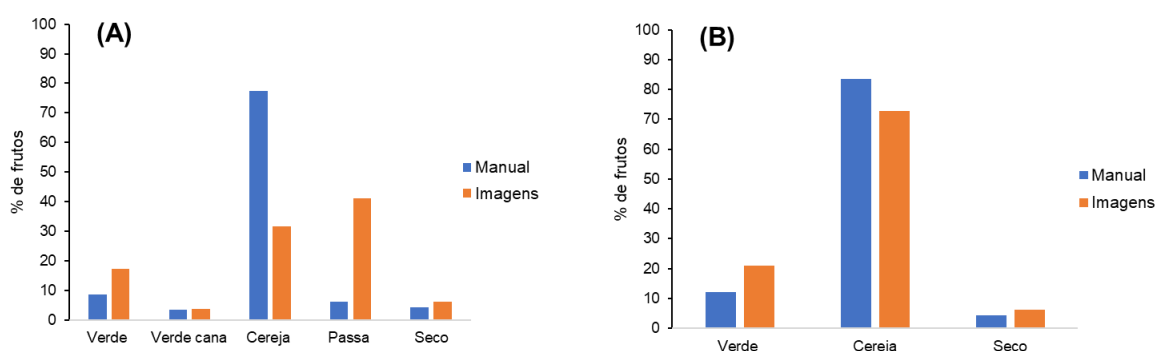
Legenda: De acordo com o estágio de maturação (classificação detalhada) nos dias 0, 15 e 30 após a aplicação dos tratamentos (C controle, T1: aplicação do produto em toda a planta e T2: aplicação do produto somente na região inferior da planta). Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas entre os tratamentos no mesmo período de tempo, de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$). As barras representam o erro padrão da média de três repetições.

Fonte: Do autor (2024).

A partir dos resultados obtidos, foi realizada uma comparação entre ambos métodos de avaliação (visual e imagens) aos 30 dias quando foi feita a colheita. Devido aos possíveis erros na quantificação visual, causados pela percepção individual de cada pessoa ao classificar, foi feita uma análise com 2 tipos de classificação dos frutos, uma considerando todos os estágios e outra agrupando algum deles, conforme mostrado na figura 5 A e B. De acordo com esses resultados, observa-se que para ambas as classificações (A e B), o percentual de frutos verdes pela quantificação por imagens foi maior, 17% e 21% (Fig.5 A e B), enquanto houve uma menor quantidade de frutos cereja na quantificação por imagens.

Para determinar a colheita, a classificação agrupada utilizada na Fig.5 B é a mais utilizada em campo (Nogueira et al., 2021). De acordo com os resultados obtidos para essa classificação, pela quantificação por imagens, obteve-se 73% de frutos maduros no momento da contagem, enquanto que na quantificação visual foi 84%. Deve-se destacar que o mais usual é que a colheita deve ser iniciada apenas quando houver mais de 80% dos frutos maduros (índice de colheita), caso contrário, a qualidade final pode ser comprometida (Ferrão et al., 2012). Uma alta presença de frutas verdes pode alterar significativamente a composição final da bebida (Mazzafera, 1999).

Figura 5: Quantificação dos frutos de café de toda a planta visual e imagens ao dia 30 após a aplicação dos tratamentos.



Legenda: Os gráficos A e B mostram a porcentagem de frutos em dois tipos de classificações. A classificação em B é uma redução dos estádios da classificação em A. Verde (verde + verde cana), cereja (cereja + passa) e seco.

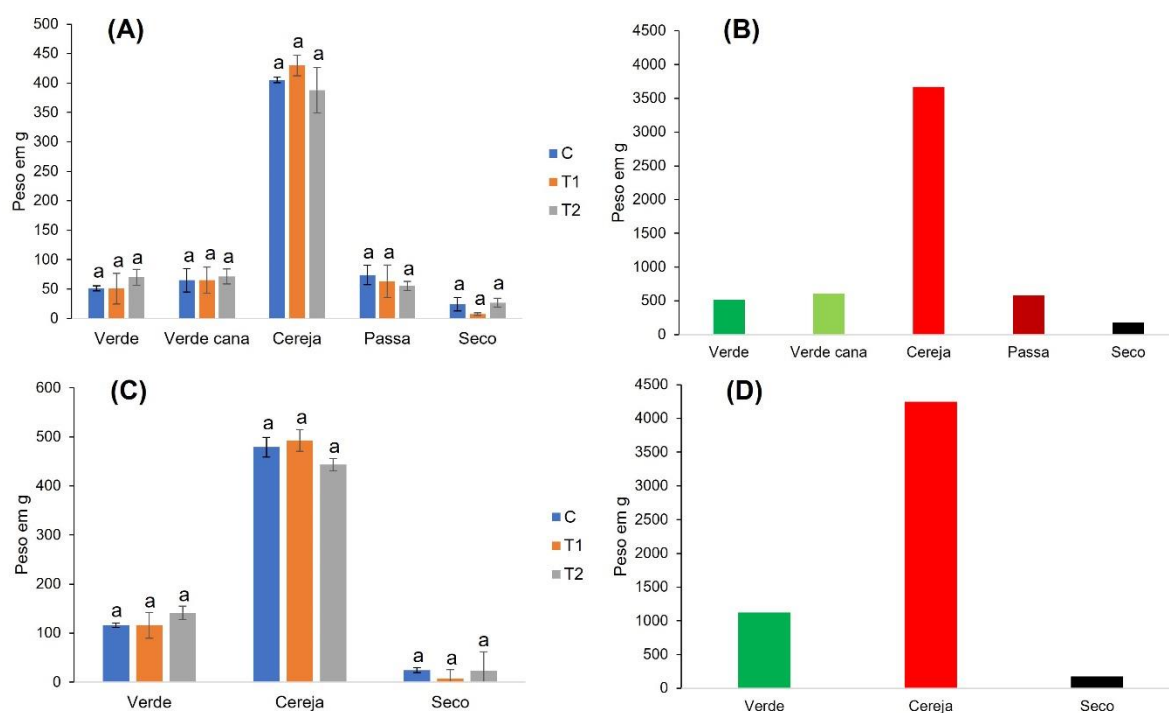
Fonte: Do autor (2024).

Os dados obtidos pela quantificação por imagens estão mais próximos aos dados coletados para o rendimento (figura 6) o qual foi realizado a partir de uma amostra representativa da colheita final (figura S1). A partir da amostragem após a

colheita final, também é possível corroborar que o produto aplicado não teve efeito; estatisticamente, não houve diferenças entre os tratamentos (Figura 6 A e C). Por outro lado, o gráfico (B) e (D) (Figura 6) mostra o peso total da soma de todos os tratamentos, onde foram obtidos 516 g de frutos verdes considerando a classificação detalhada (Figura 6B) e 1121 g para a classificação agrupada (Figura 6D), representando 9% e 20%, respectivamente. Para o fruto cereja, foi obtido um peso de 3669 g na classificação detalhada equivalente a 66% (Figura 6B) e 4246 g equivalente a 77% na classificação agrupada (Figura 6D).

Utilizando a classificação agrupada os dados mostram que 73% na contagem por imagens foi de fruto cereja, enquanto que no rendimento da colheita em campo 77% da amostra foi fruto cereja, com uma margem de erro de 4%, ambos abaixo do 80% recomendado para iniciar a colheita (Ferrão et al., 2012). Enquanto que, no método visual foram obtidos valores acima 80% de fruto cereja com erro de 7% com respeito ao rendimento da colheita final.

Figura 6: Peso de frutos café advindos de uma amostragem da colheita em campo, separados em diferentes classificações.



Legenda: (A) e (C) classificação detalhada. (B) e (D) classificação agrupada. Os gráficos (A) e (C) mostram o peso dos frutos por tratamento (C controle, T1: aplicação do produto em toda a planta e T2: aplicação do produto somente na região inferior da planta). Os gráficos (C) e (D) mostram o peso dos frutos da soma de todos os tratamentos. A classificação agrupada é uma redução dos estádios de maturação. Verde (verde + verde cana), cereja (cereja + passa) e seco. Médias seguidas pelas mesmas letras não apresentam diferenças significativas entre

os tratamentos no mesmo estágio de maturação, de acordo com o teste de Tukey ($P < 0,05$). As barras representam o erro padrão da média de três repetições.

Fonte: Do autor (2024).

Os dados apresentados por Eron et al. (2024) são semelhantes à estimativa encontrada neste estudo. Em outros trabalhos que utilizaram imagens para determinar a maturação, o erro de estimativa da colheita é maior: algoritmos de processamento de imagens 3D com um erro estimado de 3,7% e 8,7% (Ramos, Avendano e Prieto, 2018), algoritmo K-nearest neighbour (KNN) 6,67% (Dermawan et al., 2023), Machine Vision System (MVS) 6% (Ramos et al., 2017).

Embora os resultados obtidos mostrem uma margem de erro baixa (4%) em comparação com outros trabalhos mencionados acima, é possível melhorar a sensibilidade do modelo treinando imagens. Para isso, o modelo é avaliado por uma métrica de precisão mediana (mAP) com um limite de interseção sobre a união (IoU) de 0,5 (Eron et al., 2024).

Em geral os resultados demonstram que com a quantificação por imagens analisado neste trabalho, são obtidos dados confiáveis o que pode ser atribuído ao fato de que a amostragem é mais representativa e precisa para distinguir os estágios de maturação em comparação com a contagem visual, a qual é mais trabalhosa e que envolve várias pessoas na coleta de dados, aumentando assim a probabilidade de erros ao diferenciar os estágios de maturação (Martins et al, 2021). Por outro lado, a quantificação por imagens analisado neste estudo tem vantagens sobre outros métodos propostos, pois não requer equipamentos sofisticados para obter e processar as imagens (Rodríguez et al., 2020; Rosas et al., 2022).

4. CONCLUSÃO

Embora a aplicação de ETEFOM não tenha tido efeito na aceleração da maturação dos frutos por outros fatores, foi possível comprová-lo por meio da quantificação e do rendimento analisados para cada um dos tratamentos. A quantificação por imagens analisado neste estudo mostrou-se eficiente e confiável na classificação e estimativa da maturação dos frutos de café em comparação com o método visual. É uma ferramenta não destrutiva que fornece informações valiosas, oferecendo maior representatividade e precisão dos dados sem a necessidade de equipamentos sofisticados. Isso o torna uma opção prática e viável para produtores e

pesquisadores, para fins como monitoramento, estimativa de produção e determinação do momento ideal da colheita. Além disso, é uma ferramenta que reduz o tempo e, portanto, os custos.

REFERÊNCIAS

- AMPA, K. et al. Effects of pre-harvest application of ethephon or abscisic acid on 'Kohi' kiwifruit (*Actinidia chinensis*) ripening on the vine. **Scientia horticulturae**, v. 209, p. 255-260, 2016.
- BAZAME, H. C. et al. Mapping coffee yield with computer vision. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 6, p. 2372-2387, 2022.
- BENASSI, B. J. P. M.; ALMEIDA, G. R. R. **Comportamento do cafeeiro após aplicação de doses de maturador na primeira safra**. 2020. 13 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Agrônômica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2020.
- CARVALHO, G. R. et al. Eficiência do Ethephon na uniformização e antecipação da maturação de frutos de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) e na qualidade da bebida. **Ciência e Agrotecnologia**, vol. 27, p. 98-106, 2003.
- CARVALHO, D. S. et al. Effects of coffee maturation regulators. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 16, n.1060, 2022.
- CHENG, B. et al. Slower development of lower canopy beans produces better coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 14, p. 4201-4214, 2020.
- CRISOSTO, C. H. et al. Effect of ethephon on ripening, seed development, branch growth and leaf abscission of *Coffea arabica* L. **J Haw Pac Agri**, v. 3, p. 13-17, 1991.
- DA SILVA, F. M. et al. Avaliação da colheita mecanizada do café com o uso do ethephon. **Coffee Science-ISSN 1984-3909**, v. 1, n. 1, p. 1-6, 2006.
- DA SILVA, F. M. et al. Colheita do café mecanizada e semimecanizada. **Boletim de Extensão** - UFLA, Lavras, p. 80, 2001.
- DE NEGREIROS, V. V.; NASCENTES, R. F.; BRUNELLI-NASCENTES, M. C. Efeitos da aplicação de regulador vegetal na maturação e na qualidade de bebida dos frutos do café. **Revista AgroFIB**, v. 1, n. 1, 2019.
- DERMAWAN, M. F. H. et al. Image Processing Implementation to Classify Coffee Fruit Ripeness Using K-Nearest Neighbor (KNN) Algorithm. In: **2023 International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)**. IEEE, p. 538-543, 2023.

DO NASCIMENTO, J. F. et al. Variability in *Eremanthus erythropappus* (DC) MacLeish clones revealed by morphological and molecular markers. **Genetic Resources and Crop Evolution**, p. 1-14, 2024.

ERON, F. et al. Computer vision-aided intelligent monitoring of coffee: Towards sustainable coffee production. **Scientia Horticulturae**, v. 327, p. 112847, 2024.

FERRÃO, R. G. et al. Café conilon: Técnicas de produção com variedades melhoradas. 4. ed. revisada e ampliada. Vitória, ES: **Incapar**, p.74, 2012.

HAMEED, A.; HUSSAIN, S. A.; SULERIA, H. A. R. “Coffee Bean-Related” agroecological factors affecting the coffee. **Co-evolution of secondary metabolites**, p. 641-705, 2020.

Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet). **Mapa de estações**. 2023

JING, H. C.; SCHIPPERS, J. H.; HILLE, J.; DIJKWEL, P. P. Ethylene-induced leaf senescence depends on age-related changes and OLD genes in *Arabidopsis*. **J. Exp. Bot.**, v. 56, n. 421, p. 2915–2923, 2005.

MARTINS, R. N. et al. A novel vegetation index for coffee ripeness monitoring using aerial imagery. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 263, 2021.

MASARIRAMBI, M. T.; CHINGWARA, V.; SHONGWE, V. D. The effect of irrigation on synchronization of coffee (*Coffea arabica* L.) flowering and berry ripening at Chipinge, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 34, n. 13-16, p. 786-789, 2009.

MAZZAFERA, P. Chemical composition of defective coffee beans. **Food chemistry**, v. 64, n. 4, p. 547-554, 1999.

MORAIS, H. et al. Escala fenológica detalhada da fase reprodutiva de *Coffea arabica*. **Bragantia**, v. 67, p. 257-260, 2008.

NAFISAH, N. et al. Implementation of fuzzy logic control algorithm for temperature control in robusta rotary dryer coffee bean dryer. **MethodsX**, v. 12, p. 102580, 2024.

NAKAYAMA, F. N. et al. Avaliação do momento de aplicação de etephon sobre a qualidade e maturação dos frutos de café cv mundo novo. **Revista OMNIA Exatas**, v. 2, n. 1, p. 7-15, 2009.

NOGUEIRA, M. R. et al. A novel vegetation index for coffee ripeness monitoring using aerial imagery. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 263, 2021.

RAMOS, P. J.; AVENDANO, J.; PRIETO, F. A. Measurement of the ripening rate on coffee branches by using 3D images in outdoor environments. **Computers in Industry**, v. 99, p. 83-95, 2018.

RAMOS, P. J. et al. Automatic fruit count on coffee branches using computer vision. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 137, p. 9-22, 2017.

REDMON, J. et al. You only look once: Unified, real-time object detection. **En Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition**. p. 779-788, 2016.

RODRÍGUEZ, J. P. et al. A computer vision system for automatic cherry beans detection on coffee trees. **Pattern Recognition Letters**, v. 136, p. 142-153, 2020.

ROSAS, J. T. F. et al. Coffee ripeness monitoring using a UAV-mounted low-cost multispectral camera. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 1, p. 300-318, 2022.

SÁGIO, S. A. et al. Physiological and molecular analyses of early and late *Coffea arabica* cultivars at different stages of fruit ripening. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, p. 3091-3098, 2013.

SCUDELER, F. et al. Cobertura da pulverização e maturação de frutos do cafeeiro com ethephon em diferentes condições operacionais. **Bragantia**, v. 63, p. 129-139, 2004.

SUMITOMO CHEMICAL. **Impulse**. 29 nov. 2023. Disponível em: <https://www.sumitomochemical.com.br/wp-content/uploads/products/files/reguladores-de-crescimento-impulse-bula-1.pdf>. Acesso em: 9 set. 2024.

WALTERS, K. J.; LOPEZ, R. G. Ethephon foliar sprays are influenced by carrier water alkalinity and ambient air temperature at application. **HortScience**, v. 53, n. 12, p. 1835-1841, 2018.

WINSTON, E. C. et al. Ethylene-induced fruit ripening in arabica coffee (*Coffea arabica* L.). **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 32, n. 3, p. 401-408, 1992.

MATERIAL SUPLEMENTAR

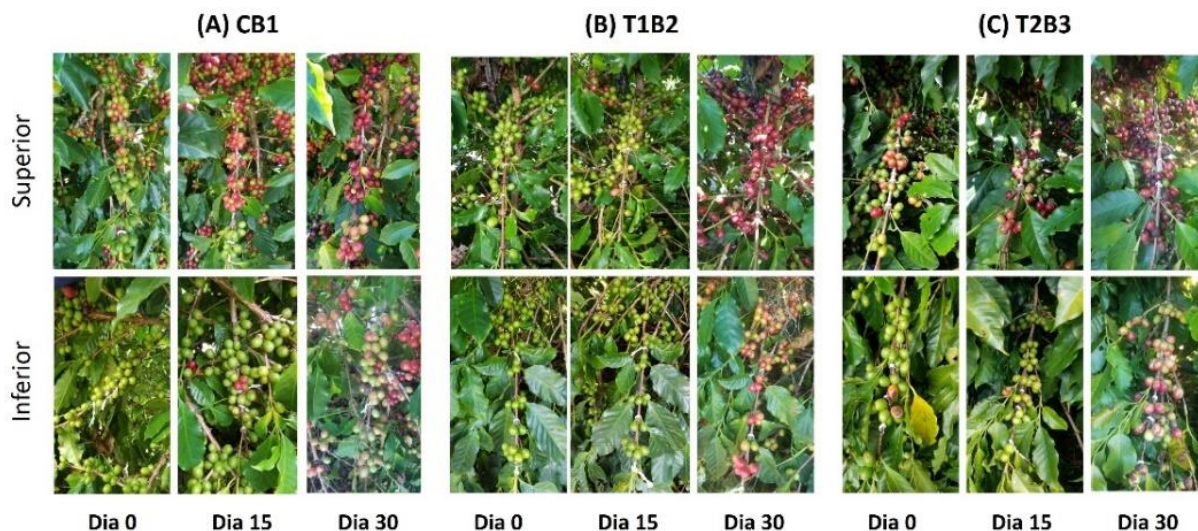
Figura S1: Representação da quantificação e classificação detalhada dos frutos da colheita no campo de uma repetição biológica por tratamento.



Legenda: (A) C- Controle; (B) T1 – aplicação em toda a planta; (C) T2 – aplicação só à região inferior da planta.

Fonte: Do autor (2024).

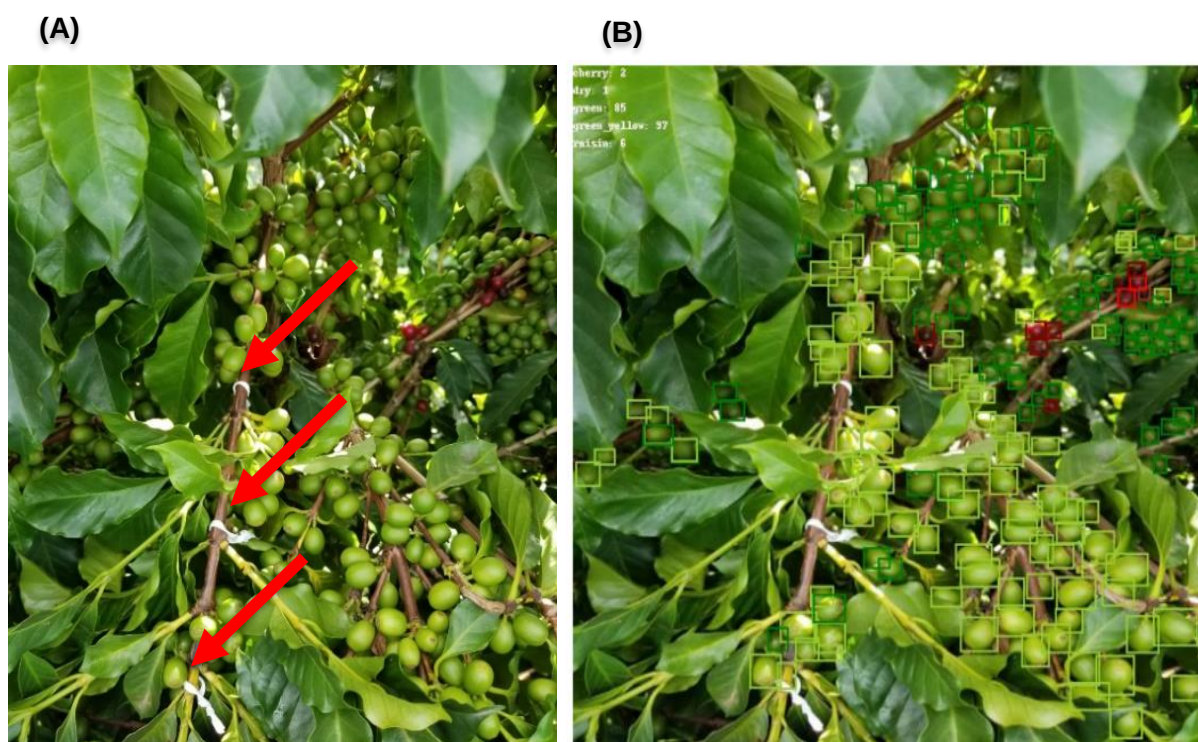
Figura S2: Representação do amadurecimento dos frutos ao longo do tempo no campo de uma repetição biológica por tratamento.



Legenda: (A) C- Controle; (B) T1 – aplicação em toda a planta; (C) T2 – aplicação só à região inferior da planta.

Fonte: Do autor (2024).

Figura S3: Representação da quantificação dos frutos de café visual e imagens.



Legenda: (A) Ramo marcado com 3 nós que foram selecionados para realizar a quantificação visual. (B) Imagem do mesmo ramo marcado e analisado pelo algoritmo que quantificou todos os frutos mostrados. As caixas de diferentes cores representam as etapas que foram analisadas (classificação detalhada dos frutos).

Fonte: Do autor (2024).

SEÇÃO 3

ARTIGO 2: Qualidade a nível molecular dos frutos do café: avanços e perspectivas

*Artigo preparado de acordo com as diretrizes da norma NBR 6022 (ABNT 2018).

Qualidade a nível molecular dos frutos do café: avanços e perspectivas

Keila Lizeth Reyes Rodríguez¹, Joyce Pereira Alvarenga¹, Raphael Ricon de Oliveira¹, Antonio Chalfun Junior¹

¹Laboratório de Fisiologia Molecular Vegetal (LFMP), Setor de Fisiologia Vegetal, Departamento de Biologia, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Minas Gerais, Brasil.

ABSTRACT

The quality of coffee is considered a fundamental parameter for its commercialization in international markets. Many studies have demonstrated differences between the two *Coffea* species of commercial interest, with *Coffea arabica* being the species with better sensory quality than *Coffea canephora*, due to variations in the content of the main compounds that determine the quality of the beverage during roasting. These compounds are defined during bean formation and maturation, which are influenced by several internal and external factors, including the expression of genes involved in the main biosynthetic pathways. Molecular studies in recent years have made significant advances in the understanding of these compounds, however, further studies of the two species are still required to help understand the interaction and key points. As demonstrated in this literature review, detailed information is provided on the molecular advances that have been related to coffee quality and are available for *C. arabica* and *C. canephora*.

Keywords: genes, endosperm, storage compounds, development, fruit ripening

1. INTRODUÇÃO

O café é uma cultura altamente demandada pelos mercados nacionais e internacionais devido à sua ampla aceitação pelos consumidores (Dos Santos, 2021; Murthy e Naidu, 2012; Surma e Oparil, 2021). A demanda impulsiona a economia de um país, mas também serve como uma fonte de emprego para as inúmeras famílias que trabalham no campo e na cadeia de produção. O comércio mundial de café é baseado em 2 espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora* que representam 60% e 40% da produção mundial respectivamente (Valencia, 2021). A espécie arábica é mais apreciada pelos consumidores por sua qualidade na bebida, destacando-se por conter sabores e aromas distintivos (Barbosa et al., 2019). Esses compostos são o resultado de múltiplas interações entre fatores genéticos (Leroy et al., 2011), ambientais (Ramos et al., 2016) e agronômicos (Gaspard et al., 2022) durante o desenvolvimento do grão.

A composição final dos grãos e a maturação desuniforme (Masarirambi, Chingwara e Shongwe, 2009) no momento da colheita representam 40% da qualidade

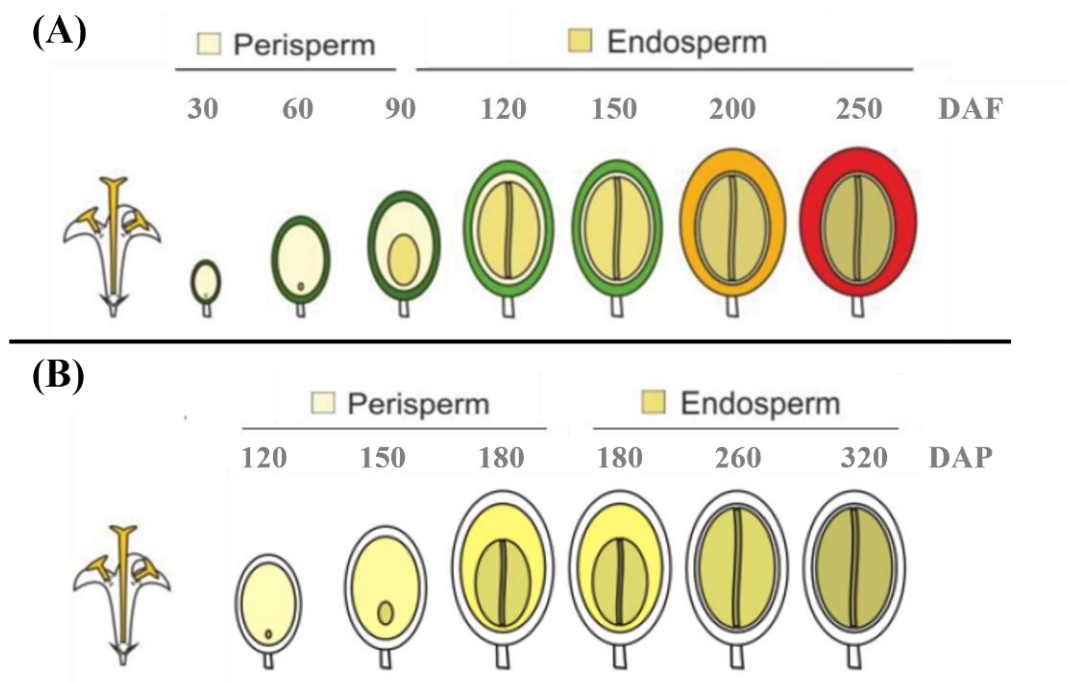
final do café, enquanto que os 60% restante é definido na pós-colheita até seu processamento (Musebe, Agwanda e Mekonen, 2007; Velásquez e Banchón, 2023). Como grande parte da qualidade do grão é definida desde o desenvolvimento do fruto (Pérez, 2023), é importante estudar, mais a fundo, as principais vias relacionadas à qualidade, e como ocorrem as interações a nível molecular durante o desenvolvimento. Portanto, esta revisão tem como objetivo compilar a informação atual dos avanços na qualidade dos frutos a nível molecular, proporcionando uma visão geral útil para estabelecer novas pesquisas que auxiliem na obtenção de mais respostas.

2. ANATOMIA E DESENVOLVIMENTO DO FRUTO DE CAFÉ

O fruto do cafeeiro é considerado uma drupa carnosa, com pericarpo composto por várias camadas. O exocarpo, que corresponde à pele externa do fruto, seguido pelo mesocarpo também conhecido como mucilagem ou polpa e por último, o endocarpo, denominado pergaminho, uma fina capa que envolve as sementes (Esquivel e Jimenez, 2012). A semente, por sua vez, é dividida em perisperma ou pele prateada, que constitui a capa mais externa, o endosperma, que é o principal tecido de reserva e o embrião, parte importante para iniciar o processo da germinação (Ferreira et al., 2019; Geromel et al., 2006). Nos frutos do café, o ciclo fenológico de desenvolvimento e maturação é mais curto em *C. arabica* em comparação com *C. canephora*, levando de 6 a 9 meses e de 9 a 11 meses, respectivamente (Wintgens, 2004). Em *C. arabica*, nos primeiros estádios após a fecundação o tecido mais visível é o perisperma (Figura 1A), enquanto o endosperma se desenvolve a partir dos 15-150 dias após a floração (DAF), sendo entre os 90-120 DAF onde ocorre seu maior crescimento e também a diminuição do perisperma, reduzindo-se a uma película fina, por outro lado, o embrião torna-se visível até os 90-105 DAF de desenvolvimento (Dussert et al., 2018; Salazar et al., 1994) Em contraste, o desenvolvimento em *C. canephora* é mais lento, conforme mostrado na Figura 1B.

O perfil de qualidade e sabor da bebida de café e o momento da colheita são determinados pelo desenvolvimento dessas camadas (Mazzafera et al., 1998; Vaast et al., 2006); além dos aspectos culturais e agrônômicos.

Figura 1: Diagrama esquemático do desenvolvimento dos frutos de café.



Legenda: (A) *C. arabica* e (B) *C. canephora*. Dias após a floração (DAF) e dias após a polinização (DAP).

Adaptada de COTTA (2017) e DUSSERT et al. (2018).

3. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS GRÃOS DE CAFÉ

O estudo dos compostos químicos dos grãos de café verde é fundamental para compreender os elementos que contribuem para as características sensoriais da qualidade do café, pois existe uma correlação entre eles (Barbosa et al. 2019; Farah et al., 2006). De acordo com Barbosa et al. (2019) e Ky et al. (2001), a qualidade está relacionada a maiores teores de lipídios, sacarose, trigonelina e menos cafeína, proteínas, minerais e ácido clorogênico (ACG). A concentração média desses compostos varia entre as espécies, como se mostra na Tabela 1 para os grãos verdes.

Tabela 1. Compostos químicos dos grãos de café verde.

Compostos	<i>C. arabica</i> ^a	<i>C. canephora</i> ^a	Referências
Carboidratos (Sacarose)	40,65% - 59,38% (7,4% - 11,1%)	37% (4,05% - 7,05%)	(Degefa et al., 2022; Muhari et al., 2023; Ky et al., 2001)

Proteínas	11% - 13%	11% – 13%	(Wei e Tanokura, 2015)
Lipídeos	17 %	8,1% - 9,8%	(Mazzafera et al., 1998; Silva et al., 2020; Wagemaker et al., 2011)
Minerais	3% - 4,2%	4,0% - 4,5%	(Wei e Tanokura, 2015)
ACG	3,40% - 7,24%	7,88% - 14,4%	(Ky et al., 2001; Narita e Inouye, 2015)
Cafeína	1,0%	1,9%	(Koshiro et al., 2006)
Trigonelina	0,88% - 1,77%	0,75% - 1,24%	(Ky et al., 2001)

^a Porcentagem do conteúdo de matéria seca.

4. METABOLISMO E EXPRESSÃO GENÉTICA ASSOCIADO À QUALIDADE

4.1. Sacarose

A sacarose é uma molécula que é sintetizada em tecidos fonte (folhas maduras) e é transportada via apoplasto e simplasto para os tecidos dreno (fruto, semente e raiz) (Wind, Smeekens e Hanson, 2010). Uma vez que a descarga de sacarose ocorre no fruto, ela deve ser quebrada em hexoses, através de uma invertase específica (de parede celular, citosólica ou vacuolar) em cada local de quebra, hidrolisando a sacarose em glicose e frutose ou através da sacarose sintase (Susy) no citoplasma que degrada a sacarose em UDP-glicose e frutose (Cheng et al., 2020; Ruan, 2012). Presume-se que essas hexoses no citoplasma podem ser usadas para a formação de lipídios, proteínas, polissacarídeos da parede celular e ACG. Por outro lado, as hexoses no citoplasma podem ser sintetizadas pela sacarose fosfato sintase (SPS) e pela sacarose fosfato fosfatase (SPP) em sacarose novamente (Cheng et al., 2020).

De acordo com Geromel et al. (2006) a separação dos tecidos dos frutos de *C. arabica* só foi possível desde os 60 DAF. Neste estudo encontraram conteúdos de sacarose e açúcares redutores a partir dos 60 DAF no pericarpo e perisperma, enquanto no endosperma a partir dos 118 DAF, no entanto, recentemente foi demonstrado que não há mobilização de sacarose e de teores de açúcares redutores

do pericarpo (epicarpo e mesocarpo) para o endosperma de frutos em diferentes estádios de maturação (Baptistella et al., 2024). A nível molecular, foram identificadas duas isoformas da enzima Susy na espécie *C. arábica*, denominadas *CaSUS1* e *CaSUS2*. Estes genes são expressos em diferentes momentos ao longo do desenvolvimento dos frutos. Durante as etapas iniciais da formação do fruto, há uma maior expressão do gene *CaSUS1* no pericarpo (60 e 147 DAF), perisperma (60 e 89 DAF) e endosperma (118 e 147 DAF). Conforme o fruto amadurece, a expressão de *CaSUS1* diminui, enquanto a expressão de *CaSUS2* aumenta, especialmente no pericarpo (205 e 234 DAF) e endosperma (234 DAF) (Geromel et al., 2006). A expressão de *CaSUS2* coincide com a maior atividade da enzima Susy nas últimas etapas (Geromel et al., 2005). No citoplasma, a invertase neutra do citosol (INC) desempenha duas funções principais: regular os níveis de açúcar e degradar sacarose, assim como *CaSUS2* quando a expressão de *CaSUS1* diminui. Enquanto a invertase ácida da parede celular (IAP) é expressa no início, assim como *CaSUS1*, e a invertase ácida vacuolar (IAC) na etapa final de maturação (Cheng et al., 2020).

Em um estudo comparativo entre as espécies *C. arabica* e *C. canephora*, foram identificadas diferenças na síntese e no acúmulo de sacarose. Em *C. canephora*, observou-se maior atividade de Susy e IAC e expressão dos genes *CcSUS2* e *INVERTASE 2 (CcINV2)* no início do desenvolvimento dos grãos em comparação a *C. arabica*, no entanto, nas etapas posteriores a atividade diminuiu. Além disso, observou-se que nos últimos estágios de amadurecimento há uma menor atividade de SPS e baixa expressão de *SACAROSE FOSFATO FOSFATASE 1 (CcSPS1)*, o que pode explicar o menor acúmulo de sacarose no grão em relação à *C. arabica* (Privat et al., 2008).

4.2. Parede celular

A parede celular é uma organela vegetal que rodeia a membrana plasmática da célula, compostas principalmente por celulose, hemicelulose pectina e, em menor escala, lignina e outros compostos (Zhang et al., 2021) e é uma estrutura que desempenha diversas funções, entre elas a manutenção da pressão de turgescência celular, suporte estrutural, comunicação entre as células e principal barreira de proteção contra ataques de insetos, patógenos e estresse ambiental (Bacete et al., 2018; Polko e Kieber, 2019; Zhang et al., 2021). Existem dois tipos de parede celular,

a primária e a secundária com distintas funções e composição. A primária está relacionada à divisão e expansão celular, enquanto a secundária proporciona aos tecidos força e rigidez somente quando o crescimento celular é parado (Li, Fernie e Persson, 2016).

Durante o processo de amadurecimento dos frutos, a parede celular primária sofre modificações estruturais em polissacarídeos como celulose, hemicelulose e pectinas que levam à perda de firmeza (Brummell, 2006), como consequência da expressão gênica e da ação de algumas enzimas (Goulao e Oliveira, 2008), proteínas e hormônios vegetais (Budzinski et al., 2011).

A celulose é composta de cadeias simples de glicoses ligadas entre si por ligações β -1,4. A síntese de celulose ocorre na membrana plasmática por meio de um complexo de celulose sintase (CS) que é subdividido em unidades de proteína de celulose sintase (CesA) (Polko e Kieber, 2019; Turner e Kumar, 2018). A sacarose está envolvida na biossíntese de celulose na parede celular e foi sugerido que algumas das isoformas Susy estão envolvidas na degradação, fornecendo UDP-glicose como o principal substrato da CesA (Amor et al., 1995; Guerriero, Fugelstad e Bulone, 2010).

As microfibrilas de celulose são conectadas à hemicelulose por várias ligações de hidrogênio, dando suporte estrutural à célula (Zhang et al., 2021). A hemicelulose, ao contrário da celulose, é uma cadeia ramificada de polissacarídeos heterogêneos. Há diferentes tipos de hemiceluloses nas paredes celulares (Scheller e Ulvskov, 2010); no caso da parede celular primária, ela é caracterizada por conter mais xiloglucanos e arabinoxilanos (Cosgrove, 2024). A síntese de hemicelulose (Scheller e Ulvskov, 2010), bem como de pectinas (Atmodjo, Hao e Mohnen, 2013), ocorre no aparelho de Golgi por um conjunto de enzimas chamadas glicosiltransferases, usando açúcares como substrato. As pectinas são compostas principalmente de ácido galacturônico e há dois tipos de pectinas estruturais conhecidas como ramnogalacturonana-I (RG-I) e homogalacturonana (HG) (Cosgrove, 2024).

Várias enzimas estão envolvidas na degradação da parede celular (Goulao e Oliveira, 2008) e as β -galactosidases e a pectina metil esterase (PME) foram estudadas em frutos de café (Cação et al., 2012; Golden, John e Kean, 1993). Há atividade de glicosidase durante o desenvolvimento e o amadurecimento dos frutos de *C. arabica*. A enzima β -galactosidase é uma enzima glicosidase envolvida no amolecimento das paredes celulares, com um aumento constante da atividade ao

longo do desenvolvimento e do amadurecimento, catalisando galactanas e arabinogalactanas e, quando em conjunto com a enzima pectinase, catalisa pectinas, galactanas e arabinogalactanas, liberando galactose na reação (Golden, John e Kean, 1993). A PME tem o mesmo padrão de atividade das β -galactosidases em frutos de *C. arabica*, no mesmo estudo foi observado que o gene da *PME ISOFORM* (*CaPME4*) é expresso somente no pericarpo durante 210-300 DAF, tendo maior expressão aos 300 DAF (Cação et al., 2012).

As cascas de frutos maduros de café contêm níveis mais altos de celulose, depois hemicelulose e, por último, lignina (Gouvea et al., 2009; Navya e Pushpa, 2013). Já a polpa do fruto de *C. arabica* contém níveis mais elevados de pectina e menores níveis de hemicelulose (xiloglucanos, galactomananos e arabinogalactanos) (Reichembach et al., 2024).

Os grãos de café são dominados por polissacarídeos de hemicelulose (galactomananos, arabinosilanos, arabinogalactanos e arabinanos) e celulose (Adler et al., 2015; Geromel et al., 2006). Polissacarídeos que, quando degradados durante a torrefação do café, alteram positivamente as propriedades físicas e químicas importantes para a qualidade (Li et al., 2021; Moreira et al., 2015; Redgwell et al., 2002).

Um estudo em *C. arabica* constatou que, nos estágios iniciais de formação do fruto, entre 56 e 98 DAF, há níveis mais altos de arabinogalactanos, arabinosilanos e arabinanos, entre 98 e 140 DAF há uma proporção maior de galactomananos seguidas de arabinosilanos e, entre 140 e 224 DAF, predominam as galactomananos ligadas às arabinogalactanos e às arabinanos (Adler et al., 2015). Esses dados coincidem com Redgwell et al. (2003), que determinaram que cerca de 50% das proporções no grão de *C. arabica* são ocupadas por galactomananos e coincidem com os mesmos estágios de expressão gênica (Cheng, Furtado e Henry, 2018), os genes *MANNAN SYNTHASE 1* (*ManS1*) e *GALACTOMANNAN GALACTOSYLTRANSFERASE 1* (*GMGT1*) desempenham um papel importante na biossíntese de galactomananos (Pré et al, 2008), a expressão desses genes, bem como a coexpressão com outros genes importantes na biossíntese de galactomananos, incluindo *MANNOSE-1P GUANYLTRANSFERASE* (*MGT*), *UDP-GLUCOSE 4'-EPIMERASE* (*UG4E*), *ManS*, *GMGT* e α -*GALACTOSIDASE* (α -*Gal*) (Joët et al., 2014). Além disso, a expressão de genes envolvidos com arabinolactanos, como *FACCILIN-LIKE ARABINOGLALACTAN 17* (*CaFLA17*) em frutos verdes,

enquanto *FACCILIN-LIKE ARABINOGLACTAN 1 (CaFLA1)* em frutos que iniciam o processo de degradação da clorofila (Cheng, Furtado e Henry, 2018).

Foi detectado que os níveis de arabinogalactanas em grãos de *C. canephora* são relativamente mais altos do que em *C. arabica* (Bradbury e Halliday, 1990). Por outro lado, outro estudo utilizou grãos de café de frutos maduros e encontrou maior teor de manose (açúcar simples que se liga a outros açúcares para formar polissacarídeos de hemicelulose) em *C. arabica* do que em *C. canephora*; entretanto, não foram encontradas diferenças no teor de polissacarídeos (Fischer et al., 2001).

4.3. Os ácidos clorogênicos (ACG)

Os ACG são compostos químicos responsáveis pelo amargor na bebida do café e, assim como a lignina e as antocianinas, são produtos da biossíntese da via fenilpropanoide (Campa et al., 2003; Ivamoto et al., 2013; Joët et al., 2010). Cerca de 82 tipos de ACG foram encontrados em grãos de café verde (Narita e Inouye, 2015). No entanto, as principais classes são os ácidos cafeoilquínicos (ACQ), os ácidos dicafeoilquínicos (diACQ) e ácidos feruloilquínicos ou ferálico (AFQ) (Campa et al., 2003), sendo os ACQ mais abundantes (Koshiro et al., 2007), com variações genéticas em algumas das principais enzimas da biossíntese de ACG (Ivamoto et al., 2013). O teor total de ACG no pericarpo e nos grãos de café diminui durante a maturação, com uma diferença entre as espécies, sendo que o *C. canephora* tem teores mais altos do que o *C. arabica* (Koshiro et al., 2007).

Em *C. arabica*, a maioria dos transcritos de genes associados à ACQ é expressa quando a despigmentação da clorofila começa a degradar durante o amadurecimento (Cheng, Furtado e Henry, 2018), no entanto, entre 90 e 120 DAF, a rede de coexpressão de genes está relacionada à síntese de ACQ e, a partir de 240 DAF, há uma interação complexa entre vários genes (Joët et al., 2010). Isso pode ser devido, em parte, à regulação gênica por mudanças de temperatura; no início do desenvolvimento do fruto, as baixas temperaturas favorecem o acúmulo de dois isômeros de ACQ (5- ACQ e di3,5-ACQ) e esses isômeros em estágios posteriores são isomerizados em ACQ menor (Joët et al., 2010).

No estágio inicial de desenvolvimento dos grãos de *C. canephora*, um aumento da expressão dos genes de *PHENYLALANINE AMMONIA LYASE 1 e 3 (CcPAL1 e 3)* regulam a atividade da primeira enzima da via fenilpropanoide que catalisa a fenilalanina

em ácido cinâmico, e o gene *HYDROXYCINNAMOYL-COA QUINATE HYDROXYCINNAMOYL TRANSFERASE* (*CcHQT*) (Lepelley, 2012) envolvido na regulação da enzima que catalisa o cafeoil CoA em ACQ (Knevitt, 2017). Além disso, nesta mesma etapa no pericarpo também se tem aumento da expressão dos genes *CcPAL1* e 2 (Lepelley, 2012).

Usando a técnica de mapeamento, foram localizados genes em regiões cromossômicas (Leroy et al., 2011), como o gene *CAFFEOYL-COENZYME A 3-O-METHYLTRANSFERASE* (*CCoAOMT*) em várias espécies de café, que regula a enzima que catalisa a conversão de cafeoil-CoA em feruloil-CoA, importante no acúmulo do conteúdo de ACG (Campa et al., 2003) e o gene *CcPAL1* de *C. canephora* envolvido na regulação inicial da via de biossíntese de ACG (Mahesh et al., 2006), assim como em outros estudos realizados em *C. canephora* que identificaram a co-localização de certos loci de caracteres quantitativos (QTL) relacionados à qualidade, como mostrado por Leroy et al. (2011) e sua associação com características organolépticas e bioquímicas, enquanto que para *C. arabica* não há informações disponíveis, conforme relatado em uma revisão da literatura que compilou informações sobre compostos relacionados à qualidade (Tran et al., 2016).

4.4. Cafeína

A cafeína é um composto alcalóide nitrogenado que, assim como o ACG, confere as características amargas à bebida do café (Cheng et al., 2016; Perrois et al., 2015). A síntese ocorre por meio da via da xantosina, que posteriormente sofre metilação sequencial como resultado da atividade de algumas N-metiltransferases envolvidas: xantosina-metiltransferase (XMT), 7-metilxantina transferase (MXMT) e 3,7-dimetilxantina metiltransferase (DXMT) (Ogawa et al., 2001; Ogita et al., 2004; Perrois et al., 2015). A síntese de cafeína em *C. arabica* e *C. canephora* ocorre nos estágios iniciais do desenvolvimento do fruto, com um acúmulo constante nos grãos à medida que o amadurecimento avança para ambas as espécies; no entanto, o conteúdo final em *C. canephora* é maior (Koshiro et al., 2006). Essa diferença pode ser parcialmente explicada pela maior expressão dos genes que codificam N-metiltransferases *CcXMT1*, *CcMXMT1* e *CcDXMT* em *C. canephora* (Perrois et al., 2015), esses genes são expressos nos estágios iniciais do desenvolvimento do fruto,

portanto, desempenham um papel importante no acúmulo de cafeína nos grãos (Perrois et al., 2015; Uefuji et al., 2003).

Além disso, a expressão de outros genes foi observada durante vários estágios do desenvolvimento e amadurecimento do fruto para ambas as espécies mencionadas acima. Os transcritos da *7-METHYLXANTHOSINE SYNTHASE* (*CmXRS*), da *THEOBROMINE SYNTHASE* (*CTS2*) e da *CAFFEINE SYNTHASE* (*CCS1*) foram mais notáveis nos grãos, enquanto a *METHIONINE SYNTHASE* (*MS*) no pericarpo no estágio de crescimento do fruto, momento em que a matéria seca começa a se acumular (Koshiro et al., 2006). Em outro estudo em *C. arabica*, foi relatado que esses genes são expressos a partir da expansão celular (Maluf, 2009), ou seja, antes do estágio descrito por Koshiro et al. (2006).

Por outro lado, com o sequenciamento completo do genoma da *C. canephora*, foram identificados 23 novos genes envolvidos na biossíntese da cafeína no café (Denoeud et al., 2014). A partir desse estudo, polimorfismos de nucleotídeo único (SNPs) foram identificados em *C. arabica*, com forte envolvimento com genes-chave para conversão de substrato na biossíntese de cafeína (Tran et al., 2018a; 2018b). Enquanto isso, outros estudos se propuseram a investigar os grupos de espécies de café que não produzem cafeína, para os quais foram selecionadas plantas sem esse composto em *C. arabica* e *C. humblotiana* para tentar explicá-lo (Guimarães et al., 2021; Raharimalala et al., 2021), onde foi proposto que a ausência de cafeína se deve ao fato dessas espécies não possuírem o gene *MXMT*, um gene que controla a última fase entre a teobromina e a cafeína (Raharimalala et al., 2021).

4.5. Trigonelina

A trigonelina é outro composto alcalóide nitrogenado importante para a qualidade do café, pois confere características distintivas de sabor e aroma (Ashihara, 2015). A biossíntese ocorre pela via principal da nicotinamida adenina dinucleotídeo (NAD), embora tenham sido sugeridas vias alternativas (Ashihara, 2015), que têm o ácido nicotínico como precursor imediato para a síntese da trigonelina e, como a cafeína, é catalisada pela S adenosil-L-metionina (SAM) e requer metilação da nicotinato N-metiltransferase (trigonelina sintase) (Ashihara, 2006). A atividade biossintética da trigonelina no café ocorre no estágio inicial da formação do fruto (Koshiro et al., 2006), com a maior biossíntese ativa ocorrendo no pericarpo,

diminuindo progressivamente nesse tecido à medida que os estágios seguintes avançam (Ashihara, 2015; Koshiro et al., 2006; Zheng, Nagai e Ashihara, 2004). Enquanto isso, o teor no grão aumenta nos estágios finais de maturação, sugerindo que parte dessa trigonelina provém do pericarpo (Ashihara, 2015). Em *C. arabica*, os genes *TRIGONELLINE SYNTHASE 1* e *2* (*CaCTgS1* e *2*) que codificam a trigonelina sintase têm homologia com o gene *CaCCS1* para a síntese de cafeína, mas nenhuma outra afinidade na via de biossíntese foi verificada (Mizuno et al., 2014).

Foram encontrados alguns SNPs em *C. arabica* envolvidos com genes que atuam na regulação da biossíntese de trigonelina (Tran et al., 2018a) e, em outro estudo, também foram determinados SNPs em genótipos de *Coffea spp.* que estão envolvidos com a trigonelina (Castillo et al., 2022). As informações genéticas disponíveis sobre a trigonelina no café são escassas, e ainda são necessárias mais informações para ajudar a entender essa via metabólica e os pontos-chave que regulam sua relação com a qualidade (Cheng et al., 2016).

4.6. Lipídios

Os lipídios são compostos que desempenham papéis importantes no desenvolvimento dos grãos de café (Silva et al., 2020) e seu acúmulo final nesse tecido, proporcionando notas de sabor, textura e sensação na boca, melhoram a qualidade sensorial da bebida (Oestreich-Janzen, 2010). O café é conhecido por conter principalmente triacilgliceróis, esteróis, tocoferóis e diterpenos (Speer e Kölling-Speer, 2006). A biossíntese de lipídios é muito complexa e partem da ruta metabólica do ácido tricarboxílico (Sant'ana et al., 2018; Cheng et al., 2016), tendo sido sugerido que ela é parcialmente controlada pela atividade da Susy (Ruan, 2014). Os diterpenos estão entre os principais compostos de interesse na fração lipídica, por contribuírem para as propriedades de sabor e qualidade do café. A principal via de síntese é nos plastídios, através da via do metileritritol fosfato (MEP), e sugeriu-se ademais que no citosol podem ser sintetizados através da via do ácido mevalônico isoprenoide (MVA) (Pereira e Ivamoto, 2015).

O estudo do genoma de *C. canephora* mostrou que o gene *FATTY ACID DESATURASE 2* (*CcFAD2*) é transcrito várias vezes durante o desenvolvimento do endosperma (Denoëud et al, 2014), assim como em *C. arabica* foi demonstrada a expressão de dois genes *TRIACYLGLYCEROL* (*CaTAG*) e *LINOLEIC ACID* (Cheng,

Furtado e Henry, 2018), e esses genes coincidem com o acúmulo máximo de ácido linoleico (Denoeud et al., 2014) e com o acúmulo total de lipídios (Cheng, Furtado e Henry, 2018). No entanto, em grãos maduros são mais expressos os genes *STORAGE LIPIDS DEGRADATION IN BEAN GERMINATION (CaSDP1-LIKE)*, *TAG LIPASE (CaSDP1)*, *DIACYLGLYCEROL ACYLTRANSFERASE (CcDGAT)* e *OLEOSIN 2 (CcOLE-2)* (Cheng, Furtado e Henry, 2018; Privat et al., 2011).

O fato de que o gene *OLE-2* (Ca e Cc), bem como outro grupo de genes pertencentes às oleosinas, são expressos durante vários estágios do desenvolvimento da fruta, especificamente no grão e em níveis baixos ou inexistentes no pericarpo. Uma diferença entre as espécies é que os genes *CaOLE-1*, *CaOLE-2* e *CaOLE-4* apresentaram maior expressão em *C. arabica* do que em *C. canephora* (Simkin et al., 2006).

Por outro lado, o conteúdo de diterpenos (cafestol/kaweol) é maior nos frutos do café do que em outros tecidos vegetais (Ivamoto et al., 2017; 2023). Nos frutos, seu conteúdo varia de acordo com seu desenvolvimento, nos estágios iniciais (30-120 DAF) é maior no perisperma (kaweol>cafestol), enquanto nos estágios mais avançados no endosperma, continuando o mesmo padrão, mas em concentrações mais baixas (Ivamoto et al., 2017).

Acredita-se que alguns genes do *citocromo P450* estejam envolvidos no estágio final da biossíntese de diterpenos e, portanto, estejam relacionados ao acúmulo de kaweol e cafestol (Ivamoto-Suzuki et al., 2023). No perisperma dos grãos de *C. arabica*, os genes que codificam ao citocromo P450 *CaCYP82C2*, *CaCYP76C4* e *CaCYP74A1* são mais expressos durante o desenvolvimento (90-150 DAF) e, em menor grau, *CaCYP71A25* (90 DAF) e *CaCYP701A3* (90-150 DAF) (Ivamoto et al., 2017). Recentemente, outros genes da biossíntese foram estudados e, em frutos, os genes *ENT-COPALYL DIPHOSPHATE SYNTHASE 1 (CaCPS1)* e *KAURENE SYNTHASE 3 (CaKS3)* são os mais expressos, pois regulam dois substratos importantes para a síntese de diterpenos ent-CPP e ent-kaurene, respectivamente (Ivamoto-Suzuki et al., 2023).

Deve-se mencionar que também foi identificada maior expressão nas primeiras etapas de desenvolvimento dos frutos, alguns genes co-localizados com SNPs associados ao conteúdo de lipídios e diterpenos e que também tem proximidade com genes da biossíntese desses compostos (Sant' Ana et al., 2018).

4.7. Proteínas

As proteínas fazem parte dos compostos que determinam o sabor da bebida, pois desempenham um papel importante durante a torra (Procida et al., 2003). As proteínas de armazenamento de sementes conhecidas são as globulinas, prolaminas, glutelinas e albuminas (Da Silva e Dantas, 2016). No café, a globulina 11S é a proteína mais abundante nos grãos (Rogers et al., 1999; Cheng, Furta e Henry, 2018) e é estudada por sua contribuição para a qualidade da bebida (Koshino et al., 2008). De igual importância, durante o desenvolvimento do fruto, outras proteínas desempenham papéis em diferentes tipos de processos, como: armazenamento, divisão e alongamento celular, metabolismo da metionina, processos metabólicos e energia (Alves et al., 2016). Ao contrário dos outros compostos, o teor de proteína é aparentemente o mesmo tanto para *C. arabica* quanto para *C. canephora*, variando apenas na composição (Wei e Tanokura, 2015).

O acúmulo da proteína 11S ocorre no perisperma de frutos de *C. arabica*, de 90 a 180 DAF, aumentando à medida que o desenvolvimento avança (Alves et al., 2016). Entretanto, o acúmulo no grão ocorre em estágios posteriores (De Castro e Marraccini, 2006; Rogers et al., 1999).

A expressão do gene *COFFEE STORAGE PROTEIN 1* (*CcCSP1*) que codifica a proteína 11S em *C. canephora* é expressa a partir do estágio de crescimento do fruto e com maior expressão no início do amadurecimento (Simkin et al., 2006), enquanto em *C. arabica* é expressa mais cedo, com pico de expressão durante o desenvolvimento do fruto (Cheng, Furta e Henry, 2018; Simkin et al., 2006). Em *C. arabica*, descobriu-se que outro gene da proteína 11S, o *CaCSP2*, é expresso em frutos maduros, mas em menor grau do que *CaCSP1* (Privat et al., 2011).

A expressão de alguns genes responsáveis por outras proteínas foi estudada em *C. arabica* e verificou-se que em frutos verdes há maior expressão dos genes *7S-LIKE GLOBULIN*, *GLUTELIN A2* e em frutos maduros são mais expressos *SDP1*, *SDP1-LIKE*, *GLUTELIN A3* e *PATATIN 6*. Além disso, há coexpressão de alguns desses genes que estão relacionados à parede celular e à transferência de lipídios (Cheng, Furta e Henry, 2018).

4.8. Processo de amadurecimento do fruto

A maturação do fruto é um processo que ocorre de maneira natural na planta e está geneticamente programado por diversos genes estruturais e reguladores transcricionais (Perotti, Moreno e Podestá, 2014; Zhu et al., 2022). Durante este processo, são ativadas vias bioquímicas que causam mudanças externas e internas no fruto (Barry e Giovannoni, 2007), como alterações no sabor, aroma, textura, cor (Gierson e Kader, 1986) e teor de água (Eira et al., 2006; Ságio et al., 2013). Isso sugere que a qualidade final do grão de café é influenciada por uma série de eventos (Hu et al, 2022).

4.8.1. Pigmentos

A degradação da clorofila é uma das 3 fases na via metabólica da síntese da clorofila (Tanaka e Tanaka; 2006). Essa degradação ocorre ao longo do ciclo biológico de uma planta, sendo mais associada ao processo de senescência das folhas e maturação dos frutos (Hörtensteiner e Kräutler, 2011; Roca e Mínguez-Mosquera, 2006). A perda de clorofila é um processo muito complexo que se torna evidente quando ocorre uma despigmentação da cor verde (Lira et al., 2014). Esse processo normalmente ocorre nas primeiras etapas da maturação dos frutos (Charoenchongsuk et al., 2015). Os níveis de clorofila “a” e “b” em frutos de *C. arabica* e *C. canephora* diminuem rapidamente durante a maturação (Simkin et al., 2010). O conteúdo total de clorofila no pericarpo, observando-se o mesmo padrão de degradação, com maior variação a partir de 125 DAF (Ocampo et al., 2010). Na etapa final da maturação em *C. arabica*, foram encontrados conteúdos de clorofilas “a” e “b” no epicarpo, enquanto somente a clorofila “b” estava presente no mesocarpo (Esquivel et al., 2020). Em frutos localizados no dossel inferior da planta, foi observada uma menor degradação da clorofila e uma maior resistência à desidratação nas etapas iniciais da maturação, associadas a uma maior expressão do gene *RESPONSIVE TO DEHYDRATION 22* (*CaRD22*) (Cheng et al., 2020). O gene *CaRD22* atua na biossíntese do ácido abscísico (ABA) e tem a função de ativar genes relacionados ao estresse (Leng et al., 2021; Matus et al, 2014).

Como consequência da degradação da clorofila, outros pigmentos chamados carotenoides, flavonoides e antocianinas são revelados em diferentes tipos de frutos (Lu et al., 2021; 2022), dos quais antocianinas e carotenoides são encontrados em frutos de café (Hu et al., 2022). Esses são pigmentos encontrados naturalmente em

plantas (Torregrosa-Crespo et al., 2018); os carotenóides estão associados a tons de amarelo, laranja e vermelho (Namitha e Negi, 2010), enquanto as antocianinas estão relacionadas ao vermelho, azul e roxo (Rodriguez-Amaya, 2016). Esses pigmentos desempenham múltiplas funções, destacando-se por suas propriedades antioxidantes (Fu et al., 2021; Sukatiningsih, Windrati e Yudistira, 2018). Da mesma forma, sabe-se que têm influência no sabor e aroma da qualidade do café (Huang et al., 2021).

4.8.1.1. Carotenóides

Os carotenoides pertencem ao grupo dos terpenoides (Sun et al., 2022). A síntese pode ocorrer por duas vias principais: a via do ácido mevalônico (MVA) (Kuzuyama, 2002) e a via do metileritritol fosfato (MEP) (Pereira e Ivamoto, 2015).

Nos frutos de café, foram identificados diversos tipos de carotenóides (Esquivel et al., 2020; Hu et al., 2022). Observou-se que, em grãos imaturos, o conteúdo de luteína (Lut), violaxantina (Vio), neoxantina (Neo) e β -caroteno é significativamente maior em *C. canephora* do que em *C. arabica* (Simkin et al., 2010). Por outro lado, o α -caroteno, que é um intermediário na biossíntese de Lut, é encontrado em menor quantidade em *C. canephora* (Simkin et al., 2010). A relação entre os baixos conteúdos de carotenoides e a transcrição do gene *CAROTENOID CLEAVAGE DIOXYGENASE 1 (CCD1)* da enzima CCD1 é diferente em *C. canephora* e *C. arabica* (Simkin et al., 2010). Em *C. canephora*, a menor transcrição de *CcCCD1* está correlacionada com a diminuição dos conteúdos de carotenóides. Por outro lado, em *C. arabica*, observa-se um aumento das transcrições de *CaCCD1* (Simkin et al., 2010). Em morangos, foi demonstrado que um aumento na expressão de *FaCCD1* durante a maturação diminui o conteúdo de Lut e zeaxantina (Zea) (García-Limones et al., 2008), e em uvas, serve como intermediário na síntese entre β -caroteno e β -ionona, um composto importante do aroma (Timmins et al., 2020).

O aumento inicial de *CaCCD1* em *C. arabica* é mais expresso ao mesmo tempo do aumento na transcrição da enzima *9-CIS-EPOXYCAROTENOID CLEAVAGE DIOXYGENASE 3 (CaNCED3)*, enquanto em *C. canephora* é observado em grãos verdes menos desenvolvidos (Simkin et al., 2010). Recentemente, foram realizados estudos em frutos maduros de 4 variedades de cor vermelha, amarela, laranja e roxa em *C. arabica*, nos quais foram identificados 32 genes diferencialmente expressos (GDE) que codificam 14 enzimas-chave na via de biossíntese, incluindo *CaNCED* (Hu

et al, 2022). Em outros estudos, o *NCED3* participa da biossíntese do ABA e do estresse por seca (Iuchi et al., 2001; Tan et al., 2003).

4.8.1.2. Antocianinas

As antocianinas pertencem aos flavonoides, uma subclasse dos polifenóis (Jaakola, 2013). A síntese ocorre através da via dos fenilpropanoides (Hu et al., 2024). Nessa via, muitas enzimas estruturais participam, sendo essenciais para a formação das antocianinas (Hu et al., 2022). As antocianinas mais conhecidas nas plantas são: cianidina, pelargonidina, peonidina, delphinidina, petunidina e malvidina (Kayesh et al, 2013). A principal antocianina nos frutos maduros de *C. arabica* é a cianidina-3-rutinosídeo e em menor concentração a cianidina-3-glucosídeo (Prata e Oliveira, 2007). Compostos que são encontrados na casca e não na polpa das variedades de *C. arabica* que apresentam coloração vermelha (Caturra Rojo, Catuaí e Arábica) e alaranjada (Caturra alaranjado) (Esquivel et al., 2020). Através da expressão gênica, foram obtidos dados de GDE que codificam enzimas-chave na biossíntese, como a dihidroflavonol 4-redutase (DFR), que é mais expressa no início da maturação, e no final em enzimas como leucoantocianidina dioxigenase (LDOX), antocianidina 3-glucosiltransferase (BZI) e antocianidina 3-glucosido-aciltransferase (3AT) (Hu et al., 2024). Em outro estudo, foi observado que as enzimas BZI e 3TA também possuem atividade nos frutos maduros (Hu et al., 2022).

Nos frutos maduros (vermelhos) de café Robusta (*C. canephora*), foram encontrados teores de antocianinas (Sukatiningsih, Windrati e Yudistira, 2018) No entanto, as concentrações podem variar de acordo com as espécies, devido à menor expressão dos GDE, *CHALCONE ISOMERASE* e *ANTHOCYANIN REDUCTASE* em *C. canephora* em comparação com *C. arabica* (Huang et al., 2021).

4.8.2. Hormônios

Os hormônios regulam muitos processos de crescimento e desenvolvimento nas plantas durante todo o seu ciclo biológico (Bhatla e Lal, 2023). Nos frutos tem sido observado que hormonas como: ABA, ácido jasmônico, brassinoesteroides, etileno (Li, Chen e Grierson, 2021), auxinas (Kumar, Khurana e Sharma, 2013), giberelinas (GA) (Li et al., 2019), melatonina, ácido salicílico (AS) (Pérez-Llorca et al., 2019) e

citocininas, influenciam o padrão de maturação (Zhu, Zhu e Zhu, 2023). No entanto, os hormônios mais conhecidos na regulação da maturação são o etileno e ABA em frutos climatéricos (tomate, maçã), e não climatéricos (uva e citros) respectivamente (Bai, Huang e Shen, 2021; Chen et al., 2018). Atualmente, é sabido que todos esses hormônios desempenham funções importantes na maturação (Lee et al., 2020). O enfoque nas redes moleculares que modulam as interações hormonais oferece uma visão crucial para compreender e melhorar a qualidade dos frutos (Nawaz et al., 2021).

4.8.2.1. Etileno

O etileno é um hormônio vegetal gasoso que regula muitos aspectos do ciclo de vida da planta, como germinação de sementes, respostas ao estresse, maturação e abscisão de frutos, senescência de órgãos e tecidos (Binder, 2020; Schaller, 2012). Nos frutos climatéricos, como o café observa-se um elevado aumento na biossíntese de etileno, quando o amadurecimento começa, a concentração interna de etileno aumenta até atingir os níveis de saturação (Saltveit, 1999), o que implica principalmente um aumento da respiração, alterações na firmeza da parede celular, na síntese de compostos orgânicos voláteis (COV), antocianinas, carotenóides e açúcares (Iqbal et al., 2017; Pereira et al., 2005; Zerbini et al., 2015).

De acordo com Yang (1986), na via de biossíntese do etileno existem três enzimas principais: S-adenosil-L-metionina sintase (SAM sintase), ACC sintase (ACS) e ACC oxidase (ACO). Na primeira reação, a S-adenosil-L-metionina (SAM) é catalisada pela SAM sintase a partir da metionina (Wang, Li e Ecker, 2002). Posteriormente, a SAM é convertida em ácido l-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) pela ação da enzima ACS. Finalmente, o ACC é transformado em etileno pela enzima ACO (Wang, Li e Ecker, 2002). Essas enzimas variam significativamente sua expressão de acordo com os fatores de desenvolvimento, hormonais e ambientais (Lin et al., 2009).

Após a síntese de etileno, começa a via de transdução de sinal (Wang, Li e Ecker, 2002). O etileno é detectado por uma família de receptores (ETR) ligados à membrana do retículo endoplasmático (RE) (Ahmad et al., 2014; Das et al., 2015; Tieman et al., 2000). Estes receptores têm um papel regulador negativo na ausência de etileno, ativando a resposta tripla constitutiva 1 (CTR1) e suprimindo a cascata de sinalização (Kieber et al., 1993). Na presença de etileno, este liga-se ao receptor

responsivo ao etileno 1 (ETR1), inativando o CTR1 e permitindo a transmissão do sinal ao insensível ao etileno 2 (EIN2) (Wang, Li e Ecker, 2002) o que permite que a sinal seja transmitido ao fator de transcrição insensível ao etileno 3 (EIN3) que está localizado no núcleo (Iqbal et al., 2013). EIN3 envia sinais ao promotor do gene do fator de resposta ao etileno 1 (ERF1) (Bapat et al., 2010). Estes por sua vez ativam genes que conduzem a diferentes respostas do etileno na planta (Li et al., 2023).

Durante o processo de amadurecimento dos frutos de café, ocorre um aumento significativo na expressão do gene da enzima do ACO (*CaACO*) conforme ocorre a despigmentação da clorofila em direção às fases finais de maturação. (Pereira et al., 2005). Em um estudo com cultivares tardias e precoces de *C. arabica*, foi sugerido que diferenças na expressão de genes *CaACO-LIKE*, na respiração e nos níveis de etileno estão relacionadas ao amadurecimento acelerado dos frutos (Ságio et al., 2013). Isso foi posteriormente corroborado quando se observou que as cultivares precoces apresentaram maior expressão dos genes *CaACO1-LIKE* e *CaACO4-LIKE* durante o amadurecimento dos frutos aos 184 e 214 DAF, respectivamente, o que pode estar relacionado à maior desintegração do gene receptor de etileno *CaETR4-LIKE*, em consequência seja ativa a cascata de sinalização levando a um amadurecimento mais rápido dos frutos (Ságio et al., 2014). Em *C. canephora*, outro gene associado ao receptor de etileno, o *CcETR1*, foi relacionado ao amadurecimento dos frutos e, possivelmente, ao teor de cafeína dos frutos imaturos (Bustamante-Porras et al., 2007).

4.8.2.2. Outros hormônios

Visto que se tem poucas informações sobre os outros hormônios presentes no amadurecimento do café, listamos as informações disponíveis. Um grupo de genes com *splicing* diferencial foi analisado em frutos de *C. arabica*, e observou-se que os genes associados aos transportadores CASSETE DE LIGAÇÃO DE ATP (ABC) como *CaABCB14*, *CaABCG11*, *CaF28G4.18*, *CaABCG40* são expressos em frutos verdes e durante os estágios iniciais de amadurecimento. Por outro lado, em estágios posteriores, os genes relacionados ao metabolismo da cisteína e da metionina *L-CYSTEINE DESULFHYDRASE* (*CaDES1*), *GLUTATHIONE SYNTHETASE* (*CaGSH2*), *TYROSINE AMINOTRANSFERASE* (*CaTAT7*) e *β -ALANINE AMINOTRANSFERASE* (*CaPYD4*) apresentam maior atividade. Alguns desses genes

desempenham funções importantes no transporte de hormônios, como auxinas (*CaABCB14*), ABA (*CaABCG40*) e citocininas (*CaABCG11*), bem como na resposta ao ABA e aos brassinosteroides (*CaF28G4.18*) e na sinalização do ABA (*CaDES1*) (Yu et al., 2024). Outro estudo também demonstrou o transporte de auxina nos frutos através das proteínas PIN-FORMED (PIN), com expressão parcial do gene *CaPIN1-1* (Huang et al., 2020). Os transportadores ABC e PIN são os principais transportadores de efluxo de auxina nas plantas (Křeček et al., 2009; Liu et al., 2020).

Por outro lado, a família de genes NAC, que codifica fatores de transcrição (TF), desempenha diversos papéis no crescimento e desenvolvimento das plantas, bem como na resposta a estresses bióticos e abióticos (Huded et al., 2022; Li, Chen e Grierson, 2021). Na maturação de frutos climatéricos como o tomate, esses genes não só participam da biossíntese e sinalização do etileno, mas também podem interagir com hormônios como AS, ABA e brassinosteróides durante a maturação, pois esses hormônios também estão envolvidos na regulação do etileno (Li, Chen e Grierson, 2021). Em *C. canephora* foram identificados 54 genes CcNAC durante o desenvolvimento e maturação dos frutos, sendo que 4 deles apresentaram múltiplas expressões (Dong et al., 2019). Em outro estudo, foi analisado um dos 54 genes, o CcNAC25, que é expresso em vários tecidos da planta (Huded et al., 2022). Nos frutos, esse gene mostrou alta expressão durante o desenvolvimento do fruto e nas fases iniciais da maturação (Dong et al., 2019; Huded et al., 2022). Em outro estudo com damasco (*Prunus armeniaca*), uma fruta climatérica, o gene PaNAC25 interage na via de biossíntese de carotenóides (Zhang et al., 2019).

A informação disponível sobre ABA, auxina, citocininas e GA durante o desenvolvimento dos frutos do café é limitada e concentra-se principalmente no endosperma em relação à germinação. Os níveis de ABA, auxinas e citocininas no endosperma aumentam a partir dos 120 DAF e diminuem à medida que a maturação avança. Este padrão muda para as citocininas aos 200 DAF, onde diminuem para níveis muito baixos (Dussert et al., 2018). A maior expressão dos genes ABA *INSENSITIVE 3* (*CaABI3*) e *GIBERELINA 3* (*CaGA3*) também ocorre nas etapas finais da maturação. No entanto, a expressão de *CaGA3* supera a de *CaABI3* durante esse período (Dos Santos et al., 2019).

5. Perspectivas futuras

A qualidade do café é um tema muito debatido há muito tempo e, nos últimos anos, ganhou força. Apesar da disponibilidade de tecnologia e do acesso a muitas informações, ainda é difícil dizer qual processo regula a qualidade, pois há muitos fatores envolvidos, desde a formação dos compostos nos grãos até o processamento final dos grãos.

Um ponto de partida para entender a qualidade do café é durante a formação do grão, pois é nesse momento que se definem as concentrações dos compostos relacionados à qualidade, que variam entre as espécies de interesse comercial (*C. arabica* e *C. canephora*). De acordo com essa revisão da literatura, há algumas informações sobre o acúmulo desses compostos e os genes que regulam suas principais vias de biossíntese, mas pouco se sabe sobre a interação entre eles, pois a maioria desses compostos é estudada de forma separada. Alguns dos compostos identificados nesta revisão, como a sacarose, as proteínas e os hormônios, podem servir de base para a compreensão da regulação gênica, pois são essenciais para que vários processos ocorram nas plantas e, nos frutos de café, foram associados a outros compostos que também indicam a qualidade do café. Portanto, em primeiro lugar, é necessário estudar melhor a interação e a regulação molecular dessas vias com os outros compostos no desenvolvimento e amadurecimento do fruto do café. Em segundo lugar, descobrir os pontos-chave que desencadeiam e regulam o acúmulo desses compostos e, por fim, como eles podem ser manipulados para melhorar a qualidade.

REFERÊNCIAS

- ADLER, S. et al. Variations in cell wall monosaccharide composition during seed development in *Coffea arabica* L. Comparison between *Coffea arabica* var. Bourbon and *Coffea arabica* var. Laurina. **Trees**, v. 29, p. 1871-1881, 2015.
- AHMAD, S. S. et al. Ethylene signaling in plants: introspection. **Plant signaling: Understanding the molecular crosstalk**, p. 303-313, 2014.
- ALVES, L. C. et al. Differentially accumulated proteins in *Coffea arabica* seeds during perisperm tissue development and their relationship to coffee grain size. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 64, n. 7, p. 1635-1647, 2016.
- AMOR, Y. et al. A membrane-associated form of sucrose synthase and its potential role in synthesis of cellulose and callose in plants. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 92, n. 20, p. 9353-9357, 1995.

ASHIHARA, H. Metabolism of alkaloids in coffee plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 1-8, 2006.

ASHIHARA, H. Plant biochemistry: Trigonelline biosynthesis in *Coffea arabica* and *Coffea canephora*. In: Coffee in health and disease prevention. **Academic Press**, p. 19-28, 2015.

ATMODJO, M. A.; HAO, Z.; MOHNEN, D. Evolving views of pectin biosynthesis. **Annual review of plant biology**, v. 64, p. 747-779, 2013.

BACETE, L. et al. Plant cell wall-mediated immunity: cell wall changes trigger disease resistance responses. **The Plant Journal**, v. 93, n. 4, p. 614-636, 2018.

BAI, Q.; HUANG, Y.; SHEN, Y. The physiological and molecular mechanism of abscisic acid in regulation of fleshy fruit ripening. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 619953, 2021.

BAPAT, V, A. et al. Ripening of fleshy fruit: molecular insight and the role of ethylene. **Biotechnology advances**, v. 28, n. 1, p. 94-107, 2010.

BAPTISTELLA, J. L. C. et al. Variation in Soluble Sugars in Arabica Coffee Cherry Fruits. **Plants**, v. 13, n. 13, p. 1853, 2024.

BARBOSA, M. D. S. G. et al. Correlation between the composition of green Arabica coffee beans and the sensory quality of coffee brews. **Food Chemistry**, v. 292, p. 275-280, 2019.

BARRY, C. S.; GIOVANNONI, J. J. Ethylene and fruit ripening. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 26, p. 143-159, 2007.

BHATLA, S. C.; LAL, M. A. Plant growth regulators: an overview. **Plant physiology, development and metabolism**, p. 391-398, 2023.

BINDER, B. M. Ethylene signaling in plants. **Journal of Biological Chemistry**, v. 295, n. 22, p. 7710-7725, 2020.

BRADBURY, A. G. W.; HALLIDAY, D. J. Chemical structures of green coffee bean polysaccharides. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 38, n. 2, p. 389-392, 1990.

BRUMMELL, D. A. Cell wall disassembly in ripening fruit. **Functional Plant Biology**, v. 33, n. 2, p. 103-119, 2006.

BUDZINSKI, I. G. F. et al. Expression patterns of three α -expansin isoforms in *Coffea arabica* during fruit development. **Plant Biology**, v. 13, n. 3, p. 462-471, 2011.

BUSTAMANTE-PORRAS, J. et al. Molecular characterization of an ethylene receptor gene (*CcETR1*) in coffee trees, its relationship with fruit development and caffeine content. **Molecular Genetics and Genomics**, v. 277, p. 701-712, 2007.

CAMPA, C. et al. Genetic mapping of a caffeoyl-coenzyme A 3-O-methyltransferase gene in coffee trees. Impact on chlorogenic acid content. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 107, n. 4, p. 751-756, 2003.

CHAROENCHONGSUK, N. et al. Comparison of the expression of chlorophyll-degradation-related genes during ripening between stay-green and yellow-pear cultivars. **Scientia Horticulturae**, v. 181, p. 89-94, 2015.

CHEN, Y. et al. Ethylene receptors and related proteins in climacteric and non-climacteric fruits. **Plant science**, v. 276, p. 63-72, 2018.

CHENG, B. et al. Influence of genotype and environment on coffee quality. **Trends in Food Science & Technology**, v. 57, p. 20-30, 2016.

CHENG, B. et al. Slower development of lower canopy beans produces better coffee. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, n. 14, p. 4201-4214, 2020.

CHENG, B.; FURTADO, A.; HENRY, R. J. The coffee bean transcriptome explains the accumulation of the major bean components through ripening. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 11414, 2018.

CAÇÃO, S. M. B. et al. Gene expression and enzymatic activity of pectin methylesterase during fruit development and ripening in *Coffea arabica* L. **Genetics and Molecular Research**, v. 11, n. 3, p. 3186-3197, 2012.

CASTILLO, J. L. S. et al. SNP markers identification by genome wide association study for chemical quality traits of coffee (*Coffea* spp.) Germplasm. **Molecular Biology Reports**, v. 49, n. 6, p. 4849-4859, 2022.

COSGROVE, D. J. Structure and growth of plant cell walls. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, v. 25, n. 5, p. 340-358, 2024.

COTTA, M. G. **Molecular mechanisms in the first step of ABA-mediated response in *Coffea* spp.** 2017. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal Integrativa) – Montpellier SupAgro; França, 2017.

DA SILVA, F. F. S.; DANTAS, B. F. Quantification of storage proteins during seed imbibition of native species from the Brazilian Caatinga vegetation. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p. 1733-1744, 2016.

DAS, S. et al. Ethylene signal transduction and signaling roles-A Review. **Agricultural Reviews**, v. 36, n. 2, p. 133-139, 2015.

DE CASTRO, R. D.; MARRACCINI, P. Cytology, biochemistry and molecular changes during coffee fruit development. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 175-199, 2006.

- DEGEFA, M. et al. Biochemical Composition Variation among Southern Ethiopian Arabica Coffee (*Coffea arabica* L.) Genotypes. **International Journal of Agronomy**, v. 2022, 2022.
- DENOEUD, F. et al. The coffee genome provides insight into the convergent evolution of caffeine biosynthesis. **Science**, v. 345, n. 6201, p. 1181-1184, 2014.
- DONG, X. et al. Identification and expression analysis of the NAC gene family in *Coffea canephora*. **Agronomy**, v. 9, n. 11, p. 670, 2019.
- DOS SANTOS, É. M. et al. Coffee by-products in topical formulations: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 111, p. 280-291, 2021.
- DOS SANTOS, F. C. et al. GA3 and ABI3 gene expression in coffee seeds during maturation. **Genetics and Molecular Research**, v. 18, n. 3, p. GMR18264, 2019.
- DUSSERT, S. et al. Integrative analysis of the late maturation programme and desiccation tolerance mechanisms in intermediate coffee seeds. **Journal of experimental botany**, v. 69, n. 7, p. 1583-1597, 2018.
- EIRA, M. T.S. et al. Coffee seed physiology. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 149-163, 2006.
- ESQUIVEL, P. et al. Coffee (*Coffea arabica* L.) by-products as a source of carotenoids and phenolic compounds—Evaluation of varieties with different peel color. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 590597, 2020.
- ESQUIVEL, P.; JIMENEZ, V. M. Functional properties of coffee and coffee by-products. **Food research international**, v. 46, n. 2, p. 488-495, 2012.
- FARAH, A. et al. Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. **Food chemistry**, v. 98, n. 2, p. 373-380, 2006.
- FERREIRA, T. et al. Introduction to coffee plant and genetics. **Coffee: Production, Quality and Chemistry**, p 1-15, 2019.
- FISCHER, M. et al. Polysaccharides of green Arabica and Robusta coffee beans. **Carbohydrate Research**, v. 330, n. 1, p. 93-101, 2001.
- FU, X. P., et al. Antioxidant and pro-apoptosis activities of coffee husk (*Coffea arabica*) anthocyanins. **International Food Research Journal**, v. 28, n. 6, p. 1187-1195, 2021.
- GARCÍA-LIMONES, C. et al. Functional characterization of FaCCD1: a carotenoid cleavage dioxygenase from strawberry involved in lutein degradation during fruit ripening. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 19, p. 9277-9285, 2008.

GASPARD, B. et al. "Physical and Mechanical Properties of Coffee Cherries and Beans in Africa: Review and the State of Arts,". **Food Science and Technology**, v. 10, n. 3, p. 55-74, 2022.

GEROMEL, C. et al. Biochemical and genomic analysis of sucrose metabolism during coffee (*Coffea arabica*) fruit development. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 12, p. 3243-3258, 2006.

GEROMEL, C. et al. Sugar metabolism during coffee fruit development. 2005. Proceedings of the 20th International Scientific Colloquium on Coffee, Bangalore. **ANAIS-International Scientific Association on Coffee**, Paris, p.651-655, 2005.

GIERSON, D.; KADER, A. A. Fruit ripening and quality. In: The tomato crop: A scientific basis for improvement. **Dordrecht: Springer Netherlands**, p. 241-280, 1986.

GOLDEN, K. D.; JOHN, M. A.; KEAN, E. A. β -Galactosidase from *Coffea arabica* and its role in fruit ripening. **Phytochemistry**, v. 34, n. 2, p. 355-360, 1993.

GOULAO, L. F.; OLIVEIRA, C. M. Cell wall modifications during fruit ripening: when a fruit is not the fruit. **Trends in food science & technology**, v. 19, n. 1, p. 4-25, 2008.

GOUVEA, B. M. et al. Feasibility of ethanol production from coffee husks. **Biotechnology letters**, v. 31, n. 9, p. 1315-1319, 2009.

GUERRIERO, G.; FUGELSTAD, J.; BULONE, V. What do we really know about cellulose biosynthesis in higher plants?. **Journal of integrative plant biology**, v. 52, n. 2, p. 161-175, 2010.

GUIMARÃES, P. S. et al. Large-scale prospection of genes on caffeine-free *Coffea arabica* plants—discovery of novel markers associated with development and secondary metabolism. **Plant Gene**, v. 27, p. 100314, 2021.

HÖRTENSTEINER, S.; KRÄUTLER, B. Chlorophyll breakdown in higher plants. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics**, v. 1807, n. 8, p. 977-988, 2011.

HUANG, L. et al. Comparative transcriptome analysis revealed the influence of sucrose on flavor and taste quality of *Coffea arabica* and *C. canephora* varieties. **Beverage Plant Research**, v. 1, n. 1, p. 1-9, 2021.

HUANG, X. et al. Genome-wide analysis of the PIN auxin efflux carrier gene family in coffee. **Plants**, v. 9, n. 9, p. 1061, 2020.

HUDED, A. K. C. et al. Comparative genomic analysis and phylogeny of NAC25 gene from cultivated and wild *Coffea* species. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1009733, 2022.

HU, F. et al. Transcriptome and carotenoid profiling of different varieties of *Coffea arabica* provides insights into fruit color formation. **Plant Diversity**, v. 44, n. 3, p. 322-334, 2022.

HU, F. et al. Transcriptome and metabolome profiling provides insight into the regulatory network of fruit coloration in *Coffea arabica* L. **Scientia Horticulturae**, v. 326, p. 112695, 2024.

IQBAL, N. et al. Current understanding on ethylene signaling in plants: the influence of nutrient availability. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 73, p. 128-138, 2013.

IQBAL, N. et al. Ethylene role in plant growth, development and senescence: interaction with other phytohormones. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 235913, 2017.

IUCHI, S. et al. Regulation of drought tolerance by gene manipulation of 9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase, a key enzyme in abscisic acid biosynthesis in *Arabidopsis*. **The Plant Journal**, v. 27, n. 4, p. 325-333, 2001.

IVAMOTO, S. T. et al. Diterpenes biochemical profile and transcriptional analysis of cytochrome P450s genes in leaves, roots, flowers, and during *Coffea arabica* L. fruit development. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 111, p. 340-347, 2017.

IVAMOTO, S. T. et al. Nucleotide diversity of genes related to chlorogenic acid biosynthesis of *Coffea*. **Coffee Science**, v. 8, n. 2, p. 139-148, 2013.

IVAMOTO-SUZUKI, S. T. et al. Functional Characterization of ent-Copalyl Diphosphate Synthase and Kaurene Synthase Genes from *Coffea arabica* L. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 71, n. 42, p. 15863-15873, 2023.

JAAKOLA, L. New insights into the regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits. **Trends in plant science**, v. 18, n. 9, p. 477-483, 2013.

JOËT, T. et al. Regulation of galactomannan biosynthesis in coffee seeds. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 1, p. 323-337, 2014.

JOËT, T. et al. Use of the growing environment as a source of variation to identify the quantitative trait transcripts and modules of co-expressed genes that determine chlorogenic acid accumulation. **Plant Cell Environ**, v. 33, n. 7, p. 1220-1233, 2010.

KAYESH, E. et al. Fruit skin color and the role of anthocyanin. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, p. 2879-2890, 2013.

KIEBER, J. J. et al. CTR1, a negative regulator of the ethylene response pathway in *Arabidopsis*, encodes a member of the raf family of protein kinases. **Cell**, v. 72, n. 3, p. 427-441, 1993.

KNEVITT, D. **Characterising chlorogenic acid biosynthesis in coffee**. 2017. Tese (Doutorado em Filosofia) - University of East Anglia, Norwich, 2017.

KOSHINO, L. L. et al. Comparative proteomical analysis of zygotic embryo and endosperm from *Coffea arabica* seeds. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 56, n. 22, p. 10922-10926, 2008.

KOSHIRO, Y. et al. Biosynthesis of chlorogenic acids in growing and ripening fruits of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* plants. **Zeitschrift für Naturforschung C**, v. 62, n. 9-10, p. 731-742, 2007.

KOSHIRO, Y. et al. Changes in content and biosynthetic activity of caffeine and trigonelline during growth and ripening of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* fruits. **Plant Science**, v. 171, n. 2, p. 242-250, 2006.

KŘEČEK, P. et al. "The PIN-FORMED (PIN) protein family of auxin transporters." **Genome biology**, v. 10, p. 1-11, 2009.

KUMAR, R.; KHURANA, A.; SHARMA, A. K. Role of plant hormones and their interplay in development and ripening of fleshy fruits. **Journal of experimental botany**, v. 65, n. 16, p. 4561-4575, 2013.

KUZUYAMA, T. Mevalonate and nonmevalonate pathways for the biosynthesis of isoprene units. **Bioscience, biotechnology, and biochemistry**, v. 66, n. 8, p. 1619-1627, 2002.

KY, C. L. et al. Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P. accessions. **Food chemistry**, v. 75, n. 2, p. 223-230, 2001.

LEE, G. B. et al. Phytohormone profiles of 'Seolhyang' and 'Maehyang' strawberry fruits during ripening. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, v. 61, p. 229-239, 2020.

LENG, Z. X. et al. Genome-wide analysis of the DUF4228 family in soybean and functional identification of GmDUF4228-70 in response to drought and salt stresses. **Frontiers in plant science**, v. 12, p. 628299, 2021.

LEPELLEY, M. et al. Characterization, high-resolution mapping and differential expression of three homologous PAL genes in *Coffea canephora* Pierre (Rubiaceae). **Planta**, v. 236, p. 313-326, 2012.

LEROY, T. et al. Improving the quality of African robustas: QTLs for yield-and quality-related traits in *Coffea canephora*. **Tree Genetics & Genomes**, v. 7, p. 781-798, 2011.

LI, H. et al. Gibberellins play a role in regulating tomato fruit ripening. **Plant and cell physiology**, v. 60, n. 7, p. 1619-1629, 2019.

LIN, Z.; ZHONG, S.; GRIERSON, D. Recent advances in ethylene research. **Journal of experimental botany**, v. 60, n. 12, p. 3311-3336, 2009.

LIRA, B. S. et al. Plant degreening: evolution and expression of tomato (*Solanum lycopersicum*) dephytylation enzymes. **Gene**, v. 546, n. 2, p. 359-366, 2014.

LI, S.; CHEN, K.; GRIERSON, D. Molecular and hormonal mechanisms regulating fleshy fruit ripening. **Cells**, v. 10, n. 5, p. 1136, 2021.

LI, T. et al. Comparative transcriptome analysis of the climacteric of apple fruit uncovers the involvement of transcription factors affecting ethylene biosynthesis. **Horticultural Plant Journal**, v. 9, n. 4, p. 659-669, 2023.

LIU, L. et al. ATP binding cassette transporters ABCG1 and ABCG16 affect reproductive development via auxin signalling in Arabidopsis. **The Plant Journal**, v. 102, n. 6, p. 1172-1186, 2020.

LI, Z. et al. Coffee cell walls—composition, influence on cup quality and opportunities for coffee improvements. **Food Quality and Safety**, v. 5, p. fyab012, 2021.

LI, Z.; FERNIE, A. R.; PERSSON, S. Transition of primary to secondary cell wall synthesis. **Science Bulletin**, v. 61, n. 11, p. 838-846, 2016.

LU, S. et al. VvERF17 mediates chlorophyll degradation by transcriptional activation of chlorophyll catabolic genes in grape berry skin. **Environmental and Experimental Botany**, v. 193, p. 104678, 2022.

LU, W. et al. Antioxidant activity and healthy benefits of natural pigments in fruits: A review. **International journal of molecular sciences**, v. 22, n. 9, p. 4945, 2021.

MAHESH, V. et al. Isolation and genetic mapping of a *Coffea canephora* phenylalanine ammonia-lyase gene (*CcPAL1*) and its involvement in the accumulation of caffeoyl quinic acids. **Plant cell reports**, v. 25, p. 986-992, 2006.

MALUF, M. P. et al. Altered expression of the caffeine synthase gene in a naturally caffeine-free mutant of *Coffea arabica*. **Genetics and Molecular Biology**, v. 32, p. 802-810, 2009.

MASARIRAMBI, M. T.; CHINGWARA, V.; SHONGWE, V. D. The effect of irrigation on synchronization of coffee (*Coffea arabica* L.) flowering and berry ripening at Chipinge, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 34, n. 13-16, p. 786-789, 2009.

MATUS, J. T. et al. Inspection of the grapevine BURP superfamily highlights an expansion of RD22 genes with distinctive expression features in berry development and ABA-mediated stress responses. **PLoS One**, v. 9, n. 10, p. e110372, 2014.

MAZZAFERA, P. Chemical composition of defective coffee beans. **Food chemistry**, v. 64, n. 4, p. 547-554, 1999.

MAZZAFERA, P. et al. Oil content of green beans from some coffee species. **Bragantia**, v. 57, p. 45-48, 1998.

MIZUNO, K. et al. Conversion of nicotinic acid to trigonelline is catalyzed by N-methyltransferase belonged to motif B' methyltransferase family in *Coffea arabica*. **Biochemical and biophysical research communications**, v. 452, n. 4, p. 1060-1066, 2014.

MOREIRA, A. S. P. et al. Galactomannans in coffee. In: Coffee in health and disease prevention. **Academic Press**, p. 173-182, 2015.

MUHARI, E. H. et al. Effect of fruit ripening level and roasting temperature on robusta coffee bean quality. **International Journal Applied Technology Research**, v. 4, n. 1, p. 41-52, 2023.

MURTHY, P. S. e NAIDU, M. M. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. **Resources, Conservation and recycling**, v. 66, p. 45-58, 2012.

MUSEBE, R.; AGWANDA, C.; MEKONEN, M. Primary coffee processing in Ethiopia: patterns, constraints and determinants. **African Crop Science Conference Proceedings**, v. 8, p. 1417-1421, 2007.

NAMITHA, K. K.; NEGI, P. S. Chemistry and biotechnology of carotenoids. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 50, n. 8, p. 728-760, 2010.

NARITA, Y.; INOUE, K. Chlorogenic acids from coffee. In: Coffee in health and disease prevention. **Academic Press**, p. 189-199, 2015.

NAWAZ, I. et al. RNA-Seq profiling reveals the plant hormones and molecular mechanisms stimulating the early ripening in apple. **Genomics**, v. 113, n. 1, p. 493-502, 2021.

NAVYA, P. N.; PUSHPA, S. M. Production, statistical optimization and application of endoglucanase from *Rhizopus stolonifer* utilizing coffee husk. **Bioprocess and biosystems engineering**, v. 36, n. 8, p. 1115-1123, 2013.

OCAMPO, D. M. et al. Intercambio de dióxido de carbono y cambios bioquímicos en el pericarpio durante el desarrollo del fruto del cafeto. **Cenicafé**, v. 61, n. 4, p. 327-343, 2010.

OESTREICH-JANZEN, S. Chemistry of Coffee. CAFEA GmbH, **Elsevier Ltd.**, v. 3, p. 1085-1117, 2010.

OGAWA, M. et al. 7-Methylxanthine methyltransferase of coffee plants: gene isolation and enzymatic properties. **Journal of Biological Chemistry**, v. 276, n. 11, p. 8213-8218, 2001.

OGITA, S. et al. Application of RNAi to confirm theobromine as the major intermediate for caffeine biosynthesis in coffee plants with potential for construction of decaffeinated varieties. **Plant Molecular Biology**, v. 54, p. 931-941, 2004.

PEREIRA, L. F. P. et al. Ethylene production and acc oxidase gene expression during fruit ripening of *Coffea arabica* L. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 283-289, 2005.

PEREIRA, L. F. P.; IVAMOTO, S. T. Characterization of coffee genes involved in isoprenoid and diterpene metabolic pathways. In: Coffee in health and disease prevention. **Academic Press**, p. 45-51, 2015.

PÉREZ-LLORCA, M. et al. Biosynthesis, metabolism and function of auxin, salicylic acid and melatonin in climacteric and non-climacteric fruits. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 443435, 2019.

PÉREZ, V. O. et al. Chemical composition and sensory quality of coffee fruits at different stages of maturity. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 341, 2023.

PEROTTI, V. E.; MORENO, A. S.; PODESTÁ, F. E. Physiological aspects of fruit ripening: the mitochondrial connection. **Mitochondrion**, v. 17, p. 1-6, 2014.

PERROIS, C. et al. Differential regulation of caffeine metabolism in *Coffea arabica* (Arabica) and *Coffea canephora* (Robusta). **Planta**, v. 241, p. 179-191, 2015.

POLKO, J. K.; KIEBER, J. J. The regulation of cellulose biosynthesis in plants. **The Plant Cell**, v. 31, n. 2, p. 282-296, 2019.

PRATA, E R. B. A.; OLIVEIRA, L. S. Fresh coffee husks as potential sources of anthocyanins. **LWT-Food Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 1555-1560, 2007.

PRÉ, M. et al. Characterization and expression analysis of genes directing galactomannan synthesis in coffee. **Annals of Botany**, v. 102, n. 2, p. 207-220, 2008.

PRIVAT, I. et al. Differential regulation of grain sucrose accumulation and metabolism in *Coffea arabica* (Arabica) and *Coffea canephora* (Robusta) revealed through gene expression and enzyme activity analysis. **New Phytologist**, v. 178, n. 4, p. 781-797, 2008.

PRIVAT, I. et al. The 'PUCE CAFE' Project: the First 15K Coffee Microarray, a New Tool for Discovering Candidate Genes correlated to Agronomic and Quality Traits. **BMC genomics**, v. 12, p. 1-14, 2011.

PROCIDA, G. et al. Classification of green coffee beans by differences in protein composition obtained by matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry. **Rapid communications in mass spectrometry**, v. 17, n. 2, p. 140-148, 2003.

RAHARIMALALA, N. et al. The absence of the caffeine synthase gene is involved in the naturally decaffeinated status of *Coffea humblotiana*, a wild species from Comoro archipelago. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 8119, 2021.

RAMOS, M. F. et al. Discrimination of the sensory quality of the *Coffea arabica* L. (cv. Yellow Bourbon) produced in different altitudes using decision trees obtained by the CHAID method. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 10, p. 3543-3551, 2016.

REDGWELL, R. J. et al. Changes to the galactose/mannose ratio in galactomannans during coffee bean (*Coffea arabica* L.) development: implications for in vivo modification of galactomannan synthesis. **Planta**, v. 217, p. 316-326, 2003.

REDGWELL, R. J. et al. Effect of roasting on degradation and structural features of polysaccharides in Arabica coffee beans. **Carbohydrate Research**, v. 337, n. 5, p. 421-431, 2002.

REICHEMBACH, L. H. et al. Fractionation and characterization of cell wall polysaccharides from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp. **Carbohydrate Polymers**, v. 327, p. 121693, 2024.

ROCA, M.; MÍNGUEZ-MOSQUERA, M. I. Chlorophyll catabolism pathway in fruits of *Capsicum annuum* (L.): stay-green versus red fruits. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 54, n. 11, p. 4035-4040, 2006.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. Natural food pigments and colorants. **Current Opinion in Food Science**, v. 7, p. 20-26, 2016.

ROGERS, W. J. et al. Biochemical and molecular characterization and expression of the 11S-type storage protein from *Coffea arabica* endosperm. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 37, n. 4, p. 261-272, 1999.

RUAN, Y. L. Signaling role of sucrose metabolism in development. **Molecular plant**, v. 5, n. 4, p. 763-765, 2012.

RUAN, Y. L. Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling. **Annual review of plant biology**, v. 65, n. 1, p. 33-67, 2014.

SÁGIO, S. A. et al. Identification and expression analysis of ethylene biosynthesis and signaling genes provides insights into the early and late coffee cultivars ripening pathway. **Planta**, v. 239, p. 951-963, 2014.

SÁGIO, S. A. et al. Physiological and molecular analyses of early and late *Coffea arabica* cultivars at different stages of fruit ripening. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, p. 3091-3098, 2013.

SALAZAR, M. R. et al. Estudio morfológico anatómico y ultraestructural del fruto de café *Coffea arabica* L. **Cenicafé**, v. 45, n. 3, p. 93-105, 1994.

SALTVEIT, M. E. Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. **Postharvest biology and technology**, v. 15, n. 3, p. 279-292, 1999.

- SANT'ANA, G. C. et al. Genome-wide association study reveals candidate genes influencing lipids and diterpenes contents in *Coffea arabica* L. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 465, 2018.
- SCHALLER, G. E. Ethylene and the regulation of plant development. **BMC biology**, v. 10, p. 1-3, 2012.
- SCHELLER, H. V.; ULVSKOV, P. Hemicelluloses. **Annual review of plant biology**, v. 61, p. 263-289, 2010.
- SILVA, A. C. R. et al. Comprehensive lipid analysis of green Arabica coffee beans by LC-HRMS/MS. **Food Research International**, v. 137, p. 109727, 2020.
- SIMKIN, A. J. et al. Carotenoid profiling and the expression of carotenoid biosynthetic genes in developing coffee grain. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 6, p. 434-442, 2010.
- SIMKIN, A. J. et al. Oleosin gene family of *Coffea canephora*: quantitative expression analysis of five oleosin genes in developing and germinating coffee grain. **Journal of plant physiology**, v. 163, n. 7, p. 691-708, 2006.
- SPEER, K.; KÖLLING-SPEER, I. The lipid fraction of the coffee bean. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 201-216, 2006.
- SUKATININGSIH, S.; WINDRATI, W. S.; YUDISTIRA, D. Anthocyanin Stability of Robusta Coffee Cherries during Storage. **UNEJ e-Proceeding**, p. 274-282, 2018.
- SUN, T. et al. Plant carotenoids: recent advances and future perspectives. **Molecular Horticulture**, v. 2, n. 1, p. 3, 2022.
- SURMA, S.; OPARIL, S. Coffee and arterial hypertension. **Current hypertension reports**, v. 23, n. 7, p. 38, 2021.
- TANAKA, A.; TANAKA, R. Chlorophyll metabolism. **Current opinion in plant biology**, v. 9, n. 3, p. 248-255, 2006.
- TAN, B. C. et al. Molecular characterization of the Arabidopsis 9-cis epoxycarotenoid dioxygenase gene family. **The Plant Journal**, v. 35, n. 1, p. 44-56, 2003.
- TIEMAN, D. M. et al. The tomato ethylene receptors NR and LeETR4 are negative regulators of ethylene response and exhibit functional compensation within a multigene family. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 97, n. 10, p. 5663-5668, 2000.
- TIMMINS, J. J. B. et al. The sensory significance of apocarotenoids in wine: Importance of carotenoid cleavage dioxygenase 1 (CCD1) in the production of β -ionone. **Molecules**, v. 25, n. 12, p. 2779, 2020.
- TORREGROSA-CRESPO, J. et al. Exploring the valuable carotenoids for the large-scale production by marine microorganisms. **Marine Drugs**, v. 16, n. 6, p. 203, 2018.

- TRAN, H. T. M. et al. Advances in genomics for the improvement of quality in coffee. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 10, p. 3300-3312, 2016.
- TRAN, H. T. M. et al. SNP in the *Coffea arabica* genome associated with coffee quality. **Tree Genetics & Genomes**, v. 14, p. 1-15, 2018a.
- TRAN, H. T. M. et al. Use of a draft genome of coffee (*Coffea arabica*) to identify SNPs associated with caffeine content. **Plant biotechnology journal**, v. 16, n. 10, p. 1756-1766, 2018b.
- TURNER, S.; KUMAR, M. Cellulose synthase complex organization and cellulose microfibril structure. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 376, n. 2112, p. 20170048, 2018.
- UEFUJI, H. et al. Molecular cloning and functional characterization of three distinct N-methyltransferases involved in the caffeine biosynthetic pathway in coffee plants. **Plant physiology**, v. 132, n. 1, p. 372-380, 2003.
- VALENCIA-LOZANO, E. et al. *Coffea arabica* L. resistant to coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) mediated by expression of the *Bacillus thuringiensis* Cry10Aa protein. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 765292, 2021.
- VAAST, P. et al. Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 2, p. 197-204, 2006.
- VELÁSQUEZ, S.; BANCHÓN, C. Influence of pre-and post-harvest factors on the organoleptic and physicochemical quality of coffee: A short review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 60, n. 10, p. 2526-2538, 2023.
- WAGEMAKER, T. A. L. et al. Sun protection factor, content and composition of lipid fraction of green coffee beans. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 2, p. 469-473, 2011.
- WANG, K. L. C.; LI, H.; ECKER, J. R. Ethylene biosynthesis and signaling networks. **The plant cell**, v. 14, n. suppl_1, p. S131-S151, 2002.
- WEI, F.; TANOKURA, M. Chemical changes in the components of coffee beans during roasting. *En Coffee in health and disease prevention*. **Academic Press**, p. 83-91, 2015.
- WIND, J.; SMEEKENS, S.; HANSON, J. Sucrose: metabolite and signaling molecule. **Phytochemistry**, v. 71, n. 14-15, p. 1610-1614, 2010.
- WINTGENS, J. N. **In Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, 2004.
- YANG, S. Regulation of biosynthesis and action of ethylene. **Manipulation of Ethylene Responses in Horticulture, XXII IHC 201**, p. 53-60, 1986.

YU, H. et al. Transcriptomic Analysis of Alternative Splicing Events during Different Fruit Ripening Stages of *Coffea arabica* L. **Genes**, v. 15, n. 4, p. 459, 2024.

ZERBINI, P. E. et al. Optical properties, ethylene production and softening in mango fruit. **Postharvest biology and technology**, v. 101, p. 58-65, 2015.

ZHANG, B. et al. The plant cell wall: Biosynthesis, construction, and functions. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 63, n. 1, p. 251-272, 2021.

ZHANG, L. et al. Identification of key genes and regulators associated with carotenoid metabolism in apricot (*Prunus armeniaca*) fruit using weighted gene coexpression network analysis. **BMC genomics**, v. 20, p. 1-15, 2019.

ZHANG, W. et al. Biosynthesis and transport of nucleotide sugars for plant hemicellulose. **Frontiers in plant science**, v. 12, p. 723128, 2021.

ZHENG, X. Q.; NAGAI, C.; ASHIHARA, H. Pyridine nucleotide cycle and trigonelline (N-methylnicotinic acid) synthesis in developing leaves and fruits of *Coffea arabica*. **Physiologia Plantarum**, v. 122, n 4, p. 404-411, 2004.

ZHU, F. et al. The metabolic changes that effect fruit quality during tomato fruit ripening. **Molecular Horticulture**, v. 2, n. 1, p. 2, 2022.

ZHU, X.; ZHU, Q.; ZHU, H. Towards a better understanding of fruit ripening: Crosstalk of hormones in the regulation of fruit ripening. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1173877, 2023.

SEÇÃO 4

Considerações finais

A maturação dos frutos do café é um parâmetro importante na qualidade do café. Atualmente, existem muitas ferramentas disponíveis que ajudam a facilitar no campo o monitoramento e a análise desse estágio, porém algumas exigem equipamentos caros e, além disso, requerem conhecimento prévio para sua manipulação, outro parâmetro importante a considerar é a precisão do modelo que varia entre as ferramentas. Neste trabalho, a ferramenta utilizada é fácil de usar e não requer custos adicionais, e os resultados obtidos foram positivos, pois a margem de erro foi baixa em comparação à quantificação manual e aos resultados apresentados em outros estudos.

Com respeito à aplicação de ETEFOM talvez seja interessante fazer de novo aplicação do produto para uniformizar a maturação na planta, e assim abordar a hipótese planteada do amadurecimento acelerado na parte superior da planta em relação à inferior, para isso considerar as variáveis que foram abordadas na discussão que poderão haver tido interferência e comprometido a eficácia do produto.

Além disso, apresentamos dados úteis para abordar a qualidade do café desde a formação do grão até a colheita. A qualidade do café é um tema complexo que requer uma abordagem integrada para ser compreendido. Até o momento, a maioria das pesquisas tem se concentrado em compostos individuais, mas a relação entre eles pode revelar novas percepções sobre a regulação molecular durante o desenvolvimento e a maturação dos frutos, ajudando a melhorar o acúmulo final de compostos relacionados à qualidade no grão.