

A química e o perfil sensorial de *Coffea arabica* em sistema biodinâmico

The chemistry and sensorial profile of *Coffea arabica* in biodynamic system

La química y el perfil sensorial de *Coffea arabica* en sistema biodinámico

DOI: 10.54033/cadpedv22n7-109

Originals received: 4/2/2025

Acceptance for publication: 4/25/2025

Bruna Lopes Caon

Mestra em Agroecologia

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Endereço: Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: brunaroots47@gmail.com

Poliany de Oliveira Barbosa

Doutora em Genética e Melhoramento

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias

Endereço: Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: polianybarbosa@gmail.com polianybarbosa@gmail.com

Taís Rizzo Moreira

Doutora em Ciências Florestais

Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira

Endereço: Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil

E-mail: taisr.moreira@hotmail.com

Rogério Carvalho Guarçoni

Doutor em Produção Vegetal

Instituição: Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, Agente de Desenvolvimento Rural, Pesquisa

Endereço: Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil

Email: rogerio.guarconi@gmail.com

Emanuele Catarina da Silva Oliveira

Doutora em Química

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus Vila Velha, Cordenadoria de Química Industrial, Universidade Federal do Espírito Santo

Endereço: Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: emanuele.oliveira@ifes.edu.br

Sávio da Silva Berilli

Doutor em Produção Vegetal

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Endereço: Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: savio.berilli@ifes.edu.br

Lucas Louzada Pereira

Doutor em Engenharia de Produção

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Endereço: Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: lucaslouzadapereira@gmail.com

Ana Paula Candido Gabriel Berilli

Doutora em Genética e Melhoramento de Plantas

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo

Endereço: Alegre, Espírito Santo, Brasil

E-mail: ana.berilli@ifes.edu.br

RESUMO

O Brasil é o maior produtor e exportador de café do mundo, com predominância de cultivos a pleno sol. Alternativas de manejo, como o sistema biodinâmico, que minimiza o uso de compostos sintéticos para adubação e controle fitossanitário tem se mostrado viáveis para a produção de cafés especiais e com maior conservação da biodiversidade. Assim, este estudo avaliou a influência de diferentes processos fermentativos em frutos de *Coffea arabica* Bourbon Amarelo, submetidos aos métodos Natural, Semi-dry, Washed e Yeast fermentation. Após fermentação, secagem e torra, foi realizada a análise sensorial segundo os protocolos da Specialty Coffee Association (SCA). Tanto a extração, caracterização e identificação dos compostos voláteis foram realizadas por microextração em fase sólida acoplada à cromatografia gasosa, permitindo a distinção entre os tratamentos. Como resultado, foi possível observar que os cafés processados pelo método Natural apresentaram maior pontuação sensorial, enquadrando-se como cafés especiais pela SCA. O tratamento Washed obteve o menor desempenho, seguido por Yeast fermentation e Semi-dry. Destaca-se que os resultados encontrados servem de auxílio para produtores na escolha de métodos pós-colheita que agreguem valor ao produto,

além de oferecer subsídios para investigações futuras sobre a interação entre fermentação e qualidade sensorial. Recomenda-se ainda que estudos futuros explorem a correlação entre compostos voláteis e a estabilidade sensorial ao longo do tempo, visto que fermentação já é um processo bem estabelecido.

Palavras-chave: Agricultura. Café Arábica. Qualidade de Bebida. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Brazil is the world's leading producer and exporter of coffee, with cultivation predominantly conducted under full sun exposure. Alternative management systems, such as biodynamic farming—which minimizes the use of synthetic inputs for fertilization and phytosanitary control—have proven viable for the production of specialty coffees while promoting greater biodiversity conservation. This study evaluated the influence of different fermentation processes on *Coffea arabica* var. Bourbon Amarelo fruits, subjected to Natural, Semi-dry, Washed, and Yeast fermentation methods. Following fermentation, drying, and roasting, sensory analyses were performed according to the protocols of the Specialty Coffee Association (SCA). The extraction, characterization, and identification of volatile compounds were carried out using solid-phase microextraction (SPME) coupled with gas chromatography (GC), enabling differentiation among the treatments. Results indicated that coffees processed via the Natural method achieved the highest sensory scores, qualifying as specialty coffees according to SCA standards. The Washed treatment showed the lowest performance, followed by Yeast fermentation and Semi-dry. These findings offer valuable guidance for producers in selecting post-harvest processing methods that add value to the final product and provide a basis for future research into the relationship between fermentation processes and sensory quality. Further studies are recommended to explore correlations between volatile compounds and sensory stability over time, considering that fermentation is already a well-established process.

Keywords: Agriculture. Arabica Coffee. Beverage Quality. Sustainability.

RESUMEN

Brasil es el mayor productor y exportador de café del mundo, con cultivos predominantemente a pleno sol. Alternativas de manejo, como el sistema biodinámico —que minimiza el uso de insumos sintéticos para la fertilización y el control fitosanitario— han demostrado ser viables para la producción de cafés especiales, además de favorecer una mayor conservación de la biodiversidad. Este estudio evaluó la influencia de diferentes procesos fermentativos en frutos de *Coffea arabica* var. Bourbon Amarillo, sometidos a los métodos Natural, Semi-seco, Lavado y Fermentación con levaduras. Tras la fermentación, el secado y el tueste, se realizó el análisis sensorial según los protocolos de la Specialty Coffee Association (SCA). La extracción, caracterización e identificación de los compuestos volátiles se llevó a cabo mediante microextracción en fase sólida (SPME) acoplada a cromatografía de gases (GC), lo que permitió distinguir entre los tratamientos. Los resultados mostraron que los cafés procesados mediante el método Natural obtuvieron las puntuaciones sensoriales más altas,

clasificándose como cafés especiales según los estándares de la SCA. El tratamiento Lavado presentó el rendimiento más bajo, seguido por la Fermentación con levaduras y el método Semi-seco. Estos hallazgos proporcionan orientación valiosa a los productores para la elección de métodos de poscosecha que agreguen valor al producto, además de ofrecer fundamentos para futuras investigaciones sobre la interacción entre la fermentación y la calidad sensorial. Se recomienda que estudios posteriores exploren la correlación entre los compuestos volátiles y la estabilidad sensorial a lo largo del tiempo, dado que la fermentación es un proceso ya bien establecido.

Palabras clave: Agricultura. *Coffea arabica*. Calidad de Bebida. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

Embora o café seja mundialmente reconhecido como uma cultura de sombra, no Brasil é cultivado em grande escala a pleno sol, sistema conhecido como cultivo convencional. Esse sistema tem sido questionado por seus efeitos na qualidade do solo e na dependência de insumos externos (Steiner, 2010), visto que o acúmulo de precursores químicos pode influenciar na qualidade sensorial da bebida (Vale *et al.*, 2014; D’Alessandra, 2015; Lemos *et al.* 2020). Assim, sistemas como a agricultura biodinâmica ganham destaque, pois defendem a não utilização de agrotóxicos e adubos químicos, produzindo alimentos com maior valor nutricional e energético para o consumidor (Steenbock, 2021).

A qualidade sensorial e a composição química do café estão vinculadas ao manejo da lavoura, pois sofrem interferências do local de cultivo, do relevo, do clima, das características genéticas da planta e não menos importante, dos processos de pós-colheita (Snarharum *et al.*, 2014; Da Mota *et al.*, 2020). Uma vez que as diferentes condições de processamento e fermentação dos grãos afetam tanto a composição quanto a atividade das comunidades microbianas, desencadeando interações bioquímicas, é possível observar que essas interações podem criar rotas metabólicas que contribuem com notas frutadas, florais, doces e outras características sensoriais desejáveis (De Bruyn *et al.*, 2016).

A determinação da qualidade sensorial da bebida é avaliada por degustadores treinados a fim de identificar as nuances, defeitos e diferenças de cada amostra (Pereira *et al.*, 2017a). Aliada à análise sensorial, a identificação de adulterações por meio da detecção de compostos voláteis (Ren *et al.*, 2018, Rey-Stolle *et al.*, 2022), pode contribuir para a determinação de uma “impressão digital” do café (Rodriguez *et al.*, 2020), diferenciando processos fermentativos em amostras de diferentes regiões.

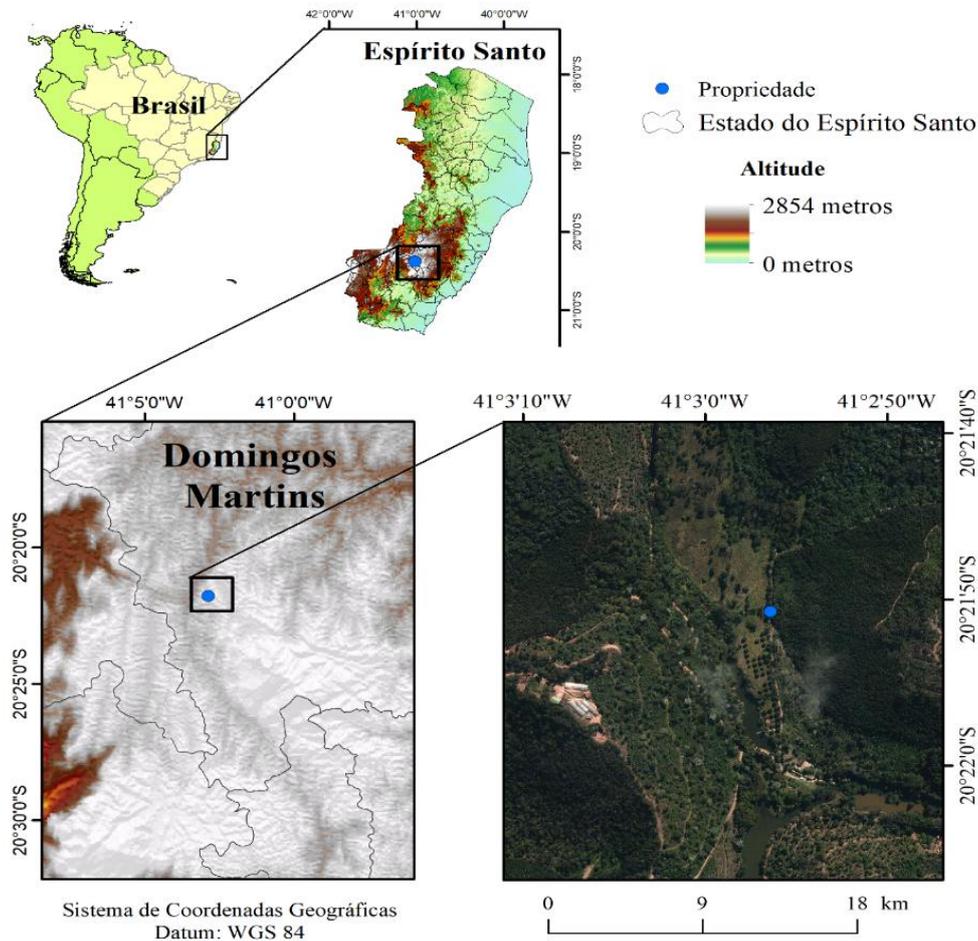
Aspecto importante, visto que nos últimos anos o mercado nacional tem apresentado um crescimento médio de 12% ao ano para o setor de cafés especiais em contraste com o aumento de apenas 2% no consumo de café *commodity*, que desencadeia uma crescente demanda em prol de processos contínuos de melhoria na qualidade da bebida (Giomo; Borém, 2011; Alves *et al.*, 2020).

Assim, este estudo investigou o manejo do café arábica Bourbon amarelo associado a diferentes tratamentos de fermentação, e analisou como esses processos influenciam na qualidade da bebida, em sistema biodinâmico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Fazenda Camocim localizada no município de Domingos Martins, região Serrana do Estado do Espírito Santo, Brasil. Com altitude aproximada de 1200 metros, com as coordenadas geográficas 20°21'50.6" Sul e 41°02'56.5" Oeste (Figura 1). Essa região apresenta temperatura média das máximas nos meses mais quentes entre 27,8°C e 30,7°C e a média das mínimas nos meses mais frios entre 9,4°C e 11,8°C, com precipitação média anual de 1298 mm (Seplan, 1999). A fazenda produz café em sistema agroflorestal, com espaçamento de 1,00 x 2,50 m. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com quatro tratamentos e cinco repetições.

Figura 1. Fazenda Camocin localizada no município de Domingos Martins, região Serrana do Estado do Espírito Santo, Brasil

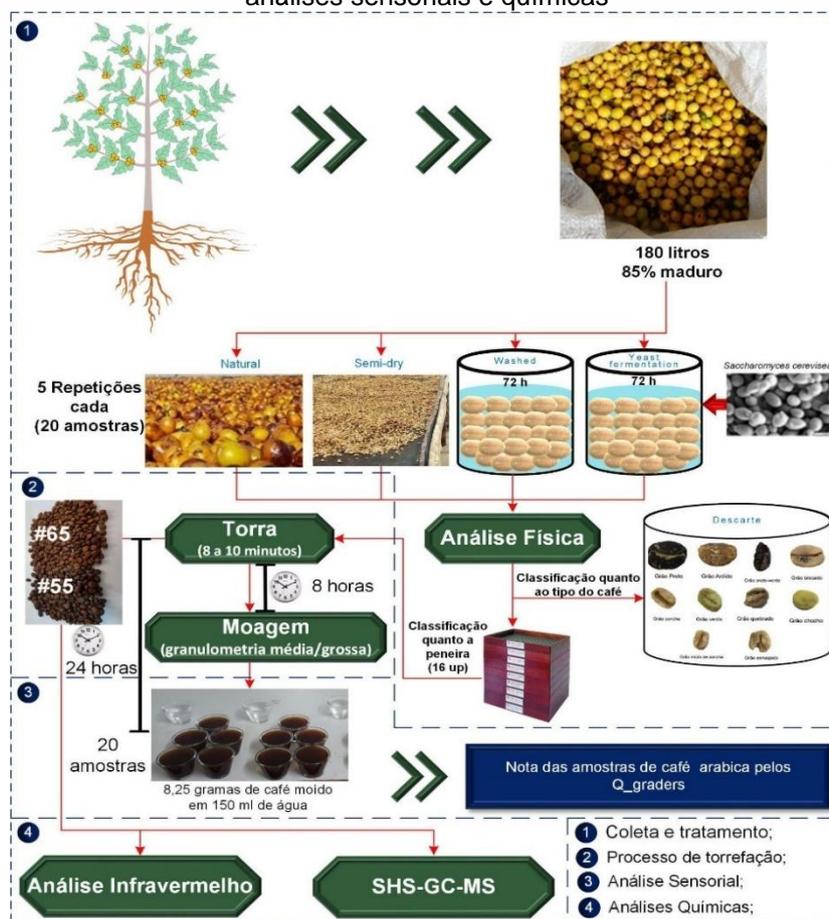


Fonte: Autoria própria.

Cada amostra foi obtida a partir da coleta de solo em cinco plantas, com cinco pontos amostrados ao redor de cada planta, localizados na projeção da copa (saia), dentro de uma área de um m² e a uma profundidade de 0 a 20 cm (Faoro *et al.*, 2010). O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2006).

Para a caracterização química do solo, as amostragens foram realizadas na mesma profundidade (0–20 cm), também na projeção da copa dos cafeeiros. As etapas metodológicas deste estudo estão esquematizadas na Figura 2.

Figura 2. Fluxograma das etapas de 1- coleta, 2- tratamento, 3- processo de torrefação, 4- análises sensoriais e químicas



Fonte: Autoria própria.

2.1 COLETA DOS FRUTOS E TRATAMENTOS

Os frutos foram coletados seletivamente, priorizando-se aqueles com aproximadamente 85% de maturação, considerando exclusivamente frutos ceveja. Após a colheita, os frutos foram encaminhados ao Laboratório de Análise e Pesquisa em Café (LAPC), do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) – Campus Venda Nova do Imigrante, para o processamento segundo metodologia adaptada de Pereira (2017b), conforme os seguintes tratamentos:

- Washed: café despulpado (18 L), submetido à fermentação anaeróbica em água por 72 horas;
- Yeast fermentation: café despulpado (18 L), submetido à fermentação anaeróbica em água com adição de levedura *Saccharomyces cerevisiae* por 72 horas;

- c) Semi-dry: café despulpado com mucilagem remanescente (18 L), conduzido à secagem em estufa após a remoção da casca;
- d) Natural: café em coco (com casca) – 18 L, conduzido diretamente à estufa após a separação dos frutos boa.

Nos tratamentos Washed e Yeast fermentation os grãos permaneceram imersos em tanques de fermentação sob condições anaeróbicas. Após o processamento, os grãos foram secos em terreiro suspenso até atingirem teor de umidade entre 11% e 12% (base úmida). Em seguida, os grãos foram classificados fisicamente, sendo selecionados apenas aqueles livres de defeitos e retidos na peneira 16 #UP para a etapa de torra, conforme os critérios da metodologia da *Specialty Coffee Association* (SCA) (SCA, 2008).

2.1.1 Processo de torrefação

O processo de torrefação foi realizado com base nos parâmetros estabelecidos pelo conjunto de discos Agtron-SCA, utilizando o disco #60 como referência padrão para o ponto de torra. As amostras foram torradas em um intervalo de 8 a 10 minutos, utilizando o torrador Probatino da marca Probat®, em conformidade com as recomendações da SCA. A definição dos perfis de torra foi baseada na variação do gradiente de temperatura por minuto, sendo o tempo de desenvolvimento da torra determinado pelo intervalo entre o primeiro *crack* e a retirada dos grãos do torrador (Giacalone *et al.*, 2019; Yang *et al.*, 2016). As amostras foram torradas com 24 horas de antecedência à análise sensorial.

2.1.2 Análise sensorial

A análise sensorial foi realizada no Laboratório de Pesquisa e Análise de Café (LAPC), seguindo as diretrizes estabelecidas pela SCA. Participaram da avaliação seis provadores certificados (*Q-Graders*) (Pereira *et al.*, 2018; SCAA, 2021). As amostras previamente moídas foram dispostas em cinco xícaras, cada uma contendo 8,25 gramas de café e 150 mL de água mineral aquecida a 93 °C (Machado, 2019). O protocolo sensorial da SCA contempla a avaliação de onze

atributos: fragrância/aroma, uniformidade, xícara limpa, doçura, sabor, acidez, corpo, retrogosto, equilíbrio, avaliação global (*overall*) e defeitos. A pontuação é atribuída em uma escala centesimal (Pereira *et al.*, 2016), sendo a nota final resultante da somatória dos escores dos atributos positivos e da subtração dos pontos atribuídos a defeitos.

2.1.3 Cromatografia gasosa

As amostras de café torrado de cada tratamento foram moídas em moinho *Bunn Coffee Mill* (modelo G3A HD), com granulometria ajustada para que 70–75% das partículas passassem por peneira de malha 0,074 mm, conforme o padrão US Standards. A análise dos compostos voláteis foi realizada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas com extração por *headspace* estático (SHS-GC-MS), conforme metodologia de Lyrio (2023). Para tanto, 3 g de café moído foram acondicionados em frascos *headspace* de 20 mL, selados com tampa metálica e septo de silicone, e aquecidos a 95 °C por 15 minutos no sistema de autoamostragem AOC-6000 Plus (Shimadzu, Japão). Uma alíquota de 1 mL da fase gasosa foi coletada com seringa aquecida a 100 °C e injetada no sistema GCMS QP2020 NX (Shimadzu, Japão). A separação foi realizada em coluna capilar SH-WAX (30 m × 0,25 mm × 0,25 µm), com hélio como gás de arraste (1,5 mL/min). O injetor operou a 240 °C, em modo *split* (razão 5:1). O programa de aquecimento da coluna iniciou em 40 °C, com elevação de 4 °C/min até 120 °C e, em seguida, 10 °C/min até 230 °C, mantida por 8 minutos.

Os dados cromatográficos foram processados no software LabSolutions GCMS (versão 4.20, Shimadzu), e os resultados expressos como áreas relativas dos compostos identificados. Foram utilizados os cromatogramas de íons totais (TIC) e, quando necessário, os cromatogramas de íons extraídos (EIC) para mitigar os efeitos da sobreposição de picos, comum devido à complexidade do perfil químico do café (Masucci; Caldwell, 2004), e as áreas dos picos foram previamente autoescaladas. O teste de Tukey foi empregado para identificar compostos voláteis com diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos. Adicionalmente, foi aplicada a seleção por peso de Fisher como método de

seleção de variáveis, com o objetivo de maximizar a separação entre tratamentos distintos e minimizar a variação dentro dos grupos (Lovatti *et al.*, 2019).

O espectrômetro de massas operou por ionização eletrônica (70 eV), faixa m/z 35–300, com intervalo de aquisição de 0,1 s e tempo de corte do solvente de 2,5 min. A identificação dos compostos voláteis foi realizada por comparação dos espectros com as bibliotecas NIST20 e WILEY12. O índice de retenção linear (LRI) foi calculado com base em uma série de *n*-alcanos (C8–C40), nas mesmas condições analíticas, e comparado com dados da literatura para colunas polares (polietilenoglicol).

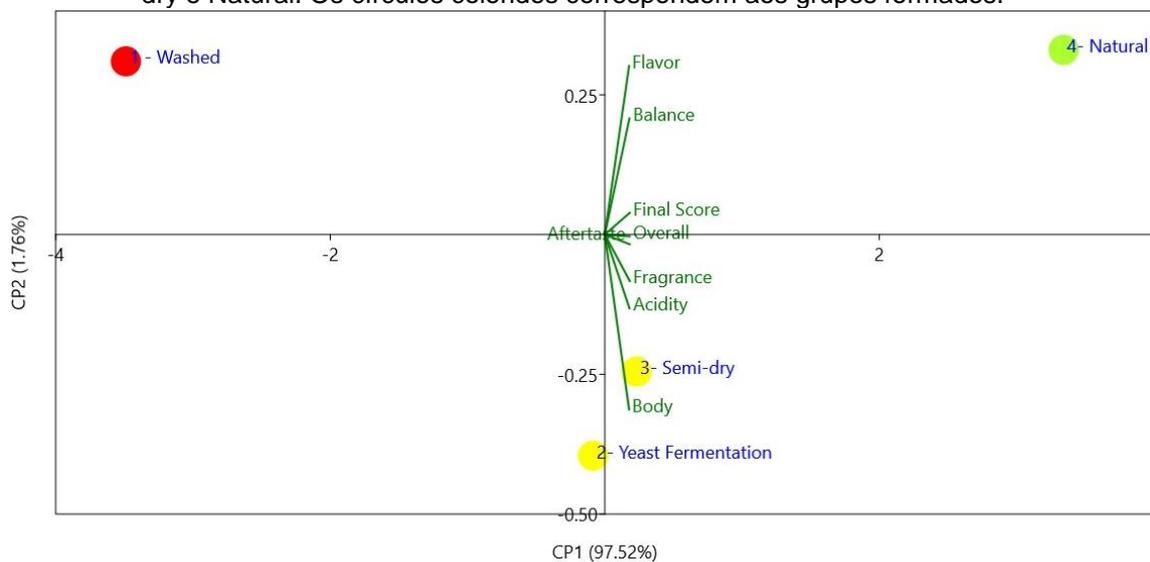
Em seguida, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA). Os gráficos de *scores* e *loadings*, construídos a partir das componentes principais (PCs), permitiram visualizar tanto a associação entre as amostras quanto a influência das variáveis (compostos voláteis) sobre essa distribuição (Pereira *et al.*, 2016). Foi aplicada uma PCA para explorar visualmente os agrupamentos sensoriais dos cafés, de acordo com os quatro tratamentos testados, com auxílio dos softwares R (R Core Team, 2021) e PAST (Hammer; Harper, 2001). Os dados sensoriais foram analisados por Análise de Variância (ANOVA), a média foi baseada no teste de Tukey a 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas nos softwares MATLAB (versão R 2013a) e Microsoft Excel (versão 2016).

3 RESULTADOS

A análise sensorial permitiu classificar todos os cafés Bourbon amarelo submetidos aos diferentes tratamentos pós-colheita como cafés especiais, por apresentarem pontuações superiores a 80 pontos. O tratamento Natural apresentou o melhor desempenho com nota final de 85,20, destacando-se pelas nuances sensoriais de chá de capim-limão, floral, frutas vermelhas, melado, melão e pêssego. Já os tratamentos Washed, Yeast Fermentation e Semi-dry não diferiram entre si de forma significativa, assim como Yeast Fermentation, Semi-dry e Natural. No entanto, observou-se diferença estatística entre os tratamentos Washed e Natural. Entre os cafés classificados como especiais, o tratamento

Washed apresentou a menor pontuação, com nuances sensoriais menos intensas em comparação aos demais. De acordo com os critérios da SCA, os tratamentos *Semi-dry* e *Yeast Fermentation* foram classificados como cafés especiais, com notas finais muito próximas. Além disso, esses dois tratamentos apresentaram perfis sensoriais mais homogêneos, com nuances similares identificadas pelos *Q-Graders* (Figura 3).

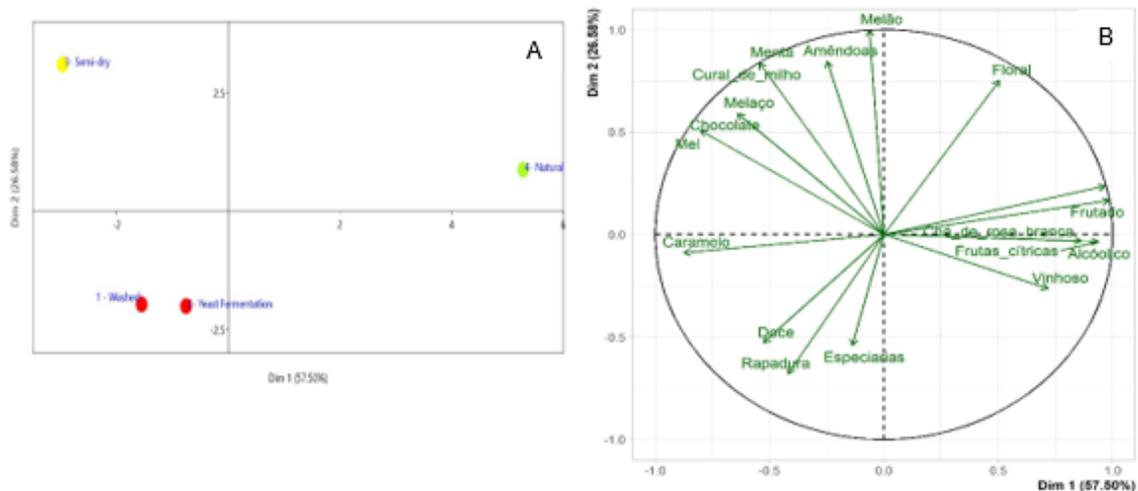
Figura 3. Diagrama de dispersão em relação aos dois primeiros componentes principais, obtido a partir dos atributos sensoriais de cafés dos tratamentos *Washed*, *Yeast fermentation*, *Semi-dry* e *Natural*. Os círculos coloridos correspondem aos grupos formados.



A influência dos métodos de processamento pós-colheita no perfil de qualidade sensorial do café foi evidenciada pela análise de componentes principais (PCA). Os primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram 99,28% da variação total (PC1: 97,52%; PC2: 1,76%), e pode-se observar a formação de três grupos distintos no diagrama de dispersão (Figura 3). Os grupos refletem os resultados sensoriais da Tabela 1, em que o eixo positivo da PC2 agrupou os cafés dos tratamentos *Natural* (85,20 pontos) e *Washed* (82,66 pontos), enquanto o eixo negativo da PC2 reuniu os cafés *Yeast Fermentation* e *Semi-dry*, que apresentaram notas próximas. No eixo da PC1, o café *Natural* destacou-se positivamente, enquanto o *Washed* se posicionou negativamente, com *Yeast Fermentation* e *Semi-dry* ocupando posições intermediárias.

A análise das nuances sensoriais revelou agrupamentos consistentes entre os tratamentos. Yeast Fermentation mostrou maior proximidade ao Washed do que com Semi-dry, conforme observado na Figura 4A. Os cafés Washed e Natural apresentaram perfis sensoriais contrastantes (PC2 negativa e positiva, respectivamente), reforçando os dados da análise sensorial. Em relação às características específicas, o café do tratamento Natural destacou-se por notas frutadas (cítricas, frutas vermelhas e pêssigo), florais e chá de rosa branca (Figura 4B); o Washed apresentou perfil voltado ao caramelo; Yeast Fermentation revelou nuances de doçura, rapadura e especiarias; enquanto Semi-dry apresentou notas de curau de milho, mel, chocolate, melaço, amêndoas e melão. Todos os cafés foram classificados como especiais segundo a metodologia SCA, com perfis sensoriais distintos, mas positivos.

Figura 4. Diagrama de dispersão em relação aos dois primeiros componentes principais, obtido a partir das nuances dos cafés dos tratamentos Washed, Yeast fermentation, Semi-dry e Natural. Em A os agrupamentos dos tratamentos, em B as características específicas encontradas



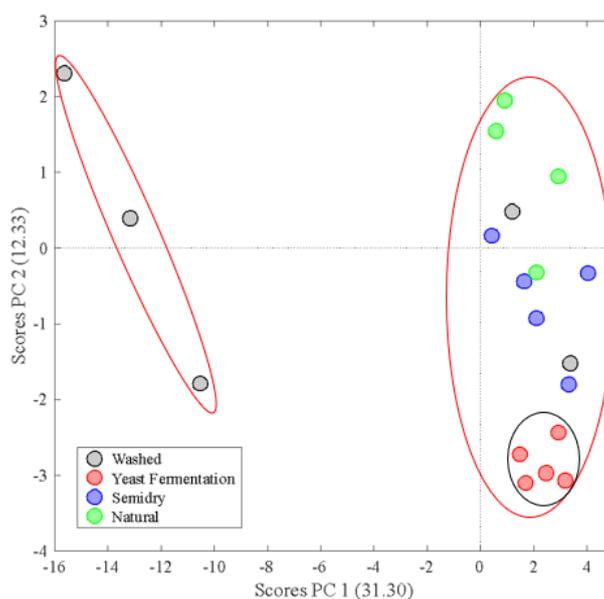
Fonte: Autoria própria.

Os resultados cromatográficos da análise TIC revelaram 109 compostos nos cafés torrados, identificando diversas classes: 24 furanos, 12 pirazinas, 8 pirróis, 21 cetonas, 5 piridinas, 2 fenóis, 5 ésteres, 6 ácidos carboxílicos, 8 álcoois, 3 aldeídos, 1 pirano, 1 heterocíclico, 5 hidrocarbonetos, 1 composto nitrogenado, 1 oxazol, 1 peróxido, 2 tiazol, 1 tiofeno, 1 tiol e 1 xantina. Sendo cinco compostos mais relevantes: diacetato de 1,2-etanodiol, 3-hidroxi-2-butanona,

2,5-dimetil pirazina, etil-pirazina e metil-pirazina. O café torrado apresentou uma composição complexa de compostos voláteis, com 20 classes identificadas nos tratamentos Washed, Yeast fermentation, Semi-dry e Natural, distribuídas conforme a concentração de cada composto em cada tratamento. A xantina, principalmente na forma de cafeína, foi mais presente no tratamento Natural, seguida de Yeast fermentation, e menos nos tratamentos Semi-dry e Washed.

As cetonas e furanos, compostos de baixo peso molecular, estavam uniformemente distribuídos, sendo comuns no café, mas propensos a se perderem durante o armazenamento. As pirazinas, que surgem durante a torra de alimentos, foram menos presentes no tratamento Natural e mais homogêneas nos outros tratamentos. Os pirróis se destacaram no tratamento Washed, representando cerca de 34% da composição volátil. Os tratamentos Semi-dry e Natural apresentaram concentrações semelhantes de álcoois, o que se correlaciona com suas altas pontuações na análise sensorial. O tratamento Washed, por outro lado, teve a menor concentração de álcoois. Para a classe dos éteres, o tratamento Natural apresentou a menor intensidade, sugerindo que menores concentrações desta classe podem estar associadas a uma maior qualidade sensorial. Em relação à distribuição das classes voláteis, a análise de componentes principais (PCA) explicou 43,63% da variância total, com o primeiro componente responsável por 31,30% e o segundo por 12,33%, auxiliando na discriminação dos tratamentos (Figura 5).

Figura 5. Agrupamento dos compostos voláteis identificados nos quatro tratamentos com café arábica Bourbon amarelo



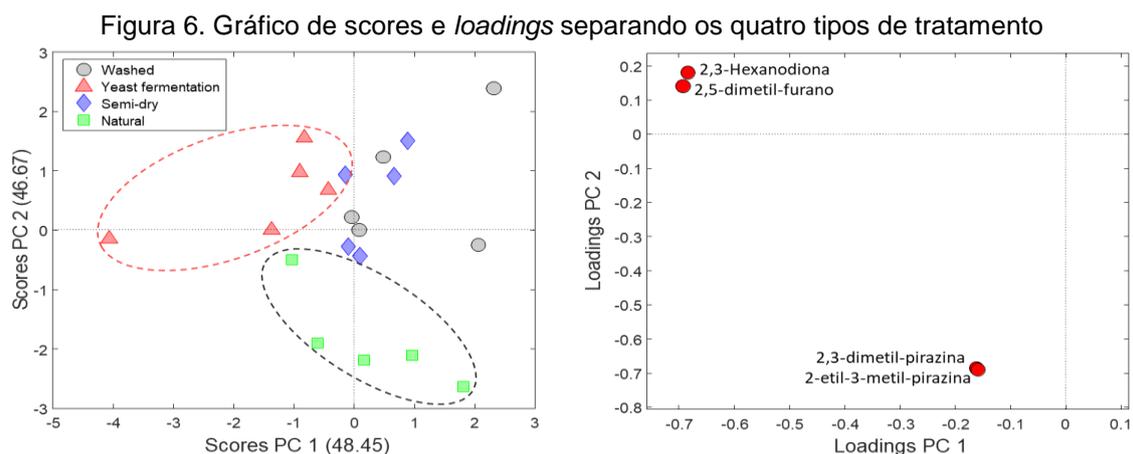
Fonte: Autoria própria.

A análise de componentes principais (PCA) revelou uma nítida separação entre os tratamentos, com o tratamento Natural, Semi-dry e Yeast fermentation concentrados no lado positivo da PC1, enquanto o tratamento Washed foi parcialmente posicionado no lado negativo da PC1. Isso reflete as diferenças entre os tratamentos, especialmente com relação ao processo fermentativo utilizado. Na PC2, o tratamento Natural esteve no lado positivo, enquanto Yeast fermentation e Semi-dry se agruparam no lado negativo, com Yeast fermentation se concentrando no extremo negativo.

A cromatografia gasosa, com integração em EIC, revelou 85 compostos distribuídos em 19 classes, como cetonas, ácidos carboxílicos, furanos, pirazinas, pirróis, e outras classes menos presentes. Com destaque para o pico do trimetiloxazol (classe dos oxazóis), que desapareceu nos tratamentos, indicando exclusividade no tratamento Washed. Entre as classes de compostos, a abundância relativa dos pirróis, hidrocarbonetos, tiazóis, álcoois, éter e anidridos variou estatisticamente. No tratamento Washed, as classes dos pirróis, hidrocarbonetos e tiazóis foram as responsáveis por uma separação estatística dos demais tratamentos, destacando-se como características próprias desse método de processamento. O tratamento Yeast fermentation, por sua vez, se diferenciou dos

demais devido à classe dos anidridos, compostos resultantes da desidratação de ácidos carboxílicos. Alguns desses compostos, como a 2,5-furanodiona (anidrido maleico), são sensíveis à armazenagem prolongada de grãos de café verde e podem servir como marcadores de torras mais claras.

A distribuição das amostras nas componentes PC1 e PC2 explicam 48,45% e 46,67% da variância total, respectivamente (Figura 6). O tratamento Yeast fermentation se concentra na PC2 positiva e PC1 negativa, com os compostos que mais contribuíram para a separação desse tratamento sendo a 2,3 hexanodiona e 2,5-dimetil-furano. A 2,3 hexanodiona é associada a atributos sensoriais como amanteigado, frutado e caramelo, enquanto o 2,5-dimetil-furano tem um perfil delicado e etéreo.



Fonte: Autoria própria.

Em relação às abundâncias, os compostos 2,3 hexanodiona e 2,5-dimetil-furano estão mais presentes na fração volátil do tratamento Yeast fermentation, e suas nuances sensoriais associadas incluem melaço, frutas cítricas e frutado, refletindo na pontuação final de 83,90 pontos desse tratamento. O tratamento Semi-dry apresenta uma correlação parcial com Yeast fermentation, enquanto os tratamentos Washed e Natural mostraram-se mais semelhantes entre si e distantes de Yeast fermentation. As amostras do tratamento Natural foram separadas no sentido negativo da PC2, com os compostos 2,3-dimetil-pirazina e 2-etil-3-metil-pirazina sendo os mais relevantes para essa separação. Esses compostos estão associados às características sensoriais de avelã e torrado, sendo

que as notas de avelã foram observadas pelos *Q-graders* nesse tratamento. Por outro lado, nos tratamentos Washed e Semi-dry, não foi possível observar separação estatística entre eles.

4 DISCUSSÃO

Os cafés processados pelo tratamento Natural apresentaram maior potencial de qualidade que os demais tratamentos, situando-se dentro da classificação de cafés especiais pela metodologia da SCA (2008). Aspecto que pode estar relacionado a diversos fatores, desde a própria cultivar até características edafoclimáticas e topográficas que influenciam as comunidades fúngicas e bacterianas, ou simplesmente casualidade (Veloso *et al.*, 2020). Resultado semelhante foi observado por Oliveira Martins *et al.* (2023), em que as maiores notas finais foram obtidas nos tratamentos Natural e Semi-dry, aspecto atribuído ao *terroir* da região do experimento.

Nesse sentido, nossos resultados inferem que a qualidade da bebida do café arábica pode ser melhorada em condições climáticas mais estáveis (amenas), por estar relacionado com o consórcio de árvores com a lavoura em questão, visto que o microclima pode estar impactando positivamente para que o café esteja dentro de um ambiente mais fresco, principalmente na estação com temperaturas mais altas (Toledo *et al.*, 2017). Isso porque o aprimoramento do manejo da lavoura tanto dos métodos de cultivo quanto do processo de pós-colheita contribui para a obtenção de um café de melhor qualidade, buscando uma colheita com grãos no ponto ideal de amadurecimento, visto que nessa fase ocorre o acúmulo de precursores químicos que podem influenciar na qualidade sensorial da bebida (Vale *et al.*, 2014; D’Alessandro, 2015; Lemos *et al.*, 2020).

A variação de nota sensorial e de atributos entre os tratamentos corroboram com os resultados encontrados por Pereira (2017b), em que os diferentes tipos de tratamentos e processos de fermentação, espontânea ou induzida, podem alterar a qualidade final do café, proporcionando rotas sensoriais distintas. Assim, as classes dos compostos se distinguem devido aos diferentes tratamentos empregados para o café. Como observado no tratamento

Washed que obteve nota final de 82,66 com a menor nota, legitima os resultados encontrados na técnica de GC-MS, por possuir classes de compostos que são exclusivas, ou seja, presentes apenas para este tratamento, como as classes dos compostos nitrogenados, oxazóis e peróxidos.

Na avaliação química, as classes são agrupadas e cada uma se caracteriza por apresentar notas de aromas diferentes (Akiyama *et al.*, 2005). Os furanos distribuíram-se de maneira uniforme entre os tratamentos, sendo reconhecida por seu sabor e aroma, tanto em alimentos como em bebidas, pois estão associados a atributos sensoriais positivos (Petisca *et al.*, 2013). Enquanto os tíóis são responsáveis pelas notas de “café” e “torrado” (Dulsat-Serra *et al.*, 2016), e sua presença se deve ao metabolismo secundário das leveduras, sendo observado em maior proporção no tratamento Yeast fermentation, sendo este composto presente em vinhos de boa qualidade (Fang; Qian, 2005; Uekane *et al.*, 2013).

Os ácidos orgânicos aparecem em maior proporção nos tratamentos Natural e Semi-dry, sendo conhecidos na determinação da composição volátil, característica considerada importante para o sabor do café (Elias, 2019). Além disso, a distribuição entre as classes pode ter beneficiado a qualidade de bebida. O composto diacetato 1,2-etanodiol é um éster, e os ésteres geralmente são associados a notas positivas, e apresentam odores variados, tais como pinho, frutado e floral, além de se incluírem na classe dos lipídeos (Moreira *et al.*, 2000). A classe das pirazinas se originam da torra de diversos produtos alimentícios, e para o café, ela está associada a notas de nozes, avelã, frutado, floral, amendoim, torrado e terra (Flament; Bessiere-Thomas, 2002; Amanpour; Selli, 2016). Para o composto 3-hidroxi-2-Butanona, pertencente à classe das cetonas, é comum encontrar notas sensoriais de framboesa, doce e frutado (Flament; Bessiere-Thomas, 2002).

Os compostos 2,5-dimetil-pirazina, etil-Pirazina e metil-Pirazina são compostos voláteis, pertencentes ao grupo das pirazinas. Cerca de 100 pirazinas já foram identificadas no café torrado, sendo produzidos, principalmente pela reação de Maillard (Toci; Boldrin, 2018). Costuma-se encontrar esses compostos em maiores concentrações nos cafés com um perfil de torra mais longo (Yang *et*

al., 2016), e em blends de café arábica de qualidade inferior (Toci; Boldrin, 2018). Alguns compostos desta classe possuem atributos sensoriais de queimado e bordô (Flament; Bessiere-Thomas, 2002; Somporn *et al.*, 2011).

Os pirróis se destacaram no tratamento Washed e são encontrados tanto em cafés arábicas como no conilon, um discriminante importante entre ambas as espécies (Lyrio, 2023; Hovell *et al.*, 2010), sendo conhecidos por apresentarem características de aroma doce e levemente queimado (Flament; Bessiere-Thomas, 2002; Moreira *et al.*, 2000), características notáveis para o aroma do café (Toci; Boldrin, 2018). A xantina faz parte do grupo dos alcalóides purínicos, dentre os quais se destaca a cafeína (1,3,7-trimetilxantina), sendo um constituinte bioativo, motivo pelo qual a bebida é reconhecida pelas pessoas, pelo seu efeito estimulante (Durán *et al.*, 2017; Mejía, 2019). E os compostos que pertencem a classe dos álcoois podem derivar da produção da degradação oxidativa de lipídeos, como também serem formados pelo resultado do metabolismo de culturas fermentativas, que produzem álcoois de cadeias maiores (Sunarharum *et al.*, 2014; Moreira *et al.*, 2000).

Em geral, pode-se observar que os compostos identificados em cada tratamento corroboram com os resultados da análise sensorial, evidenciando que os diferentes processos fermentativos, tanto espontâneos quanto induzidos, influenciam as notas finais e os atributos sensoriais do café. Isso demonstra que o tipo de fermentação pode impactar diretamente na qualidade da bebida. E ressalta-se que a concentração isolada de uma classe de compostos não determina, por si só, o aroma do café, uma vez que interações sinérgicas e antagônicas entre os compostos voláteis também influenciam significativamente essa percepção sensorial (Toci; Boldrin, 2018), de forma que um composto que poderia ser caracterizado negativamente, pode se tornar neutro ou benéfico na presença de outro composto que possa fazer essa interação. Indicando para a necessidade da compreensão sobre os compostos voláteis do café, visto que a fermentação já é um processo bem estabelecido.

5 CONCLUSÃO

Os métodos de fermentação influenciam significativamente os atributos sensoriais do café, devido à complexidade de sua matriz química. Os tratamentos Natural e Semi-dry apresentaram os melhores perfis sensoriais e maiores pontuações, sendo classificados como cafés especiais. Os tratamentos Washed e Yeast fermentation também resultaram em cafés especiais, embora com notas sensoriais ligeiramente inferiores, evidenciando que diferentes processos fermentativos podem produzir cafés com características valorizadas no mercado. O tratamento Natural promoveu maior formação de compostos voláteis secundários, associados diretamente a atributos como notas frutadas. E a análise química revelou que a composição volátil pode ser uma ferramenta preditiva da qualidade sensorial. Em suma, os resultados encontrados podem auxiliar produtores na escolha de métodos pós-colheita que agreguem valor ao produto, além de oferecer subsídios para investigações futuras sobre a interação entre fermentação e qualidade sensorial. Como limitações, destacam-se a ausência da análise microbiota, e de dados sobre a durabilidade da qualidade sensorial. Assim, recomenda-se que estudos futuros explorem a correlação entre compostos voláteis e a estabilidade sensorial ao longo do tempo.

AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Ministério da Educação, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, a Fundação de Apoio à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo pela concessão da Bolsa de Produtividade. E ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia dos Campus de Alegre, Itapina e Venda Nova do Imigrante, em conjunto a Fazenda Camocin – ES e a Fazenda MIÓ pela disponibilização dos recursos educacionais, experimentais e tecnológicos.

REFERÊNCIAS

- AKIYAMA, M. *et al.* Characterization of aromatic compounds released during grinding roasted robusta coffee beans. **Food Science Technology Research**, 11, 298–307. 2005.
- ALVES, E. A. *et al.* Efeito da fermentação sobre qualidade da bebida do café robusta (*Coffea canephora*) cultivado na Amazônia ocidental. **Revista Ifes Ciência**, v. 6, n. 3, p. 159-170, 2020.
- AMANPOUR A; SELLI, S. Differentiation of volatile profiles and odor activity values of Turkish Coffee and French Press Coffee. **J. Food Process. Preserv.**, 40, 1116–1124. 2016.
- D’ALESSANDRO, S. C. Identificação de Cafés Especiais. In: SAKIYAMA, N. S. *et al.* Café Arábica: do plantio à colheita. Viçosa: **Editora UFV**, . cap. 12, p. 268-291.2015
- DA MOTA, M. C. B. *et al.* Influence of fermentation conditions on the sensorial quality of coffee inoculated with yeast. **Food Research International**, v. 136, 109482, 2020.
- DE BRUYN, F. *et al.* Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. **Applied and Environmental Microbiology**. Disponível em: <https://doi.org/10.1128/AEM.02398-16>, 2016.
- DULSAT-SERRA, N.; QUINTANILLA-CASAS, B.; VICHI, S. Volatile thiols in coffee: A review on their formation, degradation, assessment and influence on coffee sensory quality. **Food Research International**, 89, 982–988. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.08.016>.
- DURÁN, C.A.A. *et al.* Café: Aspectos Gerais e seu Aproveitamento para além da Bebida. **Revista Virtual de Química**, 9(1), 107–134. 2017.
- ELIAS, A.M.T. **Perfil físico-químico de blends de variedades de café em diferentes condições do processo de torrefação**. 1–78 f. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2019.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, 316 p. 2006.
- FANG, Y.; QIAN, M.C. Sensitive quantification of sulfur compounds in wine by headspace solid phase microextraction technique. **Journal of Chromatography A**, 1080(2), 177–185. 2005.
- FAORO, H. *et al.* Influência das características do solo na diversidade de bactérias da Mata Atlântica Meridional. **American Society for Microbiology**, 2010.
- FLAMENT, I.; BESSIERE-THOMAS, Y. Coffee flavor chemistry. **John Wiley & Sons**, New York, p. 11–29. 2002.

GIACALONE, D. *et al.* Common roasting defects in coffee: Aroma composition, sensory characterization and consumer perception. **Food Quality and Preference**, v. 71, p. 463-474, 2019.

GIOMO, G. S.; BORÉM, F. M. Cafés especiais no Brasil: opção pela qualidade. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 32, n. 261, p. 7-16, 2011.

HAMMER, Ø; HARPER, D.A. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, 4(1), 1. 2001.

HOVELL, A.M.C. *et al.* Evaluation of alignment methods and data pretreatments on the determination of the most important peaks for the discrimination of coffee varieties *Arabica* and *Robusta* using gas chromatography-mass spectroscopy. **Anal. Chim. Acta**, 678, 160–168. 2010.

LEMOS, M. F. *et al.* Chemical and sensory profile of new genotypes of Brazilian *Coffea canephora*. **Food Chemistry**, v. 310, 125850, 2020.

LOVATTI, B.P.O. *et al.* Use of Random Forest in the Identification of Important Variables. **Microchemical Journal**, 145, 1129–1134. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018>.

LYRIO, M. V. V. **Determinação dos perfis químicos e avaliação de blends de cafés arábica e conilon por SHS-GC-MS, FTIR e quimiometria.** 2023. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Disponível em: https://sappg.ufes.br/tese_drupal//tese_17158_Disserta%E7%E3o%20final%20Marcos%20Val%E9rio%20%20Vieira%20Lyrio%20-%20PPGQui%20%281%29.pdf.

MACHADO, J. L. Perfil químico e sensorial de grãos de diferentes genótipos de *Coffea canephora*. Vitória: **Universidade Federal do Espírito Santo**, 2019. 78 p.

MASUCCI, J. A.; CALDWELL, G. W. Techniques for Gas Chromatography/Mass Spectrometry. In: GROB, R. L.; BARRY, E. F. (eds.). *Modern Practice of Gas Chromatography*. Hoboken: **Wiley**, p. 339–401. 2004.

MEJÍA CARMONA, K.S. **Colunas capilares extratoras à base de grafeno e derivados encourados em sílica para a determinação de Xantinas e Ocratoxina em amostras de café.** Dissertação (Mestrado em Química Analítica e Inorgânica), Instituto de Química de São Carlos/Universidade de São Paulo, 104 p. 2019.

MOREIRA, R.F.A.; TRUGO, L.C., DE MARIA, C.A.B. Componentes voláteis do café torrado. Parte II. Compostos alifáticos, alicíclicos e aromáticos. **Química Nova**, 23, 195–203. DOI: 10.1590/S0100-40422000000200010. 2000.

OLIVEIRA MARTINS, E.D. *et al.* Chemical profile and sensory perception of coffee produced in agroforestry management. **European Food Research and Technology**, 249(6), 1479–1489. 2023.

PEREIRA, L. *et al.* A consistência na análise sensorial de cafés utilizando Q-graders. **European Food Research and Technology**, v. 243, p. 1545-1554, 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2863-9>.

PEREIRA, L. L. *et al.* Propositions on the optimal number of q-graders and r-graders. **Journal of Food Quality**, v. 1, 3285452, 2018.

PEREIRA, L. L. **Novas abordagens para produção de cafés especiais a partir do processamento via-úmida**. 2017b. 200 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PEREIRA, L.L. *et al.* Interação da torra e das peneiras do café na preferência de consumidores. In: **XXV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. X CICR SECTION. IV IINTERNATIONAL TECHNICAL SYMPOSIUM**. 2016.

PETISCA, C. *et al.* Furans and other volatile compounds in ground roasted and espresso coffee using headspace solid-phase microextraction: Effect of roasting speed. **Food Bioprod. Process.** 91, 233–241. 2013.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2021.

REN, J.L. Advances in mass spectrometry-based metabolomics for investigation of metabolites. **RSC Adv.** V.8, pg. 22335-22350. 2018.

REY-STOLLE, F. Low and high resolution gas chromatography-mass spectrometry for untargeted metabolomics: A tutorial. **Analytica Chimica Acta**, 1210, 339043. 2022.

RODRIGUEZ, Y.F.B.; GUZMAN, N.G.; HERNANDEZ, J.G. Effect of the postharvest processing method on the biochemical composition and sensory analysis of arabica coffee. **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 177-183. 2020.

SCA, Specialty Coffee Association. **Protocolo para análise sensorial de café metodologia SCA**. [S.l.]: TSC-SCAA. 2008.

SCAA_CuppingProtocols_TSC_DocV_RevDec08_Portuguese.pdf. Acesso em: 12 dez. 2021.

SEPLAN. Zonas naturais do espírito santo: uma regionalização do estado, das microrregiões e dos municípios/ Secretaria de Estado do Planejamento. Vitória: **SEPLAN**, 101 p. 1999.

SOMPORN, C. *et al.* Effects of roasting degree on radical scavenging activity, phenolics and volatile compounds of *Arabica* coffee beans (*Coffea arabica* L. cv. Catimor). **Int. J. Food Sci. Technol.**, 46, 2287–2296. 2011.

STEENBOCK, W. A arte de guardar o sol: padrões da natureza na reconexão entre florestas, cultivos e gentes. 1ª ed. rio de janeiro: **bambual editora**, 207p. 2021.

STEINER, R. Fundamentos da Agricultura Biodinâmica. GA (obra completa) No. 327. Trad. Gerard Bannwart. São Paulo: Editora **Antroposófica**, 3ª ed. 2010.

SUNARHARUM, W.B.; WILLIAMS, D.J.; SMYTH, H.E. Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. **Food Research International**, v. 62, p. 315–325. 2014.

TOCI, A.T.; BOLDRIN, M.V.Z.Z. Coffee beverages and their aroma compounds. In: Grumezescu AM, Holban AM (Eds.), **Natural and Artificial Flavoring Agents and Food Dyes: Handbook of Food Bioengineering**, Vol. 7, 397–425. **Elsevier**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00380-7>. 2018.

TOLEDO, P.R.A.B. Discriminant analysis for unveiling the origin of roasted coffee samples: A tool for quality control of coffee related products. **Food Control**, 73(Part B), 164–174. 2017.

UEKANE, T.M.; ROCHA-LEÃO; M.H.M., REZENDE, C.M. Compostos sulfurados no aroma do café: origem e degradação. **Revista Virtual de Química**, 5(5), 891–911. 2013.

VALE, A.R.; CALDERARO, R.A.P.; FAGUNDES, F.N. A cafeicultura em minas gerais: estudo comparativo entre as regiões Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e Sul/Sudoeste. CAMPO-TERRITÓRIO: **revista de geografia agrária**, edição especial do XXI ENGA, p. 1-23. 2014.

VELOSO, T.G.R. *et al.* Effects of environmental factors on microbiota of fruits and soil of *Coffea arabica* in Brazil. **Scientific Reports**, 10(1), 14692. 2020.

YANG, N.I. Determination of volatile marker compounds of common coffee roast defects. **Food Chemistry**, 211, 206-214. 2016.