

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Ozonização de café em sistema de microbolhas: cinética de reação,  
descontaminação microbiológica e qualidade**

Felipe Guimarães Abrantes Lacerda  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**FELIPE GUIMARÃES ABRANTES LACERDA**

**Ozonização de café em sistema de microbolhas: cinética de reação,  
descontaminação microbiológica e qualidade**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Marcus V. de Assis Silva

Coorientadores: Luana Haeblerlin  
Leda R. D. Faroni

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

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

T

L131o Lacerda, Felipe Guimarães Abrantes, 1993-  
2025 Ozonização de café em sistema de microbolhas: cinética de  
reação, descontaminação microbiológica e qualidade / Felipe  
Guimarães Abrantes Lacerda. – Viçosa, MG, 2025.  
58 f.: il. (algumas color.).

Orientador: Marcus Vinicius de Assis Silva.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Engenharia Agrícola, 2025.

Referências bibliográficas: f. 51-58.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.780>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Café. 2. Café - Melhoramento genético. 3. Café -  
Avaliação sensorial. 4. Ozônio. 5. Sistema de microbolhas.  
I. Marcus Vinicius de Assis Silva, 1992-. II. Universidade  
Federal de Viçosa. Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 633.73

**FELIPE GUIMARÃES ABRANTES LACERDA**

**Ozonização de café em sistema de microbolhas: cinética de reação,  
descontaminação microbiológica e qualidade**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Felipe Guimarães Abrantes Lacerda  
Autor

---

Marcus Vinicius de Assis Silva  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 02/12/2025 às 08:54:31 e pelo orientador em 02/12/2025 às 09:18:51. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **JS9Z.RFB1.9QJQ** e clique no botão 'Validar documento'.

## AGRADECIMENTOS

À Deus e Nossa Senhora Aparecida que sempre me abençoaram e me protegeram para chegar até aqui.

Ao grande amor da minha vida Antonieta, pelo companheirismo, cumplicidade e carinho, sempre me lembrando que sou capaz e à sua família, Lilia, Leo e Daniel, pelo carinho.

Aos meus filhos, Gustavo e Augusto, que têm me ensinado como o amor nos transforma e motiva.

Aos meus pais Wilson e Wânia, e ao meu irmão Pedro, que nunca mediram esforços para me ajudar, além de sempre acreditarem em mim.

À Flavia que cuida de todos nós, com muito carinho.

À minha amada sobrinha, Maria Alice que tem deixado meus dias mais leves e cheios de amor. À minha cunhada Kamila, por todo carinho que sempre teve comigo.

À minha avó Nininha por ter cuidado a vida toda de mim e do meu irmão. Um amor que não sei expressar em palavras.

Aos meus avós Vera e Lilito, que, mesmo estando em outro plano, me ensinaram valores que foram fundamentais para a minha formação como pessoa.

Às minhas tias Monica e Ilca, ao meu tio Henrique que sempre se fizeram presentes e a todos da minha família que torcem por mim e me apoiam. Ao tio Sidney (in memoriam) pelas inúmeras conversas sobre café.

À Ana Luísa minha prima que, com uma força incomensurável vem nos mostrando quanto vale a pena lutar pela vida. À Luisa, também minha prima, por me mostrar com gestos/atitudes, o quanto é importante e vale a pena ser grato e leal à nossa família.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram e fizeram dessa caminhada bem mais leve, com muitas histórias boas para serem lembradas. Amo vocês “Os fifis”.

À Mel, ao Caju, ao Tody, Toka, Zuck, Branquinha e Lilica por tantos momentos que me alegraram e me distraíram.

Ao Café Vô Lilito e à Fazenda Aparecida e seus colaboradores, por todos os ensinamentos e momentos lá vividos.

À UFV e à UFLA pela oportunidade de conquistar uma excelente formação profissional. Ao CNPq pela concessão da bolsa no meu mestrado.

Ao professor Marcus e à professora Leda que nunca mediram esforços em me ajudar nesse trabalho e sempre me apoiaram.

Aos professores Ernandes, Cecon e Luana, pelos ensinamentos e apoio.

Aos colegas do Laboratório, Emanuel, Carollayne, Francisco 1 e 2, Camila, Jojo e Ebi, por toda ajuda e conversas ao longo do desenvolvimento deste

trabalho.

À Ana Paula e ao professor Flávio Meira Borém pelos grandes ensinamentos sobre o café e ao Núcleo de Estudos PósCafé da UFLA que sempre se faz presente na minha memória.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

LACERDA, Felipe Guimarães Abrantes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Ozonização de café em sistema de microbolhas: cinética de reação, descontaminação microbiológica e qualidade.** Orientador: Marcus Vinicius de Assis Silva. Coorientadores: Luana Haeberlin e Leda Rita Dantonino Faroni.

A qualidade do café pode ser influenciada pelas condições de processamento e pela presença de microrganismos deteriorantes. O uso da água ozonizada é uma das tecnologias que têm se destacado na descontaminação microbiológica de alimentos. Objetivou-se com este trabalho caracterizar a cinética de reação do ozônio na água em sistema de microbolhas e determinar o potencial da água ozonizada na descontaminação microbiológica e preservação da qualidade sensorial do café. O experimento foi realizado na Fazenda Aparecida, em Carangola-MG, latitude: 20° 47' 17" S e longitude: 42° 11' 47" W. Foi utilizado o café Arábica (*Coffea arabica* L.), variedade Catuaí Vermelho colhido de um talhão com altitude de aproximadamente 920 metros. Para caracterização da cinética de reação foram determinadas as curvas de saturação e cinética de decomposição para as concentrações de entrada de ozônio iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>. Para tratamento do café, amostras de 10 kg foram submetidas à imersão em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio por períodos iguais a 40, 60 e 90 minutos para o café cereja descascado e tempos iguais a 60, 120 e 180 minutos para café cereja. A imersão do café foi feita em um tanque de polipropileno nas dimensões (0,15 x 0,35 x 0,75 m) e capacidade para 30 litros de água. Para a geração das microbolhas sem ozônio e microbolhas de ozônio na água foi utilizado um gerador de microbolha responsável pela circulação da água, a uma vazão volumétrica de 0,43 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Após o processo de imersão do café as amostras foram distribuídas em terreiros suspensos para a secagem. Para avaliar o efeito do tratamento na descontaminação microbiológica do café foram realizadas contagens de fungos filamentosos e leveduras, além das bactérias mesófilas. A caracterização da qualidade do café após os tratamentos foi feita através da análise sensorial baseada no protocolo da Associação de Cafés Especiais (SCAA), teor de água, cor e quantificação de defeitos. Para avaliar a qualidade físico-química da água de imersão do café foram feitas análises de condutividade elétrica, pH, potencial redox, DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), DQO (Demanda Química de Oxigênio) e turbidez. Os experimentos foram realizados em delineamento inteiramente casualizado e foram considerados dois tipos de café (café cereja descascado e café cereja), três tipos de tratamentos (imersão em água

com microbolhas sem ozônio, imersão em água com microbolhas de ozônio e apenas lavagem convencional). Realizou-se análise de variância e teste de Tukey ( $P < 0,01$ ) para comparação entre as médias e teste de Dunnett ( $P < 0,05$ ) para comparação dos tratamentos com o controle. A concentração inicial de ozônio dissolvido em água no tanque de imersão foi de 1,16; 1,89 e 2,03 mg L<sup>-1</sup> para as concentrações de entrada do gás ozônio de 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. O tempo de meia-vida do ozônio no tanque de imersão apenas em água pura foi de 30,00; 46,52 e 63,59 min para as concentrações de 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Em relação à descontaminação microbiológica para o café cereja descascado, o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio por 40 min foi responsável por reduzir em 1,13 log UFC g<sup>-1</sup> a contaminação por fungos filamentosos e leveduras. Para mesófilos aeróbios, este mesmo tratamento foi responsável por reduzir 0,54 log UFC g<sup>-1</sup>. No café cereja, o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio por 60 min promoveu uma redução de 2,98 log UFC g<sup>-1</sup> na contaminação por fungos filamentosos e leveduras. Os resultados da análise sensorial para o café natural não apresentaram diferença estatística significativa ( $P < 0,05$ ) com pontuação média de 80,29. Para a quantidade de defeitos foram observadas diferenças significativas apenas do café cereja descascado para grãos verdes, ardidados e quebrados. Quanto ao teor de água, o café cereja descascado apresentou menores valores em relação ao café cereja. Para diferença de cor, o efeito dos tratamentos foi mais pronunciado imediatamente após a imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio. No café cereja descascado, os maiores valores de tonalidade de cor foram observados imediatamente após os tratamentos com imersão do café em água com microbolhas de ozônio. No tratamento com imersão de café cereja em água com microbolhas de ozônio por 180 min observou-se uma redução significativa na saturação de cor ( $P < 0,05$ ). Em relação às análises físico-químicas da água é importante destacar que houve uma redução expressiva nos valores de DBO e DQO na água de imersão do café cereja descascado com microbolhas de ozônio por 90 min. Os valores de DBO e DQO ao final deste tratamento foram iguais a  $46,63 \pm 1,62$  e  $93,43 \pm 3,91$  mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Conclui-se que a aplicação de água ozonizada como um pré-tratamento na secagem do café é uma tecnologia promissora para realizar a descontaminação microbiológica e manter a qualidade de cafés especiais.

Palavras-chave: *Coffea arabica* L.; pós-colheita; ozônio ; sistema de microbolhas; qualidade sensorial

## ABSTRACT

LACERDA, Felipe Guimarães Abrantes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Coffee ozonation in a microbubble system: reaction kinetics, microbiological decontamination and quality.** Adviser: Marcus Vinicius de Assis Silva. Co-advisers: Luana Haerberlin and Leda Rita Dantonino Faroni.

The quality of coffee can be influenced by processing conditions and the presence of spoilage microorganisms. The use of ozonated water is one of the technologies that has stood out in the microbiological decontamination of food. This work aimed to characterize the reaction kinetics of ozone in water in a microbubble system and to determine the potential of ozonated water in the microbiological decontamination and preservation of the sensory quality of coffee. The experiment was carried out at Fazenda Aparecida, in Carangola-MG, latitude: 20° 47' 17" S and longitude: 42° 11' 47" W. Arabica coffee (*Coffea arabica* L.), variety Catuaí Vermelho, harvested from a plot at an altitude of approximately 920 meters, was used. To characterize the reaction kinetics, saturation and decomposition kinetic curves were determined for ozone input concentrations equal to 15.77; 25.18 and 37.20 mg L<sup>-1</sup>. For coffee treatment, 10 kg samples were immersed in water with ozone-free microbubbles and in water with ozone microbubbles for periods of 40, 60, and 90 minutes for pulped natural coffee and 60, 120, and 180 minutes for cherry coffee. The coffee immersion was carried out in a polypropylene tank with dimensions (0.15 x 0.35 x 0.75 m) and a capacity of 30 liters of water. A microbubble generator responsible for water circulation at a volumetric flow rate of 0.43 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> was used to generate ozone-free and ozone microbubbles in the water. After the coffee immersion process, the samples were distributed on raised drying patios. To evaluate the effect of the treatment on the microbiological decontamination of coffee, counts of filamentous fungi and yeasts, as well as mesophilic bacteria, were performed. The characterization of coffee quality after treatments was done through sensory analysis based on the Specialty Coffee Association (SCAA) protocol, water content, color, and quantification of defects. To evaluate the physicochemical quality of the coffee immersion water, analyses of electrical conductivity, pH, redox potential, BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), and turbidity were performed. The experiments were conducted in a completely randomized design and considered two types of coffee (pulped natural coffee and natural coffee), three types of treatments (immersion in water with microbubbles without ozone, immersion in water with ozone microbubbles, and conventional washing only). Analysis of variance and Tukey's test ( $P < 0.01$ ) were

performed for comparison between means, and Dunnett's test ( $P < 0.05$ ) for comparison of treatments with the control. The initial concentration of ozone dissolved in water in the immersion tank was 1.16, 1.89, and 2.03 mg L<sup>-1</sup> for the ozone gas inlet concentrations of 15.77, 25.18, and 37.20 mg L<sup>-1</sup>, respectively. The half-life of ozone in the immersion tank in pure water only was 30.00, 46.52, and 63.59 min for the concentrations of 15.77, 25.18, and 37.20 mg L<sup>-1</sup>, respectively. Regarding microbiological decontamination for pulped natural coffee, treatment with immersion in water with ozone microbubbles for 40 min reduced contamination by filamentous fungi and yeasts by 1.13 log CFU g<sup>-1</sup>. For aerobic mesophiles, this same treatment reduced contamination by 0.54 log CFU g<sup>-1</sup>. In cherry coffee, treatment with immersion in water with ozone microbubbles for 60 min promoted a reduction of 2.98 log CFU g<sup>-1</sup> in contamination by filamentous fungi and yeasts. The results of the sensory analysis for natural coffee did not show a statistically significant difference ( $P < 0.05$ ) with an average score of 80.29. For the number of defects, significant differences were observed only in pulped natural coffee for green, burnt, and broken beans. Regarding water content, pulped natural coffee showed lower values compared to cherry coffee. Regarding color difference, the effect of the treatments was more pronounced immediately after immersion of the coffee in water with microbubbles without ozone and in water with ozone microbubbles. In the pulped natural coffee, the highest color tone values were observed immediately after treatments with immersion of the coffee in water with ozone microbubbles. In the treatment with immersion of coffee cherries in water with ozone microbubbles for 180 min, a significant reduction in color saturation was observed ( $P < 0.05$ ). Regarding the physicochemical analyses of the water, it is important to highlight that there was a significant reduction in BOD and COD values in the water where the pulped natural coffee cherries were immersed in ozone microbubbles for 90 min. The BOD and COD values at the end of this treatment were  $46.63 \pm 1.62$  and  $93.43 \pm 3.91$  mg L<sup>-1</sup>, respectively. It is concluded that the application of ozonated water as a pre-treatment in coffee drying is a promising technology for achieving microbiological decontamination and maintaining coffee quality of specialty coffees.

Keywords: *Coffea arabica* L.; post harvest; ozone; microbubble system; sensory quality

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Imagem de satélite da Fazenda Aparecida em Carangola (MG).....	15
Figura 2	Vista isométrica com a disposição dos equipamentos utilizados para a imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio (a) gerador de microbolhas e (b) vista em corte do tanque de incorporação com o detalhe dos difusores utilizados para distribuição das microbolhas .....	16
Figura 3	Moega de recepção do café (a) Equipamentos utilizados para lavar e descascar mecanicamente o café (b).....	18
Figura 4	Terreiro suspenso com café cereja .....	21
Figura 5	Folha de degustação utilizada no experimento .....	24
Figura 6	Variação da concentração de ozônio durante o enchimento do tanque de incorporação (a) e a decomposição do ozônio na água no tanque de imersão (b) para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L <sup>-1</sup> .....	27
Figura 7	Modelos ajustados de cinética de reação de primeira ordem referentes ao decaimento da concentração de ozônio no tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L <sup>-1</sup> .....	30

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Equações de regressão referentes à variação da concentração de ozônio, durante o enchimento do tanque de incorporação e a decomposição do ozônio na água no tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L <sup>-1</sup> .....	29
Tabela 2	Modelos ajustados de cinética de decomposição de primeira ordem para o decaimento da concentração de ozônio na água no interior do tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L <sup>-1</sup> .....	30
Tabela 3	Análise de variância dos fungos filamentosos e mesófilos aeróbios (log UFC g <sup>-1</sup> ) em café cereja descascado e café cereja .....	31
Tabela 4	Valores médios das contagens de fungos filamentosos e mesófilos aeróbios (log UFC g <sup>-1</sup> ) em café cereja descascado e café cereja .....	32
Tabela 5	Análise de variância referente aos atributos sensoriais e à pontuação final do café cereja e café cereja descascado .....	33
Tabela 6	Valores médios de alguns atributos sensoriais e da pontuação final do café cereja descascado e do café cereja .....	34
Tabela 7	Resumo da análise de variância da diferença de cor ( $\Delta E$ ), tonalidade de cor ou ângulo hue (h*), e saturação de cor ou croma em café cereja descascado e café cereja após os tratamentos e a secagem com trinta dias de armazenamento .....	35
Tabela 8	Valores médios de diferença de cor ( $\Delta E$ ), tonalidade de cor ou ângulo hue (h*) e saturação de cor ou croma (C <sub>r</sub> *) de café cereja descascado e café cereja, após os tratamentos e a secagem com trinta dias de armazenamento .....	36
Tabela 9	Resumo da análise de variância dos diferentes tipos de defeitos e do teor de água em café cereja descascado e café cereja .....	37
Tabela 10	Valores médios dos diferentes tipos de defeitos e teor de água de café cereja descascado e café cereja .....	38
Tabela 11	Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação (R <sup>2</sup> ) e Erro Padrão da Estimativa (EPE) referentes à variação da condutividade elétrica, potencial redox e pH da água de imersão do café cereja descascado e café cereja em função do tempo de imersão em água com microbolhas sem ozônio e água com microbolhas de ozônio .....	39
Tabela 12	Valores médios da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e turbidez da água utilizada nos tratamentos .....	41

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	12
2.	MATERIAL E MÉTODOS .....	15
2.1	Local do experimento .....	15
2.2	Cinética de reação do ozônio na água .....	16
2.3	Colheita e processamento do café .....	18
2.3.1	Imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio .....	19
2.4	Secagem do café .....	20
2.5	Análise microbiológica do café cereja descascado e do café cereja .....	21
2.6	Análise de qualidade do café .....	22
2.6.1	Análise sensorial .....	22
2.6.2	Teor de água .....	24
2.6.3	Cor .....	24
2.6.4	Quantificação dos defeitos .....	25
2.7	Análise físico-química da água do processo de imersão do café .....	25
2.8	Análise estatística .....	26
3.	RESULTADOS .....	27
3.1	Cinética de reação do ozônio na água .....	27
3.2	Análise microbiológica do café cereja descascado e do café cereja .....	30
3.3	Análises da qualidade do café .....	32
3.3.1	Análise sensorial .....	32
3.3.2	Cor .....	34
3.3.3	Quantificação de defeitos e teor de água .....	37
3.4	Análise físico-química da água do processo de imersão do café .....	38
4.	DISCUSSÃO .....	42
4.1	Cinética de reação do ozônio na água .....	42
4.2	Análise microbiológica do café cereja e café cereja descascado .....	43
4.3	Análise de qualidade do café cereja descascado e do café cereja .....	45
4.3.1	Análise Sensorial .....	45
4.3.2	Cor .....	46
4.3.3	Quantidade de defeitos e teor de água .....	47
4.4	Análise físico-química da água do processo de imersão do café .....	48
5.	CONCLUSÃO .....	50
	REFERÊNCIAS .....	41

## 1. INTRODUÇÃO

O café é uma cultura importante no Brasil, pois é amplamente consumido e cultivado para fins comerciais. A produção do café está associada à história do nosso país desde o século XVIII, quando foi introduzido no Brasil (Pimenta, 2003). Em 2024, a produção de café no Brasil foi de 54,79 milhões de sacas. Estima-se que esta produção será de 53,2 milhões de sacas em 2025, um decréscimo de 6,8% em relação ao volume produzido de 2024, devido aos efeitos climáticos (CONAB, 2024). No ano de 2024 foram colhidas 39,59 milhões de sacas de café arábica no país, um aumento de 1,7% em relação a 2023, cuja produção equivale a 72,25% do volume de café produzido nacionalmente (CONAB, 2024).

As variações de produtividade do café ano a ano e as oscilações no valor de mercado tornam a rentabilidade da produção de café vulnerável. Isto acontece, pois o café é precificado de acordo com a qualidade e tipo e a bebida que o produto apresenta. Uma forma de tornar essa produção mais sustentável é investir em tecnologias que agreguem valor ao produto, como na produção de cafés especiais. Os cafés especiais são caracterizados por apresentarem pontuação igual ou superior a 80 pontos na prova de xícara. Os cafés especiais têm alcançado melhores preços no mercado e a demanda por este tipo de café tem aumentado (Borém *et al.*, 2019a).

A produção de café especial tem se tornado uma atividade de relevância para os produtores. Além disso, tem mobilizado também pesquisadores na condução de investigações científicas com o objetivo de propor melhorias para a manutenção da qualidade do produto, controlando os fatores que reduzem essa qualidade nas etapas que envolvem a produção e a pós-colheita (Brazil Specialty Coffe Association, 2021). Fatores como condições climáticas do local de cultivo, altitude, tratamentos culturais, operações de colheita e pós-colheita, processamento, condições de armazenamento e tipo de embalagens utilizados influenciam a qualidade do café (Borém *et al.*, 2008; Livramento *et al.*, 2017; Borém *et al.*, 2019b; Worku *et al.*, 2023).

A qualidade do café também é influenciada pela população microbiana presente nos frutos e nas condições de processamento que podem favorecer o desenvolvimento de uma ou outra espécie (Nakayama *et al.*, 2020). A presença de alguns grupos de microrganismos, principalmente fungos filamentosos, pode estar associada à redução da qualidade do café (Silva *et al.*, 2000; Haile *et al.*, 2019). O fruto e o grão de café podem apresentar uma grande diversidade de espécies de microrganismos (Ferreira *et al.*, 2011; Bruyn *et al.*, 2017) dentre bactérias, leveduras e fungos filamentosos. A contaminação

por microrganismos ocorre naturalmente no desenvolvimento do fruto, durante a colheita e pós-colheita do café. Imediatamente após a colheita e durante a secagem, os bolores, como popularmente são chamados os fungos filamentosos, têm sido reportados como um dos principais grupos de microrganismos que compõem a microbiota presente nos frutos (Nakayama *et al.*, 2020).

O desenvolvimento de microrganismos gera, além de perdas pós-colheita, riscos à saúde humana, especialmente devido ao desenvolvimento de fungos filamentosos que podem produzir micotoxinas, mais especificamente, a ocratoxina A (Batista; Chauferon, 2007; Oueslati *et al.*, 2022). Alguns grupos de microrganismos, como bactérias e leveduras, podem causar outros efeitos como a produção de enzimas que atuam na degradação da mucilagem e da polpa do café (Haile; Kang, 2019). Em função dos problemas relacionados à contaminação por microrganismos, investigações científicas têm sido conduzidas com o objetivo de desenvolver tecnologias para a inativação destes microrganismos. Entre as tecnologias em desenvolvimento pode-se citar a utilização da radiação ultravioleta (UV-C) (Byun *et al.*, 2020), uso de plasma frio (Casas-Junco *et al.*, 2019), dióxido de cloro (Lee *et al.*, 2020) e do gás ozônio (Akbar; Medina; Magan, 2020).

O ozônio é um gás resultante do rearranjo de átomos de oxigênio, podendo ser gerado artificialmente por descargas elétricas ou pela incidência de radiação eletromagnética de alta energia (luz ultravioleta) no ar (Khadre *et al.*, 2001; Hafeez *et al.*, 2021). É um agente oxidante altamente reativo com grande capacidade de desinfecção e esterilização (Pandiselvam *et al.*, 2019). Em virtude dessa característica, a aplicação do ozônio tem sido eficiente no controle e inativação de microrganismos em grãos (Uzoma *et al.*, 2023), frutas, legumes e verduras (Botondi *et al.*, 2021). O ozônio utilizado na conservação de alimentos e sanitização de ambientes pode ser aplicado na forma gasosa (Akbar; Medina; Magan, 2020), dissolvido em água (Premjit *et al.*, 2022) ou ainda por meio da névoa ozonizada (Cabral *et al.*, 2023).

A incorporação do gás ozônio na água pode ser feita por meio de pedras porosas (Baquero-Rodrigues *et al.*, 2018), injetores do tipo venturi (Zhou; Smith, 2000) ou ainda por meio de geradores de microbolhas (Hashimoto *et al.*, 2021). Considerando as aplicações que envolvem o uso do ozônio dissolvido em água, vale ressaltar que a estabilidade e solubilidade do ozônio são influenciadas por fatores como a temperatura, pH e presença de matéria orgânica (Gardoni; Valti; Canzian, 2012). As propriedades desinfetantes do ozônio dissolvido em água estão associadas à formação dos radicais livres que danificam o envoltório celular dos microrganismos devido ao estresse

oxidativo induzido (Aslam; Alam; Saeed, 2020; Pandiselvam *et al.*, 2022). A indústria alimentícia tem utilizado o ozônio, como um agente oxidante no processamento de alimentos e um substituto potencial para desinfetantes à base de cloro, prolongando a vida útil de frutas, vegetais, grãos e seus subprodutos (Pandiselvam *et al.*, 2022). O processo de sanitização de alimentos e tratamento de água com compostos à base de cloro tem algumas desvantagens, devido à formação de compostos organoclorados, trihalometano e ácido haloacético, os quais podem ser mutagênicos, cancerígenos e tóxicos (Ferreira *et al.*, 2017).

Diante do potencial do ozônio dissolvido em água para o controle e desinfecção microbiológica de produtos, e, tendo em vista que o processamento do café utiliza água para diversas etapas, torna-se relevante investigar a aplicação da água ozonizada na descontaminação microbiológica do café como um pré-tratamento à secagem. Espera-se que ao utilizar a água ozonizada seja possível atingir níveis de descontaminação dos frutos de café suficientes para a condução de uma secagem lenta em terreiro suspenso sem perdas de qualidade pela ação de microrganismos deteriorantes. Dessa forma, os objetivos desse trabalho foram: (i) caracterizar a cinética de reação do ozônio em água em sistema de microbolhas; (ii) determinar a eficiência da água ozonizada em sistema de microbolhas na descontaminação microbiológica de café cereja descascado e café cereja; (iii) determinar a qualidade física e sensorial do café cereja descascado e café cereja após imersão em água ozonizada; e (iv) caracterizar a qualidade físico-química da água durante o processo de imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local do experimento

A colheita e a secagem do café foram realizadas na Fazenda Aparecida, localizada na comunidade rural denominada Barroso, distrito de Alvorada, município de Carangola (MG) (Figura 1). Nesta propriedade rural, o café foi processado, foram feitos os tratamentos com imersão em água ozonizada e o café foi seco. A área onde foi colhido o café apresentava altitude de 920 m e as seguintes coordenadas geográficas: latitude: 20° 47' 17" S e longitude: 42° 11' 47" W. As análises microbiológicas e de qualidade física do café foram realizadas no Laboratório Pós-colheita da Área Técnica de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV). As análises de qualidade sensorial do café foram realizadas no Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), *campus* de Venda Nova do Imigrante. As análises de DBO, DQO e turbidez referentes à água utilizada no processo de imersão dos frutos foram realizadas no laboratório ANALAG, Viçosa (MG).

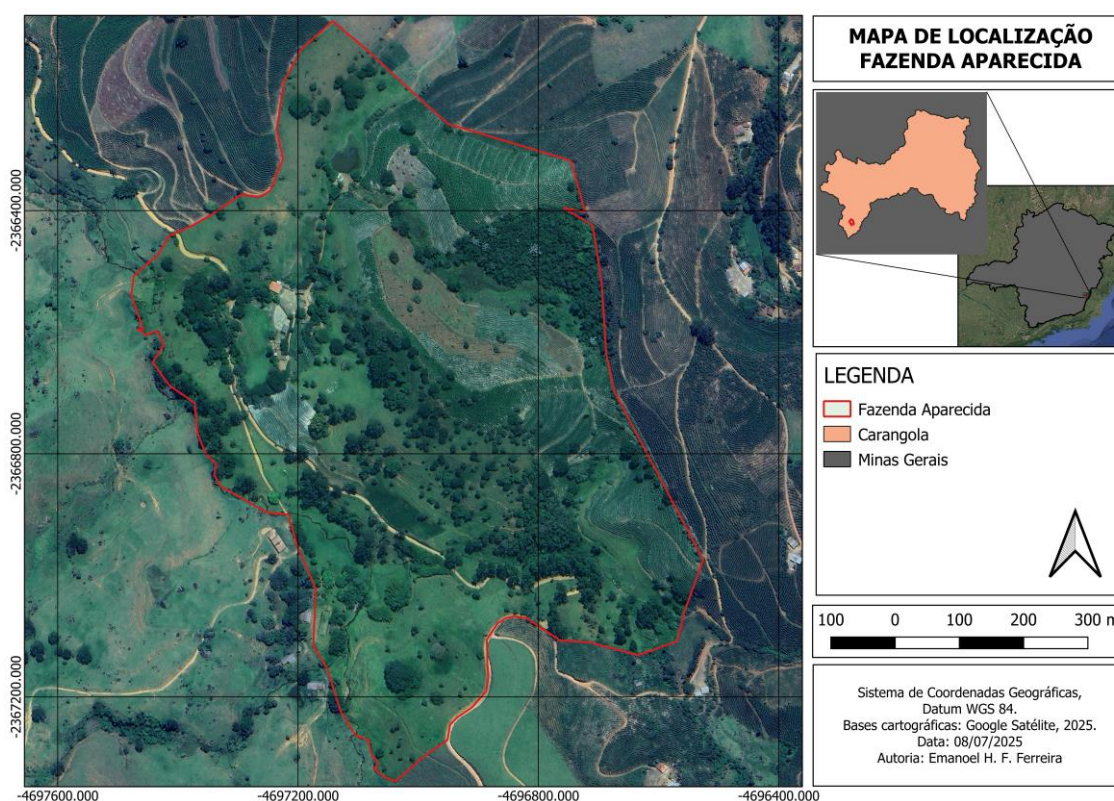
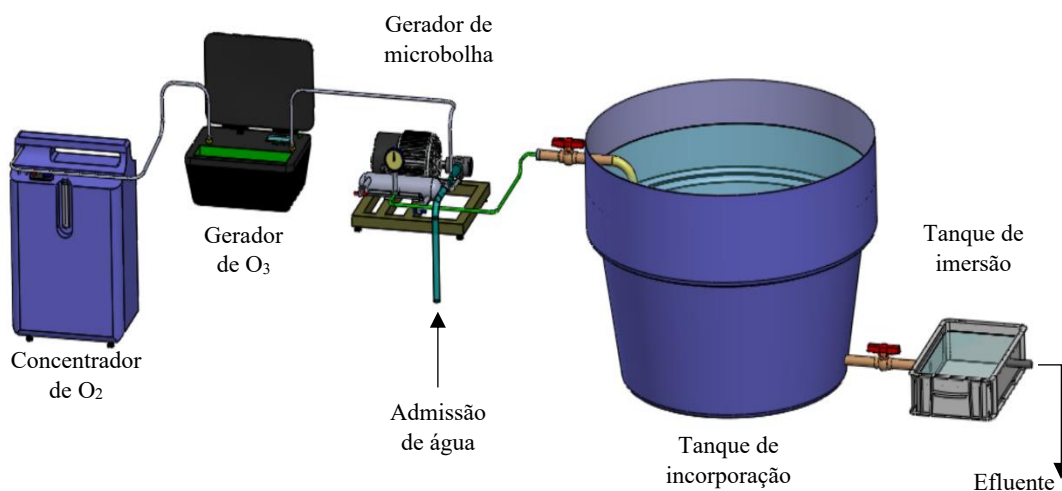


Figura 1 – Imagem de satélite da Fazenda Aparecida em Carangola (MG).

Fonte: Google Satélite, 2025.

## 2.2 Cinética de reação do ozônio na água

Apresenta-se na Figura 2 a disposição dos equipamentos utilizados para geração de água ozonizada e imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio. A caracterização da cinética de reação do ozônio na água foi feita determinando a curva de saturação e a curva de decaimento da concentração de ozônio em água. Foram determinadas as curvas de saturação e cinética de decomposição para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>. Para determinar a curva de saturação, a concentração foi monitorada pelo método iodométrico no tanque de incorporação (Figura 2a) (Rakness *et al.*, 1996). As leituras de concentração foram feitas a cada três minutos até o momento em que permanecesse constante, sendo indicativo de que a água havia atingido o estado de saturação. Após a saturação, a injeção de ozônio no gerador de microbolhas foi interrompida e foi monitorado o decaimento da concentração do gás ozônio dissolvido em água no tanque de imersão até atingir concentrações inferiores a 0,1 mg L<sup>-1</sup>. Para realizar as leituras de concentração, eram utilizadas amostras de 50 mL de água.



(a)

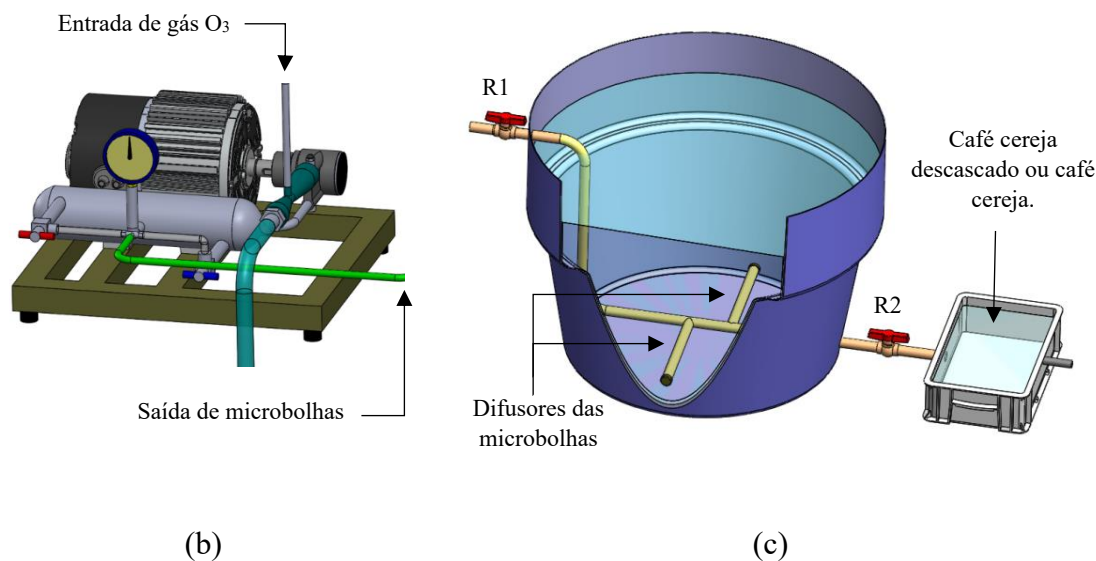


Figura 2 - (a) Vista isométrica com a disposição dos equipamentos utilizados para a imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio, (b) gerador de microbolhas e (c) vista em corte do tanque de incorporação com o detalhe dos difusores utilizados para distribuição das microbolhas.

Fonte: Autores, 2024.

Os ensaios referentes à curva de saturação e curva de decaimento da concentração de ozônio ao longo do tempo foram feitos em duplicata. Para a modelagem da cinética de saturação da água no tanque de incorporação foi ajustada a Equação 1. A modelagem da cinética de decomposição foi feita utilizando o modelo de decaimento exponencial (Equação 2). O tempo de meia-vida do gás ozônio (Equação 3) na água contida no tanque de imersão foi obtido a partir da constante da taxa de decomposição ( $k$ ) do modelo de cinética de reação de ordem 1 (Equação 4) (Wright, 2005).

$$\hat{C} = y_0 + a \cdot \exp \left[ \frac{-0,5 \cdot \left( \frac{\ln(t/b)}{c} \right)^2}{t} \right] \quad (1)$$

$$C = a e^{-bt} \quad (2)$$

$$\ln(C) = \ln(C_0) - kt \quad (3)$$

$$t_{1/2} = \ln \frac{k}{2} \quad (4)$$

Em que:

$C$  = Concentração do gás ozônio dissolvido em água ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$C_0$  = Concentração inicial do gás ozônio dissolvido em água ( $\text{mg L}^{-1}$ );

$t$  = Tempo (min);

$a, b, c$  = Constantes do modelo;

$k$  = Constante da taxa de decomposição ( $\text{min}^{-1}$ ).

### 2.3 Colheita e processamento do café

A colheita do café foi feita manualmente na região montanhosa das Matas de Minas, em um talhão com altitude de aproximadamente 920 metros, exclusivamente da espécie Arábica (*Coffea arabica* L.), variedade Catuaí vermelho, que ocorreu em duas datas distintas: o café cereja, em 13/06/2024, e o café cereja descascado em 16/07/2024.

A derriça do café foi feita em panos e o transporte até o local de processamento foi realizado por um trator agrícola, no mesmo dia da colheita. Os frutos de café colhidos, foram depositados em uma moega (Figura 3a) e, a seguir, transportados por um elevador do tipo caçamba modelo EVU-07, (Pinhalense, Espírito Santo do Pinhal, São Paulo, Brasil) até o separador mecânico de impurezas grosseiras (paus, pedras e folhas) modelo ABC-10, (Pinhalense, Espírito Santo do Pinhal, São Paulo, Brasil) (Figura 3b). A seguir, o café cereja passou pelo processo de separação hidráulica, realizado pelo lavador mecânico modelo LSC-05 (Pinhalense, Espírito Santo do Pinhal, São Paulo, Brasil). O processo de separação por densidade dividiu os frutos de café em dois lotes: um de café boia (que não foi utilizado no experimento) e outro de frutos densos (café cereja maduro e verde). Para a padronização das amostras foi feita a seleção manual dos frutos maduros de café cereja.



(a)

(b)

Figura 3 – Moega de recepção do café (a) Equipamentos utilizados para lavar e descascar mecanicamente o café (b).

Fonte: Acervo do autor, 2024.

O café cereja descascado passou pelo mesmo processo, com a separação de impurezas grosseiras e separação por densidade. Os grãos de café maduros e verdes, separados no processo de lavagem, foram direcionados para o descascador mecânico modelo ECONOFLEX-6 (Pinhalense, Espírito Santo do Pinhal, São Paulo, Brasil), onde os grãos maduros foram descascados, e separados dos grãos verdes e das cascas. As formas de processamento dos grãos de café realizadas asseguraram a homogeneização das amostras para a etapa seguinte de imersão em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio.

### *2.3.1 Imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio*

A água utilizada para a realização do experimento foi proveniente de uma mina d'água da Fazenda Aparecida. A água foi reservada em uma caixa de mil litros para garantir uma vazão regular de água durante todo o experimento. A água de mina foi submetida à análise laboratorial para caracterização:

- Ensaio Microbiológico: Coliformes totais  $2,2 \times 10^2$  NMP/100mL (limite inferior:  $1,5 \times 10^2$ ; limite superior:  $3,4 \times 10^2$ ); *Escherichia coli*  $<1,0$  NMP/100mL (menor que um).
- Ensaio Físicos: Cor Aparente  $<1,0$  uH (menor que um); Dureza total 8,2 mg/L; pH 5,77; Turbidez 1,12 UNT; Ferro Total  $<0,08$  mg/L (menor que zero vírgula zero oito).

Para a geração das microbolhas sem ozônio e microbolhas de ozônio na água foi utilizado um gerador de microbolha (Figura 2b), modelo MB 600 (myOZONE, Jaguariúna, São Paulo, Brasil). O ozônio foi obtido a partir de um gerador de ozônio (Figura 3a), modelo M10 (myOZONE, Jaguariúna, São Paulo, Brasil) alimentado com oxigênio proveniente de um concentrador de oxigênio modelo EverFlo (Philips Respironics, Murrysville, Pensilvânia, EUA). O gás ozônio foi injetado no gerador de microbolha na vazão volumétrica de  $1 \text{ L min}^{-1}$  e concentração de  $37,20 \text{ mg L}^{-1}$ . Essa incorporação foi feita no tanque de incorporação (Figura 3a) de 500 litros. No fundo deste tanque foi inserido um difusor (Figura 2c) ligado diretamente à saída de microbolhas do gerador de microbolhas. Este difusor foi feito em cano de PVC perfurado com a finalidade de distribuir uniformemente as microbolhas no interior do tanque de incorporação. Para a geração das microbolhas sem ozônio, o gerador de microbolhas foi alimentado diretamente pelo concentrador de oxigênio. Os tratamentos com imersão em água com

microbolhas sem ozônio foram conduzidos tendo em vista que trabalhos anteriores reportaram que apenas a ação física das microbolhas é suficiente para provocar redução na contaminação microbiológica (Hou *et al.*, 2022). A imersão do café em água com microbolhas de ozônio e microbolhas sem ozônio foi feita em um tanque de polipropileno nas dimensões (0,15 x 0,35 x 0,75 m) e capacidade para 30 litros de água (Figura 3c).

A bomba do gerador de microbolha foi responsável pela circulação da água, a uma vazão volumétrica de  $0,43 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ . Essa vazão volumétrica correspondeu a um tempo de residência da água ozonizada, no interior do tanque de oxidação, igual a 1,16 h e um tempo de residência de 0,33 h no tanque de imersão. Dessa forma, a água utilizada na imersão do café apresentava uma taxa de renovação no interior do tanque de imersão igual a três vezes por hora. Em cada tratamento de imersão em água ozonizada foram utilizados 10 kg de café cereja descascado e 10 kg de café cereja.

Foram conduzidos os testes de imersão em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio por períodos iguais a 40, 60 e 90 minutos para o café cereja descascado e tempos iguais a 60, 120 e 180 minutos para café cereja. Esses tempos foram estabelecidos a partir da realização de testes preliminares. Foram adotados períodos de imersão inferiores para café cereja descascado com o intuito de não afetar negativamente a qualidade sensorial da bebida. Para evidenciar o efeito antimicrobiano referente à ação da água com microbolhas, foi feito um tratamento controle com os dois tipos de café passando apenas pelo processamento convencional (lavador mecânico).

## 2.4 Secagem do café

Imediatamente após o processo de imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio as amostras de café foram distribuídas em terreiros suspensos instalados na Fazenda Aparecida para a secagem (Figura 4). Este tipo de sistema de secagem foi escolhido por ser uma forma bastante difundida para cafés especiais (Borém *et al.*, 2019a). A condução da secagem em terreiro suspenso proporciona uma secagem mais uniforme, menores riscos de fermentação indesejada e uma taxa de secagem mais baixa, o que mantém os compostos químicos do café de forma íntegra, assegurando assim sua qualidade. Os terreiros apresentavam as dimensões de 0,90 metros de largura e 2,5 metros de comprimento e ficavam a 0,6 metros acima do piso. Neste sistema de secagem, o café ficou em contato com uma tela sombrite e o piso onde esses terreiros foram colocados era de concreto.



Figura 4 – Terreiros suspensos com café cereja e suas respectivas dimensões.

Fonte: Acervo do autor, 2024.

A secagem, tanto do café cereja descascado quanto do café cereja, seguiu os mesmos parâmetros. Inicialmente, enquanto os grãos apresentavam alta umidade, foram espalhados em uma camada fina na espessura de um grão. Foram feitos revolvimentos contínuos (de trinta em trinta minutos) da massa de grãos, até o fim da secagem, com um controle da temperatura dos grãos de café. Depois de atingir a meia seca que correspondeu ao teor de água de 25% b.u para o café cereja descascado e 30% b.u para café cereja, foi feita uma nova dobra na massa de grãos, aumentando a espessura da camada de grãos. A partir desse momento do processo de secagem, os terreiros foram cobertos às 15 horas de cada dia e descobertos às 9 horas do dia seguinte, para aproveitar apenas os períodos do dia com maior incidência de radiação solar. O período de secagem foi de 30 dias para o café cereja descascado e 38 dias para o café cereja. Após a secagem, as amostras foram armazenadas em câmara fria na temperatura de 10 °C.

## 2.5 Análise microbiológica do café cereja descascado e café cereja

Após o tratamento, foram realizadas análises microbiológicas dos cafés para contagem de fungos filamentosos, leveduras e mesófilos aeróbios. Em cada parcela experimental foram retirados 10 g de café, que foram transferidos para sacos plásticos esterilizados para o preparo da diluição  $10^{-1}$ , utilizada nas diluições subsequentes. Aos sacos plásticos foram acrescentados como diluente 90 mL de solução salina 2%

autoclavada e os grãos de café foram macerados para liberação dos microrganismos. Foram consideradas as diluições de  $10^{-2}$  a  $10^{-6}$  para fungos filamentosos e leveduras e de  $10^{-1}$  a  $10^{-6}$  para mesófilos aeróbios. Tanto para fungos filamentosos e leveduras, como para mesófilos aeróbios foram consideradas as diluições de  $10^{-2}$  a  $10^{-6}$ .

O plaqueamento dos fungos filamentosos e leveduras foi feito pelo método de espalhamento em superfície (*Spread-Plate*) e dos mesófilos aeróbios pelo método de inoculação em profundidade (*Pour-Plate*). Para fungos filamentosos e leveduras, foram retiradas de cada diluição alíquotas de 0,1 mL (100 microlitros,  $\mu$ l) que eram pipetadas e espalhadas com alça de Drigalski em placas de Petri preenchidas com meio de cultura solidificado (*Potato Dextrose Agar* - PDA) e acidificado com ácido tartárico 10%. No plaqueamento dos mesófilos aeróbios, foram retiradas alíquotas de 1 mL em cada diluição, que foram pipetadas em placas de Petri vazias, onde foi adicionado meio de cultura em estado líquido (*Plate Count Agar*-PCA), permanecendo em temperatura ambiente até a completa solidificação.

Os procedimentos foram realizados em câmara de fluxo laminar vertical, modelo PCR FLV-1266/4 (Filterflux, Piracicaba, São Paulo, Brasil). As placas foram incubadas em câmaras BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), por períodos de 120 h (5 dias) a 25 °C, para fungos filamentosos e leveduras e de 48 h (2 dias) a 30 °C, para mesófilos aeróbios. Depois de completarem o tempo necessário de incubação, foi feita a contagem das unidades formadoras de colônia (UFC) presentes nas placas, considerando-se as faixas de 15 a 150 colônias para fungos filamentosos e leveduras e de 25 a 250 colônias para mesófilos aeróbios, sendo os resultados expressos em log UFC g<sup>-1</sup>. Os critérios adotados nas análises microbiológicas seguem as recomendações da *American Public Health Association*-APHA (Salfinger; Tortorello, 2015) e instruções normativas (ISO) números 6887-1/1999, 4833-1:2013 e 21527-1/2:2008.

## **2.6 Análise de qualidade do café**

### *2.6.1 Análise Sensorial*

As análises sensoriais foram realizadas por profissionais do *Coffee Design* do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), *campus* de Venda Nova do Imigrante, onde foi feita a torra leve do café. Durante o processo de torra foi feito o monitoramento da temperatura do ar de secagem da amostra, garantindo-se que o tempo de torra não ultrapassasse 12 minutos por amostra.

O processamento das amostras de café em pó para análise sensorial foi iniciado após passado o tempo de 8-24 h, quando o café foi moído em moinho, modelo Bunn G3AHD (Bunn, Springfield, Illinois, United States) com granulometria entre 70 e 75% e passagem em peneira com malha de 0,074 mm. A análise sensorial foi realizada e avaliada por seis provadores certificados como Q-Graders pela *Specialty Coffee Association of America* (SCAA), seguindo as recomendações de Pereira et al. (2020). A análise sensorial foi aprovada pelo comitê de revisão ética da instituição (IFES), sob o número do Certificado de Apresentação para Revisão Ética, N° 31567320.2.0000.5072. As amostras foram preparadas de acordo com as recomendações da SCAA. O ponto de infusão da água foi considerado após atingir 92–95 °C. As amostras de café foram colocadas em cinco xícaras, contendo 8,25 g de café e 150 mL de água mineral a 93 °C.

Os seis painelistas (degustadores certificados como Q-Graders) iniciaram as avaliações quando a temperatura dos copos atingiu 55 °C e o tempo de degustação foi de quatro minutos depois da infusão. As variáveis apresentadas na análise sensorial pelo protocolo da SCAA foram: fragrância/aroma, sabor, gosto residual, acidez, corpo, equilíbrio, doçura, xícara limpa, uniformidade, geral e uma pontuação final (Figura 5).

Na degustação, foram disponibilizadas cinco xícaras para cada amostra aos degustadores. Sendo que, esse conjunto foi disposto aleatoriamente na bancada de degustação e com uma codificação modificada, não permitindo que os degustadores soubessem qual o tratamento feito em cada amostra. Além disso, só foi informada a origem do café aos degustadores, não permitindo assim que nenhum fator externo interferisse no resultado final. Essas análises foram utilizadas para caracterização das amostras e comparação entre os diferentes tratamentos do café. Para cada degustador foram dadas sete folhas de degustação, para preenchimento dos dados (Figura 5).

**Specialty Coffee Association Arabica Cupping Form**

Name: \_\_\_\_\_  
Date: \_\_\_\_\_  
Table no: \_\_\_\_\_

Quality Scale			
6.00 - GOOD	7.00 - VERY GOOD	8.00 - EXCELLENT	9.00 - OUTSTANDING
6.25	7.25	8.25	9.25
6.50	7.50	8.50	9.50
6.75	7.75	8.75	9.75

**Sample No.** \_\_\_\_\_

Roast Level of Sample: \_\_\_\_\_

Fragrance/Aroma: \_\_\_\_\_

Flavor: \_\_\_\_\_

Acidity: \_\_\_\_\_

Body: \_\_\_\_\_

Uniformity: \_\_\_\_\_

Clean Cup: \_\_\_\_\_

Overall: \_\_\_\_\_

Balance: \_\_\_\_\_

Sweetness: \_\_\_\_\_

Defects (subtract): \_\_\_\_\_

Final Score: \_\_\_\_\_

Figura 5 – Ficha de avaliação sensorial utilizada no experimento.

Fonte: (Lingle, 2011).

### 2.6.2 Teor de água

O teor de água foi determinado pelo método de estufa, a 105 °C, durante dezesseis horas, de acordo com a Norma ISO 6673 (*International Organization for Standardization* – ISO, 2003), expresso em base úmida (% b u.). Foram realizadas três repetições para cada amostra.

### 2.6.3 Cor

A análise da cor do café cereja descascado e café cereja foi realizada imediatamente após os tratamentos e após o processo de secagem em terreiro suspenso com trinta dias de armazenamento em câmara fria na temperatura de 10 °C e umidade relativa de 80%. A avaliação da cor do café foi feita por meio da leitura direta de refletância das coordenadas  $L^*$  (intensidade de branco a preto),  $a^*$  (intensidade de vermelho a verde), e  $b^*$  (intensidade de amarelo a azul) utilizando um colorímetro modelo CR410 (Konica Minolta, Osaka, Japão).

A partir dos valores de  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  foi determinada a saturação de cor ou chroma ( $Cr^*$ , Equação 1), a tonalidade de cor ou ângulo hue ( $h^*$ , Equação 2), e a diferença total de cor ( $\Delta E^*$ , Equação 3). Para o cálculo da diferença total de cor, foram utilizadas como referência as coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  das amostras de café não expostas ao ozônio ou ao oxigênio, ou seja, as amostras “controle” de cada tipo de café.

$$Cr^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (5)$$

$$h^* = \arctang\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \quad (6)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (7)$$

Em que:

$L_0^*$ ,  $a_0^*$  e  $b_0^*$  = coordenadas obtidas das amostras de café que não foram imersas em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio.

#### 2.6.4 *Quantificação de defeitos*

A determinação do número de defeitos foi feita 40 dias após a secagem do café, quando as amostras estavam sendo preparadas para análise sensorial. Inicialmente foram pesados 300 g de café cru de cada amostra, a qual depois foi dividida em três partes de 100 g. Após essa etapa, foi realizada a separação de cada defeito presente nas amostras, com base na Classificação Oficial Brasileira (COB). Foram quantificados os seguintes defeitos: Pretos; Verdes; Ardidos; Chochos/Mal Granados; Quebrados; Brocados e Conchas. Na quantificação de defeitos, foi utilizado um tapete de classificação de café fornecido pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (SENAR). Esse tapete permitiu identificar melhor os defeitos, pois tinha imagem e nome de cada defeito. Após a separação foram feitas a contagem e anotação do número de defeitos do café, por tipo.

#### 2.7 **Análise físico-química da água do processo de imersão do café**

Para caracterizar a qualidade da água gerada durante o processo de imersão do café, foram feitas análises de condutividade elétrica, pH e potencial redox, com três repetições cada durante o processo. As análises de qualidade da água foram feitas apenas nos tratamentos com maior período de imersão que correspondeu a 90 min para café cereja descascado e 180 min para café cereja. A condutividade elétrica foi determinada utilizando-se de condutivímetro modelo MCAA150 (TECNOPON, São Paulo, Brasil). O pH foi determinado em pHmetro digital modelo Q-400A (QUIMIS, Diadema, São Paulo, Brasil). A determinação do potencial redox foi realizada utilizando-se o OPR/Redox Tester, com sensibilidade entre 0 e 1.999 mV (169E, Ningbo Sinotester Biological VO.,

Ltda). No processo de imersão do café cereja descascado foram coletadas três amostras de água de 500 mL nos tempos de 0; 22,5; 45,0; 67,5 e 90,0 min. No processo de imersão do café cereja foram coletadas três amostras de água de 500 mL nos tempos de 0; 45; 90; 135 e 180 min. Para as análises de DBO, DQO, turbidez, as amostras de água foram coletadas apenas no início e no final dos períodos de imersão. Na realização das análises foi seguido o método APHA (2012), sendo que para a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foi SMEWW 5210 B, para a Demanda Química de Oxigênio (DQO) foi SMEWW 5220 D e para Turbidez foi SMEWW 2130 B.

## 2.8 Análise estatística

Os experimentos foram realizados em delineamento inteiramente casualizado e foram considerados dois tipos de café (café cereja descascado e café cereja), três tipos de tratamentos (imersão em água com microbolhas sem ozônio, imersão em água com microbolhas de ozônio e apenas lavagem convencional) e três tempos diferentes imersão para cada tipo de café (café cereja descascado por 40, 60 e 90 minutos e café cereja por 60, 120 e 180 minutos).

Os dados referentes à cinética de reação do ozônio durante o enchimento do tanque de incorporação de ozônio e durante a decomposição do ozônio no tanque de imersão para as diferentes concentrações foram submetidos à análise de regressão. A escolha dos modelos teve como base a significância dos coeficientes de regressão, que foram determinados pelo teste *t* a um nível de probabilidade de 5% e pelo coeficiente de determinação “R<sup>2</sup>”. Os dados referentes às análises microbiológicas e análises de qualidade foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para a análise sensorial a ANOVA foi feita em um delineamento em blocos casualizados (DBC). As comparações das médias, ao nível de probabilidade de 1%, foram feitas pelo teste de Tukey. Já pelo teste de Dunnett os tratamentos foram comparados com o controle ao nível de significância de 5%. Para a análise físico-química da água os valores de condutividade elétrica, pH e potencial redox foram submetidos à análise de regressão em função do tempo. Para os dados referentes à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e turbidez foi feita a estatística descritiva com os valores médios e o desvio padrão. Para ambos os testes feitos, foi utilizado o *software* SAEG 9.1 (SAEG, “Sistema para Análises Estatísticas”, UFV, Viçosa-MG). Para a elaboração dos gráficos e análises de regressão foi utilizado o *software* SigmaPlot, versão 14.5 (Systat Software Inc., Erkrath, Alemanha).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Cinética de reação do ozônio na água

Apresenta-se na Figura 6a a variação da concentração de ozônio dissolvido em água em função do tempo de enchimento do tanque de incorporação e na Figura 4b o decaimento da concentração de ozônio no tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>. Na Tabela 1 são apresentados os modelos de regressão com os respectivos coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) e Erro Padrão da Estimativa (EPE).

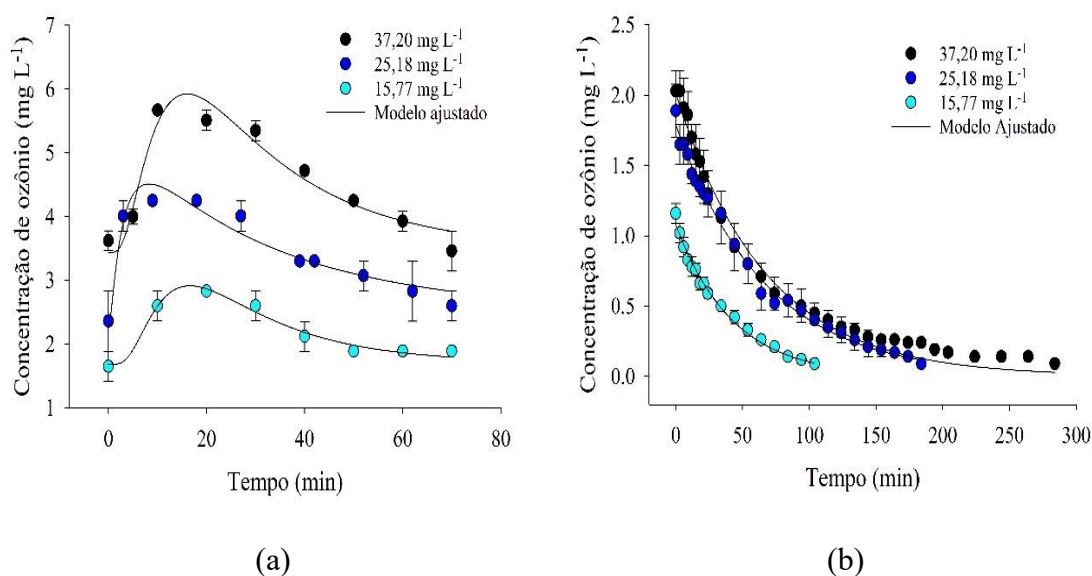


Figura 6 - Variação da concentração de ozônio (média  $\pm$  erro padrão) durante o enchimento do tanque de incorporação (a) e a decomposição do ozônio na água no tanque de imersão (b) para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>.

Fonte: Autores, 2024.

As curvas apresentadas na Figura 6a demonstram que maiores valores da concentração de gás ozônio na entrada do tanque de incorporação implicam em maiores valores da concentração de ozônio na água. A variação da concentração do gás ozônio na água no interior do tanque de incorporação foi monitorada durante o enchimento deste tanque. Maiores valores de concentração de ozônio dissolvido em água foram observados nos 15 primeiros minutos de enchimento do tanque para todas as concentrações testadas.

O tempo de enchimento e tempo de residência da água ozonizada no tanque de incorporação foram de 70 min. No final dos 70 min, as concentrações de ozônio na água no tanque de incorporação foram iguais a 1,89; 2,60 e 3,78 mg L<sup>-1</sup> para as concentrações

de entrada do gás ozônio de 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. Isto correspondeu a uma porcentagem de incorporação igual a 11,9 % para a concentração de 15,77 mg L<sup>-1</sup>, 10,32 % para a concentração de 25,18 mg L<sup>-1</sup> e 10,16 % para a concentração de 37,20 mg L<sup>-1</sup>.

Na Figura 6b e na Tabela 1 estão apresentadas as curvas de decaimento da concentração de ozônio na água no interior do tanque de imersão para as três concentrações testadas. O monitoramento da concentração de ozônio na água do tanque de imersão foi feito após 20 min. Este era o tempo necessário para o enchimento do tanque de imersão. A concentração inicial de ozônio dissolvido em água no tanque de imersão foi de 1,16; 1,89 e 2,03 mg L<sup>-1</sup> para as concentrações de entrada do gás ozônio de 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup> respectivamente. O monitoramento do decaimento da concentração de ozônio foi feito até as leituras atingirem valores inferiores a 0,1 mg L<sup>-1</sup> que correspondem ao limite de detecção do método iodométrico. Para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>, a porcentagem de incorporação no tanque de imersão foi de 7,65; 7,50 e 5,45 % respectivamente.

Tabela 1 - Equações de regressão referentes à variação da concentração de ozônio, durante o enchimento do tanque de incorporação e a decomposição do ozônio na água no tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>

Tanque de incorporação de ozônio			
Concentração inicial de O <sub>3</sub>	Modelo ajustado	R <sup>2</sup>	EPE
37,20 mg L <sup>-1</sup>	$\hat{C} = 3,4379^{**} + 52,2370^{**} \cdot \exp \left[ \frac{-0,5 \cdot \left( \frac{\ln(t/27,5147^{**})}{0,7353^{**}} \right)^2}{t} \right]$	0,9394	0,2619
25,18 mg L <sup>-1</sup>	$\hat{C} = 2,2605^{**} + 42,5159^{**} \cdot \exp \left[ \frac{-0,5 \cdot \left( \frac{\ln(t/43,0061^*)}{1,2832^{**}} \right)^2}{t} \right]$	0,9456	0,1990
15,77 mg L <sup>-1</sup>	$\hat{C} = 1,6856^{**} + 25,2741^{**} \cdot \exp \left[ \frac{-0,5 \cdot \left( \frac{\ln(t/25,4592^{**})}{0,6531^{**}} \right)^2}{t} \right]$	0,9737	0,0928
Tanque de imersão			
Concentração inicial de O <sub>3</sub>	Modelo ajustado	R <sup>2</sup>	EPE
37,20 mg L <sup>-1</sup>	$\hat{C} = 2,0158^{**} \exp(-0,0150^{**} t)$	0,9876	0,0745
25,18 mg L <sup>-1</sup>	$\hat{C} = 1,7911^{**} \exp(-0,0149^{**} t)$	0,9943	0,0451
15,77 mg L <sup>-1</sup>	$\hat{C} = 1,0810^{**} \exp(-0,0235^{**} t)$	0,9909	0,0235

\*\* Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t. \* Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Autores, 2024.

Apresentam-se na Figura 7 e na Tabela 2 os modelos ajustados de cinética de reação de primeira ordem para as três concentrações estudadas. O tempo de meia-vida do ozônio no tanque de imersão apenas em água pura foi de 30,00; 46,52 e 63,59 min para as concentrações de 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Não foram observadas grandes diferenças na porcentagem de incorporação em função da concentração de entrada. Entretanto, fica evidente que maiores valores de concentração de entrada de ozônio implicam em maiores tempos de meia-vida do gás na água, o que consequentemente representa maior estabilidade do ozônio na água.

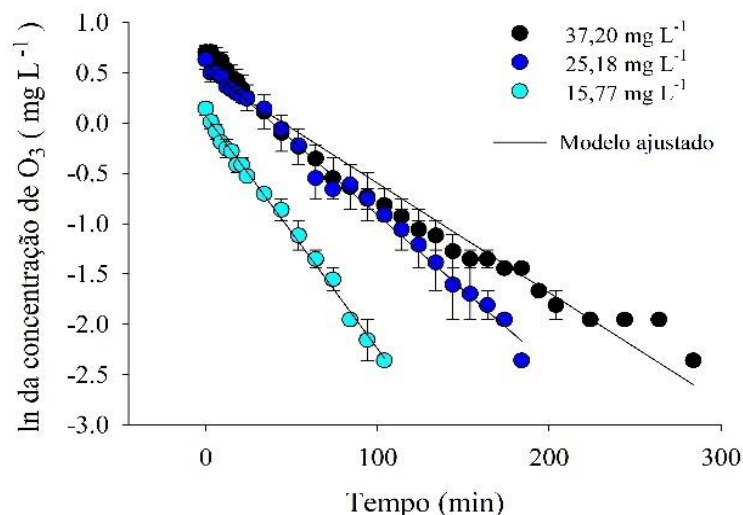


Figura 7 - Modelos ajustados de cinética de reação de primeira ordem referentes ao decaimento da concentração de ozônio no tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>.

Fonte: Autores, 2024.

Tabela 2 - Modelos ajustados de cinética de decomposição de primeira ordem para o decaimento da concentração de ozônio na água no interior do tanque de imersão para as concentrações de entrada iguais a 15,77; 25,18 e 37,20 mg L<sup>-1</sup>

Concentração inicial de O <sub>3</sub>	Modelo ajustado	t <sub>1/2</sub> (min)	R <sup>2</sup>	EPE
37,20 mg L <sup>-1</sup>	$\ln(\hat{C}) = 0,4921^{**} - 0,0109^{**}t$	63,59	0,96	0,1819
25,18 mg L <sup>-1</sup>	$\ln(\hat{C}) = 0,5806^{**} - 0,0149^{**}t$	46,52	0,99	0,0745
15,77 mg L <sup>-1</sup>	$\ln(\hat{C}) = 0,0698^{**} - 0,0231^{**}t$	30,00	0,99	0,0576

\*\* Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Fonte: Autores, 2024.

### 3.2 Análise microbiológica do café cereja descascado e do café cereja

Apresenta-se na Tabela 3 o resumo da ANOVA referente às contagens dos fungos filamentosos, leveduras e mesófilos aeróbios (log UFC g<sup>-1</sup>) em café cereja descascado e café cereja. Verificou-se que para o café cereja descascado, os tratamentos foram significativos a um nível de significância de 5% para fungos filamentosos, leveduras e mesófilos aeróbios. Para o café cereja os tratamentos foram significativos a 1% para fungos filamentosos e leveduras e mesófilos aeróbios.

Tabela 3 - Análise de variância dos fungos filamentosos e leveduras e mesófilos aeróbios (log UFC g<sup>-1</sup>) em café cereja descascado e café cereja

Fv	GL	Quadrados Médios	
		Fungos filamentosos e leveduras (log UFC g <sup>-1</sup> )	Mesófilos aeróbios (log UFC g <sup>-1</sup> )
<b>Café cereja descascado</b>			
TR	6	0,48*	0,37*
Resíduo	14	0,15	0,09
CV (%)		7,42	4,39
<b>Café cereja</b>			
TR	6	4,47**	0,45**
Resíduo	14	0,20	0,06
CV (%)		8,04	3,22

\*\* F significativo a 1%. \* F significativo a 5%.

Fonte: Autores, 2024.

Apresentam-se na Tabela 4 os valores médios das contagens de fungos filamentosos, leveduras e mesófilos aeróbios para café cereja descascado após o processamento convencional (controle), imersão em água com microbolhas sem ozônio e imersão em água com microbolhas de ozônio por 40, 60 e 90 min. Na Tabela 4 são apresentados também os valores médios das contagens de fungos filamentosos e leveduras e mesófilos aeróbios para café cereja após separação hidráulica em lavador mecânico (controle), imersão em água com microbolhas sem ozônio e imersão em água com microbolhas de ozônio por 60; 120 e 180 min. Para o café cereja descascado, houve uma diferença significativa pelo teste de Dunnett ao nível de 5% de probabilidade para os tratamentos com imersão em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio por 40 e 60 min em relação ao controle. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4, para o café cereja descascado, o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio por 40 min foi responsável por reduzir em 1,13 ciclos log a contaminação por fungos filamentosos e leveduras. Para mesófilos aeróbios este mesmo tratamento com imersão por 40 min foi responsável por reduzir 0,54 ciclos log. No café cereja, o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio por 60 min promoveu uma redução de 2,98 ciclos log UFC/g na contaminação por fungos filamentosos e leveduras. Ainda para café cereja, apenas o tratamento com imersão por 180 min em água com microbolhas de ozônio foi suficiente para reduzir significativamente ( $P < 0,05$ ) a contagem de mesófilos aeróbios.

Tabela 4 - Valores médios das contagens de fungos filamentosos e mesófilos aeróbios (log UFC g<sup>-1</sup>) em café cereja descascado e café cereja

Tratamento	Fungos Filamentosos e leveduras (log UFC g <sup>-1</sup> )	Mesofilos aeróbios (log UFC g <sup>-1</sup> )
<b>Café cereja descascado</b>		
Controle	5,87 a	7,39 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /40 min	4,96 *ab	6,37 *b
Microbolhas com O <sub>3</sub> /40 min	4,74 *b	6,85 ab
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	4,94 *ab	7,12 ab
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	4,95 *ab	6,84 ab
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /90 min	5,55 ab	7,35 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /90 min	5,19 ab	6,97 ab
<b>Café cereja</b>		
Controle	7,42 a	8,11 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	4,75 *b	8,08 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	4,44 *b	8,06 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /120 min	4,86 *b	7,96 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /120 min	4,82 *b	8,19 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /180 min	7,15 a	7,66 ab
Microbolhas com O <sub>3</sub> /180 min	5,45 *b	7,10 *b

As médias seguidas de asterisco na coluna diferem do controle ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não difere entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autores, 2024.

### 3.3 Análises de qualidade do café

#### 3.3.1 Análise sensorial

Apresenta-se na Tabela 5 a análise de variância referente aos atributos sensoriais do café cereja descascado, do café cereja e a pontuação final. Verificou-se que para o café cereja descascado nenhum dos fatores avaliados apresentou diferença significativa e para o café cereja apenas a acidez foi significativa a 1%.

Tabela 5 - Análise de variância referente aos atributos sensoriais e pontuação final do café cereja e café cereja descascado.

Fv	GL	Quadrados Médios							
		Aroma	Sabor	Gosto Residual	Acidez	Corpo	Equilíbrio	Geral	Pontuação Final
<b>Café cereja descascado</b>									
Bloco	5	0,21	0,11	0,11	0,16	0,09	0,10	0,16	4,26
TR	6	0,08 <sup>NS</sup>	0,10 <sup>NS</sup>	0,03 <sup>NS</sup>	0,06 <sup>NS</sup>	0,05 <sup>NS</sup>	0,04 <sup>NS</sup>	0,03 <sup>NS</sup>	1,91 <sup>NS</sup>
Resíduo	30	0,06	0,06	0,05	0,06	0,04	0,04	0,05	1,45
CV (%)		3,39	3,29	3,10	3,23	2,71	2,91	3,23	1,49
<b>Café cereja</b>									
Bloco	5	0,13	0,01	0,03	0,14	0,07	0,08	0,07	2,47
TR	6	0,02 <sup>NS</sup>	0,04 <sup>NS</sup>	0,01 <sup>NS</sup>	0,05*	0,03 <sup>NS</sup>	0,04 <sup>NS</sup>	0,01 <sup>NS</sup>	0,59 <sup>NS</sup>
Resíduo	30	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,46
CV (%)		1,89	2,30	2,41	1,84	2,04	1,91	2,46	0,82

\*- F significativo a 5%. NS – F não significativo a 5%

Fonte: Autores, 2024.

Em relação ao café cereja descascado nenhum dos atributos sensoriais analisados difere estatisticamente em relação ao controle (Tabela 6). Para o café cereja, apenas a acidez apresentou diferença significativa. Foi observado que o tratamento com imersão do café cereja em água ozonizada em sistema de microbolhas por 120 min apresentou o maior valor de acidez (7,63), diferindo estatisticamente dos demais tratamentos e do controle a um nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. Apesar da diferença significativa observada nos valores de acidez, os efeitos dos tratamentos não foram suficientes para provocar alteração significativa na pontuação final do café. A pontuação final dos cafés de todos os tratamentos variou de 80,29 a 82,25, caracterizando os cafés como sendo do tipo especial. O tratamento com imersão do café cereja em água ozonizada por 120 min foi o que apresentou maior pontuação final (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores médios de alguns atributos sensoriais e da pontuação final do café cereja descascado e do café cereja

Tratamentos	Aroma	Sabor	Gosto Residual	Acidez	Corpo	Equilíbrio	Geral	Pontuação Final
<b>Café Cereja Descascado</b>								
Controle	7,25 a	7,17 a	7,21 a	7,17 a	7,29 a	7,17 a	7,17 a	80,42 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /40 min	7,33 a	7,29 a	7,25 a	7,33 a	7,17 a	7,21 a	7,17 a	80,75 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /40 min	7,33 a	7,29 a	7,21 a	7,29 a	7,33 a	7,25 a	7,29 a	81,00 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	7,54 a	7,46 a	7,33 a	7,42 a	7,38 a	7,42 a	7,38 a	81,92 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	7,54 a	7,38 a	7,21 a	7,33 a	7,25 a	7,29 a	7,25 a	81,25 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /90 min	7,33 a	7,08 a	7,13 a	7,13 a	7,17 a	7,25 a	7,21 a	80,29 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /90 min	7,38 a	7,38 a	7,29 a	7,33 a	7,38 a	7,29 a	7,29 a	81,33 a
<b>Café Cereja</b>								
Controle	7,58 a	7,42 a	7,38 a	7,42 ab	7,38 a	7,33 a	7,46 a	81,96 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	7,38 a	7,46 a	7,29 a	7,38 b	7,42 a	7,29 a	7,38 a	81,58 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	7,46 a	7,42 a	7,33 a	7,46 ab	7,46 a	7,42 a	7,50 a	82,04 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /120 min	7,42 a	7,38 a	7,29 a	7,42 ab	7,42 a	7,29 a	7,38 a	81,58 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /120 min	7,46 a	7,63 a	7,25 a	7,63*a	7,54 a	7,33 a	7,42 a	82,25 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /180 min	7,46 a	7,42 a	7,38 a	7,46 ab	7,58 a	7,42 a	7,38 a	82,08 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /180 min	7,50 a	7,42 a	7,25 a	7,33 b	7,38 a	7,17 a	7,38a	81,42 a

As médias seguidas de asterisco na coluna diferem da testemunha ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet. As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autores, 2024.

### 3.3.2 Cor

Na Tabela 7 encontra-se o resumo da ANOVA referente à diferença de cor ( $\Delta E$ ), tonalidade de cor ou ângulo hue ( $h^*$ ) e saturação de cor ou croma ( $Cr^*$ ) em café cereja descascado e café cereja, imediatamente após os tratamentos e após a secagem. A análise de variância revelou que os tratamentos com imersão em água com microbolhas sem ozônio e água com microbolhas de ozônio promoveram alteração significativa na diferença de cor ( $P < 0,01$ ) e tonalidade de cor ( $P < 0,05$ ) do café cereja descascado imediatamente após os tratamentos. Os tratamentos também promoveram alterações significativas na diferença de cor ( $P < 0,01$ ) e saturação de cor ( $P < 0,01$ ) do café cereja descascado após a secagem com trinta dias de armazenamento. Em relação ao café cereja logo após os tratamentos, ficaram evidentes alterações significativas ( $P < 0,01$ ) na diferença de cor e saturação de cor. Ainda para o café cereja, após a secagem com trinta dias de armazenamento, foram observadas alterações significativas apenas na diferença de cor ( $P < 0,01$ ).

Tabela 7 - Resumo da análise de variância da diferença de cor ( $\Delta E$ ), tonalidade de cor ou ângulo hue ( $h^*$ ), e saturação de cor ou croma ( $Cr^*$ ) em café cereja descascado e café cereja após os tratamentos e após a secagem com trinta dias de armazenamento

Fv	GL	Quadrados Médios					
		Após os tratamentos			Após a secagem		
		( $\Delta E$ )	( $h^*$ )	( $Cr^*$ )	( $\Delta E$ )	( $h^*$ )	( $Cr^*$ )
<b>Café Cereja Descascado</b>							
TR	6	25,71**	21,81*	13,66 <sup>NS</sup>	3,78**	4,74 <sup>NS</sup>	1,11**
Resíduo	14	3,03	6,00	10,87	0,54	2,23	0,24
CV (%)		26,59	2,75	16,82	30,91	1,75	5,04
<b>Café Cereja</b>							
TR	6	37,78**	15,46 <sup>NS</sup>	28,66**	3,69**	3,76 <sup>NS</sup>	0,28 <sup>NS</sup>
Resíduo	14	5,08	19,05	5,37	0,40	4,03	0,38
CV (%)		28,99	11,25	14,99	26,44	2,35	5,45

\*\* - F significativo a 1%; \* - F significativo a 5%; NS – F não significativo a 5%.

Fonte: Autores, 2024.

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados referentes à diferença de cor ( $\Delta E$ ), tonalidade de cor ( $h^*$ ) e saturação de cor ( $Cr^*$ ) para o café cereja descascado e café cereja no dia imediatamente após os tratamentos e após a secagem dos grãos com 30 dias de armazenamento. Para o café cereja descascado e café cereja imediatamente após os tratamentos, observou-se que houve diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett para a diferença de cor do controle em relação aos demais tratamentos. Esta diferença de cor pode estar associada ao processo de imersão do café em água com microbolhas com e sem ozônio. Entre os tratamentos com microbolhas sem ozônio e água com microbolhas de ozônio não foram observadas diferenças estatísticas ( $P > 0,05$ ) para a diferença de cor.

Em relação à tonalidade de cor, pelo teste de Dunnett observou-se diferença estatística ( $P > 0,05$ ) do controle em relação aos demais tratamentos. Além disso, ficou evidente que a tonalidade de cor do café cereja descascado foi maior nos tratamentos com imersão em água ozonizada em relação às amostras de café imersas em água com microbolhas sem ozônio. Apesar da tonalidade de cor ter sido superior nos tratamentos com água ozonizada, as diferenças não foram perceptíveis ao olho humano. Os valores de saturação de cor referentes ao café cereja descascado imediatamente após os tratamentos não apresentaram diferenças estatísticas significativas. Entretanto, para o café cereja observou-se uma redução significativa nos valores de saturação de cor referente ao tratamento com imersão em água ozonizada por 180 min.

Para o café cereja descascado e o café cereja, após a secagem, foram observadas diferenças estatísticas de cor em relação ao controle pelo teste de Dunnett ao nível de 5% de probabilidade. Entretanto, entre os tratamentos não houve diferença estatística ( $P > 0,05$ ) para a diferença de cor. A tonalidade de cor tanto do café cereja descascado, quanto do café cereja não variou significativamente ( $P > 0,05$ ). Em relação à saturação de cor, apenas o café cereja descascado apresentou variação significativa, sendo que o tratamento controle apresentou o maior valor de croma. Apesar da diferença estatística observada nos valores de croma, esta alteração não foi perceptível ao olho humano.

Tabela 8 - Valores médios de diferença de cor ( $\Delta E$ ), tonalidade de cor ou ângulo hue ( $h^*$ ) e saturação de cor ou croma ( $Cr^*$ ) de café cereja descascado e café cereja, após os tratamentos e após a secagem com trinta dias de armazenamento

Tratamentos	Após os tratamentos			Após a secagem		
	( $\Delta E$ )	( $h^*$ )	( $Cr^*$ )	( $\Delta E$ )	( $h^*$ )	( $Cr^*$ )
<b>Café cereja descascado</b>						
Controle	0,00 b	83,33 b	16,12 a	0,00 b	83,95 a	10,48 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /40 min	7,01 *a	88,91 *ab	19,19 a	3,56 *a	85,51 a	10,16 ab
Microbolhas com O <sub>3</sub> /40 min	7,27 *a	91,43 *a	21,21 a	2,00 *a	84,34 a	9,04 *b
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	8,13 *a	89,00 *ab	18,79 a	2,65 *a	85,05 a	9,00 *b
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	7,31 *a	90,25 *a	18,62 a	1,73 *a	87,32 a	9,19 *ab
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /90 min	7,75 *a	88,73 *ab	20,53 a	1,80 *a	86,13 a	9,86 ab
Microbolhas com O <sub>3</sub> /90 min	8,36 *a	91,00 *a	22,76 a	2,23 *a	83,89 a	10,14 ab
<b>Café cereja</b>						
Controle	0,00 b	38,21 a	14,20 ab	0,00 b	84,46 a	11,19 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	9,19 *a	39,21 a	16,57 a	2,96 *a	85,00 a	11,72 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	7,23 *a	35,65 a	18,94 a	2,98 *a	86,58 a	11,40 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /120 min	9,64 *a	42,68 a	16,15 ab	2,63 *a	85,74 a	11,09 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /120 min	10,19 *a	36,94 a	14,42 ab	3,35 *a	83,59 a	10,78 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /180 min	8,93 *a	38,70 a	18,23 a	2,43 *a	86,56 a	11,52 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /180 min	9,24 *a	40,19 a	13,17 b	2,29 *a	84,66 a	11,30 a

As médias seguidas de asterisco na coluna diferem da testemunha ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. As médias, seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autores, 2024.

### 3.3.3 Quantificação de defeitos e teor de água

Apresenta-se na Tabela 9 o resumo da ANOVA referente aos tipos de defeitos e ao teor de água do café cereja descascado e do café cereja após a secagem. Os tratamentos foram significativos para a presença de grãos verdes, ardidos e quebrados. Para o café cereja não foram observadas diferenças estatísticas ( $P < 0,05$ ) em relação aos tipos de defeitos. Entretanto, o teor de água do café cereja descascado variou significativamente ( $P < 0,01$ ) em função dos tratamentos.

Tabela 9 - Resumo da análise de variância dos diferentes tipos de defeitos e do teor de água em café cereja descascado e café cereja

Fv	GL	Quadrados Médios							Teor de água (%)
		Pretos	Verdes	Ardidos	Chochos ou Mal Granados	Quebrados	Brocados	Conchas	
<b>Café Cereja Descascado</b>									
TR	6	5,20 <sup>NS</sup>	52,54*	98,94**	7,56 <sup>NS</sup>	71,75**	14,78 <sup>NS</sup>	2,33 <sup>NS</sup>	0,04 <sup>NS</sup>
Resíduo	14	2,14	13,86	8,52	8,96	14,76	9,24	5,19	0,02
CV (%)		80,90	39,28	33,87	39,03	23,19	17,88	42,71	1,60
<b>Café Cereja</b>									
TR	6	0,08 <sup>NS</sup>	0,75 <sup>NS</sup>	5,94 <sup>NS</sup>	24,08 <sup>NS</sup>	137,27 <sup>NS</sup>	106,75 <sup>NS</sup>	0,98 <sup>NS</sup>	0,04**
Resíduo	14	0,09	2,67	5,81	25,24	60,40	126,24	2,67	0,002
CV (%)		324,04	149,01	60,98	49,07	29,94	26,90	58,12	0,44

\*\* - F significativo a 1%; \* - F significativo a 5%; NS – F não significativo a 5%.

Fonte: Autores, 2024.

Apresentam-se na Tabela 10 os valores médios de defeitos relativos a grãos pretos, verdes, ardidos, chochos ou mal granados, quebrados, brocados, conchas e teor de água para o café cereja descascado e café cereja. Para o café cereja descascado, o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio por 60 min diferiu estatisticamente ( $P < 0,05$ ) do controle pelo teste de Dunnett e foi responsável pelo maior número de grãos verdes (17,00). Este mesmo tratamento também registrou o maior número de grãos ardidos (19,99). Além disso, o tratamento com imersão por 60 min em água com microbolhas sem ozônio para o café cereja descascado foi o que apresentou o maior número de grãos quebrados (23,00), diferindo estatisticamente ( $P < 0,05$ ) em relação ao controle e aos demais tratamentos. Ainda para o café cereja descascado, a variação do teor de água não foi significativa ( $P > 0,05$ ) entre os tratamentos apresentando valores entre 9,40 a 9,79% b.u. Para o café cereja, não foram observadas diferenças estatísticas ( $P > 0,05$ ) para nenhum dos defeitos. Apenas o teor de água apresentou alteração significativa ( $P < 0,05$ ), sendo que, o menor valor registrado foi de 11,00% para o

controle e 11,28% para o tratamento com imersão em água com microbolhas sem ozônio por 60 min.

Tabela 10 - Valores médios dos diferentes tipos de defeitos e teor de água de café cereja descascado e café cereja

Tratamentos	Pretos	Verdes	Ardidos	Chochos/ Mal Granados	Quebrados	Brocados	Conchas	Teor de água (%)
<b>Café cereja descascado</b>								
Controle	2,67 a	8,00 ab	14,33 ab	8,33 a	14,33 ab	15,67 a	4,67 a	9,74 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /40 min	1,33 a	13,33 ab	6,67 *bc	7,00 a	17,33 ab	20,00 a	6,00 a	9,58 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /40 min	0,00 a	5,33 b	4,00 *c	6,67 a	12,67 ab	14,33 a	4,67 a	9,60 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	3,33 a	9,00 ab	5,67 *c	8,33 a	23,00 *a	19,33a	6,67 a	9,79 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	3,33 a	17,00 *a	19,00 a	10,67 a	18,67 ab	18,33 a	5,00 a	9,56 a
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /90 min	0,67 a	7,00 ab	6,33 *bc	6,67 a	21,00 a	15,00 a	4,33 a	9,54 a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /90 min	1,33 a	6,67 ab	4,33 *c	6,00 a	9,00 b	16,33 a	6,00 a	9,40 a
<b>Café cereja</b>								
Controle	0,00 a	1,33 a	1,33 a	9,33 a	23,00 a	37,67 a	2,33 a	11,00 c
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /60 min	0,33 a	0,67 a	4,00 a	5,67 a	35,67 a	48,00 a	2,33 a	11,28*a
Microbolhas com O <sub>3</sub> /60 min	0,00 a	2,00 a	5,33 a	13,33 a	35,67 a	48,33 a	2,67 a	11,26*ab
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /120 min	0,33 a	1,00 a	4,00 a	13,67 a	24,33 a	31,67 a	2,67 a	11,13*bc
Microbolhas com O <sub>3</sub> /120 min	0,00 a	1,33 a	5,00 a	11,67 a	21,67 a	40,33 a	2,67 a	10,99 c
Microbolhas sem O <sub>3</sub> /180 min	0,00 a	0,67 a	3,00 a	9,00 a	20,33 a	45,00 a	3,00 a	11,04 c
Microbolhas com O <sub>3</sub> /180 min	0,00 a	0,67 a	5,00 a	9,00 a	21,00 a	41,33 a	4,00 a	11,07 c

As médias seguidas de asterisco na coluna diferem da testemunha ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnett. As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Fonte: Autores, 2024.

### 3.4 Análise físico-química da água do processo de imersão do café

São apresentadas na Tabela 11 as equações de regressão referentes à variação da condutividade elétrica, pH e potencial redox do efluente gerado durante o tratamento com imersão do café cereja descascado e café cereja em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio. Para a água de imersão do café cereja descascado em água com microbolhas sem ozônio, o tempo de tratamento influenciou a variação da condutividade elétrica e do potencial redox, enquanto o pH não foi influenciado pelo tempo, registrando um valor médio de 4,55. Ao analisar a condutividade elétrica e potencial redox, é possível perceber que para cada 1 min de tratamento houve a redução

de 1,44 vezes nos valores de condutividade elétrica e de 2,40 vezes nos valores de potencial redox.

Tabela 11 – Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e Erro Padrão da Estimativa (EPE) referentes à variação da condutividade elétrica, potencial redox e pH da água de imersão do café cereja descascado e café cereja em função do tempo de imersão em água com microbolhas sem ozônio e água com microbolhas de ozônio

Tratamento	Variável de qualidade	Modelo ajustado	EPE	$R^2$
<b>Café Cereja Descascado</b>				
Microbolhas sem ozônio	Condutividade elétrica	$\hat{y} = 172,246 - 1,446^{**}t$	10,92	0,96
	pH	$\hat{y} = 4,558$	-	-
	Potencial redox	$\hat{y} = 730,60 - 2,400^{**}t$	23,60	0,94
Microbolhas com ozônio	Condutividade elétrica	$\hat{y} = 194,474 - 1,957^{**}t$	18,95	0,94
	pH	$\hat{y} = 4,114 + 0,012^{**}t$	0,12	0,94
	Potencial redox	$\hat{y} = 874,93$	-	-
<b>Café Cereja</b>				
Microbolhas sem ozônio	Condutividade elétrica	$\hat{y} = 82,071 + 0,105^{**}t - 0,001^{*}t^2$	1,04	0,99
	pH	$\hat{y} = 4,746 + 0,004^{**}t$	0,048	0,97
	Potencial redox	$\hat{y} = 919,886$	-	-
Microbolhas com ozônio	Condutividade elétrica	$\hat{y} = 62,934$	-	-
	pH	$\hat{y} = 4,912$	-	-
	Potencial redox	$\hat{y} = 962,730$	-	-

\*\*Significativo a 1%, de acordo com o teste t; \*Significativo a 5%, de acordo com o teste t.

Fonte: Autores, 2024.

No que se refere à água de imersão do café cereja descascado, verificou-se que apenas o potencial redox não foi influenciado pelo tempo de tratamento apresentando um valor médio igual a 874,93 mV (Tabela 11). A condutividade elétrica da água e pH foram influenciados pela incorporação de ozônio na água. A água com microbolhas de ozônio reduziu em 1,95 vezes o valor de condutividade elétrica a cada minuto de tratamento enquanto o pH aumentou em 0,012 vezes a cada minuto do tratamento. Para a água de imersão do café cereja, é possível perceber que apenas a condutividade elétrica e pH da água com microbolhas sem ozônio sofreram variação significativa durante o tempo de tratamento. A condutividade elétrica apresentou comportamento quadrático descrito por uma equação polinomial do segundo grau, sendo que o valor máximo atingido de condutividade elétrica foi de 83,80  $\mu\text{S cm}^{-1}$  no tempo de 33 minutos. Em relação ao pH, foi observado um aumento de 0,0036 vezes para cada minuto de tratamento. O tempo de imersão do café cereja em água com microbolhas de ozônio não influenciou

significativamente os valores de condutividade elétrica, pH e potencial redox que registraram valores médios iguais a  $62,93 \mu\text{S cm}^{-1}$ ; 4,99 e 962,73 mV respectivamente.

Na Tabela 12 estão apresentados os valores médios e o desvio padrão referentes a DBO, DQO e turbidez da água no início e no final do tratamento de imersão do café cereja descascado e café cereja em água com microbolhas sem ozônio e água com microbolhas de ozônio. Ao final do período de tratamento, tanto do café cereja descascado quanto do café cereja observou-se uma redução nos valores de DBO, DQO e turbidez da água. Esta redução foi mais expressiva na água de imersão do café cereja descascado com microbolhas de ozônio em que o valor final da DBO e DQO foi de  $46,63 \pm 1,62$  e  $93,43 \pm 3,91 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente. Em relação ao efluente gerado pelo tratamento de imersão do café cereja em água com microbolhas de ozônio, os valores finais de DBO e DQO foram de  $185,20 \pm 5,16$  e  $377,00 \pm 12,64 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente. Os valores de turbidez da água de imersão do tratamento com microbolhas sem ozônio e com microbolhas de ozônio em café cereja descascado foram de  $14,47 \pm 0,59$  e  $5,12 \pm 0,48$  UNT respectivamente. Os valores de turbidez da água do tratamento com microbolhas sem ozônio e com microbolhas de ozônio em café cereja foram de  $8,75 \pm 0,14$  e  $7,17 \pm 0,46$  UNT, respectivamente.

Tabela 12 - Valores médios e desvio padrão da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e turbidez da água utilizada nos tratamentos

Tratamentos	Coleta de amostra	DBO (mg L <sup>-1</sup> )	DQO (mg L <sup>-1</sup> )	Turbidez (UNT)
<b>Café Cereja Descascado</b>				
Microbolhas sem ozônio	Início do período de imersão - 00:00 horas	387,70 ± 92,60	675,65 ± 3,65	70,00 ± 11,06
Microbolhas com ozônio	Início do período de imersão - 00:00 horas	459,80 ± 38,36	879,97 ± 29,13	61,57 ± 5,46
Microbolhas sem ozônio	Final do período de imersão - 01:30 horas	62,23 ± 4,35	159,23 ± 15,06	14,47 ± 0,59
Microbolhas com ozônio	Final do período de imersão - 01:30 horas	46,63 ± 1,62	93,43 ± 3,91	5,12 ± 0,48
<b>Café Cereja</b>				
Microbolhas sem ozônio	Início do período de imersão - 00:00 horas	314,15 ± 8,35	609,20 ± 7,90	40,70 ± 5,81
Microbolhas com ozônio	Início do período de imersão - 00:00 horas	221,07 ± 30,20	431,03 ± 25,10	28,27 ± 2,33
Microbolhas sem ozônio	Final do período de imersão - 03:00 horas	171,30 ± 19,19	355,47 ± 17,28	8,75 ± 0,14
Microbolhas com ozônio	Final do período de imersão - 03:00 horas	185,20 ± 5,16	377,00 ± 12,64	7,17 ± 0,46

Fonte: Autores, 2024.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1 Cinética de reação do ozônio na água

Na literatura existem alguns estudos que descrevem como ocorre a cinética de reação do ozônio gasoso (McClurkin, Maier e Ileleji, 2013) e do ozônio dissolvido em água (Gardoni, Vailti e Canzian, 2012). A cinética de reação do ozônio na água é influenciada pela concentração inicial de gás ozônio, pH, temperatura, dureza, alcalinidade, concentração de metais, ânions/cátions, presença de matéria orgânica na água e condições hidrodinâmicas do escoamento (Gardoni, Vailti e Canzian, 2012).

Em função da complexidade que envolve a cinética de reação do ozônio na água e a ausência de uma abordagem matemática que equacione a influência de todas essas variáveis, estudos anteriores sugerem que sejam feitos experimentos em condições que sejam o mais próximo possível de aplicações em escala real (Gardoni, Vailti e Canzian, 2012).

A caracterização da cinética de reação do ozônio é de fundamental importância para compreender em que magnitude ocorre a transferência de massa da fase gasosa para a fase líquida e as reações de decomposição. A partir desse entendimento é possível realizar o dimensionamento de sistemas de tratamento, definir a potência de geradores de ozônio, a tecnologia de incorporação adequada ao volume de água e quantidade de produto para um determinado processo em escala comercial. Neste estudo, foi utilizado um sistema de geração de microbolhas como tecnologia para a incorporação de gás ozônio na água. As microbolhas são caracterizadas por apresentarem diâmetro inferior a 100  $\mu\text{m}$ , enquanto as bolhas comuns têm diâmetro entre 2 e 5 mm (Khuntia *et al.*, 2012). Dessa forma, as microbolhas têm menor volume, maior superfície específica e menores velocidades de movimentação em relação às bolhas comuns. Todos estes fatores favorecem a incorporação do gás ozônio na água (Khuntia *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2017). A incorporação de ozônio na água através de microbolhas tem sido extensamente investigada e tem demonstrado bons resultados no que se refere à eficiência de incorporação do gás ozônio na água (John *et al.*, 2025).

Na Figura 4a ficou evidente uma maior incorporação de ozônio na água nos primeiros 15 min de enchimento do tanque de incorporação. Isto pode ser explicado pelo fato de nos primeiros minutos de enchimento do tanque existir um menor volume de água e conseqüentemente maior proximidade entre os difusores de microbolha (Figura 3c) e o ponto de coleta de amostra de água. À medida que o volume de água no interior do tanque

de incorporação aumentou, o ponto de coleta de amostra ficou mais distante dos difusores de microbolhas. O aumento da altura de coluna de água sobre os difusores favoreceu a dispersão das microbolhas em um maior volume de água, além de se observar uma tendência em estabilizar a transferência de massa da fase gasosa (ozônio) para a fase líquida (água).

Em relação ao percentual de incorporação de gás ozônio na água no tanque de imersão, observaram-se menores valores de concentração no tanque de imersão em relação às concentrações de ozônio no tanque de incorporação (Figura 4a e 4b). Esta diferença se deve à decomposição que ocorreu devido à hidrodinâmica do escoamento da água durante o enchimento do tanque de imersão com água ozonizada. Estudos anteriores já relataram que as condições hidrodinâmicas do escoamento influenciam a decomposição do ozônio na água (Gardoni *et al.*, 2012). Maiores velocidades de agitação do escoamento aumentam a decomposição do ozônio (Sheffer e Esterson, 1982; Sotelo *et al.*, 1989).

A saturação de ozônio na água do tanque de incorporação, ocorreu em aproximadamente 40 min. Este tempo foi suficiente para que a concentração de ozônio dissolvido em água se estabilizasse em um volume de 500 L de água. Maiores valores de concentração de ozônio implicaram maiores concentrações de ozônio dissolvido em água. Resultados semelhantes foram encontrados por Galdeano *et al.* (2018) quando investigaram as concentrações e o tempo de saturação de ozônio na água em diferentes temperaturas e valores de pH. No estudo conduzido por estes autores, para a concentração inicial de ozônio igual a 22,3 mg L<sup>-1</sup> com pH igual a 6,0 e temperatura de 25°C, o tempo e a concentração de saturação foram iguais a 27,94 min e 5,26 mg L<sup>-1</sup>. O decaimento da concentração de ozônio na água observado neste estudo também foi dependente da concentração inicial de ozônio. Maiores valores de concentração inicial de ozônio implicaram em maiores tempos de meia-vida. Para a concentração de 15,77 mg L<sup>-1</sup>, o tempo de meia-vida foi de 30 min, resultado semelhante também foi encontrado por Ferreira *et al.* (2021) que avaliaram a cinética de decomposição do ozônio na água quando utilizaram uma concentração inicial de 13,0 mg L<sup>-1</sup>.

#### **4.2 Análise microbiológica do café cereja e café cereja descascado**

O café, assim como os demais produtos agrícolas, apresenta problemas de contaminação microbiológica (Bruyn *et al.*, 2017). Essas contaminações estão relacionadas ao método de colheita e processamento (Vilela *et al.*, 2010). A presença

destes microrganismos como fungos filamentosos pode promover a contaminação dos grãos de café por micotoxinas (Batista *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2024). Em um estudo conduzido por Akbar, Medina e Magah (2020) ficou evidente o potencial do gás ozônio no controle de fungos micotoxigênicos e na degradação de ocratoxina A em café armazenado. A proposta deste estudo foi determinar o potencial da água ozonizada em sistema de microbolhas na descontaminação microbiológica do café imediatamente após a colheita. Investigações científicas recentes têm demonstrado o grande potencial da água ozonizada em sistema de microbolhas na descontaminação microbiológica de produtos agrícolas (Hou *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2025).

Neste estudo, a água ozonizada em sistema de microbolhas teve um efeito significativo na redução das contagens de fungos filamentosos, leveduras e mesófilos aeróbios (Tabela 3). Foram observadas reduções mais expressivas nas contagens destes microrganismos em café cereja. Essas reduções mais expressivas podem estar relacionadas ao tempo de tratamento, à contaminação inicial das amostras e às características físicas dos dois tipos de café provenientes das duas formas de processamento, com e sem casca.

Os tempos de imersão em água ozonizada para o café cereja (0 a 180 min) foram superiores aos tempos de imersão do café cereja descascado (0 a 90 min). A contaminação nas amostras controle para fungos filamentosos e leveduras ( $7,42 \log \text{ UFC g}^{-1}$ ) e mesófilos ( $8,11 \log \text{ UFC g}^{-1}$ ) foi superior no café cereja em relação à contaminação do controle em café cereja descascado (Tabela 4). Esta diferença nas contagens do controle pode ser associada à remoção mecânica da casca do café-cereja descascado que possivelmente contribui para a redução da contaminação microbiológica. Além disso, foi observado que o café cereja descascado quando imerso em água liberou a mucilagem que envolve o endocarpo. Esta mucilagem é rica em proteínas (4 a 12%), lipídios (1 a 2 %), minerais (6 a 10 %) e carboidratos totais (45 a 89 %) (Franca e Oliveira, 2009; Klingel *et al.*, 2020). A presença desta mucilagem na água de imersão acelera a decomposição do ozônio, o que ajuda a explicar a menor redução observada nas contagens de fungos filamentosos, leveduras e mesófilos no café cereja descascado.

Um dos processos que vêm sendo estudados recentemente para melhoria da qualidade sensorial do café é a fermentação (Elhalis, Cox e Zhao, 2023). O processo de fermentação é facilitado pela presença de microrganismos, que compõem a microbiota natural dos frutos, e produzem enzimas que degradam a polpa do café. Entretanto, a microbiota natural dos frutos de café é composta por diferentes microrganismos (Silva *et*

*al.*, 2008; Vilela *et al.*, 2010; Waters, Moroni e Arendt, 2015; Bruyn *et al.*, 2017) como bactérias, leveduras e fungos filamentosos (*Penicillium*, *Cladosporium*, *Fusarium* e *Aspergillus*). Algumas espécies destes microrganismos podem ser deteriorantes e promover a redução da qualidade do café. Neste sentido, nos processos de fermentação é necessário que se realize o controle do tempo de fermentação e da população de microrganismos (Evangelista *et al.*, 2014). A população microbiana presente nos frutos de café e as condições de fermentação podem induzir a predominância de uma determinada espécie de microrganismo e afetar de forma decisiva a qualidade do produto. Dessa forma é de fundamental importância o desenvolvimento de estratégias, tais como, o uso da água ozonizada para o controle de microrganismos nos frutos de café de forma a garantir uma melhor performance da fermentação e em processos de secagem a baixas temperaturas.

### **4.3 Análise de qualidade do café cereja descascado e do café cereja**

#### *4.3.1 Análise Sensorial*

Os resultados obtidos na análise sensorial (Tabela 6) evidenciam que, apesar do ozônio ser um forte agente oxidante (Karaca e Velioglu, 2007), o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio preservou a qualidade sensorial do café cereja descascado e do café cereja. Todas as amostras permaneceram com nota final superior a 80 pontos, sendo classificadas como cafés especiais (Lingle e Menon, 2017). Os tratamentos com microbolhas sem ozônio e com microbolhas de ozônio, pelos períodos estudados, de acordo com a análise sensorial, não promoveram a oxidação de compostos precursores de sabor e aroma. Além disso, ressalta-se que o café cereja descascado não possui a proteção da casca do fruto e, mesmo assim, não apresentou alterações sensoriais que viessem a prejudicar a bebida.

Na análise sensorial, foi observada uma alteração significativa apenas na acidez do café cereja. A maior intensidade de acidez ocorreu no tratamento com imersão por 120 min em água com microbolhas de ozônio. Apesar de apresentar diferença estatística, o aumento na acidez não provocou diferença significativa na pontuação final do café. Além disso, vale ressaltar que os tratamentos que tiveram as maiores notas finais foram aqueles que apresentaram maiores valores de acidez em que foi feita a imersão do café cereja em água com microbolhas de ozônio por 60 e 120 min (Tabela 6). Para café especial, mesmo

não sendo observadas diferenças estatísticas, o aumento de um ponto na nota final do café implica maior valor comercial dos grãos.

Alguns estudos demonstram que o café durante o armazenamento está sujeito às alterações químicas ligadas diretamente ao processo de respiração e a outros processos oxidativos (Borém *et al.*, 2021, Borém *et al.*, 2019b). A intensidade em que ocorrem estas alterações químicas nos grãos de café depende do tipo de processamento, da qualidade inicial do café, do tipo de embalagens utilizadas no armazenamento, da umidade relativa e temperatura do ambiente de armazenagem (Borém *et al.*, 2023a; Borém *et al.*, 2021). Entre as alterações químicas que podem ocorrer, destaca-se a oxidação de carboidratos, proteínas e lipídeos (Borém *et al.*, 2021; Borém *et al.*, 2019b). A oxidação lipídica tem sido apontada como um dos principais motivos para o envelhecimento dos grãos de café e para a presença de sabores como papelão, papel e colheita passada na análise sensorial (Borém *et al.*, 2021). A preservação da qualidade sensorial do café é um forte indicativo de que o tratamento com imersão em água ozonizada não provocou alterações químicas nos grãos.

#### 4.3.2 Cor

As alterações significativas observadas para diferença de cor no café cereja descascado e no café cereja imediatamente após os tratamentos (Tabela 8) foram maiores que os valores de diferença de cor observados para o café após a secagem. Os valores de diferença de cor variaram de 7,01 a 8,36 para o café cereja descascado e de 7,23 a 10,19 para o café cereja imediatamente após os tratamentos (Tabela 8). Os valores de diferença de cor para o café cereja descascado após a secagem variaram de 1,73 a 3,56 para café cereja e após a secagem variaram de 2,43 a 2,98. Valores de diferença de cor superiores a 3 já implicam uma diferença de cor que pode ser perceptível ao olho humano (Altmann *et al.*, 2022). Os resultados obtidos para diferença de cor neste estudo (Tabela 8) mostram que o efeito dos tratamentos foi mais pronunciado imediatamente após a imersão do café em água com microbolhas sem ozônio e em água com microbolhas de ozônio. No café cereja descascado, os maiores valores de tonalidade de cor foram observados imediatamente após os tratamentos com imersão do café em água com microbolhas de ozônio. Possivelmente essas alterações estão associadas ao efeito da remoção da mucilagem que envolve os grãos nos tratamentos de imersão.

No tratamento com imersão de café cereja em água com microbolhas de ozônio por 180 min observou-se uma redução significativa na saturação de cor (Tabela 8).

Possivelmente o ozônio dissolvido em água ocasionou a oxidação de alguns pigmentos presentes na casca do café. Este mesmo comportamento já foi observado em outros estudos feitos com castanha (Freitas-Silva, Moraes-Valle e Venâncio, 2013; Ferreira *et al.*, 2021). Apesar de se observarem alterações significativas na saturação da cor da casca do café cereja, elas não apresentaram impacto na cor dos grãos após a secagem. Isto indica que o efeito imediato da oxidação de pigmentos da casca do fruto não influencia na cor dos grãos após secagem, beneficiamento e armazenamento. A saturação de cor do café cereja descascado após a secagem, apesar de ter apresentado diferença estatística entre os tratamentos, o maior período de imersão em água ozonizada foi estatisticamente igual ao do controle. É de fundamental importância o desenvolvimento de tecnologias pós-colheita que não provoquem alteração na cor do café. A qualidade da bebida do café está muito relacionada à cor do grão e alterações indesejáveis podem levar à depreciação de um determinado lote de café (Coraldi, Borém e Oliveira, 2008; Borém *et al.*, 2013).

#### 4.3.3 Quantidade de defeitos e teor de água

Foram observadas diferenças significativas nos defeitos apenas do café cereja descascado para grãos verdes, ardidos e quebrados (Tabela 10). Os defeitos verdes estão relacionados à maturação desuniforme do café, de acordo com o 4º Levantamento de Safra feito pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), houve um elevado percentual de cafés verdes na safra de 2024 (CONAB, 2025). O café utilizado no experimento é proveniente de uma lavoura na qual não foi utilizado nenhum tipo de maturador nos pés de café. A passagem pelo descascador mecânico permitiu realizar a separação dos frutos verdes, porém esta separação não foi totalmente eficiente, o que pode explicar a presença deste tipo de defeito nas amostras. A presença de grãos quebrados pode estar relacionada à regulagem da máquina utilizada no descascamento e ao teor de água dos grãos. O café cereja descascado apresentou menores valores de teor de água em relação ao café cereja (Tabela 10). Grãos mais secos são mais suscetíveis a danos mecânicos, dessa forma, sugere-se que a própria máquina pode ter sido responsável pela quebra dos grãos no momento da operação de beneficiamento (Brighenti e Cirilo, 2018).

Segundo a Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003, os grãos “ardidos” são aqueles inteiros ou pedaços de grãos que apresentam cor marrom como sendo sua coloração predominante, podendo ser marrom claro ou escuro (vários tons). Esses tons de marrons são provenientes de processos fermentativos. A fermentação é um processo metabólico facilitado pela presença de microrganismos presentes na microbiota natural

dos frutos de café (Silva *et al.*, 2008). Neste estudo, observou-se que o tratamento com imersão do café cereja descascado por 60 min em água com microbolhas de ozônio apresentou o maior número de grãos ardidos (Tabela 11). Entretanto, é importante ressaltar que o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio pelo maior tempo (90 minutos), apresentou o menor número de grãos ardidos. Isto é um indicativo de que os tratamentos não foram responsáveis pela fermentação indesejada e que a presença dos grãos ardidos pode estar relacionada à heterogeneidade da amostra, visto que as fermentações destes frutos podem ter ocorrido na lavoura ou até mesmo no transporte.

#### 4.4 Análise físico-química da água do processo de imersão do café

As análises físico-químicas da água feitas durante o processo de imersão do café foram a condutividade elétrica, pH, e potencial redox. A condutividade elétrica de uma solução mede a capacidade dessa solução de conduzir corrente elétrica e está diretamente relacionada à presença de íons em solução (Gupta e Paul, 2013; Bhateria e Jain, 2016). Neste estudo, ficou evidente que a condutividade elétrica da água de imersão do café cereja descascado com microbolhas sem ozônio e microbolhas com ozônio reduziu durante o tratamento. A redução mais expressiva ocorreu no tratamento com microbolhas de ozônio, como evidenciado pelo coeficiente angular (1,95) da equação ajustada (Tabela 11). A imersão do café cereja descascado em água faz com que ocorra a liberação da mucilagem na água, o que explica os maiores valores de condutividade elétrica em relação à água de imersão do café cereja. A água de imersão do café cereja apresentou menores valores de condutividade elétrica, uma vez que a casca do café que envolve o fruto limita a liberação da mucilagem na água de imersão.

O potencial redox é o indicativo da capacidade oxidante da água (Linnk *et al.*, 2023). Portanto, maior valor de potencial redox, implica em maior potencial de oxidação da água. Os valores de potencial redox para águas superficiais estão em torno de 300 a 500 mV (Søndergaard, 2009). Neste estudo, o valor de potencial redox da água de imersão do café cereja descascado e do café cereja ficou entre 874,93 e 962,73 mV. Estes resultados estão próximos dos valores de potencial redox encontrados por Santos *et al.* (2024) em água destilada (1013 mV) e água mineral (1059 mV). Os valores médios de pH da água de imersão do café cereja descascado em microbolhas sem ozônio foram de 4,55 (Tabela 11). Os valores de pH para águas residuárias de café reportados na literatura são de 3,88 a 4,21 devido à presença de ácidos orgânicos presentes na casca e na

mucilagem do café (Selvamurugan *et al.*, 2010; Rattan *et al.*, 2015). No tratamento com imersão do café cereja descascado em água com microbolhas de ozônio observou-se um aumento dos valores de pH (Tabela 11). Este aumento pode estar relacionado ao potencial do ozônio na degradação dos ácidos orgânicos presentes na água.

A DBO se refere à quantidade de oxigênio dissolvido que é consumido por microrganismos para decompor a matéria orgânica de uma determinada água residuária. Quanto maiores os valores de DBO para uma água residuária, maior será o potencial dessa água em poluir um determinado curso d'água limitando a quantidade de oxigênio dissolvido para outros organismos (Bhateria e Jain, 2016). De acordo com a Deliberação Normativa COPAM-CERH/MG nº 8, de 21 de novembro de 2022, o limite máximo permitido para DBO e DQO é de 60 e 180 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. Neste estudo, a redução mais expressiva nos valores de DBO e DQO ocorreu na água de imersão do tratamento de café cereja descascado, registrando-se valores médios de 46,63 ± 1,62 e 93,43 ± 3,91 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, que atendem aos limites estabelecidos. Além da redução observada nos valores de DBO e DQO, observou-se também a redução nos valores de turbidez. A turbidez está relacionada à resistência que a água oferece à passagem de luz em função das partículas em suspensão.

Cada vez mais têm aumentado as pesquisas sobre processos produtivos mais sustentáveis que limitem a geração de efluentes (Sengupta *et al.*, 2020). Dentro deste contexto, fica evidente o potencial do ozônio no tratamento da água resultante da sanitização do café e abre possibilidades para o reuso dessa água, inclusive em outras etapas do processamento do café.

A utilização da água ozonizada em sistema de microbolhas para descontaminação microbiológica de café antes da secagem caracteriza-se como uma tecnologia promissora. Esta estratégia de tratamento contribui para a produção de lotes de cafés com qualidade de bebida e com segurança alimentar. O processo de tratamento do café com água ozonizada futuramente pode ser associado à fermentação. Um dos grandes desafios do processo de fermentação é produzir lotes de café com qualidade padronizada. A boa performance do processo fermentativo é assegurada quando se tem o controle do grupo de microrganismos presentes no meio. Nesse sentido, sugere-se que o uso da água ozonizada na descontaminação microbiológica do café poderá garantir um maior controle da população inicial de microrganismos em um processo de fermentação.

## 5. CONCLUSÃO

As porcentagens de incorporação de ozônio na água não apresentaram grandes diferenças em relação à concentração inicial de gás ozônio. Entretanto, os tempos de meia-vida do ozônio na água foram influenciados pela concentração inicial. Maiores valores de concentração inicial de ozônio resultaram em maiores tempos de meia-vida do gás ozônio na água. Os tratamentos com imersão em água com microbolhas sem ozônio e água com microbolhas de ozônio mostraram-se eficazes na redução das contagens de fungos filamentosos, leveduras e bactérias mesófilas. Estas reduções foram mais expressivas nos tratamentos com microbolhas de ozônio. Os resultados obtidos nas análises de qualidade evidenciaram que o tratamento com imersão em água com microbolhas de ozônio preservou a qualidade sensorial do café cereja descascado e café cereja. Além de preservar a qualidade sensorial, a incorporação de ozônio na água em sistema de microbolhas apresenta um grande potencial no tratamento da água resultante do processo de imersão do café.

## REFERÊNCIAS

- AKBAR, A.; MEDINA, A.; MAGAN, N. Potential control of mycotoxigenic fungi and ochratoxin A in stored coffee using gaseous ozone treatment. **Microorganisms**, 8(10), 1462, 2020.
- ALTMANN, B. A.; GERTHEISS, J.; TOMASEVIC, I.; ENGELKES, C.; GLAESENER, T.; MEYER, J.; SCHÄFER, A.; WIESEN, R.; MÖRLEIN, D. Human perception of color differences using computer vision system measurements of raw pork loin. **Meat Science**, 188, 108766, 2022.
- APHA. Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater, 22nd Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC. 2012.
- ASLAM, R.; ALAM, M. S.; SAEED, P. A. Sanitization Potential of Ozone and Its Role in Postharvest Quality Management of Fruits and Vegetables. **Food Engineering Reviews**, v. 12, p. 48–67, 2020.
- BAQUERO-RODRÍGUEZ, G. A.; LARA-BORRERO, J. A.; NOLASCO, D.; ROSSO, D. A Critical Review of the Factors Affecting Modeling Oxygen Transfer by Fine-Pore Diffusers in Activated Sludge. **Water environment research**, 90(5), p. 431-441, 2018.
- BATISTA, L. R.; CHALFOUN, S. M.; SILVA, C. F.; CIRILLO, M.; VARGA, E. A.; SCHWAN, R. F. Ochratoxin A in coffee beans (*Coffea arabica L.*) processed by dry and wet methods. **Food control**, 20(9), p. 784-790, 2009.
- BATISTA, L. R.; CHALFOUN, S. M. Incidência de Ocratoxina A em diferentes frações do café (*Coffea arabica L.*): bóia, mistura e variação após secagem em terreiros de terra, asfalto e cimento. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), Lavras, v. 31, n. 3, p. 804-813, maio/jun. 2007.
- BHATERIA, R.; JAIN, D. Water quality assessment of lake water: a review. **Sustainable water resources management**, 2, p. 161-173, 2016.
- BORÉM, F. M.; ABREU, G. F.; ALVES, A. P. C.; SANTOS, C. M.; TEIXEIRA, D. E. Volatile compounds indicating latent damage to sensory attributes in coffee stored in permeable and hermetic packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, 29, 100705, 2021.
- BORÉM, F. M.; ANDRADE, F. T.; SANTOS, C. M.; ALVES, A. P. C.; MATIAS, G. C.; TEIXEIRA, D. E.; OSSANI, P. C.; CIRILO, M. A. Quality of specialty natural coffee stored in different packages in Brazil and abroad. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 4, p. 455-466, Oct./Dec. 2019a.
- BORÉM, F. M.; MATIAS, G. C.; ALVES, A. P. C.; HAEBERLIN, L.; SANTOS, C. M.; ROSA, S. D. V. F. Effect of storage conditions on the chemical and sensory quality of pulped natural coffee. **Journal of Stored Products Research**, 104, 102183, 2023a.

- BORÉM, F. M.; NOBRE, G. W.; FERNANDES, S. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; OLIVEIRA, P. D. Avaliação sensorial do café cereja descascado, armazenado sob atmosfera artificial e convencional. **Ciência e Agrotecnologia** (UFLA), Lavras, v. 32, p. 1724-1729, 2008.
- BORÉM, F. M.; RIBEIRO, F. C.; FIGUEIREDO, L. P.; GIOMO, G. S.; FORTUNATO, V. A.; ISQUIERDO, E. P. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. **Journal of Stored Products Research**, v. 52, p. 1-6, 2013.
- BORÉM, F. M.; RIBEIRO, F. C.; FIGUEIREDO, L. P.; GIOMO, G. S.; SIQUEIRA, V. C.; DIAS, C. A. Sensory analysis and fatty acid profile of specialty coffees stored in different packages. **J Food Sci Technol**, 56(9), 4101-4109, Sep 2019b.
- BOTONDI, R.; BARONE, M.; GRASSO, C. A review into the effectiveness of ozone technology for improving the safety and preserving the quality of fresh-cut fruits and vegetables. **Foods**, 10(4), 748, 2021.
- BRAZIL SPECIALTY COFFEE ASSOCIATION (BSCA) - 2021. Disponível em: <<https://www.bsca.com.br/index/home>>. Acesso em: 5 ago. 2024.
- BRIGHENTI, C. R. G.; CIRILO, M. A. Analysis of defects in coffee beans compared to biplots for simultaneous tables. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 1, p. 62-69, jan-mar, 2018.
- BRUYN, F.; ZHANG, S. J.; POTHAKOS, V.; TORRES, J.; LAMBOT, C.; MORONI, A. V.; CALLANAN, M.; SYBESMA, W.; WECKX, S.; DE VUYST, L. Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. **Applied and environmental microbiology**, 83(1), e02398-16, 2017.
- BYUN, K. H.; PARK, S. Y.; LEE, D. U.; CHUN, H. S.; HA, S. D. Effect of UV-C irradiation on inactivation of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus* and quality parameters of roasted coffee bean (*Coffea Arabica L.*). **Food Additives & Contaminants: Part A**, 37(3), p. 507-518, 2020.
- CABRAL, K. C.; SILVA, S. B.; SILVA, P. R. S.; HANSEN, É.; SILVA, J.; BROCHIER, B. Kinetic Modeling of *Escherichia coli* Inactivation by Ozone Mist. **Ozone: Science & Engineering**, p. 1-14, 2023.
- CASAS-JUNCO, P. P.; SOLÍS-PACHECO, J. R.; RAGAZZO-SÁNCHEZ, J. A.; AGUILAR-USCANGA, B. R.; BAUTISTA-ROSALES, P. U.; CALDERÓN-SANTOYO, M. Cold plasma treatment as an alternative for ochratoxin a detoxification and inhibition of mycotoxigenic fungi in roasted coffee. **Toxins**, 11(6), 337, 2019.
- CHEN, H. L.; CHOU, S. K.; ARCEGA, R. D.; HOU, C. Y.; WU, J. S.; LIU, C. T.; Hsiao, C. P. HUNG, L. Y.; LIN, C. M. Inactivation of *Salmonella Typhimurium* on mung bean seeds by combined application of microbubbles and disinfections and its effect on sprouting. **Food Control**, 167, 110767, 2025.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de café, 2024. Brasília, DF, v. 11, n. 4, jan. 2025.

CORALDI, P. C.; BORÉM, F. M.; OLIVEIRA, J. A. Qualidade do café natural e despulpado após diferentes tipos de secagem e armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.12, n.2, p.181–188, 2008.

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

EVANGELISTA, S. R.; SILVA, C. F.; CRUZ MIGUEL, M. G. P.; SOUZA CORDEIRO, C.; PINHEIRO, A. C. M.; DUARTE, W. F.; SCHWAN, R. F. Improvement of coffee beverage quality by using selected yeast strains during the fermentation in dry process. **Food Research International**, 61, p. 183-195, 2014.  
FERREIRA, G. F. P.; NOVAES, Q. S.; BATISTA, I. R.; SOUZA, S. E.; AZEVEDO, G. B.; SILVA, D. N. Fungos beneficiados no sudoeste da Bahia. **Summa Phytopathologica**, v. 37, n. 3, p. 98-102, 2011.

FERREIRA, W. F. D. S.; ALENCAR, E. R.; BLUM, L. E. B.; FERREIRA, M. D. A.; MENDONÇA, M. A.; RACANICCI, A. M. C.; URRUCHI, W. M. I. Ozonation of Brazil nuts in aqueous media at different pH levels: ozone decomposition, *Aspergillus flavus* inactivation, and effects on nut color and crude oil lipid profile. **Ozone: Science & Engineering**, 43(4), p. 351-362, 2021.

FERREIRA, W. F. S. F.; ALENCAR, E. R.; ALVES, H.; RIBEIRO, J. L.; SILVA, C. R. Influence of pH on the efficacy of ozonated water to control microorganisms and its effect on the quality of stored strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 41, n. 6, p. 692-700, 2017.

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Coffee processing solid wastes: current uses and future perspectives. **Agricultural wastes**, 9, 155-189, 2009.

FREITAS-SILVA, O.; MORALES-VALLE, H.; VENÂNCIO, A. Potential of aqueous ozone to control aflatoxigenic fungi in Brazil nuts. **International Scholarly Research Notices**, 2013(1), 859830, 2013.

GALDEANO, M. C.; WILHELM, A. E.; GOULART, I. B.; TONON, R. V.; FREITAS-SILVA, O.; GERMANI, R.; CHÁVEZ, D. W. H. Effect of water temperature and pH on the concentration and time of ozone saturation. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 21, e2017156, 2018.

GARDONI, D.; VAILTI, A.; CANZIAN, R. Decay of ozone in water: a review. **Ozone: Science & Engineering**, 34(4), p. 233-242, 2012.

GUPTA, T.; PAUL, M. The seasonal variation in ionic composition of pond water of Lumding, Assam, India. **Current World Environment**, 8(1), 127-131, 2013.

HAFEEZ, A.; JAVED, F.; FAZAL, T.; SHEZAD, N.; UR REHMAN, M. S.; REHMAN, F. Intensification of ozone generation and degradation of azo dye in non-

thermal hybrid corona-DBD plasma micro-reactor. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, 159, p. 108-205, 2021.

HAILE, M.; KANG, W. H. The Role of Microbes in Coffee Fermentation and Their Impact on Coffee Quality. **Journal of Food Quality**, 4836709, 2019.

HASHIMOTO, K.; KUBOTA, N.; OKUDA, T.; NAKAI, S.; NISHIJIMA, W.; Motoshige, H. Reduction of ozone dosage by using ozone in ultrafine bubbles to reduce sludge volume. **Chemosphere**, 274, 129922, 2021.

HOU, C-Y; CHEN, Y-R; WU, J-S; CHEN, H-L; HSIANO, C-P; LIU, C-T; LIN, C-M. Antibacterial efficacy and physicochemical effects of ozone microbubble water on tomato. **Sustainability**, 14, 6549, 2022.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION-ISO 21527-1/2008.

Microbiology of food and animal feeding stuffs. Horizontal method for the enumeration of yeasts and molds. Part 1: Colony count technique in products with water activity greater than 0,95. 2008. Disponível em:

<<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38275/8c4a207b2cd043c3b21a766b89543be1/ISO-21527-1-2008.pdf>> Acesso em: 25/06/2025.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION-ISO 21527-2/2008.

Microbiology of food and animal feeding stuffs. Horizontal method for the enumeration of yeasts and molds. Part 2: Colony count technique in products with water activity greater than 0,95. 2008. Disponível em:

<<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38276/6bf5f40cda7d440ba7327042cf800899/ISO-21527-2-2008.pdf>> Acesso em: 25/06/2025.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION-ISO 4833-1/2013. Microbiology of the food chain. Horizontal method for the enumeration of micro-organisms. Part 1: Colony count at 30 degrees C by the pour plate technique. 2013. Disponível em:

<<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/53728/1ef93e071e0e4b0da3f4cba045d92c1d/ISO-4833-1-2013.pdf>> Acesso em: 25/06/2025.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION-ISO 6887-1/1999; Microbiology of Food and Animal Feeding Stuffs - Preparation of Test Samples, Initial Suspension and Decimal Dilutions for Microbiological Examination. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1999. Disponível em:

<<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/26850/ede9dca9b457404388bb34d2ab341d68/ISO-6887-1-1999.pdf>> Acesso em: 25/06/2025.

JOHN, A.; BROOKES, A.; CARRA, I.; JEFFERSON, B.; JARVIS, P. Understanding the difference between the nano and micro bubble size distributions generated by a regenerative turbine microbubble generator using ozone. **Journal of Water Process Engineering**, 70, 106963, 2025.

KARACA, H.; VELIOGLU, Y. S. Ozone applications in fruit and vegetable processing. **Food Reviews International**, v. 23, n. 1, p. 91-106, 2007.

- KHADRE, M. A.; YOUSEF, A. E.; KIM, J. G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. **Journal of Food Science**, 66, p. 1242-1252, 2001.
- KHUNTIA, S; MAJUMDER, S. K.; GHOSH, P. Microbubble-aided water and wastewater purification: a review. **Reviews in Chemical Engineering**, v. 28, n. 4-6, p. 191-221, 2012.
- KLINGEL, T.; KREMER, J. I.; GOTTSTEIN, V.; REZENDE, T. R.; SCHWARZ, S.; LACHENMEIER, D. W. A review of coffee by-products including leaf, flower, cherry, husk, silver skin, and spent grounds as novel foods within the European Union. **Foods**, 21 (9), 665, May 2020.
- LEE, H.; KIM, N.; RYU, J. H.; KIM, H. Inactivation of *Aspergillus flavus* on green coffee beans by treatments with organic acid vapor. **Food Control**, 160, 110322, 2024.
- LEE, H.; RYU, J. H.; KIM, H. Antimicrobial activity of gaseous chlorine dioxide against *Aspergillus flavus* on green coffee beans. **Food microbiology**, 86, 103308, 2020.
- LINGLE, T. R. **Manual do degustador de café**. 4<sup>a</sup> ed. Long Beach, California: Specialty Coffee Association of America, 2011.
- LINGLE, T. R.; MENON, S. N. Cupping and grading - discovering character and quality. In: FOLMER, B. (Ed.). *The Craft and Science of Coffee*. Academic Press, 2017, cap. 8, p. 181-203.
- LINNIK, P.; OSADCHYI, V.; OSADCHA, N.; LINNIK, R. Redox potential as an important characteristic of the chemical and biological state of surface waters. **Chemistry and Ecology**, 39(6), p. 640-672, 2023.
- LIVRAMENTO, K. G.; BORÉM, F. M.; JOSÉ, A. C.; SANTOS, A. V.; LIVRAMENTO, D. E.; ALVES, J. D.; PAIVA, L. V. Proteomic analysis of coffee grains exposed to different drying processes. **Food Chemistry**. n. 221, p. 1874-1882, 2017.
- MCCLURKIN, J. D.; MAIER, D. E.; ILELEJI, K. E. Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. **Journal of Stored Products Research**, 55, p. 41-47, 2013.
- NAKAYAMA, C.C.; TEIXEIRA, A.A.; TEIXEIRA, R. R.; REIS, M.; MONTEIRO, A.; BUENO, J. Sucessão de microrganismos em diferentes estádios de secagem do café e sua influência na bebida. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 2402-2418, Jan. 2020.
- OUESLATI, S.; YAKHLEF, S. B.; VILA-DONAT, P.; PALLARÉS, N.; FERRER, E.; BARBA, F. J.; BERRADA, H. Multi-mycotoxin determination in coffee beans marketed in Tunisia and the associated dietary exposure assessment. **Food Control**, 140, p. 109-127, 2022.

PANDISELVAM, R.; SINGH, A.; AGRIOPOULOU, S.; SACHADYN-KROL, M.; Aslam, R.; LIMA, C. M. G.; KHANASHYAM, A. C.; KOTHAKOTA, A.; ATAKAN, O.; KUMARJ, M.; MATHANGHI, S. K. K.; KHANEGHAH, A. A comprehensive review of the impacts of ozone treatment on textural properties in different food products. **Trends in Food Science & Technology**, n. 127, p. 74–86, 2022.

PANDISELVAM, R.; SUBHASHINI, S.; BANUU PRIYA, E. P.; KOTHAKOTA, A.; RAMESH, S. V.; SHAHIR, S. Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety. **Ozone: Science & Engineering**, 41, p. 17-34, 2019.

PEREIRA, L. L.; GUARÇONI, R. C.; PINHEIRO, P. F. OSÓRIO, V. M.; PINHEIRO, C. A.; MOREIRA, T. R.; SCHENGBER, C. New propositions about coffee wet processing: chemical and sensory perspectives. **Food Chem**, 310: 125943, 2020.  
PIMENTA, C. J. Introdução. In: PIMENTA, C. J. **Qualidade do Café**. Lavras (MG): Editora da UFLA, 2003, p. 9-11.

PREMJIT, Y.; SRUTHI, N. U.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A. Aqueous ozone: Chemistry, physiochemical properties, microbial inactivation, factors influencing antimicrobial effectiveness, and application in food. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 21(2), p. 1054-1085, 2022.

RAKNESS, K.; GORDON, G.; LANGLAIS, B.; MASSCHELEIN, W.; MATSUMOTO, N.; RICHARD, Y.; ROBSON, C. M.; SOMIYA, I. Guideline for measurement of ozone concentration in the process gas from an ozone generator. **Ozone: Science & Engineering**, v. 18, p. 209–229, 1996.

RATTAN, S.; PARANDE, A. K.; NAGARAJU, V. D., GHIWARI, G. K. A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. **Environmental Science and Pollution Research**, 22, p. 6461-6472, 2015.  
SAEG. Sistema para Análises Estatísticas, 9.1. Fundação Arthur Bernardes, UFV-Viçosa (MG), 2007. Disponível em: <http://www.ufv.br/saeg/>. Acesso em: 1 nov. 2024.

SANTOS, T. M., LOPES, M. E. T., ALENCAR, E. R., SILVA, M. V. D. A., MACHADO, S. G. Ozonized water as a promising strategy to remove biofilm formed by *Pseudomonas* spp. on polyethylene and polystyrene surfaces. **Biofouling**, p. 1-13, 2024.

SELVAMURUGAN, M., DORAISAMY, P., MAHESWARI, M., NANDAKUMAR, N. B. High rate anaerobic treatment of coffee processing wastewater using upflow anaerobic hybrid reactor. **Iran. J. Environ. Health. Sci. Eng.**, 2010, vol. 7, n. 2, p. 129-136, 2010.

SENGUPTA, B.; PRIYADARSHINEE, R.; ROY, A.; BANERJEE, A., MALAVIYA, A.; SINGHA, S.; MANDAL, T.; KUMAR, A. Toward sustainable and eco-friendly production of coffee: abatement of wastewater and evaluation of its potential valorization. **Clean Technologies and Environmental Policy**, 22, p. 995-1014, 2020.

SHEFFER, S., ESTERSON, G. L. Mass transfer and reaction kinetics in the ozone/tap water system. **Water Research**, 16(4), p. 383-389, 1982.

SIGMAPLOT 14.5. Disponível em: <https://www.alfasoft.com/files/sigmaplot145.exe>. Acesso em: 10 nov. 2024.

SILVA, C. F.; BATISTA, L. R.; ABREU, L. M.; DIAS, E. S.; SCHWAN, R. F. Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica* L.) fermentation. **Food microbiology**, 25(8), 951-957, 2008.

SILVA, C. F.; SCHWAN, R. F.; DIAS, E. S.; WEALS, A. E. Microbial diversity during maturation and natural processing of coffee cherries of *Coffea Arabica* L. In: **Brazil. International Journal of Food Microbiology**, v. 60, p. 251–260, 2000.

SILVA, M. J.; ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. A.; SILVA, M.A.; MAGALHÃES, C. G.; HENRIQUE, A.; RIBEIRO, S.; MACHADO, S. G.; RIBEIRO, W. S.; MACHADO, S. G. Post-harvest quality of lettuce treated with ozonised water in a microbubble system. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, p. 1-18, 2024.

SØNDERGAARD, M. Redox potential. In: **Encyclopedia of inland waters**. Pergamon Press, 2009, p. 852-859.

SOTELO, J. L.; BELTRAN, F. J.; BENITEZ, F. J.; BELTRAN-HEREDIA, J. Henry's law constant for the ozone-water system. **Water research**, 23(10), p. 1239-1246, 1989.

UZOMA, S.; ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D.; SILVA, M. V. A.; PIEDADE, E.; SITEO, E.; PANDISELVAM, R.; MACHADO, S. G. Association between low-temperature drying and ozonation processes to control pests and preserve maize quality. **Food Control**, n. 156, 110119, 2024.

VILELA, D. M.; PEREIRA, G. V. D. M.; SILVA, C. F.; BATISTA, L. R.; SCHWAN, R. F. Molecular ecology and polyphasic characterization of the microbiota associated with semi-dry processed coffee (*Coffea Arabica* L.). **Food Microbiology**, 27(8), p. 1128-1135, 2010.

WATERS, D. M.; MORONI, A. V.; ARENDT, E. K. Biochemistry, germination and microflora associated with *Coffea Arabica* and *Coffea Canephora* green coffee beans. **Critical reviews in food science and nutrition**, 57(2), p. 1-51, 2015.

WEI, C.; ZHANG, F.; HU, Y.; FENG, C.; WU, H. Ozonation in water treatment: the generation, basic properties of ozone and its practical application. **Rev Chem Eng**. 33(1), 49–89, 2017.

WORKU, M.; ASTATKIE, T.; BOECKY, P. Quality and biochemical composition of Ethiopian coffee varied with growing region and locality. **Journal of Food Composition and Analysis**, n. 115, 105015, 2023.

WRIGHT, M. R. **Introduction to chemical kinetics**. John Wiley & Sons, 2005.

ZHOU, H.; SMITH, D. W. Ozone mass transfer in water and wastewater treatment: Experimental observations using a 2D laser particle dynamics analyzer. **Water research**, 34(3), p. 909-921, 2000.