



ANTONIA ISADORA FERNANDES

**PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION, QUANTIFICATION
PHENOLIC COMPOUNDS, AND INSTRUMENTAL SENSORIAL
ANALYSIS USING BIONIC SENSORS OF CACHAÇA AGED IN
BARRELS OF WOOD SPECIES**

LAVRAS – MG

2026

ANTONIA ISADORA FERNANDES

**PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION, QUANTIFICATION
PHENOLIC COMPOUNDS, AND INSTRUMENTAL SENSORIAL
ANALYSIS USING BIONIC SENSORS OF CACHAÇA AGED IN
BARRELS OF WOOD SPECIES**

Tese apresentada à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do programa
de Pós-Graduação em Agroquímica, área de
concentração em Química/Bioquímica, para a
obtenção do título de Doutor.

Profª. Dra. Maria das Graças Cardoso
Orientadora

Dr. Wilder Douglas Santiago
Coorientador

LAVRAS – MG

2026

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

Fernandes, Antonia Isadora.

Physicochemical characterization, quantification phenolic compounds, and instrumental sensorial analysis using bionic sensors of cachaça aged in barrels of wood species / Antonia Isadora Fernandes. - 2026.

136 p.

Orientadora: Maria das Graças Cardoso

Coorientador: Wilder Douglas Santiago

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2026.

Bibliografia.

1. Cachaça. 2. Qualidade de Bebidas. 3. Envelhecimento. I. Cardoso, Maria das Graças. II. Santiago, Wilder Douglas. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

ANTONIA ISADORA FERNANDES

**PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION, QUANTIFICATION
PHENOLIC COMPOUNDS, AND INSTRUMENTAL SENSORIAL
ANALYSIS USING BIONIC SENSORS OF CACHAÇA AGED IN
BARRELS OF WOOD SPECIES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agroquímica, área de concentração em Química/Bioquímica, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 23 de janeiro de 2026

Dra. Maria das Graças Cardoso	UFLA
Dr. Wilder Douglas Santiago	UFLA
Dra. Maria Luisa Teixeira	UFLA
Dra. Mariana de Rezende Bonesio	UFLA
Dr. Nicolas Rios Ratkovich	UNIANDES

Profª. Dra. Maria das Graças Cardoso
Orientadora

Dr. Wilder Douglas Santiago
Coorientador

LAVRAS – MG

2026

*A todos os produtores, pesquisadores, consumidores e
apreciadores do primeiro destilado das Américas, bebida
genuína brasileira,*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me iluminar e guiar meus caminhos todos os dias e por toda a providência a mim concedida.

À Nossa Senhora, por interceder por mim a cada amanhecer, por cada dificuldade superada e por cada graça alcançada.

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria das Graças Cardoso, por toda a orientação concedida, pelos ensinamentos e por abrir as portas do Laboratório de Óleos Essenciais e do Laboratório de Análise de Qualidade de Aguardente. Por todo o apoio, força e por sempre acreditar no meu potencial quando eu não acreditava. Por se tornar uma grande amiga pessoal e pelos ensinamentos valiosos que me ensinaram a ser uma pessoa melhor.

Ao meu coorientador, Dr. Wilder Douglas Santiago, por todo o suporte, auxílio na realização das análises e por todas as contribuições valiosas durante todo o doutorado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, ao Departamento de Química e a Universidade Federal de Lavras, pela infraestrutura concedida que possibilitou o desenvolvimento desse trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, pela concessão das bolsas de doutorado no Brasil e no Exterior, pelo Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) pelo suporte financeiro concedido para a realização dessa pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Prof. Dr. Nicolas Ratkovich, pela orientação durante o período sanduíche e por todas as valiosas sugestões durante o desenvolvimento desse trabalho. À Lucía, Nicolas, Eliana, Juan e Sebastian, pelo auxílio na realização dos experimentos e pelo companheirismo. A Universidad de Los Andes e ao Departamento de Ingeniería Química y de Alimentos pela acolhida, infraestrutura e suporte concedido para o desenvolvimento da pesquisa no exterior.

Aos meus pais, Selma e Antonio (*in memoriam*), por todo amor, apoio e ensinamentos sobre a vida, paciência e resiliência. A minha irmã, Isabel, por me ensinar a buscar meus sonhos e me incentivar em cada caminho e decisão, celebrando cada conquista. À Julio, por todo carinho. Por tudo o que são na minha vida e por tudo o que fizeram por mim, longe ou perto, não tem palavras que expressem o meu sentimento.

Aos meus sobrinhos, Karen e Arthur, por trazerem amor e alegria aos meus dias difíceis e por me motivarem a ir sempre mais longe. À minha família de coração: meus tios Clécia e Valter, meus irmãos, Mateus e Ryan, e a Vanda e Carlos por sonharem isso tudo comigo e fazerem minhas idas ao Crato sempre mais felizes.

Aos colegas dos Laboratórios de Óleos Essenciais e Qualidade de Cachaça Danúbia, Carol, Wilton, Pedro, Raphael, Joyce, Juliana, Sara, Maria Eduarda, Vinicius, Isabelli, Ana Julia, Gislaine, Maria Augusta, Giovana, Pâmela, Ana Paula, Gabriela Fontes, Gabriela Campolina, Vanuzia e Marcus, por toda a ajuda nos experimentos, convivência e amizade ao longo desses anos.

Às técnicas do Laboratório de Análise de Qualidade de Aguardente, Dra. Maria Luisa e Dra. Mariana Bonesio, por todos os ensinamentos e colaborações, pelo carinho e convivência durante todo esse tempo.

À Cachaça Porto de Minas, na pessoa do Sr. Jorge Vieira, e a Cachaça Rainha da Cana, nas pessoas do Sr. Epitácio Cardoso e Pedro Oliveira, pelo fornecimento das cachaças utilizadas nesse e em todos os estudos desenvolvidos durante o doutorado.

Ao Luiz, Natânia, Victória, Mateus, Anderson, Alisson, Livia, Yslane, Marcos e Lucas, por trazerem leveza e companheirismo durante essa caminhada. À minhas queridas amigas que fiz no doutorado sanduíche, Naiara, Raquel, Aila, Janaina e Johanna, por serem presentes, mesmo que distantes. À querida Ana Marta Sátyro, por todas as trocas de conhecimentos sobre o mundo da cachaça.

Ao Alessandro Junior, que me acompanhou durante essa caminhada e por todo o incentivo, cuidado e carinho, principalmente nos momentos mais desafiadores.

Aos membros da banca examinadora, por aceitarem o convite e por todas as valiosas contribuições.

A todos que participaram, de forma direta ou indireta, na realização desse trabalho, durante todo esse período.

“É justo que muito custe o que muito vale”

Santa Teresa D'Ávila

RESUMO

A cachaça é a bebida fermento-destilada obtida a partir do mosto de cana-de-açúcar crua e que apresenta teor alcoólico entre 38 e 48% v/v a 20 °C. Durante todas as suas etapas produtivas, são formados congêneres responsáveis por suas características organolépticas peculiares e marcantes. O processo de armazenamento/envelhecimento da bebida, única etapa não-obrigatória da cadeia produtiva, garante que o produto apresente maior complexidade sensorial e valor agregado, graças às moléculas extraídas da superfície do barril que reagem com moléculas formadas nas outras etapas da cadeia produtiva. Embora o processo de envelhecimento ocorra utilizando barris fabricados de carvalho americano ou europeu, novas espécies vegetais nativas brasileiras e espécies exóticas vêm destacando-se para essa finalidade, a fim de reduzir custos de importação e manutenção de barris de carvalho e garantir maior diversidade de produtos a serem comercializados. Dessas espécies, citam-se a amburana, bálsamo, jequitibá, freijó e eucalipto. O presente trabalho objetivou avaliar a influência do envelhecimento de cachaças em barris fabricados de madeiras alternativas nos parâmetros físico-químicos, composição fenólica e atributos sensoriais por meio de sensores biônicos. A análise dos parâmetros físico-químicos foi realizada de acordo a Instrução Normativa Nº 24 de 08 de novembro de 2005 do Ministério de Agricultura e Pecuária (MAPA); as análises de compostos fenólicos foram realizadas por cromatografia líquida de alta eficiência; já as análises instrumentais de aromas e sabores foram realizadas de acordo com metodologias para língua e nariz eletrônicos já estabelecidas. Como resultados, todas as amostras apresentaram parâmetros inferiores aos limites máximos propostos pela legislação vigente. As análises por cromatografia líquida quantificaram treze compostos fenólicos, com teores variáveis de não detectado a 75,2 mg L⁻¹. Os sensores biônicos foram capazes de distinguir 134 aromas distintos, classificados em categorias e subcategorias, além de identificarem percepções de sabores relacionadas à umami, acidez e retrogostos superiores à amostra referência (amostra não-envelhecida), enquanto percepções relacionadas ao amargor e adstringência foram menores à referência. A realização desse estudo evidencia a viabilidade da utilização de madeiras nativas brasileiras e exóticas para o envelhecimento de cachaças, de forma a garantir a obtenção de novos produtos envelhecidos em conformidade com a legislação e de alta complexidade e harmonia sensorial. A aplicação de sensores biônicos na análise de cachaças envelhecidas também se mostrou promissora para a avaliação de características sensoriais do produto final, bem como ao longo

da cadeia produtiva, identificando características atípicas e/ou indesejáveis e permitindo, quando necessário, a tomada de ações corretivas de forma rápida, garantindo um produto de alta qualidade, além de auxiliar no momento de compra do consumidor, possibilitando a escolha de um produto que se enquadre melhor nos seus interesses pessoais.

Palavras-chave: Envelhecimento. Madeiras nativas. Sensores biônicos. Compostos voláteis. Compostos fenólicos.

ABSTRACT

Cachaça is a fermented-distilled beverage obtained from the must of raw sugarcane, with an alcohol content between 38 and 48% v/v at 20°C. Throughout its production stages, congeners are formed, which are responsible for its peculiar and distinctive organoleptic characteristics. The storage/aging process of the Beverage, the only non-mandatory stage in the production chain, ensures greater sensory complexity and added value, thanks to molecules extracted from the barrel surface that react with molecules formed during the other stages of the production chain. Although the aging process normally occurs in barrels made of American or European oak, new native Brazilian plant species and exotic species stand out for this purpose. The use of these species help to reduce the cost of importing and maintaining oak barrels and to guarantee greater diversity of products to be marketed. Among these species are amburana, balsam, jequitibá, freijó, and eucalyptus. The physicochemical composition, and quantification of phenolic and volatile compounds present in samples of cachaça aged in fourteen native and exotic plant species were analyzed, as well as the instrumental analysis of sensory characteristics using electronic tongue and nose tests. The analysis of physicochemical parameters was performed according to Normative Instruction No. 24 of November 8, 2005, from the Ministry of Agriculture and Livestock (MAPA). The analyses of phenolic compounds were performed by high-performance liquid chromatography. The instrumental analyses of aromas and flavors were performed according to established methods for electronic tongue and nose tests. As a result, the parameters of all the samples were lower than the maximum limits proposed by current legislation. Liquid chromatography analyses quantified thirteen phenolic compounds, with concentrations ranging from not detected to 75.2 mg L⁻¹. Bionic sensors distinguished 134 distinct aromas, which were classified into categories and subcategories. Perceptions of flavors related to umami, acidity, and aftertastes superior to those of the reference sample (non-aged sample) were identified. Perceptions related to bitterness and astringency were lower than those of the reference. This study highlights the viability of using native Brazilian and exotic woods for aging cachaça to ensure the production of new aged products in accordance with legislation and with high complexity and sensory harmony. The application of bionic sensors in the analysis of aged cachaça has also shown promise for evaluating the sensory characteristics of the final product, as well as throughout the production chain by identifying atypical and/or undesirable characteristics and allowing, when necessary, the rapid

implementation of corrective actions to ensure a high-quality product, in addition to assisting the consumer at the time of purchase by enabling the choice of a product that better suits their personal interests.

Keywords: Aging. Native woods. Bionic sensors. Volatile compounds. Phenolic compounds.

INDICADORES DE IMPACTO

Esse trabalho objetivou analisar, de forma aprofundada, como a espécie vegetal utilizada na fabricação de barris é capaz de modular os parâmetros químicos da cachaça envelhecida. Os resultados obtidos por meio dessa pesquisa podem apresentar impacto direto significativo no que diz respeito ao envelhecimento da cachaça, beneficiando produtores na tomada de decisões relacionadas à essa etapa e consumidores no momento de compra, possibilitando a escolha da bebida de acordo com seus gostos pessoais. Além desses pontos, o conhecimento da composição química é de suma importância para a expansão da bebida, tanto no mercado nacional como internacional, maximizando o potencial de geração de renda por esta. O desenvolvimento dessa pesquisa contou com a parceria com produtores de cachaça externos à UFLA (Cachaça Porto de Minas) para a obtenção das bebidas estudadas, bem como com a Universidad de Los Andes (Bogotá, Colômbia). Com isso, foi possível contemplar três das oito áreas temáticas da Política Nacional de Extensão, que são (4) Educação, (6) Saúde e (7) Tecnologia de Produção. No que diz respeito aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, é possível correlacioná-lo com (3) Saúde e Bem-estar, (8) Trabalho Decente e Crescimento Econômico, (9) Indústria Inovação e Infraestrutura, (12) Consumo e Produção Sustentáveis e (17) Parcerias e Meios de Implementação.

IMPACT INDICATORS

This study aimed to conduct an in-depth analysis of how the plant species used in barrel production can modulate the chemical parameters of aged cachaça. The results obtained from this research may have a significant direct impact on the cachaça aging process, benefiting producers in decision-making related to this stage and consumers at the time of purchase, by enabling the selection of beverages according to their personal preferences. In addition, understanding the chemical composition is of utmost importance for the expansion of the beverage in both national and international markets, maximizing its income-generating potential. The development of this research involved a partnership with cachaça producers outside UFLA (Cachaça Porto de Minas) for the acquisition of the studied beverages, as well as collaboration with the Universidad de Los Andes (Bogotá, Colombia). As a result, the project encompassed three of the eight thematic areas of the National Extension Policy: (4) Education, (6) Health, and (7) Production Technology. Regarding the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), this work can be correlated with (3) Good Health and Well-being, (8) Decent Work and Economic Growth, (9) Industry, Innovation, and Infrastructure, (12) Responsible Consumption and Production, and (17) Partnerships for the Goals.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

PRIMEIRO CAPÍTULO

Figura 1 – Cadeia produtiva da cachaça de alambique.	30
Figura 2 – Conversão de açúcar em etanol e CO ₂	34
Figura 3 – Formação de aldeídos cinâmico e benzoico e ácidos benzoicos a partir da lignina.	50

SEGUNDO CAPÍTULO

Figure 1 - Boxplot obtained from the sensory data of the analyzed cachaças for the basic taste modalities.	83
Figure 2 - Results obtained for the taste sensory attributes of samples aged in barrels made from different wood species.	83
Figure 3 - Flavor wheel of desirable aromas detected in cachaça samples, organized into categories, subcategories, and aromatic descriptors.	87
Figure 4 - Flavor wheel of undesirable aromas detected in cachaça samples, organized into categories, subcategories, and aromatic descriptors.	88

TERCEIRO CAPÍTULO

Figures 1 and 2 - Hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA) plots for the cachaça samples under study.	120
Figure 3 - Glycerol concentration in aged samples evaluated in this study.	122
Figure 4 - Concentrations of total phenolic compounds in the aged cachaça samples.	124

Figure 5 - Total phenolic content obtained by the Folin-Ciocalteu method and the sum of phenolic compounds quantified by high-performance liquid chromatography in cachaças aged in different barrels.	128
---	-----

LISTA DE QUADROS

PRIMEIRO CAPÍTULO

Quadro 1 – Limites superior e inferior dos parâmetros físico-químicos estabelecidos dos Padrões de Identidade e Qualidade para cachaça e aguardente de cana-de-açúcar.....	44
Quadro 2 – Limites de contaminantes orgânicos e inorgânicos dos Padrões de Identidade e Qualidade para cachaça e aguardente de cana-de-açúcar.....	45
Quadro 3 – Vantagens e desvantagens de princípios de funcionamento da língua eletrônica..	56
Quadro 4 – Vantagens e desvantagens de sensores utilizados na fabricação de narizes eletrônicos.....	59

LISTA DE TABELAS

SEGUNDO CAPÍTULO

Table 1 - PEN3 e-nose sensors and the respective substances identified. 81

Table 2 - Categories and subcategories of aromatic families used for comparison. 82

TERCEIRO CAPÍTULO

Table 1 - Physicochemical parameters of the cachaça samples under study. 112

Table 2 - Organic and inorganic contaminants in the cachaça samples under study. 117

Table 3 - Limits of detection and quantification for phenolic compounds quantified in aged samples. 125

Table 4 - Phenolic content present in samples of cachaça aged in barrels made of native Brazilian species of wood and exotic woods (mg/L). 126

LISTA DE ABREVIATURAS

a.a. Álcool anidro

max Máximo

min Mínimo

n^o Número

LISTA DE SIGLAS

ADQ	Análise Descritiva Quantitativa
PCA	Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)
CE	Carbamato de Etila
CG	Cromatografia Gasosa
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis
CP	Conductive Polymers (Polímeros Condutores)
EC	Electrochemical Sensors (Sensores eletroquímicos)
FRAP	Ferric Reducing Antioxidant Power (Poder Antioxidante Redutor Férrico)
HPAs	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MOS	Metal Oxide Sensors (Sensores Óxido Metálicos)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors (Sensores semicondutores de óxido metálico)
PIQs	Padrões de Identidade e Qualidade
PS	Piezoelectric Sensors (Sensores Piezoelétricos)
QCM	Quartz Crystal Microbalance (Microbalanças de Cristal de Quartzo)
RNAs	Redes Neurais Artificiais
SAW	Surface Acoustic Wave (Onda Acústica de Superfície)

LISTA DE SÍMBOLOS

v/v	Volume por volume
°C	Grau Celsius
g	Grama
L	Litro
mL	Mililitro
mg	Miligrama
µg	Micrograma
pH	Potencial hidrogeniônico

SUMÁRIO

PRIMEIRO CAPÍTULO.....	24
1 INTRODUÇÃO	25
2 OBJETIVOS	27
2.1 Objetivo Geral.....	27
2.2 Objetivos Específicos.....	27
3 REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1 Cachaça	28
3.2 Cadeia Produtiva.....	29
3.2.1 Plantio e Colheita da Cana-de-açúcar	31
3.2.1.1 Moagem e Tratamento do Caldo.....	32
3.2.2 Fermentação	33
3.2.3 Destilação.....	35
3.2.4 Envelhecimento.....	36
3.3 Madeiras utilizadas no processo de envelhecimento	38
3.4 Madeiras nativas e exóticas utilizadas no envelhecimento.....	39
3.5 Componentes Secundários e Contaminantes	43
3.6 Compostos Fenólicos	48
3.7 Análise sensorial de bebidas	52

3.8	Sensores biônicos.....	54
3.8.1	Língua eletrônica	55
3.8.2	Nariz eletrônico.....	57
	REFERÊNCIAS.....	61
	SEGUNDO CAPÍTULO.....	76
	EVALUATION OF THE SENSORY PROFILE OF CACHAÇAS AGED IN EXOTIC BRAZILIAN WOODS USING ELECTRONIC TONGUE AND NOSE SYSTEMS	76
	TERCEIRO CAPÍTULO	104
	GLYCEROL CONTENT, PHENOLIC COMPOSITION, AND PHYSICOCHEMICAL EFFECTS OF CACHAÇA AGING IN EXOTIC AND NATIVE BRAZILIAN WOODS	104
4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	136

PRIMEIRO CAPÍTULO

1 INTRODUÇÃO

A cachaça é produto genuinamente brasileiro, que teve início durante a colonização do país e obtido a partir da destilação do caldo fermentado de cana-de-açúcar. Por ser produzido em quase todo o país, as cachaças brasileiras apresentam particularidades entre si, únicas de cada região na qual são produzidas.

Para a obtenção da bebida, são necessárias cinco etapas principais: plantio da cana-de-açúcar, obtenção do mosto, fermentação, destilação e envelhecimento. Durante todas essas etapas, são formados compostos secundários desejáveis, como aldeídos, ácidos, ésteres e álcoois superiores que, quando em concentrações adequadas e atuando de forma sinérgica, promovem e garantem características peculiares de aroma e sabor e que juntas irão formar o “flavor” da bebida.

O envelhecimento da bebida em barris de madeira, mesmo que seja facultativo na cadeia produtiva da cachaça, é uma prática de suma importância e muito adotada entre os produtores, pois, além de agregar valor ao produto, suaviza o sabor e melhora aromas da bebida recém-destilada. Durante essa etapa, a interação da cachaça com a madeira é responsável pela extração de diversos compostos, como taninos, ácidos voláteis e compostos fenólicos. Além desses, reações de esterificação ocorridas entre o álcool da bebida e ácidos da madeira são capazes de formar outros ésteres, contribuindo ainda mais para as características sensoriais do produto final.

A madeira mais empregada para o envelhecimento de bebidas é carvalho (*Quercus* sp.), pois apresenta características desejáveis relacionadas à cor, cheiro, durabilidade e resistência mecânica. No entanto, por não ser nativa no Brasil, apresenta alto custo de obtenção, importação e manutenção. Como alternativas para esse gargalo, a utilização de madeiras nativas brasileiras para a fabricação de tonéis de envelhecimento tem sido vista como promissora, de forma a reduzir custos com barris de carvalho e permitir a diversificação das bebidas pela variação do perfil sensorial dessas. Como exemplos, cita-se o jequitibá-rosa, freijó, araribá, bálsamo, grápia, ipê amarelo e amburana.

Considerando o expressivo aumento no consumo e na exportação de cachaça, tanto branca quanto envelhecida, é necessário que sejam conhecidos os perfis físico-

químicos e a composição química dessas, objetivando a garantia dos Padrões de Identidade e Qualidade (PIQs) da bebida. No que está relacionado a bebidas envelhecidas, a identificação dos compostos formados e extraídos pela interação álcool-madeira é crucial, a fim de garantir que esses compostos, quando ingeridos, não causem prejuízos à saúde de consumidor.

Além dos estudos químicos difundidos acerca da composição físico-química da cachaça, o conhecimento dos aspectos sensoriais da bebida final pode ser fundamental para auxiliar na decisão de compra. Diante dos entraves conhecidos na análise sensorial convencional, ferramentas tecnológicas inovadoras, sensores biônicos capazes de reproduzirem percepções sensoriais humanas de aroma e sabor, como nariz e língua eletrônicos, vêm sendo fortemente aplicados no monitoramento do controle de qualidade, na caracterização e na diferenciação de bebidas alcoólicas, gerando respostas rápidas e precisas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Avaliar a influência do envelhecimento de cachaças em barris fabricados de carvalho americano e de madeiras nativas brasileiras e exóticas nos parâmetros físico-químicos, na sua composição fenólica e nos seus atributos sensoriais por meio de sensores biônicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Traçar o perfil físico-químico de cachaças envelhecidas em diferentes madeiras;
- Quantificar contaminantes por técnicas cromatográficas;
- Identificar e quantificar a composição fenólica incorporada nas bebidas;
- Caracterizar o perfil sensorial das bebidas envelhecida por meio da aplicação de língua e nariz eletrônicos;
- Investigar a capacidade dos sensores biônicos em identificar aromas característicos e diferenciar sensorialmente os produtos finais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cachaça

A cachaça, por definição da Instrução Normativa nº 539 de 22 de dezembro de 2022, é a bebida obtida única e exclusivamente pela destilação do caldo de cana-de-açúcar fermentado e que possui graduação alcoólica entre 38 e 48% (v/v) a 20 °C. Por ser patrimônio histórico e cultural do Brasil, só é considerada cachaça a bebida obtida pela fermento-destilação do mosto de cana-de-açúcar produzida no território nacional (Brasil, 2022).

Seu surgimento é datado junto com o descobrimento e a colonização do Brasil e inúmeras são as histórias que versam sobre o surgimento da cachaça, sendo os escravos os pioneiros na fabricação e consumo dessa bebida. Quando a cana-de-açúcar era moída para a fabricação de açúcar nos engenhos e ficavam sobras de caldo nos moinhos, com o passar dos dias, esses resquícios fermentavam naturalmente e mudavam de aparência e sabor, garantindo sensações agradáveis e refrescantes, promovendo disposição pra trabalhar e relaxamento no fim do dia. A partir disso, a bebida foi aprimorada e, pelo conhecimento dos senhores de engenho acerca das técnicas de destilação, esse líquido começou a ser destilado e ganhar popularidade nos engenhos e nas casas de cozer méis dos senhores de engenho. O alto consumo da cachaça resultou na diminuição da comercialização e consumo de outras bebidas, como o vinho e a bagaceira e, por decretos portugueses, proibiram a fabricação e venda da cachaça em 1635. Essa proibição ocasionou a revolta de produtores que buscaram a liberação da fabricação e isenção de taxas, originando assim a Revolta da Cachaça (Cardoso, 2020).

Atualmente, a cachaça é produzida na maior parte do território nacional. Dados do Anuário da Cachaça (2025) afirmam que no ano de 2024 o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) fechou o ano em 1266 estabelecimentos registrados, indicando um crescimento anual de 4% com relação ao ano anterior. Destes, 828 estabelecimentos são localizados na região sudeste do país. O estado de São Paulo é o maior produtor de cachaça de coluna do país, enquanto Minas Gerais lidera a produção de cachaça de alambique, seguido dos estados do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Em 2024, a cachaça foi exportada para 74 países distintos, com uma marca de 6.661.879 litros

e um montante equivalente a US\$ 14.544.205. O Paraguai lidera o ranking de importação em volume, seguido da Alemanha e dos Estados Unidos.

A principal diferença da cachaça para a aguardente diz respeito à matéria prima e fabricação. Enquanto a cachaça é obtida apenas pela destilação do mosto fermentado de cana-de-açúcar e fabricada exclusivamente no Brasil, a aguardente de cana-de-açúcar é obtida através do destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar ou pelo mosto fermentado da cana-de-açúcar, podendo ser adicionada até 30 g L⁻¹ de açúcares. Além disso, a aguardente pode ser obtida a partir da fermento-destilação de outras matérias-primas vegetais, como milho, frutas e trigo, e que apresentem teor alcoólico entre 38 e 54% v/v a 20 °C (Brasil, 2022).

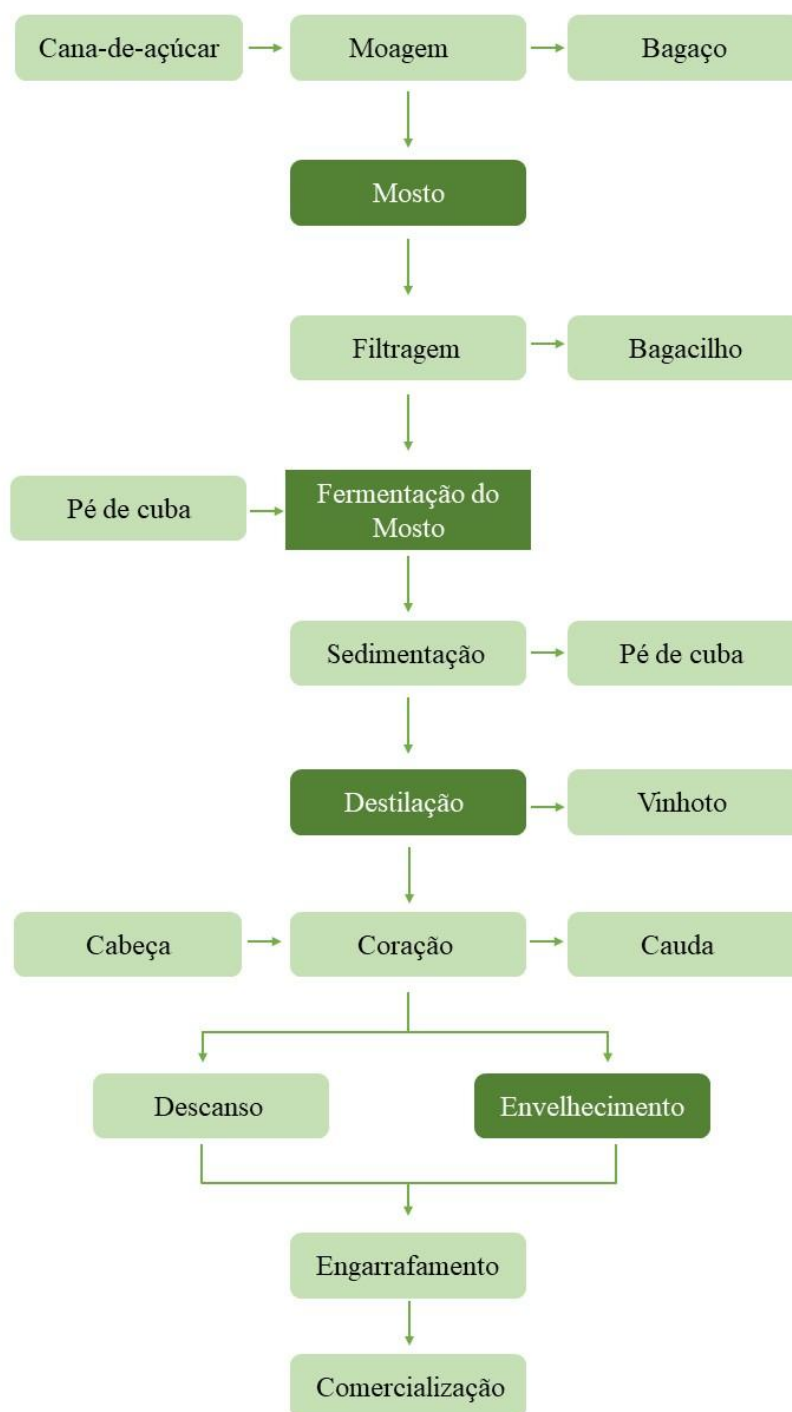
Tendo em vista o aumento do consumo da cachaça, seja em sua forma natural, drinks, licores ou bebidas mistas, além da expansão na exportação, as técnicas e as etapas de produção da cachaça devem ser criteriosamente inspecionadas, a fim de obter um produto padronizado e de alta qualidade, sem que acarrete danos à saúde do consumidor. Com isso, o aumento de estudos e pesquisas a fim de promover a melhoria na produção da bebida é cada vez mais expressivo, de forma que o desenvolvimento de novas tecnologias e a difusão do conhecimento esteja cada vez mais ao alcance dos produtores.

3.2 Cadeia Produtiva

Cardoso (2020) explica que, para a obtenção de um produto de alta qualidade, a cadeia produtiva da cachaça fundamenta-se em quatro etapas fundamentais: plantio e colheita da cana-de-açúcar, fermentação, destilação e envelhecimento da bebida.

A cana-de-açúcar é colhida, submetida a moagem e o caldo obtido é filtrado e decantado, além de ter seu teor de açúcar ajustado. Em seguida, ocorre a conversão do açúcar em etanol, CO₂ e outros compostos, pela ação de leveduras. Após a fermentação, o caldo é destilado em equipamentos adequados e mantidos em tonéis de inox ou de madeira, a fim de promover a estabilização o sabor da bebida. Finalmente, a bebida é envasada e comercializada. A Figura 1, adaptada por Schwan e Dias (2020), descreve sucintamente a cadeia produtiva da cachaça.

Figura 1 – Cadeia produtiva da cachaça de alambique.



Fonte: Adaptada por Schwan e Dias (2020).

3.2.1 Plantio e Colheita da Cana-de-açúcar

Segundo Pimentel e Andrade (2020), a cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, pertencente à família *Poaceae*, gênero *Saccharum* e teve sua origem relatada no sudeste da Ásia, na região de Nova Guiné e Indonésia, chegando ao Brasil no século XVI, com a chegada dos portugueses e plantada, inicialmente, pela extensão litorânea do país.

Apesar de não ser nativa do Brasil, a cultura canavieira tornou-se um dos maiores produtos econômicos do país, tanto na produção de açúcar ou etanol, garantindo assim o título de maior produtor e exportador de cana-de-açúcar e seus derivados. Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2025), citam que a estimativa de produção de cana-de-açúcar para a safra 2025/2026 indica uma produção de 668,8 milhões de toneladas, reduzida em 1,2% da safra anterior. A maior produção de cana-de-açúcar é registrada na Região Sudeste, detendo uma parcela equivalente a 63,5% da produção nacional.

Além da produção de álcool combustível e açúcar, a cana-de-açúcar é muito utilizada em pequenas e médias propriedades brasileiras para a produção de cachaça, bem como alimentação de ruminantes. Para a produção de cachaça, é imprescindível que a cana-de-açúcar escolhida apresente características como alto rendimento de colmos, alto teor de sacarose, médio ou baixo teor de fibras, resistência a pragas e doenças, fácil despalha, resistência à tombamento, boa adaptação às condições ambientais e solos diversos, baixa isoporização e boa brotação de soqueiras, por exemplo. Com a utilização de variedades melhoradas geneticamente, é possível que os rendimentos médios de canaviais sejam maximizados, alcançando taxas produtivas de 85 toneladas por hectare (Aquarone *et al.*, 2005; Pimentel; Andrade, 2020).

No que diz respeito à colheita da cana-de-açúcar, produtores de cachaça e indústrias alcooleiras a fazem tanto de forma mecânica como de forma manual, podendo esses interferirem na qualidade da cachaça. A colheita mecânica, quando não realizada corretamente, pode carrear maior quantidade de terra, maximizando a chance de contaminação microbiana da matéria-prima. Além disso, se não realizadas limpezas periódicas nos equipamentos utilizados para isso, a cana-de-açúcar colhida pode

ocasionar corrosão e abrasão. A colheita manual, muito utilizada por apresentar baixo custo, exige maior atenção quanto às práticas higiênicas para a redução de contaminação microbiana e à condução até a etapa de moagem (Mota; Mendonça; Veiga, 2020).

Em algumas propriedades que optam pela colheita manual, é comumente vista a prática de queima do canavial antes da colheita, justificada por facilitar a colheita pela eliminação da palha, além de garantir a segurança dos cortadores contra folhas afiadas, insetos e animais peçonhentos. No entanto, é uma prática ilegal. Masson *et al.* (2007) apontam que a queima da cana-de-açúcar é responsável por modificações consideráveis na fisiologia e morfologia do colmo, resultando na exsudação do açúcar presente. Como consequência, há a inversão gradativa dos açúcares, incremento na contaminação microbiana e maior aderência de partículas do solo na superfície dos colmos. Além disso, a queima da cana-de-açúcar está diretamente relacionada com o surgimento e aumento das concentrações de contaminantes como furfural e o 5-hidroximetilfurfural, por meio da desidratação das pentoses e hexoses, respectivamente.

3.2.1.1 Moagem e Tratamento do Caldo

Após a colheita, a cana-de-açúcar é submetida a moagem, a fim de obter o caldo a ser fermentado posteriormente. Essa etapa deve ocorrer em, no máximo, 24h após a colheita, uma vez que a demora no transporte e processamento da cana-de-açúcar cortada pode favorecer a perda de sacarose, aumento na contaminação de bactérias lácticas e leveduras e formação de ácidos orgânicos (Filho; Bortoletto; Alcarde, 2016).

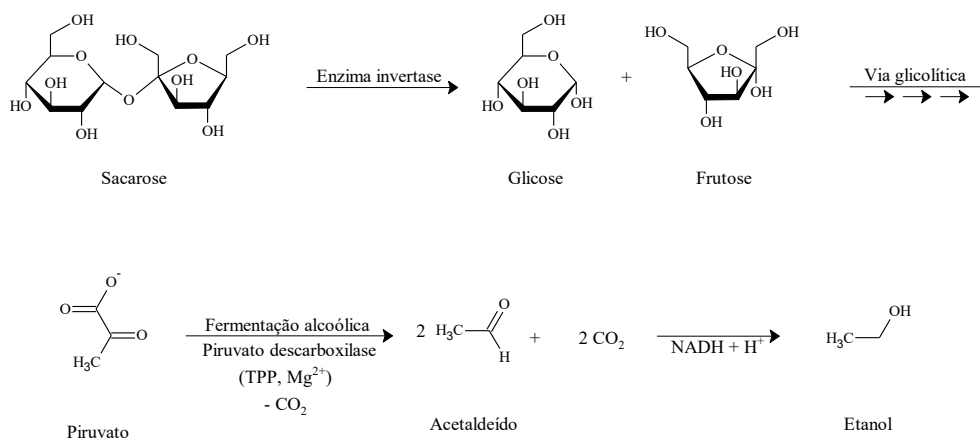
Mota, Mendonça e Veiga (2020) explicam que, pela passagem através de moendas, a cana-de-açúcar é dividida em duas frações: bagaço e caldo. O bagaço é a parte da matéria-prima rica em fibras, enquanto o caldo ou garapa é a fração composta principalmente por água e açúcares, além de aminoácidos, ceras, sais minerais e lipídios, por exemplo. O bagaço resultante nessa etapa pode ser utilizado como combustível nas caldeiras a vapor, enquanto o caldo é tratado para a fermentação.

O caldo obtido deve ser peneirado para a remoção de bagacilhos, folhas e impurezas do solo. Em seguida, o caldo deve ser decantado, permitindo que impurezas

remanescentes mais densas, como areia e terra, se depositem no fundo do decantador, enquanto impurezas de menor densidade permaneçam na superfície dos tanques de decantação. Essas etapas são cruciais para que seja obtido um mosto mais limpo e homogêneo e com menor presença de sólidos que possam interferir negativamente no processo fermentativo e favorecer na formação de compostos indesejáveis, como o metanol. Por fim, é realizada a diluição do caldo, ajustando a concentração de açúcares a níveis adequados para garantir que o processo de fermentação corretamente e completamente (Alcarde, 2017; Bortoletto; Silvello; Alcarde, 2018).

3.2.2 Fermentação

A etapa de fermentação do caldo de cana-de-açúcar é etapa crucial na produção de bebidas alcoólicas, uma vez que nesse passo ocorre, por ação de microrganismos, a conversão de açúcares em etanol e gás carbônico. De acordo com Schwan e Dias (2020), o processo de fermentação é iniciado a partir da hidrólise da sacarose em duas moléculas de glicose e frutose, promovido pela enzima invertase. Pela via glicolítica, dez reações catalisadas por diversas enzimas estão presentes na transformação da glicose em duas moléculas de piruvato que, por sua vez, são descarboxiladas pela ação da enzima piruvato descarboxilase, formando duas moléculas de acetaldeído e duas de gás carbônico. Por fim, a enzima álcool desidrogenase reduz as moléculas de acetaldeído em moléculas de etanol (Figura 2).

Figura 2 – Conversão de açúcar em etanol e CO₂

Fonte: Adaptado de Schwan e Dias (2020).

Além da formação de etanol e CO₂, a fermentação alcoólica também é responsável pela formação de outros compostos secundários de grande importância na formação do perfil sensorial do produto, como álcoois superiores, ácidos orgânicos, aldeídos e ésteres (Oliveira *et al.*, 2005; Alcarde; Monteiro; Belluco, 2012; Portugal *et al.*, 2017).

Quando comparada com outras bebidas alcoólicas, como o vinho, a fermentação do mosto de cana-de-açúcar para a fabricação de cachaça ocorre, normalmente, entre 14 e 24h, de forma descontínua e com reciclo de células. O processo fermentativo da cachaça ocorre em duas etapas: a propagação do microrganismo, com aeração do caldo contendo teores de açúcares próximos a 5 °Brix e, posteriormente, com a fermentação do caldo, com ajuste do caldo para um °Brix entre 14 e 16 (Bortoletto; Silvello; Alcarde, 2018; Schwan; Dias, 2020).

Por ser uma matéria-prima de alta riqueza nutricional, o caldo de cana-de-açúcar pode ser facilmente contaminado por outros microrganismos, capazes de transformar o substrato disponível em outros produtos e, conseqüentemente, reduzindo a produção de álcool durante a fermentação. Com isso, se fazem necessárias técnicas assépticas para o manejo do caldo, além da utilização de leveduras adequadas (Pereira; Acevedo; Alcarde, 2024). Schwan e Dias (2020) explicam que a utilização de linhagens isoladas e

selecionadas do processo de fermentação da cachaça se sobressai ao fermento caipira por promover a obtenção de um produto final uniforme entre safras, maior rendimento alcoólico e menor contaminação por outros microrganismos.

Além da presença de microrganismos contaminantes, outros diversos fatores podem ocasionar a minimização do rendimento da fermentação. Variáveis como acidez, temperatura e disponibilidade de nutrientes e açúcares também podem influenciar na conversão do açúcar em álcool. Como solução, medidas como acidificação do mosto, adição de nitrogênio e controle de temperatura são vistos com bons olhos para que haja maior aproveitamento fermentativo (Reihani; Khosravi-Darani, 2019; Schwan; Dias, 2020).

3.2.3 Destilação

Após fermentado, o caldo é submetido à destilação que, por definição, consiste no processo de separação de substâncias de uma mistura, a partir do aquecimento desta até o seu estado gasoso e, por resfriamento, retorna ao seu estado líquido. Nos processos industriais, Thyssen e Assaf (2022) apontam que a destilação pode ocorrer de diversas formas, mas todas são modificações dos tipos fundamentais: a destilação simples, destilação fracionada, destilação a vácuo e destilação a vapor. Na destilação da cachaça, emprega-se a destilação simples.

Durante o processo da destilação da cachaça, a água e o etanol presentes no mosto fermentado formam uma mistura azeotrópica. Dias e Machado (2020) definem como mistura azeotrópica o conjunto complexo de vapores que apresentam temperatura de ebulição menor que qualquer um dos integrantes da mistura a ser destilada, de forma que não há como separar cada composto de forma isolada. A partir disso, a água e o etanol, que possuem temperatura de ebulição de 100 °C e 78,35 °C, respectivamente, começam a ser separados em temperatura de aquecimento igual a 78,15 °C.

A destilação da cachaça pode ocorrer por meio de equipamentos produzidos de cobre ou por colunas de inox, originando a cachaça de alambique ou a cachaça de coluna, respectivamente. A cachaça destilada em colunas de inox é característica de grandes

fabricantes, onde o mosto fermentado é destilado de forma contínua, enquanto na cachaça de alambique a destilação ocorre descontinuamente e é comum em produções menores. Além dos pontos citados, os dois métodos de destilação diferem em pontos como uniformidade do produto final e composição de componentes secundários de aroma e sabor: a cachaça de alambique apresenta sabor e aroma mais uniforme, de maior complexidade (Granato *et al.*, 2014; Ratkovich *et al.*, 2023).

A cachaça destilada em alambiques de cobre é obtida por um processo de monodestilação, com a separação das frações “cabeça”, “coração” e “cauda”. A fração “cabeça”, correspondente a 1-2% do volume útil da caldeira, é composta por compostos total ou parcialmente solúveis em álcool e são destilados quando o vapor contém elevada concentração de álcool. Já a fração “coração”, a alma da bebida, constitui a fração de interesse e que possui maior equilíbrio dos compostos da bebida, com concentração alcoólica média entre 38% e 42%. Por fim, a fração “cauda” é composta por substâncias solúveis em água e são destilados quando o vapor possui baixa concentração de álcool (Dias; Machado, 2020).

De acordo com Alcarde (2017), é comum recomendar a mistura das frações “cabeça” e “cauda” com um novo vinho a ser destilada, a fim de recuperar o etanol restante e para que os componentes químicos dessas duas frações possam reagir com compostos presentes no novo vinho e originar novos compostos aromáticos. No entanto, outra possibilidade viável é a transformação da “cabeça” e “cauda” em etanol combustível e fertilirrigação, respectivamente.

Quando recém-destilada, a cachaça possui sabor forte e com características sensoriais desagradáveis. Para que haja a suavização desse aspecto, o produto é encaminhado para descanso, sendo armazenadas em recipientes de inox ou barris de madeira.

3.2.4 Envelhecimento

Mesmo que seja uma etapa facultativa, o envelhecimento da cachaça após a etapa de destilação é uma prática de amplo emprego pelos produtores, justificado pelo valor

agregado ao produto. A bebida recém-destilada apresenta características sensoriais que não são apreciáveis por parte dos consumidores. Com isso, o armazenamento e envelhecimento da bebida permite que esse sabor forte seja suavizado a partir da interação entre a bebida armazenada e a madeira dos tonéis.

De acordo com Souza *et al.* (2025), a prática de armazenamento de bebidas em barris de madeira se iniciou de forma desproposita: recipientes de madeira facilitavam o armazenamento, transporte e conservação do produto. No entanto, foram percebidas melhorias no aspecto sensorial do produto. A partir disso, foram aprimoradas técnicas de fabricação e armazenamento, bem como de espécies vegetais passíveis de serem utilizadas para a fabricação de barris e possíveis tratamentos que possam modular a liberação de compostos para a bebida.

Quimicamente falando, durante o envelhecimento, os barris de madeiras atuam como uma membrana semipermeável, permitindo a passagem de vapores de água e álcool, a depender da umidade e temperatura do local que os tonéis são mantidos. Durante essa etapa, a mistura hidroalcoólica permite a extração de compostos da madeira, bem como a hidrólise de macromoléculas, como a lignina, celulose e hemicelulose, em moléculas menores, como óleos voláteis, açúcares, ácidos orgânicos não voláteis e compostos fenólicos.

Quando comparado com a bebida antes do envelhecimento, os parâmetros físico-químicos do produto envelhecido sofrem alterações significativas. O teor de extrato seco, por exemplo, aumenta graças à incorporação de compostos não-voláteis da madeira para o líquido. Já a acidez volátil, aldeídos, furfural e ésteres aumentam por reações de oxidação e esterificação e pela extração de compostos ácidos presentes na madeira. Em contrapartida, percebe-se a diminuição dos parâmetros cobre e metanol (Bortoletto; Alcarde, 2013; Santiago *et al.* 2017; Briceno *et al.*, 2025).

Aquino *et al.* (2006) explicam que, além do tipo da madeira, outras peculiaridades também são capazes de influenciar diretamente na composição química da bebida após o envelhecimento. Estudos de Caldeira, Mateus e Belchior (2006) apontaram que torras mais intensas conferiram maiores intensidades de baunilha, amadeirado, picante, frutas secas, fumaça e adstringência, enquanto notas de álcool, frutadas e cola apresentaram

menores intensidades a bebidas envelhecidas em barris de castanheira e carvalho. Posteriormente, Alcarde (2017) explicou que a tosta, além de auxiliar na moldagem do barril, contribui para modificar as moléculas da madeira, degradando as macromoléculas em níveis maiores ou menores e resultando em diversas substâncias aromáticas e de sabor.

Com a finalidade eliminar bagacilhos oriundos dos barris, após o tempo de envelhecimento, a bebida é filtrada por filtração simples, engarrafadas, rotuladas e lacradas, estando aptas para a comercialização.

3.3 Madeiras utilizadas no processo de envelhecimento

O processo de envelhecimento é responsável pela melhoria dos aspectos organolépticos da bebida recém-distilada e a maximização do valor agregado do produto final. Souza e colaboradores (2025) apontam que a cachaça compõe uma parcela considerável de bebidas envelhecidas consumidas mundialmente.

Em uma visão mundial, a madeira mais utilizada para fabricação de barris de envelhecimento de bebidas é o carvalho (*Quercus* sp.). Sua vasta utilização pode ser explicada pela disponibilidade em países da Europa e América do Norte, além de apresentar características desejáveis como densidade, cor, cheiro, gosto, permeabilidade, resistência mecânica e durabilidade natural. Por não ser uma planta nativa do Brasil, se faz necessária a importação dessa madeira para a fabricação e manutenção de barris de carvalho, o que ocasiona no aumento do gasto para os produtores. Como alternativa para esse processo, novas madeiras brasileiras têm sido estudadas para a fabricação de barris de envelhecimento (Pielech-Przybylska; Balcerek, 2019; Tarko; Krankowski; Duda-Chodak, 2023; Souza *et al.*, 2025).

Castro (2024) aponta que o envelhecimento de cachaças em carvalho e em outras madeiras apresentam diferenças significativas entre si devido às características vegetais de cada espécie, as quais são influenciadas por fatores internos, como a composição química da madeira, densidade e porosidade e parte do tronco utilizada na fabricação do barril, e fatores externos, como clima e solo que a planta se desenvolveu e grau de tosta de barril. A escolha da espécie vegetal para uso na tanoaria deve ser definida de acordo

com as características desejáveis de cor, aromas, disponibilidade, herança cultural e legislação.

Para Mori *et al.* (2003), o uso de outras madeiras é visto como promissora para a deficiência de madeiras nobres para a fabricação de barris. Em seus estudos relacionados ao potencial do uso de barris de eucalipto para a fabricação de barris de envelhecimento, os autores concluíram que o uso dessa espécie para a fabricação de tonéis de envelhecimento é uma alternativa viável, justificada pela composição química semelhante ao carvalho, baixa permeabilidade a líquidos e a conservação dos parâmetros físico-químicos da bebida.

Diferentemente de outras bebidas envelhecidas, como uísque, tequila e vinho, a cachaça não apresenta restrições relacionadas a espécie vegetal utilizada no envelhecimento, possibilitando o uso de outras madeiras para essa finalidade. Com a riqueza vegetal brasileira disponível e alto valor econômico, a aplicação de espécies nativas para fins de tanoaria mostra-se viável, de modo a garantir um destilado envelhecido de características sensoriais distintas às aquelas já conhecidas, permitindo a criação de produtos de forte identidade regional e maximizando a valorização de biomas brasileiros (Santos *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2025).

De acordo com Mendes *et al.* (2020), algumas das principais madeiras nacionais utilizadas para a fabricação de barris de envelhecimento e armazenamento são o amendoim (*Pterogyne nitens*), bálsamo (*Myroxylon peruiferum*), freijó (*Cordia goeldiana*), amburana (*Amburana cearensis*), ipê amarelo (*Tabebuia vellosa*), ipê roxo (*Tabebuia avellanedae*), jequitibá (*Cariniana legalis*), canela-sassafrás (*Ocotea pretiosa*) e jatobá (*Hymenaea caribae*). Quando utilizadas de forma singular ou em *blends*, é possível a maximização da complexidade aromática do produto final, conferindo sabores únicos e reconhecíveis.

3.4 Madeiras nativas e exóticas utilizadas no envelhecimento

A utilização de madeiras nativas brasileiras data ao período colonial, como alternativa viável à importação de barris de carvalho, que apresentavam alto custo de

importação e dificuldade de logística. Atualmente, o uso dessas espécies se mostra como alternativas para criação de novos produtos com forte identidade regional, oferecendo características gustativas peculiares e atraentes pela extração de compostos específicos (Silva *et al.*, 2025; Souza *et al.*, 2025).

Scheid (2022) aponta que são consideradas espécies vegetais nativas àquelas árvores naturais de uma área ou região, podendo ser endêmicas (existentes apenas em uma área geográfica limitada) ou estarem presentes em mais de uma região. As espécies tropicais consistem naquelas que ocorrem naturalmente em regiões tropicais do mundo, de clima quente e úmido. Já as espécies exóticas dizem respeito àquelas que não são naturais daquele local e foram introduzidas a uma determinada região de forma acidental ou intencional, e podem ser consideradas como invasoras (desenvolve-se em outros lugares com facilidade e pode ameaçar os ecossistemas naturais daquele espaço, disputando por água, nutrientes e território) ou não invasoras.

Popularmente conhecida como jequitibá-rosa, a espécie *Cariniana legalis* é uma espécie arbórea nativa da Amazônia e comumente utilizada na construção civil, carpintaria, marcenaria, tabuados e compensados, por exemplo, bem como em programa de reflorestamento. É amplamente encontrada nos estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul. Além de aplicações para fabricações de móveis, o jequitibá-rosa apresenta atividade biológica frente a afecções e inflamações a partir da aplicação da resina. Quando utilizada para o envelhecimento de bebidas, essa espécie confere aromas agradáveis e “flavor” complexo que pode ser comparado com o carvalho americano, sem que haja modificações na sua coloração (Rêgo; Possamai, 2001; Ribeiro *et al.*, 2015; Fey *et al.*, 2020; Lacerda *et al.*, 2025).

O freijó (*Cordia goeldiana*) é uma espécie neotropical nativa da América Central e América do Sul. Sua madeira apresenta boa durabilidade e aceitação no mercado, podendo ser aplicada na fabricação de painéis e nanofibras de celulose, bem como em projetos paisagísticos e de arborização. No que diz respeito à fabricação de barris para o envelhecimento de bebidas, o freijó ainda é pouco utilizado, mas vêm ganhando visibilidade por conferir compostos fenólicos como catequina, resveratrol, ácido gálico e ácido vanílico ao produto (Mascarenhas *et al.*, 2021).

A espécie *Hymenaea courbaril* L., vulgarmente conhecido como jatobá, é uma espécie vegetal pertencente à família Fabaceae, encontrada em quase todo o território brasileiro. Suas aplicações podem ser facilmente vistas na construção civil e na fabricação de móveis, enquanto seu potencial farmacológico é comprovado frente a problemas respiratórios e estomacais, por exemplo. No envelhecimento de cachaças, essa espécie proporciona tonalidade amarelada e sensorial de notas intensas herbáceas, doces e picantes (Souza *et al.*, 2025).

A amburana (*Amburana cearensis*) é uma espécie vegetal da caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, de ampla distribuição no Nordeste e de vasta aplicabilidade na farmacologia, carpintaria e perfuraria. No envelhecimento de cachaças, a amburana pode contribuir com altas concentrações de compostos como o ácido vanílico, cumarina e vanilina, além de proporcionar um perfil aromático muito característico ao carvalho, intensamente aromático e adocicado (Dantas *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2025).

Handroanthus albus, comumente conhecido como ipê-amarelo, é uma árvore brasileira nativa de vasta distribuição no território nacional e de potencial ornamental e medicinal. Quando em comparação com outras madeiras brasileiras, o ipê apresenta maiores concentrações de taninos e ligninas, acarretando uma tonalidade mais intensa e textura encorpada e sensorial composto por forte presença de notas amadeiradas e cítricas sutis (Maria-Ferreira *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2025).

O cumaru (*Dipteryx odorata*) é uma espécie vegetal nativa da Floresta Amazônica e que pertence à família Fabaceae. Seus frutos apresentam potencial de consumo alimentício e farmacológico, enquanto sua madeira pode ser utilizada na indústria madeireira. Suas sementes são ricas em cumarinas, composto químico que confere aroma adocicado remetente à baunilha e amêndoas. Quando utilizada para o envelhecimento de destilados, o cumaru confere coloração intensa e perfil sensorial semelhante ao carvalho, com notas de sabores remetentes à alcoólico, baunilha e picante (Neto; Silva; Gomes, 2023; Bonfim; Casabianca; Oliveira, 2025; Moraes *et al.*, 2025; Simioni *et al.*, 2025).

A utilização de madeiras do gênero *Eucalyptus* para o envelhecimento de cachaças pode ser favorável graças a ampla gama de variação de cor, odor, sabor, permeabilidade, densidade e durabilidade da madeira. Além dessas características, o eucalipto também

apresenta alta produtividade e rápido crescimento, sendo o Brasil o maior produtor dessa espécie fora do seu habitat natural (Souza *et al.*, 2025).

Figliolia, Aguiar e Silva (2006) citam que a espécie *Myroxylon peruiferum* L., popularmente conhecida como Cabreúva-vermelha e bálsamo, ocorre de forma natural por todo o território brasileiro e apresenta uma madeira densa e de características desejáveis na construção civil e fabricação de móveis. A aplicação dessa espécie para o envelhecimento de cachaças já é relatada pela literatura, conferindo coloração avermelhada, proveniente de seus taninos, e concentrações de ácidos gálico, elágico e siríngico, fenol, siringaldeído, vanilina e eugenol (Zacaroni *et al.*, 2011; Santiago *et al.*, 2017).

Araribá, denominada cientificamente por *Centrolobium robustum*, é uma planta oriunda da Mata Atlântica, com distribuição restrita ao Sudeste do Brasil. Sua espécie pode ser efetivamente utilizada em ações de reflorestamento, paisagismo e construção civil. No envelhecimento de destilados, essa madeira confere características de maciez, equilibrada acidez e coloração amarela, com aromas intensos florais e frutados, e com doçura semelhante ao chocolate (Vasconcellos *et al.*, 2016; Simoncini *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2025).

Ocotea odorífera, conhecida como canela-sassafrás, sassafrás, canela-parda e sassafrás-brasileiro, é uma planta nativa brasileira, que pode ser encontrada desde o Sul da Bahia até o Rio Grande do Sul. Sua madeira já é amplamente utilizada na fabricação de barris de envelhecimento de cachaça, conferindo ao produto notas doces e picantes, com um suave toque mentolado (Filho; Nogueira, 2005; Souza *et al.*, 2025).

A jaqueira (*Artocarpus heterophyllus*) é uma espécie vegetal exótica originada da Ásia e de grande cultivo no Brasil. Sua aplicabilidade pode ser vista na indústria madeireira, farmacêutica e ambiental, por exemplo. Para o envelhecimento de destilados, barris fabricados a partir dessa espécie podem contribuir na modulação do perfil sensorial a partir da incorporação de fenólicos advindos da madeira (Nansereko; Muyonga, 2021; Santos *et al.*, 2025).

A grápia (*Apuleia leiocarpa*) é uma espécie vegetal da família Fabaceae, de alta distribuição pelo Brasil, indo do Nordeste brasileiro até o território uruguaio e de inúmeras aplicações industriais (Carvalho *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2022). A utilização dessa madeira para fins de envelhecimento de cachaça já foi relatada na literatura, contribuindo com uma coloração límpida, com baixa concentração de compostos fenólicos e sabor adocicado e menos ácido ao produto final (Simoncini *et al.*, 2022).

3.5 Componentes Secundários e Contaminantes

Formados durante toda a cadeia produtiva e em quantidades inferiores, os compostos secundários desempenham papel de suma importância para o produto final, garantindo aspectos agradáveis à visão, olfato e paladar. Saerens *et al.* (2010) explicam que as substâncias aromatizantes produzidas por leveduras são divididas em seis principais grupos: ácidos orgânicos, álcoois superiores, compostos carbonílicos, moléculas contendo enxofre, compostos fenólicos e ésteres voláteis. Segundo Cardoso e colaboradores (2020), no que diz respeito à saúde do consumidor, os compostos presentes na cachaça podem ser classificados como tóxicos e atóxicos, que devem ser ingeridos em concentrações inferiores aos estabelecidos pela legislação vigente.

Atualmente, a Instrução Normativa nº 539 de 26 de dezembro de 2022 (Brasil, 2022) estabelece os PIQ's para cachaças e aguardentes de cana-de-açúcar. Os Quadros 1 e 2 apresentam os limites mínimos e máximos estabelecidos por essa Instrução para os parâmetros físico-químicos e para contaminantes orgânicos e inorgânicos, respectivamente, bem como suas respectivas unidades. O coeficiente de congêneres corresponde ao somatório dos teores de acidez volátil, ésteres, aldeídos, furfural e álcoois superiores, enquanto os álcoois superiores correspondem à soma dos álcoois isobutílico (2-metilpropanol), isoamílicos (2-metil-1butanol e 3-metil-1-butanol) e propílico (1-propanol).

Quadro 1 – Limites superior e inferior dos parâmetros físico-químicos estabelecidos dos Padrões de Identidade e Qualidade para cachaça e aguardente de cana-de-açúcar

Parâmetro	Limite		Unidade
	Min	Max	
Graduação alcoólica (cachaça)	38	48	% v/v de álcool etílico a 20°C
Graduação alcoólica (aguardente de cana)	38	54	% v/v de álcool etílico a 20°C
Acidez Volátil, expressa em ácido acético	-	150	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Ésteres Totais, expressos em acetato de etila	-	200	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Aldeídos Totais, expressos em aldeído acético	-	30	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Soma de Furfural e 5-hidroximetilfurfural	-	5	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Álcoois superiores	-	360	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Coefficiente de Congêneres	200	650	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Compostos Fenólicos Totais (aguardente de cana envelhecida)	Presente		-
Açúcares totais, em glicose (aguardente de cana)	-	≤ 6,0	g L ⁻¹
Açúcares totais, em glicose (aguardente de cana adoçada)	> 6,0	< 30	g L ⁻¹

Fonte: Brasil (2022).

Quadro 2 – Limites de contaminantes orgânicos e inorgânicos dos Padrões de Identidade e Qualidade para cachaça e aguardente de cana-de-açúcar

Parâmetro	Limite Máximo	Unidade
Metanol	20	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Cobre	5,0	mg L ⁻¹
Carbamato de Etila	210	µg L ⁻¹
2-propenal (Acroleína)	5	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Álcool 1-butanol	3	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro
Álcool 2-butanol	10	mg 100 mL ⁻¹ de álcool anidro

Fonte: Brasil (2022).

Cardoso *et al.* (2020) explicam que altos teores de acidez da cachaça podem ser provenientes da contaminação da matéria-prima por bactérias acéticas, antes ou depois da moagem, pela contaminação do mosto entre o período da fermentação e destilação, bem como no processo de envelhecimento, uma vez que a interação da bebida com o barril é capaz de extrair compostos de natureza ácida.

Para Santos (2022), os aldeídos são formados no início da fermentação por ação das leveduras, sendo o acetaldeído o de maior presença (cerca de 90%). Origina-se pela oxidação do etanol e é formado, principalmente, nas primeiras horas de fermentação. Do ponto de vista sensorial, o excesso de aldeídos é capaz de promover incômodos nas fossas nasais e lacrimejamento. No organismo, podem ocasionar intoxicações e dor de cabeça.

Os álcoois superiores são definidos como álcoois que contém mais de três átomos de carbono, formados por oxidação ou pela atividade da levedura no processo de fermentação e que, quando presente na bebida, conferem aromas florais. Os principais compostos dessa classe encontrados em cachaças e aguardentes são os álcoois 3-metil-1-butanol (álcool isoamílico), 1-pentanol (amílico) e 1-propanol (propílico). Comumente, aguardentes destiladas em alambiques apresentam maior concentração de álcoois superiores quando comparados a aguardentes destiladas em colunas de inox, uma vez que pelo método contínuo de destilação os vapores alcoólicos alcançam concentrações de

etanol superiores a 60%. Nessas concentrações de etanol, os álcoois superiores possuem tendência de acumularem-se na fase líquida da matriz líquida-vapor em destilação (Alcarde, 2017; Cardoso, 2020).

Assim como os compostos desejáveis na cachaça, os compostos secundários indesejáveis podem ser formados durante as mais diversas etapas da fabricação de cachaça ou podem ser incorporados pelo contato com recipientes que armazenam ou transportam a matéria-prima ou a bebida.

Masson *et al.* (2007) explicam que a formação de furfural e 5-hidroximetilfurfural é ocasionada pela decomposição química de pentoses e hexoses, respectivamente, e podem ser formadas em etapas distintas da fabricação de cachaça, como na utilização de matéria-prima queimada, na pirogenização de matéria orgânica nos alambiques e no envelhecimento da bebida.

De acordo com Barbosa (2021), a utilização de equipamentos fabricados de cobre favorece a eliminação de odores desagradáveis, uma vez que íons cúpricos são capazes de catalisar a oxidação do gás sulfídrico e tióis para sulfetos de cobre e dissulfetos. Quando consumido em concentrações superior ao permitido, o cobre pode ocasionar epilepsia, melanoma e Alzheimer. Silva e colaboradores (2022) citam que casos que excedem os limites superiores de cobre em bebidas destiladas em equipamentos de cobre podem estar relacionados a más condições assépticas de destiladores. Por isso, se faz extremamente necessária a rotina de limpeza adequada para a remoção do azinhavre (carbonato básico de cobre) solúvel em meio ácido. Uma alternativa para a redução dos teores de cobre é a passagem da bebida destilada por filtros de resina de troca iônica, carvão ativado ou quitosana. No entanto, esses filtros podem remover outros congêneres fundamentais para os aspectos sensoriais da cachaça.

Alvarenga *et al.* (2023) explicam que a acroleína é um aldeído que não possui rotas de formação bem definidas, mas sugere-se que pode ser formada pela desidratação do glicerol produzido durante a fermentação alcoólica e no processo de destilação, bem como pela contaminação do mosto por bactérias ácido-láticas. A intoxicação por esse contaminante pode ocasionar reação lacrimogênia, irritabilidade ao nariz e garganta e severos danos ao sistema nervoso central.

O carbamato de etila (CE) é um éster etílico do ácido carbâmico de alta solubilidade em água e etanol e naturalmente formado em alimentos e bebidas fermentadas por precursores como ácido cianídrico, citrulina, ureia e aminoácidos. Sua atividade carcinogênica conhecida classifica-o como provável carcinogênico para humanos (Caruso; Nagato; Alaburda, 2010; Cardoso *et al.*, 2020). Pesquisas recentes de Cardoso e colaboradores (2025) indicaram que sua formação está relacionada com o glicosídeo cianogênico Dhurrin, localizado em maiores concentrações nas partes superiores da cana-de-açúcar (pontas). O desponte durante o corte, quando feito de forma incorreta, pode resultar em maiores concentrações desse contaminante no produto final.

Os álcoois 1-butanol e 2-butanol, vulgarmente conhecidos como butílico e *sec*-butílico, respectivamente, são provenientes da contaminação do mosto pela bactéria *Clostridium acetobutylicum* e que deteriora fortemente o sabor da bebida. No corpo humano, a exposição ao 1-butanol promove irritação ocular, cutânea e no trato respiratório, enquanto a exposição ao 2-butanol acarreta irritação ocular significativa e alterações hepáticas e neurológicas. Práticas de armazenamento adequado e redução no tempo de moagem são eficazes para a minimização da presença desses microrganismos no caldo e, conseqüentemente, desses contaminantes na bebida (WHO, 1987; Alcarde, 2017; Cardoso *et al.*, 2020).

O metanol, outro álcool indesejável que pode ser detectado na cachaça, é originado a partir da degradação da pectina das fibras da cana-de-açúcar, quando o bagacilho está presente no caldo a ser fermentado e sob condições ácidas. Quando ingerido, o metanol é metabolizado em formaldeído pela enzima álcool desidrogenase, seguido pelo ácido fórmico a partir da ação da enzima aldeído desidrogenase de forma rápida. No organismo, a intoxicação por metanol pode ocasionar cegueira, acidose grave, coma e, em alguns casos, óbito (Filho; Bortoletto; Alcarde, 2016; Destanoğlu; Ateş, 2019; Cardoso *et al.*, 2020).

Os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) são compostos orgânicos produzidos durante a combustão incompleta de produtos de carbono. A absorção desses compostos pelo organismo humano pode ocorrer pela inalação pelo trato respiratório, absorção pela camada dérmica e pela ingestão pelo trato gastrointestinal (mesma via de absorção do etanol) são classificados como carcinogênicos e mutagênicos pela IARC. No

âmbito produtivo da cachaça, apesar da legislação vigente ainda não estabelece os teores máximos desses compostos, sabe-se que a contaminação da bebida por HPAs são decorrentes da localização de canaviais perto de rodovias, queima da cana-de-açúcar e uso de lubrificantes em equipamentos (Riachi *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2022; King *et al.*, 2024). Além dessas fontes de contaminação, estudos realizados por Machado *et al.* (2014), Souza *et al.* (2022) e Abrantes *et al.* (2025) apontaram que a presença desses também pode ser resultante do acondicionamento em recipientes fabricados de materiais indevidos, como politereftalato de etileno (PET). No caso de bebidas envelhecidas, o processo de carbonização de barris pode influenciar na contaminação do produto final por esses compostos (Barbosa *et al.*, 2022).

3.6 Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos constituem uma das maiores classes de moléculas bioativas, formadas no metabolismo secundário de plantas a partir do Ácido Chiquímico e do Acetil Co-A, possuindo inúmeras propriedades biológicas, atuando na redução do risco de doenças infecciosas, carcinogênicas e cardiovasculares, assim como na prevenção da oxidação celular (Pereira *et al.*, 2016). Sua atividade vegetal relaciona-se à proteção do indivíduo, garantindo sobrevivência e resistência à patógenos e à ambientes de estresse. Para Boudet (2007), alguns compostos fenólicos podem estar amplamente distribuídos em espécies vegetais, enquanto outros estão restritos a gêneros ou famílias vegetais, servindo, em alguns casos, como biomarcadores auxiliares no estudo taxonômico destas.

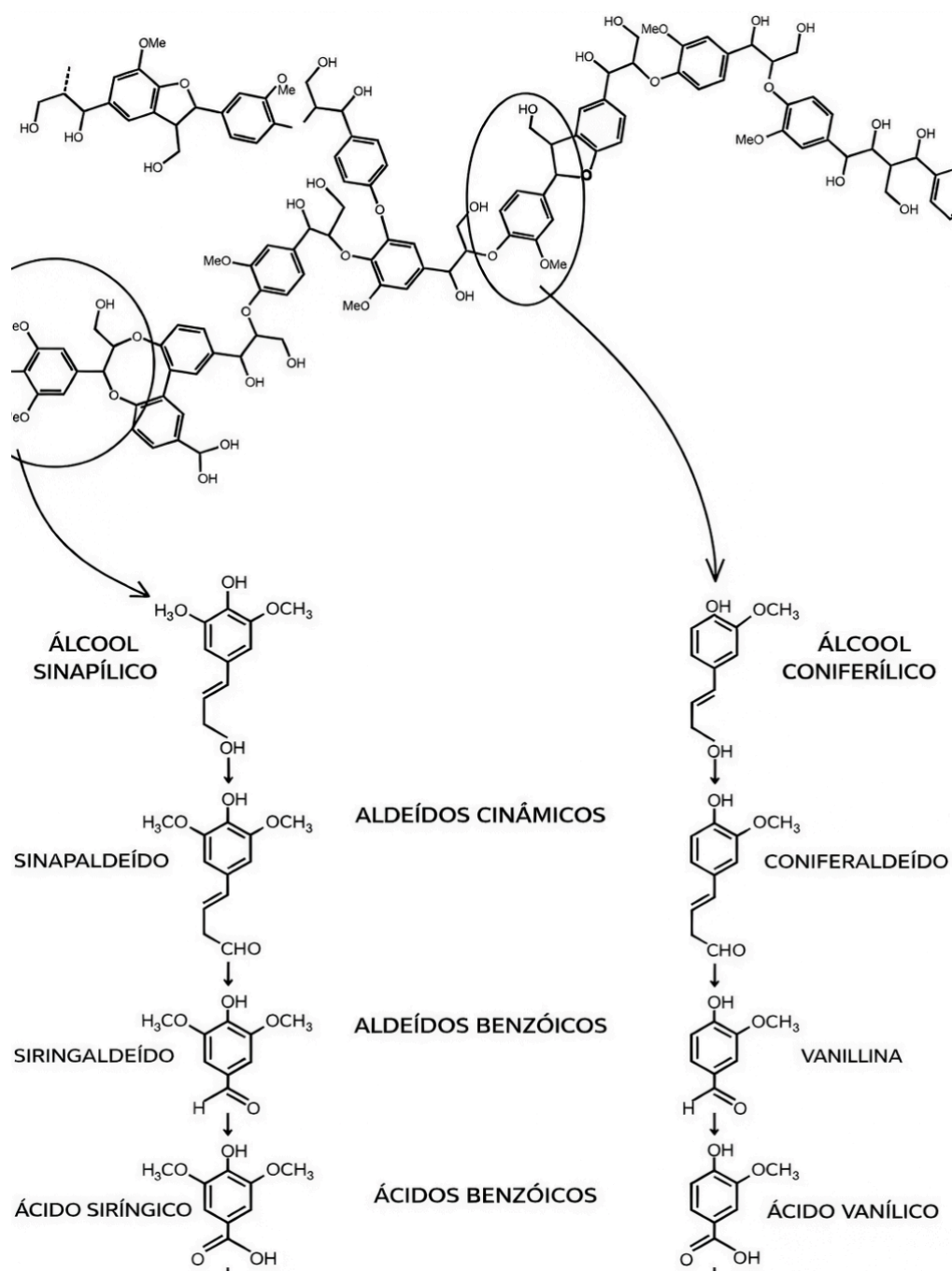
Quimicamente falando, os compostos fenólicos possuem um anel aromático, com um ou mais substituintes hidroxilas. Esses compostos podem ser divididos em dois grandes grupos: flavonoides (isoflavonoides, antocianidinas, flavanois, flavonois, flavonas e flavononas) e não flavonoides (ácidos hidroxicinâmicos e hidroxibenzoicos, estilbenoides, lignoides e cumarinas) (Carvalho *et al.*, 2020).

Quando presentes em alimentos, esses compostos contribuem significativamente para características sensoriais. De acordo com Pereira e Angelis-Pereira (2014),

tonalidades de roxo, azul e vermelho podem ser provenientes da presença de antocianinas. Em relação ao sabor, garantem adstringência, amargor e até mesmo doçura. Barbosa *et al.* (2022) citam que, em bebidas envelhecidas, os compostos fenólicos são capazes de agregarem sabor, aroma e cor. Isso é facilmente visto em cachaças envelhecidas em barris de carvalho, que apresentam cor dourada límpida, enquanto barris de bálsamo apresentam cor amarelo esverdeado, por exemplo.

Dentre as macromoléculas presentes na estrutura da madeira, a lignina apresenta maior potencial de atuar como marcadores de envelhecimento. Na sua estrutura química, nota-se a presença de ramos de álcoois coniferil e sinapil, compostos de guaiacol e siringol, respectivamente. O álcool coniferílico origina o coniferaldeído, que é convertido em vanilina e, posteriormente, oxidado em ácido vanílico. Já o álcool sinapílico gera sinapaldeído, que é transformado em siringaldeído e, em seguida, oxidado a ácido sirínico. A degradação dessas macromoléculas, assim como outros compostos, pode sofrer influências de parâmetros como tempo de armazenamento, temperatura do armazém e graduação alcoólica do destilado (Castro *et al.*, 2020; Mendes, 2020; Silvello; Alcarde, 2020). A Figura 3 ilustra a formação de aldeídos e ácidos a partir da lignina.

Figura 3 – Formação de aldeídos cinâmico e benzoico e ácidos benzoicos a partir da lignina.



Fonte: Castro *et al.* (2020).

Sabe-se que fatores bióticos e abióticos podem influenciar diretamente na produção de metabólitos secundários em vegetais, sejam esses da mesma espécie ou de espécies diferentes. Logo, madeiras utilizadas no envelhecimento podem apresentar diferenças na composição fenólica incorporada nas bebidas. Ademais, estudos apontam que outros fatores como o tempo de envelhecimento, intensidade de tosta e o tempo de utilização do barril também podem influenciar diretamente na composição fenólica da bebida (Vichi *et al.*, 2007; Bortoletto; Silvello; Alcarde, 2021). Esses pontos foram comprovados por Castro *et al.* (2023), que, ao investigarem a influência do reuso de barris no envelhecimento de cachaças, concluíram que a composição fenólica aumenta de acordo com tempo de envelhecimento, número de ciclos de reuso e espécie de carvalho aplicada.

Segundo Moreira, Netto e Maria (2012), o perfil de compostos fenólicos em bebidas serve como indicador de envelhecimento e autenticidade do produto final, uma vez que cada tipo de madeira confere compostos específicos à bebida. Por exemplo, bebidas envelhecidas em barris de carvalho apresentam elevadas concentrações de ácidos elágico e vanílico ao produto, enquanto barris de amburana garantem ácido vanílico e sinapaldeído; bálsamo confere vanilina e ácido elágico; jequitibá confere ácido gálico; e barris de ipê conferem o coniferaldeído e os ácidos sirínico e vanílico.

Como anteriormente citado, os compostos fenólicos não contribuem apenas para os aspectos organolépticos da cachaça. No entanto, quando ingeridos em concentrações adequadas, apresentam relevância para a saúde, podendo contribuir para a atividade antioxidante do consumidor. Oliveira-Alves *et al.* (2024) apontam que os efeitos desses compostos na saúde dependem de sua composição química e de suas possíveis interações com o etanol e com outros compostos bioativos.

Rodrigues *et al.* (2016), estudando a atividade antioxidante de extratos alcoólicos de cachaças envelhecidas em barris de carvalho, amburana, bálsamo e jequitibá, observaram que esses apresentaram alto potencial antioxidante por meio da estabilização de radicais livres, inibição de peroxidação lipídica e redução do Fe^{+3} . Nesse mesmo período, foram testadas a capacidade fungicida desses extratos sobre fungos *Aspergillus* e *Penicillium*.

Posteriormente, estudos de Hinojosa-Nogueira *et al.* (2020) também investigaram o potencial antioxidante de runs envelhecidos utilizando três métodos distintos (ABTS, DPPH e FRAP). Como resultados, os autores obtiveram maiores potenciais antioxidantes a partir de amostras envelhecidas por um intervalo maior de tempo, tanto pelo método de envelhecimento por soleira quanto para os runs envelhecidos em barris utilizados no envelhecimento de vinhos. Por esses mesmos métodos, Oliveira-Alves e colaboradores (2022) apontaram que quatro amostras de aguardentes vínicas envelhecidas por métodos diferentes não apresentaram resultados significativamente diferentes, o que foi justificado pela variabilidade da madeira utilizada e pelo nível de micro-oxigenação.

3.7 Análise sensorial de bebidas

A análise sensorial é definida como um método experimental analítico das características organolépticas de alimentos (textura, sabor, cor, aparência e cheiro) a partir dos cinco sentidos humanos. Na indústria alimentícia, dados obtidos a partir de análises sensoriais são importantes para a manutenção do controle de qualidade e para a tomada de decisões em todas as etapas de produção a partir da aceitação/rejeição de produtos por parte dos consumidores (Natale *et al.*, 1998; Cejudo-Bastante *et al.*, 2013; Ruiz-Capillas; Herrero, 2021).

Os métodos de análises sensoriais tradicionais são os métodos executados com o sistema sensorial humano e dividem-se em quatro pontos principais: reconhecimento de diferenças entre amostras, escala e categoria de diferenças entre essas amostras, análise descritiva de forma qualitativa e quantitativa de intensidade de amostras e teste de consumidor, a fim de entender as reações hedônicas e emocionais do consumidor a cada amostra. No entanto, esses métodos apresentam algumas desvantagens de aplicação, como alto custo, necessidade de pré-tratamento da amostra, inconsistência devido à fadiga humana e inadequação para monitoramento *on-line* e/ou medições em tempo hábil. Como exemplos desses métodos, pode-se citar o método do triângulo, o teste de classificação e a escala hedônica (Buratti *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2024).

A avaliação sensorial de cachaças mostra-se de suma importância nas etapas de controle de qualidade, reformulação de produtos já existentes, desenvolvimento de novos produtos e aceitação de produtos por parte dos consumidores. Pela necessidade de alcançar todo o público mundial, testes sensoriais da bebida despontam como complemento para as análises químicas já desenvolvidas (Odello *et al.*, 2009; Pinheiro *et al.*, 2020).

Alguns métodos já foram muito empregados para obtenção de características organolépticas de cachaças. Odello e colaboradores (2009) aplicaram avaliação sensorial de descritores quantitativos e qualitativos e método sensorial afetivo para análise de 36 amostras de cachaças brasileiras a partir de painelistas treinados. A partir disso, concluíram que as amostras destiladas em alambiques de cobre e as amostras envelhecidas são mais aceitas pelo público consumidor.

Posteriormente, a fim de compreender como o inóculo misto e leveduras selecionadas podem influenciar o perfil sensorial do produto final, Amorim, Schwan e Duarte (2016) analisaram três lotes de cachaças para os parâmetros de sabor, aroma, aparência e aceitabilidade, aplicando o método de escala hedônica. Os resultados indicaram que os lotes fermentados utilizando inóculos mistos apresentaram melhores avaliações sensoriais quando comparados àqueles fermentados apenas com *S. cerevisiae*. Esse fato foi concretizado a partir da caracterização volátil, que indicou maiores concentrações de ésteres e álcoois superiores desejáveis nessas amostras.

Avaliando a influência de espécies de madeiras e níveis de tostas, Bortoletto, Corrêa e Alcarde (2016) aplicaram o método de Análise Descritiva Quantitativa (ADQ) com vocabulário obtido por Flash Profile, para análise de parâmetros relacionados a coloração, aroma, sabor e sensações. Os resultados apresentaram que a intensidade da torra modula a complexidade química e sensorial do destilado, intensificando a coloração, composição fenólica e congêneres de maturação, garantindo a presença de notas amadeiradas, vaniladas, doces e suaves ao produto final.

Mesmo com a relevância da análise sensorial por métodos mais tradicionais, as limitações por esses métodos ainda podem ser consideradas fortes entraves na ciência de alimentos. Com isso, novas tecnologias analíticas, como sensores biônicos, apresentam-

se como ferramentas complementares e promissoras, permitindo maiores informações qualitativas de forma rápida, fácil e reprodutível. Suas aplicações acarretam na maior conformidade de caracterização e melhor monitoramento da qualidade da bebida.

3.8 Sensores biônicos

A avaliação de parâmetros sensoriais de alimentos e bebidas de forma rápida, contínua e direta durante a cadeia produtiva e comercialização mostrou-se de grande importância para a garantia de um produto final de qualidade e otimização da produção. A partir de testes sensoriais, é possível identificar falhas de produção, garantir melhor padronização do produto final e identificar as características mais relevantes do produto em questão.

Para a obtenção de informações de percepções sensoriais, é necessário um grupo de consumidores treinados em um ambiente que apresente estrutura adequada, demandando custo e tempo. Como alternativa para os métodos analíticos tradicionais, a aplicação de sensores biônicos, como língua e nariz eletrônicos, vem sendo difundidas com eficácia. Suas aplicações já foram vistas no controle de qualidade de bebidas e alimentos e na indústria farmacêutica, por exemplo.

Os sensores biônicos são desenvolvidos a partir do trabalho interdisciplinar das ciências biológicas e de materiais e de engenharias, e utilizam unidades sensíveis formadas por materiais físicos e químicos com capacidades de formar um arranjo de sensores que imitam a percepção de órgãos humanos. Com o sinal de resposta gerado pelo arranjo de sensores, combinado com o método de reconhecimento de padrões, é possível analisar diversas substâncias de forma qualitativa e identificar, de uma forma geral, sistemas complexos (Chen; Lin; Zhao, 2021).

A utilização de instrumentos sensoriais inteligentes promove a redução de custo de mão de obra, custo de tempo de treinamentos, resultados rápidos e confiáveis a partir de uma pequena quantidade amostral, sem exigência de preparo de amostras em muitas etapas ou alto custo. A possibilidade da inserção dessas ferramentas métricas durante a linha de produção para análises com baixa geração de resíduos e sem promoção de

contaminações durante o processo faz com que essas técnicas sejam ainda mais atrativas (Tian *et al.*, 2019; Mahanti *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024; García-Hernández *et al.*, 2025).

Na produção de cachaça *in situ*, a aplicação desses sensores biônicos para monitoramento da cadeia produtiva e análise de características organolépticas ainda é pouco difundida. Comumente, o monitoramento da cadeia produtiva é feito de forma tradicional e análises químicas realizadas ocorrem apenas quando a bebida já está pronta, enquanto os testes sensoriais são realizados a partir dos métodos sensoriais já conhecidos, a partir de provadores selecionados. Logo, com a aplicação dessas ferramentas em tempo real, a obtenção contínua de informações sobre a produção seria otimizada, permitindo a tomada de decisões de forma mais rápida e estratégica.

3.8.1 Língua eletrônica

A língua eletrônica, também denominada como *e-tongue*, consiste em um sistema experimental formada por uma série de sensores inespecíficos capazes de obter respostas de analitos de forma semelhante ao obtido pelo paladar humano. De uma forma geral, o sistema da língua eletrônica é composto por uma matriz receptora, um sistema transdutor de sinais (capaz de converter os sinais obtidos em sinais elétricos) e um sistema de processamento de dados capaz de analisar as informações obtidas. O sistema de detecção de padrões é capaz de reconhecer moléculas solúveis não voláteis, simples ou complexas, que formam o sabor de uma amostra. Seus princípios de funcionamento se baseiam em mensurações eletroquímicas (amperometria, condutometria, potenciometria ou voltametria cíclica), detecção de variação de massa, métodos ópticos (luminescência, absorbância e refletância) ou enzimáticos (biossensores). Por fim, os dados são analisados por métodos de análises de componentes principais (PCA), redes neurais artificiais (RNAs) e lógica difusa (Titova; Nachev, 2020; Ciursa; Oroian, 2021; Vahdatiyekta *et al.*, 2022). As principais vantagens e desvantagens de cada princípio de funcionamento estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3 – Vantagens e desvantagens de princípios de funcionamento da língua eletrônica.

Princípio de funcionamento	Vantagens	Desvantagens
Potenciométrico	Sensibilidade e seletividade altas, ampla faixa dinâmica de trabalho, baixo custo, configuração simples	Temperatura e pH podem reduzir a sensibilidade e a calibração
Amperométrico	Sensibilidade, versatilidade e possibilidade de aplicação de outras técnicas analíticas	Baixa seletividade
Voltamétrico	Alta seletividade e sensibilidade, robustez, simplicidade	Desvio do sensor por influência da temperatura e umidade, adsorção de componentes das amostras analisadas
Condutivimétrico	Simplicidade, rapidez analítica, baixo custo de obtenção e manutenção	Baixa seletividade, sofre influências de parâmetros relacionados à amostra
Métodos ópticos	Análise em tempo real, não é necessário contato direto com a amostra, alta sensibilidade	Podem sofrer influências de temperatura e umidade, exige calibração para condições específicas
Enzimáticos	Alta sensibilidade, seletividade cruzada, ideal para analitos que apresentem compostos-alvos	Vida útil curta, sensível ao pH e temperatura, alto custo de obtenção

Fonte: Ciosek e Wróblewski (2007); Winquist (2008); Rosa, Leone e Chiofalo (2020); Mahanti *et al.* (2024); García-Hernández *et al.* (2025).

Inicialmente, a língua eletrônica foi desenvolvida para discriminar os cinco gostos básicos: doce, azedo, salgado, amargo e umami. No entanto, por apresentar características de baixa seletividade de sensores e a possibilidade de análises estatísticas de vários sensores para discriminação entre amostras, essa ferramenta ascendeu gradualmente para uma ferramenta de grande utilidade e aplicabilidade em diversas áreas. Além dos sabores básicos, a língua eletrônica também é capaz de mensurar os sabores residuais promovidos pelas substâncias após a ingestão do produto. Comumente, é possível mensurar a intensidade de sabor residual adstringente e amarga de alimentos (Benjamim; Gamrasni, 2016; Ross, 2021).

Inúmeros estudos apontam o uso dessa ferramenta em diversas áreas. No ramo alimentício, a língua eletrônica já foi aplicada na identificação de fraudes em produtos cárneos e azeites, análise de maturidade de frutas, possíveis adulterações de méis e no controle de qualidade de águas comercializadas. No ramo de bebidas alcoólicas, mostrou-se altamente eficaz para a classificação de vinhos de acordo com sua região geográfica e modificações sensoriais provocadas por microrganismos deteriorantes, bem como na identificação de diferenças sensoriais ocasionadas pela diferença nas etapas de produção vinhos de arroz (Gutiérrez *et al.*, 2011; Apetrei; Apetrei, 2014; Dias *et al.*, 2016; Tian *et al.*, 2019; Paup *et al.*, 2021; Dias *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2023).

A análise de bebidas destiladas utilizando essa ferramenta já foi relatada com sucesso para diversos produtos e diversas finalidades. Legin e colaboradores (2005) buscaram aplicar língua eletrônica para classificação de aguardentes, vodcas e álcoois utilizados na fabricação dessa bebida. A partir dessa, foi possível classificar as bebidas em “conforme” e “não conforme”, seguindo a legislação russa, além de classificar o etanol utilizado de acordo com a matéria-prima.

3.8.2 Nariz eletrônico

Os narizes eletrônicos, também denominados como *e-nose*, nariz artificial ou olfatômetro digital, podem ser definidos como um dispositivo formado por um conjunto de sensores de gás que são capazes de detectar e identificar misturas de substâncias

aromáticas e compostos orgânicos voláteis (COVs), imitando o sistema olfativo humano. A partir do reconhecimento de padrões aromáticos e da análise multivariada de dados de todo o conjunto de respostas obtidos, é possível obter uma impressão digital para cada aroma (Branca *et al.*, 2003; Wiśniewska *et al.*, 2017).

Narizes eletrônicos detectam moléculas odoríferas a partir de diversos sensores. Dentre esses, os mais comuns são os sensores semicondutores de óxido metálico (MOSFET), polímeros condutores (CP), sensores óxido-metálicos (MOS), sensores eletroquímicos (EC) e sensores piezoelétricos (OS), que engloba os sensores de microbalanças de cristal de quartzo (QCM) e sensores de onda acústica de superfície (SAW). Cada um desses apresenta vantagens e limitações relacionadas à sensibilidade, detecção, diferenciação e calibração. Embora alguns apresentem maior utilidade de aplicação, sua escolha deve ser feita de acordo com a amostra a ser analisada (Mota; Teixeira-Santos; Rufo, 2021; Furizal *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023). Algumas vantagens e desvantagens de cada sensor utilizado para essa finalidade estão apresentadas, de forma sucinta, no Quadro 4.

Quadro 4 – Vantagens e desvantagens de sensores utilizados na fabricação de narizes eletrônicos.

Sensor	Vantagens	Desvantagens
Semicondutores de Óxido-metálico	Alta sensibilidade, baixo custo, tamanho pequeno, produção em grandes escalas	Baixa seletividade, necessidade de calibração precisa
Polímeros Condutores	Alta sensibilidade, resposta rápida, boas propriedades mecânicas, economia, baixo custo de produção	Baixa estabilidade, sensibilidade reduzida com o uso, sensibilidade a umidade (gera respostas mascaradas)
Óxido-metálicos	Baixo custo, tamanho pequeno e alta sensibilidade e estabilidade, resposta rápida, vida útil longa	Sensibilidade cruzada a diferentes gases, alto consumo de energia,
Eletroquímicos	Baixo consumo de energia, robustez, vida útil prolongada	Baixa sensibilidade a diversas classes de compostos, tamanho grande, dificuldade de obtenção de linha de base estável
Microbalanças de Cristal de Quartzo	Resposta rápida, alta taxa de detecção, sensibilidade, confiabilidade	Incapacidade de distinguir odores semelhantes, suscetibilidade a interferência de outros gases
Ondas Acústicas de Superfície	Operam em temperatura ambiente, resposta rápida, tamanho compacto, alta sensibilidade	Interferência da temperatura na identificação de COVs, susceptíveis a corrosão

Fonte: Wilson; Baietto (2009); Palacín *et al.*, (2022); Furizal *et al.* (2023); Lee *et al.* (2023); Li *et al.* (2023); Li *et al.* (2024), Mahanti *et al.* (2024)

Assim como a língua eletrônica, o nariz eletrônico também apresenta vasta aplicação para obtenção de dados analíticos em diversas áreas. Sua maior vantagem corresponde a não-destruição da amostra durante a análise, detecção rápida de componentes e a exigência de um volume amostral pequeno, além da capacidade de detectar odores imperceptíveis ao nariz humano (pouco intensos). No entanto, sua desvantagem corresponde a falta de possibilidade de quantificação dos compostos presentes nas amostras, sem que haja informações diretas sobre a identidade ou estruturas químicas dos compostos responsáveis pelo odor (Wang *et al.*, 2024; Segura-Garcia *et al.*, 2025).

De uma forma geral, a aplicação dessa ferramenta pode ser vista em investigações de problemas ambientais, ciências médicas, indústrias de cosméticos e farmacêutica. No ramo alimentício pode ser eficaz na análise de diferenciação de chás e frescor de carnes e vegetais, por exemplo. No ramo de bebidas alcoólicas, a aplicação desse equipamento para diversos produtos e diversas finalidades vem tornando-se cada vez mais rotineira, possibilitando identificar de forma rápida e segura casos de falsificação, adulteração e identificação de matéria-prima, por exemplo (Wiśniewska *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2019; Huang *et al.*, 2019; He *et al.*, 2022).

Zhang *et al.* (2022) classificaram seis amostras de uísques de acordo com suas marcas, regiões e estilos utilizando essa mesma ferramenta, combinada com métodos de cromatografia em fase gasosa (CG). Ao comparar com a composição volátil obtida a partir de CG, os autores concluíram que a ferramenta pode ser utilizada de forma rápida e confiável para a identificação de uísques a partir dos parâmetros estabelecidos anteriormente.

Posteriormente, Li e colaboradores (2023) utilizaram, com sucesso, um nariz eletrônico com sensores MOS para analisar a composição volátil de amostras de baijiu chinês. A partir desse, os autores identificaram perfis de respostas distintos para cada uma das classes de voláteis presentes a partir da sensibilidade específica de cada sensor aplicado, bem como valores de respostas variáveis com o número de cadeias de carbono presentes na estrutura das substâncias que formavam cada classe.

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, A. P. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and physicochemical analysis of cachaça packaged in polyethylene terephthalate (PET). **Journal of the Institute of Brewing**, v. 131, n. 1, p. 55-68, 2025.
<https://doi.org/10.58430/jib.v131i1.68>
- ALCARDE, A. R. **Cachaça: ciência, tecnologia e arte**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2017. 96p. 2017.
- ALCARDE, A. R.; MONTEIRO, B. M.S.; BELLUCO, A. E. S. Composição química de aguardentes de cana-de-açúcar fermentadas por diferentes cepas de levedura *Saccharomyces cerevisiae*. **Química Nova**, v. 35, n. 8, p. 1612-1618, 2012.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000800022>
- ALVARENGA, G. F. *et al.* Correlation of the presence of acrolein with higher alcohols, glycerol, and acidity in cachaças. **Journal of Food Science**, v. 88, n. 4, p. 1753-1768, 2023. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16523>
- AMORIM, J. C.; SCHWAN, R. F.; DUARTE, W. F. Sugar cane spirit (cachaça): Effects of mixed inoculum of yeasts on the sensory and chemical characteristics. **Food Research International**, v. 85, p. 76-83, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.04.014>
- APETREI, I. M.; APETREI, C. Detection of virgin olive oil adulteration using a voltammetric e-tongue. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 148-154, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.002>
- AQUARONE, E. *et al.* **Biotecnologia Industrial na produção de alimentos**. São Paulo: Editora Blucher, 2005, v. 4, 525p.
- AQUINO, F. W. B. *et al.* Determinação de marcadores de envelhecimento em cachaças. **Food Science Technology**, v. 26, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612006000100024>

BARBOSA, R. B. *et al.* Physical–chemical profile and quantification of phenolic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in cachaça samples aged in oak (*Quercus* sp.) barrels with different heat treatments. **Food Bioprocess Technology**, v. 15, p. 1977–1987, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02853-w>

BENJAMIM, O.; GAMRASNI, D. Electronic tongue as an objective evaluation method for taste profile of pomegranate juice in comparison with sensory panel and chemical analysis. **Food Analytical Methods**, v. 9, p. 1726-1735, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0350-0>

BONFIM, S. A.; CASABIANCA, H.; OLIVEIRA, A. H. Isotopic characterization of cumaru essential oil (*Dipteryx odorata*) for quality and authenticity validation. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 13, n. 3, p. 1-12, 2025. <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2025.2837>

BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Congeners in sugar cane spirits aged in casks of different woods. **Food Chemistry**, v. 139, p. 695-701, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.12.053>

BORTOLETTO, A. M.; CORREA, A. C.; ALCARDE, A. R. Aging practices influence chemical and sensory quality of cachaça. **Food Research International**, v. 86, p. 46-53, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.05.003>

BORTOLETTO, A. M.; SILVELLO, G. C.; ALCARDE, A. R. Good Manufacturing Practices, Hazard Analysis and Critical Control Point plan proposal for distilleries of cachaça. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 5, p. 432-443, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0040>

BORTOLETTO, A. M.; SILVELLO, G. C.; ALCARDE, A. R. Perfil aromático de compostos ativos aromatizantes em aguardente de cana-de-açúcar envelhecida em barris tropicais de madeira. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 24, 2021. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.07119>

BOUDET, A. M. Evolution and current status of research in phenolic compounds.

Phytochemistry, v. 68, p. 2722-2735, 2007.

<https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2007.06.012>

BRANCA, A. *et al.* Electronic nose based discrimination of a perfumery compound in a fragrance. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 92, n. 1-2, p. 222-227, 2003.

[https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(03\)00270-3](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(03)00270-3)

BRASIL. 2022. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Portaria MAPA nº 539 de 26 de dezembro de 2022. Estabelece os Padrões de Identidade e Qualidade da aguardente de cana e cachaça.** 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário da Cachaça.** 2024. Brasília: MAPA/AECS. 2025.

BRICENO, J. C. C. *et al.* Kinetics of volatile aromatic compound production during the aging of cachaça in different types of wood. **Food Science and Technology**, v. 45, 2025. <https://doi.org/10.5327/fst.00455>

BURATTI, S. *et al.* E-nose, e-tongue and e-eye for edible olive oil characterization and shelf life assessment: A powerful data fusion approach. **Talanta**, v. 182, p. 131-141, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.01.096>

CALDEIRA, I.; MATEUS, A. M.; BELCHIOR, A. P. Flavour and odour profile modifications during the first five years of Lourinhã brandy maturation on different wooden barrels. **Analytica Chimica Acta**, v. 563, p. 264-273, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.12.008>

CARDOSO, M. *et al.* Compostos Secundários da Cachaça. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana.** 4 ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 171-252. 2020.

CARDOSO, M. G. *et al.* Quantification of the cyanogen Dhurrin at high levels in sugar cane varieties and its correlation as a precursor of ethyl carbamate in cachaças. **Australian Journal of Crop Science**, v. 19, n. 7, p. 737-747, 2025. <https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.07.p13>

CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4 ed. Lavras: Editora da UFLA. 2020.

CARUSO, M. S. F.; NAGATO, L. A. F.; ALABURDA, J. Benzo(a)pireno, carbamato de etila e metanol em cachaças. **Química Nova**, v. 33, n. 9, 2010.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000900027>

CARVALHO, A. S. *et al.* Purification, characterization and antibacterial potential of a lectin isolated from *Apuleia leiocarpa* seeds. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 75, p. 402-408, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.02.001>

CARVALHO, D. G. *et al.* Determination of the concentration of total phenolic compounds in aged cachaça using two-dimensional fluorescence and mid-infrared spectroscopy. **Food Chemistry**, v. 329, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127142>

CASTRO, M. C. **Caracterização química e sensorial do grau de maturação de cachaça envelhecida em tonéis de madeiras brasileiras**. 2024. 134f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba – SP, 2024.

CASTRO, M. C. *et al.* Lignin-derived phenolic compounds in cachaça aged in new barrels made from two oak species. **Helyon**, v. 6, n. 11, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05586>

CASTRO, M. C. *et al.* Maturation-related phenolic compounds in cachaça aged in oak barrels: influence of reuses. **Wood Science and Techonology**, v. 57, p. 781-795, 2023.
<https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s00226-023-01474-6>

CEJUDO-BASTANTE, M. J. *et al.* Development and optimization by means of sensory analysis of new beverages based on different fruit juices and sherry wine vinegar. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 93, n. 4, p. 741-748, 2013.
<https://doi.org/10.1002/jsfa.5785>

CHEN, J. *et al.* Freshness evaluation of three kinds of meats based on the electronic nose. **Sensors**, v. 19, n. 3, p. 605, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19030605>

CHEN, Q.; LIN, H.; ZHAO, J. **Advanced nondestructive detection technologies in food**. Singapura: Springer Nature, 2021.

CIOSEK, P.; WRÓBLEWSKI, W. Sensor arrays for liquid sensing – electronic tongue systems. **The Analyst**, v. 132, n. 10, p. 963-978, 2007. <https://doi.org/10.1039/B705107G>

CIURSA, P.; OROIAN, M. Voltammetric e-tongue for honey adulteration detection. **Sensors**, v. 21, n. 15, p. 5059, 2021. <https://doi.org/10.3390/s21155059>

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de Safra Brasileira – Cana-de-açúcar: Segundo levantamento, agosto de 2025 – safra 2025/2025, v. 13, n. 2. Brasília: Conab, 2025.

DANTAS, A. C. S. *et al.* Acaricidal activity of *Amburana cearensis* on the cattle tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. **Ciência Rural**, v. 46, n. 3, p. 536-541, 2016. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20150334>

DESTANOĞLU; O.; ATEŞ, I. Determination and evaluation of methanol, etanol and higher alcohols in legally and illegally produced alcoholic beverages. **Journal of the Turkish Chemical Society**, v. 6, n. 1, p. 21-28, 2019. <http://dx.doi.org/10.18596/jotcsa.481384>

DIAS, L. G. *et al.* Electronic tongue: a versatile tool for mineral and fruit-flavored waters recognition. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 10, p. 264-273, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11694-015-9303-y>

DIAS, L. G. *et al.* Semi-quantitative discrimination of honey adulterated with cane sugar solution by an ETongue. **Chemistry & Biodiversity**, v. 19, n. 11, 2022. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202200698>.

DIAS, S. M. B. C.; MACHADO, A. M. R. Destilação. Compostos Secundários da Cachaça. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4 ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 171-252. 2020.

FEY, G. G. *et al.* Characterization and volatile compounds of fresh and aged mead in different types of wood. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25812-25826, 2020. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-146>

FIGLIOLIA, M. B.; AGUIAR, I. B.; SILVA, A. Germinação de sementes de *Lafoensia glyptocarpa* Koehne (mirindiba-rosa), *Myroxylon peruiferum* L. f. (cabreúva-vermelha) e *Cedrela fissilis* Vell. (cedro-rosa). **Revista do Instituto Florestal**, v. 18, p. 49-58, 2006. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.200618323>

FILHO, J. H. O.; BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Qualidade pós-colheita de colmos de cana armazenados e seus reflexos na produção de cachaça. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 19, 2016. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.6915>

FILHO, R. C.; NOGUEIRA, A. C. Influência da temperatura na germinação de diásporos de *Ocotea odorífera* (Vellozo) Rohwer (Canela-sassafrás). **Ciência Florestal**, v. 15, n. 2, p. 191-198, 2005. <https://doi.org/10.5902/198050981836>

FURIZAL, F. *et al.* Future potential of e-nose technology: A Review. **International Journal of Robotics and Control Systems**, v. 3, n. 3, p. 449-469, 2023. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v3i3.1091>

GARCÍA-HERNÁNDEZ, C. *et al.* Electronic tongue technology applied to the analysis of grapes and wines: a comprehensive review from its origins. **Chemosensors**, v. 13, n. 5, 2025. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13050188>

GRANATO, D. *et al.* Feasibility of different chemometric techniques to differentiate commercial Brazilian sugarcane spirits based on chemical markers. **Food Research International**, v. 60, p. 212-217, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.09.044>

GUTIÉRREZ, M. *et al.* Application of an e-tongue to the analysis of monovarietal and blends of white wines. **Sensors**, v. 11, n. 5, p. 4840-4857, 2011.

<https://doi.org/10.3390/s110504840>

HE, C. *et al.* Study on the suitability of tea cultivars for processing oolong tea from the perspective of aroma based on olfactory sensory, electronic nose, and GC-MS data correlation analysis. **Foods**, v. 11, n. 18, 2022. <https://doi.org/10.3390/foods11182880>

HINOJOSA-NOGUEIRA, D. *et al.* Characterization of rums sold in Spain through their absorption spectra, furans, phenolic compounds and total antioxidant capacity. **Food Chemistry**, v. 323, 2020. <https://doi-org/10.1016/j.foodchem.2020.126829>

HUANG, X. *et al.* Rapid and nondestructive detection of freshness quality of postharvest spinach based on machine vision and electronic nose. **Journal of Food Safety**, v. 39, n. 6, 2019. <https://doi.org/10.1111/jfs.12708>

Instituto Brasileiro da Cachaça – IBRAC. **Mercado Externo da Cachaça**. Disponível em: <https://ibrac.net/servicos/mercado-externo>. Acesso em 17.08.2025.

KING, L. *et al.* A state-of-the-science review of alcoholic beverages and polycyclic aromatic hydrocarbons. **Environmental Health Perspectives**, v. 132, n. 1, 2024.

LACERDA, M. *et al.* Mid infrared spectroscopy (MIR) for rapid analysis of cachaça. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 19, p. 7599-7610, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03504-2>.

LEE, K. *et al.* Ultra-low-power e-nose system based on multi-micro-led-integrated, nanostructured gas sensors and deep learning. **Acs Nano**, v. 17, p. 539-551, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c09314>

LEGIN, A. *et al.* Electronic tongue for quality assessment of ethanol vodka and eau-de-vie. **Analytica Chimica Acta**, v. 534, p. 129-135, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.11.027>

LI, Y. *et al.* Can electronic nose replace human nose? An investigation of e-nose sensor responses to volatile compounds in alcoholic beverages. **ACS Omega**, v. 8, n. 18, p. 16356-16363, 2023. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c01140>

LI, Y. *et al.* Electronic nose for the detection and discrimination of volatile organic compounds: Application, challenges, and perspectives. **Trends in Analytical Chemistry**, v. 180, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.117958>

MACHADO, A. M. R. *et al.* Contamination of cachaça by PAHs from storage containers. **Food Chemistry**, v. 146, p. 65-70, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.113>

MAHANTI, N. K. *et al.* Enhancing food authentication through E-nose and E-tongue technologies: Current trends and future directions. **Trends in Food Science & Technology**, v. 150, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104574>

MARIA-FERREIRA, D. *et al.* A polysaccharide fraction from *Handroanthus albus* (yellow ipê) leaves with antinociceptive and anti-inflammatory activities. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 159, p. 1004-1012, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.108>

MASCARENHAS, A. R. P. *et al.* Physico-mechanical properties of the wood of freijó, *Cordia goeldiana* (Boraginacea), produced in a multi-stratified agroforestry system in the southwestern Amazon. **Acta Amazonica**, v. 51, n. 2, p. 171-180, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202003001>

MASSON, J. *et al.* Parâmetros físico-químicos e cromatográficos em aguardentes de cana queimada e não queimada. **Ciência e Tecnologia dos Alimentos**, v. 31, n. 6, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600030>

MENDES, L. M. *et al.* Influência da madeira no envelhecimento da cachaça. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4 ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 275-299. 2020.

- MORAES, L. S. *et al.* Avaliação de árvores jovens e adultas de cumaru *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. em reserva florestal no município de Castanhal, estado do Pará. **Revista Foco**, v. 18, n. 5, p. 1-19, 2025. <https://doi.org/10.54751/revistafoco.v18n5-156>
- MOREIRA, R. F. A.; NETTO, C. C.; MARIA, C. A. B. A fração volátil das aguardentes de cana produzidas no Brasil. **Química Nova**, v. 35, n. 9, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000900022>
- MORI, F. A. *et al.* Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 23, p. 396-400, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612003000300018>
- MOTA, I.; TEIXEIRA-SANTOS, R.; RUFO, J. C. Detection and identification of fungal species by electronic nose technology: A systematic review. **Fungal Biology Reviews**, v. 37, p. 59-70, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2021.03.005>
- MOTA, M. F. G.; MENDONÇA, H. A.; VEIGA, J. F. Equipamentos para produção e controle de operação da fábrica de cachaça. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana. 4 ed.** Lavras: Editora da UFLA, p. 66-90. 2020.
- NANSEREKO, S.; MUYONGA, J. H. Exploring the potential of Jackfruit (*Artocarpus heterophyllus* Lam). **Asian Food Science Journal**, v. 20, n. 9, p. 97-117, 2021. <https://doi.org/10.9734/afsj/2021/v20i930346>
- NATALE, C. D. *et al.* Electronic nose and sensorial analysis: comparison of performances in selected cases. **Sensors and Actuators B**, v. 50, p. 246-252, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00242-1](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00242-1)
- NETO, P. A. S.; SILVA, J. B.; GOMES, L. F. M. Cumaru (*Dipteryx odorata*): prospecção científica e tecnológica. **Cadernos de Prospecção**, v. 16, n. 1, p. 295-311, 2023. <https://doi.org/10.9771/cp.v15i4.49735>
- ODELLO, L. *et al.* Avaliação sensorial de cachaça. **Química Nova**, v. 32, n. 7, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000700029>

OLIVEIRA, E. S. *et al.* The influence of different yeasts on the fermentation, composition and sensory quality of cachaça. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, v. 21, p. 707-715, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11274-004-4490-4>

OLIVEIRA-ALVES, S. *et al.* Coumarins in spirit beverages: sources, quantification, and their involvement in quality, authenticity and food safety. **Applied Sciences**, v. 14, n. 3, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14031010>

OLIVEIRA-ALVES, S. *et al.* Influence of the storage in bottle on the antioxidant activities and related chemical characteristics of wine spirits aged with chestnut staves and micro-oxygenation. **Molecules**, v. 27, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.3390/molecules27010106>

PALACÍN, J. *et al.* Classification of two volatiles using an e-nose composed by an array of 16 single-type miniature micro-machined metal-oxide gas sensors. **Sensors**, v. 22, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22031120>

PAUP, V. D. *et al.* Detection of red wine faults over time with flash profiling and the electronic tongue. **Beverages**, v. 7, n. 3, p. 52, 2021. <https://doi.org/10.3390/beverages7030052>

PEREIRA, A. A. M.; ACEVEDO, M. S. M. S. F.; ALCARDE, A. R. Improvement of the chemical quality of Cachaça. **Beverages**, v. 10, n. 3, p. 79, 2024.

PEREIRA, J. A. R. *et al.* Total antioxidant activity of yacon tubers cultivated in Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 5, p. 596-605, 2016. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016405009416>

PEREIRA, R.; ANGELIS-PEREIRA, M. C. Compostos fenólicos na saúde humana: do alimento ao organismo. Lavras: Editora da UFLA, 90 p. 2014.

PIELECH-PRZYBYLSKA, K.; BALCEREK, M. New trends in spirit beverages. **Alcoholic Beverages- Vol. 7: The Science of Beverages**. p. 65-111, 2019.

PIMENTEL, G. V.; ANDRADE, L. A. B. Cultura de Cana-de-açúcar. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4 ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 27-63. 2020.

PINHEIRO, A. C. M. *et al.* Análise sensorial. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4 ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 255-271. 2020.

PORTUGAL, C. B. *et al.* How native yeasts may influence the chemical profile of the Brazilian spirit, cachaça?. **Food Research International**, v. 91, p. 18-25, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.11.022>

RATKOVICH, N. *et al.* The spirit of cachaça production: An umbrella review of processes, flavour, contaminants and quality improvement. **Foods**, v. 12, n. 17, 2023.
<https://doi.org/10.3390/foods12173325>

RÊGO, G. M.; POSSAMAI, E. **Recomposição florestal: cultivo do jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*)**. Aracaju: EMBRAPA Tabuleiros Costeiros, 2001, 24p.

REIHANI, S. F. M.; KHOSRAVI-DARANI, K. Influencing factors on single-cell protein production by submerged fermentation: A review. **Electronic Journal of Biotechnology**, v. 37, p. 34-40, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2018.11.005>

RIACHI, L. G. *et al.* A review of ethyl carbamate and polycyclic aromatic hydrocarbon contamination risk in cachaça and other Brazilian sugarcane spirits. **Food Chemistry**, v. 149, p. 159-169, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.088>

RIBEIRO, R. T. M. *et al.* Morfologia de frutos e sementes de *Cariniana legalis* (Mart.) Kuntze (Lecythidaceae). **Scientia Amazonia**, v. 4, n. 2, p. 66-69, 2015.

RODRIGUES, L. M. A. *et al.* Phenolic extracts of cachaça aged in different woods and quantifying antioxidant activity and antifungal properties. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 122, n. 4, p. 644-652, 2016. <https://doi.org/10.1002/jib.375>

ROSA, A. R. D.; LEONE, F.; CHIOFALO, V. Eletronic noses and tongues. In: FERREIRA, P. A. S.; TOLDRÁ, F. (Ed.). **Chemical Analysis of Food: Techniques and Applications**. London: Academic Press, 2020. p. 353–389.

ROSS, C. F. Considerations of the use of the electronic tongue in sensory science.

Current Opinion in Food Science, v. 40, p. 87-93, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.01.011>

RUIZ-CAPILLAS, C.; HERRERO, A. M. Sensory analysis and consumer research in new product development. **Foods**, v. 10, n. 3, p. 582, 2021.

<https://doi.org/10.3390/foods10030582>

SAERENS, S. M. G. *et al.* Production and biological function of volatile esters in *Saccharomyces cerevisiae*. **Microbial Biotechnology**, v. 3, n. 2, p. 165-177, 2010.

<https://doi.org/10.1111/j.1751-7915.2009.00106.x>

SANTIAGO, W. D. *et al.* Cachaça stored in casks newly constructed of oak (*Quercus* sp.), amburana (*Amburana cearensis*), jatoba (*Hymenaea caribouril*), balsam (*Myroxylon peruiferum*) and peroba (*Paratecoma peroba*): alcohol content, phenol composition, colour intensity and dry extract. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 123, p. 232-241, 2017.

SANTOS, P. A. **Caracterização do glicosídeo cianogênico em variedades de cana-de-açúcar, identificação e quantificação de carbamato de etila em cachaças**. 2022. 91f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras. Lavras – MG, 2022.

SANTOS, W. A. *et al.* Influence of jackfruit wood barrels and chips during aging on the quality and phenolic compounds of cachaça. **Foods**, v. 14, n. 10, 1812, 2025.

<https://doi.org/10.3390/foods14101812>

SCHEID, L. Manejo de espécies nativas e exóticas, você sabe qual a diferença? **Lógica Assessoria Ambiental Inteligente**, [s.l.], 28.03.2022. Disponível em:

<https://www.logica.eco.br/noticia/manejo-de-especies-nativas-e-exoticas-voce-sabe-qual-a-diferenca>. Acesso em: 09 set 2025.

SCHWAN, R. F.; DIAS D. R. Fermentação In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4 ed. Lavras: Editora da UFLA, p. 93-117. 2020.

- SEGURA-GARCIA, J. *et al.* AI-driven 5G IoT e-nose for whiskey classification. **Applied Intelligence**, v. 55, n. 686, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10489-025-06425-1>
- SILVA, A. A. *et al.* A qualidade de destilados de cana-de-açúcar. In: FILHO, W. G. V. **Indústria de Bebidas: Inovação, Gestão e Produção**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2022. 576 p. 2022.
- SILVA, A. A. *et al.* Low-cost electronic nose for identification of wood species in which brazilian sugar cane spirit was aged. **Chemosensors**, v. 13, n. 5, p. 172, 2025. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13050172>
- SILVA, J. G. S. *et al.* Vegetative propagation of *Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr. **Journal of Forestry Research**, v. 33, p. 455-462, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01394-w>
- SILVELLO, G. C.; ALCARDE, A. R. Experimental design and chemometric techniques applied in electronic nose analysis of wood-aged sugar cane spirit (*cachaça*). **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 2, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100037>
- SIMIONI, S. C. C. *et al.* Amazonian wood chips as a strategy to change the sensory and chemical characteristics of cachaça. **Food Science and Technology**, v. 45, 2025. <https://doi.org/10.5327/fst.00402>
- SIMONCINI, J. B. V. B. *et al.* Madeiras tropicais utilizadas no envelhecimento de cachaça. **Anacleto**, v. 8, n. 1, 2022.
- SOUZA, E. G. T. *et al.* Accelerated aging of Brazilian sugarcane spirit: Impact of wood chips reuse on the phenolic and volatile profile of the beverage. **Food Chemistry**, v. 476, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143163>
- SOUZA, R. H. Z. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in cachaças packed in bottles of polyethylene terephthalate. **Journal of Food Science**, v. 87, n. 4, p. 1906-1915, 2022. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16095>

SOUZA, T. F. C. *et al.* The science of aging: understanding phenolic and flavor compounds and their influence on alcoholic beverages aged with alternative woods. **Foods**, v. 14, n. 15, p. 2739, 2025. <https://doi.org/10.3390/foods14152739>

TARKO, T.; KRANKOWSKI, F.; DUDA-CHODAK, D. The impact of compounds extracted from wood on the quality of alcoholic beverages. **Molecules**, v. 28, n. 2, p. 620, 2023. <https://doi.org/10.3390/molecules28020620>

THYSSEN, V. V.; ASSAF, E. M. Operações unitárias na indústria de bebidas. In: FILHO, W. G. V. **Indústria de Bebidas: Inovação, Gestão e Produção**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2022. 576 p. 2022.

TIAN, X. *et al.* Combination of an e-nose and an e-tongue for adulteration detection of minced mutton mixed with pork. **Journal of Food Quality**, v. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4342509>

TITOVA, T.; NACHEV, V. “Eletronic tongue” in the food industry. **Food Science and Applied Biotechnology**, v. 3, n. 1, p. 71-76, 2020. <https://doi.org/10.30721/fsab2020.v3.i1.74>

VAHDATIYEKTA, P. *et al.* A review on conjugated polymer-based electronic tongues. **Analytica Chimica Acta**, v. 1221, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2022.340114>

VASCONCELLOS, T. J. *et al.* Growth dynamics of *Centrolobium robustum* (Vell.) Mart. ex Benth. (Leguminosae-Papilionoideae) in the Atlantic Forest. **Brazilian Journal of Botany**, v. 39, p. 925–934, 2016. <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0292-9>

VICHI, S. *et al.* Volatile and semi-volatile components of oak wood chips analysed by Accelerated Solvent Extraction (ASE) coupled to gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS). **Food Chemistry**, v. 102, p. 1260-1269, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.07.023>

WANG, J. *et al.* From traditional to intelligent, a review of application and progress of sensory analysis in alcoholic beverage industry. **Food Chemistry: X**, v. 23, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101542>

WILSON, A. D.; BAIETTO, M. Applications and advances in electronic-nose technologies. **Sensors**, v. 9, n. 7, p. 5099-5148, 2009. <https://doi.org/10.3390/s90705099>

WINQUIST, F. Voltammetric electronic tongues– basic principles and applications. **Microchimica Acta**, v. 163, p. 3-10, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00604-007-0929-2>

WIŚNIEWSKA, P. *et al.* Comparison of an electronic nose based on ultrafast gas chromatography, comprehensive two-dimensional gas chromatography, and sensory evaluation for an analysis of type of whisky. **Journal of Chemistry**, v. 2017, n. 1, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/2710104>

WIŚNIEWSKA, P. *et al.* The verification of the usefulness of electronic nose based on ultra-fast gas chromatography and four different chemometric methods for rapid analysis of spirit beverages. **Journal of Analytical Methods in Chemistry**, v. 2016, n. 1, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8763436>

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Butanols: four isomers**. Geneva: World Health Organization, 1987. (Environmental Health Criteria, 65).

ZACARONI, L. M. *et al.* Determination of phenolic compounds and coumarins in sugar cane spirit aged in different species of wood. **Analytical letters**, v. 44, n. 12, p. 2061-2073, 2011. <https://doi.org/10.1080/00032719.2010.546017>

ZHANG, W. *et al.* The use of electronic nose for the classification of blended and single malt scotch whisky. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 7, p. 7015-7021, 2022. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3147185>

ZHAO, W. *et al.* Comparing the differences of physicochemical properties and volatiles in semi-dry Hakka rice wine and traditional sweet rice wine via HPLC, GC–MS and E-tongue analysis. **Food Chemistry: X**, v. 20, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.100898>

SEGUNDO CAPÍTULO

EVALUATION OF THE SENSORY PROFILE OF CACHAÇAS AGED IN EXOTIC BRAZILIAN WOODS USING ELECTRONIC TONGUE AND NOSE SYSTEMS

Artigo aceito na revista Food Science and Technology

Fator de Impacto (2022): 2.602

EVALUATION OF THE SENSORY PROFILE OF CACHAÇAS AGED IN EXOTIC BRAZILIAN WOODS USING ELECTRONIC TONGUE AND NOSE SYSTEMS

Antonia Isadora Fernandes ^a	fernandesisadora_@hotmail.com (Fernandes, A. I.)
Maria das Graças Cardoso ^a	mcardoso@ufla.br (Cardoso, M. G.)
Olga Lucía Acuña Rodríguez ^b	ol.acuna@uniandes.edu.co (Rodríguez, O. L. A.)
Wilder Douglas Santiago ^a	wilderdsantiago@gmail.com (Santiago, W. D.)
Sebastian Felipe Valencia Velasco ^b	sf.valencia@uniandes.edu.co (Velasco, S. F. V.)
David Lee Nelson ^c	dleenelson@gmail.com (Nelson, D. L.)
Nicolas Ratkovich ^b	n.rios262@uniandes.edu.co (Ratkovich, N.)

^a - Department of Chemistry, Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, MG, Brazil.

^b - Chemical and Food Engineering Department, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

^c - Postgraduate Program in Biofuels, Federal University of Vale de Jequitinhonha and Mucuri, Diamantina, MG, Brazil.

ABSTRACT

The development of sensory analysis of alcoholic beverages with human taster presents numerous obstacles, such as the need for a suitable environment, a large number of tasters, and a limited number of samples per session. Therefore, bionic sensors like electronic tongues and noses offer qualitative information on aromatic perception and descriptors. This study analyzed samples of cachaças aged in Brazilian and exotic wood barrels using these sensors. Sensory analysis was performed using sensors for acidity, bitterness, astringency, umami and bitter, astringent and rich aftertastes. Aromatic analysis compared patterns with eleven distinct aromatic families. The electronic tongue revealed that bitterness, umami and aftertaste characteristics were superior to those of the reference sample, while acidity and astringency were lower. The electronic nose detected 134 distinct aromas, such as fruity, floral, herbal and smoky. The tools demonstrated high potential for the sensory characterization of aged cachaças, quickly identifying aroma and flavor compounds.

Practical Application: Evaluation of cachaças using bionic sensors for monitoring sensory attributes.

Keywords: Bionic sensors. Aromatic profile. Sensory analysis. Aging.

1 INTRODUCTION

Cachaça, a product obtained from the fermentation of raw sugarcane juice, is one of the most widely consumed beverages in the world and serves as the basis for a variety of products, including mixed drinks, liqueurs, and cocktails such as the caipirinha. Cachaça is primarily composed of a mixture of ethanol and water, along with other secondary compounds such as aldehydes, esters, higher alcohols, and acids.

These secondary compounds are formed during all the stages of the cachaça production chain and, when present in a harmonious and balanced manner, influence the aroma and flavor characteristics and result in a complex individual sensory profile for each beverage. The presence of secondary compounds is greater and more complex when the cachaça is stored in wooden barrels because the interaction between the beverage and the wood surface leads to the incorporation of chemical compounds other than those already present, as well as the modification of existing compounds through reactions between them (Bortoletto et al., 2021; Castro et al., 2023; Ratkovich et al., 2023).

In general, oak species are the most commonly used wood for aging freshly distilled cachaças, which is justified by their desirable physical and chemical characteristics. However, oak barrels are expensive to obtain and maintain. Given this obstacle, the use of other plant species in the manufacture of casks and barrels for aging beverages has become increasingly common (Silva et al., 2025). Currently, Brazilian cooperatives have been using native Brazilian species for this purpose because they offer greater economic viability compared to the imported oak barrels. Souza et al. (2025) state that, beyond the economic perspective, the use of alternative woods for aging beverages can lead to new chemical and sensory profiles that ensure new experiences for the consumer.

Given the greater commercial demand for cachaça, coupled with consumer demands, the need for greater knowledge of its chemical and sensory characteristics is necessary to ensure a high-quality product with striking, perceptible characteristics. In addition to chemical studies, sensory evaluation of the beverage in question has been

extensively explored to complement and ensure the greatest possible detail of the final product. According to Rodríguez-Mendonza et al. (2024), the understanding of the relationship between chemical compounds and sensory descriptors in beverages is a valuable tool in the development of new products and quality control of the beverage, in addition to assisting consumers in making purchasing decisions based on their preferences.

Sensory research generally requires large trained study groups. In addition to the availability of trained individuals, specific environmental conditions, such as lighting and space, are also necessary in some cases. When studying the sensory profile of cachaças, for example, obstacles such as the chemical complexity of the beverage, the astringency and pungency of ethanol, the limited number of samples for analysis, and the need for time and financial resources for training and testing can make sensory analysis even more difficult. Alternatively, other profile recognition tools have been applied (Ross, 2021; Schreurs et al., 2024).

Qiu and Wang (2015) explain that bionic sensors, such as electronic tongues and noses, are highly efficient options for replacing conventional sensory evaluation methods because they offer high sensitivity, cost-effectiveness, and rapid analysis. Their applications are readily apparent in the food industry, where they represent a valuable tool for monitoring food processes and shelf life, assessing maturation, and assessing beverage authenticity. This study sought to evaluate the sensory profile of cachaças aged in barrels made of different woods using electronic sensors for comparing their organoleptic characteristics.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Cachaça Production

The cachaças were obtained from a producer located in the city of Areado in southern Minas Gerais, Brazil. The samples were distilled in copper stills and stored in 200-liter wooden barrels for twelve months. One liter was collected from each barrel. The samples were aged in pink jequitibá (*Cariniana legalis*) (2), freijó (*Cordia goeldiana*) (3), amburana (*Amburana cearensis*) (4), cumaru (*Dipterix odorata*) (5), grápia (*Apuleia leiocarpa*) (6), eucalyptus (*Eucalyptus ssp.*) (7), jatobá (*Hymenaea courbaril*) (8), yellow ipê (*Handroanthus albus*) (9), jackfruit (*Artrocarpus heterophyllus*) (10), sassafras (*Ocotea odorifera*) (11), balsam (*Myroxylon peruiferum*) (12), araribá (*Centrolobium*

robustum) (13) and American oak (*Quercus rubra L.*) (14). For comparison, one liter of the same freshly distilled cachaça (1) used to fill the barrels was collected and stored in a stainless-steel cask.

In addition to the collected samples, two blends obtained from the aged beverages were analyzed. One blend consisted of a mix of all the previously mentioned woods (except American oak) (15), and the other consisted of amburana, jatobá, and cumaru (16).

2.2 Electronic Tongue Analysis

Data regarding the flavor of the cachaças was collected using an Insent Taste Sensing System TS-5000Z electronic tongue (Intelligent Sensor Technology, Atsugi, OL, Japan). The electronic tongue is equipped with five sensors corresponding to the five tastes recognized by the human palate (acidic, bitter, astringent, umami, and salty), as well as an automatic detection system, a data acquisition system, and data analysis software. In addition to the basic sensors, three aftertaste sensors were used, identified as Aftertaste A, Aftertaste B, and Richness, for measuring the aftertastes related to astringency, bitterness, and umami, respectively.

Per the instrument's operational recommendations, the alcohol content of the samples was adjusted to 15%, based on the actual alcohol content measured with an electronic densitometer, to give a final volume of 65 mL. The samples were then analyzed in triplicate. Initially, the sensors were cleaned with the cleaning solutions for 90 seconds and then with the reference solution for 120 seconds. The sample reading time was 30 seconds, and the sensors were cleaned between each sample. The cleaning solutions (0.3 mM tartaric acid and 30 mM potassium chloride solutions in distilled water) were prepared according to the manufacturer's recommendations, whereas the freshly distilled sample was used as the reference solution.

2.3 Electronic Nose Analysis

Sample analyses using an electronic nose were performed using an AirSense PEN 3 sensor (Airsense Analytics Schwerin, Germany), consisting of a detection system with ten metal-oxide semiconductor sensors, as specified in Table 1, according to the method proposed by Caicedo-Narváez et al. (2024).

Table 1 - PEN3 e-nose sensors and the respective substances identified.

Sensors	Identified substances
W1C	Aromatic compounds
W5S	Nitrogen oxides
W3C	Ammonia and aromatic compounds
W6S	Hydrogen
W5C	Alkenes and aromatic compounds
W1S	Methane present in the environment
W1W	Sulfur compounds, pyrazine, and terpenes
W2S	Ethanol and aromatic compounds
W2W	Aromatic and sulfur compounds
W3S	Methane and compounds in high concentrations

Source: Adapted from Caicedo-Narváez et al. (2024)

Fifty-microliter aliquots of the samples were added to 20-mL vials and allowed to stand for 30 minutes at room temperature (20 °C). Initially, the equipment's sensors were calibrated with room-temperature air for 120 seconds. Subsequently, the headspace for each sample was injected into the system for 50 seconds, with an injection flow rate of 7.74 mL/min. After the reading for each sample, the system was purged with filtered air for 120 seconds to maintain the sensors' baseline. The samples were read in triplicate, with results recorded per second using WinMuster software.

The response profiles recorded in WinMuster were compared with aromatic compounds present in a commercial standard kit (Sosa Ingredients, Barcelona, Spain). Ten major aromatic categories were identified, formed by related subcategories, and they are presented in Table 2. For each family, six to eight aromatic compounds were added, defined on the basis of a literature review related to compounds commonly detected in sensory analyses of distilled beverages.

Table 2 - Categories and subcategories of aromatic families used for comparison.

Categories	Subcategory
Fruity	Citrus, tropical, orchard fruits, dried fruits, berries
Floral	White floral, green floral, sweet floral
Herbal and Green	Fresh herbs, dried herbs, vegetal notes
Spicy and Warm	Baking spices, exotic spices, peppery
Sweet and Nutty	Toasted nuts, creamy, caramelized sugar
Woody and Aged	Barrel aging, vanillin
Smoky and Toasted	Charred notes, toasted, earthy
Chemical and Off-Flavors	Solvents, medicinal aroma, animalic
Savory and Umami	Cold cuts, savory sauces, marine aromas
Beverages	Alcoholic
Miscellaneous	Process-derived, plant-based

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Electronic Tongue

The graph presented in Figure 1 represents the organoleptic profile obtained from the electronic tongue analysis, whereas the individual data for each sample are presented in Figure 2. When compared with the reference solution (Sample 1), the characteristics related to bitterness and umami tastes, and astringent, bitter, and umami aftertastes were perceived more strongly, whereas the perceptions of acidic, astringent, and salty characteristics were lower than those of the reference.

Figure 1 - Boxplot obtained from the sensory data of the analyzed cachaças for the basic taste modalities.

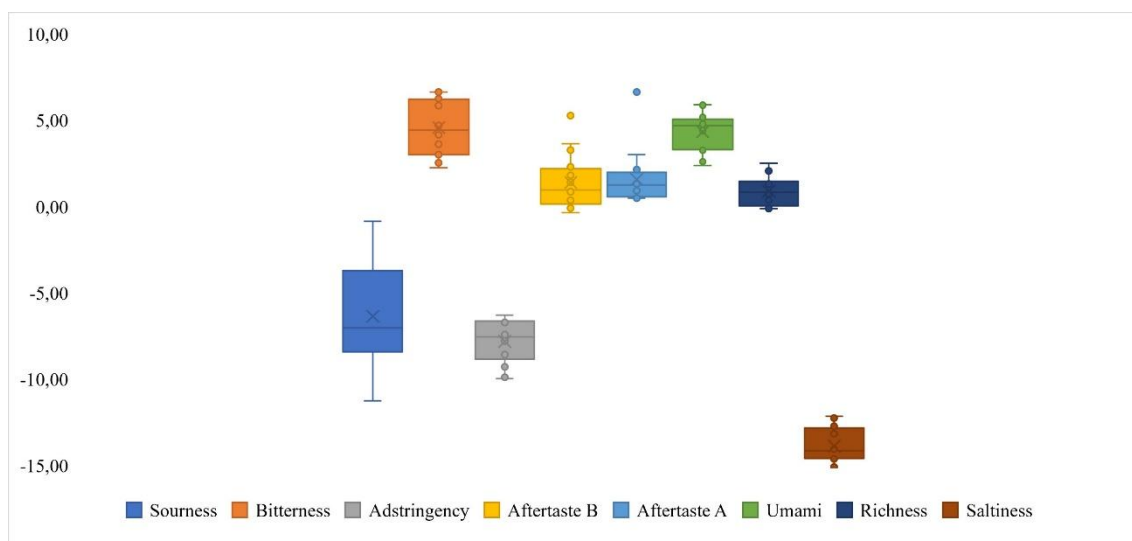
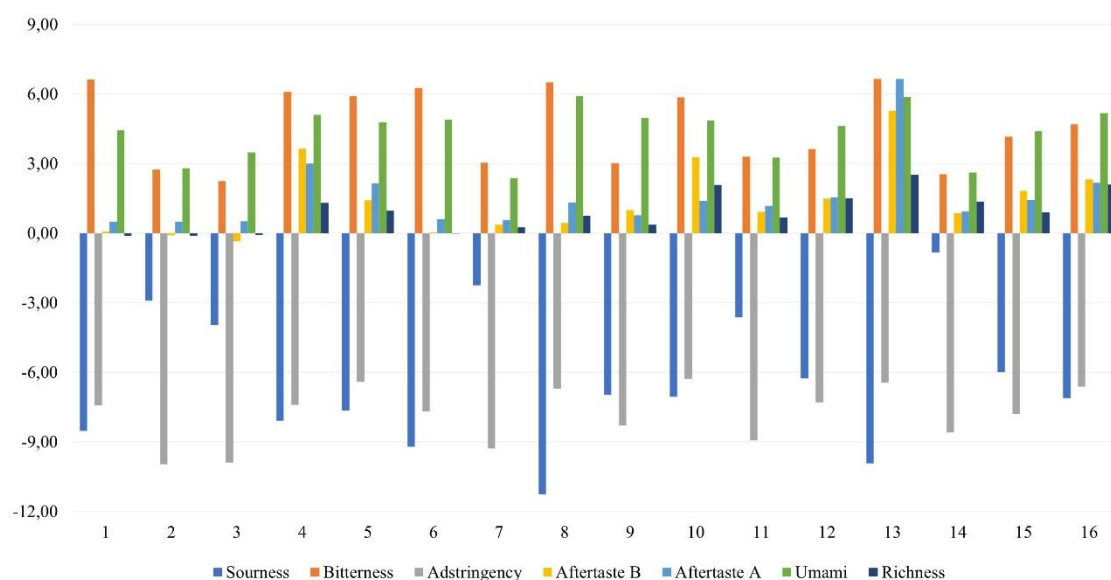


Figure 2 - Results obtained for the taste sensory attributes of samples aged in barrels made from different wood species.



The boxplot highlights significant differences between the samples analyzed, with particular emphasis on acidity. Through the analysis of the acidity parameter of all the

samples individually, the highest acidity levels were observed in samples aged in eucalyptus (Sample 7) and American oak (Sample 14) barrels, whereas the lowest acidity levels were recorded in samples aged in jatobá (Sample 8) and araribá (Sample 13). In aged beverages, factors such as ethanol oxidation and the extraction of wood compounds favor higher levels of this parameter in aged cachaças.

The total acidity of cachaça is the sum of volatile acidity and fixed acidity. Volatile acidity is related to the presence of short-chain organic acids, such as acetic acid, and contributes significantly to the aromatic and distinctive characteristics of cachaça. Fixed acidity consists of less volatile acids, such as oxaloacetic, citric, pyruvic, malic, butyric, and hexanoic acids. Their formation is related to fermentation kinetics, the distillation method used, and, in the case of aged beverages, the wood used. In general, the presence of acidity in beverages does not detract from their quality because, when combined with other secondary compounds, it complements the flavor (Lima et al., 2022; Alvarenga et al., 2023; Lacerda et al., 2025).

Caicedo-Narváez et al. (2024), using the same technique to analyze aged rums by ultrasound, obtained results for acidity below the flavor threshold for all the samples. Furthermore, lower values were also detected in three samples for the bitter aftertaste parameter, whereas lower values for the richness parameter were observed for two samples. The values observed with the remaining sensors were greater than the flavor threshold used as a reference.

The highest perceptions of bitterness were recorded for the reference sample (Sample 1) and for the samples aged in jatobá (Sample 8) and araribá (Sample 13) barrels. The samples with the lowest perception of bitterness were those aged in freijó and American oak barrels (Samples 3 and 14, respectively). Several compounds can be related to the bitterness characteristic of yeast-distilled liqueurs. Factors related to the raw material used, microbial metabolism, and the compounds formed, such as acrolein and furfural, can significantly contribute to the higher degree of bitterness of the final product. In unaged beverages, the bitter taste is more noticeable because the chemical reactions that ensure the beverage's smoothness occur more slowly. For aged beverages, compounds extracted during aging, such as furanic compounds, non-volatile phenolics, and ellagitannins, contribute to color, astringency, and bitterness (Luo et al., 2020; Tarko et al., 2023; Oliveira-Alves et al., 2024; Souza et al., 2025).

As defined by the American Society for Testing and Materials (ASTM) (2004), astringency corresponds to the complex sensation of shrinkage, traction, or wrinkling of the epithelium caused by exposure to substances such as tannins and it can be perceived in various foods and alcoholic and non-alcoholic beverages. In the beverages, some factors that can directly influence this sensation are alcohol content, pH, and sweetness. In addition to these factors, the perception of astringency in aged beverages can also be related to the presence of phenolic compounds, such as coumarins and tannins (Ares et al., 2009; Oliveira-Alves et al., 2024; Shanker et al., 2024). Regarding the attribute related to astringency, it can be seen that the values for all the samples were relatively similar, with lower degrees of perception in samples aged in jequitibá barrels (Sample 2) and freijó (Sample 3) and larger signals in samples aged in cumaru and jackfruit barrels (Samples 5 and 10, respectively).

A lower bitter aftertaste was observed in the samples aged in jequitibá and freijó barrels (Samples 2 and 3, respectively) than in the reference sample. The largest signals corresponded to the samples aged in amburana (Sample 4) and araribá (Sample 13) barrels, and the smallest signals were detected in the reference sample (Sample 1) and in the samples aged in the grápia (Sample 6) and sassafras (Sample 11) barrels. The greatest degree of perception of the flavor related to the astringent aftertaste was detected in the samples aged in amburana (Sample 4) and araribá (Sample 13) barrels, whereas the lowest signals were perceived in the reference sample (Sample 1) and in the samples aged in jequitibá and freijó barrels (Samples 2 and 3, respectively).

Sensory perceptions related to residual flavor (aftertaste) can be described as persistent sensations after ingesting food and/or beverages, resulting from the interaction between chemical compounds and taste and retronasal receptors. According to Corrêa et al. (2021), the intensity of the residual flavor in aged beverages is related to the phenolic compounds derived from the wood used for aging. With the exception of samples aged in jequitibá and freijó, aftertaste values of the aged samples were higher than those found in the reference sample. Considering that these species of woods contain a greater phenolic richness to be incorporated into the beverage, it can be inferred that this characteristic can justify the increase in this parameter. Woods such as jequitibá and freijó have greater sensory neutrality, capable of softening intense profiles and imparting sweet and subtle notes, which might explain the lower values observed when compared to other samples (Souza et al., 2025). The strongest signals for umami-related attributes were observed for

those samples aged in jatobá and araribá barrels (Samples 8 and 13, respectively), whereas the lowest signals were observed for samples aged in eucalyptus and American oak barrels (Samples 7 and 14, respectively). Regarding the corresponding aftertaste, the richness attribute, the strongest perceptions were obtained for the samples aged in the araribá barrel (Sample 13) and the blend composed of three species of wood (Sample 16), whereas the samples with the lowest signals for this attribute were those aged in eucalyptus and yellow ipê barrels (Samples 7 and 9, respectively).

Schmidt et al. (2021) cite that the perception of umami flavor is caused by the action of free glutamate and free aspartate and can be described as a smooth, lingering, and full-bodied taste. It evokes a sensation of fullness in the mouth. In distilled spirits, its presence can be related to the raw material and fermentation, as well as resulting during the resting process in stainless steel barrels or aging in wooden barrels.

For the two blends analyzed, no significant sensory differences were detected when compared to the individual samples present at the time of their production. Thus, an equilibrium between the samples occurred. One possible explanation is that, after the blends were obtained, they were stored in inert containers. This fact demonstrates the chemical reactions responsible for the formation of sensory compounds.

3.2 Electronic Nose

Figures 3 and 4 represent the aroma wheels obtained from the desirable and undesirable aromas detected in the sixteen samples analyzed in this study using the electronic nose and those of applied aroma standards. From this comparison, it was possible to obtain a robust qualitative interpretation of the aromas perceived in the samples. Ninety-six desirable aromas and 38 undesirable aromas were detected. For the control sample, 69 distinct aromas were detected. For the aged samples, between 65 and 83 aromatic compounds were detected. Blend 12 and Blend 3 presented, respectively, 72 and 53 aromas. The aromas detected for each sample are presented in the supplementary material.

Figure 3 - Flavor wheel of desirable aromas detected in cachaça samples, organized into categories, subcategories, and aromatic descriptors.

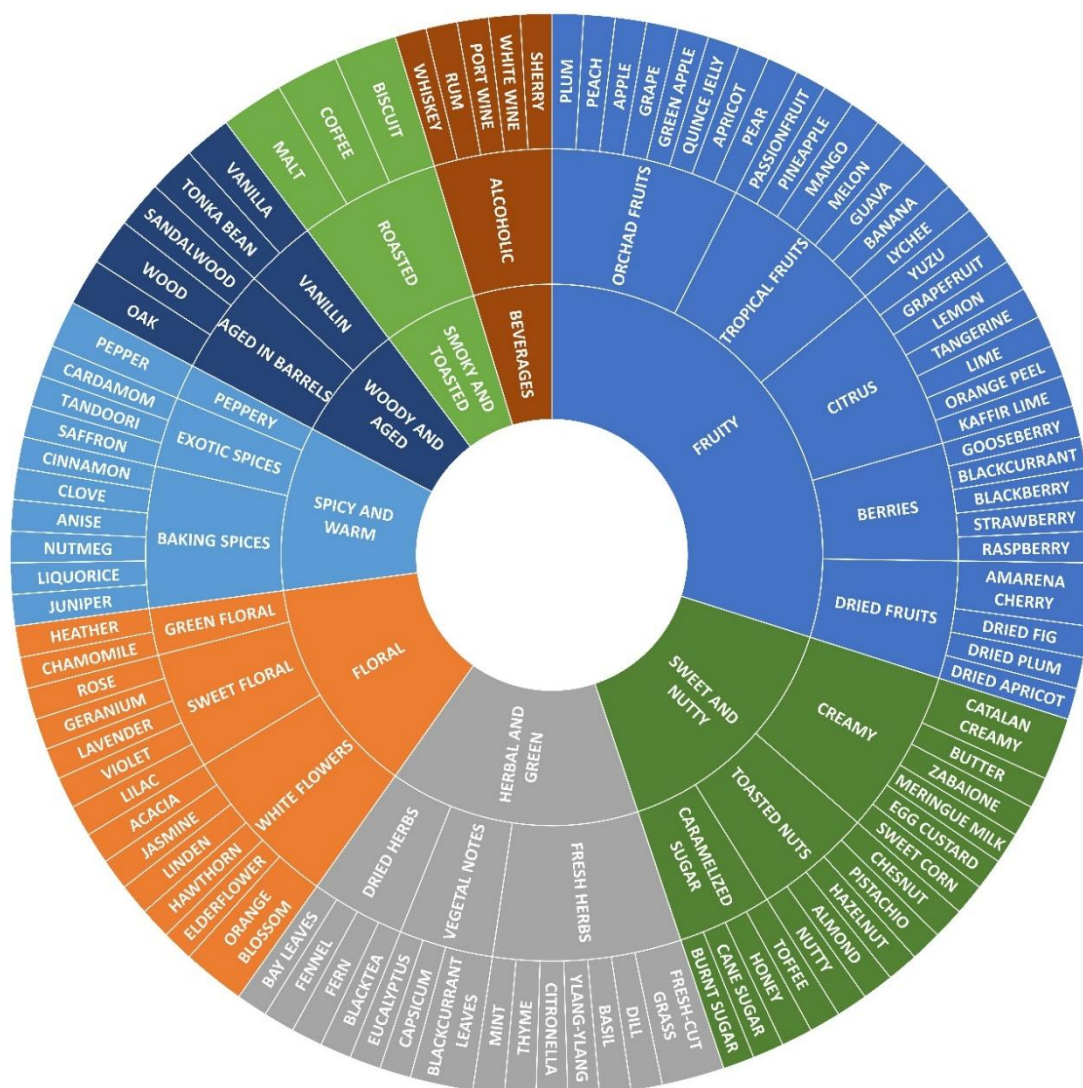
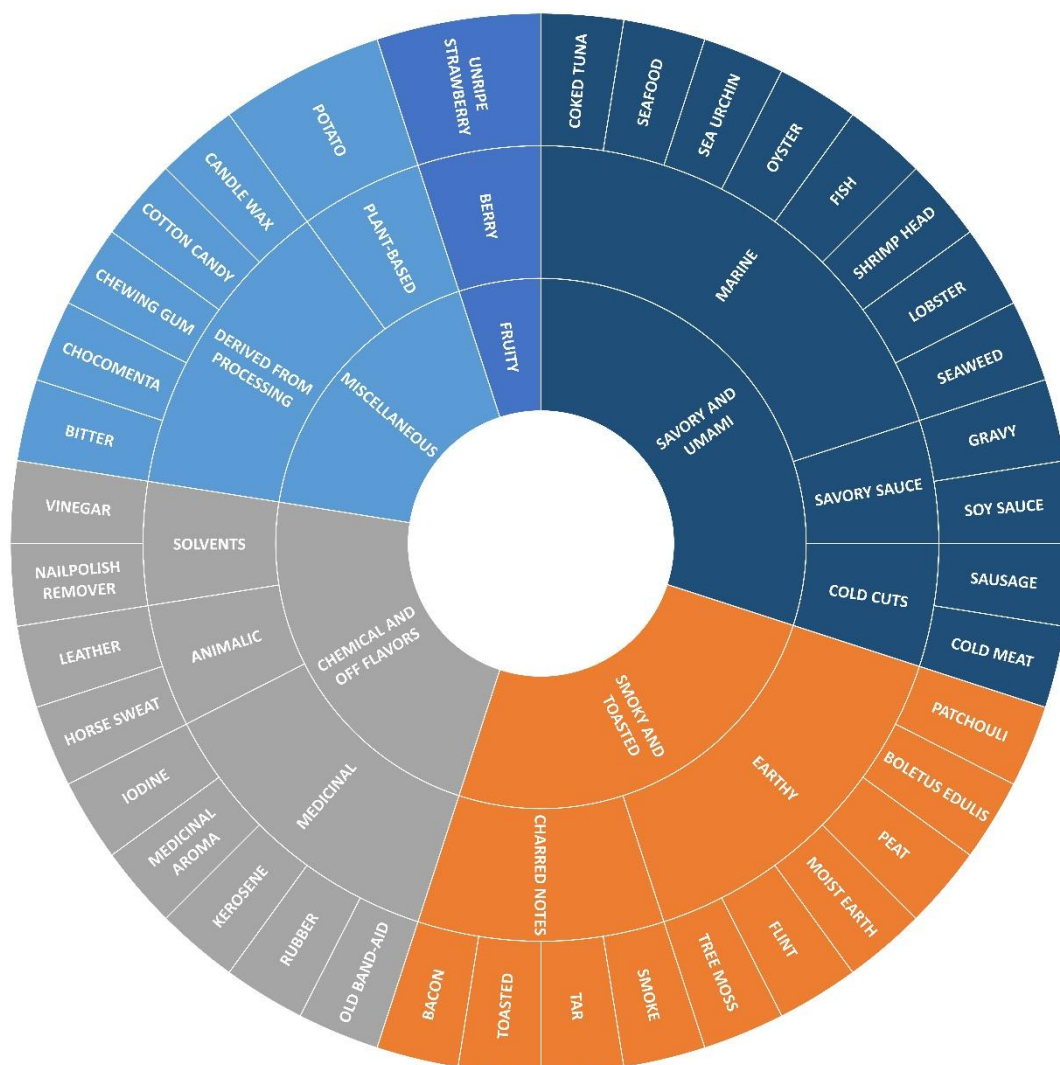


Figure 4 - Flavor wheel of undesirable aromas detected in cachaça samples, organized into categories, subcategories, and aromatic descriptors.



Aromas such as cardamom, bacon, geranium, black tea, and sherry were detected in all the samples. A medicinal aroma was also detected in all the samples, which is reminiscent of hospital and/or pharmaceutical products. Bortoletto (2016) believes that undesirable aromas can indicate sensory defects and lower quality of the final product, that result from bacterial contamination. Portugal et al. (2016) explains that some aromatic off-flavors, such as solvent notes, are related to the excessive production of higher alcohols (propyl and isoamyl) and isoamyl acetate ester during the fermentation process. Furthermore, when the oxidation of higher alcohols generates high concentrations of aldehydes, herbaceous and bitter sensations are observed in the

beverage. Later, Tarko et al. (2023) explained that some low-molecular-weight phenols from the aging process can impart other undesirable aromas to the beverage. 4-Vinylphenol and 4-ethylphenol, for example, which are found in oak, can impart medicinal aromas and aromas reminiscent of horse and leather, respectively.

The presence of other undesirable aromas has also been reported by Caetano et al. (2021), who conducted a sensory study of unaged cachaças using descriptive analysis. They observed high values for the aromatic descriptors sweet, alcoholic, fruity, sugarcane, and brown sugar. Regarding flavor characteristics, notes of tar, fermented sugarcane juice, astringent, and sugarcane bagasse were noticeable. The authors of this study associated the tarry flavor with smoke or charcoal, which might be related to the distillation process. Therefore, the appearance of these descriptors in the samples analyzed can be related to the process of distillation of the must. This study also detected aromas reminiscent of nail polish remover and vinegar. These findings corroborate data presented by Pereira et al. (2025), who associated the presence of vinegar and acetone aromas with high concentrations of acetic acid in cachaça samples, whereas low levels of volatile acidity conferred aromas described as "sweet" and "velvety."

The perception of some fruity, floral, almond, herbaceous, and spicy aromas, as well as undesirable aromas related to burning, marine animals, and various other aromas, were detected exclusively in the aged samples. These data corroborate the results of Bortoletto et al. (2021), who obtained 60 distinct aromatic compounds from the unaged sample when they analyzed cachaças aged in cabreúva, cherry, and chestnut wood. Terpenes were primarily identified among these compounds. They can be obtained during the wood extraction process or from reactions between the beverage and the barrel. In addition to terpenes, acids, alcohols, phenolics, and esters were also detected.

The presence of esters in beverages can characterize fruity aromas and flavors. These compounds are present in distinct proportions in cachaças, where they ensure the unique sensory richness of the final product and contribute the aromas of tropical fruits, berries, and citrus fruits, as well as notes of spices and almonds. Their formation results from the secondary metabolism of yeast during the fermentation process and during aging through the interconversion of phenols and alcohols and through reactions of wood extractants (Cardoso, 2020; Novo, 2020; Lazo et al., 2025).

Descriptors related to notes of spicy, spicy, woody, and vanilla were detected in all the samples analyzed. These data are consistent with the results presented by Caldeira

et al. (2006), who identified a greater intensity of these aromas in spirits from Lourinhã (Portugal) aged in various oak species. When degraded by the action of the stored beverage, lignin contributes especially to the smoothness and color of the beverage. The main phenolic aldehydes derived from this macromolecule are vanillin, syringaldehyde, coniferaldehyde, and sinapaldehyde, which can impart these characteristics to the distillate. Although the detection of compounds related to these descriptors is more common in aged beverages, their appearance in control cachaças might be related to the presence of some compounds derived from sugarcane or the presence of higher alcohols and other volatiles formed during fermentation and distillation (Corbion et al., 2023; Souza et al., 2025).

In this study, despite undergoing the same aging period, unique aromas were detected in some samples, or even in just one sample. The cachaça aged in grápia, for example, stood out for unique floral aromatic descriptors reminiscent of elderflower and lilac, spicy aromas reminiscent of tandoori and saffron, almond and sweet aromas, such as zabaglione and toffee. An aroma described as "bitter" was also detected in this sample. The control sample was the only one that exclusively exhibited an aroma related to anise spice.

During the cachaça aging process, esterification reactions occur in a shorter period of time compared to that for storage in stainless steel barrels which results in greater sensory complexity. Factors such as the plant species, geographical origin of the wood used, and storage time can significantly influence the post-aging chemical composition. Another factor that can significantly influence the chemical composition of the aged distillate is the possible heat treatment of the interior of the barrel because this practice maximizes the availability and solubility of compounds such as methyloctalactones and phenolic aldehydes, for example (Silvello et al., 2021; Bortoletto et al., 2021; Li et al., 2023).

Although the aging process is the main factor responsible for the organoleptic characteristics of cachaça, the raw material also significantly influences the aromatic complexity of the beverage. Studies by Da-Silva et al. (2025) say that the aromatic composition of the final beverage can also be influenced by the variety of sugarcane used and the management applied during planting and harvesting, which is explained by the fermentable sugar content and affects the concentrations of higher alcohols, esters,

ketones, terpenes, and aromatic compounds, which can impart floral, sweet, fruity, and herbal notes.

When analyzing volatile organic compounds (VOCs) in samples of Scotch whisky, Shen et al. (2024) correlated fruity aromas of pineapple, apple, pear, and banana with ethyl butyrate, ethyl isovalerate, isobutyl acetate, and isoamyl acetate, respectively, whereas floral aromas of roses, violet, lavender, and floral honey were related to phenylethyl alcohol, α -isomethylionone, linalool, and β -damascenone, respectively. Smoked aromas, such as bacon and smoke, were related to phenols such as guaiacol and 2-ethylphenol. Subsequently, Simioni and colleagues (2025) analyzed cachaças aged in cumarurana, jatobá, and louro-vermelho barrels and detected the presence of esters such as ethyl acetate, ethyl hexanoate, ethyl octanoate, ethyl decanoate, ethyl dodecanate, ethyl tetradecanoate, and ethyl succinate, which can evoke fruity, sweet, vegetal, herbaceous, and cognac aromas. Similar to previous reports in the literature, the samples in this study presented a wide variety of fruity, floral, and almond aromas, which can be related to the presence of these esters.

4 CONCLUSION

The most noticeable attributes for all the samples were acidity, astringency, and bitterness, which are attributed to compounds extracted from the wood during the aging process. Using the electronic nose in this study, 134 different aromas were identified in all the samples analyzed. Aromas reminiscent of flowers and fruits, resulting from the presence of esters, comprised the largest portion of identified descriptors. The presence of off-flavors was associated with high concentrations of congeners and failures throughout the production chain. The use of bionic sensors to identify the sensory profile of cachaças proved to be an effective alternative for predicting possible qualitative contributions of the barrel to the final product. Analyses related to the identification and quantification of volatile organic compounds in the samples are necessary and will be conducted in future studies to establish a direct correlation between compounds present in the beverage and organoleptic perceptions.

FUNDING SOURCES

This work was supported by the Federal University of Lavras, the University of Los Andes, and the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel – Brazil (CAPES – Finance Code 001).

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that no conflict of interests exists.

REFERENCES

- Alvarenga, G. F., Machado, A. M. R., Barbosa, R. B., Ferreira, V. R. F., Santiago, W. D., Teixeira, M. L., Nelson, D. L., & Cardoso, M. G. (2023). Correlation of the presence of acrolein with higher alcohols, glycerol, and acidity in cachaças. *Journal of Food Science*, 88 (4), 1753-1768. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16523>
- Ares, G., Barreiro, C., Deliza, R., & Gámbaro, A. (2009). Alternatives to reduce the bitterness, astringency and characteristic flavour of antioxidant extracts. *Food Research International*, 42 (7), 871-878. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.03.006>
- ASTM International. (1989). *Standard definitions of terms relating to sensory evaluation of materials and products* (ASTM E253–87). In *Annual book of ASTM standards* (Vol. 15.07, p. 2). ASTM International.
- Bortoletto, A. M. (2016). *Influência da madeira na qualidade química e sensorial da aguardente de cana envelhecida* (Doctoral thesis, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, University of São Paulo, Piracicaba).
- Bortoletto, A. M., Silvello, G. C., & Alcarde, A. R. (2021). Aromatic profiling of flavor active compounds in sugarcane spirits aged in tropical wooden barrels. *Brazilian Journal of Food Technology*, 24. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.07119>
- Caetano, D., Lima, C. M. G., Sanson, A. L., Silva, D. F., Hassemer, G. S., Verruck, S., Silva, G. A., Afonso, R. J. C. F., Coutrim, M. X., & Gregório, S. R. (2021). Descriptive screening and lexicon development of non-aged artisanal cachaça sensorial profile using

principal component analysis and Kohonen artificial neural networks. *Journal of Sensory Studies*, 36 (3). <https://doi.org/10.1111/joss.12645>

Caicedo-Narváez, S., Aldana-Heredia, J. F., & Ratkovich, N. (2024). Study of ultrasound-assisted technology for accelerating the aging process in a sugar cane honey spirit. *Beverages*, 10 (3). <https://doi.org/10.3390/beverages10030062>

Caldeira, I., Mateus, A. M., & Belchior, A. P. (2006). Flavour and odour profile modifications during the first five years of Lourinhã brandy maturation on different wooden barrels. *Analytica Chimica Acta*, 563, 264-273. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.12.008>

Cardoso, M. G. (2020). *Produção de aguardente de cana. (4th ed.)*. UFLA Publisher.

Castro, M. C., Silvello, G. C., Corniani, L. S., Acevedo, M. S. M. S. F., Pereira, A. A. M., & Alcarde, A. R. (2023). Maturation-related phenolic compounds in *cachaça* aged in oak barrels: influence of reuses. *Wood Science and Techonology*, 57, 781-795. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01474-6>

Corbion, C., Smith-Ravin, J., Marcelin, O., & Bouajila, J. (2023). An overview of spirits made from sugarcane juice. *Molecules*, 28 (19). <https://doi.org/10.3390/molecules28196810>

Corrêa, A. C., Bortoletto, A. M., Silvello, G. C., & Alcarde, A. R. (2021). Novel distilled spirits obtained from combinations of fermented sugarcane juice and malted barley wort. *Journal of the Institute of Brewing*, 127 (2), 189-195. <https://doi.org/10.1002/jib.640>

Da-Silva. V., Felizardo, L., Bizerra-Santos, J., De-Barros, M. C., Silva, F. L. H., & Ribeiro-Filho, N. (2025). The influence of sugarcane genotype on aroma profile and quality parameters of a distilled spirit. *European Food Research and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00217-025-04895-8>

Lacerda, M., Felizardo, L., Rufino, J. L., Sousa, L. R., & Ribeiro-Filho, N. (2025). Mid infrared spectroscopy (MIR) for rapid analysis of cachaça. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11694-025-03504-2>

Lazo, O., García-Ortiz, A. L., Pardo, J., & Guerrero, L. (2025). Mezcal Characterization Through Sensory and Volatile Analyses. *Foods*, 14 (3). <https://doi.org/10.3390/foods14030402>

Li, J., Zhang, Q., & Sol, B. (2023). Chinese baijiu and whisky: research reservoirs for flavor and functional food. *Foods*, 12 (15). <https://doi.org/10.3390/foods12152841>

Lima, C. M. G., Benoso, P., Pierezan, M. D., Santana, R. F., Hassemer, G. S., Rocha, R. A., Nora, F. M. D., Verruck, S., Caetano, D., & Simal-Gandara, J. (2022). A state-of-the-art review of the chemical composition of sugarcane spirits and current advances in quality control. *Journal of Food Composition and Analysis*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104338>

Luo, Y., Kong, L., Xue, R., Wang, W., & Xia, X. (202). Bitterness in alcoholic beverages: The profiles of perception, constituents, and contributors. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 222-232. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.026>

Novo, M. A. L. (2020). *A arte do blend na cachaça. (1st ed.)*. São Paulo.

Oliveira-Alves, S., Lourenço, S., Fernandes, T. A., & Canas, S. (2024). Coumarins in spirit beverages: sources, quantification and their involvement in quality, authenticity and food safety. *Applied Science*, 14 (3). <https://doi.org/10.3390/app14031010>

Pereira, A. A. M., Ribeiro, T. G., Carvalho, L. C., & Alcarde, A. R. (2025). Influence of volatile acidity at different concentrations on the sensory profile of cachaça. *Journal of Food Science & Food Products*, 1, 2025.

- Portugal, C. B., Alcarde, A. R., Bortoletto, A. M., & Silva, A. P. (2016). The role of spontaneous fermentation for the production of *cachaça*: a study of case. *European Food Research and Technology*, 242, 1587-1597. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2659-3>
- Qiu, S., & Wang, J. (2015). Applications of sensory evaluation, HS-SPME GC-MS, E-Nose and E-tongue for quality detection in citrus fruits. *Journal of Food Science*, 80 (10), 2015. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13012>
- Ratkovich, N., Esser, C., Machado, A. M. R., Mendes, B. A., & Cardoso, M. G. (2023). The spirit of *cachaça* production: An umbrella review of processes, flavour, contaminants and quality improvement. *Foods*, 12 (17). <https://doi.org/10.3390/foods12173325>
- Rodríguez-Mendoza, A. V., Arbeláez-Parra, S., Amaya-Gómez, R., & Ratkovich, N. (2024). Flavor Wheel Development from a Machine Learning Perspective. *Foods*, 13 (24). <https://doi.org/10.3390/foods13244142>
- Ross, C. F. (2021). Considerations of the use of the electronic tongue in sensory science. *Current Opinion in Food Science*, 40, 87-93. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.01.011>
- Schmidt, C. V., Olsen, K., & Mouritsen, O. G. (2021). Umami potential of fermented beverages: Sake, wine, champagne, and beer. *Food Chemistry*, 360, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128971>
- Schreurs, M., Piampongsant, S., Roncoroni, M., Legal, L., Herrera-Malaver, B., Vanderaa, C., Theßeling, F. A., Kreft, Ł., Botzki, A., Malcorps, P., Daenen, L., Wenseleers, T., & Verstrepen, K. J. (2024). Predicting and improving complex beer flavor through machine learning. *Nature communications*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46346-0>
- Shanker, M. A., Krishnan, R., Kumar, G. S., Mohammed, T., Hymavayhi, A. S., Rosamma, Ragesh, N., George, S., Rana, S. S., & Abdullah, S. (2024). Insights on the astringency of non-alcoholic beverages: Fruit, vegetable & plantation-based perspective. *Food Chemistry Advances*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100630>

Shen, X., Wang, H. T., Zhuang, H. N., Yao, L. Y., Sun, M., Yu, C., Li, D. K., & Feng, T. (2024). Comparative analysis of the aromatic profile of single malt whiskies from different regions of Scotland using GC-MS, GC-O-MS and sensory evaluation. *Journal of Food Composition and Analysis*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106465>

Silva, A. A., Vieira, B. R., Yamauchi, E. Y., Li, R. W. C., & Gruber, J. (2025). Low-cost electronic nose for identification of wood species in which brazilian sugar cane spirit was aged. *Chemosensors*, v. 13 (5). <https://doi.org/10.3390/chemosensors13050172>

Silvello, G. C., Bortoletto, A. M., Castro, M. C., & Alcarde, A. R. (2021). New approach for barrel-aged distillates classification based on maturation level and machine learning: A study of cachaça. *LWT*, 140. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110836>

Simioni, S. C. C., Galdino, M. L. S., Souza, A. H. S., Santiago, W. D., Nunes, C., Pedroso, M. P., Cardoso, M. G., Bianchi, M., & Pinheiro, A. C. (2025). Amazonian wood chips as a strategy to change the sensory and chemical characteristics of cachaça. *Food Science and Technology*, 45. <https://doi.org/10.5327/fst.00402>

Souza, T. F. C., Miranda, B. M., Briceno, J. C. C., Gómez-Estaca, J., & Silva, F. A. (2025). The Science of Aging: Understanding Phenolic and Flavor Compounds and Their Influence on Alcoholic Beverages Aged with Alternative Woods. *Foods*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/foods14152739>

Tarko, T., Krankowski, F., & Duda-Chodak, A. (2023). The Impact of Compounds Extracted from Wood on the Quality of Alcoholic Beverages. *Molecules*, 28(2). <https://doi.org/10.3390/molecules28020620>

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S1 - Aromatic compounds in cachaça samples aged in different woods and identified using an electronic nose.

Category	Subcategory	Type of aroma	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16
Fruity	Citrus	Kaffir lime	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	
		Orange peel	X	X	X	X	X		X	X		X				X		
		Lime	X			X	X	X	X		X				X	X		
		Tangerine	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
		Lemon	X			X	X			X	X		X	X	X	X	X	X
		Grapefruit		X			X											
		Yuzu		X	X	X		X	X				X	X		X	X	
		Pear	X	X	X	X	X			X	X	X	X			X		X
		Apricot	X	X	X		X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Quince jelly	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Orchard fruits	Green apple			X			X	X									
		Grape		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	
		Apple			X		X				X	X						
		Peach			X			X	X	X				X				
		Plum			X	X	X	X	X	X	X		X	X		X	X	
		Lychee	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Tropical fruits	Banana	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
		Guava						X	X			X						

Floral	Berries	Melon	X	X	X		X	X	X	X		X	X		X	X
		Mango	X	X		X	X	X				X			X	X
		Pineapple				X	X					X	X	X		X
		Passionfruit				X		X	X		X					X
		Raspberry	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Blackcurrant	X	X	X		X		X						X	
		Unripe strawberry	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X
		Blackberry	X	X	X		X	X		X		X				
		Gooseberry			X	X		X	X		X			X		X
		Strawberry			X		X		X	X	X		X			X
	Dried fruits	Dried apricot	X				X				X	X	X			
		Dried plum	X				X			X		X				X
		Dried fig	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
		Amarena cherry		X	X										X	
		Acacia	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X	X
	White floral	Jasmine		X	X					X	X				X	
		Linden		X					X							
		Hawthorn				X	X		X	X	X	X	X		X	X
		Orange blossom						X	X			X			X	
		Elderflower						X								
	Green floral	Heather	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	
		Chamomile	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X

Herbal and green	Sweet floral	Rose	X			X	X	X	X	X		X	X		X	X	
		Geranium	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Lavander		X	X	X	X	X		X		X		X	X		
		Violet				X		X		X		X	X	X	X	X	X
		Lilac						X									
		Mint	X	X		X	X		X		X	X			X	X	X
	Fresh herbs	Thyme	X	X	X	X	X	X	X	X			X			X	X
		Fresh-cut grass	X		X			X	X	X							X
		Citronella		X	X		X										
		Ylang-ylang		X	X												
		Basil		X			X				X	X	X	X	X	X	
		Dill				X		X	X		X	X	X	X	X	X	X
	Dried herbs	Bay leaves	X	X	X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X
		Blacktea	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Fennel		X	X	X	X				X			X	X		
		Fern			X	X					X				X	X	
		<i>Capsicum</i>		X	X	X	X	X		X	X		X		X	X	
		Eucalyptus				X	X		X	X	X	X			X	X	X
Sweet and nutty	Creamy	Blackcurrant leaves					X				X			X		X	
		Egg custard	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
		Meringue milk	X	X	X		X			X	X	X			X		X
		Sweet corn		X	X						X			X			

[illegible]

TERCEIRO CAPÍTULO

GLYCEROL CONTENT, PHENOLIC COMPOSITION, AND PHYSICOCHEMICAL EFFECTS OF CACHAÇA AGING IN EXOTIC AND NATIVE BRAZILIAN WOODS

Artigo aceito na revista Food and Bioprocess Technology

Fator de Impacto (2024): 5.800

Glycerol Content, Phenolic Composition, and Physicochemical Effects of Cachaça Aging in Exotic and Native Brazilian Woods

Antonia Isadora Fernandes^a, Maria das Graças Cardoso^{a*}, Wilder Douglas Santiago^a, Sara Cristina dos Santos Silva^a, Carolina Salles Freire^a, Wilton Amaral dos Santos^a, David Lee Nelson^b

^a Department of Chemistry, Federal University of Lavras (UFLA), Lavras, MG, Brazil.

^b Postgraduate Program in Biofuels, Federal University of Vale de Jequitinhonha and Mucuri, Diamantina, Brazil.

Abstract

The aging of freshly distilled cachaça has a significant impact on the quality of the final product, ensuring greater sensory harmony and higher value for the product. One of the main factors responsible for the beverage's organoleptic quality is the plant species used, to construct the barrels, which ensures unique complexity in each aged product. This study sought to identify the physicochemical profile, glycerol content, and the phenolic profile of thirteen samples of cachaças aged in barrels made of domestic and foreign species of wood, as well as samples of two blends. The physicochemical parameters of the samples were analyzed in accordance with Normative Instruction No. 24 of September 8, 2005, whereas the glycerol content in the samples was identified by spectrophotometric methods. Finally, the total phenol profile was analyzed using the Folin-Ciocalteu spectrophotometric method, whereas the identification and quantification of these compounds was performed using High-Performance Liquid Chromatography (HPLC). All the samples met the limits established by current legislation. The lowest glycerol content was found in the blank sample (freshly distilled), whereas the highest concentration of this compound was detected in the sample aged in American oak, with values of 3.8 and 5.7 mg/L, respectively. Total phenolic concentrations were estimated to range between 5.6 and 284.6 mg GAE/L using the Folin-Ciocalteu method, whereas the chromatographic method detected minimum and maximum concentrations equivalent to 0 mg/L and 75.2 mg/L, respectively. The mean test applied in this study revealed

significant differences between the cachaças aged in different woods, thus demonstrating the use of Brazilian woods for producing cachaças with distinct sensory complexities. A high sensitivity in quantifying the phenolic compounds present was observed by the chromatographic method, whereas their concentrations were overestimated in the samples in question using the spectrophotometric method. The results obtained here reinforce the importance of qualitative and quantitative monitoring of glycerol and phenolic compounds extracted during aging to guarantee quality standards and the safety of consumption of the final product.

Keywords: Aging. Aging barrels. Brazilian woods. Glycerol content. Phenol composition. Quality control.

Introduction

Cachaça is a fermented-distilled beverage obtained from sugarcane juice, and it is produced exclusively in Brazil. It has an alcohol concentration between 38 and 48% v/v at 20°C. The production chain is divided into the planting and harvesting of the raw material, fermentation of the sugarcane juice, distillation, standardization, and aging. All the stages, in turn, when combined with good manufacturing practices, ensure a high-quality product with high chemical and sensory richness (Brazil 2022; Da-Silva et al. 2023).

According to data from the Cachaça Yearbook (Brazil 2025), cachaça production generates direct and indirect jobs throughout the production and marketing process. The beverage generated US\$14,544,205.00 in exports last year, thanks to sales to 74 different countries. Because it is a uniquely Brazilian product, there is no competition from imports from other countries.

Storing the freshly distilled beverage in stainless steel containers or aging it in wooden barrels or stainless steel tanks is essential for ensuring its sensory quality, as this stage promotes the attenuation of the harsh notes characteristic of the freshly distilled spirit and the integration of its secondary compounds. When stored in stainless steel barrels, the flavor mellowing process occurs slowly, whereas the improvement of the

sensory aspects of the final product during the aging process in wooden barrels occurs more quickly.

Cardoso (2020) explains that, during aging in wood, the interaction between the barrel and the beverage promotes the incorporation of molecules extracted from the wood surface, as well as the transformation of existing molecules. The final product is a beverage with a color, aroma, and flavor characteristic of the plant species used. Unlike other fermented or distilled beverages, such as whiskey and wine, cachaça is not restricted to using a single plant species for aging, so other species of wood can be used. Da-Silva et al. (2023) point out that several Brazilian species are already used for this purpose to furnish products with distinct physical-chemical compositions and sensory complexities, as well as to expand the possibilities for blends and beverage offerings.

One of the compounds commonly found in aged cachaças is glycerol, which is formed during the fermentation stage. Considered to be the third largest fermentation product, glycerol contributes favorably to the sensory characteristics of texture, smoothness, sweetness, and complexity. When compared with distilled beverages, the content of this compound in fermented beverages, such as wine, is usually higher because of its low volatility (Bortoletto et al. 2016; D'avila et al. 2024; Wang et al. 2025).

In addition to glycerol, another type of compound widely found in aged beverages is the phenolic compound, molecules that are derived from the secondary metabolism of plants. They have a high biological potential and the ability to accentuate the sensory aspects of the product. The extraction of these compounds present on the surface of the barrel can occur either by direct extraction from the surface of the wood or by extraction of macromolecules, such as lignin, and subsequent degradation of these into smaller molecules that are more easily incorporated into the beverage. In distilled beverages, the composition and concentration of these compounds vary with the species and geographical origin of the wood used in the manufacture of the barrel, the heat treatments applied and the barrel's usage cycles. Their sensory contributions to the final product consequently depend on these factors (Canas 2017; Carvalho et al. 2020; Zhang et al. 2022; Castro et al. 2023; Souza et al. 2025).

Based on the importance of marketing cachaças in accordance with current legislation, coupled with consumer demand for distinctive, high-quality products, this study sought to analyze the physicochemical parameters, glycerol content, and the phenolic profile of cachaça aged in Brazilian woods, and compare them with established limits so as to understand the influence of each wood used in this study on the final product.

Materials and methods

Cachaça Production

The cachaças were obtained from a producer located in the city of Alfenas in southern Minas Gerais, Brazil. The samples were distilled in copper stills and aged in 200 L barrels for twelve months. One liter of cachaça was collected from each barrel. Beverages aged in barrels made of pink jequitibá (*Cariniana legalis*) (A2), freijó (*Cordia goeldiana*) (A3), amburana (*Amburana cearensis*) (A4), cumaru (*Dipteryx odorata*) (A5), grápia (*Apuleia leiocarpa*) (A6), eucalyptus (*Eucalyptus* ssp.) (A7), jatobá (*Hymenaea courbaril*) (A8), yellow ipê (*Handroanthus albus*) (A9), jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) (A10), sassafras (*Ocotea odorifera*) (A11), balsam (*Myroxylon peruiferum*) (A12), araribá (*Centrolobium robustum*) (A13), and American oak (*Quercus rubra* L.) (A14) were analyzed. For comparison, one liter of the cachaça used to fill the barrels was obtained and stored in a stainless-steel barrel (Blank) (A1).

In addition to the selected cachaças, two blends obtained from the aged beverages were analyzed. The first blend consisted of a mix of all the previously mentioned woods (except American oak) (A15), and the other consisted of amburana, jatobá, and cumaru (A16). The proportions of each blend were kept confidential by the producer.

Analysis of the Physicochemical Profile

The analysis of the beverage's physicochemical parameters was performed in accordance with Normative Instruction No. 24 of November 8, 2005, of the Ministry of Agriculture and Livestock (Brazil 2005). Based on this Instruction, visual appearance and alcohol concentration were evaluated, as well as the concentrations of aldehydes, esters, volatile acidity, dry extract, furfural, total sugars, and copper.

The quantification of higher alcohols in the samples was performed using a gas chromatograph according to the method proposed by Barbosa et al. (2023). The levels of acrolein and ethyl carbamate were evaluated according to the methods developed by Machado et al. (2013) and Nascimento et al. (1997) modified by Zacaroni et al. (2011), respectively.

Glycerol Quantification

The glycerol content in the samples was determined using the spectrophotometric method developed by Amerine and Ough (1980), with adaptations proposed by Alvarenga et al. (2023). In this method, the glycerol present in the beverage is oxidized to formaldehyde by the action of metaperiodate. The formaldehyde is then condensed with acetylacetone and ammonia, forming a colored complex. The analysis was performed in triplicate, and readings were taken on a Bel UV-M51 spectrophotometer at a wavelength of 420 nm. The glycerol concentrations in the samples were determined by comparison with the standard curve for glycerol concentrations maintained between 1.8 and 100 mg/L.

Analysis of phenolic composition

Determination of Total Phenolic Content

The concentration of total phenolic compounds present in the samples was determined using the method of Singleton and Rossi (1965), with adaptations proposed

by Rodrigues et al. (2016). One-mL aliquots of cachaça were diluted in 1 mL of 40% ethyl alcohol and 5 mL of distilled water in test tubes. Then, 0.5 mL of 50% Folin-Ciocalteu solution was added. After 5 minutes, a volume of 1 mL of NaCO₃ (5%) was added to the mixture. The test tubes were kept in the dark for sixty minutes. After this time, the solution was read at 725 nm using a UV-vis UVM51 spectrophotometer (BEL Engineering, Monza, Italy).

The concentration of total phenolic compounds in the samples was determined using the gallic acid calibration curve, at concentrations between 1 and 400 mg/L. The results were expressed in milligram equivalents of gallic acid per liter (mg GAE/L).

Analysis by High-Performance Liquid Chromatography

The phenolic compounds in the samples were identified and quantified using HPLC and applying the method proposed by Santiago, Cardoso, and Nelson (2017). In this analysis, a Shimadzu liquid chromatograph (Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) was used, equipped with two high-pressure pumps (SPD-M20A), a degasser (DGU-20A3), an interface (CBM-20A), and an autosampler (SIL-10AF). The separation of the compounds was promoted using an Agilent-Zorbax Eclipse XDB-C18 column (4.6 x 250 mm, 5 µm) coupled to an Agilent-Zorbax Eclipse XDB-C18 pre-column (4.6 x 12.5 mm, 5 µm). The elution of the compounds was achieved with a gradient composed of acetic acid (2%) (Solvent A), and methanol-water-acetic acid (70:28:2) (Solvent B), at a flow rate of 0.8 mL/min.

The elution gradient was programmed as follows: from 0 to 25 minutes, the composition varied from 0 to 40% (A–B); from 25 to 40 minutes, the gradient was adjusted from 40 to 55% (A–B); between 40 and 50 minutes, it increased from 55 to 100% (A–B); finally, from 50 to 60 minutes, the system returned from 100 to 0% (A–B).

To identify and quantify the compounds present in the samples, an analytical curve containing thirteen phenolic compounds, in concentrations varying between 0 and 1000 mg/L was prepared. The detection of the compounds was performed using a diode array detector (DAD), at a wavelength equivalent to 280 nm, by comparing the retention times

of the compounds in the samples and the standards. The quantification of the compounds was performed by external standardization, by comparing the peaks obtained in the cachaça samples with the peaks of the analytical curve. The compounds analyzed were: gallic acid, catechin, vanillic acid, phenol, syringic acid, vanillin, syringaldehyde, *p*-coumaric acid, sinapic acid, coniferaldehyde, coumarin, 4-methylumbelliferone, and *o*-coumaric acid. The samples were previously filtered using 0.45 µm polyethylene filter membranes (Millipore) and injected into the chromatographic system in triplicate.

Statistical Analysis

The means obtained from the physicochemical analysis, glycerol analysis, and phenolic composition were compared using Scott–Knott’s test at a 5% significance level. All statistical analyses were performed using SISVAR software (version 5.8) (Ferreira, 2011). To illustrate the similarity between the samples regarding the parameters analyzed, multivariate analysis graphs for principal component analysis and hierarchical clustering were obtained using CHEMOFACE software (Nunes et al. 2012).

Results and discussion

Physicochemical Parameters

The physicochemical profiles of the samples analyzed in this study are presented in Table 1.

Table 1 - Physicochemical parameters of the cachaça samples under study.

Samples	Physicochemical parameters							
	Alcohol conc. ¹	Volatile acidity ²	Total aldehydes ²	Total esters ²	Dry extract ³	Higher alcohols ²	Furfural ⁴	Total sugars ³
A1	47.9 ± 0.0a	15.5 ± 0.0j	7.8 ± 0.0f	11.9 ± 1.3h	0.1 ± 0.0a	193.3 ± 0.9h	0.1 ± 0.0f	ND
A2	42.4 ± 0.1j	38.6 ± 0.1g	28.3 ± 0.0a	19.6 ± 1.5f	0.1 ± 0.0a	216.9 ± 0.2b	0.3 ± 0.0e	ND
A3	41.7 ± 0.2k	51.8 ± 2.3d	6.9 ± 0.0g	34.6 ± 1.6b	0.3 ± 0.0a	228.4 ± 1.7a	1.1 ± 0.1c	ND
A4	44.3 ± 0.0g	50.4 ± 0.0d	14.8 ± 0.0d	25.6 ± 0.0e	0.9 ± 0.0a	196.8 ± 2.8g	0.6 ± 0.0d	ND
A5	47.9 ± 0.0a	23.3 ± 2.2i	10.9 ± 0.0e	16.4 ± 0.0g	0.9 ± 0.0a	192.6 ± 0.2h	0.3 ± 0.1e	ND
A6	46.7 ± 0.0b	15.9 ± 0.0j	4.4 ± 0.3h	11.2 ± 0.0h	0.2 ± 0.0a	194.2 ± 0.0h	0.1 ± 0.0f	ND
A7	46.4 ± 0.0c	48.1 ± 0.0e	11.1 ± 0.3e	28.2 ± 0.0d	0.5 ± 0.0a	213.9 ± 2.4c	1.0 ± 0.2c	ND
A8	44.8 ± 0.0e	23.3 ± 0.0i	8.3 ± 0.0f	15.6 ± 0.0g	0.4 ± 0.0a	197.2 ± 2.4g	0.02 ± 0.0f	ND
A9	44.5 ± 0.1f	53.5 ± 0.2c	22.1 ± 0.7b	31.4 ± 0.0c	0.6 ± 0.0a	194.0 ± 0.5h	ND	ND
A10	44.5 ± 0.2f	50.2 ± 0.2d	7.4 ± 0.0g	27.5 ± 0.1d	0.7 ± 0.0a	195.6 ± 0.4g	0.1 ± 0.0f	ND
A11	43.2 ± 0.0i	56.8 ± 2.4b	21.7 ± 0.0b	24.2 ± 0.0e	0.7 ± 0.0a	206.1 ± 0.1d	1.2 ± 0.1c	ND
A12	46.1 ± 0.0d	35.5 ± 0.0h	10.9 ± 0.7e	15.1 ± 0.0g	0.8 ± 0.0a	193.5 ± 0.3h	0.1 ± 0.0f	ND
A13	43.6 ± 0.1h	58.0 ± 0.1b	17.8 ± 0.3c	24.0 ± 0.0e	1.8 ± 0.0a	203.2 ± 0.8e	0.5 ± 0.0d	ND
A14	43.6 ± 0.0h	95.6 ± 0.1a	22.3 ± 0.3b	48.1 ± 0.0a	1.5 ± 0.0a	189.7 ± 0.7i	2.2 ± 0.1a	ND
A15	43.3 ± 0.1i	44.7 ± 0.1f	15.1 ± 0.0d	19.1 ± 1.4f	0.7 ± 0.0a	199.7 ± 0.3f	0.7 ± 0.1d	ND
A16	44.8 ± 0.0e	56.5 ± 0.0b	17.3 ± 0.1c	18.5 ± 1.4f	1.7 ± 0.0a	199.1 ± 0.1f	1.9 ± 0.3b	ND

Higher alcohols: sum of isobutyl, isoamyl and propyl alcohols; 1: GL % v/v at 20°C; 2: mg/100 mL anhydrous alcohol (a.a.); 3: g/ L; 4: mg/100 mL; ND: Not detected. Means followed by the same letter in the columns are statistically equal by Scott–Knott t-test ($\alpha = 5\%$).

According to Normative Instruction No. 539 of December 22, 2022, cachaça must contain an alcohol concentration between 38 and 48% v/v at 20°C (Brazil 2022). All the samples analyzed in this study contained an alcohol concentration between 41.7 and 47.9% v/v at 20°C. The highest alcohol concentrations were detected in the blank sample and the sample aged in a cumaru barrel (A5).

Numerous factors, from the sugarcane harvesting process to distillation, can influence the alcohol content of the beverage. Implementation of good manufacturing practices throughout the production chain, the ripeness of the sugarcane to be harvested, the soluble solids content of the fermented juice (°Brix), and the correct separation of fractions during distillation are crucial for determining the beverage's alcohol content. During the aging process, depending on the temperature and humidity of the aging room, ethanol can evaporate through the barrel's pores. In addition to evaporation through the barrel's pores, ethanol can react with other secondary compounds, leading to the formation of new compounds, which result in a lower concentration (Cardoso 2020; Alvarenga et al. 2023).

The volatile acidity levels of the samples were below the limit established by current legislation, equivalent to 150 mg/100 mL a.a.. D'avila et al. (2024) explain that volatile acidity plays a significant role in the beverage, both in the sensory profile and in the formation of new compounds. High concentrations indicate inadequate fermentation parameters or microbial contamination.

Aging in wooden barrels contributes significantly to the increase of this parameter. According to Bortoletto et al. (2016), ethanol can be oxidized into acetaldehyde and, subsequently, into acetic acid. In addition to ethanol oxidation, interaction with the wood surface during storage promotes the degradation of macromolecules into smaller molecules, such as phenolic compounds, which are easily incorporated into the beverage. Some of these are acidic in nature and may partially contribute to the increase of this parameter in cachaças.

The total aldehyde concentrations in the samples also remained below the maximum limit, corresponding to 30 mg/100 mL a.a. (Brazil 2022). Cardoso (2020) describes aldehydes as highly volatile compounds formed during fermentation. They have

a penetrating odor and some toxicity to the consumer. These compounds can be detected in beverages by the existence of watery eyes and a hangover sensation. Their concentrations in alcoholic beverages must be strictly controlled through proper fermentation and proper separation of the beverage's fractions because an excessive concentration of aldehydes results in poor sensory quality and health problems, such as alcohol poisoning and damage to the central nervous system. Barbosa et al. (2022) cite that greater oxygenation of the beverage occurs due to the porosity of wood, which leads to a greater number of oxidation reactions in the liquid and, consequently, an increase in the concentration of aldehydes and acids in the final product.

The ester group of beverages corresponds to compounds that, when combined with other secondary components, are responsible for aroma and flavor characteristics. Their formation results from the fermentation process, the esterification of organic acids with ethanol, and the extraction of components from the barrel during the aging process. With the exception of the sample aged in grápia (A6), the samples aged in barrels contained higher ester concentrations than the control cachaça sample. A higher concentration of esters in aged beverages is expected because of the extraction of esters from wood and the esterification of fatty acids with ethanol, which occurs faster when compared to inert containers, such as stainless steel (Cardoso 2020; D'avila et al. 2024).

Contrary to the data obtained in this study, Alcarde et al. (2010) found higher concentrations of total esters in samples aged in grápia barrels, whereas lower concentrations were found cachaças aged in other Brazilian woods, such as jequitibá, purple ipê and pereira. Some factors that can explain the discrepancies between the authors' data and those found in the grápia-aged sample analyzed in this study include the barrel's porosity and, consequently, the beverage's oxidation level, as well as the esterification reactions between acids and alcohols.

At the time of this study, there were no legal limits for dry extract content in cachaças. In this study, values ranged from 0.07 to 1.8 g/L for the blank (A1) and American oak-aged (A14) samples, respectively. Several studies, such as those by Catão et al. (2011), suggest that the dry matter content can be explained by the incorporation of molecules from the barrel into the beverage, which accounts for approximately 40% of the dry matter content and increases proportionally with storage time. Furthermore, aged

samples with more intense colors (Samples A5, A6, A14, and A15) contained larger amounts of dry matter than samples with lighter colors (Samples A3, A4, and A7). A similar result was reported by Anjos et al. (2011), who explained this increase by the extraction of phenolics and tannins, which, in turn, determined the color of the final product.

Higher alcohols correspond to the sum of propan-1-ol, 2-methylpropan-1-ol, and 3-methylbutan-1-ol (n-propyl, isobutyl, and isoamyl alcohols, respectively), and are formed during the fermentation process through amino acid catabolism, via both the Ehrlich pathway and the pyruvate pathway, the latter being favored under amino acid deficiency. Their formation can be influenced by fermentation parameters such as aeration, temperature, pH, and nutrient availability in the must, as well as by the yeast strain and its biological activity. Although they contribute sweet and floral aromatic characteristics at appropriate concentrations, higher alcohols may also be associated with fusel oil and solvent-like notes (Capobiango et al., 2013; Corbion et al., 2023; Pereira et al., 2024). In this study, the average content of higher alcohols in the analyzed samples was 203.4 mg/100 mL a.a., with the highest concentration observed in the sample aged in freijó (228.4 mg/100 mL a.a.) and the lowest in the sample aged in American oak (189.7 mg/100 mL a.a.).

During the aging process, the content of higher alcohols in cachaça may be influenced by the type of wood and the toasting process, which can transform these compounds through micro-oxygenation reactions mediated by the wood, as well as reactions with wood-derived substances such as organic acids, aldehydes, and phenolic compounds. As a result, a decrease in higher alcohols and an increase in ester concentration are generally observed in the final product. Since each wood type differently affects chemical composition, perception, and transformation reactions of compounds, the profile of higher alcohols in the product is directly governed by the wood used during aging (Tarko et al., 2023; Arduini; Chinnici, 2026). This was demonstrated by Santiago et al. (2014), who, when analyzing cachaças aged in oak and amburana, observed differences in higher alcohol content among the samples, inversely correlated with total ester content. This inverse correlation was also observed in some of the samples investigated in the present study.

Furfural concentrations in the samples remained below the current maximum limit (5 mg/100 mL a.a.), with the highest value detected in the sample aged in American oak (A14). Considered to be a toxic aldehyde, furfural can be formed at various stages of production, such as through the degradation of pentoses during the burning of sugarcane (an illegal and prohibited practice), the pyrogenation of organic matter during distillation, and the action of acids in the beverage on pentoses and polymers during the aging process (Masson et al. 2007; Cardoso 2020).

In addition to the factors mentioned above, other factors that can contribute to the furfural content in cachaça samples include the plant species used in barrel production and the heat treatment to which it can be subjected. Barbosa et al. (2022) explains that the barrel toasting process results in the dehydration of cellulose and hemicellulose and promotes the emergence of furfural and hydroxymethylfurfural, respectively.

Measurement of the sugar concentration in cachaças is of paramount importance. Current legislation establishes an upper limit of 6 g/L of total sugars, whereas this limit remains between 6 and 30 g/L for sweetened cachaças. When present, these sugars must be listed on the label's ingredients list (Brazil 2022). In this study, none of the samples contained detectable sugar concentrations using the official analytical method (Brazil 2005). The results obtained for the contaminants required by Normative Instruction No. 539 of December 2022 (Brazil 2022) are presented in Table 2.

Table 2 - Organic and inorganic contaminants in the cachaça samples under study.

Samples	Concentrations of Contaminants					
	Methanol ¹ (methyl alcohol)	Butan-1-ol ¹ (butyl alcohol)	Butan-2-ol ¹ (isobutyl alcohol)	Prop-2-enal (Acrolein) ¹	Copper ²	Ethyl carbamate ³
A1	1.0 ± 0.0d	0.8 ± 0.0f	0.2 ± 0.0f	< LOD	1.0 ± 0.1f	39.0 ± 0.5j
A2	0.5 ± 0.0e	1.2 ± 0.0a	0.1 ± 0.0g	< LOD	1.9 ± 0.0c	63.0 ± 0.0e
A3	ND	1.1 ± 0.0b	0.1 ± 0.0g	< LOD	2.5 ± 0.0a	88.0 ± 0.3a
A4	0.5 ± 0.0e	1.0 ± 0.0c	0.5 ± 0.0e	< LOD	0.9 ± 0.1f	36.7 ± 2.1k
A5	ND	0.9 ± 0.0e	0.4 ± 0.0e	< LOD	0.7 ± 0.0g	41.8 ± 0.5i
A6	ND	0.9 ± 0.0f	0.2 ± 0.0f	< LOD	0.5 ± 0.0h	36.9 ± 1.8k
A7	1.7 ± 0b	1.1 ± 0.1c	1.7 ± 0.1c	< LOD	1.1 ± 0.3e	66.9 ± 0.2d
A8	1.6 ± 0.0c	0.9 ± 0.0f	0.3 ± 0.0f	0.8 ± 0.0c	0.4 ± 0.0h	27.1 ± 0.4m
A9	ND	0.9 ± 0.0d	0.3 ± 0.01f	4.1 ± 0.2a	1.9 ± 0.0b	72.9 ± 0.0c
A10	0.4 ± 0.0e	0.9 ± 0.0f	0.03 ± 0.0g	< LOD	0.5 ± 0.0h	33.4 ± 0.7l
A11	3.9 ± 0.1a	1.1 ± 0.0b	0.1 ± 0.0g	< LOD	2.2 ± 0.0b	79.7 ± 0.7b
A12	0.5 ± 0.0e	0.9 ± 0.0f	3.8 ± 0.1a	< LOD	1.2 ± 0.0e	43.1 ± 0.6h
A13	0.5 ± 0.0e	1.1 ± 0.0b	0.04 ± 0.0g	1.2 ± 0.1b	2.0 ± 0.2b	49.4 ± 0.0g
A14	1.9 ± 0.0b	1.0 ± 0.0d	0.2 ± 0.0f	< LOD	1.6 ± 0.0d	40.8 ± 0.0i
A15	ND	0.9 ± 0.0e	1.2 ± 0.0d	< LOD	1.5 ± 0.1d	17.7 ± 0.1n
A16	ND	0.9 ± 0.0e	3.3 ± 0.0b	< LOD	0.8 ± 0.0f	57.4 ± 0.4f

1: mg/100 mL a.a.; 2: mg/L; 3: µg/L; ND: Not detected; < LOD: lower than the detection limit of the method (0.2 mg/100 mL a.a.). Means followed by the same letter in the columns are statistically equal by the Scott–Knott t-test ($\alpha = 5\%$).

Methanol is a toxic contaminant whose formation is associated with the enzymatic degradation of pectin present in the pressing residues of raw materials, such as sugarcane or citrus fruits, during the fermentation process; these compounds can be reduced in the juice to be fermented through filtration steps. It is typically found at higher concentrations in the initial distillation fraction, known as the “head.” When ingested, it can cause acidosis, blindness, and even death (Dato et al., 2005; Cardoso, 2020). In this study, the methanol concentrations ranged from not detected to 3.9 mg/100 mL a.a. (Sample A11), remaining within the established limits (20 mg/100 mL a.a.). Although present, the methanol content represents less than 20% of the maximum allowed value, indicating that the production process was satisfactorily controlled; however, attention is still required at critical points of its formation, such as the filtration and decantation of the juice to be fermented and the proper fraction cuts during distillation.

Although it is an undesirable product of the process and due to its formation pathways, methanol levels in cachaça do not tend to increase significantly during aging, unlike other congeners such as aldehydes and esters. However, due to factors such as evaporation during aging, methanol concentrations may decrease or increase as a result of methanol evaporation itself or the evaporation of water and ethanol, respectively. Similar results were reported by Spaho et al. (2019), who correlated the reduction of methanol in aged apple spirits with evaporation through barrel pores and with chemical reactions related to the oxidation of methanol, leading to the formation of other compounds such as formaldehyde.

The butan-1-ol concentrations in the samples were lower and higher in the blank (A1) and jequitibá (A2) samples, corresponding to 0.8 and 1.2 mg/100 mL a.a., respectively. The lowest and highest butan-2-ol concentrations were identified in the samples aged in jackfruit (A10) and balsam (A12), equivalent to 0.03 and 3.8 mg/100 mL a.a., respectively. These two alcohols are bacterial byproducts formed during the fermentation process. Butan-1-ol originates from contamination of the must by *Clostridium acetobutylicum*, whereas the formation of 2-butanol through the enzymatic reduction or oxidative degradation of 2,3-butanediol is related to contamination by bacteria of the genus *Lactobacillus*. The formation of these compounds can be effectively minimized through appropriate sugarcane processing practices, particularly by avoiding the use of overmature or deteriorated cane, as well as cane that has been stored for extended periods between harvest and milling (Cardoso 2020; Alvarenga et al. 2023). Some of the possible pathways of formation of this substance are related to dehydration of glycerol and contamination by lactic acid bacteria.

Acrolein, scientifically known as prop-2-enal, is a toxic, unsaturated aldehyde with a bitter and pungent taste and exhibits high risk to human health. It can be detected in foods rich in carbohydrates and lipids that have been heated, as well as in fermented products. Its possible pathways of formation in alcoholic beverages are related to the degradation of glycerol and contamination by lactic acid bacteria (Zhou et al. 2024). Of all the samples tested, those aged in jatobá, yellow ipê, and araribá (Samples A8, A9, and A13, respectively) contained detectable acrolein concentrations according to the method employed, with values equal to 0.8, 4.1, and 1.2 mg/100 mL a.a., respectively. In their studies, Alvarenga and colleagues (2023) found positive correlations between the concentrations of acrolein and butan-2-ol in cachaça samples. Contrary to the authors' findings, this study found no apparent correlations between these two compounds.

The copper encountered in distilled beverages comes from the equipment used in the distillation process, and it is desirable because it can catalyze reactions with sulfur compounds and improve the sensory aspect of the distilled product. Its concentration must be controlled through adequate cleaning of the distillation apparatus or through the cautious use of suitable filters (Barbosa et al. 2022; Silva et al. 2022). In aged beverages, lower concentrations of this compound can be related to possible copper adsorption reactions on the barrel surface (Bortoletto et al. 2016). For the samples in this study, the highest concentration of this compound was detected in the sample stored in freijó barrel (A3) (2.5 mg/L). In the other aged samples, the average content of all the samples corresponded to 1.3 mg/L.

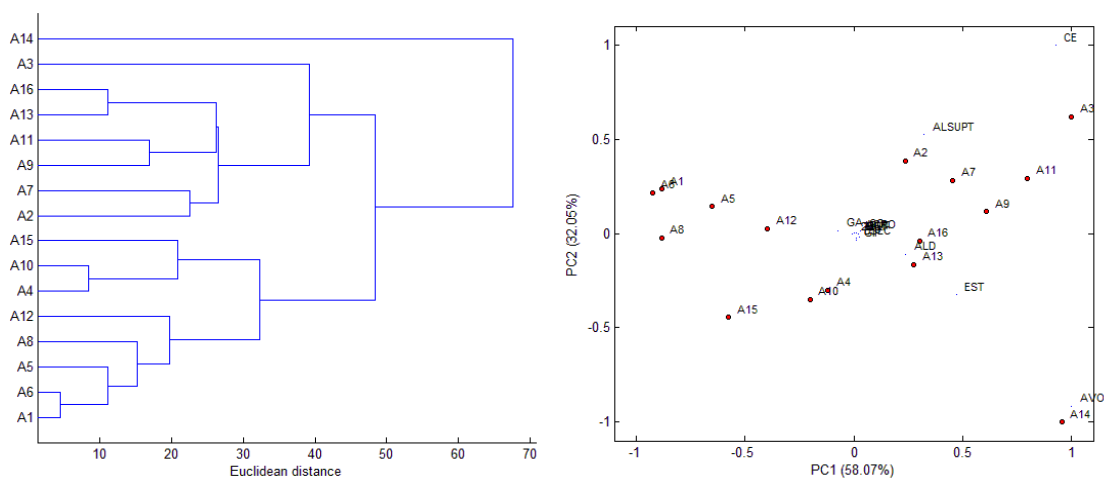
Ethyl carbamate (EC) is a highly toxic and potentially carcinogenic compound formed from the enzymatic degradation and thermal cleavage of cyanogenic glycosides present in cachaça raw materials. The glycoside precursor to the formation of this compound, Dhurrin, is found in higher concentrations in the apical meristem of sugarcane, indicating that higher EC concentrations can be detected in cachaças produced using improperly topped sugarcane (Cardoso et al. 2025).

In this study, the EC values of all the samples analyzed were lower than the maximum value of 210 µg/L proposed by IN No. 539 (Brazil 2022). The lowest and highest carbamate levels were detected in Blend 1 (A15) (17.7 µg/L) and the sample aged in freijó (A3) (88.0 µg/L), respectively. In addition to the mandatory steps of cachaça production, EC concentrations in the final product can increase or decrease during the maturation period in inert containers or during the aging process in wooden barrels. Even when detected in trace

concentrations in freshly distilled beverages, the formation of EC during the storage process continues through the interaction between ethanol and amino acids on the barrel surface (Zacaroni et al. 2011). Recently, research by Cardoso et al. (2025) showed that EC is formed from the precursor Dhurrin, and that its control is primarily based on the correct manner of cutting the sugarcane.

Hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA) are valuable tools for visualizing and interpreting multivariate data and identifying similarities and differences between samples. The dendrograms obtained by HCA and PCA for the samples are shown in Figures 1 and 2. PCA indicated that 90.1% of the data were explained by the first and second principal components.

Figures 1 and 2 - Hierarchical cluster analysis (HCA) and principal component analysis (PCA) plots for the cachaça samples under study.



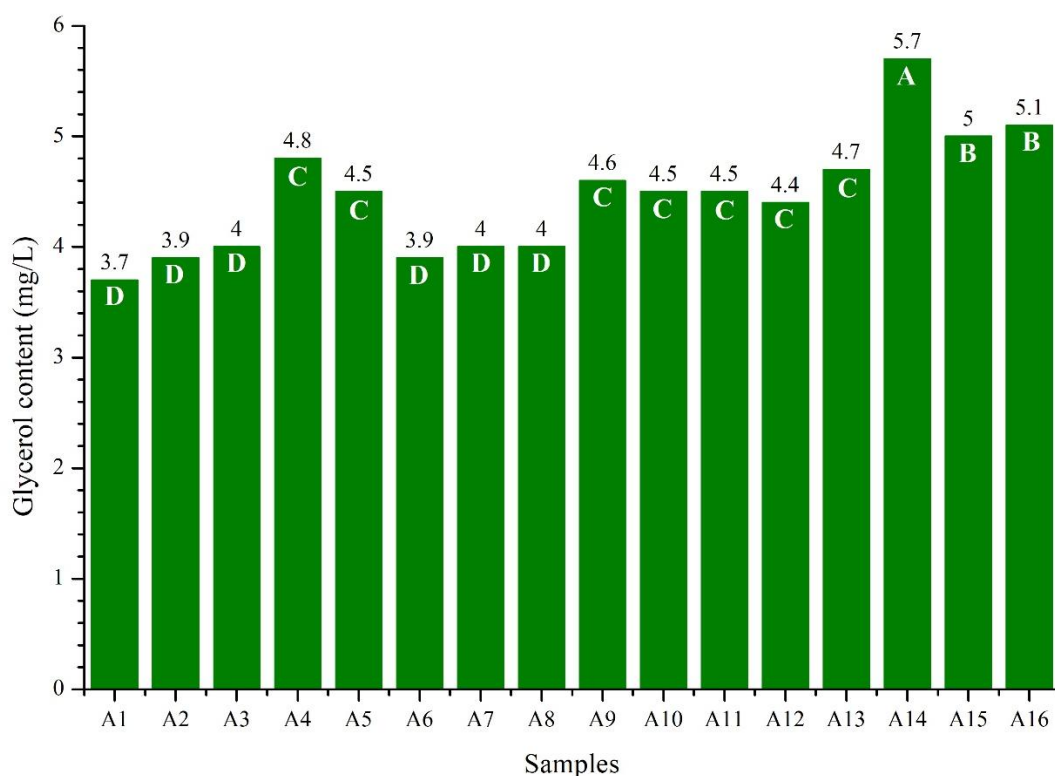
Five distinct groups were observed. These groups were formed on the basis of their degrees of similarity. Strong similarities for the physicochemical parameters investigated, except for higher alcohols, esters, and aldehydes, were observed among the groups formed by the unaged sample and the samples aged in cumaru, grábia, jatobá, and balsam (Samples A5, A6, A8, and A12), as well as the group formed by the blend of twelve woods and the samples aged in amburana and jackfruit (Samples A15, A4, and A10). Similarities for all the parameters were observed among the group formed by the blend composed of beverages aged in amburana,

cumaru, and jatobá and by the samples aged in jequitibá, eucalyptus, yellow ipê, sassafrás, and araribá (Samples A16, A3, A7, A11, and A13). Finally, the samples aged in freijó and American oak (A3, and A14) formed two distinct groups, differing from the other samples in all the parameters, particularly with regard to ethyl carbamate and volatile acidity levels, respectively.

Glycerol Concentration Analysis

The glycerol concentrations for each sample analyzed are presented in Figure 3. Although there are no limits established by current legislation, its concentration in the final product tends to be low. In this study, the lowest value found for this parameter corresponded to the blank sample (A1) (3.8 mg/L), whereas the highest concentration was detected in the sample aged in American oak (A14) (5.7 mg/L). The average glycerol concentration of the other aged samples was 4.3 mg/L.

Figure 3 - Glycerol concentration in aged samples evaluated in this study.



Means followed by the same letter in the columns are statistically equal by the Scott-Knott t-test ($\alpha = 5\%$).

Glycerol production in some beverages, such as wine and beer, can be considered beneficial, whereas in yeast-distilled beverages it may be undesirable, as it represents a waste of fermentable substrate. Its high boiling point (290 °C) prevents significant volatilization during the distillation process. However, glycerol can be present in distilled beverages due to its solubility in ethanol and partial transfer during steam distillation. Its synthesis through yeast metabolism is related to redox balance and the response to osmotic stress caused by substrate availability in the must (Bortoletto et al. 2016). Furthermore, the quantification of glycerol in alcoholic beverages is important for identifying raw material deterioration or adulteration resulting from the addition of natural or synthetic glycerol. Therefore, monitoring this parameter can be useful to ensure production efficiency (Scanes et al. 1998; Souza et al. 2012; Garcia et al. 2015; Cardoso 2020).

Wang et al. (2025), studying the Chinese distillate baiju, reported that glycerol is a key compound for the formation of other flavor compounds during the process. Glycerol concentrations in their samples ranged from 2.6 mg/L to 15.9 mg/L, which is explained by the raw material used and fermentation parameters, such as temperature, substrate availability, and microbial strain.

Corroborating the results presented for these samples, Garcia et al. (2015) found lower glycerol levels in cachaças stored in stainless steel containers (1.4 mg/L), whereas higher concentrations of this compound were identified in samples aged in oak barrels (12.5 mg/L). Subsequently, Bortoletto et al. (2016) found higher glycerol levels in cachaças aged in oak barrels, corresponding to 21.9 mg/L, whereas the control sample had a glycerol concentration equivalent to 1.4 mg/L.

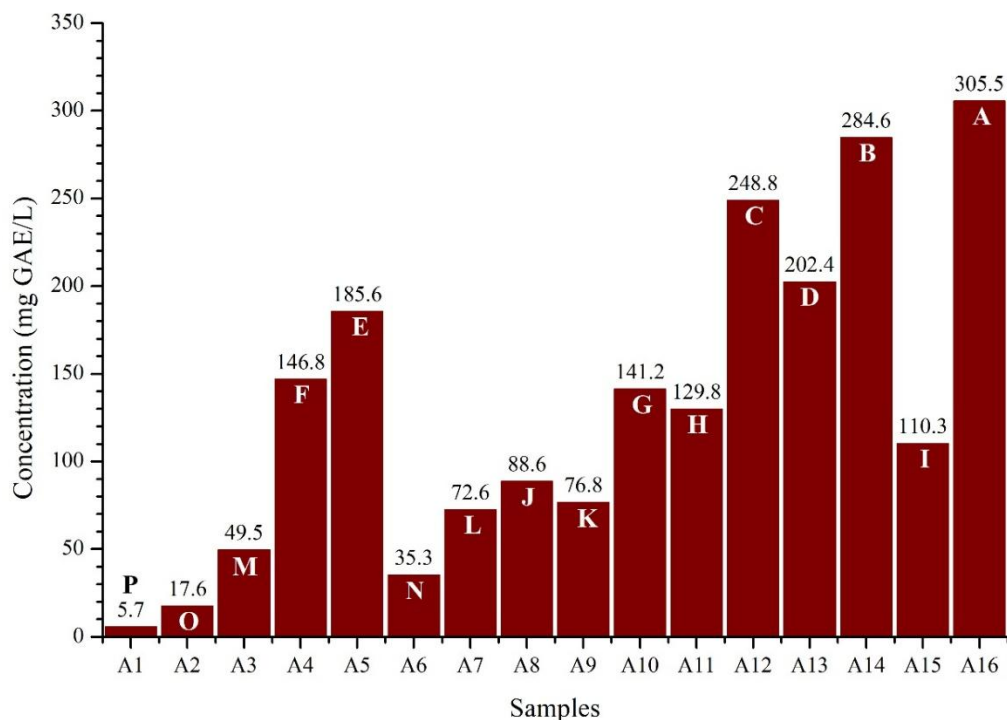
For Alvarenga et al. (2023), a plausible explanation for the higher glycerol concentrations in aged beverages than in samples stored in stainless steel tanks is the reactions that occur between the beverage and the inner surface of the barrel. According to Garcia and colleagues (2015), wood cell walls are composed of compounds that can be hydrolyzed and/or extracted, to produce glycerol and fatty acids.

During the aging process, the glycerol content in aged beverages is maximized by the transesterification of wood triglycerides with ethanol to generate ethyl esters of fatty acids and glycerol (Bortoletto et al. 2016; Corbion et al. 2023). According to Lee et al. (2001), the sugar concentration in aged spirits, such as whiskey, gradually increases in the early stages of aging, whereas fructose and glycerol concentrations are greatest in the more advanced stages of aging.

Phenolic composition of the samples

The data obtained for the total phenolic content in the samples is presented in Figure 4. All the phenolic concentrations varied significantly between samples. The lowest and highest concentrations were detected in the non-aged sample used as a reference (A1) and in the sample aged in American oak (A14), respectively, at concentrations equivalent to 5.6 and 284.6 mg GAE/L.

Figure 4 - Concentrations of total phenolic compounds in the aged cachaça samples.



Means followed by the same letter in the columns are statistically equal by the Scott–Knott t-test ($\alpha = 5\%$).

Analyzing only the aged samples, the highest total phenolic contents were identified in samples aged in American oak, balsam, and araribá (Samples A14, A12, and A13), whereas lower concentrations of total phenolics were observed for grápia, freijó, and jequitibá (Samples A6, A3, and A2). A similar result was presented by Rodrigues et al. (2016), who obtained higher total phenolic contents in samples aged in oak, amburana, and balsam.

The phenolic compounds quantified by HPLC and their respective limits of detection (LOD) and quantification (LOQ), expressed in mg/L, are presented in Table 4. The LOD and LOQ of this study were estimated to lie between 0.02 and 0.04 mg/L and 0.07 and 0.14 mg/L, respectively. These values were similar to those established by Santiago, Cardoso and Nelson (2017), who, when developing the method, estimated detection values between 0.022 and 0.046 mg/L, whereas the quantification values remained between 0.073 and 0.154 mg/L.

Table 4 - Limits of detection and quantification for phenolic compounds quantified in aged samples.

Compound	LOD	LOQ
Gallic acid	0.03	0.11
Catechin	0.03	0.12
Vanilic acid	0.02	0.10
Phenol	0.03	0.11
Syringic acid	0.04	0.14
Vanilin	0.02	0.09
Syringaldehyde	0.03	0.09
p-Coumaric acid	0.02	0.09
Sinapic acid	0.03	0.10
Coniferaldehyde	0.04	0.14
Coumarin	0.02	0.08
4-Methylumbelliferone	0.03	0.11
<i>o</i>-Coumaric acid	0.02	0.07

Table 5 represents the concentrations of phenols quantified by the chromatographic method applied in this study, expressed in mg/L. As expected, the unaged sample (A1) did not indicate the presence of phenolic compounds. Higher concentrations of phenolic compounds were found in samples aged in balsam and American oak by this method (A12 and A14), whereas samples aged in jequitibá and eucalyptus barrels (A2 and A7) contained lower levels of these compounds.

Table 5 - Phenolic content present in samples of cachaça aged in barrels made of native Brazilian species of wood and exotic woods (mg/L).

Samples	GAA	CAT	VAA	PHEN	SYRA	VAN	SYR	P-COU	SINA	CONF	COUM	4-MUMB	O-COU	Total Concentration
A1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0 ± 0.0p
A2	7.2 ± 0.1d	ND	0.2 ± 0.0i	ND	< LOQ	0.3 ± 0.0i	1.1 ± 0.0i	ND	ND	ND	ND	ND	ND	8.8 ± 0.1m
A3	ND	1.3 ± 0.1d	0.9 ± 0.1f	1.4 ± 0.1e	0.5 ± 0.0i	ND	ND	ND	ND	ND	0.2 ± 0.0f	ND	0.2 ± 0.0e	4.5 ± 0.2n
A4	0.7 ± 0.0h	7.4 ± 0.1a	11.4 ± 0.1b	ND	0.4 ± 0.0i	0.2 ± 0.0j	ND	< LOQ	ND	ND	57.9 ± 0.4a	ND	ND	78 ± 0.3b
A5	ND	ND	1.0 ± 0.0f	ND	9.7 ± 0.1b	1.5 ± 0.1f	1.0 ± 0.1i	0.2 ± 0.0d	ND	0.7 ± 0.0e	0.3 ± 0.0f	ND	8.7 ± 0.2a	23.1 ± 0.3l
A6	ND	0.2 ± 0.0g	< LOQ	ND	< LOQ	< LOQ	0.8 ± 0.1j	< LOQ	ND	ND	< LOQ	1.0 ± 0.2d	ND	2.0 ± 0.2o
A7	7.0 ± 0.4d	ND	0.8 ± 0.1g	ND	1.6 ± 0.0f	2.9 ± 0.0c	8.2 ± 0.0d	< LOQ	ND	3.5 ± 0.1b	< LOQ	ND	ND	24.0 ± 0.4k
A8	4.4 ± 0.2f	4.9 ± 0.1b	ND	6.2 ± 0.2d	0.2 ± 0.0j	ND	0.5 ± 0.0j	0.5 ± 0.1c	2.7 ± 0.1b	ND	1.6 ± 0.1d	5.6 ± 0.5a	0.3 ± 0.0d	26.9 ± 0.6h
A9	0.2 ± 0.0i	0.8 ± 0.0e	0.5 ± 0.0h	ND	12.3 ± 0.4a	4.2 ± 0.1a	3.2 ± 0.0g	1.3 ± 0.0a	0.2 ± 0.0d	ND	0.6 ± 0.0e	0.9 ± 0.0d	< LOQ	24.2 ± 0.4j
A10	12.8 ± 0.4b	0.5 ± 0.0f	ND	40.6 ± 0.8a	ND	1.0 ± 0.1h	0.8 ± 0.3j	ND	ND	1.4 ± 0.1d	0.5 ± 0.0e	ND	ND	57.6 ± 1.7d
A11	1.4 ± 0.0g	ND	1.5 ± 0.0e	ND	1.8 ± 0.0e	3.2 ± 0.0b	7.0 ± 0.0e	ND	ND	3.4 ± 0.4b	0.4 ± 0.0e	0.9 ± 0.2d	7.0 ± 0.1b	26.6 ± 0.5i
A12	9.9 ± 0.1c	ND	ND	ND	0.4 ± 0.0i	0.1 ± 0.0k	15.5 ± 0.7b	0.5 ± 0.4c	25.9 ± 0.3a	14.2 ± 0.3a	ND	3.2 ± 0.0b	5.5 ± 0.0c	75.2 ± 1.1c
A13	0.5 ± 0.0h	ND	18.1 ± 0.1a	ND	0.9 ± 0.0g	2.7 ± 0.0e	2.2 ± 0.2h	< LOQ	ND	2.1 ± 0.1c	ND	ND	0.2 ± 0.0e	26.7 ± 0.3g
A14	19.7 ± 0.7a	ND	0.9 ± 0.1f	ND	2.8 ± 0.1d	2.8 ± 0.1d	18.4 ± 0.2a	ND	0.5 ± 0.1c	1.5 ± 0.1d	ND	ND	0.23 ± 0.0d	46.8 ± 0.9e
A15	4.9 ± 0.1e	2.2 ± 0.5c	3.6 ± 0.1d	8.3 ± 0.2c	0.7 ± 0.0h	1.1 ± 0.1g	3.9 ± 0.4f	< LOQ	ND	1.4 ± 0.0d	8.8 ± 0.0c	1.5 ± 0.0c	ND	36.4 ± 0.1f
A16	5.1 ± 0.2e	2.1 ± 0.2c	5.9 ± 0.2c	31.4 ± 0.3b	3.0 ± 0.0c	1.1 ± 0.0g	8.7 ± 0.3c	0.6 ± 0.1b	2.7 ± 0.1b	2.0 ± 0.2c	16.6 ± 0.4b	3.0 ± 0.4b	ND	82.2 ± 0.7a

Caption: GAA: Gallic acid; CAT: Catechin; VAA: Vanillic acid; PHEN: Phenol; SYRA: Syringic acid; VAN: Vanillin; SYR: Syringaldehyde; P-COU: *p*-coumaric acid; SINA: Sinapic acid; CONF: Coniferaldehyde; COUM: Coumarin; 4-MUMB: 4-methylumbelliferone; O-COU: *o*-coumaric acid; ND: Not detected; < LOQ: lower than the detection limit of the method

Chromatographic analysis did not indicate the presence of any compound in all the aged samples. Considering that the samples were aged under the same environmental conditions and time, the distinct phenolic compositions can be justified mainly by the chemical characteristics of the wood. The alcohol content of the aged beverage is also a determining factor in the extraction process of compounds because the greater the alcohol content, the more effective the extraction process (Zacaroni et al. 2014; Santiago et al. 2017).

Higher concentrations of gallic acid and syringaldehyde were found in the sample aged in American oak (A14) (19.7 and 18.4 mg/L, respectively). The compounds catechin and coumarin were detected at higher levels in the sample aged in amburana (A4) (7.4 and 57.9 mg/L, respectively). The sample aged in yellow ipê barrels (A9) contained higher concentrations of vanillin and syringic and p-coumaric acids (4.2, 12.3 and 1.3 mg/L, respectively). Sinapic acid and coniferaldehyde concentrations were detected in higher quantities in the sample aged in balsam wood (A12) (25.9 and 14.2 mg/L, respectively). Finally, the highest levels of phenol, 4-methylumbelliferone, and vanillic and o-coumaric acids were detected in the samples aged in jackfruit (A10) (40.6 mg/L), jatobá (A8) (5.6 mg/L), araribá (A13) (18.1 mg/L), and cumaru (A5) (8.7 mg/L).

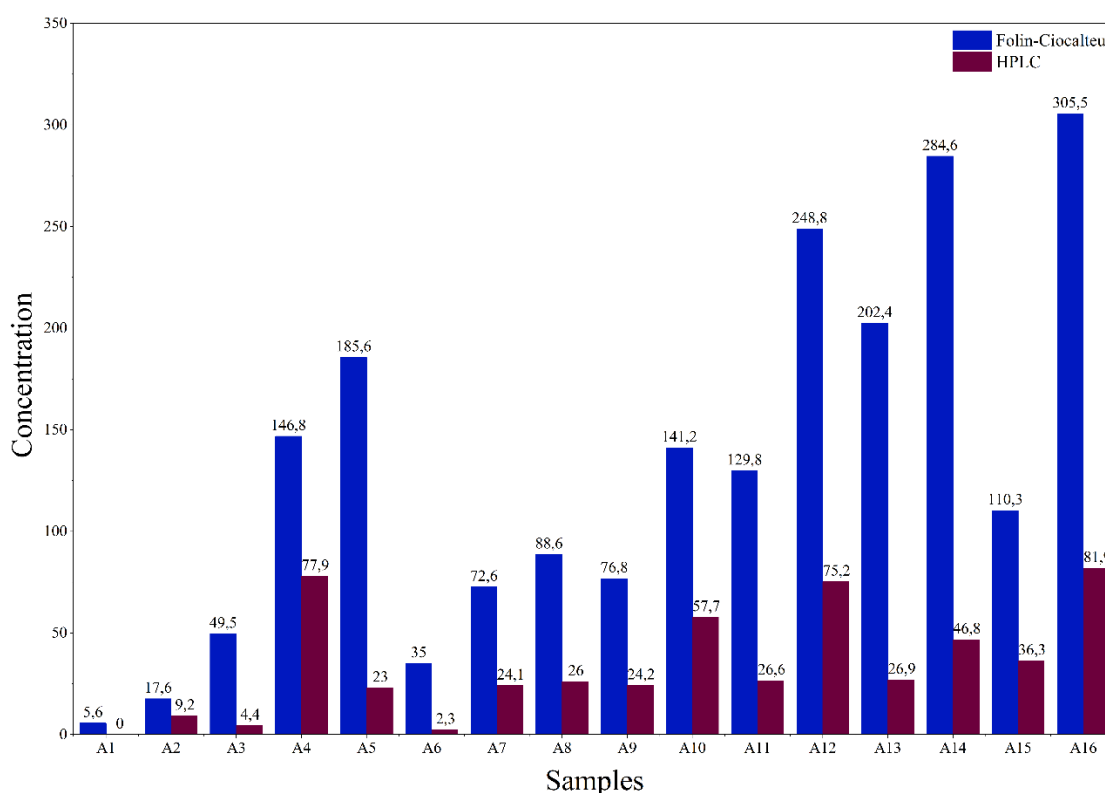
Although they play a crucial role in the sensory characteristics of aged cachaça and offer numerous benefits to human health, the phenolic compounds extracted during the aging process must be analyzed carefully and thoroughly. In this study, the highest levels of phenolic compounds detected were coumarin and phenol in samples aged in amburana and jackfruit wood (Samples A4, and A10, respectively), at concentrations equivalent to 57.9 mg/L and 40.6 mg/L, respectively.

With the exception of the sample aged in freijó (A13), which did not have detectable values of vanillin in its composition, and the samples aged in jackfruit (A10) and balsam (A12) did not indicate the presence of vanillic acid in their compositions. All the samples that contained concentrations greater than the quantifiable limits for vanillin also contained quantifiable limits for vanillic acid. This same relationship was seen for the compounds syringaldehyde and syringic acid, which, with the exception of the samples aged in freijó (A3) and amburana wood (A4) that did not contain concentrations of syringaldehyde, and jackfruit wood (A10), which did not show detectable concentrations of syringic acid. This correlation had already been established by Alcarde,

Souza and Bortoletto (2014), who justified this relationship by the oxidation reactions that form vanillic and syringic acid molecules from the oxidation of vanillin and syringaldehyde, respectively.

Figure 5 represents a comparison of the phenolic contents obtained from the application of the two methods applied in this study.

Figure 5 - Total phenolic content obtained by the Folin-Ciocalteu method and the sum of phenolic compounds quantified by high-performance liquid chromatography in cachaças aged in different barrels.



The phenolic compound content obtained by the Folin-Ciocalteu method was significantly higher than the sum of the phenolic concentrations quantified by HPLC. The overestimation of phenolic concentration by this method can be justified by the reagent's ability to interact with non-phenolic compounds present in the samples. These possible interactions with other non-phenolic compounds, such as aromatic esters, sugars, and proteins, can justify a false-positive result for phenolics in the control (non-aged) sample (Rodrigues et al. 2016; Pérez; Dominguez-López; Lamuela-Raventós 2023).

The spectrophotometric technique has a low application cost, speed in obtaining results, and can be applied in a preliminary and qualitative way in the analysis of the evolution of chemical composition because its low selectivity does not allow the exact quantification of the phenolic content. The chromatographic method, on the other hand., due to its high sensitivity and selectivity for each compound, provides robust and concrete results regarding phenolic composition. However, it is limited by its high infrastructure and maintenance costs.

Conclusion

Significant differences were observed in the physicochemical parameters of the samples investigated in this study, all within legally permitted limits. PCA indicated the formation of distinct groups based on similarities among the samples for each analyzed parameter. Compared to the other samples, the one aged in American oak exhibited the most distinct behavior. Glycerol levels remained similar across most samples, with higher values observed in the aged samples compared to the control. The method used to determine total phenolic content overestimated the concentrations obtained by chromatographic methods, indicating that the Folin–Ciocalteu method should be used only in a quantitative manner. The use of alternative woods appears promising for producing cachaças with distinct chemical profiles and phenolic compositions. Further studies are needed to elucidate the determining factors in aging and to identify chemical markers derived from each type of wood.

Acknowledgments

This work was supported by the Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG – Project PPE 0035/2023), the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Project CNPq 311183/2022-0), and Coordenação do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES – Finance code 001).

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

References

- Alcarde AR, Souza LM, Bortoletto AM. 2014. Formation of volatile and maturation-related congeners during the aging of sugarcane spirit in oak barrels. *J Inst Brew* 120(4):529-536. <https://doi.org/10.1002/jib.165>
- Alcarde AR, Souza PA, Belluco AES. 2010. Aspectos da composição química e aceitação sensorial da aguardente de cana-de-açúcar envelhecida em tonéis de diferentes madeiras. *Food Sci Technol* 30 (1). <https://doi.org/10.1590/S0101-20612010000500035>
- Alvarenga GF, Machado AMR, Barbosa RB, Ferreira VRF, Santiago WD, Teixeira ML, Nelson DL, Cardoso MG. 2023. Correlation of the presence of acrolein with higher alcohols, glycerol, and acidity in cachaças. *J Food Sci* 88(4):1753-1768. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16523>.
- Amerine MA, Ough CS. 1980. Methods for analysis of musts and wines. Wiley, New York.
- Anjos JP, Cardoso MG, Saczk AA, Zacaroni LM, Santiago WD, Dórea HS, Machado AMR. 2011. Identification of ethyl carbamate during the aging of cachaça in an oak barrel (*Quercus* sp.) and a glass vessel. *Quim Nova* 34:874-878. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000500025>
- Barbosa RB, Alvarenga GF, Ferreira VRF, Santiago WD, Nelson DL, Cardoso MG. 2023. Cachaça sold in polyethylene terephthalate packaging: Determination of the physical-chemical profile, polycyclic aromatic hydrocarbons and ethyl carbamate. *Cien Agrotec* 47. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202347007522>
- Barbosa RB, Santiago WD, Alvarenga GF, Oliveira RES, Ferreira VRF, Nelson DL, Cardoso MG. 2022. Physical–chemical profile and quantification of phenolic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in cachaça samples aged in oak (*Quercus* sp.)

barrels with different heat treatments. *Food Bioprocess Technol.* 15: 1977-1987.
<https://doi.org/10.1007/s11947-022-02853-w>

Bortoletto AM, Correa AC, Alcarde AR. 2016. Fatty acid profile and glycerol concentration in *cachaças* aged in different wood barrels. *J Inst Brew* 122 (2):293-298.
<https://doi.org/10.1002/jib.313>

Brazil. Ministry of Agriculture and Livestock (MAPA). **Normative Instruction No. 24, of September 8, 2005. Approves the Operational Manual of Beverages and Vinegars.** 2005.

Brazil. Ministry of Agriculture and Livestock (MAPA). **Ordinance No. 539, of December 26, 2022. Establishes the Identity and Quality Standards for sugarcane spirit and cachaça.** 2022.

Brazil. Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA). Secretariat of Agricultural Defense (SDA). **Cachaça Yearbook 2025: Reference Year 2024.** Brasília: MAPA/SDA, 2025. 49 p.

Canas S. 2017. Phenolic composition and related properties of aged wine spirits: influence of barrel characteristics. A review. *Beverages* 3(4).
<https://doi.org/10.3390/beverages3040055>

Cardoso MG, Santiago WD, Pimentel GV, Santos PA, Marques MALSM, Fernandes AI, Rezende DACS, Teixeira AR, Santos WA, Machado AMR, Freire CS, Nelson DL. 2025. Quantification of the cyanogen Dhurrin at high levels in sugar cane varieties and its correlation as a precursor of ethyl carbamate in *cachaças*. *Aust J Crop Sci* 19(7):737-747.
<https://doi.org/10.21475/ajcs.25.19.07.p13>

Cardoso MG. 2020. *Produção de aguardente de cana*. 4th ed. Lavras: UFLA Press, 2020.

Carvalho DG, Razan L, Trierweiler LF, Trierweiler JO. 2020. Determination of the concentration of total phenolic compounds in aged *cachaça* using two-dimensional fluorescence and mid-infrared spectroscopy. *Food Chem* 329
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127142>

Castro MC, Silvello GC, Corniani, LS, Acevedo MSMSF, Pereira AAM, Alcarde AR. 2020. Maturation-related phenolic compounds in cachaça aged in oak barrels: influence of reuses. *Wood Sci Technol* 57:781-795. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01474-6>

Catão CG, Paes JB, Gomes JP, Araujo GT. 2011. Qualidade da madeira de cinco espécies florestais para o envelhecimento da cachaça. *Rev Bras Eng Agric Ambient* 15(7). <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000700013>

Corbion C, Smith-Ravin J, Marcelin O, Bouajila J. 2023. An Overview of Spirits Made from Sugarcane Juice. *Molecules* 28(19):6810. <https://doi.org/10.3390/molecules28196810>

D'avila GB, Cardoso MG, Santiago WD, Caetano ARS, Alvarenga GF, Oliveira RES, Campolina GA, Ferreira VRF, Santos PA, Abrantes AP, Fernandes AI, Nelson DL. 2024. Effect of long storage of sugarcane spirit in stainless Steel on physicochemical. *Aust J Crop Sci* 18(5):259-265. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.05.p3559>

Da-Silva VP, Souza JB, Queiroz ALM, Ribeiro-Filho N, Bezerra TKA. 2023. Cachaça production: from sugar cane to spirit. *J Inst Brew* 129(4):259–275. <https://doi.org/10.58430/jib.v129i4.40>

EFSA. 2013. European Food Safety Authority. **Scientific Opinion on the toxicological evaluation of phenol.** 11 (4). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3189>

Ferreira DF. 2011. Sisvar: A Computer Statistical Analysis System. *Ciênc Agrotec* 35: 1039-1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>

Garcia AC, Serafim FAT, Keukeleire DD, Franco DW. 2015. Evaluation of glycerol profiles in sugarcane spirits (*cachaças*). *J Braz Chem Soc* 26(1):57-63. <https://doi.org/10.5935/0103-5053.20140213>

Lee KYM, Paterson A, Piggot JR. 2001. Origins of flavour in whiskies and a revised flavour wheel: a review. *J Inst Brew* 107(5):287-313. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2001.tb00099.x>

- Lončar M, Jakovljević M, Šubarić D, Pavlić M, Služek VB, Cindrić I, Molnar M. 2020. Coumarins in food and methods of their determination. *Foods* 9(5). <https://doi.org/10.3390/foods9050645>
- Machado AMR, Cardoso MG, Sackz AA, Anjos JP, Zacaroni LM, Dorea HS, Nelson DL. 2013. Determination of ethyl carbamate in cachaça produced from copper stills by HPLC. *Food Chem* 138:1233-1238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.048>.
- Masson J, Cardoso MG, Vilela FJ, Pimentel FA, Moraes AR, Anjos JP. 2007. Parâmetros físico-químicos e cromatográficos em aguardentes de cana queimada e não queimada. *Cienc agrotec* 31(6):1805-1810. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600030>
- Nascimento RF, Marques JC, Lima Neto BS, Keukeleire DD, Franco DW. 1997. Qualitative and quantitative high-performance liquid chromatographic analysis of aldehydes in Brazilian sugar cane spirits and other distilled alcoholic beverages. *J Chromatogr A* 782(1):13-23. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(97\)00425-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(97)00425-1)
- Nunes CA, Freitas MP, Pinheiro ACM, Bastos SC. 2012. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. *J Braz Chem Soc* 23(11):2003-2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012005000073>
- Pereira AAM, Acevedo MSMSF, Alcarde AR. 2024. Improvement of the chemical quality of Cachaça. *Beverages* 10(3):79. <https://doi.org/10.3390/beverages10030079>
- Pérez M, Dominguez-López I, Lamuela-Raventós RM. 2023. The chemistry behind the folin-ciocalteu method for the estimation of (poly)phenol content in food: total phenolic intake in a mediterranean dietary pattern. *J Agric Food Chem* 71(46):17543-17553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04022>
- Rodrigues LMA, Cardoso MG, Santiago WD, Soares LI, Passamani FR, Santiago JA, Lira NA, Nelson DL. 2016. Phenolic extracts of cachaça aged in different woods and quantifying antioxidant activity and antifungal Properties. *J Inst Brew* 122(4):644-652. <https://doi.org/10.1002/jib.375>
- Santiago WD, Cardoso MG, Nelson DL. 2017. Cachaça stored in casks newly constructed of oak (*Quercus* sp.), amburana (*Amburana cearensis*), jatoba (*Hymenaea caribouril*),

balsam (*Myroxylon peruiferum*) and peroba (*Paratecoma peroba*): alcohol content, phenol composition, colour intensity and dry extract. *J Inst Brew* 123(2):232-241. <https://doi.org/10.1002/jib.414>

Scanes KT, Hohmann S, Prior BA. 1998. Glycerol production by the yeast *Saccharomyces cerevisiae* and its relevance to wine: a review. *S Afr J Enol Vitic* 19(1).

Silva AA, Galinaro CA, Cardoso DR, Lima Neto BS, Franco DF. 2022. A qualidade de destilados de cana-de-açúcar. In: Filho WGV (ed) *Indústria de Bebidas: Inovação, Gestão e Produção*. 2nd ed. São Paulo, 576p.

Singleton, VL, Rossi JA. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Am J Enol Vitic* 16:144-158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>

Souza EGT, Silva MMAM, Silva AP, Galvão MS, Lima MS, Silva JA, Madruga MS, Muniz MB, Bezerra TKA. 2025. Accelerated aging of Brazilian sugarcane spirit: Impact of wood chips reuse on the phenolic and volatile profile of the beverage. *Food Chem* 496. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143163>

Souza FC, Vasconcelos Junior FJ, Cabral RC, Fernández TLL, D'elia E. 2012. Simple enzymatic methods for glycerol analysis in commercial beverages. *CyTA - Journal of Food* 11(3):270–276. <https://doi.org/10.1080/19476337.2012.732613>

Wang G, Cheng H, Pan H, Zheng F, Ye X, Li Z, Zhang Y, Sun B. 2025. Insights into the role of glycerol as a marker for differentiation of different flavor types of baijiu. *Food Anal Methods* 18:584–594. <https://doi.org/10.1007/s12161-024-02733-3>

Zacaroni LM, Cardoso MG, Sack AA, Santiago WD, Anjos JP, Masson J, Duarte FC, Nelson DL. 2011. Caracterização e quantificação de contaminantes em aguardentes de cana. *Quim Nova* 34(2):320-324. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000200026>

Zacaroni LM, Cardoso MG, Santiago WD, Mendonça JGP, Nunes CA, Duarte FC. 2014. Avaliação multivariada da composição fenólica de cachaças envelhecidas em diferentes barris de madeira. *Científica* 42(2):101-107. <https://doi.org/10.15361/1984-5529.2014v42n2p101-107>

Zhou Y, Jin W, Wu Q, Zhou Q. Acrolein: formation, health hazards and its controlling by dietary polyphenols. *Crit Rev Food Sci Nutr* 64(26):9604-9617. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2214625>

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sensores eletrônicos, embora eficazes na obtenção de informações sensoriais de inúmeras matrizes analíticas, ainda necessitam otimização contínua, de modo a obter sensores mais portáteis, de baixo custo e cada vez mais fiéis às percepções sensoriais humanas. No âmbito da cachaça a aplicação dos sensores biônicos configuram-se como uma alternativa promissora e reproduzível, mas ainda pouco explorada para o monitoramento da cadeia produtiva, comercialização e consumo. Quando aplicadas de forma adequada, podem contribuir significativamente para o desenvolvimento de novos produtos e na melhoria contínua dos produtos já consolidados no mercado.

Os resultados obtidos por meio das análises físico-químicas e cromatográficas aqui aplicadas possibilitaram compreender de forma clara como a utilização de madeiras nativas e exóticas é capaz de modular o perfil sensorial de cachaças envelhecidas, especialmente por meio da extração, transformação e interação de compostos fenólicos durante o processo de envelhecimento. A aplicação das ferramentas biomimétricas de língua e nariz eletrônicos possibilitou entender a influência de cada madeira na composição aromática e nas características de sabor oriundas da sua composição química e fenólica advindas do processo de envelhecimento.

A quantificação de compostos fenólicos na bebida evidenciou que a espécie vegetal utilizada para a fabricação do barril influencia diretamente no perfil sensorial da bebida, sendo responsável pela intensificação de notas aromáticas mais intensas à medida que maiores teores desses são incorporados à matriz final.

O estudo enriquece a cadeia produtiva da cachaça na etapa de envelhecimento, levando ao produtor um conhecimento da utilização desses métodos que, quando em conjunto, podem representar um importante passo no estudo de bebidas destiladas, como a cachaça, maximizando a valorização e inovação da bebida, devolvendo para a sociedade e fazendo jus ao que foi investido em pesquisa.