



**MARIA AUGUSTA LANZA DE SÁ E MELO MARQUES**

**EFEITO DAS IMPUREZAS VEGETAIS DA CANA-DE-  
AÇÚCAR SOBRE A QUALIDADE DA CACHAÇA**

**LAVRAS-MG  
2024**

**MARIA AUGUSTA LANZA DE SÁ E MELO MARQUES**

**EFEITO DAS IMPUREZAS VEGETAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A  
QUALIDADE DA CACHAÇA**

Dissertação 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 Mestre.

Profa. Dra. Maria das Graças Cardoso  
Orientadora

Dr. Wilder Douglas Santiago  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2024**

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

Marques, Maria Augusta Lanza de Sá e Melo.

Efeito das impurezas vegetais da cana-de-açúcar sobre a  
qualidade da cachaça / Maria Augusta Lanza de Sá e Melo  
Marques. - 2024.

65 p. : il.

Orientador(a): Maria das Graças Cardoso.

Coorientador(a): Wilder Douglas Santiago.

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

Bibliografia.

1. Aguardente. 2. Ponteiro. 3. Análises de Compostos  
Principais. I. Cardoso, Maria das Graças. II. Santiago, Wilder  
Douglas. III. Título.

**MARIA AUGUSTA LANZA DE SÁ E MELO MARQUES**

**EFEITO DAS IMPUREZAS VEGETAIS DA CANA-DE-AÇÚCAR SOBRE A  
QUALIDADE DA CACHAÇA**

**EFFECT OF SUGARCANE PLANT IMPURITIES ON THE QUALITY OF  
CACHAÇA**

Dissertação 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 Mestre.

APROVADA em 30 de julho de 2024.

Dra. Maria das Graças Cardoso UFLA  
Dra. Ana Maria de Resende Machado CEFET-MG  
Dr. Guilherme Vieira Pimentel UFLA  
Dr. Wilder Douglas Santiago UFLA

Profa. Dra. Maria das Graças Cardoso  
Orientadora

Dr. Wilder Douglas Santiago  
Coorientador

**LAVRAS-MG  
2024**

*Ao Glorioso São José, ao meu Santo Anjo da Guarda e ao meu avô Maurício Lanza.*

*Dedico.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu Senhor e meu Deus, a quem devo toda honra e glória.

À Nossa Senhora e a São Miguel Arcanjo, por me auxiliarem e me defenderem.

Aos meus pais, João José e Teresa Cristina, meus maiores torcedores que me ensinam todos os dias sobre paciência, resiliência e fé. Aos meus irmãos, Antônio, Nuno e Fernando, por tornarem a vida um pouco mais divertida.

À minha orientadora, Dra. Maria das Graças Cardoso, não apenas pela orientação, mas por ensinar lições que vou levar para minha vida e principalmente acreditar em meu potencial nos momentos em que eu mesma não acreditava.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, ao Departamento de Química e à Universidade Federal de Lavras, pela infraestrutura e apoio.

Às Agências de Fomento de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa e pelo fomento concedido.

Ao meu coorientador, Dr. Wilder Douglas Santiago, por todo auxílio, colaborações e paciência.

À técnica do Laboratório de Análise de Qualidade de Aguardente, Dra. Maria Luísa, por todo apoio e dicas.

À Dra. Tharyn Reichel, pela disposição em ajudar com a estatística.

Aos membros da banca, Profa. Ana Maria de Resende Machado e Prof. Guilherme Vieira Pimentel, por aceitarem o convite e pelo tempo para leitura e colaborações.

Aos meus avós, tios e tias, primos e primas, por serem apoio e inspiração para todas as horas. Em especial minha madrinha, Luciana Maria.

Ao produtor de cachaça João Cassiano, da Cachaça Cassiano, e à equipe Alambiques Santa Efigênia, por gentilmente cederem o material que tornou possível a realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório Carol, Giovana, Mateus, Anna Beatriz, Lucas, Sara, Beatriz, Luciano, Luiz, Joyce, Wilton e Raphael, pela ajuda, risadas e companheirismo ao longo desses dois anos de trabalho. De maneira especial, Danubia, Isadora e Gislaine, pela parceria, amizade e carinho.

Aos meus amigos Álvaro, Clarissa, Júlia, Luiza, Nathan, Vitor e Thais, por estarem ao meu lado há mais de dez anos.

Aos meus amigos Luiz e Natânia, que seguem comigo desde a graduação, cuja amizade guardo com muito carinho e amor.

À minha amiga Clara Martins, minha companheira de fé.

Ao meu namorado Paulo Victor que faz valer a pena essa tatuagem acadêmica.

A todos aqueles que de perto ou de longe, direta e indiretamente, tornaram possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

A cachaça, bebida tipicamente brasileira, é produzida exclusivamente a partir da cana-de-açúcar, com graduação alcoólica entre 38% e 48% (v/v) a 20 °C. Os Parâmetros de Identidade e Qualidade (PIQs) estipulados pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA) garantem a qualidade da bebida, ao limitarem valores máximos de compostos secundários e contaminantes. Possíveis fontes de contaminação de alguns compostos secundários incluem o desponte inadequado da cana-de-açúcar e presença de impurezas vegetais para produção da cachaça por possuírem compostos que participam de rotas de formação de compostos secundários. Este trabalho teve como objetivo analisar o perfil físico-químico de cachaças obtidas de diferentes partes de seis variedades de cana-de-açúcar e correlacionar as concentrações de compostos secundários com as condições de corte da cana-de-açúcar, sendo produzidas bebidas com a cana-de-açúcar integral, sem desponte e despalha (PPC), colmo despalhados com ponteiro (PC) e apenas o colmo limpo (C) da cana-de-açúcar. As variedades utilizadas para este trabalho (CTC 02, CTC 11, CTC 9003, RB 867515, IAC 5000 e SP 1842) estavam nos seguintes cortes: 3º, 1º, 1º, 4º, 3º e 4º no momento de sua coleta, no município de Candeias, Minas Gerais. As análises físico-químicas seguiram a metodologia estabelecida pelo MAPA. Nenhuma das amostras ultrapassou os limites máximos estabelecidos para os parâmetros de cachaça. Quatro amostras foram classificadas como aguardente de cana devido ao grau alcoólico superior ao limite para cachaça, atribuível a erros na destilação e não aos cortes da matéria-prima. Observou-se que a presença do meristema apical influenciou os níveis de álcoois superiores com valores mais altos nas amostras que continham essa parte da planta. Isso sugere que os aminoácidos presentes no meristema influenciam a formação desses compostos. As análises de Componentes Principais (PCA) e de Agrupamento Hierárquico (HCA) indicaram que a variedade da cana teve um impacto maior na qualidade do produto final do que as condições de corte da matéria-prima. Conclui-se que, ao comparar os cortes da cana-de-açúcar e a variedade, a última tem maior influência na qualidade da bebida do que os cortes da cana-de-açúcar.

**Palavras chaves:** Aguardente; ponteiro; análise de compostos principais.

## ABSTRACT

The cachaça, a typically Brazilian beverage, is produced exclusively from sugarcane, with an alcohol content between 38% and 48% (v/v) at 20°C. The Parameters of Identity and Quality (PIQs) established by the Ministry of Agriculture and Livestock (MAPA) ensure the quality of the beverage by limiting maximum values for secondary compounds and contaminants. Possible sources of contamination from some secondary compounds include improper sugarcane topping and the presence of plant impurities in cachaça production, as they contain compounds that participate in pathways for forming secondary compounds. This study aimed to analyze the physicochemical profile of cachaças obtained from different parts of six sugarcane varieties and to correlate the concentrations of secondary compounds with the sugarcane cutting conditions, producing beverages from whole sugarcane without topping and defoliation (PPC), stripped stalk with top (PC), and only the clean stalk (C) of the sugarcane. The varieties used for this study (CTC 02, CTC 11, CTC 9003, RB 867515, IAC 5000, and SP 1842) were in the following cuts 3rd, 1st, 1st, 4th, 3rd, and 4th at the time of their collection in the municipality of Candeias, Minas Gerais. The physicochemical analyses followed the methodology established by MAPA. None of the samples exceeded the maximum limits set for cachaça parameters. Four samples were classified as sugarcane spirits due to an alcohol content above the limit for cachaça, attributed to distillation errors rather than the cuts of the raw material. It was observed that the presence of the apical meristem influenced the levels of higher alcohols, with higher values in samples containing this part of the plant. This suggests that the amino acids present in the meristem influence the formation of these compounds. Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA) indicated that the sugarcane variety had a greater impact on the final product's quality than the cutting conditions of the raw material. It is concluded that, when comparing sugarcane cuts and variety, the latter has a greater influence on the beverage quality than the sugarcane cuts.

**Keywords:** Sugarcane spirit; topping; principal component analysis.

## **INDICADORES DE IMPACTO**

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de pesquisa relacionada diretamente à qualidade de cachaças e aguardentes de cana-de-açúcar produzidas com diferentes níveis de impureza da cana-de-açúcar. Os resultados apresentados neste trabalho possuem impacto da cadeia produtiva da cachaça, especialmente no que se refere à qualidade da matéria-prima durante a colheita, na redução de impurezas vegetais, beneficiando diretamente os produtores e consumidores da bebida em todo território nacional e internacional, caso o produto seja exportado. A realização desta pesquisa contou com a participação de um produtor de cachaça, externo à Universidade Federal de Lavras, e contemplou três áreas temáticas da extensão, estabelecidas pela Política Nacional da Educação: educação (4), saúde (6) e tecnologia e produção (7). Quanto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), o presente trabalho se alinha com os seguintes objetivos: saúde e bem-estar (3), trabalho decente e crescimento econômico (8), indústria, inovação e infraestrutura (9), consumo e produção responsáveis (12) e parcerias e meios de implementação (17).

## **IMPACT INDICATORS**

This work aimed to develop research directly related to the quality of cachaça and cane spirit produced with different impurity levels of sugarcane. The results presented in this work impact the cachaça production chain, especially regarding the management of raw materials, especially during harvest, in impurity reduction, directly benefiting producers and consumers of the beverage throughout the national and international territory, should the product be exported. This research was carried out with the participation of a cachaça producer external to the Federal University of Lavras and covered three thematic areas of extension established by the National Education Policy: education (4), health (6), and technology and production (7). Concerning the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs), this work aligns with the following objectives: good health and well-being (3), decent work and economic growth (8), industry, innovation, and infrastructure (9), responsible consumption and production (12), and partnerships for the goals (17).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo de cachaça e aguardente de cana-de-açúcar....	22
Figura 2 – Morfologia do colmo da cana-de-açúcar.....	23
Figura 3 – Esquema simplificado da fermentação alcoólica.....	27
Figura 4 – Via de Ehrlic para a transformação de aminoácidos em álcoois superiores.....	43
Figura 5 – Gráfico de Análises de Componentes Principais (ACP) das amostras demonstrando o agrupamento dos grupos similares.....	51
Figura 6 – Análise Hierárquica de Clusters para todas as amostras.....	53

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros de Identificação e Qualidade (PIQs) da cachaça.....	20
Quadro 2 – Limites máximos dos contaminantes da cachaça.....	21
Quadro 3 – Variedades utilizadas no experimento e suas características.....	26
Quadro 4 – Características das frações cabeça, cauda e coração, obtidas na destilação de cachaça em alambique de cobre.....	29

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado das análises físico-químicas das amostras.....	39
Tabela 2– Resultado das análises dos álcoois isobutílico, isoamílico e n-propílico e seu somatório (Continua).....	42
Tabela 3– Resultados das análises físico-químicas dos contaminantes orgânicos e inorgânicos .....	47

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Cachaça .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Cachaça e aguardente de cana-de-açúcar definidos pela legislação brasileira</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Cadeia produtiva da cachaça .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Matéria-prima .....</b>	<b>23</b>
<b>2.3.2</b>	<b>As variedades de cana-de-açúcar e a qualidade da cachaça .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.2.1</b>	<b>Variedades utilizadas no experimento e suas características .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Obtenção do mosto .....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Fermentação.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Destilação .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Armazenamento/Envelhecimento .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Engarrafamento.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4</b>	<b>Compostos secundários e contaminantes da cachaça .....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Cana-de-açúcar.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Caracterização e informações da produção.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Análises físico-químicas das amostras de cachaça/aguardente.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Grau alcoólico .....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Acidez volátil.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Extrato seco.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Ésteres.....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Aldeídos .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Furfural .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Cobre .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.8</b>	<b>Açúcares totais.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.9</b>	<b>Acroleína .....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.10</b>	<b>Carbamato de etila (CE).....</b>	<b>38</b>
<b>3.3.11</b>	<b>Análise de álcoois superiores e metanol .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>Análises estatísticas .....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>58</b>

**REFERÊNCIAS ..... 59**

## 1 INTRODUÇÃO

A cachaça, aguardente de cana produzida exclusivamente em território nacional, apresenta características próprias regulamentadas pelos Parâmetros de Identidade e Qualidade (PIQs) estipulados pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Estes parâmetros visam garantir a qualidade da bebida e a segurança do consumidor, abrangendo aspectos como acidez volátil, ésteres, aldeídos, álcoois isobutílico, isoamílico e propílico, além de avaliarem a presença dos contaminantes furfural, carbamato de etila, acroleína, álcoois superiores n-butílico e sec-butílico, metanol e cobre.

A produção da cachaça inicia-se com o cultivo da cana-de-açúcar, do seu plantio e colheita, passando por uma limpeza (desponte e despalha). Neste processo, é importante realizar o corte correto e a limpeza da cana-de-açúcar para que impurezas do solo, minerais, vegetais e do ambiente não sejam transferidas para o caldo no momento da moagem, evitando a contaminação do mosto e comprometendo a qualidade do produto final. A presença do ponteiro da cana-de-açúcar pode contribuir para o aumento de alguns compostos.

A fermentação é uma etapa crucial para a geração da cachaça, pois é pela ação das leveduras que os açúcares presentes no caldo são convertidos em etanol e compostos secundários responsáveis pelo aroma e sabor. No entanto, a presença de microrganismos e compostos indesejados pode causar resultados negativos no produto final, como o aumento da concentração de compostos contaminantes. Dessa forma, o bom manejo e cuidado com a cana-de-açúcar são essenciais para a qualidade da bebida.

O interesse pela cachaça é evidenciado pelo aumento de registros de novas cachaçarias junto ao MAPA. Em 2023, foram registrados 88 novos estabelecimentos, totalizando 1217, dos quais mais de 41,4% estão localizados no estado de Minas Gerais (Brasil, 2024). Além disso, o setor da cachaça apresentou recorde em exportação, com um crescimento de 54,74%, movimentando mais de US\$ 18 milhões e sendo exportada para 72 países, com Portugal como o maior consumidor (IBRAC, 2022). Estes dados demonstram a importância de pesquisas voltadas para a qualidade da cachaça, visando garantir segurança e excelência tanto para os consumidores brasileiros quanto para o mercado internacional.

Nesse contexto, objetivou-se com este estudo quantificar os compostos secundários em cachaças de alambique, por meio das análises físico-químicas estabelecidas pela legislação, obtidas e produzidas a partir de seis variedades com três cortes diferentes da matéria-prima: cana crua, ou seja, cana sem desponte e palha (integral), colmos despalhados, com presença do ponteiro (meristema apical), e colmos despalhados e despontados; a fim de

verificar a influência dessas condições na qualidade da bebida fermento-destilada. Espera-se, assim, fornecer informações que possam auxiliar os produtores de cachaça a obterem um produto de qualidade superior.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cachaça

A história da cachaça inicia-se com a História do Brasil, com a instalação dos primeiros engenhos de cana-de-açúcar na capitania de São Vicente, por volta do ano de 1532 (Alcarde, 2014). A destilação era uma técnica já utilizada pelos portugueses para a produção da bagaceira (destilado das cascas de uva), assim, acredita-se que a destilação do fermentado de cana-de-açúcar foi intencional. Não se tem registro exato da primeira destilação, mas estima-se que a cachaça tenha surgido entre 1516 e 1532, em algum engenho localizado no litoral, sendo o primeiro destilado das Américas (Martins, 2022). A partir de então, a aguardente ganhou importância na economia do Brasil Colônia, chegando a ser moeda de troca em transações comerciais (Cardoso, 2020).

Com o passar do tempo, aliado ao fato de não ser taxada, a cachaça ganhava cada vez mais relevância no Brasil Colônia, diminuindo o interesse nas bebidas importadas de Portugal. Isto obrigou a Coroa Portuguesa a proibir a fabricação e a venda da aguardente de cana-de-açúcar em todo o Estado do Brasil, com exceção apenas do estado de Pernambuco e do consumo pelos escravos. Assim, em 1660, diante da proibição, os produtores fluminenses rebelaram-se e tomaram o poder do Rio de Janeiro por 5 meses até a liberação do comércio da bebida. Culminou-se, então, a Revolta da Cachaça, em 13 de setembro de 1661 (Cardoso, 2020; Martins, 2022). Os reflexos desse momento são refletidos até os dias atuais, pois em 2011, o dia 13 de setembro passa a ser oficialmente considerado, no Brasil, o Dia Nacional da Cachaça.

A cachaça não foi protagonista apenas nesse momento político. Durante a Inconfidência Mineira, aqueles que eram envolvidos no movimento tomavam cachaça como símbolo de democracia, nacionalismo e protesto contra as ordens de Lisboa. De modo similar, no período que antecedeu a Independência do Brasil, não consumir produtos de Portugal era considerado patriótico, o que fez com que a cachaça ascendesse em diversos níveis sociais. Após a Independência em 1822, o destilado se tornou um elemento simbólico do novo país que surgia. No período após a Abolição da Escravidão, por ser de fácil acesso, a cachaça era bastante consumida pelos antigos escravos que não tinham abrigo nem comida como forma de refúgio para suas dores (Martins, 2022). Entretanto, ao final do século XIX, o Brasil começou a almejar uma identidade europeia, o que aumentou o consumo de bebidas vindas do Velho Continente entre a elite brasileira, gerando separação social (Fernandes, 2022). Esses fatos

auxiliaram a construção de uma imagem pejorativa da cachaça, associada a uma ideia negativa a respeito de seus consumidores.

Com a Semana da Arte Moderna em 1922 e a Geração de 1930, Gilberto Freyre formula um projeto que resgata o orgulho brasileiro fundado em suas próprias raízes e vê a miscigenação como um forte traço brasileiro. Nesse contexto, a cachaça volta a ser celebrada, e como exemplo disto tem-se a criação da “batida paulista”, mais tarde chamada de Caipirinha pelo empresário Mário de Andrade. Na década de 80 esse movimento fortalece-se após o Regime Militar (1945 – 1964) com o retorno do samba ao *mainstream* e a valorização do cinema e culinária nacional, que tiveram como consequência a elevação social da cachaça. Assim, a bebida se torna objeto de estudos científicos em universidades de renome no país, como a Universidade Federal de Lavras e a Escola de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Fernandes, 2022).

Segundo dados do Instituto Brasileiro da Cachaça (IBRAC), em 2022, a comercialização da cachaça foi responsável pela geração de receita equivalente a US\$ 20,70 milhões, representando um crescimento de 52,38% em valor e de 29,03% em volume, em comparação a 2021. Além disso, em 2023 houve um aumento de 18,5% do registro de produtos, totalizando 5998 produtos registrados. Este valor indica crescimento no setor, visto que no ano anterior o aumento de registros foi apenas de 1,9% (Brasil, 2024). Logo, é evidente que a cachaça tem um papel importante para a economia do país, sendo necessário investimento para a pesquisa de sua qualidade.

A cachaça também pode ser utilizada como matéria-prima para a produção de outras bebidas, como licores de diversos sabores. Neves (2022) avaliou as diferenças da qualidade entre um licor de jabuticaba feito com cachaça e outro produzido com álcool de cereais. O autor demonstrou que o licor feito com cachaça apresentou maior complexidade de compostos de aromas, como terpenos e compostos fenólicos, do que o mesmo licor produzido com álcool de cereal, o que conferiu melhor aspecto sensorial ao consumidor. Além disso, Duarte *et al.* (2020) indicam usos da cachaça em receitas de carne, elaborações de bebidas, como caipirinha, e até mesmo balas e doces, que se apresentam como produtos derivados da cachaça. Desse modo, é importante reforçar que os congêneres da cachaça influenciam seus coprodutos, o que torna necessária a garantia de uma matéria-prima de qualidade.

## 2.2 Cachaça e aguardente de cana-de-açúcar definidos pela legislação brasileira

Atualmente, a legislação brasileira reconhece a cachaça como bebida alcoólica obtida pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar de características sensoriais peculiares, podendo ser adicionada de açúcares até  $6 \text{ g L}^{-1}$ , expressos em sacarose, de denominação típica e exclusiva da aguardente de cana produzida no Brasil. Enquanto a aguardente de cana é a bebida obtida do destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar ou pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, podendo ser adicionada de açúcar (Brasil, 2022). O Quadro 1 apresenta os limites dos compostos desejáveis na cachaça e seus limites mínimos e máximos.

Quadro 1 – Parâmetros de Identificação e Qualidade (PIQs) da cachaça.

<b>Parâmetro</b>	<b>Min.</b>	<b>Máx.</b>
Gradação alcoólica, expressa em v/v, a 20,0 °C	38,8	48,0
Acidez volátil, expressa em ácido acético, em $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ a.a	-	150
Ésteres totais, expresso em acetato de etila, em $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ a.a	-	200
Aldeídos totais, em acetaldeído, em $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ a.a	-	30
Soma de furfural e hidroximetilfurfural, em $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ a.a	-	5
Soma dos álcoois isobutílico (2- metilpropanol), isoamílicos (2-metil-1-butanol e 3-metil-1-butanol) e n-propílico (1-propanol), em $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ a.a	-	360
Coeficientes de congêneres, em $\text{mg } 100 \text{ mL}^{-1}$ a.a	200	650
Compostos fenólicos totais (para cachaça envelhecida)	Presente	
Açúcares totais (para cachaça), em g/L (expressos em glicose)	-	$\leq 6,0$
Açúcares totais (para cachaça adoçada), em g/L (expressos em glicose)	$> 6,0$	$< 30$

Fonte: Brasil (2022).

O Quadro 2 exhibe os contaminantes da cachaça e seus limites máximos.

Quadro 2 – Limites máximos dos contaminantes da cachaça.

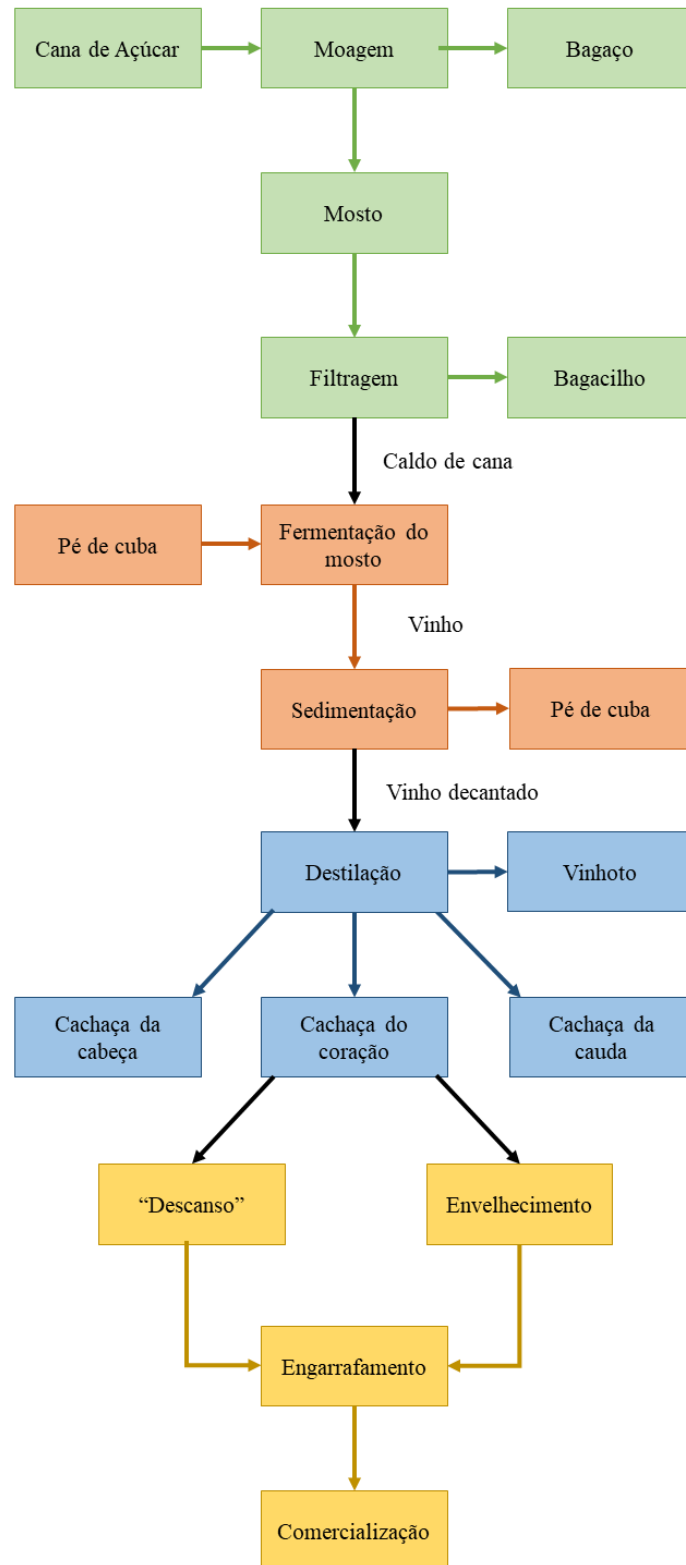
<b>Parâmetro</b>	<b>Máx.</b>
Álcool metílico (metanol), em mg 100 mL <sup>-1</sup> a.a	20
Carbamato de etila, em µg/L	210
Acroleína (2-propenal), em mg 100 mL <sup>-1</sup> a.a	5
Álcool sec-butílico (2-butanol), em mg 100 mL <sup>-1</sup> a.a	10
Álcool n-butílico (1-butanol), em mg 100 mL <sup>-1</sup> a.a	3
Cobre, em mg/L	5,0

Fonte: Brasil (2022).

### 2.3 Cadeia produtiva da cachaça

A cadeia produtiva da cachaça abrange vários setores de serviços, desde o cultivo da matéria-prima até a comercialização do produto. A Figura 1 representa um fluxograma que simplifica a cadeia produtiva de cachaça e aguardente de cana-de-açúcar.

Figura 1 – Fluxograma do processo produtivo de cachaça e aguardente de cana-de-açúcar.



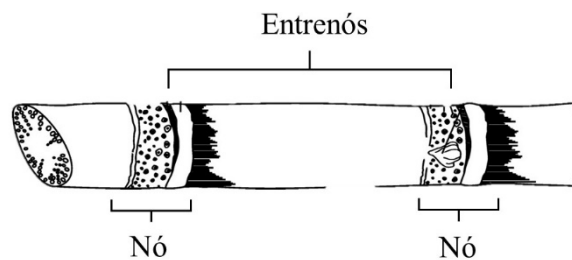
Fonte: Adaptado de Santiago (2013).

### 2.3.1 Matéria-prima

O Brasil ocupa posição de destaque na produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) do mundo. As previsões da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024) indicam que essa cultura ocupa aproximadamente 9 milhões de hectares do território nacional na safra de 2024/25, representando um aumento de 4,1% com relação à safra anterior. Este dado evidencia a importância da cadeia sucroenergética no agronegócio brasileiro, gerando recursos e empregos. Além de gerar produtos como açúcar, etanol e bioenergia, a cana-de-açúcar é a matéria-prima de bebidas como aguardente de cana e cachaça, produtos de importância cultural, o que consolida ainda mais sua significância ao país.

Na sua estrutura morfológica, a cana-de-açúcar apresenta múltiplos colmos, compostos de uma sucessão de nós. Cada nó é caracterizado por um anel de crescimento, gemas, cicatriz da folha e zona cerosa, sendo separados por entrenós constituídos por células que armazenam sacarose. O topo de cada colmo possui um meristema apical, formado por entrenós curtos de onde emergem as folhas encapsuladas pelo fuso foliar (OECD, 2016). Compreender a morfologia da planta pode ser um auxílio no entendimento de seus estágios fenológicos de crescimento, conhecimento que contribui com as práticas de cultivos da cana-de-açúcar. A Figura 2 ilustra os nós e o entrenó do colmo da cana-de-açúcar.

Figura 2 – Morfologia do colmo da cana-de-açúcar.



Fonte: Adaptado de Keeping, Kvedaras e Bruton (2009).

A composição da planta representante da família *Poaceae* é quantitativamente variável e influenciada pelo clima, solo, adubação e estágio de desenvolvimento da cultura. Mattos, Margarido e Ceccato-Antonini (2018) tiveram como objetivo avaliar a influência do manejo (orgânico e convencional) e das variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB966928 e RB855453) sobre a composição química da vinhaça, um subproduto da destilação, de cachaça de alambique. Os autores notaram que a variedade teve um efeito importante sobre a concentração dos nutrientes cálcio e magnésio, destacando as variedades RB867515 e

RB855453. Ainda assim, esse efeito foi pouco significativo quando comparado ao manejo em que o convencional apresentou maiores concentrações dos nutrientes. Os autores explicam esse resultado ao dizerem que, no manejo convencional, a planta teria uma quantidade maior dos nutrientes disponíveis.

Conhecer a variedade também se faz importante para o planejamento do canavial, uma vez que é esse fator que define o tempo de maturação da planta, ou seja, tempo que a cana-de-açúcar leva para chegar ao seu estágio máximo. A maturação está dividida em três tipos: precoce, média e tardia. A maturação precoce é apresentada pela planta adequada para colheita no início da safra, em maio/junho; enquanto a maturação média é a maturação apresentada pela cana-de-açúcar adequada para colheita no meio da safra, nos meses de julho a setembro; e a maturação tardia é aquela apresentada por canas-de-açúcar que estão maduras ao fim da safra, outubro e novembro, quando sua colheita ocorre (Pimentel; Andrade, 2020).

### **2.3.2 As variedades de cana-de-açúcar e a qualidade da cachaça**

A escolha da variedade a ser plantada deve levar em consideração os fatores do ambiente, como condições do solo e água, teor de fibra, fácil despalha, resistência ao tombamento, ausência de florescimento, baixa isoporização, boa brotação de soqueira, ausência de rachaduras, rápido crescimento e fechamento e período de utilização industrial longo (Pimentel; Andrade, 2020).

Quando se trata do manejo varietal para produção de cachaça, estudos de Silva *et al.* (2022) relacionaram o teor de nitrogênio de diferentes variedades de cana-de-açúcar com a concentração do contaminante carbamato de etila (CE) da cachaça produzida a partir dessas. Os autores encontraram correlação entre ambos, indicando que cachaças com alto teor de CE advinham de canas-de-açúcar com alto teor de nitrogênio. Anteriormente, Cravo *et al.* (2019) caracterizaram o glicosídeo cianogênico *Dhurrin* em cinco variedades de cana-de-açúcar a fim de determinar sua possível relação com o CE em cachaça.

Silva *et al.* (2020b) compararam os compostos voláteis de cachaças obtidas de três variedades de cana-de-açúcar nas situações de cultivo orgânico e convencional. Os autores concluíram que a cachaça produzida a partir do cultivo orgânico apresentou a maior quantidade de compostos voláteis, além de indicar a influência da variedade na qualidade físico-química da bebida. Anteriormente, Mattos, Margarido e Ceccato-Antonini (2018) tiveram como objetivo avaliar a influência do manejo (orgânico e convencional) e das variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB966928 e RB855453) sobre a composição

química da vinhaça, um subproduto da destilação, de cachaça de alambique. Os autores notaram que a variedade teve um efeito importante sobre a concentração dos nutrientes cálcio e magnésio, destacando as variedades RB867515 e RB855453. Ainda assim, esse efeito foi pouco significativo quando comparado ao manejo em que o convencional apresentou maiores concentrações dos nutrientes. Esse resultado foi atribuído à aplicação direta de nutrientes à planta. Anteriormente, Martini, Margarido e Ceccato-Antonini (2010) objetivaram avaliar as características microbiológicas (leveduras) e físico-químicas do caldo de cana extraído de diferentes partes do colmo (base, meio e ponta) em três períodos da safra (maio a dezembro) de três variedades (RB72454, RB835486 e RB 867515), em uma área sob manejo orgânico. Os autores observaram o efeito do início da safra, quando os compostos fenólicos estão em baixa concentração, mas com altos números de *Saccharomyces cerevisiae* e de outras leveduras.

#### **2.3.2.1 Variedades utilizadas no experimento e suas características**

Dentre as variedades existentes, seis foram escolhidas para a realização deste trabalho por serem cultivadas por produtores de cachaça. O Quadro 3 apresenta as variedades e suas características.

Quadro 3 – Variedades utilizadas no experimento e suas características.

<b>Variedade</b>	<b>Características</b>
CTC 2	Maturação média a tardia, apresenta rusticidade e fácil isoporização.
CTC 11	Maturação média e exigente em fertilidade.
CTC 9003	Maturação precoce a média, exigente em fertilidade, alto teor de sacarose e não apresenta florescimento.
IACSP 95-5000	Maturação precoce a média, exigente em fertilidade, porte ereto e alta produtividade.
RB867515	Variedade mais cultivada do Brasil, maturação média a tardia, rústica, elevada produtividade.
SP80-1842	Maturação média, exigente em fertilidade, ótima brotação, crescimento rápido e suscetível a broca.

Fonte: Adaptado de Centro de Tecnologia Canaveira (2024); Instituto Agrônomo (IAC, 2012) e Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético (RIDESA, 2024).

O Censo Varietal do Instituto Agrônomo (IAC) da safra de cana-de-açúcar 2022/23, elaborado por Braga Júnior *et al.* (2023), indica como a variedade mais plantada no Brasil a RB867515, seguida pelas variedades CTC 04 e RB966928. Dentre estas, a primeira está incluída neste estudo. Os autores, ao avaliarem uma queda da área de plantio da primeira variedade e um aumento da área das outras variedades mencionadas, sugerem que os produtores estão em busca de variedades modernas, com alta produtividade e resistentes às principais doenças da cana-de-açúcar. Assim, o estudo do desempenho de diferentes canas-de-açúcar na produção de cachaça faz-se interessante.

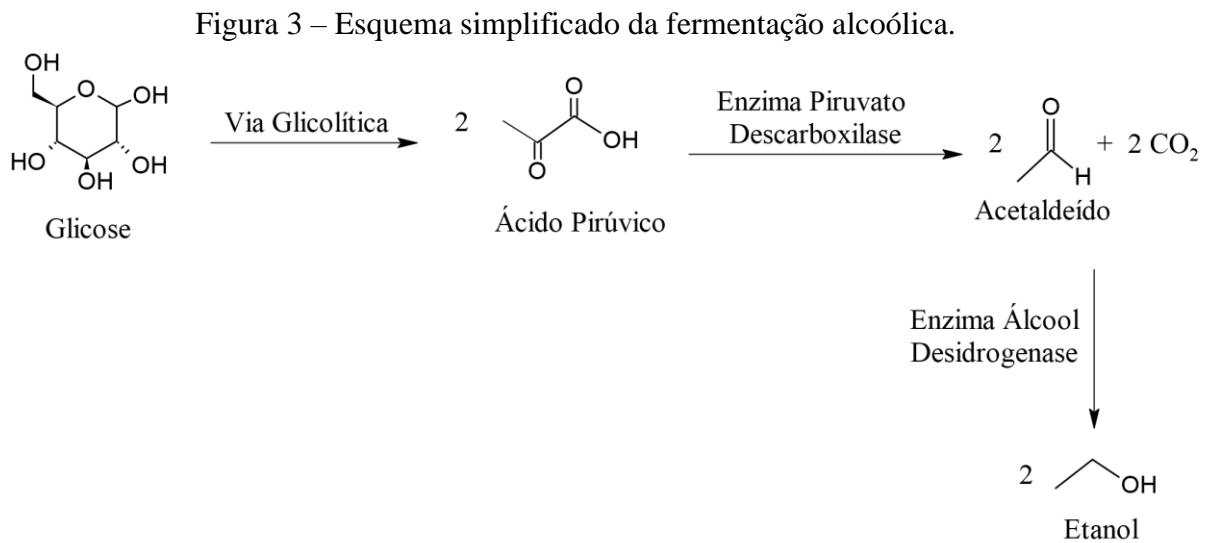
### 2.3.3 Obtenção do mosto

Após a coleta, a cana-de-açúcar é processada (moída) para a obtenção do caldo que será fermentado. É crucial que o processamento ocorra em até 24 horas após a coleta para minimizar os riscos de contaminação e perda de açúcares. A extração por moagem divide o colmo da cana em caldo (rico em açúcares e água) e bagaço. Mesmo com cuidado na moagem, é necessário passar o caldo pelo decantador para evitar a presença de bagacilhos na fermentação, pois eles podem causar a formação de metanol, um contaminante prejudicial à saúde humana. Após a decantação, o caldo deve ser ajustado para entre 14 e 16 °Brix em

tanques antes do início da fermentação. Este passo é essencial, pois a diluição inadequada pode resultar em uma ação lenta e incompleta das leveduras, impactando negativamente o produto final (Mota; Mendonça; Veiga, 2020).

### 2.3.4 Fermentação

O caldo obtido segue para a etapa de fermentação, que ocorre entre 20 a 36 horas. Esse é o momento mais importante da produção por ser o momento da formação de compostos responsáveis pelos aspectos sensoriais de gosto e aroma. Entretanto, a presença de microrganismos indesejáveis provoca a formação de compostos contaminantes que podem não só alterar os aspectos sensoriais e físico-químicos da bebida como podem acarretar riscos à saúde do consumidor (Schwan; Dias, 2020). A Figura 3 ilustra um esquema simplificado da fermentação com a produção de etanol e compostos secundários.



Fonte: Adaptado de Schwan e Dias (2020).

A fermentação se inicia com a escolha do microrganismo que pode ser leveduras espontâneas ou selecionadas. As leveduras espontâneas são decorrentes da microbiota natural que se encontram no caldo de cana ou no ambiente de fermentação, possuindo assim uma enorme diversidade de microrganismos, incluindo bactérias. Já as leveduras selecionadas, como o nome sugere, são leveduras selecionadas em laboratório que apresentam pouca ou nenhuma diversidade de microrganismos (Schwan; Dias, 2020).

O trabalho de Mendonça *et al.* (2015) teve como objetivo rastrear contaminantes da cachaça durante a etapa da fermentação, utilizando leveduras comerciais de *S. cerevisiae* e

microbiota natural ao usar milho e arroz como nutrientes, durante a etapa de destilação e durante a etapa de armazenamento da cachaça (barris de carvalho e recipiente de vidro). Os autores observaram que as cachaças provenientes do arroz como nutriente inicial apresentaram altas concentrações dos contaminantes. Já a amostra fermentada por leveduras selecionadas apresentou concentrações baixas do contaminante. Por sua vez, Portugal *et al.* (2017) tiveram como objetivo estudar as diferenças da qualidade de cachaças fermentadas por quatro cepas de leveduras naturais, que podem ser encontradas no local da produção (*Meyerozyma guilliermondii*, *Hanseniaspora guilliermondii*, *Pichia fermentans* e *Saccharomyces cerevisiae*), e das cachaças fermentadas por uma cepa de levedura comercial, CA-11. Os autores observaram uma quantidade maior de compostos voláteis, que incluem os álcoois superiores produzidos pela levedura selecionada, e o menor valor encontrado foi de cepas naturais. Esses trabalhos reforçam o impacto significativo do microrganismo na qualidade do destilado, o que evidencia a importância da seleção cuidadosa da levedura considerando os produtos finais gerados.

Após a escolha da levedura, a propagação do microrganismo, também chamado de pé de cuba, ocorre sob intensa aeração e em caldo diluído com teores de açúcar próximos a 5 °Brix. Isso se deve ao fato de que altas concentrações prejudicam a respiração celular, indispensável para o crescimento eficiente. Esse estágio inicial é a introdução do inóculo, também chamado de pé de cuba. Posteriormente, a fermentação propriamente dita acontece, com a adição do caldo com teor de açúcar próximo a 14 e 16 °Brix e a conversão do açúcar a etanol e CO<sub>2</sub>, como representado anteriormente na Figura 3 (Schwan; Dias, 2020).

A contaminação por bactérias durante a fermentação pode causar reações paralelas que geram ácidos orgânicos, aldeídos e álcoois superiores. Embora sejam compostos desejáveis, quando estão em concentrações acima do limite máximo do MAPA são considerados contaminantes. Além disso, a presença de bactérias na fermentação promove a floculação de leveduras e componentes tóxicos, impactando a velocidade da fermentação e reduzindo a vida útil das leveduras (Oliveira; Oliveira; Kamimura, 2023).

Alvarenga *et al.* (2023), com o objetivo de quantificarem e detectarem a presença de acroleína em diferentes amostras de cachaças e aguardentes de cana-de-açúcar, descrevem possíveis vias de formação desse contaminante a partir da correlação com outros compostos secundários presentes pela Análise de Componentes Principais (ACP). Os resultados revelam uma forte correlação positiva da presença do álcool sec-butílico e a formação de acroleína, ambos considerados contaminantes. Esse estudo indica a necessidade de um maior controle microbiológico da fermentação. Além de prevenir a contaminação bacteriana, esse controle

auxilia a prevenção da formação de compostos indesejados que podem comprometer a qualidade do produto final.

### 2.3.4 Destilação

Após a fermentação, o mosto de cana-de-açúcar é destilado. Por definição, a destilação é uma técnica de purificação e concentração de um líquido ou separação de mistura de líquidos que possuem temperatura de ebulição diferente. A solução aquecida entra em ebulição, sendo o líquido de menor temperatura de ebulição separado primeiro, seguido do líquido com temperatura de ebulição maior (Dias; Machado, 2020).

A destilação do mosto fermentado a fim de produzir cachaça pode ser feita em alambiques de cobre, onde três frações são separadas de acordo com suas concentrações alcoólicas, chamadas de cabeça, coração (fração consumida) e cauda (Quadro 3). Quando realizada em colunas industriais, geralmente feitas de aço inoxidável, a destilação é caracterizada por ser contínua e em grandes quantidades, sem separação evidente de frações. Para a produção de cachaça, a coluna industrial passou por adaptações, pois sua utilização primária era para a produção de álcool de alta graduação e baixo teor de componentes secundários (De Souza *et al.*, 2009).

Quadro 4 – Características das frações cabeça, cauda e coração, obtidas na destilação de cachaça em alambique de cobre.

<b>Fração do destilado</b>	<b>Características</b>
Cabeça	Corresponde aos primeiros vapores e possui alto teor alcoólico devido à volatilidade do etanol presente no mosto. Usualmente, representa de 1 a 10% do volume total do destilado. Possui altos teores de compostos secundários que se tornam indesejáveis dependendo da concentração e deve ser desprezada.
Coração	É o destilado desejado: a cachaça. Seu recolhimento é iniciado após a separação da fração cabeça, representando 80% do volume total do líquido destilado caso o álcool contido no mosto tenha sido convertido em cachaça.
Cauda	Também chamado de “água fraca”, representa 15% do volume total do destilado ou quando o teor alcoólico da fração atingir o volume de 14%.

Fonte: Adaptado de Dias e Machado (2020).

Semelhantemente, Rodrigues *et al.* (2020) quantificaram os contaminantes orgânicos em aguardentes de cana e cachaças produzidas por destilação de coluna e de alambique de cobre pelo uso de cromatografia líquida de alta performance (HPLC). No trabalho, os autores mostraram que as amostras obtidas por destilação em coluna não apresentaram concentrações superiores ao limite da legislação para nenhum contaminante, porém apresentaram concentrações mais altas de diacetil quando comparadas às cachaças destiladas em alambiques de cobre. Os resultados levaram os autores a concluir que a produção de cachaça em alambiques de cobre e coluna deve ser monitorada mais rigorosamente para que a produção de contaminantes seja minimizada, a fim de que a qualidade do produto não seja prejudicada.

### **2.3.5 Armazenamento/Envelhecimento**

O armazenamento/envelhecimento é a última etapa da produção de cachaça, mas não obrigatória. Nesta etapa objetiva-se melhorar a qualidade sensorial e química ao estimular trocas entre a madeira e a bebida que contribuem para estabilização de cor e sabor (Bortoletto; Correa; Alcarde, 2016). Santiago *et al.* (2017) avaliaram e compararam os compostos fenólicos encontrados em cachaças envelhecidas em tonéis recém-construídos de carvalho, amburana, jatobá, bálsamo e peroba. Essas cachaças também foram avaliadas após um ano de armazenamento nos tonéis, sendo observada uma diminuição no teor alcoólico e aumento dos compostos fenólicos com o passar do tempo, bem como alteração na cor das bebidas. Conclui-se que o tempo de armazenamento e envelhecimento afeta a bebida, alterando sua composição e podendo agregar valor comercial à cachaça.

### **2.3.6 Engarrafamento**

Ao final de todo o processo, a bebida é então engarrafada criteriosamente para ser comercializada. É recomendado que a garrafa seja constituída de vidro, uma vez que os componentes da cachaça podem reagir com material plástico, comprometendo a bebida (Machado *et al.*, 2014).

## **2.4 Compostos secundários e contaminantes da cachaça**

Os compostos secundários podem ser derivados da matéria-prima ou formados durante toda a cadeia produtiva. Recebem essa denominação por serem formados além dos produtos principais da fermentação alcoólica: álcool etílico e dióxido de carbono (Cardoso, 2020). Na cachaça, os ésteres, aldeídos, álcoois superiores e acidez auxiliam no *flavor* da bebida quando em teores estipulados pela legislação.

Quando os teores dos produtos secundários estipulados pela legislação são ultrapassados, não apenas o aspecto sensorial pode ser alterado, como também a bebida pode oferecer riscos à saúde do consumidor. Assim, é importante que se realizem análises físico-químicas que assegurem a qualidade do produto a ser consumido.

Nesse sentido, Tábua *et al.* (2018) compararam os perfis físico-químicos de aguardentes de cana produzidas em Moçambique com aquelas produzidas no Brasil, utilizando os parâmetros estipulados pela legislação brasileira. Os autores notaram que as aguardentes moçambicanas ultrapassaram os limites máximos para teor alcoólico, acidez volátil, furfural e metanol, cuja média variou entre 0,66 a 191,85 mg 100 mL<sup>-1</sup> de álcool anidro. Uma vez que o metanol é um contaminante tóxico à saúde humana, os autores sugeriram melhorias na produção da aguardente moçambicana, como manejo da matéria-prima, para garantir a qualidade da bebida consumida. Anteriormente, Arslan *et al.* (2015) chamaram a atenção para os altos teores de metanol observados em bebidas produzidas de modo ilegal na Turquia. Esses mesmos autores tiveram como objetivo quantificar metanol nessas bebidas e observaram que o contaminante foi detectado em trinta e nove das cinquenta e seis amostras ilegais. Este resultado pode justificar o alto índice de doenças do fígado relacionado a bebidas presente na região sul da Turquia, onde as bebidas foram produzidas.

Apesar de ser um catalisador durante o processo de destilação, o cobre é considerado contaminante inorgânico. Barbosa *et al.* (2022b), pesquisando o uso de fibras de coco como adsorvente para a remoção de cobre das cachaças, obtiveram como resultado a capacidade de adsorção máxima de 1,38 mg g<sup>-1</sup>, havendo pouca alteração do aspecto físico-químico da cachaça. Esse trabalho demonstra alternativas de materiais e métodos para diminuir o teor de cobre, além da recomendação de higienização regular do alambique. Assim como a falta de higienização do alambique, outras práticas indevidas durante a cadeia produtiva da cachaça podem acarretar na formação de contaminantes que ainda não são previstos na legislação brasileira, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que são formados durante o processo de queima incompleta de matéria orgânica (Cardoso, 2020).

Barbosa *et al.* (2022a) analisaram e quantificaram compostos fenólicos e HPAs em amostras de cachaça envelhecidas em barris de carvalho com diferentes níveis de tosta. Os

autores concluíram que os diferentes níveis de carbonização influenciaram os tipos de compostos formados e a quantidade desses compostos extraídos pelas amostras de cachaça. Além dos compostos fenólicos, todas as amostras, incluindo aquelas armazenadas em recipientes de vidro, apresentaram contaminação por HPAs. Entretanto, houve um aumento evidente na concentração de compostos na cachaça armazenada, em especial em barris de terra média. Os HPAs não são presentes somente em cachaças envelhecidas, como mostra o trabalho de Machado *et al.* (2014), que objetivou quantificar esses contaminantes em cachaças armazenadas em bombonas de polietileno e em garrafas de vidro por cromatografia a gás acoplado a espectro de massas. O resultado observado pelos autores foi a presença de dezesseis HPAs nas amostras armazenadas nas bombonas, em que dez se encontravam acima do limite estabelecido pela União Europeia, enquanto as amostras armazenadas em vidro apresentaram apenas dois HPAs acima do limite estipulado pela mesma legislação. Assim, concluíram que a contaminação da cachaça em vidro pode ter sua origem no manejo inadequado da cana-de-açúcar, uma vez que os HPAs são formados durante a combustão incompleta de matéria orgânica, reforçando, então, a importância do cuidado com a matéria-prima da bebida.

Amorim, Schwan e Duarte (2016) objetivaram avaliar a eficiência do inóculo de leveduras misto para a produção de cachaças, composto por *Saccharomyces cerevisiae* e *Meyerozyma caribbica*. Ao caracterizarem o produto final por HPLC e GC-MS e análises sensoriais, os autores perceberam que a mistura de leveduras pode ser favorável para a obtenção de maiores teores de álcool isoamílico e outros compostos voláteis, os quais podem ser extremamente favoráveis para as características sensoriais e a aceitação pelo consumidor. No entanto, quando se trata do álcool butílico, as cachaças fermentadas pela mistura de leveduras tiveram uma concentração maior, e a descrição sensorial dada foi “maltosa, tipo solvente”, indicando que o excesso desse composto deu uma perspectiva negativa à bebida.

Masson *et al.* (2007) avaliaram o perfil físico-químico de cachaças produzidas a partir de cana-de-açúcar com e sem queima prévia. Eles observaram que o furfural, um contaminante com limite máximo de 5 mg 100 mL<sup>-1</sup> aa, sofreu aumento significativo da concentração em canas-de-açúcar queimadas quando comparadas com as bebidas produzidas de canas-de-açúcar sem queima. Os autores atribuíram essa alteração à exsudação do açúcar que se torna aderente ao colmo, resíduos advindos da combustão, partículas sólidas do solo, minerais, entre outros. Durante o processamento, os resíduos vão para o caldo e fermentados, sendo destilados posteriormente, o que transforma a matéria orgânica em furfural e

metilfurfural, alcançando o produto final. Não foi observada alteração nos outros parâmetros estudados.

Nesse mesmo sentido, Mota, Mendonça e Veiga (2020) destacaram que a demora no transporte e processamento da cana cortada aumenta a perda de açúcares, favorecendo a formação de inibidores do processo fermentativo, além da deterioração microbiológica que afeta a eficiência e rendimento industrial. Portanto, uma boa logística operacional pode evitar a formação excessiva de álcoois superiores e contaminantes. Recomenda-se evitar o uso de cana bisada, sendo esta aquela que deveria ser cortada em uma safra, porém foi cortada na safra seguinte, ou armazená-la por longos períodos após o corte (Cardoso, 2020).

O trabalho de Martini, Margarido e Ceccato-Antonini (2010) avalia as características microbiológicas e físico-químicas de caldos de cana-de-açúcar extraídos de diferentes partes do colmo (base, meio e ponta) ao observar altas concentrações de organismos no caldo obtido pela ponta do colmo, sendo indicado como preparação do fermento natural para a produção da cachaça. Entretanto, os estudos não observaram a qualidade da bebida obtida desses caldos e a influência na concentração dos compostos finais.

Como observado, as condições da matéria-prima são refletidas na cachaça obtida. A importância do transporte da cana-de-açúcar e as condições do manejo (convencional e orgânico) foram amplamente estudados. Porém, não existem estudos que indiquem como as impurezas vegetais da matéria-prima influenciam os compostos finais na cachaça. Desse modo, este presente trabalho tem como objetivo observar a concentração e alteração do perfil físico-químico de cachaças obtidas com diferentes quantidades de impurezas vegetais de diferentes variedades.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Cana-de-açúcar

As variedades de cana-de-açúcar foram cultivadas em canavial localizado no município de Candeias, Minas Gerais, cuja latitude e longitude são, respectivamente,  $-20.75^{\circ}$  S e  $-45.25^{\circ}$ . As variedades para este trabalho foram: CTC 02, CTC 11, CTC 9003, RB 867515, IAC 5000 e SP 1842; e o momento de sua colheita estava nos seguintes cortes: 3°, 1°, 1°, 4°, 3° e 4°, respectivamente. Essas variedades foram escolhidas por serem as variedades utilizadas pelo produtor que realizou a fermentação e a destilação das amostras, que serão especificadas a seguir. As maturações das canas-de-açúcar das variedades CTC 02, CTC 11 e CTC 9003 são média, tardia e precoce, respectivamente (Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, 2024).

### 3.2 Caracterização e informações da produção

Foram produzidas três cachaças a partir das variedades previamente identificadas, totalizando 18 amostras das bebidas obtidas em diferentes condições do corte de cana-de-açúcar. As amostras foram produzidas em uma cachaçaria localizada no município de Candeias, Minas Gerais, já consolidada no mercado. Quanto à fermentação, a levedura utilizada foi a estirpe CA-11 (*Saccharomyse cerevisiae*), com duração de 24 horas. O Brix do caldo das amostras variou entre 14-17° após a correção do grau Brix, antes de se iniciar a fermentação.

O volume do mosto fermentado foi de 20 litros e destilado em alambique de cobre, em fogo direto com deflegmador. O corte da cabeça foi feito a 10% do volume total do destilado, enquanto a fração coração representou 80% do volume total.

As amostras de cachaça produzidas foram identificadas de acordo com suas condições. A condição PPC são as cachaças produzidas com cana com palhada, ponteiro e colmo, a fim de simular o corte normalmente feito pelos produtores; condição PC são as cachaças produzidas a partir da cana com ponteiro e colmo; condição C são as cachaças produzidas a partir da cana 100% limpa, em plena maturação e sem ponta e ponteiro, apenas com o colmo.

Para este trabalho, considera-se a ponta a parte superior da planta, onde encontram-se as folhas, e o ponteiro é entre o colmo e a ponta, caracterizado pelos entrenós curtos e pela presença do meristema apical.

As análises físico-químicas e cromatográficas foram realizadas no Laboratório de Análise de Qualidade de Aguardente, do Departamento de Química da Universidade Federal de Lavras.

### **3.3 Análises físico-químicas das amostras de cachaça/aguardente**

As análises físico-químicas seguiram as especificações exigidas pelo Ministério de Agricultura e Pecuária (MAPA), estabelecidas pela Instrução Normativa nº 24, de 08 de setembro de 2005. Desse modo, os seguintes parâmetros foram analisados: grau alcoólico, acidez volátil, extrato seco, ésteres, aldeídos, álcoois superiores, furfural, metanol, cobre, açúcares totais, acroleína e carbamato de etila (Brasil, 2005).

#### **3.3.1 Grau alcoólico**

O grau alcoólico foi determinado pela destilação de 250 mL das amostras. O destilado foi utilizado para medir o grau alcoólico dado em % (v/v) a 20 °C, pelo uso do densímetro eletrônico da marca Gibertini (DensiMat) a 20 °C.

#### **3.3.2 Acidez volátil**

A acidez volátil foi determinada por meio de extração dos ácidos voláteis, utilizando-se a técnica de arraste a vapor de água em destilador eletrônico da marca Gibertini. Os destilados foram titulados com hidróxido de sódio 0,1 mol L<sup>-1</sup>, em presença de fenolftaleína 1%. Os resultados foram expressos em miligramas de ácido acético por 100 mL aa.

#### **3.3.3 Extrato seco**

O extrato seco das amostras foi determinado utilizando métodos gravimétricos. Em uma cápsula de alumínio previamente pesada em balança analítica, foram adicionados 25 mL da amostra sem redestilar. Posteriormente, ocorreu a evaporação em banho-maria a 95 °C, durante 3 horas. Após esse período, as cápsulas foram levadas à estufa a 100 °C por 30 minutos. O material foi resfriado em dessecador e o resíduo sólido remanescente foi pesado em balança analítica. Os resultados foram expressos em gramas de extrato seco por litro da amostra.

### 3.3.4 Ésteres

A determinação dos ésteres foi realizada por meio da titulação dos ácidos carboxílicos obtidos por transesterificação dos ésteres presentes nas amostras. A quantificação dos ésteres é realizada com base em sua hidrólise alcalina, seguida da titulação dos ácidos liberados, com solução padronizada de hidróxido de sódio  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ . Os resultados obtidos foram expressos em miligramas de acetato de etila por 100 mL aa.

### 3.3.5 Aldeídos

Os aldeídos foram determinados por meio de métodos iodométricos, titulando-se o  $\text{SO}_2$  produzido durante a análise. A quantidade de aldeídos presente nas amostras foi expressa em miligramas de aldeído acético por mL aa.

### 3.3.6 Furfural

A quantificação do furfural foi realizada pela adição de anilina e ácido acético glacial às amostras, efetuando medidas espectrofotométricas a 520 nm, utilizando um espectrofotômetro Bel Engineering Modelo UV-M15. As quantidades desse composto foram obtidas pela construção de curvas analíticas de soluções padrão de furfural em etanol. Os resultados obtidos foram expressos em miligramas de furfural por 100 mL aa.

### 3.3.7 Cobre

O cobre foi quantificado por meio de medidas espectrofotométricas na região visível do espectro, utilizando um espectrômetro Bel Engineering Modelo UV-M15 a 546 nm, comparando a valores de absorvância referentes a uma curva analítica previamente construída, utilizando sulfato de cobre como padrão primário. Os resultados foram expressos em  $\text{mg L}^{-1}$ . A análise de cobre ocorre após redução do  $\text{Cu}^{2+}$  presente na bebida a  $\text{Cu}^+$ , formando, posteriormente, um complexo colorido com a solução de 2,2-diquinolilo em álcool isoamílico.

### 3.3.8 Açúcares totais

Os açúcares totais foram quantificados por titulação, segundo o método de Lane-Eyon, com o uso da solução de Fehling, baseado na redução do cobre alcalino do reagente a óxido cuproso. O ponto final é indicado pelo azul de metileno.

### 3.3.9 Acroleína

A quantificação de acroleína foi realizada segundo Nascimento *et al.* (1997) e Zacaroni *et al.* (2011). As amostras de cachaça foram derivadas, formando 2,4-dinitrofenilhidrazona, e injetadas em sistema HPLC Shimadzu, equipado com duas bombas de alta pressão modelo SPD-M20A, degaseificador modelo DGU-20A3 e interface modelo CBM-20A. A coluna utilizada foi coluna Agilent-Zorbax Eclipse XDB-C18 (250 × 4.6 mm × 5 µm) acoplada a uma pré-coluna Agilent-Zorbax Eclipse XDB-C18 4-Pack (12.5 × 4.6 mm × 5 µm) com o injetor automático modelo SIL-10AF e o detector de arranjos de diodos (DAD) a 365 nm, em fluxo de 0,9 mL min<sup>-1</sup>. A fase móvel utilizada foi composta por solução de água com ácido acético (98:2% v/v) como solvente A e metanol (solvente B). O sistema de eluição foi um gradiente de 0 a 3 min (70-85% B); 10 a 12 min (80-70% B); e 12 a 15 min (70-70% B).

### 3.3.10 Carbamato de etila (CE)

A análise de CE foi realizada de acordo com o método proposto por Anjos *et al.* (2011) e Machado *et al.* (2013), utilizando o mesmo sistema HPLC descrito anteriormente. A análise consistirá na derivação prévia da amostra, com uma solução de xantidrol 0,02 mol L<sup>-1</sup>. As separações foram realizadas empregando-se a mesma coluna descrita anteriormente acoplada a um detector de fluorescência (FLD) modelo RF-10AXL. A coluna utilizada foi coluna Agilent-Zorbax Eclipse AAA (4,6 x 150 mm, 5 µm) conectada a uma pré-coluna Agilent-Zorbax Eclipse AAA 4-Pack (4,6 x 12,5 mm, 5 µm). Os comprimentos de onda de excitação e emissão empregados foram de 233 e 600 nm, respectivamente. O fluxo utilizado em toda a análise foi de 0,75 mL min<sup>-1</sup>, e o volume injetado das amostras e do padrão foi de 20 µL. A eluição foi realizada em sistema do tipo gradiente: 0 a 5 min (40-60% B); 5 a 10 min (60-70% B); 10 a 18 min (70-80% B); 18 a 19,5 min (80-90% B); 19,5 a 25 min (90-40% B);

e 25 a 30 min (40% B). A fase móvel foi composta por solução de acetato de sódio 20 mM (solvente A) e acetonitrila (solvente B).

### 3.3.11 Análise de álcoois superiores e metanol

Os álcoois superiores e o metanol foram determinados por meio de cromatografia em fase gasosa com detector de ionização de chama, segundo Barbosa *et al.* (2022b).

Foi utilizado um cromatógrafo gasoso da marca Perkin Elmer (Clarus 580), auto-amostrador com detector de ionização de chama e coluna DB-WAX (30 mm x 0,25 mm x 0,25  $\mu\text{m}$ ). Os reagentes e os padrões utilizados foram todos de grau analítico para cromatografia. A curva analítica foi preparada de uma solução de 4 mg L<sup>-1</sup> em etanol 40%. No cromatógrafo a gás, a coluna foi iniciada a uma temperatura de 35 °C, elevando-a até atingir 140 °C; a temperatura do injetor estava a 150 °C; e o detector a 170 °C, com um fluxo de análise de 1,4 mL por minuto, no modo Splitless 1:10.

### 3.4 Análises estatísticas

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos inteiramente casualizados (DIC) com seis tratamentos correspondentes às variedades de cana-de-açúcar, sendo a parcela experimental composta por 3 cortes. A normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk, e os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram agrupadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa MINITAB®, versão 18.0 (Minitab Inc. – State College, PA, USA). Os dados representam a média das três repetições. A análise de componentes principais (PCA) e a análise hierárquica de clusters (HCA) foram utilizadas para averiguar e compreender a similaridade entre as amostras no que se trata dos parâmetros analisados. Os resultados, expressos em média, foram obtidos pelo programa CHEMOFACE (Nunes *et al.*, 2012).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos congêneres das amostras estão apresentados na Tabela 1, expressos em média  $\pm$  desvio padrão.

Tabela 1 – Resultado das análises físico-químicas das amostras.

Análise	Grau alcoólico <sup>1</sup>	Extrato seco <sup>2</sup>	Aldeído <sup>3</sup>	Ésteres <sup>3</sup>	Acidez volátil <sup>3</sup>	Furfural <sup>3</sup>	Coefficiente de congêneres <sup>3</sup>
CTC 2-PPC	43,97 $\pm$ 0,11 <sup>Bf</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	10,19 $\pm$ 0,36 <sup>Afghi</sup>	27,29 $\pm$ 2,69 <sup>Aabc</sup>	11,63 $\pm$ 2,32 <sup>Ahij</sup>	ND	280 $\pm$ 12,43 <sup>Ad</sup>
CTC 2-PC	47,15 $\pm$ 0,06 <sup>Acde</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	10,38 $\pm$ 0,30 <sup>Afghi</sup>	24,55 $\pm$ 1,25 <sup>Bcde</sup>	12,40 $\pm$ 0,02 <sup>Aghij</sup>	ND	271,21 $\pm$ 2,73 <sup>Adefg</sup>
CTC 2-C	47,85 $\pm$ 0,01 <sup>Abcd</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	11,97 $\pm$ 0,31 <sup>Aefg</sup>	28,67 $\pm$ 0,00 <sup>Aab</sup>	9,23 $\pm$ 0,00 <sup>Ajk</sup>	ND	286,08 $\pm$ 1,43 <sup>Ac</sup>
CTC 11-PPC	47,05 $\pm$ 0,64 <sup>Acde</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	26,82 $\pm$ 5,06 <sup>Aa</sup>	27,33 $\pm$ 0,37 <sup>Abcd</sup>	12,42 $\pm$ 0,17 <sup>Aefghi</sup>	ND	339,93 $\pm$ 12,86 <sup>Ab</sup>
CTC 11-PC	47,56 $\pm$ 0,08 <sup>Abcd</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	6,35 $\pm$ 0,30 <sup>Cjk</sup>	27,04 $\pm$ 0,05 <sup>Aabc</sup>	12,38 $\pm$ 0,02 <sup>Afghij</sup>	ND	278,04 $\pm$ 0,07 <sup>Cd</sup>
CTC 11-C	49,14 $\pm$ 0,03 <sup>Aabc</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	15,05 $\pm$ 0,31 <sup>Bbcd</sup>	21,80 $\pm$ 1,22 <sup>Bef</sup>	14,87 $\pm$ 0,01 <sup>Acdefg</sup>	ND	301,4 $\pm$ 2,14 <sup>Bc</sup>
CTC 9003-PPC	49,18 $\pm$ 0,11 <sup>Aabc</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	10,59 $\pm$ 0,02 <sup>Bfgh</sup>	27,89 $\pm$ 0,06 <sup>Aab</sup>	16,34 $\pm$ 2,07 <sup>Abc</sup>	ND	253,91 $\pm$ 4,71 <sup>Bg</sup>
CTC 9003-PC	47,51 $\pm$ 0,13 <sup>Abcd</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	9,21 $\pm$ 0,03 <sup>Bghij</sup>	23,46 $\pm$ 0,06 <sup>Bdef</sup>	15,38 $\pm$ 0,04 <sup>Acdef</sup>	ND	277,53 $\pm$ 0,46 <sup>Ade</sup>
CTC 9003-C	47,82 $\pm$ 0,18 <sup>Abcd</sup>	0,00 $\pm$ 0,01 <sup>a</sup>	15,68 $\pm$ 0,06 <sup>Abc</sup>	22,41 $\pm$ 1,35 <sup>Bef</sup>	7,63 $\pm$ 2,13 <sup>Bk</sup>	ND	274,57 $\pm$ 1,30 <sup>Adef</sup>
RB 867515-PPC	51,67 $\pm$ 0,05 <sup>Aa</sup>	0,004 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	7,46 $\pm$ 0,28 <sup>Bijk</sup>	29,86 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	16,97 $\pm$ 0,02 <sup>Babc</sup>	ND	269,31 $\pm$ 0,09 <sup>Adefg</sup>
RB 867515-PC	51,7 $\pm$ 0,08 <sup>Aa</sup>	0,008 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	12,09 $\pm$ 0,02 <sup>Adefg</sup>	26,53 $\pm$ 0,04 <sup>Bbcd</sup>	19,78 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	ND	283,60 $\pm$ 0,43 <sup>Ac</sup>
RB 867515-C	50,32 $\pm$ 0,04 <sup>Aab</sup>	0,01 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	8,07 $\pm$ 0,30 <sup>Bhij</sup>	21,30 $\pm$ 1,22 <sup>Cf</sup>	11,62 $\pm$ 0,01 <sup>Chij</sup>	ND	259,93 $\pm$ 2,53 <sup>Aefg</sup>
IACSP-5000-PPC	47,53 $\pm$ 0,31 <sup>Abcd</sup>	0,012 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	10,96 $\pm$ 0,55 <sup>Cefgh</sup>	21,63 $\pm$ 2,41 <sup>Bef</sup>	12,30 $\pm$ 0,08 <sup>Bfghij</sup>	ND	255,42 $\pm$ 6,64 <sup>Ag</sup>
IACSP-5000-PC	45,07 $\pm$ 0,08 <sup>ABdef</sup>	0,008 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	17,33 $\pm$ 0,29 <sup>Ab</sup>	27,58 $\pm$ 1,40 <sup>Aabc</sup>	16,21 $\pm$ 0,03 <sup>Abcd</sup>	ND	257,73 $\pm$ 0,59 <sup>Afg</sup>
IACSP-5000-C	44,10 $\pm$ 0,17 <sup>Bef</sup>	0,052 $\pm$ 0,07 <sup>Aa</sup>	13,70 $\pm$ 0,05 <sup>Bcde</sup>	15,56 $\pm$ 2,81 <sup>Cg</sup>	9,94 $\pm$ 0,04 <sup>Bijk</sup>	ND	255,03 $\pm$ 8,97 <sup>Ag</sup>
SP-1842-PPC	46,88 $\pm$ 0,01 <sup>Acdef</sup>	0,006 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	17,11 $\pm$ 0,32 <sup>Ab</sup>	25,60 $\pm$ 0,00 <sup>Abcd</sup>	15,59 $\pm$ 0,00 <sup>Bcde</sup>	ND	394,05 $\pm$ 11,10 <sup>Aa</sup>
SP-1842-PC	46,31 $\pm$ 0,01 <sup>Acdef</sup>	0,006 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	4,72 $\pm$ 0,32 <sup>Ck</sup>	26,84 $\pm$ 1,31 <sup>Aabc</sup>	18,93 $\pm$ 0,00 <sup>Aab</sup>	ND	345,35 $\pm$ 21,49 <sup>Bb</sup>
SP-1842-C	44,43 $\pm$ 0,01 <sup>Aef</sup>	0,00 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	13,13 $\pm$ 0,66 <sup>Bcdef</sup>	26,05 $\pm$ 1,36 <sup>Abcd</sup>	13,16 $\pm$ 0,00 <sup>Bdefgh</sup>	ND	354,97 $\pm$ 7,67 <sup>Bb</sup>
Limites permitidos*	38-48	-	30	200	150	5	200-650

<sup>1</sup>%(v/v) a 20 °C; <sup>2</sup>g/L; <sup>3</sup>mg/100 mL de álcool anidro. Letras minúsculas em mesma coluna e letras maiúsculas para mesma variedade são médias estaticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de confiança. PPC: ponta, ponteiro e colmo; PC: ponteiro e colmo; C: colmo. Fonte: Brasil (2022).

As amostras CTC 11-C, CTC 9003-PPC, RB 867515-PPC, RB 867515-PC e RB 867515-C apresentaram graduação alcoólica acima do limite máximo da legislação para cachaça, porém dentro do limite para aguardente de cana. A diferenciação por grau alcoólico é importante para a classificação do produto final obtido, conforme a legislação brasileira. Para aguardente de cana o limite máximo é de 54% (v/v) a 20 °C, e para cachaça de 48% (v/v) a 20 °C (Brasil, 2022). As folhas presentes nos cortes PPC não possuem açúcares em quantidade suficiente para que o parâmetro seja alterado de modo significativo e a sua ausência nos cortes PC e C corrobora essa afirmação. A variação do grau alcoólico entre as amostras de modo geral pode ser justificada por variações durante a produção das bebidas, durante o corte das frações na destilação e fermentação, conforme destacado por Cardoso (2020).

A variação dos teores de aldeídos, como indicada na Tabela 3, não ultrapassou o limite máximo estipulado (30 mg 100 ml<sup>-1</sup> aa.) (Brasil, 2022). Entretanto, a amostra CTC 11-PPC apresentou o valor maior para esse composto (26,82 mg 100 ml<sup>-1</sup> de álcool anidro). Ao considerar que as amostras da mesma variedade (CTC 11-PC e CTC 11-C) apresentaram valores próximos a outras variedades e cortes, pode-se inferir que a razão dessa diferença se deve a algum erro no processo de destilação e fermentação. Os aldeídos são o resultado da ação das leveduras durante o início da fermentação e tendem a desaparecer ao final do processo devido à oxidação dos aldeídos a ácido pela aeração excessiva do mosto. Embora estejam dentro no limite, faz-se necessário ter atenção a esse composto devido à sua inerência à qualidade da bebida e ao seu efeito no sistema nervoso central ao ser ingerido (Santiago *et al.*, 2015; Cardoso, 2020). Os resultados corroboram os encontrados anteriormente por Vilela *et al.* (2007) ao identificarem concentrações de aldeídos de 21 cachaças que variavam entre 2, 95 a 28, 83 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de álcool anidro (mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa) ao analisarem o perfil físico-químico de cachaças não registradas e suas misturas produzidas no Sul de Minas Gerais.

Os ésteres são formados durante a fermentação e são compostos responsáveis pelo aroma das bebidas alcoólicas ao contribuírem com odor frutado. Nas bebidas alcoólicas destiladas, os principais ésteres são acetato de etila e lactato de etila, que são cruciais para o equilíbrio do aroma e sabor em cachaças de alta qualidade (Ratkovich *et al.*, 2023). Os valores encontrados para ésteres foram abaixo do limite estabelecido pela legislação e corroboram algumas concentrações encontradas por Maia, Marinho e Nelson (2021) ao compararem os teores de lactato de etila e acetato de etila em 247 amostras de cachaça. Os resultados encontrados, porém, não apresentaram a variação observada no trabalho que avalia a composição química de cachaças produzidas no estado da Paraíba, realizado por Oliveira *et*

*al.* (2020), cujos resultados variaram entre 9, 17 a 172,72 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa. Os autores atribuíram a variação devido à formação dos ésteres no meio intracelular das cepas da levedura durante o processo fermentativo ou por meio de reações de esterificação durante o armazenamento/envelhecimento. Quatro amostras (SP-1842-PC, CTC 11-PC, RB 867515-PPC e RB 867515-C) apresentaram-se abaixo do menor valor encontrado por Oliveira *et al.* (2020), porém corroboram a média de ésteres de 5, 15 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa encontrada por Pereira *et al.* (2003) ao avaliarem os compostos secundários de aguardentes de cana provenientes de diversas localidades de Minas Gerais. A variação desse parâmetro pode ser justificada pela influência de fatores como quantidade de fermento, temperatura, aeração e agitação na fermentação e qualidade do caldo (Cardoso, 2020).

Dentre os compostos secundários formados durante a fermentação, está o ácido acético, o principal componente da fração ácida das cachaças expresso em acidez volátil (Cardoso, 2020). Quando dentro dos limites legais, a acidez volátil pode contribuir para o *flavor* da bebida. Entretanto, altos valores desse parâmetro não apenas podem diminuir o aspecto sensorial como indicam uma possível contaminação do mosto por bactérias acéticas, sendo necessário o cuidado com higienização do local de fermentação e evitar a estocagem da cana-de-açúcar e/ou do próprio caldo (Cardoso, 2020; Alvarenga *et al.*, 2023). As amostras não ultrapassaram o limite de 150 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa, indicando que todas estão dentro da legislação e corroboram concentrações encontradas (18, 84 a 179,33 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa) por Alvarenga *et al.* (2023) ao detectarem e quantificarem acroleína em amostras de cachaça para avaliar as possíveis rotas de formação do contaminante com sua correlação a outros compostos secundários presentes na bebida. As concentrações também corroboram as encontradas por Miranda *et al.* (2007), cujos valores variaram de 6,06 a 247,74 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa ao realizarem um levantamento de 94 cachaças e aguardentes de marcas comerciais quanto à conformidade com os padrões de identidade e qualidade previstos na legislação. Quando comparadas, é possível notar que as concentrações encontradas neste trabalho são baixas ao se compararem com a média dos valores dos trabalhos mencionados. Isto indica um processo de produção controlado, com práticas adequadas de higiene e baixos níveis de contaminação de bactérias.

O furfural é um aldeído formado pela degradação de açúcares residuais, tanto na etapa de fermentação do caldo quanto na destilação da cachaça, em condições de pH ácido e temperaturas elevadas, além de ser considerado tóxico para humanos e carcinogênico para animais em laboratório (Cardoso, 2020; Menevseoglu; Cabaroglu, 2021). A legislação brasileira tem seu limite máximo de 5 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa (Brasil, 2022). Não foi detectado

esse contaminante nas amostras, indicando padronização de produção e condições de manejo da matéria-prima adequadas, como estudado por Masson *et al.* (2007), que relacionam a altos teores de furfural com cana-de-açúcar estocada e queimada.

O extrato seco não é um parâmetro exigido pelo MAPA, porém é uma maneira de quantificar o teor de resíduos sólidos totais presentes em uma amostra e é influenciado pelas características finais da bebida (Alvarenga *et al.*, 2023). A quantidade de resíduos totais das amostras 1, 2, 3 e 6 em todas as condições foram desprezíveis. Entretanto, as amostras 4 e 5 em todos as condições apresentaram pouca quantidade de extrato seco, valores normais para cachaças não envelhecidas. Os valores encontrados condizem com a média de valores encontradas para cachaças armazenadas em tanques de aço inoxidável por Alvarenga *et al.* (2023). Esses resultados também condizem com a ausência de açúcares em todas as amostras, indicando que as bebidas não tiveram açúcar adicionado, como é permitido pela legislação, desde que a adição seja de até 6 g L<sup>-1</sup>.

A Tabela 2 apresenta as médias  $\pm$  desvio padrão dos álcoois superiores (isoamílico, isobutílico e n-propílico) e do somatório destes.

Tabela 2 – Resultado das análises dos álcoois isobutílico, isoamílico e n-propílico e seu somatório (Continua).

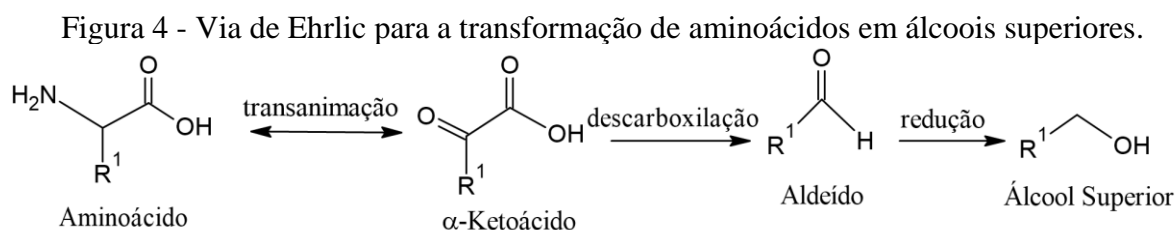
Análise	Álcool isobutílico <sup>1</sup>	Álcool isoamílico <sup>1</sup>	Álcool n-propílico <sup>1</sup>	Somatório dos álcoois isobutílico, isoamílico e n-propílico <sup>1</sup>
<b>CTC 2-PPC</b>	67,45 $\pm$ 3,72 <sup>Bcd</sup>	94,84 $\pm$ 0,70 <sup>Aef</sup>	68,76 $\pm$ 3,39 <sup>Ag</sup>	231,05 $\pm$ 7,8 <sup>ABefg</sup>
<b>CTC 2-PC</b>	65,40 $\pm$ 0,12 <sup>Bd</sup>	93,61 $\pm$ 1,11 <sup>Afg</sup>	64,8 $\pm$ 0,00 <sup>Bh</sup>	223,81 $\pm$ 1,19 <sup>Bghi</sup>
<b>CTC 2-C</b>	88,94 $\pm$ 0,52 <sup>Aa</sup>	86,18 $\pm$ 0,46 <sup>Bj</sup>	61,02 $\pm$ 0,15 <sup>Cij</sup>	236,14 $\pm$ 1,13 <sup>Ae</sup>
<b>CTC 11-PPC</b>	40,82 $\pm$ 1,19 <sup>Bk</sup>	106,24 $\pm$ 3,33 <sup>Aa</sup>	126,21 $\pm$ 2,75 <sup>Ad</sup>	273,27 $\pm$ 7,27 <sup>Ac</sup>
<b>CTC 11-PC</b>	43,21 $\pm$ 0,19 <sup>Bjk</sup>	89,47 $\pm$ 0,84 <sup>Chi</sup>	100,23 $\pm$ 0,35 <sup>Cf</sup>	232,9 $\pm$ 0,29 <sup>Cef</sup>
<b>CTC 11-C</b>	49,27 $\pm$ 0,65 <sup>Ai</sup>	96,86 $\pm$ 0,69 <sup>Bcde</sup>	103,3 $\pm$ 1,28 <sup>Be</sup>	249,25 $\pm$ 1,24 <sup>Bd</sup>
<b>CTC 9003-PPC</b>	58,44 $\pm$ 2,35 <sup>Cef</sup>	87,21 $\pm$ 2,73 <sup>Bij</sup>	53,37 $\pm$ 1,61 <sup>Bk</sup>	199,02 $\pm$ 6,69 <sup>Bk</sup>
<b>CTC 9003-PC</b>	69,49 $\pm$ 0,32 <sup>Ac</sup>	99,46 $\pm$ 0,73 <sup>Abc</sup>	60,46 $\pm$ 0,74 <sup>Aij</sup>	229,41 $\pm$ 0,32 <sup>Aefg</sup>
<b>CTC 9003-C</b>	66,06 $\pm$ 0,36 <sup>Bd</sup>	99,83 $\pm$ 0,51 <sup>Abc</sup>	62,86 $\pm$ 0,32 <sup>Ahi</sup>	228,76 $\pm$ 0,55 <sup>Befg</sup>
<b>RB 867515-PPC</b>	59,76 $\pm$ 0,02 <sup>Ae</sup>	94,28 $\pm$ 0,17 <sup>ABef</sup>	60,98 $\pm$ 0,05 <sup>Bij</sup>	215,02 $\pm$ 0,15 <sup>ABij</sup>
<b>RB 867515-PC</b>	61,12 $\pm$ 0,01 <sup>Ae</sup>	93,44 $\pm$ 0,85 <sup>Bfg</sup>	70,63 $\pm$ 0,34 <sup>Ag</sup>	225,19 $\pm$ 0,53 <sup>Afgh</sup>
<b>RB 867515-C</b>	53,12 $\pm$ 0,43 <sup>Bh</sup>	96,19 $\pm$ 2,13 <sup>Bdef</sup>	69,63 $\pm$ 0,70 <sup>Ag</sup>	218,94 $\pm$ 1,00 <sup>Bhij</sup>
<b>IACSP-5000-PPC</b>	52,75 $\pm$ 1,68 <sup>Bh</sup>	99,19 $\pm$ 0,44 <sup>Abcd</sup>	58,59 $\pm$ 1,64 <sup>Aj</sup>	210,52 $\pm$ 3,76 <sup>Bj</sup>
<b>IACSP-5000-PC</b>	45,23 $\pm$ 0,15 <sup>Cj</sup>	98,39 $\pm$ 0,20 <sup>Accl</sup>	52,99 $\pm$ 0,20 <sup>Bk</sup>	196,61 $\pm$ 0,54 <sup>Ck</sup>
<b>IACSP-5000-C</b>	74,10 $\pm$ 1,94 <sup>Ab</sup>	90,00 $\pm$ 2,53 <sup>Bhi</sup>	51,73 $\pm$ 1,59 <sup>Bk</sup>	215,83 $\pm$ 6,06 <sup>Aij</sup>

Tabela 2 – Resultado das análises dos álcoois isobutílico, isoamílico e n-propílico e seu somatório (Conclusão).

Análise	Álcool isobutílico <sup>1</sup>	Álcool isoamílico <sup>1</sup>	Álcool n-propílico <sup>1</sup>	Somatório dos álcoois isobutílico, isoamílico e n-propílico <sup>1</sup>
SP-1842-PPC	54,00 ± 1,03 <sup>Agh</sup>	101,86 ± 4,39 <sup>Ab</sup>	179,88 ± 5,36 <sup>Aa</sup>	335,75 ± 10,78 <sup>Aa</sup>
SP-1842-PC	44,49 ± 2,24 <sup>Bj</sup>	82,81 ± 9,77 <sup>Ck</sup>	167,55 ± 8,48 <sup>Bb</sup>	294,85 ± 20,49 <sup>Cb</sup>
SP-1842-C	56,31 ± 1,19 <sup>Afg</sup>	91,15 ± 1,70 <sup>Bgh</sup>	155,17 ± 2,77 <sup>Cc</sup>	302,63 ± 5,66 <sup>Bb</sup>
<b>Limites permitidos*</b>	-	-	-	360

<sup>1</sup>mg 100 mL<sup>-1</sup> de álcool anidro. Letras minúsculas em mesma coluna e letras maiúsculas para mesma variedade são médias estaticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de confiança. PPC: ponta, ponteiro e colmo; PC: ponteiro e colmo; C: colmo. Fonte: Brasil (2022).

A presença de álcoois superiores em bebidas fermentadas pode ocorrer durante a fermentação pelo metabolismo de leveduras e bactérias. Na presença da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, os níveis de álcoois superiores estão relacionados com a nutrição do nitrogênio (Zhong *et al.*, 2020). Quando a quantidade de nitrogênio é suficiente, o processo de transformação dos aminoácidos acontece pela descarboxilação e redução dos  $\alpha$ -cetoácidos, sendo estes derivados de uma das duas vias relacionadas ao metabolismo de aminoácidos, em que a primeira via é o catabolismo dos aminoácidos pela via de Ehrlich e a segunda é a via anabólica, ligando assim a formação dos álcoois superiores ao nitrogênio e ao metabolismo de carbono (Cordente *et al.*, 2019). A formação de álcoois superiores pela via de Ehrlich envolve a transformação do aminoácido ao seu  $\alpha$ -cetoácido correspondente. Na segunda etapa, os  $\alpha$ -cetoácidos são descarboxilados para aldeídos. A terceira e última etapa dessa via envolve a redução do aldeído a seu álcool superior correspondente por uma enzima álcool desidrogenase (Figura 4) (Cordente *et al.*, 2019).



Fonte: Adaptado de Cordente *et al.* (2019).

No que se trata da legislação brasileira para cachaça, os limites não são estabelecidos para os álcoois superiores isoamílico, isobutílico e n-propílico individualmente, mas para a soma total desses compostos (360 mg 100 mL<sup>-1</sup> aa). Nenhuma amostra ultrapassou o limite máximo para a soma dos álcoois superiores. Os resultados apresentados são consistentes com

os de Campos *et al.* (2010), que investigam a persistência e dominância de diferentes cepas de *Saccharomyces cerevisiae* durante a fermentação do caldo de cana-de-açúcar para a produção de cachaça. Os autores relatam uma variação de álcoois superiores de 120,66 a 309,86 mg 100 mL<sup>-1</sup> de álcool anidro para as três cepas avaliadas. Previamente, Oliveira *et al.* (2005) obtiveram valores que variaram de 31,4 a 328,8 mg 100 mL<sup>-1</sup> de aa ao analisarem os compostos voláteis de 24 cepas de *Saccharomyces cerevisiae* e uma cepa de cada uma das leveduras: *Candida apicola*, *C. famata*, *C. guilliermondii*, *Hanseniaspora occidentalis*, *Pichia subpelliculosa* e *Schizosaccharomyces pombe*. Os resultados encontrados neste trabalho corroboram a concentração máxima do parâmetro encontrado por Oliveira *et al.* (2020), 310 mg · 100 mL<sup>-1</sup> de aa, ao se aproximar das amostras SP-1842-PPC e SP-1842-C (335,75 e 302,63 mg · 100 mL<sup>-1</sup> de aa, respectivamente). Silva *et al.* (2020b) analisaram os compostos voláteis das cachaças produzidas de 3 variedades de cana-de-açúcar em três diferentes tipos de manejo: orgânico, convencional e sem aplicação de fertilizantes. Dentre as variedades analisadas, está a variedade RB867515, cuja soma de álcoois superiores da amostra sem fertilizantes é 218,06 mg · 100 mL<sup>-1</sup> de aa que se aproxima às amostras RB 867515-PPC, RB 867515-PC e RB 867515-C da mesma variedade de cana-de-açúcar (Tabela 4).

Observa-se que os resultados obtidos estão dentro da normalidade esperada, com valores similares àqueles encontrados em literatura, bem como dentro dos limites legais do parâmetro.

De acordo com Masarin *et al.* (2011), os ácidos hidroxicinâmicos compõem uma parte significativa dos compostos aromáticos presentes na cana-de-açúcar. Assim, considerando a via de formação dos álcoois superiores apresentada anteriormente (Figura 4) e que a cana-de-açúcar é uma cultura cianogênica, ou seja, contém glicosídeos cianogênicos que liberam cianeto (HCN) ao serem hidrolisados (Moraes; Moreira; Tsai, 2011; Bortoletto; Silvello; Alcarde, 2015), pode-se inferir que a quantidade de compostos nitrogenados encontrada na matéria-prima influencia a formação dos álcoois superiores. Assim, pode-se inferir que a concentração maior de álcoois superiores das amostras da variedade SP-1842 está relacionada à composição química da matéria-prima e/ou condições de produção da bebida.

A presença do meristema apical da cana-de-açúcar na produção de cachaça influencia a concentração dos álcoois superiores. Isto se faz possível devido à própria composição química do meristema apical, que desempenha papel importante no crescimento da parte aérea das plantas. Seu funcionamento e manutenção envolve, principalmente, dois hormônios: auxina e citocinina, sendo o último derivado da adenina com cadeias laterais isoprenoides ou aromáticas, responsável pelo crescimento de células e diferenciação destas em folhas e brotos

em expansão (Murray *et al.*, 2012; Masoabi *et al.*, 2023). De acordo com a revisão elaborada por Murray *et al.* (2012) a respeito da regulação hormonal do meristema apical das plantas, esta região apresenta altos níveis de citonina devido ao seu papel na regulação do tamanho da população de células-tronco. Assim, é possível inferir uma alta concentração de aminoácidos nesse local da cana-de-açúcar, o que levaria a maiores concentrações de álcoois superiores e compostos secundários que podem ser formados por essa mesma via, como os aldeídos e ésteres (Figura 4) (Cordente *et al.*, 2019).

A via de formação dos álcoois superiores também está relacionada à formação de ésteres: uma vez formado, o álcool superior pode ser convertido ao seu éster correspondente em uma reação de condensação entre o álcool e a enzima acetil-CoA (Cordente *et al.*, 2019). Essa relação pode ser uma possível explicação para as concentrações mais altas de ésteres das amostras IACSP-5000-PPC, IACSP-5000-PC e IACSP-5000-C, enquanto a soma dos álcoois superiores é a mais baixa dentre as bebidas analisadas.

Duarte *et al.* (2017), ao traçarem o perfil físico-químico e cromatográfico de cachaças orgânicas produzidas em diferentes estados brasileiros, observaram concentrações de álcool propílico que variaram de 12,24 a 51,72 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa. A concentração mais alta encontrada pelos autores aproxima-se das amostras CTC 9003-PPC, IACSP-5000-PC e IACSP-5000-C. As concentrações mais altas obtidas para esse álcool se assemelham àquelas obtidas por Alvarenga *et al.* (2023), que variaram de 17, 88 a 153, 86 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa, abrangendo as bebidas produzidas das variedades 1 a 5. Amorim, Schwan e Duarte (2016), por suas vezes, obtiveram média de 146,39 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa para esse álcool ao traçarem o perfil físico-químico e sensorial de cachaças fermentadas com levedura selecionada *S. cerevisiae* comparadas ao inóculo misto. Esse valor se aproxima das concentrações encontradas para as amostras CTC 11-PPC, CTC 11-PC e CTC 11-C.

O álcool isoamílico foi o que apresentou maiores concentrações em geral. Isto também pode ser observado no trabalho de Bortoletto, Correa e Alcarde (2016) ao analisarem cachaças envelhecidas em diferentes madeiras por um mesmo tempo, a fim de perceberem as diferenças físico-químicas e sensoriais das cachaças. Os autores obtiveram a concentração de 129,33 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa do álcool isoamílico para a cachaça antes do envelhecimento, concentração mais alta que as amostras CTC 11-PPC e SP-1842-PPC, cujas concentrações são 106,24 e 101,86 33 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa, respectivamente. Alvarenga *et al.* (2023) obtiveram concentrações de cachaças não envelhecidas que variaram de 28,98 a 167,06 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa, em que grande parte dessas apresentaram valores similares aos apresentados no presente trabalho. Barbosa *et al.* (2022a), ao traçarem o perfil físico-químico

de cachaças armazenadas em barris de madeira com diferentes tostas, encontraram para uma das amostras 114, 29 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa do álcool isoamílico em sua amostra controle (sem envelhecimento). Esses valores se aproximam dos encontrados no presente trabalho.

No que se trata do álcool isobutílico, a maior e a menor concentrações encontradas foram 88,94 e 40,82 mg 100 mL<sup>-1</sup> de aa (amostras CTC 2-C e CTC 11-PPC, respectivamente). Os valores encontrados estão de acordo com os resultados apresentados por Alvarenga *et al.* (2023), cujas concentrações de álcool isobutílico variaram entre 19,57 e 70,02 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa. Posteriormente, Gomes *et al.* (2009), ao compararem cachaças produzidas pela fermentação de diferentes cepas de *S. cerevisiae* e da levedura selvagem, obtiveram concentrações de 50, 70, 71 e 82 mg · 100 ml<sup>-1</sup> de aa. Os valores apresentados nas pesquisas anteriores corroboram os resultados encontrados neste trabalho.

A legislação brasileira não possui valores mínimos e máximos para os álcoois citados anteriormente. Entretanto, é possível perceber que as concentrações encontradas para todas as amostras corroboram os valores já demonstrados em literatura.

A Tabela 3 apresenta a média  $\pm$  desvio padrão dos resultados dos contaminantes orgânicos e inorgânicos encontrados nas amostras.

Tabela 3 – Resultados das análises físico-químicas dos contaminantes orgânicos e inorgânicos.

Análise	Cobre <sup>1</sup>	Álcool metílico (metanol) <sup>2</sup>	Álcool n-butílico <sup>2</sup>	Álcool sec-butílico <sup>2</sup>	Acroleína <sup>2</sup>	Carbamato de etila <sup>3</sup>
CTC 2-PPC	1,20 $\pm$ 0,00 <sup>Aa</sup>	ND	1,04 $\pm$ 0,04 <sup>a</sup>	ND	< LQ	11,83 $\pm$ 0,00 <sup>Ab</sup>
CTC 2-PC	1,20 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	< LQ	< LQ	ND	< LQ	11,56 $\pm$ 0,00 <sup>Ab</sup>
CTC 2-C	1,55 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	ND	< LQ	7,3 $\pm$ 0,00 <sup>Bdef</sup>
CTC 11-PPC	1,43 $\pm$ 0,33 <sup>Aa</sup>	ND	3,35 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	11,27 $\pm$ 0,00 <sup>Afg</sup>
CTC 11-PC	2,48 $\pm$ 0,08 <sup>Aa</sup>	ND	1,82 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	4,53 $\pm$ 0,00 <sup>Bfg</sup>
CTC 11-C	2,03 $\pm$ 0,05 <sup>Aa</sup>	< LD	1,71 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	4,58 $\pm$ 0,00 <sup>Bfg</sup>
CTC 9003-PPC	2,00 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	< LD	< LQ	ND	< LQ	4,7 $\pm$ 0,00 <sup>Bfg</sup>
CTC 9003-PC	1,98 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	ND	< LQ	12,43 $\pm$ 0,00 <sup>Ab</sup>
CTC 9003-C	0,92 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	ND	< LQ	5,61 $\pm$ 0,00 <sup>Befg</sup>
RB 867515-PPC	1,66 $\pm$ 0,00 <sup>Aa</sup>	< LQ	0,92 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	6,4 $\pm$ 0,00 <sup>Befg</sup>
RB 867515-PC	2,19 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	< LD	1,05 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	9,76 $\pm$ 0,00 <sup>Abcd</sup>
RB 867515-C	1,25 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	< LD	< LQ	ND	< LQ	6,55 $\pm$ 0,00 <sup>Befg</sup>
IACSP-5000-PPC	1,20 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	ND	1,34 $\pm$ 0,04 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	10,1 $\pm$ 0,00 <sup>Abcd</sup>
IACSP-5000-PC	1,42 $\pm$ 0,14 <sup>Aa</sup>	ND	0,93 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	3,83 $\pm$ 0,00 <sup>Cg</sup>
IACSP-5000-C	1,11 $\pm$ 0,03 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	ND	< LQ	6,48 $\pm$ 0,00 <sup>Befg</sup>
SP-1842-PPC	1,47 $\pm$ 0,01 <sup>Aa</sup>	< LQ	1,91 $\pm$ 0,05 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	16,32 $\pm$ 0,00 <sup>Aa</sup>
SP-1842-PC	2,06 $\pm$ 0,08 <sup>Aa</sup>	< LQ	2,00 $\pm$ 0,08 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	12,07 $\pm$ 0,00 <sup>Bb</sup>
SP-1842-C	2,22 $\pm$ 0,06 <sup>Aa</sup>	< LQ	1,41 $\pm$ 0,02 <sup>Aa</sup>	ND	< LQ	8,28 $\pm$ 0,00 <sup>Ccde</sup>
<b>Limites permitidos*</b>	5	20	3	10	5	210

<sup>1</sup>mg L<sup>-1</sup>; <sup>2</sup>mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa; <sup>3</sup>µg L<sup>-1</sup>. LD e LQ para álcool metílico (mg/100 ml a.a): 0,39 e 1,39, respectivamente. LD e LQ para álcool n-butílico, sec-butílico (mg 100 ml<sup>-1</sup> aa): 0,25 e 0,82, respectivamente. LD e LQ para acroleína (mg 100 mL<sup>-1</sup> aa): 0,23 e 0,76, respectivamente. LD e LQ para carbamato de etila, em µL L<sup>-1</sup>: 0,97 e 3,24. Letras minúsculas em mesma coluna e letras maiúsculas para mesma variedade são médias estaticamente iguais pelo Teste de Tukey a 95% de confiança. ND: não detectado. PPC: ponta, ponteiro e colmo; PC: ponteiro e colmo; C: colmo. Fonte: Brasil (2022).

A produção da cachaça pode ser classificada de acordo com o sistema utilizado para a destilação, que são tipicamente dois: colunas destiladoras de aço inoxidável e alambiques de cobre. No caso de utilização do último, alguns estudos mostram que a presença de cobre é de extrema importância para a catálise de reações que melhoram a qualidade sensorial do produto. Entretanto, altas concentrações desse metal é tóxico ao ser humano, sendo associado a doenças neurológicas, como Parkinson e Alzheimer, além de catalisar a formação do carbamato de etila (Barbosa *et al.*, 2022b; Figueiredo *et al.*, 2022; Ratkovich *et al.*, 2023).

Silva *et al.* (2020a), ao monitorarem a concentração de carbamato de etila e cobre de cachaças produzidas dos cultivos orgânico e convencional de três variedades de cana-de-açúcar, obtiveram para a variedade RB867515 as seguintes concentrações desse contaminante: 3,87, 3,82 e 3,07 mg L<sup>-1</sup> para os cultivos orgânicos, convencionais e sem fertilização, respectivamente. As concentrações das amostras RB 867515-PPC, RB 867515-PC e RB 867515-C para o cobre foram 1,66, 2,19 e 1,25 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, valores menores do que aqueles encontrados no trabalho anterior. Essa diferença pode ser justificada pela higiene do alambique no momento da destilação ou pelo corte da fração. De acordo com Lima *et al.* (2009), durante o processo de destilação, ou durante o tempo que o equipamento não está em uso, há a formação de azinhavre (carbonato básico de cobre) nas paredes internas. Essa mistura é dissolvida pelos vapores alcoólicos ácidos, sendo responsável pela contaminação. Isso também pode ser uma justificativa para as concentrações mais altas de cobre encontradas nas amostras CTC 11-PC, SP-1842-PC e SP-1842-PPC (2,48, 2,06 e 2,22 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente).

O álcool metílico (metanol) não foi detectado em 50% das amostras e esteve abaixo do limite de detecção para outra metade. Esse álcool, formado pela degradação da lignina da cana-de-açúcar presente em partículas de bagaço da cana-de-açúcar, é indesejável devido a sua toxicidade à saúde humana, incluindo cegueira e morte (Cardoso *et al.*, 2022; Ratkovich *et al.*, 2023). Bortoletto e Alcarde (2015), ao avaliarem o perfil físico-químico de 268 cachaças, observaram uma média de 7,16 mg 100 ml<sup>-1</sup> de aa, resultando em 2,6% das amostras acima do limite legal. Similarmente, Vilela *et al.* (2021), ao avaliarem 38 amostras de cachaças produzidas no estado da Paraíba, observaram que todas apresentaram concentrações de metanol abaixo do limite máximo estipulado. Esses resultados corroboram os apresentados neste trabalho, indicando que o caldo de cana-de-açúcar passou por tratamento adequado anteriormente à sua fermentação e que o corte das frações e a temperatura do alambique foram adequados.

O álcool superior sec-butílico não foi detectado em nenhuma amostra. Já o álcool n-butílico esteve abaixo de limite de quantificação para as amostras CTC 2-PC, CTC 2-C, CTC 11-C, CTC 9003-PPC, CTC 9003-PC, CTC 9003-C, RB 867515-C e IACSP-5000-C (Tabela 5) e menor que o limite máximo estipulado pela legislação vigente para as amostras restantes. De acordo com Cardoso (2020) e Alvarenga *et al.* (2023), esses álcoois são formados durante o processo de fermentação que tenha sido contaminada por bactérias do gênero *Clostridium* e *Lactobacillus*. Estas bactérias são capazes de formar o álcool sec-butílico pela redução enzimática do 2,3-butanodiol ou espontaneamente por sua degradação oxidativa. A concentração desse composto pode afetar a bebida negativamente e é um indicativo de deterioração da matéria-prima. Desse modo, pode-se observar que o ambiente em que a fermentação das amostras foi realizada foi devidamente higienizado e que não houve contaminação bacteriana das canas-de-açúcar utilizadas para a produção das bebidas. Os resultados corroboram os apresentados por Fernandes *et al.* (2017) ao estudarem cachaças produzidas a partir de cinco variedades diferentes colhidas em três épocas distintas, ao observarem a ausência do álcool sec-butílico nas amostras e baixas concentrações do álcool n-butílico.

A presença da acroleína é indesejável por ser tóxica por todas as vias de administração, apresentando características mutagênicas. Seu risco é associado à reatividade que leva a efeitos citotóxicos, como lesões locais das membranas das mucosas quando em contato direto com o tecido (Cardoso, 2020). A formação da acroleína pode estar relacionada à contaminação bacteriana pelo gênero *Lactobacillus*, pela conversão do glicerol (um dos produtos da fermentação, pouco presente em cachaças não envelhecidas) em 3-hidroxiopropanal por atividade anaeróbica (Alvarenga *et al.*, 2023). A acroleína esteve abaixo do limite de quantificação (0,76 mg 100 mL<sup>-1</sup> aa.) em todas as amostras, indicando baixas concentrações desse contaminante. O resultado reforça que não houve contaminação do mosto e da matéria-prima por bactérias. Vilela *et al.* (2021) encontraram concentrações menores do que 1 mg 100 mL<sup>-1</sup> aa em todas as amostras analisadas.

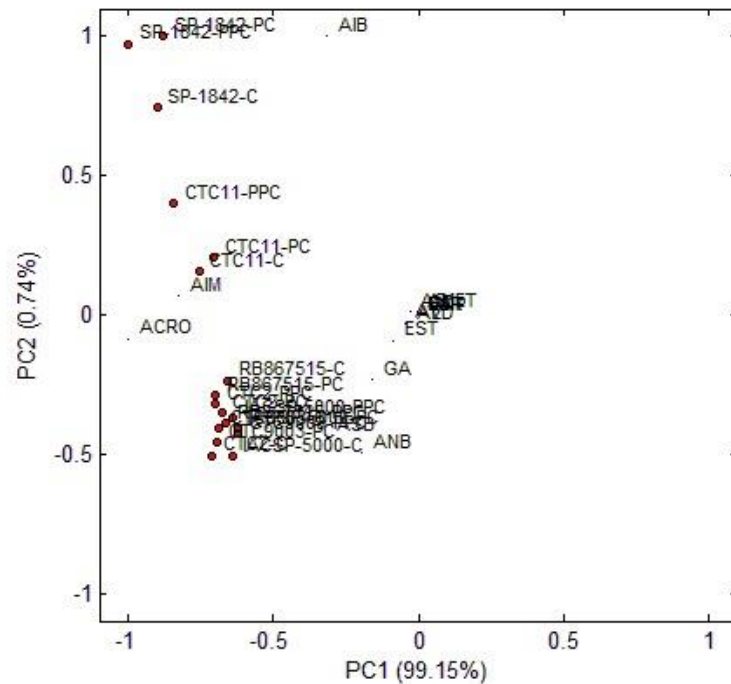
O carbamato de etila é um contaminante encontrado naturalmente em alimentos e bebidas fermentadas e fermento-destiladas. Este composto deve ser cuidadosamente monitorado devido ao seu alto potencial carcinogênico a animais e humanos, sendo seu limite 210 µg L<sup>-1</sup> (Cardoso, 2020; Brasil, 2022). De acordo com a revisão de Lima *et al.* (2022), uma das diversas vias de formação em aguardente de cana-de-açúcar está relacionada ao íon cianeto formado pela degradação enzimática de glicosídeos cianogênicos presente na matéria-

prima, que ao ser oxidado a cianeto reage com etanol na presença de cobre, resultando assim no CE.

Todas as amostras estão dentro do limite máximo estabelecido para o CE, sendo a concentração mais alta encontrada de  $16,32 \mu\text{g L}^{-1}$  (SP1842-PPC). Este valor corrobora as concentrações encontradas por Anjos *et al.* (2011) que, ao avaliarem a influência do envelhecimento nas concentrações do contaminante, obtiveram média de  $16,62 \mu\text{g L}^{-1}$  para a amostra armazenada em vidro, ou seja, não envelhecida. As concentrações das amostras pesquisadas neste trabalho CTC 2-PPC, CTC 2-PC, CTC 11-PPC, CTC 9003-PC e SP-1842-PC se assemelham à concentração de  $12,29 \mu\text{g L}^{-1}$  para a variedade RB867515 encontrada por D'Avila *et al.* (2016) ao avaliarem a influência de diferentes sistemas agroindustriais na produção de cachaça, incluindo a variedade da cana-de-açúcar ao quantificarem o CE. Cravo *et al.* (2019) caracterizaram o glicosídeo *dhurrin* de cinco variedades de canas-de-açúcar diferentes, buscando uma relação entre aquele e o CE. Ao analisarem as bebidas produzidas com essas variedades, os autores encontraram a concentração de  $4,47 \mu\text{g L}^{-1}$  para a variedade RB867515. Os resultados apresentados nos trabalhos anteriores não se aproximam das concentrações da variedade RB867515, porém se aproximam das amostras CTC 11-PC, CTC 11-C, CTC 9003-PPC e IACSP-5000-PC, de variedades distintas. A concentração relatada por Cravo *et al.* (2019) para variedade CTC 11 ( $9,26 \mu\text{g L}^{-1}$ ) não corrobora os resultados do presente trabalho para a mesma variedade (amostra 2).

Para se confirmar a relação entre as amostras observadas no teste de média, foram feitas a Análise Hierárquica de Clusters (HCA) e a Análise de Componentes Principais (PCA). A Figura 5 apresenta o gráfico biplot PC1 x PC2 dos *loadings* e *scores*, que relaciona as análises físico-químicas de cada amostra.

Figura 5 – Gráfico de Análises de Componentes Principais (ACP) das amostras demonstrando o agrupamento dos grupos similares.



Fonte: Da autora (2024).

Pela Figura 5 é possível perceber que, com a primeira componente e a componente principal, 99,9% dos dados foram descritos, sendo 99,15% descritos pela primeira componente principal, indicando que quase todas as amostras podem ser explicadas por um único eixo. Pode-se observar que a variedade SP-1842 se diferiu das demais, assemelhando-se entre os cortes PPC e PC, o que corrobora a análise de variância aplicada anteriormente, observada nas Tabelas 3, 4 e 5. A proximidade dessas amostras pode ser explicada por semelhanças na sua produção, como corte de destilação e fermentação, ou pela presença do meristema apical em ambos os cortes, uma vez que a amostra SP-1842-C está distante das demais. Isso indicaria que para a variedade SP-1842 o corte da cana-de-açúcar influenciou os resultados finais.

Já a amostra CTC 11-PPC não é semelhante a nenhuma amostra, nem mesmo às outras cachaças de sua variedade. Isto pode ser observado no teste de média para a soma dos componentes secundários e álcoois superiores, aldeídos e carbamato de etila (Tabelas 1, 2 e 3), em que a amostra CTC 11-PPC não é estatisticamente igual às amostras CTC 11-PC e CTC 11-C. Pode-se inferir pela PCA que para essa variedade também houve uma influência dos cortes da matéria-prima ou uma similaridade maior entre essas amostras no momento de produção.

Pelo agrupamento dos PIQs acidez volátil, ésteres, aldeídos, álcool metílico, álcool propílico, cobre e CE ao centro do gráfico (Figura 4), é possível observar a existência de uma relação entre eles. Os ésteres e a acidez podem estar relacionados por meio da reação de esterificação entre álcoois e ácidos carboxílicos, como o ácido acético que tem sido o principal componente da parte ácida das cachaças. Isto também explicaria a proximidade dos ésteres ao grau alcoólico, ilustrado no gráfico. Da mesma forma, os aldeídos estão próximos à acidez pela sua oxidação a ácidos ao final da fermentação. A formação desse composto pode ocorrer pela descarboxilação de oxiácidos ou pela oxidação dos álcoois respectivos, o que justifica a aproximação com o álcool propílico e corrobora a via de formação dos álcoois superiores ilustrada na Figura 3 (Cardoso, 2020). O cobre e o CE podem estar relacionados pela catálise da reação de formação contaminante orgânico pelo primeiro, como discutido anteriormente no referencial teórico.

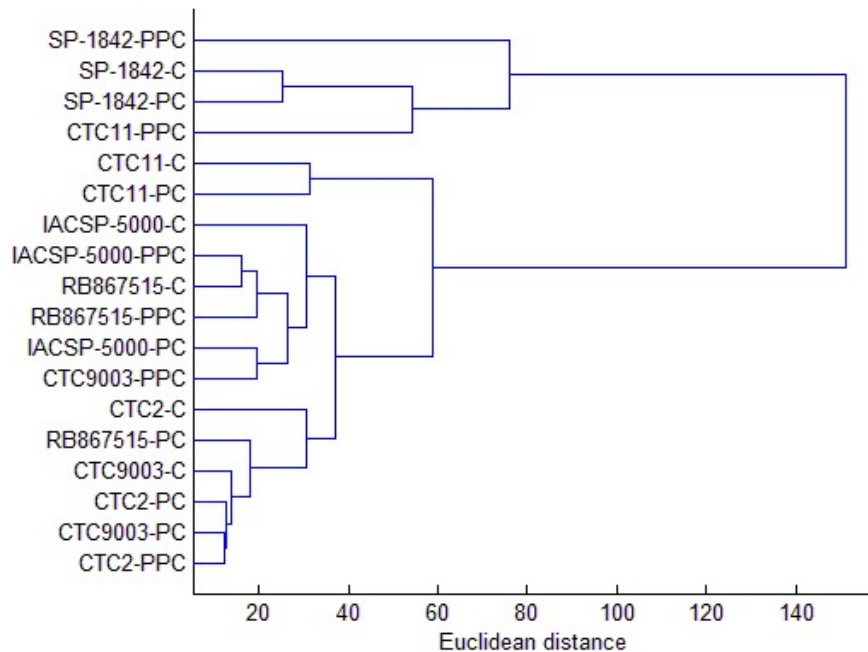
Quanto ao metanol, sua presença nas bebidas alcoólicas fermentadas está atrelada à presença de lignina, temperatura de fermentação e idade da matéria-prima utilizada na bebida (Cardoso, 2020). Outra possível fonte de metanol seria a contaminação do mosto por microrganismos como bactérias e diferentes cepas de *S. cerevisiae* (Ohimain, 2016). Entretanto, como visto anteriormente, não há indícios de contaminação bacteriana do mosto. Desse modo, estima-se que esse contaminante nas amostras deste trabalho possa ser originado da lignina presente na cana-de-açúcar e que a sua rota de formação gere algum composto secundário.

É possível perceber relação entre a acroleína e os álcoois n-butílico e sec-butílico, como observado por Alvarenga *et al.* (2023). A proximidade do álcool isoamílico e da acroleína, no gráfico (Figura 5), sugere alguma relação com o contaminante, sendo observado pelos autores citados anteriormente. Os contaminantes acroleína e os álcoois n-butílico e sec-butílicos estão relacionados à contaminação bacteriana de mesma família, o que justifica sua relação. Já os álcoois isoamílico e isobutílico, desejáveis para a composição do aroma da bebida, são formados pela via de Ehrlich, podem ser formados a partir de diferentes aminoácidos, o que justificaria a distância entre os parâmetros no gráfico (Figura 5).

A HCA tem como objetivo agrupar as amostras, e o distanciamento entre estas reflete a sua similaridade, sendo útil para determinar suas semelhanças (Panero *et al.*, 2009). Desse modo, pode-se atestar que essa análise confirma o observado pela PCA e pela análise de variância. A Figura 6 é o dendograma das amostras de HCA, com autoescalamento e distância euclidiana, sendo possível observar a separação de dois grupos.



Figura 6 – Análise Hierárquica de Clusters para todas as amostras.



Fonte: Da autora (2024).

É possível notar que as amostras pertencentes à variedade SP-1842 têm os três cortes similares e se aproximam da amostra CTC 11-PPC, por estarem no mesmo grupo. Essa similaridade também foi observada na Figura 5. No segundo grupo é possível notar as semelhanças entre as variedades 1, 3, 4 e 5 (CTC 02, CTC 9003, RB867515 e IAC 5000), que corrobora a análise de variância apresentada principalmente nas Tabelas 3 e 4, onde é possível notar uma grande similaridade entre as amostras dessas variedades. Desse modo, pode-se concluir que entre as variedades não existem diferenças que impactem a bebida produzida.

A Figura 5 evidencia que não houve agrupamento pelas diferentes técnicas de corte. Ou seja, as amostras com o mesmo tipo de corte não se agruparam, indicando que os métodos de corte não tiveram uma influência suficientemente forte para provocarem a semelhança entre as amostras. Dessa forma, infere-se que a variedade de cana-de-açúcar teve uma tendência maior a influenciar a qualidade das bebidas quando comparada a presença das impurezas vegetais.

Os resultados apresentados neste trabalho indicam que o uso das partes da planta, como as pontas e ponteiros, não impacta negativamente a qualidade da bebida, pois nenhuma das amostras se apresentou fora dos padrões estipulados pelo MAPA, evidenciando que as bebidas estão em boas condições de consumo. No entanto, é importante ressaltar que os álcoois superiores apresentaram concentrações mais elevadas nas bebidas obtidas pela

moagem das pontas e ponteiros. Esse aumento pode ser atribuído à presença do meristema apical da planta que, por ser responsável pelo crescimento, possui maiores concentrações de aminoácidos do que o colmo, influenciando na formação desses compostos. Portanto, é necessário o monitoramento dos álcoois superiores quando a ponteira for moída junto ao colmo para a obtenção do caldo.

Em relação às variedades de cana-de-açúcar, as análises PCA e HCA revelaram que duas variedades se destacaram das demais. Essa diferença pode ser explicada pela composição química específica dessas plantas ou por variações ocorridas durante o processo produtivo da bebida. As demais variedades não apresentaram grande diversidade entre si, indicando que, de maneira geral, não possuem um impacto significativo na qualidade da bebida. Essa conclusão está alinhada com estudos anteriores que avaliaram a influência da variedade na qualidade do produto final. Assim, a escolha da variedade pelo produtor pode ser baseada nas condições edafoclimáticas do canavial, bem como na resistência às possíveis pragas que possam afetar a planta.

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que as amostras analisadas estavam dentro dos padrões estabelecidos pelo MAPA para cachaça, indicando que colmos com a presença de palha e ponteira não comprometeram a qualidade da bebida. As análises de PCA e HCA demonstram que quando se compara a variedade da cana-de-açúcar com o nível de limpeza do colmo, a primeira tende a impactar mais a composição química do produto final. Entretanto, não significa que uma variedade seja mais indicada do que outra.

Sugerem-se estudos mais profundos sobre a composição do ponteiro da cana-de-açúcar, como a concentração e qualificação de aminoácidos presentes nessa região da planta, a fim de elucidar como a presença desses compostos podem influenciar a concentração dos álcoois superiores e do carbonato de etila.

## REFERÊNCIAS

ALCARDE, André Ricardo. **Cachaça: Ciência, Tecnologia e Arte**. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

ALVARENGA, Gabriela Fontes *et al.* Correlation of the presence of acrolein with higher alcohols, glycerol, and acidity in cachaças. **Journal of Food Science**, [Chicago], v. 88, n. 4, p. 1753-1768, Apr. 2023. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36915964/>. Acesso em: 21 nov. 2023.

AMORIM, Juliana Cunha; SCHWAN, Rosane Freitas; DUARTE, Whasley Ferreira. Sugar cane spirit (cachaça): Effects of mixed inoculum of yeasts on the sensory and chemical characteristics. **Food Research International**, [Ottawa], v. 85, p. 76-83, July 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096399691630134X>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ANJOS, Jeancarlo Pereira dos *et al.* Identification of ethyl carbamate during the aging of cachaça in an oak barrel (*Quercus* sp) and a glass vessel. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 5, p. 874-878, Feb. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/NdRyyrkWS99N4rP94QXKbVp/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 22 nov. 2022.

ARSLAN, M. Mustafa *et al.* Analysis of methanol and its derivatives in illegally produced alcoholic beverages. **Journal of Forensic and Legal Medicine**, [London], v. 33, p. 56-60, July 2015. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26048498/>. Acesso em: 14 mar. 2024.

BARBOSA, Richard Bispo *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 and Bioprocess Technology**, [New York], v. 15, p. 1977- 1978, Sept. 2022a. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11947-022-02853-w>. Acesso em: 14 dez. 2023.

BARBOSA, Richard Bispo *et al.* Kinetic, thermodynamic and physical-chemical study of the removal of copper from cachaca using coconut fibers. **Food Additives And Contaminants Part A-Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment**, [London], v. 39, n. 9, p. 1544-1554, Sept. 2022b. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35802633/>. Acesso em: 23 fev. 2024.

BORTOLETTO, Aline M.; ALCARDE, André R. Assessment of chemical quality of Brazilian sugar cane spirits and cachaças. **Food Control**, [England], v. 54, p. 1-6, Aug. 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956713515000511>. Acesso em: 04 jun. 2024.

BORTOLETTO, Aline Marques; CORREA, Ana Carolina; ALCARDE, André Ricardo. Aging practices influence chemical and sensory quality of cachaça. **Food Research International**, [Ottawa], v. 86, p. 46-53, Aug. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916301867>. Acesso em: 20 abr. 2024.

- BORTOLETTO, Aline Marques; SILVELLO, Giovanni Casagrande; ALCARDE, André Ricardo. Chemical and microbiological quality of sugar cane juice influences the concentration of ethyl carbamate and volatile congeners in cachaça. **Journal of the Institute of Brewing**, [London], v. 121, n. 2, p. 251-256, Mar. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.213>. Acesso em: 13 mar. 2024.
- BRAGA JÚNIOR, Rubens Leite do Canto *et al.* **Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - safra 2022/23**. Campinas: Boletim Técnico IAC 235, 2023. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/media/publicacoes/iacbt235.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2024.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº24, de 08 de setembro de 2005. Manual operacional de bebidas e vinagras. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF: MAPA, 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Portaria nº 539, de 26 de dezembro de 2022. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF: MAPA, 2022.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário da cachaça 2023**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: MAPA/AECS, 2024. 29 p.
- CAMPOS, C. R. *et al.* Features of *Saccharomyces cerevisiae* as a culture starter for the production of the distilled sugar cane beverage, cachaça in Brazil. **Journal of Applied Microbiology**, [Reino Unido], v. 108, n. 6, p. 1871–1879, June 2010. Disponível em: <https://enviromicro-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2672.2009.04587.x>. Acesso em: 28 maio 2024.
- CARDOSO, Maria das Graças. Compostos secundários da cachaça. *In*: CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora da UFLA, 2020. p. 27-60.
- CARDOSO, Maria das Graças *et al.* Volatil Compounds Formation in Cachaça. *In*: REIS, Felipe Richter; SANTOS, Caroline Mongruel Eleutério dos. **Volatil Compounds Formation in Specialty Beverages**. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 20-22.
- CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Variedades CTC**. CTC, 2024. Disponível em: <https://ctc.com.br/produtos/>. Acesso em: 16 jan. 2024.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Primeiro levantamento. Brasília: CONAB, 2024. 56 p. Disponível em: <https://www.conab.gov.br>. Acesso em: 04 ago. 2024.
- CORDENTE, Antonio G. *et al.* Harnessing yeast metabolism of aromatic amino acids for fermented beverage bioflavouring and bioproduction. **Applied Microbiology and Biotechnology**, [Toronto], v. 103, n. 11, p. 4325-4336, June 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31020380/>. Acesso em: 24 nov. 2022.

CRAVO, Francielli D'Carlos *et al.* Composition of Cachaças Produced from Five Varieties of Sugarcane and the Correlation of the Presence of Dhurrin in the Cane with That of Ethyl Carbamate in the Product. **American Journal of Plant Sciences**, [Esta], v. 10, n. 2, Feb. 2019. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=90780>. Acesso em: 21 nov. 2022.

D'AVILA, Gabriel Biscotto *et al.* Quantification of ethyl carbamate in cachaça produced in different agro-industrial production systems. **Journal of the Institute of Brewing**, [London], v. 122, p. 299–303, Apr. 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.322>. Acesso em: 07 jun. 2024.

DE SOUZA, Patterson P. *et al.* Brazilian cachaca: "Single shot" typification of fresh alembic and industrial samples via electrospray ionization mass spectrometry fingerprinting. **Food Chemistry**, [Barking], v. 115, n. 3, p. 1064-1068, Aug. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814608014787>. Acesso em: 23 jan. 2024.

DIAS, S. M. B. C.; MACHADO, A. M. R. Destilação. *In*: CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora da UFLA, 2020. p. 27-60.

DUARTE, Felipe Cimino *et al.* Brazilian organic sugarcane spirits: Physicochemical and chromatographic profile. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 2, p. 288–295, Apr. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/Tfz8DWmggrmv9TbmZVDVWMR/>. Acesso em: 12 jun. 2024.

DUARTE, W. F. *et al.* Alternativas do uso da cachaça no desenvolvimento de novos produtos. *In*: CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 27-60.

FERNANDES, Dirley. Cachaça: sempre ao lado do brasileiro. *In*: GERK, Andréia *et al.* **200 anos, 200 cachaças: A evolução da cachaça, da Independência até os dias de hoje, contada em 200 rótulos**. 1. ed. Campinas: PCN Comunicações, 2022.

FERNANDES, Oscar William Barbosa *et al.* Influence of harvest season and maturation of different sugarcane (*Saccharum* spp.) cultivars on the chemical composition of alembic Brazilian sugarcane spirit. **Open Access Library Journal**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 1-16, Jan. 2017. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=73483>. Acesso em: 04 jul. 2024.

FIGUEIREDO, Matheus Torres Duarte *et al.* Immobilization of anthocyanin in polymeric film to obtain a colorimetric sensor for detection of copper in Cachaça. **Food Analytical Methods**, [United States], v. 15, p. 3535–3553, Aug. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12161-022-02383-3>. Acesso em: 04 jun. 2024.

GOMES, F. C. O. *et al.* Use of selected indigenous *Saccharomyces cerevisiae* strains for the production of the traditional cachaça in Brazil. **Journal of Applied Microbiology**, [England], v. 103, n. 6, p. 2438–2447, Jan. 2009. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18045429/>. Acesso em: 01 jun. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CACHAÇA. **Mercado Externo**. IBRAC, 2022. Disponível em: <https://ibrac.net/servicos/mercado-externo>. Acesso em: 29 nov. 2022.

INSITUTO AGRONÔMICO. **Catálogo de variedades**. IAC, 2012. Disponível em: <https://socicana.com.br/wp-content/uploads/2012-10-31-08-38-CatalogodeVariedadesIAC.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2024.

LIMA, Annete de J. Boari *et al.* Efeito de substâncias empregadas para remoção de cobre sobre o teor de compostos secundários da cachaça. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 845–848, fev. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/smLsndD6NXFNrY8fDKPYVKv/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 04 jun. 2024.

LIMA, Clara Mariana Gonçalves *et al.* 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**, [United States], v. 106, Mar. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S088915752100538X>. Acesso em: 09 jun. 2024.

KEEPING, Malcolm G.; KVEDARAS, Olivia L.; BRUTON, Anthony G. Epidermal silicon in sugarcane: Cultivar differences and role in resistance to sugarcane borer *Eldana saccharina*. **Environmental and Experimental Botany**, [England], v. 66, n. 1, p. 54-60, Apr. 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098847208001706>. Acesso em: 26 jul. 2024.

MACHADO, Ana Maria de Resende *et al.* Contamination of cachaça by PAHs from storage containers. **Food Chemistry**, [Barking], v. 146, p. 65-70, Mar. 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24176314/>. Acesso em: 15 maio 2023.

MACHADO, Ana Maria de Resende *et al.* Determination of ethyl carbamate in cachaça produced from copper stills by HPLC. **Food Chemistry**, [Barking], v. 138, p. 1233-1238, June 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23411237/>. Acesso em: 15 maio 2023.

MAIA, Amazile Biagionei; MARINHO, Lorena Simão; NELSON, David Lee. Relevance of Ethyl Lactate Among The Cachaça Esters. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar**, [São Paulo], v. 2, n. 6, July 2021. Disponível em: <https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/467>. Acesso em: 07 maio 2024.

MARTINI, Cristina; MARGARIDO, Luiz Antonio Correia; CECCATO-ANTONINI, Sandra Regina. Microbiological and physicochemical evaluations of juice extracted from different parts of sugar cane stalks from three varieties cultivated under organic management. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 30, n. 3, Sept. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/47nLSDTq8L9jM5p9Qdtd3yt/>. Acesso em: 07 maio 2024.

MARTINS, Jairo História da Cachaça. *In*: GERK, Anrêia *et al.* **200 anos, 200 cachaças: A evolução da cachaça, da Independência até os dias de hoje, contada em 200 rótulos**. 1. ed. Campinas: PCN Comunicações, 2022.

- MASARIN, Fernando *et al.* Chemical composition and enzymatic digestibility of sugarcane clones selected for varied lignin content. **Biotechnol Biofuels**, [England], v. 4, n. 55, Dec. 2011. Disponível em: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/1754-6834-4-55>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- MASOABI, M. *et al.* Response of sugarcane plants with modified cytokinin homeostasis under water deficit conditions. **Plant Stress**, [Amsterdam], v. 10, n. 3, Sept. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667064X23001070>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- MASSON, José *et al.* Parâmetros físico-químicos e cromatográficos em aguardentes de cana queimada e não queimada. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1805–1810, dez. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/yxfdjgLCCK9G9tbVwHKKNGLq/>. Acesso em: 30 abr. 2024.
- MATTOS, Danilo Sidney; MARGARIDO, Luiz Antonio Correia; CECCATO-ANTONINI, Sandra Regina. Influence of sugarcane variety and management on the mineral composition of vinasse from alembic cachaça. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 40, n. 1, Dec. 2018. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/3032/303258327050/html/>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- MENDONÇA, João Guilherme Pereira *et al.* Determination of ethyl carbamate in cachaças produced by selected yeast and spontaneous fermentation. **Journal of the Institute of Brewing**, [London], v. 122, p. 63–68, Jan. 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.308>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- MENEVSEOGLU, Ahmed; CABAROGLU, Turgut. Evaluating the Chemical and Metal Contamination of Commercial Rakı, a Grape-Based Alcoholic Beverage from Turkey. **OENO One**, [Italy], v. 55 n. 3, p. 261-271, Apr. 2021. Disponível em: <https://oeno-one.eu/article/view/4669>. Acesso em: 04 jun. 2024.
- MIRANDA, Mariana Branco de *et al.* Qualidade química de cachaças e de aguardentes brasileiras. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 27, n. 4, p. 897–901, dez. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/9RDmfRP4xwDkDVfb6JXwVdy/>. Acesso em: 08 maio 2024.
- MORAES, Larissa Alexandra Cardoso; MOREIRA, Adônis; TSAI, Siu Mui. Estado nutricional e teor de glicosídeos cianogênicos em plantas de seringueira. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 2, p. 402-408, jan. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/9YDxnRVGd7XZhNhcJmRkXLd/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- MOTA, M. F. G. C.; MENDONÇA, H. A.; VEIGA, J. F. Equipamentos para produção e controle de operação da fábrica de cachaça. *In*: CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 27-60.

MURRAY, James A. H. *et al.* Systems Analysis of Shoot Apical Meristem Growth and Development: Integrating Hormonal and Mechanical Signaling. *The Plant Cell*, [United States], v. 24, n. 10, p. 3907–3919, Oct. 2012. Disponível em: <https://academic.oup.com/plcell/article/24/10/3907/6101541>. Acesso em: 06 jun. 2024.

NASCIMENTO, Ronaldo F. *et al.* Qualitative and quantitative high-performance liquid alcoholic beverages. *Journal of Chromatography A*, [Netherlands], v. 782, n. 1, p. 13–23, Oct. 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021967397004251>. Acesso em: 04 jul. 2023.

NEVES, Nathalia A. Chemical composition of jaboticaba (*Plinia jaboticaba*) liquors produced from cachaça and cereal alcohol. *LWT – Food Science and Technology*, [England], v. 155, n. 4, Dec. 2022. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/356845177\\_Chemical\\_composition\\_of\\_jaboticaba\\_Plinia\\_jaboticaba\\_liquors\\_produced\\_from\\_cachaca\\_and\\_cereal\\_alcohol](https://www.researchgate.net/publication/356845177_Chemical_composition_of_jaboticaba_Plinia_jaboticaba_liquors_produced_from_cachaca_and_cereal_alcohol). Acesso em: 29 nov. 2022

NUNES, Cleiton A. *et al.* Chemoface: a Novel Free User- Friendly Interface for Chemometrics. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, Campinas, v. 23, n. 11, p. 2003–2010, Nov. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbchs/a/XkQMMnpQZrBHMJr3XDtkwYQ/?lang=en>. Acesso em: 07 jun. 2022.

OECD. Safety assessment of transgenic organisms in the environment: OECD consensus documents. *In: Sugarcane (Saccharum spp)*. Paris: OECD, 2016. 326 p. Disponível em: [https://www.oecd-ilibrary.org/environment/safety-assessment-of-transgenic-organisms-in-the-environment-volume-6\\_9789264253421-en](https://www.oecd-ilibrary.org/environment/safety-assessment-of-transgenic-organisms-in-the-environment-volume-6_9789264253421-en). Acesso em: 14 jun. 2024.

OHIMAIN, Elijah Ige. Methanol contamination in traditionally fermented alcoholic beverages: the microbial dimension. *SpringerPlus*, [Germany], v. 5, n. 1, Sept. 2016. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5028366/>. Acesso em: 14 jun. 2024.

OLIVEIRA, Amanda Cristina Dias de; OLIVEIRA, Carlos Augusto Fernandes de; KAMIMURA, Eliana Setsuko. Microbial contamination in the ethanol and cachaça fermentation process: impacts and applications. *Food Science and Technology*, Campinas, v. 43, July 2023. Disponível em: <https://fstjournal.com.br/revista/article/view/102>. Acesso em: 04 abr. 2024.

OLIVEIRA, Evelyn Souza *et al.* The Production of Volatile Compounds by Yeasts Isolated from Small Brazilian cachaça distilleries. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, [Netherlands], v. 21, p. 1569–1576, Dec. 2005. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11274-005-7894-x>. Acesso em: 28 maio 2024.

OLIVEIRA, Renan Elan da Silva *et al.* Physicochemical parameters and volatile composition of cachaça produced in the state of Paraíba, Brasil. *Research, Society and Development*, [São Paulo], v. 9, n. 7, May 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4409>. Acesso em: 07 maio 2024.

PANERO, F. S. *et al.* Aplicação da análise exploratória de dados na discriminação geográfica do quiabo do Rio Grande do Norte e Pernambuco. **Eclética Química**, [São Paulo], v. 34, n. 3, p. 33–40, jan. 2009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/eq/a/fq6BRtVR5bcnSzzYCDF7NPn/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2024.

PEREIRA, Norma Eliane *et al.* Compostos Secundários em Cachaças Produzidas no Estado de Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 5, p. 1068–1075, out. 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/Tb5Z9DKNH5tYz7vTPytLtjc/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 maio 2024.

PIMENTEL, G. V.; ANDRADE, L. A. B. Cultura da cana-de-açúcar. *In*: CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 27-60.

PORTUGAL, Cauré B. *et al.* How native yeasts may influence the chemical profile of the Brazilian spirit, cachaça? **Food Research International**, [Ottawa], v. 91, p. 18-25, Jan. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996916305555>. Acesso em: 12 dez. 2022.

RATKOVICH, Nicolas *et al.* The Spirit of Cachaça Production: An Umbrella Review of Processes, Flavour, Contaminants and Quality Improvement. **Foods**, [Switzerland], v. 12, n. 17, Sept. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/17/3325>. Acesso em: 15 mar. 2024.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **RB867515**. RIDESA, 2024. Disponível em: <https://www.ridesaufscar.com.br/variedadesrb/rb867515>. Acesso em: 04 ago. 2024.

RODRIGUES, Leonardo Milani Avelar *et al.* Organic contaminants in distilled sugar cane spirits produced by column and copper alembic distillation. **Research, Society and Development**, [São Paulo], v. 9, 7, June 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/4879>. Acesso em: 15 mar. 2024.

SANTIAGO, Wilder Douglas. **Teores de carbamato de etila e composição fenólica no processo de produção e no envelhecimento de cachaça em tonéis de carvalho (*Quercus sp*) e amburana (*Amburana cearenses*)**. 2013. 168 p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SANTIAGO, Wilder Douglas; CARDOSO, Maria das Graças; NELSON, David Lee. Cachaça stored in casks newly constructed of oak (*Quercus sp.*), amburana (*Amburana cearensis*), jatoba (*Hymenaeae carbouril*), balsam (*Myroxylon peruiferum*) and peroba (*Paratecoma peroba*): alcohol content, phenol composition, colour intensity and dry extract. **Journal of the Institute of Brewing**, [London], v. 123, n. 2, p. 232-241, Apr. 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.414>. Acesso em: 13 mar. 2024.

SANTIAGO, Wilder Douglas *et al.* Multivariate analysis for the characterization of physico-chemical profiles of cachaça produced in copper stills over a period of six years in Minas Gerais state. **Journal of the Institute of Brewing**, [London], v. 121, n. 2, p. 244–250, Mar. 2015. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jib.216>. Acesso em: 29 maio 2024.

SCHWAN, Rosane Freitas; DIAS, D. R. **Fermentação**. In: CARDOSO, Maria das Graças. **Produção de Aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 27-60.

SILVA, João Henrique do Nascimento e *et al.* Monitoring the content of ethyl carbamate and copper in organic and conventional cachaça. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 77, n. 5, Jan. 2020a. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/XwcDLYDsNzWCYxsymq3VNSx/?lang=en>. Acesso em: 04 jun. 2024.

SILVA, João Henrique do Nascimento e *et al.* Volatile compounds in cachaças obtained from three sugarcane varieties cultivated under the managements: organic, conventional and without fertilization. **Química Nova**, Campinas, v. 43, n. 9, p. 1227-1233, Aug. 2020b. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/8ffqxHyWdYxkMwz9qg47kwj/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 05 nov. 2022.

SILVA, João Henrique do Nascimento e *et al.* Total nitrogen content and its influence on ethyl carbamate incidence in cachaça. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 79, n. 4, Jan. 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/NfqmSnLzfHrHdHGVmYT7M4K/abstract/?lang=en>. Acesso em: 05 nov. 2022.

TÁBUA, Manuel Carlos Minez *et al.* Physicochemical and Chromatographic Profiles of Distilled Sugarcane Spirits Produced in Mozambique. **American Journal of Plant Sciences**, [s.l.], v. 9, n. 4, Mar. 2018. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=82920>. Acesso em: 24 nov. 2022.

VILELA, Anderson Ferreira *et al.* Assessment of sensory and physical-chemical quality, and potential for certification of cachaças from the state of Paraíba, Brazil. **Food Science and Technology**, Campinas, v. 41, n. 3, p. 661–668, July/Sept. 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/YtPjqXwtRkLfnfD4ZtwWWSM/?lang=en>. Acesso em: 06 jun. 2024.

VILELA, Fernando José *et al.* Determinação das composições físico-químicas de cachaças do sul de Minas Gerais e de suas misturas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1089-1094, jul. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/L3nDDtTBxpsyCPxGpB3f7q/>. Acesso em: 15 fev. 2024

ZACARONI, Lidiany Mendonça *et al.* Caracterização e quantificação de contaminantes em aguardentes de cana. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 320-324, nov. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/bDJ4dpYdPTYNBmH5hrnqjrd/>. Acesso em: 22 nov. 2022.

ZHONG, Xianfeng *et al.* Reducing higher alcohols by nitrogen compensation during fermentation of Chinese rice wine. **Food Science and Biotechnology**, [s.l.], v. 29, n. 6, p. 805-816, June 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7256137/>. Acesso em: 22 nov. 2022.