



LUIZ DANIEL RODRIGUES DA SILVA

**DIVERSIFICAÇÃO VARIETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR E
SEU IMPACTO NOS PARÂMETROS AGRONÔMICOS E
FÍSICO-QUÍMICOS DA CACHAÇA DE ALAMBIQUE**

LAVRAS – MG

2024

LUIZ DANIEL RODRIGUES DA SILVA

**DIVERSIFICAÇÃO VARIETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEU IMPACTO
NOS PARÂMETROS AGRONÔMICOS E FÍSICO-QUÍMICOS DA CACHAÇA
DE ALAMBIQUE**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós Graduação em
Agronomia/Fitotecnia, área de
concentração em Produção Vegetal,
para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel
Orientador

Prof. Dr. Maria das Graças Cardoso
Coorientadora

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).

Silva, Luiz Daniel Rodrigues da.

Diversificação varietal da cana-de-açúcar e seu impacto nos
parâmetros agronômicos e físico-químicos da cachaça de alambique
/ Luiz Daniel Rodrigues da Silva. - 2024.

86 p. : il.

Orientador(a): Guilherme Vieira Pimentel.

Coorientador(a): Maria Das Graças Cardoso.

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

Bibliografia.

1. bebida destilada. 2. fermentação. 3. Saccharum spp. I.
Pimentel, Guilherme Vieira. II. Cardoso, Maria Das Graças. III.
Título.

LUIZ DANIEL RODRIGUES DA SILVA

**DIVERSIFICAÇÃO VARIETAL DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEU IMPACTO
NOS PARÂMETROS AGRONÔMICOS E FÍSICO-QUÍMICOS DA CACHAÇA
DE ALAMBIQUE**

**VARIETAL DIVERSIFICATION OF SUGARCANE AND ITS IMPACT ON
AGRONOMIC AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF POT STILL
CACHAÇA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Lavras,
como parte das exigências do
Programa de Pós Graduação em
Agronomia/Fitotecnia, área de
concentração em Produção Vegetal,
para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de Julho de 2024.
Dr. Luiz Antônio De Bastos Andrade
Dr. Maria das Graças Cardoso
Dr. Ana Maria De Resende Machado

UFLA
UFLA
CEFET-MG

Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel
Orientador

**LAVRAS – MG
2024**

*Aos meus pais pelo amor e incentivo a minha jornada
A minha mãe e meu pai, juntos, me ensinaram que na
simplicidade reside a alegria.*
Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, por sempre me guiar e proteger minha vida.

Ao meu pai, Luiz Antonio Rodrigues da Silva, o homem de grande coração. O homem de fé que tenho como exemplo, o trabalhador rural que sempre batalha com determinação para ver os filhos alcançarem seus sonhos.

A minha mãe, Izabel Maria da Cruz, que sempre me apoiou e encorajou frente a todos os desafios no âmbito profissional e pessoal. As intempéries da vida nunca foram barreiras para esta grande mãe levar seus filhos ao caminho da educação. A mulher que sempre cuida da família.

Ao professor e orientador Guilherme Vieira Pimentel, por guiar minha jornada acadêmica e proporcionar grandes aprendizados tanto no âmbito profissional quanto no pessoal.

A professora e coorientadora, Maria das Graças Cardoso, por todo apoio, carinho e paciência em guiar minha jornada de aprendizado no que tange o universo da cachaça.

Aos meus avôs, José Damião da Cruz e Maria de Lourdes dos Santos Cruz, pelas orações e apoio incondicional. Aos meus irmãos, Luis Ismael Rodrigues da Silva e Laiza Ester Maria Rodrigues da Silva, pelo apoio a minha trajetória acadêmica e amor incondicional.

A minha namorada, Mylena Costa da Silva, pelo amor e apoio em todas as ocasiões.

Aos amigos(as), José Manoel, Guilherme Holanda, Natália Costa, Maria Augusta, Amanda Chales e Elisabete Watanabe por todo apoio acadêmico e pessoal.

Ao NECANA e ao grupo AGROENERGIA, por todo apoio e espaço para o desenvolvimento desse trabalho e contribuições profissionais.

A Cachaçaria João Mendes e João Cassiano por abrirem as portas para apoiar o desenvolvimento desta pesquisa. Ao Sr. João Cassiano e Sr. Antonio Sales (Toninho) por transferirem de forma prática e conceitual seus conhecimentos sobre fermentação, destilação e as boas práticas na propriedade. Ao Sr. João Mendes, Otavio Alvarenga e o Sr. Simão Tavares pelos ensinamentos sobre a produção da cachaça.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelas oportunidades de aprendizado que foram essenciais para esta etapa de minha formação profissional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)
pelo apoio a realização do presente trabalho – Código de Financiamento 001.

Aos que contribuíram diretamente ou indiretamente para a realização deste sonho,

Obrigado a todos!

RESUMO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) desde o século XVI é um importante componente da economia brasileira, com produtos como a cachaça que apresenta grande impacto cultural, social e econômico. No entanto, a área destinada à produção de cachaça no Brasil é predominantemente cultivada com a variedade RB867515 e outras variedades muitas vezes desconhecidas pelos produtores. O uso recorrente da mesma variedade ou o desconhecimento sobre outras variedades ao longo das safras pode comprometer a produtividade e a longevidade dos canaviais. Portanto, objetivou-se avaliar os caracteres agronômicos e de rendimento de novas variedades de cana-de-açúcar, bem como a qualidade físico-química da cachaça de alambique produzida a partir destas, visando diversificar o plantel varietal das propriedades. O experimento foi implantado e conduzido na Cachaçaria João Mendes, Perdões-MG, sendo o processo fermentativo e a destilação realizada na Cachaçaria João Cassiano, Candeias-MG, na safra 2022/23. O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, sendo cinco variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB966928, RB036066, CTC9002 e CTC9003), com cinco repetições. Exclusivamente para análise de desenvolvimento biométrico das variedades o delineamento foi em esquema fatorial 5×5 , com cinco repetições. O fator adicional foi às cinco épocas de avaliação (90, 180, 240, 270 e 330 dias após o plantio (DAP)). Foram avaliadas características biométricas (altura de planta, diâmetro do colmo e número de perfilhos por metro) de forma periódica e, em consequência da colheita, os caracteres de produção e componentes tecnológicos: (sólidos solúveis totais (SST, °Brix), índice de maturação (IM), peso de dez colmos (P10C), toneladas de colmo por hectare (TCH), litros de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC) e litros de cachaça por tonelada (LCT)). Assim como, foram realizadas avaliações no mosto em fermentação (sólidos solúveis (°Brix), pH e isolamento de microorganismos (UFC/mL)) e as análises físico-químicas (grau alcoólico, exame organoléptico, acidez volátil, ésteres, aldeídos, álcoois superiores, furfural, metanol, álcool sec-butílico e n-butílico, carbamato de etila, acroleína e cobre) da cachaça oriunda de cada variedade. Portanto, foi possível identificar variedades de alto potencial produtivo de biomassa frente ao manejo agronômico e como o controle de qualidade do sistema de produção da cachaça de alambique influência em sua composição. Já a presença de compostos na bebida em concentrações benéficas ou maléficas a qualidade do produto é independente da variedade de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: bebida destilada; fermentação; produtividade; *Saccharum spp.*

ABSTRACT

Since the 16th century, sugar cane (*Saccharum* spp.) has been an important component of the Brazilian economy, with products such as cachaça having a great cultural, social and economic impact. However, the area destined for cachaça production in Brazil is predominantly cultivated with the RB867515 variety and other varieties that are often unknown to producers. The recurring use of the same variety or lack of knowledge about other varieties throughout the harvest can compromise the productivity and longevity of sugarcane fields. Therefore, the objective was to evaluate the agronomic and yield characteristics of new sugarcane varieties, as well as the physical-chemical quality of the still cachaça produced from them, aiming to diversify the properties' varietal stock. The experiment was implemented and conducted at Cachaçaria João Mendes, Perdões-MG, with the fermentation process and distillation carried out at Cachaçaria João Cassiano, Candeias-MG, in the 2022/23 harvest. The experimental design used was randomized blocks, with five varieties of sugar cane (RB867515, RB966928, RB036066, CTC9002 and CTC9003), with five replications. Exclusively for analyzing the biometric development of the varieties, the design was in a 5×5 factorial scheme, with five replications. The additional factor was the five evaluation times (90, 180, 240, 270 and 330 days after planting (DAP)). Biometric characteristics (plant height, stem diameter and number of tillers per meter) were periodically evaluated and, as a result of harvesting, production characteristics and technological components were evaluated: (total soluble solids (TSS, °Brix), maturation index (MI), weight of ten stalks (P10C), tons of stalks per hectare (TSH), liters of juice from ten stalks (L10C), expected yield of cachaça (YEC) and liters of cachaça per ton (LCT)). Likewise, evaluations were carried out on the fermenting must (soluble solids (°Brix), pH and isolation of microorganisms (CFU/mL)) and physical-chemical analyzes (alcoholic level, organoleptic examination, volatile acidity, esters, aldehydes, higher alcohols, furfural, methanol, sec-butyl and n-butyl alcohol, ethyl carbamate, acrolein and copper) from the cachaça originating from each variety. Therefore, it was possible to identify varieties with high biomass production potential in the face of agronomic management and how the quality control of the still cachaça production system influences its composition. The presence of compounds in the beverage in concentrations that are beneficial or harmful to the quality of the product is independent of the sugarcane variety.

Keywords: Distilled beverage; fermentation; productivity; *Saccharum* spp.

INDICADORES DE IMPACTO

A cachaça é um produto brasileiro derivado exclusivamente e integralmente de alambique de cobre e obtido por destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar crua. Tradicionalmente, a predominância da variedade RB867515 nas propriedades de cachaça de alambique levantou preocupações sobre a sustentabilidade agrônômica e a qualidade do produto final. A pesquisa realizada na safra 2022/23 na Cachaçaria João Mendes, em Perdões-MG, em conjunto com a Cachaçaria João Cassiano, em Candeias-MG, teve como objetivo avaliar os impactos da introdução de novas variedades de cana-de-açúcar sobre as características físico-químicas da cachaça. Observou-se que as novas variedades, como RB036066 e CTC9002, demonstraram desempenho diferenciado em relação à RB867515, com potencial para melhorias na produtividade do canavial. As variedades estudadas produziram cachaças que atendem aos padrões legais dos componentes analisados, demonstrando a viabilidade da diversificação sem comprometer a conformidade com as normativas. Portanto, este trabalho demonstra uma abordagem abrangente que impacta várias áreas. Socialmente, o estudo promove a capacitação dos produtores ao introduzir novas variedades de cana-de-açúcar no mercado, facilitando a inclusão de diferentes tipos de cachaça e aprimorando o conhecimento dos agricultores. Tecnicamente, traz avanços nas práticas de cultivo e na produção de cachaça, com foco em novas técnicas que melhoram a qualidade e eficiência do processo. Economicamente, o aumento da produtividade das variedades estudadas potencializa a valorização do produto, contribuindo para um crescimento significativo na rentabilidade. Culturalmente, o trabalho destaca a importância da cachaça como um elemento fundamental da cultura brasileira, ajudando a preservar e valorizar esta tradição. Assim, o estudo não só melhora a produção e qualidade da cachaça, mas também oferece benefícios amplos para a economia e cultura do Brasil. No que se refere a áreas temáticas da Política Nacional de Extensão a pesquisa está elencada: a cultura, devido ao impacto cultural da cachaça, um produto tradicional brasileiro; a tecnologia e produção, por causa da avaliação de diferentes variedades de cana-de-açúcar para melhorar a produtividade e a qualidade da cachaça; e ao meio ambiente, devido à escolha das variedades de cana-de-açúcar e o manejo agrônômico eficiente proporcionarem sustentabilidade da produção de cachaça. Além disso, a pesquisa contribui para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU: promove a sustentabilidade agrônômica (ODS 2) ao incentivar a diversificação genética e a eficiência na produção de cana-de-açúcar; impulsiona o crescimento econômico (ODS 8) ao melhorar a competitividade da cachaça no mercado global; destaca a inovação tecnológica e o aprimoramento do sistema de produção (ODS 9); e promove práticas responsáveis que maximizam a qualidade e a conformidade do produto (ODS 12). Por fim, incentiva o manejo sustentável dos recursos naturais e a preservação da biodiversidade (ODS 15). Logo, os resultados deste estudo destacam a importância da pesquisa contínua e da inovação no setor para garantir a competitividade e a excelência da cachaça no mercado global. Assim como, esta pesquisa retorna para a sociedade informações técnico-científica sobre a importância do aprimoramento do sistema de produção da cachaça e cumpre com o investimento dos órgãos de fomento.

IMPACT INDICATORS

Cachaça is a Brazilian product derived exclusively and entirely from copper stills and obtained by distilling the fermented must of raw sugarcane juice. Traditionally, the predominance of the RB867515 variety in still cachaça properties has raised concerns about agronomic sustainability and the quality of the final product. The research carried out in the 2022/23 harvest at Cachaçaria João Mendes, in Perdões-MG, in conjunction with Cachaçaria João Cassiano, in Candeias-MG, aimed to evaluate the impacts of the introduction of new sugarcane varieties on the physical-chemical characteristics of cachaça. It was observed that the new varieties, such as RB036066 and CTC9002, demonstrated differentiated performance in relation to RB867515, with potential for improvements in sugarcane productivity. The varieties studied produced cachaças that meet the legal standards for the components analyzed, demonstrating the viability of diversification without compromising compliance with regulations. Therefore, this work demonstrates a comprehensive approach that impacts several areas. Socially, the study promotes the training of producers by introducing new sugarcane varieties to the market, facilitating the inclusion of different types of cachaça and improving the knowledge of farmers. Technologically, it brings advances in cultivation practices and cachaça production, focusing on new techniques that improve the quality and efficiency of the process. Economically, the increased productivity of the varieties studied enhances the value of the product, contributing to a significant increase in profitability. Culturally, the work highlights the importance of cachaça as a fundamental element of Brazilian culture, helping to preserve and value this tradition. Thus, the study not only improves the production and quality of cachaça, but also offers broad benefits to the economy and culture of Brazil. Regarding the thematic areas of the National Extension Policy, the research is listed: culture, due to the cultural impact of cachaça, a traditional Brazilian product; technology and production, due to the evaluation of different varieties of sugarcane to improve the productivity and quality of cachaça; and the environment, due to the choice of sugarcane varieties and efficient agronomic management providing sustainability for cachaça production. In addition, the research contributes to several UN Sustainable Development Goals (SDGs): it promotes agronomic sustainability (SDG 2) by encouraging genetic diversification and efficiency in sugarcane production; it drives economic growth (SDG 8) by improving the competitiveness of cachaça in the global market; it highlights technological innovation and the improvement of the production system (SDG 9); and it promotes responsible practices that maximize product quality and conformity (SDG 12). Finally, it encourages the sustainable management of natural resources and the preservation of biodiversity (SDG 15). Therefore, the results of this study highlight the importance of continuous research and innovation in the sector to ensure the competitiveness and excellence of cachaça in the global market. In addition, this research provides society with technical and scientific information on the importance of improving the cachaça production system and complies with the investment of development agencies.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	14
1	INTRODUÇÃO GERAL	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Culturas da cana-de-açúcar	18
2.1.1	Botânica e fenologia	19
2.1.2	Ecofisiologia	20
2.1.3.	Censo varietal de cana-de-açúcar	22
2.1.4.	Características das variedades utilizadas	24
2.2	A Cachaça: História	24
2.2.1	Sistema de produção da cachaça	26
2.2.2	Limites componentes e contaminantes da cachaça	31
	REFERÊNCIAS	33
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	38
	ARTIGO 1 - CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA E RENDIMENTO DE CACHAÇA DE VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR	37
1	INTRODUÇÃO	38
2	MATERIAL E MÉTODOS	39
2.1	Local do experimento	39
2.2	Delineamento e condução experimental	39
2.3	Caracteres agronômicos e componentes tecnológicos da cana-de-açúcar..	41
2.4	Análises estatísticas	42
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
2.5.1	Análise de variância (ANOVA) das características biométricos	43
2.5.2	Número de plantas por metro (NPM)	44
2.5.3	Altura de plantas (AP) e Diâmetro do colmo (DC)	45
2.5.4	Análise de variância (ANOVA) das características de produção	48
2.5.5	Sólidos solúveis totais (SST, °Brix)	49
2.5.6	Peso de dez colmos (P10C) e toneladas de colmos (TCH)	50
2.5.7	Litro de caldo dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça e litros de cachaça por hectare (LCH)	51
3	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	54

	ARTIGO 2 - COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CACHAÇA DE ALAMBIQUE EM VIRTUDE DAS VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	60
1	INTRODUÇÃO	61
2	MATERIAL E MÉTODOS	62
2.1	Local do experimento	62
2.2	Delineamento e condução experimental	62
2.3	Preparação do mosto e das leveduras	62
2.4	Processo de fermentação	63
2.5	Processo de destilação	63
2.6	Características avaliadas do mosto em fermentação e da cachaça	64
2.7	Análises estatísticas.....	64
2.8	RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
2.8.1	Características do mosto em fermentação	65
2.8.2	Características físico-químicas da cachaça (qualidade).....	69
2.8.3	Características físico-químicas da cachaça (contaminantes).....	75
3	CONCLUSÃO.....	80
	REFERÊNCIAS	81
	ANEXO A	86

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) desde o século XVI até os dias atuais tem sido um importante componente da economia brasileira, sendo o país o maior produtor mundial. A produtividade média nacional da cana-de-açúcar é de 85,5 t ha⁻¹ em uma área cultivada de 8333,9 mil ha⁻¹ (CONAB, 2024). A área cultivada no Brasil para região Norte/Nordeste e Centro-Sul, respectivamente, está em torno de 931,9 e 7402,0 mil ha⁻¹. Os três principais estados em área cultivada são São Paulo, Alagoas e o Góias, respectivamente, com 4091, 2298,7 e 954,8 mil ha⁻¹ (CONAB, 2024).

A cultura se destaca entre os setores da economia brasileira, devido ser matéria-prima para a produção de etanol hidratado/anidro, açúcar e energia elétrica nas usinas sucroenergéticas, forragem e cachaça (KLEIN *et al.*, 2019), destacando está na contribuição com o setor alimentício e turístico, com isso a cultura garante a rentabilidade e competitividade econômica a nível mundial (DANTAS; ALVES, 2020; MORAIS *et al.*, 2020; VALÉRIO, 2021).

A cachaça é uma bebida com grande impacto cultural, social e econômico na sociedade brasileira. O setor da cachaça movimenta anualmente valores próximos de sete bilhões de reais, sendo este responsável pela geração média de 600 mil empregos diretos e indiretos (RODRIGUES *et al.*, 2019). A sua produção é disseminada em todos os estados da federação, com destaque para São Paulo, Pernambuco e Ceará, produtores de cachaça industrial, e Minas Gerais, Paraíba, Bahia e Rio de Janeiro, produtores de cachaça de alambique (IBRAC, 2021; RODRIGUES *et al.*, 2019).

O Estado de Minas Gerais é o principal produtor da cachaça de alambique de cobre, responsável por 50% da produção nacional, e geração de renda das pequenas e médias propriedades (SYLVIO *et al.*, 2021). As cachaçarias brasileiras se concentram na região sudeste com 66,2% do total no país, sendo 620 cachaçarias (BRASIL, 2022). Nas demais regiões do país, temos 138 cachaçarias localizadas no Sul (14,7%), 130 cachaçarias na região Nordeste (13,9%), 39 cachaçarias na região Centro-Oeste (4,2%) e 09 cachaçarias na região Norte (1,0%) do país (BRASIL, 2022). E em 2021, 609 municípios brasileiros possuem pelo menos 1 cachaçaria registrada sendo Salinas-MG a cidade com maior número de cachaçarias, com 16 estabelecimentos seguido pela cidade de Alto Rio Doce-MG e Areia-PB que aparecem empatados na segunda posição, com 11 estabelecimentos cada (BRASIL, 2022).

Dessa forma, as características desejadas na cana-de-açúcar para a produção de cachaça englobam o alto rendimento de colmos, teor de fibra médio/baixo, alto teor de

sacarose, resistência as principais pragas e doenças, fácil despalha e período de utilização industrial longo (PIMENTEL; ANDRADE, 2020). Assim, a escolha de variedades adaptadas às condições edafoclimáticas de cultivo é primordial para formar o canavial ideal. No entanto, a escassez de informação técnica e científica sobre as variedades com maior rendimento agrônômico para a produção de cachaça, torna a atividade ainda limitada.

O plantel varietal dos engenhos de cachaça no território brasileiro geralmente é constituído predominantemente pela RB867515 e outras variedades muitas vezes desconhecidas pelos produtores, porém a utilização recorrente da mesma variedade e de materiais de genética desconhecida ao longo das safras pode comprometer a produtividade e longevidade do canavial (PIMENTEL; ANDRADE, 2020). Esse fica vulnerável as condições impostas por fatores bióticos e abióticos, respectivamente, perdendo capacidade produtiva devido às moléstias que assolam a cultura e a inserção da variedade em ambientes distintos de suas exigências (SANCHES *et al.*, 2019; CURSI *et al.*, 2021). Dessa forma, ressalta-se a importância de buscar por novos materiais com intuito de diversificar o plantel e garantir à longevidade do canavial destinado a produção de cachaça.

As informações na literatura para a produção desta bebida geralmente estão restritas aos processos fermentativos da matéria-prima, fato este justificado pela gama de investigações realizadas com foco na qualidade do caldo (BORTOLETTO *et al.*, 2015; RIBEIRO *et al.*, 2017; MUTTON *et al.*, 2020) e leveduras fermentativas (PORTUGAL *et al.*, 2017; MOURA *et al.*, 2020; STEFENON *et al.*, 2021). Entretanto, as considerações a nível agrícola dos canaviais destinados à produção de cachaça de alambique detém escassez de informações, principalmente quando se refere ao rendimento biométrico das variedades, associado à composição de suas respectivas cachaças em diferentes ambientes de cultivo, aspecto este essencial para o planejamento de implantação do canavial de grande rentabilidade.

E se tratando da qualidade da bebida, os compostos que compõem a cachaça dependem da matéria prima, fermentação, destilação, envelhecimento e tipos de madeiras usadas para armazenamento, sendo estes fatores preponderantes para modificarem o aroma e sabor (CAPOBIANGO *et al.*, 2012). Os destilados são caracterizados pela presença de compostos como metanol, ácidos orgânicos, aldeídos (incluindo furfural), ésteres, acidez volátil e álcoois superiores (BORTOLETTO *et al.*, 2016). Além disso, possuem compostos inorgânicos como o cobre, ferro e manganês (PENTEADO *et al.*, 2009).

Portanto, como a demanda do consumidor por bebida de qualidade está sendo cada vez mais observado, o produto deve apresentar baixa acidez, aldeídos, furfural, entre outros

compostos que possam prejudicar a saúde humana e os aspectos organolépticos da bebida (SILVA *et al.*, 2020b). Dessa forma, destaca-se a importância de realizar pesquisas com intuito de buscar pelas variedades com alto desempenho agrônômico e dentro dos parâmetros analíticos de qualidade da cachaça, avaliando desde o campo até as etapas laboratoriais de extração do caldo e análises físico-químicas da cachaça.

As hipóteses baseiam-se no fato de que pode haver diferenças no potencial produtivo e na qualidade da cachaça em relação às variedades cultivadas. Portanto, contribuindo para a expansão das variedades para uso nas cachaçarias e que podem ser futuramente a opção no plantel de variedades indicadas para a macrorregião. Com base nisso, objetivou-se avaliar os caracteres agrônômicos e de rendimento de novas variedades de cana-de-açúcar, bem como a qualidade físico-química da cachaça de alambique produzida a partir destas, visando diversificar o plantel varietal das propriedades.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) pertence à família Poaceae e classe Monocotilédone, enquanto que a classificação das espécies varia, entretanto ressalta-se que *Saccharum* cultivada em escala comercial compreende quatro espécies domesticadas e duas selvagens. Sendo elas *Saccharum officinarum* L., classificada como cana nobre (elevado teor de sacarose) de Nova Guiné, sendo a única espécie com aceitação contínua desde a descrição, *Saccharum sinense* Roxb., da China, *Saccharum barberi* Jeswiet, da Índia, *Saccharum edule* Hassk., restrito principalmente à Melanésia, a espécie selvagem *Saccharum spontaneum* L., e a segunda espécie selvagem, *Saccharum robustum* Jeswiet and Brandes que é restrito à Melanésia e partes da Indonésia (Moore; Maretzki, 1996).

A cana-de-açúcar, juntamente com soja, milho e arroz, dominam o cenário das grandes culturas, pois segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, a produção anual é de 1,92 bilhões de toneladas em uma área de 27 milhões de hectares (ha), estando distribuída em mais de 100 países (Fao, 2022). No ano de 2022, a produção global de cana-de-açúcar mostrou-se com valores mais altos no Brasil (722 mil ton), Índia (439 mi ton), China (103 mi ton) e Tailândia (92 mil ton) e no Paquistão (87 mil ton), correspondendo, respetivamente, a 37,7%, 22,9%, 5,4%, 4,8% e a 4,6% da produção de cana-de-açúcar do mundo (Fao, 2024). Apesar da grande produção brasileira as florestas nativas são preservadas, pois mesmo o Centro-Sul sendo o coração da produção e da indústria canavieira brasileira, a área total de cultivo corresponde a menos de 1% do território nacional (Unica, 2020).

O cultivo da cana-de-açúcar compreende um dos casos de maior sucesso da biorrefinaria, devido ao açúcar, etanol e bioeletricidade (Nguyen *et al.*, 2017). Assim como, ocorre à produção de outros bioprodutos, como o melaço, vinhaça e biogás, ampliando a gama de produtos, porém garantido a sustentabilidade ambiental e econômica das unidades produtoras (Oliveira *et al.*, 2018).

Além disso, tem-se a cachaça que é provavelmente conhecida mundialmente através da famosa bebida brasileira chamada caipirinha, pois usa esta bebida destilada da cana-de-açúcar como seu principal componente, combinado com outros produtos, com isso destaca-se que a cachaça é uma bebida típica brasileira nascida no período

colonial (1530-1815) de grande importância econômica para o Brasil (Neutzling *et al.*, 2015).

2.1.1 Botânica e fenologia

A cana-de-açúcar detém aparato fotossintético C4 com adaptação a distintas condições edafoclimáticas, pois a flexibilidade entre os subtipos fotossintéticos C4 NADP-enzima málica e a fosfoenolpiruvato carboxiquinase, confere alta eficiência fotossintética sob diferentes condições de luz (Marin; Nassif, 2013; Sales *et al.*, 2018). A emergência desta cultura inicia-se com o aparecimento das raízes e parte aérea do tolete aos 20 a 30 dias após o plantio, sendo um processo fisiológico de ramificação subterrânea contínua das partes nodais compactadas ao broto primário (Diola; Santos, 2010).

O perfilhamento ocorre a partir do colmo primário brotado, sendo essa fase é caracterizada pela formação de perfilhos primários, secundários e terciários, com a emissão das raízes começa a utilização dos nutrientes do solo (Silva *et al.*, 2004; Magro *et al.*, 2011), e devido à existência dos perfilhos, ocorre a formação de touceira (Castro; Christofolletti, 2005). A parte aérea é constituída por nós e entrenós, onde está localizada a inserção foliar, as suas folhas são completas, compostas por bainha, colar e lâmina foliar, apresentando inserção alternada no colmo (Scarpari; Beauclair, 2008; Marafon, 2012).

O primeiro estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar é a brotação, seguida da emergência, perfilhamento, crescimento da parte aérea e maturação. O crescimento da parte aérea é impulsionado por fatores ambientais como a alta luminosidade, umidade e temperatura, e com o desenvolvimento em altura, começa o armazenamento de sacarose na base do colmo, as raízes tornam-se mais volumosas, além disso, ressaltam-se que ao receber altas temperaturas (20-35°C), os colmos poderão ser mais grossos, as folhas serão mais longas e o perfilhamento será mais intenso (Batista, 2013; Manhães *et al.*, 2015).

Com relação à fase de maturação, apresenta-se como a última antes da colheita, inicia aos 270 dias após o plantio ou corte (DAP/DAC), sendo esta responsável pela intensa formação de sacarose nas folhas através da fotossíntese para transferência e acúmulo nos colmos, especificamente das células parenquimáticas (Sanghera *et al.*, 2019; Watt *et al.*, 2014).

2.1.2 Ecofisiologia

Os condicionantes climáticos possuem efeito sobre o comportamento fisiológico da cana-de-açúcar; assim, são vários os fatores que podem influenciar a brotação e o perfilhamento, sendo eles: fatores ambientais (luminosidade, temperatura, e umidade do ar e do solo); genéticos e fisiológicos (genótipo e idade); e fitotécnicos (práticas agrícolas realizadas no campo) (Manhães et al., 2015).

Com relação à temperatura necessária para o desenvolvimento da cultura, tem-se uma diferenciação de acordo com o genótipo e os zoneamentos agrícolas, sob limite mínimo de temperatura entre 19 a 21°C para ciclo da cultura (Morais, 2015). Dessa forma, as tardias são menos sensíveis à baixa temperatura do ar e continuam seu crescimento por períodos mais longos, com retardo de seu amadurecimento (Amaral et al., 2019). E a necessidade hídrica da cana-de-açúcar varia entre 1100 a 1500 milímetros (Diolo; Santos, 2010).

No Centro-sul do Brasil a necessidade hídrica é de 137 m³ t⁻¹ de cana, variando de 124 m³ t⁻¹ no estado de São Paulo a 170 m³ t⁻¹ no Paraná (Hernandes et al., 2014). Dessa forma, ressalta-se que as variações no consumo de água são provavelmente devido à evapotranspiração da cultura em relação ao clima e ao potencial produtivo, variando com as condições edafoclimáticas e o manejo (Bordonal et al., 2018). Com a irrigação plena e suplementar, ocorre a redução do déficit hídrico no período crítico do ciclo da cultura e são estratégias importantes para aumentar a produção de biomassa (Marin et al., 2016).

A radiação solar é primordial para o desenvolvimento da cana (18 a 36 MJ m⁻² dia⁻¹), sendo a duração e intensidade do brilho solar fundamentais no perfilhamento, assim como para o alongamento dos colmos sob fotoperíodo entre 10 e 14 horas (Vianna, 2014). Os valores de eficiência conversão de energia real tanto para cana-planta quanto cana-soca pode ser inferior aos valores teóricos para as espécies C4. Nesse contexto, a radiação solar influencia a fotossíntese que favorece a produção de biomassa da cana-de-açúcar (Silva et al., 2014).

Na fase de maturação o ideal é que as condições ambientais favoreçam o acúmulo de sacarose em detrimento do crescimento vegetativo, sendo os principais fatores a redução de temperatura e restrição hídrica na região Centro-Sul (Pimentel; Andrade, 2020). Portanto, estes fatores associados à época de colheita (safra) e o trabalho de um alambique de abril a novembro no Centro-Sul, é necessário que o

produtor tenha variedades de maturação precoce (aquelas com maturação no início da safra, ou seja, maio/junho), média (aquelas com maturação no meio da safra, ou seja, Julho/agosto/setembro) e tardia (aquelas com maturação no fim da safra, ou seja, outubro/novembro) (Pimentel; Andrade, 2020).

A qualidade da matéria-prima é determinada por suas características químicas-tecnológicas, como o teor de sólidos solúveis (Brix); pureza; teor de sacarose "aparente" (Pol); teor de açúcares totais e fibra. Essas características são usadas para atender às necessidades da indústria durante o processamento. Há quatro elementos que impactam a qualidade da cana-de-açúcar. Eles são a maturação dos colmos; o teor de impurezas (minerais e vegetais); a deterioração que altera os parâmetros de qualidade, o planejamento da lavoura e a interação com a indústria (Silva et al., 2015).

A maturação da cana tem três aspectos diferentes: botânico (a cana só é considerada madura após a emissão de flores e a formação de sementes), fisiológico (a maturação ocorre quando o colmo atinge seu nível máximo de armazenamento de açúcar (sacarose), independentemente do teor atingido, e econômico (quando a cana atinge o teor mínimo de sacarose de 13% do peso do colmo). A maturação é influenciada por uma série de fatores, que podem ser naturais ou artificiais, pois é um processo fisiológico (Silva et al., 2015). A variedade, os tratos culturais, o solo e o clima estão entre os fatores naturais mais notáveis.

No Brasil, a safra dura cerca de sete meses. A safra no Centro-Sul do país começa em abril a maio e termina em novembro a dezembro. A safra no Nordeste ocorre de setembro a março. Mas esse tempo pode começar antes ou depois do estabelecimento, dependendo das demandas da empresa e/ou da disponibilidade de matéria-prima (Silva et al., 2015). Como resultado, é necessário utilizar variedades que atinjam um nível de maturação ideal para industrialização em diferentes épocas do ano. Para começar a safra, geralmente são usadas variedades precoces (cultivadas em 20% a 25% da área a ser colhida), enquanto as variedades de maturação média (cultivadas em 60% a 70% da área a ser colhida); e, para o fim da safra, variedades tardias (10% a 15% da área a ser colhida) (Silva et al., 2015).

As variedades de cana comportam-se diferentemente em sua capacidade de produzir açúcar, Segalla (1961) categoriza as variedades de cana em relação à sua capacidade de produzir açúcar em três tipos: variedades ricas (quando o teor de sacarose na cana é maior que 14% e a pureza do caldo é maior que 85%), variedades médias (quando o teor de sacarose na cana é entre 12,5% e 14% e a pureza do caldo é maior que

82%) e variedades pobres (quando o teor de sacarose na cana é menor que 12,5% e a pureza do caldo menor que 82%). Com o objetivo de fornecer a indústria com matérias-primas de alta qualidade, devem-se conhecer as curvas de maturação das variedades utilizadas.

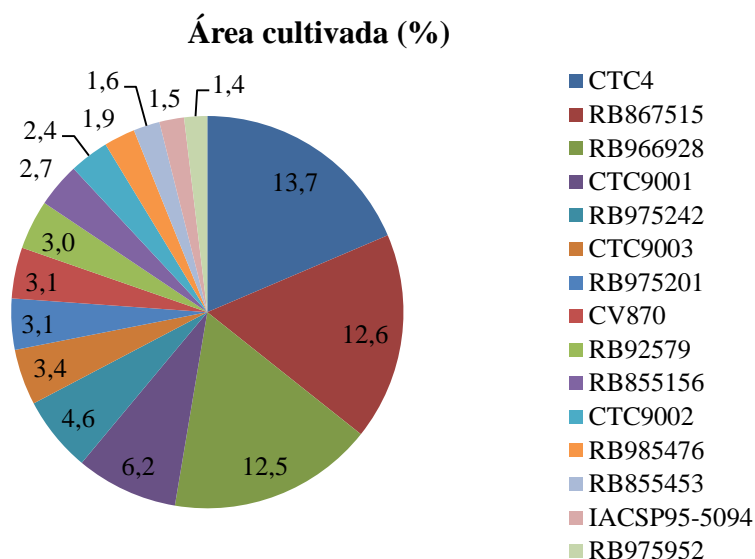
O primeiro pesquisador a estudar as curvas de maturação no Brasil foi Brieger (1968), que estabeleceu as linhas de base para a caracterização do período útil de industrialização (PUI). O PUI foi estabelecido para valores de sacarose na cana (sacarose - Pol), compreendidos entre 13% e 16%. O valor 13% corresponde à linha de base, e, somente após a cana ultrapassar esse valor, é que se deve iniciar o corte. Embora certas variedades possam não atingir o limite superior a 16%, isso serve como referência na seleção das variedades e para determinar quando a maturação da cana está declinando (Silva et al., 2003).

Uma das principais responsabilidades na gestão de uma usina é a condução do manejo das variedades. Esta prática envolve a substituição de variedades por outras mais adequadas, produtivas e com melhores características tecnológicas, o que pode resultar em ganhos significativos. Os programas de melhoramento da cana-de-açúcar têm desenvolvido genótipos excelentes, os quais, quando manejados e cultivados de maneira adequada, buscam aumentos contínuos na produtividade e no teor de sacarose (Silva et al., 2015).

2.1.3 Censo varietal de cana-de-açúcar

De acordo com Censo Varietal do Instituto Agrônomo de Campinas para a safra 2023/24 as quinze variedades mais cultivadas nos estados que compõem a produção canavieira na região Centro-Sul, foram a CTC4, RB867515, RB966928, CTC9001, RB975242, CTC9003, RB975201, CV870, RB92579, RB855156, CTC9002, RB985476, RB855453, IACSP95-5094 e RB975952 (Braga Junior, 2023) (Figura 1).

Figura 1 - Porcentagem de área cultivada por variedades na região Centro-Sul do Brasil na Safra 2023/24



Fonte: Braga Junior (2023)

Dessa forma, ressalta-se que foram levantadas informações sobre as variedades cultivadas em 228 unidades produtoras (74% da área de cana-de-açúcar da região), sendo as quatro variedades responsáveis por metade da área cultivada entre os produtores da região Centro-Sul, pela ordem, CTC4, RB867515, RB966928, CTC9001 e RB975242 (Braga Junior, 2023). Com relação às variedades com maior área plantada, na safra 2022/23, destacam-se: RB966928 (10,4%), RB867515 (10,3%), CTC4 (9,3%) e RB975242 (7,9%). Para as novas variedades destacam-se a IACSP01-5503, RB127825, IACCTC07-8008 com maior plantio e colheita de ano e meio (BRAGA JUNIOR, 2023).

Com relação, ao plantio de variedades nas propriedades de cachaça de alambique no estado de Minas Gerais, a ocupação de área agrícola com o canavial esta 38% em 5,0 hectares, 46% entre 5-10 hectares, 8% entre 11-20 hectares e 4% em áreas tanto de 31-40 hectares quanto de 51-100 hectares (Alvarenga, 2024). Com relação às variedades cultivadas nessas áreas, destacou-se a variedade RB867515 com 37% de plantio, seguida de 12% tanto de espécies desconhecidas quanto com a variedade SP80-3280, com até 5% as variedades SP80-1816, RB92579, CTC11 e Cana Java (Alvarenga, 2024). Além disso, é possível notar uma resistência do produtor de cachaça em diversificar o painel varietal, pois 72% não tem interesse em fazer o plantio de novas variedades em sua propriedade, seguido de 8% que tem interesse em diversificar as variedades (Alvarenga, 2024).

2.1.4 Características das variedades utilizadas

A RB867515 como aspectos gerais abrange desenvolvimento rápido, média despalha, diâmetro de colmo médio de cor verde-arroxeadada, as suas recomendações de manejo estão baseadas em ambientes de média a baixa fertilidade natural, com programação de colheita em meados de julho até setembro (maturação média a tardia), além disso, destaca-se com o alto teor de sacarose, alta produtividade agrícola e apresentando boa brotação na planta e socas (Ridesa, 2021). Assim como, a classificação de cana-de-açúcar quanto a sua maturação (precoce, média e tardia) se refere à época de plantio descrita como ‘cana de ano e meio’. A RB966928 possui excelente brotação em cana-planta, muito boa em soqueiras, elevado perfilhamento em cana-planta e soca, sendo a produção agrícola alta, PUI médio e maturação precoce (abril a junho), requer ambientes de médio a alto potencial, com colheita no início e meio de safra (Ridesa, 2021).

A RB036066 apresenta ótima brotação e perfilhamento em cana-planta e soca, com alta produção agrícola, maturação média a tardia (junho a setembro) e PUI longo, se indicada para ambientes de médio a alta fertilidade, sendo a colheita de junho a setembro (Ridesa, 2021). A CTC9003 mostra alto perfilhamento, apta ao plantio mecanizado, precoce e não floresce, com período útil de industrialização longo (PUI – abril a setembro) e a CTC9002 apresenta maturação média a tardia, PUI longo (junho a setembro), porte ereta, tolerante a seca e ideal para solos de baixa capacidade produtiva, tem alta produtividade e excelente rebrota, inclusive em cana crua (Ctc, 2023).

2.2 A cachaça: história

No início da história do Brasil, a cana-de-açúcar começava a ter o seu valor de exploração, sendo utilizada para a fabricação do açúcar, que outrora proporcionou também à cachaça que aos poucos foi mudando o cenário do país, passando por diversas classes sociais da população brasileira desde sua descoberta. Inicialmente apreciada apenas pelos afrodescendentes, aos poucos foi se popularizando, e durante sua história ganhou espaço nos aspectos culturais, econômicos e sociais que a circunda, quebrando preconceitos e paradigmas, porém esta bebida nacional ainda enfrenta desafios em seu processo de produção (Braga *et al.*, 2015).

A cachaça é a denominação típica e exclusiva de produção brasileira, com grau alcoólico entre 38 e 48% v/v do volume, a 20°C, obtida por destilação de mosto fermentado de cana-de-açúcar crua, podendo ser adicionada de açúcares (Brasil, 2022). Esta é um ícone brasileiro produzido pela fermentação do caldo de cana com posterior destilação em alambique de cobre ou coluna de aço inox. A sua produção atualmente esta por volta de 800 milhões de litros e que o setor gera mais de 600 mil empregos (Ibrac, 2021).

A Colômbia, em 2012, se tornou o primeiro país a reconhecer a cachaça como um produto brasileiro distinto, marcando uma virada na proteção e reconhecimento da cachaça internacionalmente; já em 2013, o auge da cachaça no mercado dos EUA quebrou anos de generalização do produto – antes disso, ela havia sido vigorosamente rotulada como “Rum Brasileiro” de 2001 a 2013 para venda nos Estados Unidos (Ratkovich *et al.*, 2023).

Em 2016, o Acordo de Reconhecimento Mútuo de Cachaça e Tequila como Indicações Geográficas e Produtos Distintivos do Brasil e do México concluiu oficialmente as negociações para reconhecer a cachaça no México como uma bebida destilada exclusiva do Brasil, assim como o Chile, em 2018, reconheceu a cachaça como um produto brasileiro distinto, que permitiu o reconhecimento mútuo das indicações geográficas da cachaça e do pisco (chileno) (Ratkovich *et al.*, 2023). Esses avanços adicionaram-se ao crescente reconhecimento internacional da cachaça como um produto brasileiro único (Tabela 1).

Tabela 1 - Classificação e rotulagem da cachaça

Classificação	Nome	Descrição	Marcação
Processo de destilação	Cachaça de alambique	quando for produzido exclusiva e integralmente em alambique de cobre e obtido por destilação do mosto fermentado de caldo de cana-de-açúcar crua.	Opcional
	Cachaça	quando produzida por método de destilação diferente ou mistura de cachaças de outros métodos.	
Processo de envelhecimento	Cachaça envelhecida	que é envelhecido em recipiente de madeira com capacidade máxima de 700 L durante pelo menos um ano e contém pelo menos 50% do seu volume envelhecido na madeira.	Obrigatória

	Cachaça armazenada	que se encontra armazenado em recipiente de madeira mas não cumpre os critérios de envelhecimento definidos nas Normas de Identidade e Qualidade em vigor e demais diplomas administrativos pertinentes.	
	Cachaça	que esteja acondicionado em recipiente adequado e que não cumpra os critérios de envelhecimento ou armazenamento em madeira definidos nas Normas de Identidade e Qualidade em vigor e demais atos administrativos pertinentes.	
Teor de açúcar	Cachaça adoçada	que é uma bebida com adição de açúcares em quantidade superior a 6 g/L e inferior a 30 g/L.	Obrigatória
	Cachaça	que pode conter açúcares adicionados em quantidade igual ou inferior a 6 g/L	

Fonte: Brasil (2022)

Na atualidade a cachaça é uma bebida apreciada por todas as classes sociais. Os fatores que definem a qualidade da cachaça são a matéria-prima, as condições climáticas, o manejo e o processo de produção, sendo comuns diferenças nas quantidades de compostos químicos e atributos sensoriais, devido à produção em diferentes regiões brasileiras (Reche; Franco, 2009). Além disso, a cachaça também é muito consumida pelos povos na Europa e nas Américas do Sul e do Norte (SILVA *et al.*, 2020a).

O Brasil tem capacidade instalada para produzir aproximadamente 1,2 bilhão de litros de cachaça por ano, no entanto, produz por volta de 800 milhões de litros e exporta cerca de 7,22 milhões de litros (Ibrac, 2021; Brasil, 2022), devido à falta de padronização no processo produtivo. A cachaça utiliza a cana-de-açúcar, o que proporcionou a introdução dos alambiques e tornou-se uma bebida fundamental na história brasileira, pois vários estudos relatam o surgimento da cachaça e sua etimologia no Brasil (Silva *et al.*, 2014).

2.2.1 Sistema de produção da cachaça

A colheita da cana-de-açúcar é fundamental para garantir a qualidade do produto final, principalmente na produção de cachaça. A planta é composta principalmente por fibra e caldo, sendo que a fibra representa de 8 a 14% da composição e o caldo de 86 a 92%. O caldo é composto principalmente por água (75 a 82%) e sólidos solúveis (18 a 25%), sendo os açúcares os principais componentes desses sólidos, com sacarose, glicose e frutose. Além dos açúcares, os sólidos solúveis também contêm não-açúcares, como aminoácidos, ácidos e gorduras. As substâncias inorgânicas representam 0,2% a 0,7% dos sólidos solúveis, incluindo compostos como SiO_2 , K_2 , P_2O_5 , CaO , Na_2O , MgO , Cl e Fe_2O_3 (Ratkovich *et al.*, 2023).

Para garantir a qualidade, os colmos devem ser processados dentro de 36 horas após o corte, removendo-se os topos (ponteira da cana) com baixo teor de açúcar, assim como na operação de colheita deve evitar a queima prévia para preservar a qualidade e evitar a contaminação (Ratkovich *et al.*, 2023). O método de colheita manual é o mais empregado, pois a colheita mecânica pode comprometer a qualidade devido à sujeira (impurezas minerais e vegetais), destacando-se que atrasos no processamento após a colheita podem levar à perda de açúcares e favorecer a deterioração microbiana (Ratkovich *et al.*, 2023). Somado ao fator declividade do terreno, na qual em diversas regiões do Estado de Minas Gerais, maior produtor de cachaça advinda de alambique de cobre, torna-se uma limitação à mecanização.

O ponto ideal de colheita da cana-de-açúcar é fundamental, sendo considerada madura para moagem quando o índice de maturação (IM) for igual ou superior a 0,85 e inferior a 1,00 (Ratkovich *et al.*, 2023), ou quando o teor de °Brix do caldo for igual ou maior que 18 (Pimentel; Andrade, 2022). O refratômetro geralmente é instrumento utilizado para determinação pelo produtor para determinar os sólidos solúveis em °Brix, além disso, vale ressaltar que o pH do caldo deve variar de 5,0 a 6,0 (Schwan; Dias, 2020). Os atrasos no transporte e processamento da cana podem levar à perda de açúcares, favorecendo a formação de leveduras e a deterioração microbiana, ressaltando a importância de processar a cana em até 24 horas após a colheita e ajustar adequadamente os equipamentos de moagem para otimizar a extração do caldo (Ratkovich *et al.*, 2023).

A multiplicação de microrganismos e a fermentação são as duas etapas principais do processo tradicional de produção de cachaça (Pataro *et al.*, 2002; Campos *et al.*, 2010; Duarte *et al.*, 2011). Na primeira fase, os microrganismos se multiplicam sob intensa aeração e o teor de açúcar é próximo de 5 °Brix. Na segunda fase, o caldo

com teor de açúcar entre 14 à 16 °Brix é adicionado para fermentar (Schwan *et al.*, 2001; Campos *et al.*, 2010). É importante evitar concentrações acima de 16 °Brix para garantir uma fermentação completa e eficaz (Pataro *et al.*, 2002).

A fermentação consiste em três fases: inicial (pré-fermentação), primária (fermentação tumultuada) e final (pós-fermentação). Durante a fase inicial, oxigênio é necessário para a multiplicação das leveduras, enquanto na fermentação primária, os açúcares são convertidos em álcool e CO₂ (Ratkovich *et al.*, 2023). A fase final é marcada pelo fim da liberação de CO₂ e estabilização do pH e temperatura. Controle do pH e temperatura é essencial para evitar contaminação bacteriana (Cardoso, 2020). As cubas de fermentação devem ser feitas de materiais não reativos e resistentes, preferencialmente com fundo inclinado para facilitar a drenagem.

Os fatores como aeração, concentração de açúcar, pH e temperatura afetam a fermentação. A faixa ideal para fermentação de cachaça é em torno de um pH de 4,5, com temperatura ideal entre 25-30 °C. Para evitar problemas durante a fermentação, é essencial descartar leveduras contaminadas, limpar completamente os recipientes e preparar uma nova cultura inicial, portanto o microbioma das fermentações tradicionais da cachaça é complexo, incluindo diversos gêneros de leveduras e bactérias, como *Lactobacillus* e *Lactococcus* spp. (Silva *et al.*, 2020; Cardoso, 2020). O uso de cepas de leveduras específicas pode ajudar a garantir a consistência na fermentação e prevenir a formação de congêneres, assegurando a qualidade e atendendo aos padrões brasileiros (Ratkovich *et al.*, 2023).

A produção de cachaça de alambique usa tradicionalmente o fermento natural conhecido como “fermento caipira”, que ainda prevalece entre os pequenos produtores no Brasil, onde este é feito a partir de uma mistura de milho triturado, farelo de arroz e suco de frutas cítricas adicionadas ao caldo de cana (Martini *et al.*, 2011). Por outro lado, existe a opção da fermentação com a levedura selecionada, sendo a mais indicada para a produção de cachaça a *saccharomyces cerevisiae* CA11 (Schwan; Dias, 2020). De modo geral, a microbiota natural de leveduras no momento da fermentação é dominante com os gêneros *Saccharomyces*, *Scizosaccharomyces*, *Kloeccera*, *Pichia*, *Debaryomyces*, *Kluyveromyces* e diversas espécies de *Candida*, e com relação às bactérias, o gênero *Latobacillus* representa 71% do total das Gram-positivas e 24% o gênero *Bacillus* (Schwan; Dias, 2020).

O volume inicial do inóculo na fermentação de cachaça varia de 12 a 20% do volume da cuba de fermentação, com duração média de 24 horas (Schwan *et al.*, 2001;

Pataro *et al.*, 2002; Campos *et al.*, 2010). A queda do °Brix durante a fermentação indica a conversão de glicose em álcool, sendo monitorada a cada 1 ou 2 horas (Ratkovich *et al.*, 2023). O controle da formação de congêneres voláteis é importante, mas medidas corretivas geralmente são tomadas durante a destilação, já que sua mensuração na fermentação é limitada (Cardoso, 2020). Para evitar a formação de ácido acético, é essencial minimizar a contaminação por bactérias acéticas, enquanto os álcoois superiores são essenciais para as características sensoriais da cachaça, sua produção excessiva pode ser prejudicial (Cardoso, 2020).

Após a fermentação, o mosto fermentado é destilado para produzir cachaça, enquanto a levedura restante pode iniciar um novo ciclo de fermentação (Campos *et al.*, 2010; Duarte *et al.*, 2011). O mosto contém, aproximadamente, 88% a 93% de água, 5% a 9% de álcool por volume e pequenas quantidades de diversos álcoois, ácidos, ésteres e aldeídos cruciais para a qualidade da cachaça (Duarte *et al.*, 2011). Portanto, no processo de destilação os produtores utilizam alambiques de cobre ou de coluna, dependendo da finalidade da produção (Ratkovich *et al.*, 2023).

Durante a destilação, são feitos cortes para separar as frações de "cabeça", "coração" e "cauda". A fração "cabeça" contém compostos indesejáveis, como metanol e aldeídos, enquanto a fração "coração" é o destilado desejado, por fim a "cauda" contém compostos como ácido acético e furfural, que devem ser removidos para reduzir a acidez da cachaça (Ratkovich *et al.*, 2023). As frações voláteis são separadas através de cortes no destilado, que separam os compostos desejáveis dos indesejáveis encontrados na cabeça.

A destilação eficiente é crucial para garantir a qualidade da cachaça, e isso depende do alambique e da técnica utilizada, incluindo o refluxo, a geometria da coluna e a condensação do vapor (Ratkovich *et al.*, 2023). Certos compostos, como furfural e hidroximetilfurfural (HMF), são formados durante a destilação e não durante a fermentação, influenciando as características sensoriais do produto final (Cardoso, 2020). Dessa forma, as boas práticas de destilação, como controle de temperatura (≤ 90 °C) e tempo (de 1,5 a 3 h), sedimentação do mosto fermentado e separação de frações, são essenciais para evitar substâncias nocivas e garantir a qualidade da cachaça (Cardoso, 2020).

A produção de cachaça pode ser feita por dois métodos principais de destilação: batelada e contínua. A destilação em batelada, com alambiques de cobre, produz pequenas quantidades de cachaça, com características sensoriais influenciadas pelo

alambique e pela habilidade do destilador, por outro lado a destilação contínua, em colunas de aço inoxidável, produz maior volume em menos tempo, mas resulta em cachaça com sabor e aroma mais uniformes e menos complexos (Ratkovich *et al.*, 2023).

A produção da cachaça envolve a etapa de envelhecimento do produto destilado que pode ser optativa e realizada em barris de madeira para obter reações específicas e modificar seu perfil de sabor. Para atender às normas regulamentadoras, devem ser utilizados recipientes de madeira de primeiro uso adequados para armazenamento e envelhecimento da cachaça, sendo proibida a utilização de equipamentos que não atendam às normas técnicas para materiais em contato com alimentos (Ratkovich *et al.*, 2023).

O envelhecimento em barris de madeira suaviza e melhora as características ásperas das bebidas destiladas recentemente, e a madeira atua como uma embalagem ativa que modifica as características da bebida ao longo do tempo, melhorando sua qualidade (Cardoso, 2020). A lei brasileira determina que a cachaça envelhecida deve conter pelo menos 50% da bebida envelhecida em barris de madeira apropriados por no mínimo um ano, sendo a cachaça premium e extra-premium envelhecida por um ano e três anos, respectivamente (Ratkovich *et al.*, 2023).

Embora o carvalho seja a principal madeira utilizada para envelhecimento de bebidas destiladas em todo o mundo, madeiras nativas brasileiras como amendoim, ararua e 30abreúva oferecem características de sabor devido à extração de compostos específicos (Ratkovich *et al.*, 2023). Existe uma associação específica entre o destilado e os componentes derivados da madeira, pois diversas reações químicas ocorrem durante a maturação e o envelhecimento (Cardoso, 2020).

O envelhecimento envolve também a extração de componentes da madeira, a decomposição de macromoléculas da madeira e a sua incorporação na bebida espirituosa, a transformação dos materiais extraídos da madeira, as reações dos componentes da madeira com os componentes originais do destilado, a evaporação de compostos voláteis através do barril de madeira, e a formação de complexos moleculares estáveis entre os compostos secundários e água e/ou etanol (Cardoso, 2020; Ratkovich *et al.*, 2023). Após o envelhecimento, a filtração e a padronização são etapas essenciais para remover partículas sólidas dos barris, reduzir o teor alcoólico e evitar futuras turvações na bebida.

2.2.2 Limites de componentes e contaminantes da cachaça

Os contaminantes, como metais pesados, pesticidas e toxinas provenientes do crescimento de fungos são uma preocupação na produção da cachaça, sendo essencial monitorá-los para garantir a segurança e a qualidade do produto final (Cardoso, 2020). Na Tabela 2, estão listados os principais elementos e os limites de contaminantes definidos pela legislação brasileira (Brasil, 2022). Além disso, o processo de envelhecimento e as cepas de levedura exercem influência sobre a qualidade e a autenticidade da cachaça (Ratkovich *et al.*, 2023).

Tabela 2 - Limites mínimos e máximos toleráveis para componentes da cachaça de acordo com a legislação brasileira.

Parâmetros	Unidade	Mín.	Máx.
Componentes			
Gradação alcoólica	% v/v a 20°C	38	48
Acidez volátil, como ácido acético	mg/100 mL de álcool anidro		150
Ésteres totais, como acetato de etila	mg/100 mL de álcool anidro		200
Aldeídos totais, em acetaldeído	mg/100 mL de álcool anidro		30
Soma de Furfural e Hidroximetilfurfural	mg/100 mL de álcool anidro		5
Álcoois superiores *	mg/100 mL de álcool anidro		360
Congêneres	mg/100 mL de álcool anidro		650
Compostos fenólicos totais (para cachaça envelhecida)			
Açúcares totais (para cachaça)	g/L (como glicose)		≤6
Açúcares totais (para cachaça adoçada)	g/L (como glicose)	>6	<30
Contaminantes			
Metanol	mg/100 mL de álcool anidro		20
Carbamato de etila (CE)	μg/L		210
Acroleína (2-propenal)	mg/100 mL de álcool anidro		5
Álcool sec-butílico (2-butanol)	mg/100 mL de álcool anidro		10
Álcool n-butílico (1-butanol)	mg/100 mL de álcool anidro		3
Cobre	mg/L		5

*Álcoois superiores: soma de álcoois isobutílicos (2-metilpropanol), álcoois isoamílicos (2-metil-1-butanol e 3-metil-1-butanol) e álcool n-propílico (1-propanol).

Fonte: Brasil (2022)

Os compostos secundários indesejáveis na produção de cachaça são: acroleína, 1-butanol, 2-butanol, cobre, CE, furfural, hidroximetilfurfural (HMF), metanol e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) (Lima *et al.*, 2022). A acroleína é um aldeído que pode ser formado durante a destilação da cachaça a partir da desidratação

do glicerol ou pelos *lactobacilos* do mosto, que converte o glicerol em β -hidroxi propionaldeído, sendo altamente tóxico e mutagênico, irritando os olhos, nariz e garganta (Cardoso, 2020). Com relação ao 1-butanol e o 2-butanol, ambos são subprodutos bacterianos que podem afetar a qualidade da cachaça quando presentes em altas concentrações, logo a principal causa desses compostos é a contaminação bacteriana durante a produção (Ratkovich *et al.*, 2023).

O cobre contribui para o aroma e sabor da cachaça, porém altas concentrações podem prejudicar o corpo humano e catalisar a formação de CE, composto considerado cancerígeno (Silva *et al.*, 2020). A legislação brasileira limita o teor de cobre a 5 mg/L em bebidas destiladas (Brasil, 2022), mas outros países impõem regulamentações mais rígidas, limitando o teor a 2 mg/L. O carbamato de etila possui potencial carcinogênico. Uma das propostas da formação do CE, pode ser baseada na complexação do cianeto a Cu^{+2} seguido de sua oxidação a cianogênio, com posterior desproporção a cianato e cianeto (Aresta; Boscolo, 2001). O cianato pode reagir com etanol para formar carbamato de etila, sendo o cobre possivelmente liberado do aparelho de destilação, após a corrosão (Aresta *et al.*, 2001).

O furfural e HMF podem conferir sabor desagradável e impactar negativamente na qualidade do produto final, e em altas concentrações pode indicar processos de produção inadequados ou má qualidade da matéria-prima (Cardoso, 2020). O metanol, formado a partir da degradação da pectina da cana-de-açúcar, é indesejável devido aos graves riscos à saúde, incluindo cegueira e morte. Portanto, a minimização de compostos secundários indesejáveis, como acroleína, 1-butanol, 2-butanol, cobre, EC, furfural, HMF e metanol, pode ser alcançada através de monitoramento cuidadoso e adesão às boas práticas de fabricação (Ratkovich *et al.*, 2023).

Até o momento, não há evidências científicas que comprovem que a variedade da cana-de-açúcar influencia diretamente a composição química da cachaça. Embora a qualidade da cachaça possa ser afetada por diversos fatores, como o método de produção, o tipo de fermentação e o envelhecimento, estudos específicos sobre a relação entre as variedades de cana e suas características químicas ainda são escassos. Essa lacuna na pesquisa indica a necessidade de investigações mais aprofundadas para entender melhor como diferentes variedades podem impactar o perfil da cachaça, contribuindo assim para a valorização e aprimoramento deste produto típico brasileiro.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. A. C. M. *et al.* Temperatura base e taxa de crescimento de oito de cana-de-açúcar. **Revista Geama**, Recife, v. 5, n. 1, p. 21-29, 2019.
- ARESTA, M.; BOSCOLO, M.; FRANCO, D. W. Cooper (II) catalysis in cyanide conversion into ethyl carbamate in spirits and relevant reactions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 49, n. 6, p. 2819-2824, 2001.
- ALVARENGA, Rogerio Antônio. **IV Censo varietal dos produtores de cachaça (2022/23)**. 2024. Monografia (Monografia em Tecnologia da Cachaça de Alambique) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2024.
- BATISTA, Laryssa Maria Teles. **Avaliação morfofisiológica da cana-de-açúcar sob diferentes regimes hídricos**. 2013. Dissertação (Dissertação em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Assessment of chemical quality of Brazilian sugar cane spirits and cachaças. **Food Control**, Londres, v. 54, n. 1, p. 1-6, 2015.
- BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Assessment of Ethyl Carbamate Contamination in Cachaça (Brazilian Sugar Cane Spirit). **Beverages**, Basel, v. 2, n. 4, p. 28, 2016.
- BORTOLETTO, A. M. *et al.* Aging practices influence chemical and sensory quality of cachaça. **Food research international**, Toronto, v. 86, n. 1, p. 46-53, 2016.
- BORDONAL, R. D. O. *et al.* Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 38, n. 2, p. 1-23, 2018.
- BRAGA, M. V. F. *et al.* A cachaça como patrimônio: turismo, cultura e sabor. **Revista de Turismo contemporâneo**, Brasília, v. 3, n. 2, p. 254-275, 2015.
- BRAGA JUNIOR, Rodrigo Luiz. **Censo Varietal IAC de Cana-de-açúcar no Brasil safra 2023/24**. Campinas, SP: Instituto Agronômico, 2023.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 539, de 26 de dezembro de 2022**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 250, p. 32, 27 dez. 2022.
- BRIEGER, F. O. Início de safra, como determinar a maturação. **Boletim Informativo Copereste**, Recife, v. 4, n. 7, p. 1-3, 1968.
- CAMPOS, C. *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**, Oxford, v. 108, p. 1871-1879, 2010.
- CARDOSO, M. D. G. **Produção de aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: UFLA, 2020. 445 p.
- CASTRO, P. R. C.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Fisiologia da cana-de-açúcar. In: MENDONÇA, A. F. (Org.). **Cigarrinhas da cana-de-açúcar: Controle biológico**. 1. ed. Maceió: Insecta, 2005. p. 123-156.
- CAPOBIANGO, M. *et al.* Evaluation of methods used for the analysis of volatile organic compounds of sugarcane (cachaca) and fruit spirits. **Food Analytical Methods**, New York, v. 6, n. 1, p. 978-988, 2012.
- CTC - CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Varietades CTC**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/cana/>. Acesso em: 11 mar. 2023.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: quarto levantamento da safra 2023/24**. v. 11, n. 44. Brasília, 2024.

CURSI, D. E. *et al.* History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech**, Pune, v. 1, n. 1, p. 1-22, 2021.

DANTAS, J. P.; ALVES, M. L. B. Cachaça potiguar: a relação com as atividades turísticas na ótica do patrimônio cultural. **Revista Turismo Estudos e Práticas-RTEP/UERN**, Mossoró, v. 9, n. 2, p. 1-14, 2020.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool: tecnologias e perspectivas**. Viçosa: Editora UFV, 2010. p. 25-49.

DUARTE, W. F. *et al.* Effect of Co-Inoculation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus fermentum* on the Quality of the Distilled Sugar Cane Beverage Cachaça. **J. Food Sci**, Chicago, v. 76, n. 1, p. C1307–C1318, 2011.

FAO – Food and Agriculture Organization. **Data: Crops and livestock products**. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 10 fev. 2024.

HERNANDES, T. A. D. *et al.* Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Oxford, v. 8, n. 2, p. 241-252, 2014.

IBRAC – Instituto Brasileiro da Cachaça. **Mercado Externo (ano 2020)**. 2021. Disponível em: <https://ibrac.net/servicos/mercado-externo>. Acesso em: 15 mar. 2024.

RATKOVICH, N. *et al.* The Spirit of Cachaça Production: An Umbrella Review of Processes, Flavour, Contaminants and Quality Improvement. **Foods**, Basel, v. 12, n. 17, p. 3325, 2023.

KLEIN, B. C. *et al.* Beyond ethanol, sugar, and electricity: a critical review of product diversification in Brazilian sugarcane mills. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Oxford, v. 13, n. 3, p. 809-821, 2019.

LIMA, C. M. G. *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**, Cambridge, v. 106, p. 104338, 2022.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Embrapa Tabuleiros Costeiros – Documentos (INFOTECA-E), Aracaju, 2012. 31 p.

MARTINI, C. *et al.* Yeast composition of sugar cane juice in relation to plant varieties and seasonality. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 5, p. 710–717, 2011.

MAGRO, F. J., *et al.* **Biometria em cana-de-açúcar**. Produção de Cana-de-Açúcar, Piracicaba, SP: USP, 2011. 18 p.

MARIN, F.; NASSIF, D. S. P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: Fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina rande, v. 17, n. 2, p. 232-239, 2013.

MANHÃES, C. M. C. *et al.* Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, Salvador, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015.

MARIN, F. R. *et al.* Prospects for increasing sugarcane and bioethanol production on existing crop area in Brazil. **Bioscience**, Atlanta, v. 66, p. 307- 316, 2016.

- MOURA, J. A. A. *et al.* Qualidade de cachaças artesanais produzidas com leveduras de diferentes origens. **Scientia Plena**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p.e031501, 2020.
- MOORE, P. H.; MARETZKI, A. Sugarcane. In: ZAMSI, E.; SCHAFER, A. A. (Orgs.). **Photoassimilate distribution in plants and crops**. 1. ed. Routledge, 1996. p. 643-670.
- MORAIS, Katiule Pereira. **Determinação da temperatura base, desempenho agrônômico e correlação de componentes de rendimento em genótipos de cana-de-açúcar**. 2015. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.
- MORAIS, R. *et al.* Interruption of informality in artisanal cachaça: an analysis from the perspective of institutional work. **Revista Contemporânea de economia e gestão**, Brasília, v. 18, n. 1, p. 107-122, 2020.
- MUTTON, M. J. R. *et al.* The clarification of sugarcane juice and the use of CA-11 yeast produces better quality cachaça. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 51, n.4, p. e20197021, 2020.
- NEUTZLING, D. M. *et al.* Value Creation from Internationalization of Sugar Cane by-products: a multi-stakeholder view of artisanal cachaça production. **Revista brasileira de gestão de negócios**, São Paulo, v. 17, n. 55, p. 890-910, 2015.
- NGUYEN, Q. *et al.* Production of sustainable bioplastic. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, Oxford, n. 1, v. 1, p. 1-15, 2017.
- OLIVEIRA, C. M. *et al.* Process integration of a multiperiod sugarcane biorefinery. **Appl Energy**, Oxford, v. 213, n. 1, p. 520-39, 2018.
- PATARO, C. *et al.* Trehalose accumulation, invertase activity and physiological characteristics of yeasts isolated from 24 h fermentative cycles during the production of artisanal Brazilian cachaça. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 33, n.1, p.202–208, 2002.
- PENTEADO, J. C. P. *et al.* Multivariate analysis for the classification differentiation of Brazilian sugarcane spirits by analysis of organic and inorganic compounds. **Analytical letters**, Boca Raton, v. 42, n. 17, p. 2747-2757, 2009.
- PIMENTEL, G. V.; ANDRADE, L. A. B. **Produção de aguardente de cana**. In: CARDOSO, M. G. (Org.). **Cultura da cana-de-açúcar**. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 25-61.
- PORTUGAL, C. B. *et al.* How native yeasts may influence the chemical profile of the Brazilian spirit, cachaça?. **Food Research International**, Toronto, v. 91, n. 1, p. 18-25, 2017.
- RIBEIRO, M. L. D. *et al.* Physico-chemical treatment of sugarcane juice produces quality cachaça. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 3, p. 458-463, 2017.
- RIDESA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **Variedades RB**. 2021. Disponível em: <https://www.ridesa.com.br/variedades>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- RECHE, R.V.; FRANCO, D. W. Distinction between cachaças distilled in pot stills and in columns using chemometrics. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 332-336, 2009.
- RODRIGUES, L. M. A. *et al.* Uma dose de história: cachaça de alambique e aguardente de coluna. **Perspectivas e Diálogos: Revista de História Social e Práticas de Ensino**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 90-108, 2019.

- SANGHERA, G. S. *et al.* Climate change impact in sugarcane agriculture and mitigation strategies. **Harnessing Plant Biotechnology and Physiology to Stimulate Agricultural Growth**, Cham, v. 1, n. 1, p. 99-115, 2019.
- SALES, C. R. *et al.* Flexibility of C4 decarboxylation and photosynthetic plasticity in sugarcane plants under shading. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 149, p. 34-42, 2018.
- SANCHES, G. M. *et al.* Precision production environments for sugarcane fields. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 76, n. 1, p. 10-17, 2019.
- SEGALLA, A. L. Variedades de cana-de-açúcar: II. Série de ensaios realizados no período de 1955 a 1958. **Bragantia**, Campinas, v. 20, p. 323-56, 1961.
- SILVA, F. C. Pesquisas industriais rurais de cana-de-açúcar: melado, rapadura e açúcar mascavo. 1. ed. Distrito Federal: Embrapa, 2003. 428 p.
- SILVA, F. C. *et al.* Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos. In: SILVA, F. C. (Org.). **Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima**. 1. ed. Distrito Federal: Embrapa, 2015. p. 335-365.
- SILVA, M. A. *et al.* Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 51, n. 296, p. 457-466, 2004.
- SILVA, T. G. F. *et al.* Índices Morfofisiológicos e Uso de Radiação Solar por um Cultivo de Cana-de-Açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 4, p. 764-773, 2014.
- SILVA, J. H. N. *et al.* Influence of the prepare of sugarcane in the organic sugarcane cachaça = Influência do preparo da cana-de-açúcar na cachaça orgânica. **UNAR**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 1-14, 2014.
- SILVA, J. H. N. *et al.* Cachaça Production in Brazil and its Main Contaminant (Ethyl Carbamate). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 77, n. 2, p. e20180135, 2020b.
- SILVA, A. P. *et al.* Composição química de aguardente de cana obtida por diferentes métodos de destilação. **Brazilian Journal of Food Technology**, São Paulo, v. 23, n. 1, p. e2018308, 2020.
- SILVA, J. H. N. *et al.* Volatile compounds in cachaças obtained from three sugarcane varieties cultivated under the managements: organic, conventional and without fertilization. **Química Nova**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 1227-1233, 2020a.
- SILVA, J. H. D. N. *et al.* Monitoring the content of ethyl carbamate and copper in organic and conventional cachaça. **Scientific Agriculture**, Piracicaba, v. 77, n. 5, p. e20190027, 2020
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Anatomia e botânica. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p. 47-56.
- STEFENON, V. M. *et al.* Caracterização genética das leveduras de fermentação como elemento de Indicação Geográfica da cachaça e aguardente artesanais de Luiz Alves, SC. **Agropecuária Catarinense**, Lages, v. 34, n. 3, p. 27-29, 2021.
- SYLVIO, A. S. V. *et al.* Caracterização da produção de cachaça em minas gerais e o potencial de geração de biogás a partir da vinhaça. **Revista Brasileira de Energia**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 57-80, 2021.

SCHWAN, R. F. *et al.* Microbiology and physiology of Cachaça (Aguardente) fermentations. *Antonie Van Leeuwenhoek Int. Journal of General and Molecular Microbiology*, Wuhan, v. 79, p. 89–96, 2001.

SCHWAN, R. F.; DIAS, D. R. Fermentação. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 91-111.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Sugarcane Agroecological Zoning 2020**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://english.unica.com.br/zoning>. Acesso em: 14 out. 2022.

VALÉRIO, V. J. O. Agronegócio sucroenergético: a face atualizada da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. **Geografia em Atos (Online)**, São João del-Rei, v. 5, n.1, p. 1-21, 2021.

VIANNA, Murilo dos Santos. **Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para a sua minimização em diferentes regiões brasileiras**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2014.

WATT, D. A.; SHELTON, H. J.; KIN, H. C. Source and Sink Physiology. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Eds.). **Sugarcane: Physiology, Biochemistry and Functional Biology**. Oxford: Wiley Blackwell, 2014. p. 483-520.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO AGRONÔMICA E RENDIMENTO DE CACHAÇA DE VARIEDADES DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A cachaça é um produto derivado da cana-de-açúcar e exclusivamente produzido no Brasil. O plantel varietal das propriedades de cachaça de alambique no território brasileiro geralmente é constituído predominantemente pela RB867515 e outras variedades muitas vezes desconhecidas pelos produtores. Além disso, a utilização recorrente da mesma variedade e de materiais de genética desconhecida ao longo das safras pode comprometer a produtividade e longevidade do canavial. Portanto, objetivou-se avaliar os caracteres agronômicos e de rendimento de cachaça de novas variedades de cana-de-açúcar, visando diversificar o plantel varietal das propriedades. O experimento foi implantado e conduzido na Cachaçaria João Mendes, Perdões-MG, sendo o processo fermentativo e a destilação realizada na Cachaçaria João Cassiano, Candeias-MG, na safra 2022/23. O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados em esquema fatorial 5×5 , sendo cinco variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB966928, RB036066, CTC9002 e CTC9003) e cinco épocas de avaliação (90, 180, 240, 270 e 330 dias após o plantio (DAP)), em cinco repetições. Foram avaliadas características biométricas (altura de planta, diâmetro do colmo e número de perfilhos por metro) de forma periódica e, em consequência da colheita, os caracteres de produção e componentes tecnológicos: (sólidos solúveis totais (SST, °Brix), índice de maturação (IM), peso de dez colmos (P10C), toneladas de colmo por hectare (TCH), litros de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC) e litros de cachaça por tonelada (LCT)). A análise de variância expõe que avaliando a evolução das plantas no tempo é possível observar que não houve efeito interativo entre as variedades e os dias após o plantio (DAP) sobre a altura de planta (AP), número de plantas por metro (NPM) e o diâmetro do colmo (DC), sendo os efeitos de forma isolada nas variedades. Na análise de variância para os parâmetros sólidos solúveis (SS), peso de dez colmos (P10C), índice de maturação (IM), litros de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC), tonelada de colmos por hectare (TCH) e litros de cachaça por tonelada (LCT) houve diferença significativa para as variedades. Em suma, destacando o rendimento de cachaça por tonelada de colmo (LCT) como o parâmetro agronômico de resumo do comportamento das variedades, tem-se o maior valor para a variedade RB036066 ($131,68 \text{ L Mg}^{-1}$) e CTC9002 ($113,71 \text{ L Mg}^{-1}$).

Palavras-chave: alambique; bebida destilada; manejo varietal; produtividade; *Saccharum* spp.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na escala comercial compreende quatro espécies domesticadas e duas selvagens, sendo as domesticadas a *Saccharum officinarum* L., *Saccharum sinense* Roxb., *Saccharum barberi* Jeswiet, *Saccharum edule* Hassk., e as selvagem são a *Saccharum spontaneum* L. e *Saccharum robustum* Jeswiet and Brandes (Moore; Maretzki, 1996). A cultura se destaca por sua capacidade de acumular elevados níveis de sacarose e apresentar um alto rendimento de biomassa por área, proporcionando bioenergia e produtos alimentícios para contribuir com os fatores socioeconômicos a nível mundial.

A cachaça é um produto derivado da cana-de-açúcar e exclusivamente produzido no Brasil. A denominação típica e exclusiva de cachaça abriga o limite de 38-48% v/v a 20 °C, obtida pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar (Brasil, 2022). Por outro lado, aguardente de cana-de-açúcar é aquela obtida pela simples destilação alcoólica do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar ou pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, com limite de 38-54% v/v a 20 °C, podendo ser adicionado açúcares (Brasil, 2022).

As variedades de cana-de-açúcar destinadas a produção de cachaça englobam o alto rendimento de colmos, teor de fibra médio/baixo, alto teor de sacarose, resistência as principais pragas e doenças, fácil despalha e período de utilização industrial longo (Pimentel; Andrade, 2020). Assim, a escolha de variedades adaptadas às condições edafoclimáticas de cultivo é primordial para formar o canavial ideal. No entanto, a escassez de informação técnica e científica sobre as variedades com maior rendimento agrônomico para a produção de cachaça, torna o manejo varietal limitado.

O plantel varietal das propriedades de cachaça de alambique no território brasileiro geralmente é constituído predominantemente pela RB867515 e outras variedades muitas vezes desconhecidas pelos produtores. Além disso, a utilização recorrente da mesma variedade e de materiais de genética desconhecida ao longo das safras pode comprometer a produtividade e longevidade do canavial (Pimentel; Andrade, 2020). Esse fica vulnerável as condições impostas por fatores bióticos e abióticos, respectivamente, perdendo capacidade produtiva devido às moléstias que assolam a cultura e a inserção da variedade em ambientes distintos de suas exigências (Sanchez *et al.*, 2019; Cursi *et al.*, 2021).

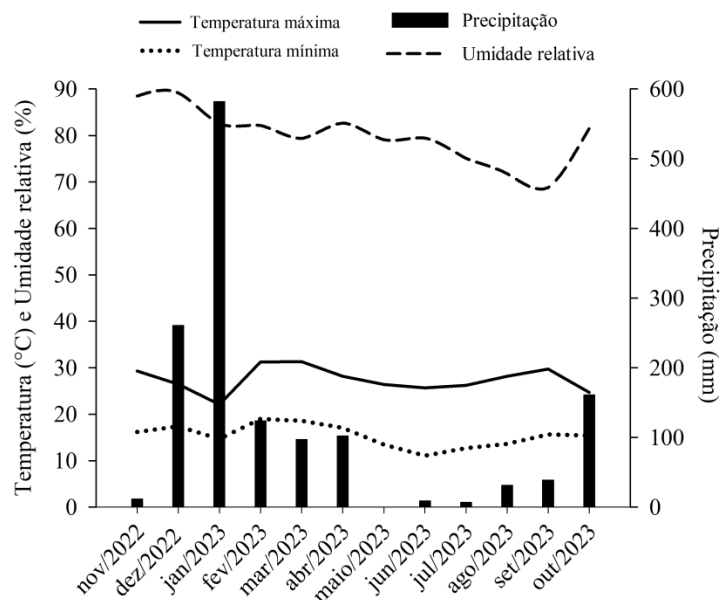
Dessa forma, ressalta-se a importância de buscar por novos materiais com intuito de diversificar o plantel e garantir a longevidade do canavial destinado a produção de cachaça. Portanto, objetivou-se avaliar os caracteres agronômicos e de rendimento de cachaça de novas variedades de cana-de-açúcar, visando diversificar o plantel varietal das cachaçarias.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido na Cachaçaria João Mendes, localizada no Município de Perdões-MG, com altitude de 907 m (latitude 21° 03' 18'' S e longitude 45° 00' 15'' W), na safra 2022/23. O clima da região caracteriza-se como tipo Cwa, pela classificação de Köppen, com uma precipitação pluviométrica média anual de 1500 mm (Alvares *et al.*, 2013). As condições meteorológicas estão descritas na figura 1.

Figura 1 - Temperatura máxima e mínima (°C), precipitação mensal (mm) e umidade relativa do ar durante o período a safra 2022/2023 (Nov de 2022 a Out de 2023) do experimento. Perdões, Minas Gerais, Brasil.



2.2 Delineamento e condução experimental

O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, sendo cinco variedades de cana-de-açúcar (RB867515, RB966928, RB036066, CTC9002 e CTC9003), com cinco repetições. Exclusivamente para análise de desenvolvimento biométrico das variedades o delineamento foi em esquema fatorial 5×5 , com cinco repetições. O fator adicional foi às cinco épocas de avaliação (90, 180, 240, 270 e 330 dias após o plantio (DAP)). As parcelas foram constituídas de quatro linhas de cinco metros, com 1,4 m de espaçamento, sendo as duas linhas centrais avaliadas, excluindo 0,5 m das extremidades, perfazendo uma área útil de 11,20 m².

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo vermelho com textura argilosa (Santos *et al.*, 2018). Antes da implantação do projeto em campo foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0-20 cm para determinação de suas características químicas e físicas: pH (H₂O) 6,1; M.O. 3,60 dag.kg⁻¹; P 34,10 mg.dm⁻³; K 208,0 mg.dm⁻³; H + Al 2,60 cmolc.dm⁻³; Al 0,0 cmolc.dm⁻³; Ca 4,70 cmolc.dm⁻³; Mg 0,90 cmolc.dm⁻³; SB 6,16 cmolc.dm⁻³; CTC (T) 8,76 cmolc.dm⁻³; V 70,32%; m 0,00%; Zn 1,40 mg.dm⁻³; Fe 39,90 mg.dm⁻³; Mn 14,90 mg.dm⁻³; Cu 0,80 mg.dm⁻³; B 0,01 mg.dm⁻³; S 12,40 mg.dm⁻³; Argila 58 dag.kg⁻¹; Silte 32 dag.kg⁻¹; Areia 10 dag.kg⁻¹.

O solo foi preparado por meio de gradagem. O plantio (29/10/2022) foi então realizado com mudas obtidas em cana-de-açúcar de segundo ciclo de cultivo (soqueiras de 9 meses). Os colmos foram cortados em 40 cm de comprimento e foram plantados a uma profundidade de 30 cm.

A adubação no plantio consistiu de 190 kg ha⁻¹ de fosfato monoamônico (MAP), juntamente com aplicação de defensivos agrícolas, sendo 1,0 L ha⁻¹ (p.c.) do inseticida imidacloprid e 0,5 L ha⁻¹ (p.c.) do fungicida piraclostrobina. O fertilizante, os colmos e os defensivos foram aplicados no fundo do sulco, antes de serem cobertos com o solo. Para fertilização de cobertura foram aplicados 100 kg ha⁻¹ de N (uréia) e 90 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio) aos 60 dias após o plantio (DAP) (Cantarella *et al.*, 2022). Durante o período do experimento foram executadas capinas manuais, com intuito de manter a área livre de plantas daninhas.

2.3 Caracteres agronômicos e componentes tecnológicos da cana-de-açúcar

As avaliações biométricas iniciaram-se aos 90 DAP e seguiram de forma equidistante, totalizando cinco avaliações, em cinco plantas situadas nas duas linhas centrais da parcela. Contabilizou-se o número de plantas por metro (NPM), obtido

através de dois metros centrais da parcela, em seguida foi feita relação do número de plantas com o comprimento do sulco, obtendo assim, a quantidade de plantas por metro linear. A altura de planta (AP) foi mensurada com o uso de uma trena, a partir da base do colmo até a inserção da folha +1, com os resultados expressos em centímetros (cm). O diâmetro de colmos (DC) foi mensurado com o auxílio de paquímetro digital com precisão de um milímetro (mm), medindo-se o entrenó do terço inferior dos colmos.

Para análise dos componentes de produção, o delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados, sendo 5 (cinco) tratamentos, com cinco repetições. A colheita foi realizada no dia 29 de setembro de 2023, com 330 dias do plantio. Por ocasião da colheita foram retirados, aleatoriamente, dois feixes com 10 colmos da área útil de cada parcela, eliminando-se a parte área.

Determinou-se o índice de maturação (IM), o teor de sólidos solúveis totais (SST, °Brix), conforme a metodologia do Consecana (2006). A tonelada de colmos por hectare (TCH) foi determinada através do peso de dez colmos industrializáveis por parcela (P10) e o número de colmos por metro (NCM) da área útil, pelo espaçamento (E). Após a pesagem e contagem dos colmos os dados foram submetidos à equação 1:

$$TCH = (P10 * NCM) / E. \quad (1)$$

Para o rendimento de cachaça propõe-se uma nova metodologia de estimativa em relação aos cultivares de cana-de-açúcar, baseado na produção do caldo, na qual a estimativa de Caldo de Cana-de-açúcar (CC, em mil litros por hectare) será pelos litros de caldo de 10 colmos moídos (LC10), o número de colmos por metro (NCM) e o espaçamento entre linhas do canavial (E), dado pela equação 2:

$$CC = (LC * NCM) / E. \quad (2)$$

Por fim, coletou-se 10 colmos aleatoriamente de cada variedade na área útil da parcela e realizou a extração mecânica do caldo, utilizando a moenda CPB 10 × 14 polegadas, e rotação de 4800 rpm. Após a extração do caldo, obteve-se o Rendimento Esperado de Cachaça (REC, em mil litros por hectare), que será dado pelo caldo de cana-de-açúcar (CC, em mil litros por hectare), fator de rendimento de caldo, padronizado a 15° Brix (Fr) e a eficiência de rendimento do alambique (Ef), sendo a seguinte equação 3:

$$REC = CC * Fr * Ef. \quad (3)$$

Sendo Fr, o fator de rendimento de caldo, para ajuste a 15° Brix (equação 3), com diluição de água, obtida em relação ao diagrama Cruz de Cobenze, de acordo com Souza *et al.* (2013), e representado na Tabela 1.

Tabela 1 - Volume de água a ser adicionado ao caldo para ajuste de 15° Brix (volume total 1000 litros)

°Brix do Caldo Original	°Brix Desejado 15		Fator de rendimento de caldo (Fr)
	Água	Caldo	
16	65	935	1,0695
17	125	875	1,1429
18	180	820	1,2195
19	225	775	1,2903
20	265	735	1,3605
21	300	700	1,4286
22	340	660	1,5152
23	370	630	1,5873
24	400	600	1,6667
25	425	575	1,7391

Fonte: Adaptado de Souza et al. (2013)

Para o cálculo do fator de rendimento de caldo (Fr), considerou-se a seguinte equação (4):

$$Fr = V_i/V_f \quad (4)$$

Sendo o volume inicial do caldo (1000 litros) (V_i) e o volume do caldo em relação ao °Brix desejado e °Brix original (Tabela 1) (V_f). Por fim, a variável eficiência de rendimento do alambique (Ef), considera-se um alambique de cobre com coluna cilíndrica, dotada de prato e deflegmador, com uma taxa de rendimento de 20% (Souza *et al.*, 2013), ou seja, para cada 1000 litros de vinho (mosto fermentado) obtêm 200 litros de cachaça, considerando as três fases (cabeça, coração e cauda).

O peso dez colmos (P10C) foi obtido através de pesagem direta em balança digital sem a palha e ponteira, em seguida os colmos foram para a moagem na moenda CPB 10 × 14 polegadas, e rotação de 4800 rpm para obter o litro de dez colmos (P10C). O litro de cachaça por tonelada de cana (LCT) foi obtido através da divisão do rendimento estimado de cachaça (REC) pela tonelada de cana por hectare (TCH).

2.4 Análises estatísticas

Os dados médios de desempenho agrônômico foram analisados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias pelo teste de

Bartlett e, posteriormente, submetida à análise de variância pelo teste F ($p < 0,05$). E a partir dos dados obtidos, utilizou-se o teste de Tukey, com significância 5%, efetuando as análises pelo programa Sisvar® (Ferreira, 2019).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Análise de variância (ANOVA) das características biométricas

A análise de variância expõe que avaliando a evolução das plantas no tempo é possível observar que não houve efeito interativo entre as variedades e os dias após o plantio (DAP) sobre a altura de planta (AP), número de plantas por metro (NPM) e o diâmetro do colmo (DC), sendo os efeitos de forma isolada nas variedades RB966928, RB867515, RB036066, CTC9002 e CTC9003 (Tabela 2).

Tabela 2 - Análise de variância para altura de planta (AP), diâmetro do colmo (DC) e o número de perfilhos por metro (NPM) de cultivares de cana-de-açúcar. Perdões, Minas Gerais, safra 2022/23, cana-planta.

Fontes de Variação (FV)	GL	Quadrado Médio		Fontes de Variação (FV)	GL	Quadrado Médio
		AP	NPM			DC
Var. (V)	4	4407,11 ^{**}	8,04 ^{ns}	Var. (V)	4	48,38 ^{**}
DAP (D)	4	160890,69 ^{**}	73,92 ^{**}	DAP (D)	3	30,80 ^{**}
V x D	16	313,08 ^{ns}	6,79 ^{ns}	V x D	12	1,65 ^{ns}
Bloco	4	408,29 ^{ns}	16,68 ^{ns}	Bloco	4	2,28 ^{ns}
Resíduo	96	375,9	11,98	Resíduo	76	2,24
C.V. (%)		11,24	24,78	C.V. (%)		4,7

DAP: Dias após plantio; FV: Fonte de Variação; GL: Grau de Liberdade; CV(%): Coeficiente de Variação; ns: Não significativo a 5% e 1% de probabilidade; **: significativo a 1% e *: significativo a 5% de probabilidade.

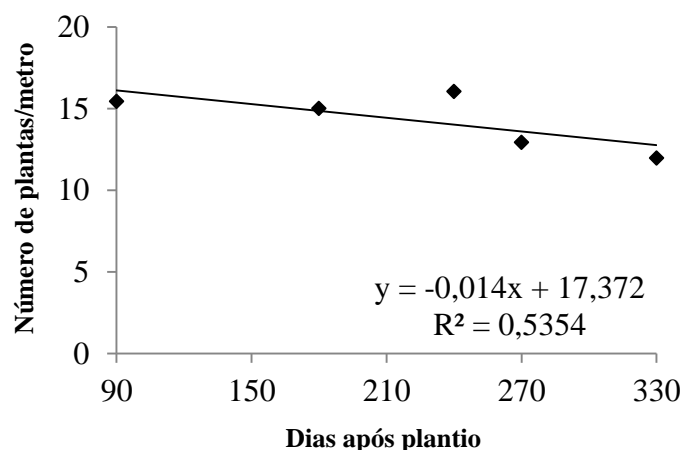
A produção da cana-de-açúcar é resultante da associação de diferentes parâmetros, como a altura, diâmetro e número de plantas por metro. Assim, a análise de biométrica da cultura possibilita tanto identificar as melhores fases de desenvolvimento quanto o rendimento em toneladas das variedades de cana-de-açúcar. Além disso, características morfológicas mencionadas, podem estar diretamente relacionadas ao

acúmulo de sacarose, devido sua influência sobre a capacidade de armazenamento nas células do parênquima do colmo (Singels *et al.*, 2021).

2.5.2 Número de plantas por metro

O número de perfilhos por metro apresentou aos 90 DAP o seu maior acúmulo com 16 plantas, em seguida houve um comportamento decrescente até o momento da colheita (330 DAP) que resultou o número máximo de 13 perfilhos por metro (Figura 2). Este comportamento decrescente pode ser atribuído ao desenvolvimento natural da cana-de-açúcar que apresenta início do perfilhamento em torno de 40 dias após o plantio e pode perdurar até 120 dias (Diola; Santos, 2010; Marafon, 2012).

Figura 2 - Número de plantas por metro de cultivares de cana-de-açúcar. Perdões, Minas Gerais, safra 2022/23, cana-planta.



Dessa forma, muitos são os fatores que podem influenciar o perfilhamento, sendo eles: fatores ambientais, genéticos e fisiológicos. Portanto, os perfilhos oriundos no período inicial de desenvolvimento do canavial tendem a produzir colmos mais grossos e mais pesados, enquanto os formados mais ao final do ciclo morrem ou permanecem curtos ou imaturos (Manhães *et al.*, 2015).

Nesse contexto, se destaca a fase de perfilhamento intenso da cana-de-açúcar, onde a competição entre os perfilhos pelos fatores de crescimento (água, luz e nutrientes) aumenta fazendo com que possa causar a morte dos perfilhos mais novos (Segato, 2006). Entretanto, vale ressaltar que essas diferenças no número máximo e redução de perfilhos ao longo do ciclo também pode ser devido às condições

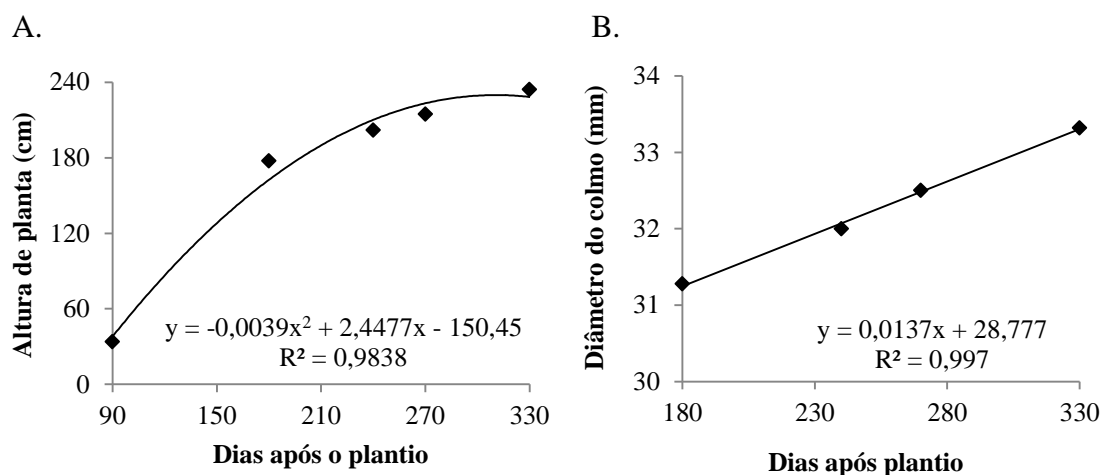
edafoclimáticas, como a radiação solar, temperatura ambiente e do solo, umidade do solo, dentre outros fatores (Araújo *et al.*, 2017). Silva *et al.* (2023), avaliando o crescimento e a produção de quatro cultivares de cana-de-açúcar, descreveram número médio de 13,6 perfilhos por metro linear. Morais *et al.* (2017), avaliando o desempenho agrônômico de doze cultivares de cana-de-açúcar descreveram uma variação de 8 a 14 perfilhos por metro.

A quantidade de plantas por metro é um fator que afeta a produtividade da cana-de-açúcar (BENETT *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2016), bem como o rendimento esperado de cachaça. Além disso, possibilita observar se o cultivar apresenta capacidade de atingir os “3 dígitos”, através da permanência de 80-110 mil colmos por hectare ao final do primeiro ciclo, conforme descreve Landell (2017).

2.5.3 Altura de planta (AP) e Diâmetro do colmo (DC)

A altura de planta máxima foi de 233,6 cm, alcançada aos 313 DAP (Figura 3A), com relação ao diâmetro de colmo o valor máximo (33,3 mm) foi observado no momento da colheita (330 DAP) (Figura 3B). Portanto, é possível descrever que a altura e diâmetro são parâmetros que dependem estritamente das condições de cultivo, principalmente se o canavial é sequeiro ou irrigado. DIAS *et al.* (2012), avaliando o desempenho agrônômico de três cultivares de cana-de-açúcar em sequeiro, observaram altura e diâmetro, respectivamente, de 30,5 mm e 294,0 cm atingido no momento da colheita. Por outro lado, alturas variando entre 250-310 cm e diâmetro do colmo máximo de 27,0 mm aos 360 DAP em condições irrigadas, foram registradas na pesquisa de cultivares por Oliveira *et al.* (2010).

Figura 3 - Altura de plantas (cm) (A) e diâmetro do colmo (cm) (B) de cultivares de cana-de-açúcar. Perdões, Minas Gerais, safra 2022/23, cana-planta.



Com relação à altura, é a fase de alongamento do colmo que inicia a partir da estabilização do número de plantas por volta dos 120 DAP, marcando o crescimento em estatura da cana-de-açúcar, parâmetro este correlacionado com a tecnologia de manejo adotada e as condições edafoclimáticas, com destaque para a época de plantio (Santos *et al.*, 2009). Para o diâmetro de colmo, geralmente as variedades de cana-de-açúcar não apresentam diferença significativa nos primeiros dias até 135 DAP, e a partir dos 279 DAP começam a ter diferenças significativas no diâmetro do colmo, logo as variedades que apresentam menor número de perfilhos possuem melhores condições de formar colmos com diâmetro maiores (Oliveira *et al.*, 2004).

Com a altura dos cultivares ao longo do tempo é possível observar o desenvolvimento normal de aumento em altura das plantas. Assim como, observa-se um crescimento mais lento dos 210 DAP aos 270 DAP, respectivamente, maio a julho. Este fato pode ser atribuído à baixa precipitação e temperatura destes meses nas condições da região trabalhada (Figura 1), logo as plantas apresentaram um desenvolvimento vegetativo lento. Sanghera *et al.* (2019), relata que a temperatura fora da faixa ideal (20-35 °C) de crescimento vegetativo afeta o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Assim como, a umidade relativa do ar ideal deve estar entre 80 e 85% durante o crescimento e entre 45 e 70% durante a maturação/colheita, sendo esta última condição presente entre junho e julho no Sudeste brasileiro (Silva *et al.*, 2020). No momento de alongamento dos colmos (210-270 DAP) as condições ambientais apresentaram resultados que não estavam na faixa ideal para precipitação (<2,0 mm) e temperaturas (26,3-12,7°C), logo travando o crescimento vegetativo e favorecendo o acúmulo de sacarose (Figura 1).

O diâmetro é um parâmetro inversamente proporcional à altura de plantas visto que o mesmo retém e disponibiliza os nutrientes necessários para o alongamento da planta, portanto isto pode justificar o comportamento quadrático da altura em detrimento do aumento linear em diâmetro de colmo. Além disso, ressalta-se que dentre os fatores de produção, o diâmetro do colmo este diretamente relacionado ao acúmulo de sacarose, que conseqüentemente, agrega-se com a capacidade de armazenamento nas células do parênquima do colmo (Marafon, 2012). Este acúmulo inicialmente ocorre nas folhas e posteriormente segue para os colmos e raízes (Singels *et al.*, 2021).

Analisando de forma isolada as variedades, na altura de planta (AP) é possível observar que apresentaram diferenças significativas apenas aos 240, 270 e 330 DAP, e para o diâmetro de colmo (DC) houve diferença estatística em todas as épocas de desenvolvimento (Tabela 3).

Tabela 3 - Altura de planta (AP) e diâmetro de colmo (DC) de cultivares de cana-de-açúcar. Perdões, Minas Gerais, safra 2022/23, cana-planta.

Cultivares	Altura de planta (AP)					
	90 DAP	180 DAP	240 DAP	270 DAP	330 DAP	Média
CTC9003	32,8 a	159,00 a	184,60 b	196,60 b	215,80 b	157,76 c
RB966928	29,6 a	164,20 a	189,40 ab	199,60 ab	219,20 b	160,40 bc
RB036066	33,4 a	180,00 a	207,00 ab	215,20 ab	229,60 ab	173,04 ab
CTC9002	36,4 a	191,40 a	222,60 a	230,00 ab	243,60 ab	184,80 a
RB867515	36,6 a	193,00 a	206,60 ab	232,00 a	263,20 a	186,28 a
Cultivares	Diâmetro de colmo (DC)					
	180 DAP	240 DAP	270 DAP	330 DAP	Média	
CTC9003	29,20 b	30,80 b	30,80 ab	30,90 c	30,42 c	
RB966928	31,00 ab	31,20 ab	30,00 b	32,40 bc	31,15 b	
CTC9002	31,20 ab	31,20 ab	30,60 ab	33,00 abc	31,60 b	
RB036066	31,60 ab	33,20 ab	31,80 ab	34,80 ab	33,05 a	
RB867515	33,40 a	33,60 a	33,00 a	35,60 a	33,70 a	

As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A altura de planta aos 240 DAP foi maior para o cultivar CTC9002, seguido pelo RB036066, RB867515 e RB966928, sendo estes últimos iguais estatisticamente

CTC9003. Aos 270 DAP a maior resultado foi RB867515, seguido pelo RB966928, RB036066 e CTC9002, os quais foram iguais CTC9003. Por fim, os cultivares de menor valor ao fim do ciclo foram CTC9003 e RB966928, porém iguais estatisticamente ao RB036066 e CTC9002, os quais conferiam os maiores valores juntamente com o cultivar RB867515 (Tabela 3).

O diâmetro de colmo aos 180 e 240 DAP, apresentaram o mesmo comportamento, com o maior resultado oriundo da variedade RB867515 que foi igual estatisticamente RB966928, CTC9002 e RB036066, onde estes últimos não diferiram da CTC9003. A RB867515 mostrou o maior valor, mas igual estatisticamente CTC9003, CTC9002 e RB036066 que não diferiram da RB966928 aos 270 DAP. No momento da colheita (330 DAP), é possível observar que a variedade de menor valor (CTC9003) não diferiu significativamente RB966928 e CTC9002. Assim como, a variedade de maior resultado (RB867515) não diferiu estatisticamente dos cultivares CTC9002 e RB036066 (Tabela 3).

Dessa forma, é possível destacar que em média RB867515 e RB036066 no momento da colheita não apresentaram estatisticamente o comportamento inversamente proporcional entre a altura de planta e diâmetro do colmo, ou seja, maior resultado de um parâmetro em detrimento do outro. E isto pode ser atribuído ao perfilhamento dos cultivares que foi apenas 13 perfilhos por metro no momento da colheita. Rodolfo Júnior *et al.* (2016), avaliando o desempenho agrônomico da cana-de-açúcar, descreveram que os cultivares quando apresentam baixo perfilhamento, os colmos tendem a apresentar maior altura e diâmetro.

Por outro lado, as condições consideradas como padrão no desenvolvimento da cana-de-açúcar foram observadas para CTC9003 e CTC9002, que em média houve maior desempenho em altura quando comparado com o diâmetro do colmo. MIRANDA *et al.* (2020), avaliando as características agrônomicas em uma média de três safras, também observaram este comportamento para os cultivares de cana-de-açúcar em condições de cultivo em sequeiro.

Em suma, observando o desenvolvimento do diâmetro do colmo ao longo do tempo a variedade RB867515 foi superior às variedades CTC9003 (com exceção aos 270 DAP), e RB966928 (com exceção aos 180 e 240 DAP) as demais intermediárias. Fato este relacionado à resposta da interação genótipo e ambiente, na qual em detrimento de um estresse hídrico a planta cessa seu crescimento vegetativo e inicia a maturação, fundamentando os resultados encontrados, que algumas variedades cessam

seu desenvolvimento vegetativo primeiro. E também devido ao período de crescimento, pois algumas variedades apresentam um período de crescimento rápido e curto com um amadurecimento mais cedo, quando comparadas a outras (Silva *et al.*, 2015).

2.5.4 Análise de variância (ANOVA) das características de produção

A análise de variância mostra que os parâmetros sólidos solúveis (SS), peso de dez colmos (P10C), índice de maturação (IM), litros de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC), tonelada de colmos por hectare (TCH) e litros de cachaça por tonelada (LCT) apresentaram diferença significativa para as variedades RB966928, RB867515, RB036066, CTC9002 e CTC9003 (Tabela 4).

Tabela 4 - Análise de variância para os sólidos solúveis totais (SST, °Brix), tonelada de colmo por hectare (TCH), índice de maturação (IM), peso de dez colmos (P10C), litros de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC) e litros de cachaça por tonelada (LCT) das variedades de cana-de-açúcar. Perdões, Minas Gerais, safra 2022/23, cana-planta.

Fontes de Variação (FV)	GL	Quadrado Médio (QM)						
		SST	P10C	TCH	IM	L10C	REC	LCT
Var. (V)	4	2,51 ^{**}	22,85 ^{**}	1157,24 [*]	0,006 ^{**}	6,18 ^{**}	34,56 ^{**}	1318,36 ^{**}
Bloco	4	0,49 ^{ns}	0,41 ^{ns}	67,65 ^{ns}	0,0001 ^{ns}	0,07 ^{ns}	14,06 ^{ns}	737,51 [*]
Resíduo	16	0,24	0,93	119,60	0,0007	0,10	4,19	195,93
C.V. (%)		2,43	8,17	10,33	2,92	6,52	17,65	13,14

DAP: Dias após plantio; FV: Fonte de Variação; GL: Grau de Liberdade; C.V. (%): Coeficiente de Variação; ns: Não significativo a 5% e 1% de probabilidade; **: significativo a 1% e *: significativo a 5% de probabilidade.

2.2.5 Sólidos solúveis totais

Os sólidos solúveis totais (SST) das variedades CTC9002, RB036066 e RB966928 foram os melhores, apesar de estatisticamente a variedade RB966928 não diferir do RB867515 e CTC9003. Para o índice de maturação (IM) os maiores valores foram para RB966928 e RB036066, sendo esta última igual estatisticamente RB867515, CTC9003 e CTC9002 (Tabela 5). A maturação da cana-de-açúcar é um processo fisiológico que envolve a síntese de açúcares nas folhas, translocação a partir das folhas dos produtos formados e armazenamento de sacarose no caule, especificamente nos parênquimas (Wang *et al.*, 2013).

Os teores de sólidos solúveis observados, independente do cultivar, são considerados adequados para o momento da colheita visto que estão acima de 18° Brix. Souza *et al.* (2012), avaliando o desempenho agroindustrial de 11 clones e 15 variedades comerciais de cana-de-açúcar, descreveram variação no momento da colheita de 17,50 a 20,75° Brix. Assim como, o índice de maturação para a colheita é adequado visto que estão acima 0,85, observando uma faixa variando <0,6 (cana verde) à >1,0 (cana em declínio de maturação) (Rossetto, 2022). A maturação da cultura depende de uma combinação complexa de variáveis climáticas, potencial genético e manejo da cultura (Cardozo; Sentelhas, 2013).

Vale ressaltar que as variedades atingiram a maturidade aos 330 DAP e não aos 360 DAP conforme é esperado para os plantios na época de outubro-dezembro, o que reforça a essencialidade do acompanhamento do índice de maturação. Verma *et al.* (2019), estudando a comunicação fonte-dreno e o metabolismo da sacarose da cana-de-açúcar, observaram que aos 300 e 330 DAP, houve um aumento no conteúdo de sacarose nos tecidos de origem (folhas) devido ao declínio da demanda do dreno (colmos), pois à medida que o dreno atinge a saturação o mesmo envia um sinal de *feedback* para a fonte, resultando no declínio na expressão de sacarose fosfato sintase e outros genes fotossintéticos.

Pereira *et al.* (2017), analisando os teores de açúcares durante a fase de maturação de quatro cultivares, descreveram que o caldo extraído do terço superior (entrenós 1-4) apresenta maior teor de glicose e frutose, enquanto o maior acúmulo de sacarose ocorre no terço inferior (entrenós 5-8), estes são favorecidos por temperaturas relativamente baixas e por um período de restrição hídrica, fatores que promove a conversão dos açúcares redutores em sacarose.

2.5.6 Peso de dez colmos (P10C) e toneladas de colmos por hectare (TCH)

No peso de dez colmos as variedades RB867515, RB036066 e CTC9002 apresentaram os maiores valores, porém CTC9002 foi estatisticamente igual a CTC9003, a qual não diferiu RB966928 (Tabela 5). Para a toneladas de colmos por hectare (TCH) houve diferença significativa sendo em média os maiores valores de 127,17 e 113,75 Mg ha⁻¹, respectivamente, para a variedade CTC9002 e RB0366066 (Tabela 5). Vale destacar que as variedades RB867515 e RB036066 foram iguais estatisticamente e todos os materiais frente ao manejo em nível de cachaçaria apresentaram bons resultados, com produtividade acima da média na região Sudeste (85,04 Mg ha⁻¹) e nacional (81,12 Mg ha⁻¹) estimada para a safra 2023/24 (Conab, 2024).

O canavial rentável deve geralmente atender os pressupostos dos “3 dígitos”, ou seja, uma produtividade média maior ou igual a 100 Mg ha⁻¹ em cinco ciclos de desenvolvimento consecutivos. De acordo com Landell (2017), a produtividade dos três dígitos é construída a partir do estabelecimento de canaviais, especialmente os que apresentem produtividades de 1º corte, entre 120-140 Mg ha⁻¹ com redução gradativa, portanto para atingir quedas de produtividades situadas na faixa adequada (5-10%), devem ser tomadas ações para mitigar o pisoteio, o arranque das touceiras no momento da colheita e outras operações que prejudicam o canavial. Portanto, visto a importância do canavial “3 dígitos”, pode se deduzir que apenas a variedade CTC9002 se enquadra dentro deste limite do primeiro corte.

A cana-de-açúcar promove rendimento médio de 60 a ≥100 toneladas por hectare, podendo variar dependendo, dentre vários fatores, do clima, variedade, práticas de manejo, tipo de solo e o período de colheita (Cardoso et al., 2018). Barbosa *et al.* (2021), avaliando a produtividade de três variedades de cana-de-açúcar, observaram todas as produtividades acima de 100 Mg ha⁻¹, independente do ambiente de produção, para as plantas colhidas no primeiro ciclo aos 415 DAP, porém no segundo ciclo houve produtividades abaixo de 100 Mg ha⁻¹ com a colheita aos 380 dias após o corte (DAC), reforçando a importância dos fatores citados anteriormente, principalmente o período de colheita e as práticas de manejo da cultura.

Além, vale ressaltar que as épocas de plantio impacta de forma significativa a produtividade, devido às condições climáticas distintas sobre o crescimento vegetativo. Aude *et al.* (1992), descreveram que o plantio da cana-de-açúcar feito entre agosto e setembro, a produtividade é significativamente maior ao completar 12 meses de

crescimento, por outro lado os plantios realizados de janeiro a março, a melhor produtividade é alcançada ao colher a cana com 18 meses de idade. Munsif *et al.* (2018), também observaram variação de produtividade devido a época de plantio que proporciona ao canavial enfrentar a sazonalidade climática da região.

2.5.7 Litro de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC) e litro de cachaça por tonelada de colmo (LCT)

O litro de caldo de dez colmos (L10C) apresentou maior quantidade na variedade RB036066 que foi estatisticamente igual CTC9002 (Tabela 5). No rendimento esperado de cachaça (REC) o maior valor foi da variedade RB036066 (14,45 mil litros), a qual foi igual estatisticamente a CTC9002 (14,38 mil litros) e RB867515 (10,67 mil litros), por fim, essa última variedade não diferiu da CTC9003 e RB966928 (Tabela 5).

O REC da RB036066 e CTC9002, respectivamente, 35,4% e 34,7% superiores a variedade padrão plantado nas cachaçarias de alambique (RB867515). Além disso, é possível observar que o REC de todas as variedades seguiu o comportamento de suas respectivas concentrações de SST, ou seja, devido ao processo de padronização do caldo para 14-16 °Brix (Schwan; Dias, 2020), ocorre como consequência aumento na quantidade de mosto para fermentação e destilação, refletindo sobre o acúmulo máximo do REC.

O maior armazenamento dos colmos pode está diretamente ligado ao desenvolvimento em tamanho e diâmetro da cana-de-açúcar, que podem proporcionar maior quantidade de células parenquimatosas, onde a sacarose é especificamente armazenada nos vacúolos das células do parênquima-tronco quanto no apoplasto que circunda essas células (Wang *et al.*, 2013), e isto promoveu o desempenho médio de 14,45 e 14,38 mil litros por hectare de cachaça, respectivamente, para variedade RB036066 e CTC9002 (Tabela 5). Vale ressaltar que este rendimento estimado de cachaça do presente estudo não fraciona em “cabeça”, “coração” e “cauda” o destilado, sendo a separação ligada ao produto que deseja ser ofertado no mercado.

A produtividade dos colmos por hectare (TCH) também afetou o REC médio das variedades, sendo possível observar que as variedades RB966928 e CTC9003 que apresentaram menor resultado REC médio também foram as que apresentaram a menor produção de colmos. Portanto, é possível destacar que uma elevada produtividade de

colmos associada ao teor de sólidos solúveis regula tanto a quantidade de diluições do caldo quanto à quantidade de mosto destinado para a fermentação, consequentemente, o rendimento de cachaça (Medeiros *et al.*, 2017).

O litro de cachaça por tonelada de colmo (LCT) resultou o maior valor para a variedade RB036066 (127,80 L Mg⁻¹) e CTC9002 (113,71 L Mg⁻¹), sendo essa última igual estatisticamente as demais. Este parâmetro proporciona uma análise geral da produção em litros de cachaça por área, apesar de não quantificar a parte nobre da cachaça conhecida como “coração”, ajuda o produtor acompanhar a evolução do seu canavial em litros totais.

Dessa forma, é possível observar que mesmo a TCH sendo baixa, a quantidade em litros de cachaça por hectare pode se equiparar a variedade de TCH maior, visto isso em média para a variedade RB966928 quando comparado a RB867515. E isto pode ser atribuído ao teor de SST que proporciona maiores diluições do caldo, à capacidade de desenvolvimento vegetativo da variedade frente às condições edafoclimáticas impostas, o controle de qualidade do processo agroindustrial, dentre outros fatores. Portanto, muitos são as variáveis que podem afetar o rendimento de cachaça por hectare, onde algumas ainda não são exploradas em nível de variedades. Nesse contexto, vale destacar que as variedades RB036066 e CTC9002 foram as melhores, respectivamente, em LCT e TCH, com ambas apresentando o maior resultado em média de REC.

Tabela 5 - Sólidos solúveis totais (SST, °Brix), índice de maturação (IM), peso de dez colmos (P10C), toneladas de colmo por hectare (TCH), litros de caldo de dez colmos (L10C), rendimento esperado de cachaça (REC) e litros de cachaça por tonelada (LCT), das variedades de cana-de-açúcar. Perdões, Minas Gerais, safra 2022/23, cana-planta.

Variedades	SST (°Brix)	IM	P10C (kg)	TCH (Mg ha ⁻¹)	L10C (L)	REC (mil L ha ⁻¹)	LCT (L Mg ⁻¹)
RB867515	19,40 b	0,87 b	14,32 a	105,40 bc	6,03 c	10,67 ab	94,27 b
CTC9003	19,50 b	0,91 b	10,68 bc	91,16 c	3,97 c	9,37 b	93,60 b
RB966928	20,20 ab	0,97 a	8,81 c	91,96 c	3,58 c	9,15 b	99,25 b
CTC9002	20,70 a	0,91 b	12,54 ab	127,17 a	5,38 b	14,38 a	113,71 ab
RB036066	21,00 a	0,92 ab	12,90 a	113,75 ab	5,77 ab	14,45 a	131,68 a
C.V. (%)	2,43	2,92	8,17	10,33	6,52	17,65	13,14
Média geral	20,16	0,92	11,85	105,88	4,95	11,61	106,50

As médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3. CONCLUSÃO

As variedades CTC9002 e RB036066 lideraram em toneladas de colmo por hectare (TCH), mostrando maior eficiência na produção de biomassa. Durante a primeira hora de fermentação os sólidos solúveis foram em média gerais de 6,30° Brix, com o pH variando entre 4,00 e 4,33. No rendimento esperado de cachaça a variedade RB036066 alcançou o maior valor (14,45 mil litros), seguido pela CTC9002 (14,38 mil litros) e RB867515 (10,67 mil litros).

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, Berlin, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AUDE, M. I. S. *et al.* Época de plantio e seus efeitos na produtividade e teor de sólidos solúveis no caldo da cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 22, p. 131-137, 1992.
- ARAÚJO, R. M. *et al.* Condições agrometeorológicas para perfilhamento máximo da cultura de cana-de-açúcar em dois ambientes distintos de produção. **Agrometeoros**, São Carlos, v.25, n.1, p.257-264, 2017.
- BARBOSA, A. M. *et al.* Energy conversion efficiency in sugarcane cultivars as a function of production environments in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 150, p. 111500, 2021.
- BENNETT, C. G. S. *et al.* Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1661- 1667, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 539, de 26 de dezembro de 2022**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 250, p. 32, 27 dez. 2022.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: quarto levantamento da safra 2023/24. v. 11, n. 44. Brasília, 2024.
- COSTA, C. T. S. *et al.* Growth and productivity of sugarcane varieties under various irrigation levels. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 29, n. 4, p. 945-955, 2016.
- CANTARELLA, H. *et al.* (Ed.). Boletim 100: Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. Versão Atualizada. São Paulo: IAC, 2022. 500 p.
- CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, p. 449-456, 2013.
- CARDOSO, T. F. *et al.* Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 68-82, 2018.
- COSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. 5. ed. São Paulo: Consecana, 2006. 111 p.
- CURSI, D. E. *et al.* History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech**, Nagpur, v. 1, n. 1, p. 1-22, 2021.
- DIAS, C. M. O. *et al.* Indicadores fitotécnicos, de produção e agroindustriais em cana de açúcar cultivada sob dois regimes hídricos. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 3, p. 58-65, 2012.
- DIOLA, V.; SANTOS, F. **Fisiologia**. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool: tecnologias e perspectivas. Viçosa: Editora UFV, 2010. p. 25-49.

- FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs: Sisvar. **Brazilian Journal of Biometrics**, São Paulo, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- LANDELL, M. G. A. Vale quanto mede: construindo e mantendo um canal de três dígitos. **Revista Opiniões**, 2017. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/artigo-construindo-mantendo-canavial-tres-digitos-010617>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- MANHÃES, C. M. C. *et al.* Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Vértices**, Maceió, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015.
- MARAFON, A. C. Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documents, (INFOTECA-E), São Carlos: Embrapa, 2012. 31 p.
- MEDEIROS, A. B. P. *et al.* **Cachaça and Rum**. In: PANDEY, A. *et al.* (Eds). Current Developments in Biotechnology and Bioengineering. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 451-468.
- MIRANDA, A. S. *et al.* Yield and technological performance of sugarcane cultivars grown under Af climate conditions. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 41, n. 1, p. 73-82, 2020.
- MORAIS, K. P. *et al.* Produtividade de colmos em clones de cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 64, p. 291-297, 2017.
- MOORE, P. H.; MARETZKI, A. **Sugarcane**. In: ZAMSI, E.; SCHAFER, A. A. (Orgs.). Photoassimilate distribution in plants and crops. 1. ed. Routledge, 1996. p. 643-670.
- MUNSIF, F. *et al.* Influence of planting date on yield and quality of sugarcane under the agro-climatic conditions of Mardan. **Sarhad Journal of Agriculture**, Peshawar, v. 34, n. 3, p. 649-655, 2018.
- OLIVEIRA, R. A. *et al.* Crescimento e Desenvolvimento de Três Cultivares de Cana-de-Açúcar, em Cana-Planta, no Estado do Paraná. **Scientia Agraria**, Botucatu, v. 5, n. 1-2, p. 87-94, 2004.
- OLIVEIRA, E. C. A. *et al.* Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, p. 951-960, 2010.
- PEREIRA, L. F. M. *et al.* Sugars levels of four sugarcane genotypes in different stem portions during the maturation phase. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 89, p. 1231-1242, 2017.
- PIMENTEL, G. V.; ANDRADE, L. A. B. **Produção de aguardente de cana**. In: CARDOSO, M. G. (Org.). Cultura da cana-de-açúcar. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 25-61.
- RODOLFO JUNIOR, F. *et al.* Produtividade e qualidade de variedades de cana-de-açúcar de terceira soça sob regime hídrico variável. **Nativa**, Uberlândia, v. 4, n. 1, p. 36-43, 2016.
- ROSSETTO, R. **Cana**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao->

tecnologica/cultivos/cana/producao/planejamento-da-colheita/colheita/maturacao.
Acesso em: 29 mar. 2024.

SANCHES, G. M. *et al.* Precision production environments for sugarcane fields. **Scientia Agricola**, Botucatu, v. 76, n. 1, p. 10-17, 2019.

SANTOS, V. R. *et al.* Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 389–396, 2009.

SANTOS, H. C. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018. 356 p.

SANGHERA, G. S. *et al.* Climate change impact in sugarcane agriculture and mitigation strategies. **Harnessing Plant Biotechnology and Physiology to Stimulate Agricultural Growth**, Hershey, v. 1, n. 1, p. 99-115, 2019.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V. *et al.* (Eds.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

SILVA, F. C. *et al.* Sistema de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos. In: SILVA, F. C. **Qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima**. 1. ed. Distrito Federal: Embrapa, 2015. p. 123-145.

SILVA, C. J. *et al.* Crescimento e produção de variedades de cana-de-açúcar sob irrigação suplementar e sequeiro. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 36, n. 4, p. 885-896, 2023.

SILVA, W. K. D. M. *et al.* Sugarcane production and climate trends in Paraíba state (Brazil). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 6, p. 1-12, 2020.

SINGELS, A. *et al.* Sugarcane. In: SANDRAS, V. O.; CALDERINI, D. F. (Eds.). **Crop physiology case histories for major crops**. 1. ed. Academic Press, 2021. p. 674-713.

SOUZA, L. M. *et al.* **Produção de cachaça de qualidade**. 1. ed. Piracicaba, SP: Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição, ESALQ - USP, 2013. 72 p.

SOUZA, P. H. N. *et al.* Avaliação de genótipos de cana-de-açúcar para início de safra na Microrregião Centro de Pernambuco. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, p. 677-683, 2012.

SCHWAN, R. F.; DIAS, D. R. Fermentação. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 91-111.

VERMA, I. *et al.* Expression analysis of genes associated with sucrose accumulation and its effect on source–sink relationship in high sucrose accumulating early maturing sugarcane variety. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, New Delhi, v. 25, n. 1, p. 207-220, 2019.

WANG, J. *et al.* Carbon partitioning in sugarcane (*Saccharum species*). **Frontiers in plant science**, Lausanne, v. 4, n. 1, p. 201, 2013.

ARTIGO 2: COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DA CACHAÇA DE ALAMBIQUE EM VIRTUDE DOS CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

A cachaça é uma bebida destilada brasileira produzida a partir do caldo da cana-de-açúcar, fermentado e destilado. O plantel varietal das fazendas destinadas a produção da cachaça de alambique no território brasileiro geralmente é constituído predominantemente pela RB867515 e outras variedades muitas vezes desconhecidas pelos produtores. Portanto, objetivou-se avaliar novas variedades de cana-de-açúcar, visando diversificar o plantel varietal das propriedades, observar se as variedades diferem na composição físico-química da cachaça. A fermentação e destilação foram realizadas na Cachaçaria João Cassiano, Candeias-MG (latitude 20° 45' 13"S, longitude 45° 16' 53"W, altitude 979 m). O delineamento experimental, o preparo do solo e o manejo agrônômico das cultivares foram realizados como descritos na parte I do artigo, sendo conduzido em delineamento em blocos casualizados, composto os tratamentos por cinco variedades de cana-de-açúcar (RB966928, RB867515, RB036066, CTC9002 e CTC9003), em cinco repetições. As características tecnológicas determinadas do vinho fermentado após uma hora (a cuba completa) foram o teor de sólidos solúveis totais (SST), pH e a contagem da população microbiana (bactérias e leveduras). Os parâmetros físico-químicos analisados da cachaça foram o grau alcoólico, exame organoléptico, acidez volátil, ésteres, aldeídos, álcoois superiores, furfural, metanol, álcool sec-butílico e n-butílico, carbamato de etila, acroleína e cobre. Analisando os sólidos solúveis a maior e menor concentração foi para as variedades CTC9003 e RB036066, respectivamente. Para o potencial hidrogeniônico (pH) é possível observar, independentemente da variedade, a variação na faixa de 4,00 a 4,33. A população microbiana em média para as leveduras e bactérias, respectivamente, apresentaram os valores de 10^7 e 10^3 UFC/mL. Nas características físico-químicas da cachaça a variedade CTC9003 apresentou uma concentração de cobre acima do limite da legislação, possivelmente devido à baixa higienização do alambique. No geral, as variedades promoveram cachaça dentro dos padrões legais para todos os componentes avaliados.

Palavras-chave: bebida destilada; produtividade; rendimento alcoólico; *Saccharum* spp.

1 INTRODUÇÃO

A composição química da cachaça depende da matéria-prima, leveduras, fermentação, destilação e processos de envelhecimento. A cachaça é uma bebida destilada brasileira produzida a partir do caldo da cana-de-açúcar, fermentado e destilado (Brasil, 2022). Esta é produzida apenas no Brasil e tem teor alcoólico de 38-48% (v/v) (Brasil, 2022). A produção da cachaça inclui tanto a prática do campo quanto a industrial. As práticas de campo incluem plantio de cana-de-açúcar, colheita e transporte, com práticas industriais envolvendo recepção, extração de caldo, fermentação, destilação, padronização e envelhecimento (Da-Silva et al., 2023).

Com relação às práticas de campo, se destaca o manejo varietal onde se busca por variedades de cana-de-açúcar com alto rendimento de colmos, teor de fibra médio/baixo, alto teor de sacarose, resistência as principais pragas e doenças, fácil despalha e período de utilização industrial longo (Pimentel; Andrade, 2020). Assim, a escolha de variedades adaptadas às condições edafoclimáticas de cultivo é primordial para formar o canavial ideal e diversificar o plantel varietal que, muitas vezes, é composto por matérias desconhecidos e a RB867515.

Posteriormente ao campo, se inicia a fermentação, onde as leveduras transformam os açúcares do caldo em vinho com a formação de etanol, dióxido de carbono e outros metabólitos. A composição do caldo de cana reflete as cultivares e a adaptação ao meio ambiente (Da-Silva, et al., 2023). As leveduras ambientais são diversas e incluem *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces*, *Pichia*, *Debaryomyces*, *Kloeckera*, *Zygosaccharomyces* e *Candida* (Schwan; Dias, 2020). Embora a levedura primária - *Saccharomyces cerevisiae* - seja predominante durante a fermentação, às fermentações em lote são facilmente contaminadas por microrganismos ambientais (Schwan; Dias, 2020). Em seguida, o mosto fermentado é destilado para produção da cachaça, onde a destilação seleciona e concentra os compostos voláteis formados durante a fermentação para melhorar as características sensoriais da bebida (Ratkovich et al., 2023).

Dessa forma, garantir o controle qualidade desde o plantio até a produção da cachaça com a higienização das dornas de fermentação e do alambique, associado ao uso de variedades de procedência conhecida (resistentes as principais doenças e adaptadas às condições edafoclimáticas da propriedade) é primordial para fortalecer a cadeia produtiva da cachaça. Portanto, objetivou-se avaliar novas variedades de cana-

de-açúcar, visando diversificar o plantel varietal das cachaçarias, observar se as variedades diferem na composição físico-química da cachaça, e ressaltar a importância do controle de qualidade do plantio até a colheita.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido na Cachaçaria João Mendes, localizada no Município de Perdões-MG, com altitude de 907 m (latitude 21° 03' 18'' S e longitude 45° 00' 15'' W), na safra 2022/23. O clima da região caracteriza-se como tipo Cwa, pela classificação de Köppen, com uma precipitação pluviométrica média anual de 1500 mm (Alvares *et al.*, 2013). A moagem, fermentação e a destilação foram conduzidas na Cachaçaria João Cassiano, Candeias-MG (latitude 20° 45' 13''S, longitude 45° 16' 53''W, altitude 979 m).

2.2 Delineamento e condução experimental

O delineamento experimental, o preparo do solo e o manejo agrônômico das cultivares foram realizados como descritos na parte I do artigo, sendo conduzido em delineamento em blocos casualizados, composto os tratamentos por cinco variedades de cana-de-açúcar (RB966928, RB867515, RB036066, CTC9002 e CTC9003), com cinco repetições.

2.3 Preparação do mosto e das leveduras

Em consequência da colheita (27/10/2023) coletaram-se 10 colmos aleatoriamente de cada parcela para composição de um feixe de 50 colmos por variedade. Na sequência (< 4h do corte) os feixes foram transportados para a Cachaçaria João Cassiano.

O caldo foi extraído por moenda e submetido à filtração (peneira de 60 mesh) visando à retirada de impurezas grosseiras (bagacilho). Para obtenção do mosto de cada variedade, foi realizada a diluição do caldo com água potável de abastecimento público,

para ajustar a concentração de sólidos solúveis para 15° Brix, com o pH médio geral situando entre 5,0-5,8, na temperatura de 28-32°C.

Na preparação da levedura foi constituído pela CA-11 (dose recomendada pelo fabricante: 500-1000 g de levedura seca para 1.000 L de mosto de cana), o ajuste do pH não foi realizado, uma vez que esta levedura apresenta como característica a habilidade de acidificar o meio. Com isso, para hidratação do fermento foram diluídos 250 g de fermento em 2,50 L de água potável. A primeira alimentação foi realizada após 30 minutos utilizando 5,0 L de suco a 10° Brix, quando o Brix reduziu para 2°, foram adicionados mais 10 L de suco. Este processo foi repetido até que a biomassa necessária para formar o starter de levedura fosse obtida.

2.4 Processos de fermentação

O processo de fermentação foi realizado em cinco cubas de aço inox de base cônica e capacidade de trabalho de 50 L (uma para cada variedade), onde as leveduras são separadas do mosto por sedimentação. Foram realizadas cinco alimentações, a primeira de 5,0 L, após 30 minutos foi feita a segunda alimentação e, em seguida as demais alimentações em intervalado de 1,5 horas, com 10 L de mosto a 15 °Brix. O fim da fermentação foi determinado quando o valor Brix do vinho fosse inferior ou igual a 1°, ou quando fosse atingido o limite máximo de 24h de fermentação. Após a conclusão, 25 L da cuba foi desviada pela abertura lateral para a destilação do vinho para cada variedade, em alambique de cobre com capacidade para 50 L de vinho.

2.5 Processo de destilação

O processo de destilação foi realizado com a coleta de três destilados: a “cabeça”, o “coração” e a “cauda”. A coleta da fração “cabeça” foi padronizada a 1% e a coleta da fração “coração” foi de 10-12% para todas as variedades. O alambique utilizado foi do tipo coluna de cabeça quente com entrada do mosto fermentado, saída de vinhaça, panela (50 litros, formato cilíndrica), tubo condensador, tanque condensador, entrada de água de resfriamento, saída de água aquecida, serpentina do condensador e saída de destilado. O aquecimento foi realizado por fogo direto na panela, controlando a temperatura para permanecer constante em 90°C.

2.6 Características avaliadas do mosto em fermentação e da cachaça

As características tecnológicas determinadas do vinho fermentado após uma hora (a cuba completa) foram o teor de sólidos solúveis totais (SST) (refratometria direta) e pH (determinação direta, com correção de temperatura) (Ctc, 2005). Para crescimento e isolamento de leveduras foi utilizado o meio de cultura YEPG com pH 3,5 [(g/L: extrato de levedura 10 (HiMedia), glicose 20 (Dinamica), peptona 20 (HiMedia) e ágar 20 (HiMedia)].

Para crescimento e isolamento de bactérias foi utilizado o meio de cultura Ágar Nutriente com 0,4% de nistatina [Prati Donaduzzi], sendo utilizado 28 g para cada litro de água destilada. A técnica de diluição seriada foi realizada com diluições de 10^{-1} a 10^{-5} UFC/mL e plaqueadas em triplicata. As placas de petri foram incubadas a 28 °C para leveduras e 37 °C para bactérias por 48 h. Após o crescimento dos microrganismos, foi realizada a contagem das colônias a olho nu tanto de leveduras quanto de bactérias, expressos em base logarítmica UFC/mL.

A análise das características físico-químicas da cachaça por variedade de cana-de-açúcar foi realizada conforme as especificações estabelecidas pela Instrução Normativa nº 24, de 08/09/2005 do MAPA (Brasil, 2005). Os parâmetros analisados foram o grau alcoólico, exame organoléptico, acidez volátil, ésteres, aldeídos, álcoois superiores, furfural, metanol, álcool sec-butílico e n-butílico, carbamato de etila, acroleína e cobre no Laboratório de Análise de Qualidade de Aguardente/UFLA.

2.7 Análises estatísticas

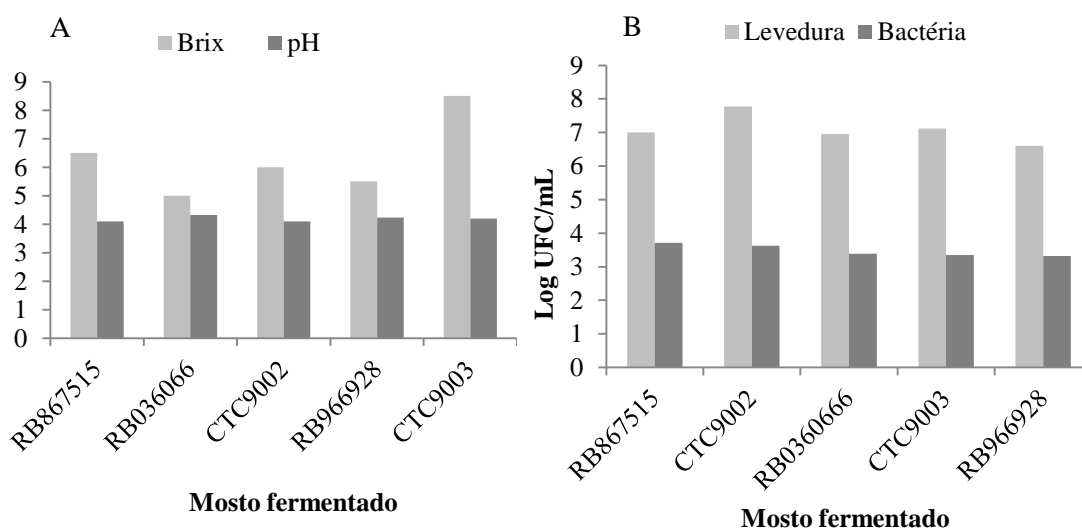
Os dados foram analisados através de estatística descritiva tanto do mosto fermentado (média) quanto das características físico-químicas da cachaça (média e desvio padrão), em duas repetições. Além disso, foi realizada uma análise de agrupamento e gerado um dendrograma, por meio do software Past3 (Paleontological STatistics, Version 3.20, Oslo, Noruega) (Hammer *et al.*, 2001), na qual o índice de similaridade Euclidiana foi calculado para cada combinação de cinco parâmetros (grau alcoólico, acidez volátil, álcoois superiores, aldeídos e ésteres). Sendo que as matrizes foram padronizadas, dividindo-se o valor de cada elemento pelo desvio padrão da respectiva matriz, com a finalidade de reduzir a amplitude de variação em cada uma delas.

2.8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.8.1 Características do mosto em fermentação

No processo de fermentação os parâmetros sólidos solúveis (SS, °Brix) e o potencial hidrogeniônico (pH) foram analisados (Figura 1A). Assim como, ocorreu a quantificação de microrganismos (bactérias e leveduras) do mosto em uma hora de fermentação (Figura 1B).

Figura 1 - pH, °Brix (A) e população total de leveduras e bactérias (B) durante fermentação de 1 hora, por variedade. Alambique João Cassiano, Candeias, Minas Gerais.



Dessa forma, analisando os sólidos solúveis a maior e menor concentração foi para as variedades CTC9003 e RB036066, respectivamente, com resultado médio geral para esta característica tecnológica de 6,30° Brix (Figura 1A). Para o teor de sólidos solúveis é importante destacar que todos os caldos foram padronizados a 15° Brix para o início da fermentação, estando no padrão desejável 14-16° Brix para o processo (Medeiros *et al.*, 2017; Schwan; Dias, 2020). Portanto, levando em consideração o abastecimento gradativo das dornas, o teor do mosto fermentado na primeira hora de fermentação após as dornas completas variou de 5,00 a 8,50° Brix. Schwan *et al.* (2001), estudando sobre a microbiologia e fisiologia do processo da cachaça,

observaram na primeira hora de fermentação o máximo de 9° Brix em cachaçaria na mesma região e levedura selecionada (CA-11).

Nesse contexto, vale destacar a importância do controle da concentração do °Brix do mosto para iniciar a fermentação, pois o excesso de açúcares pode comprometer o desempenho e multiplicação da *Saccharomyces cerevisiae*. Nesse contexto, a enzima invertase extracelular (β -D-frutose 1,6-bisfosfatase) responsável pela hidrólise de sacarose em glicose e frutose, presente nas células de *S. cerevisiae* e codificada por genes SUC, pode ser reprimida em altas concentrações de sacarose, glicose ou frutose, consequentemente, podendo paralisar ou retardar a taxa de crescimento de *S. cerevisiae* (Dijken *et al.*, 1993; Bokossa *et al.*, 1993; Herwing *et al.*, 2001; Badotti *et al.*, 2008). Nesta pesquisa, foi observado valor médio geral de 6,30° Brix e pH 4,20, independente da variedade. Schwan *et al.* (2001), observaram levando em consideração o pH 4,0 um valor médio de 5° Brix, corroborando com resultados desta pesquisa.

Os açúcares são os sólidos solúveis mais abundantes na solução de açúcar bruto do caldo, sendo o teor de sacarose o mais alto, representando mais de 85% do teor total, quando comparado aos teores de glicose e frutose (Huang *et al.*, 2017). Huang *et al.* (2017), descreveram que durante a fermentação do caldo da cana-de-açúcar, as concentrações de sacarose diminuíram rapidamente para um nível insignificante nas primeiras quatro horas, durante as quais as concentrações de glicose e frutose aumentaram em diferentes níveis. Portanto, este aumento é atribuído à hidrólise da sacarose em glicose e frutose pela invertase extracelular produzida por leveduras que em seguida são transportadas para a célula da levedura e convertidas em etanol (Muller *et al.*, 2023).

Com relação ao potencial hidrogeniônico (pH) é possível observar, independentemente da variedade, a variação na faixa de 4,00 a 4,33, sendo o comportamento médio geral de pH 4,20 (Figura 1A). Agu e Oduola (2021), descreveram que para uma melhor atuação do extrato de leveduras o pH pode estar situado entre 4,5 a 5,0, evitando-se um pH perto do ponto neutro pois a maioria das bactérias, incluindo as nocivas e micróbios indesejáveis podem causar perdas na fermentação. Entretanto, vale destacar que a levedura *Saccharomyces cerevisiae* utilizada nesta pesquisa, pode se desenvolver em $\text{pH} \geq 2,0$ conforme observado por Bassi *et al.* (2013). Todavia, mesmo frente à adaptabilidade da levedura *Saccharomyces cerevisiae* o ideal é sempre buscar as condições próximas ou ótimas de pH para garantir uma atuação eficiente e um mosto fermentado de alta qualidade.

Algumas pesquisas retratam a eficiência da *Saccharomyces cerevisiae* frente à variação de pH. Liu *et al.* (2015), que avaliando o efeito do pH sobre a fermentação de *Saccharomyces cerevisiae* durante a fermentação alcoólica, descreveram que uma cepa promoveu concentração máxima de etanol em pH 4,50 e 3,00 quando comparado ao pH 2,75 e 2,50. Lin *et al.* (2012), pesquisando sobre a fermentação do caldo da cana-de-açúcar por *Saccharomyces cerevisiae* BY4742 para a produção de etanol, observaram que o pH < 4,0 promoveu a formação de ácido acético, esse pode constituir até 70% do total de ácidos na bebida destilada e, evidentemente, uma alta concentração de ácidos resulta em características sensoriais desagradáveis (Cardoso, 2020; Cardoso *et al.*, 2022).

O pH na faixa adequada pode evitar o prolongamento na fase de latência e inibição do crescimento das leveduras fermentativas (pH 4,5 – 5,0), assim como reduz o desenvolvimento de bactérias acéticas (pH \leq 3,0) ou de bactérias lácticas ($4,00 \leq$ pH \leq 4,50) que são responsáveis por causar, respectivamente, redução da taxa de fermentação e deterioração do mosto fermentado (Schwan *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2015; Agu; Oduola, 2021). Contudo, esses resultados de sólidos solúveis (°Brix) e pH na primeira hora de fermentação podem indicar que o processo de conversão de açúcares em etanol e gás carbônico (fermentação alcoólica) iniciou de forma adequada. Além disso, vale ressaltar que a fermentação depende de outros fatores como temperatura, presença de oxigênio, matéria-prima e cepa da levedura (Narendranath; Power, 2005).

A população microbiana em média para as leveduras e bactérias, respectivamente, apresentaram os valores de 10^7 e 10^3 UFC/mL (Figura 1B). No desenvolvimento de leveduras e bactérias observa-se, respectivamente, as variedades CTC9002 (6×10^7 UFC/mL) e RB867515 (5×10^3 UFC/mL) com as maiores médias. O valor médio para levedura coincide com o observado por Schwan *et al.* (2001), entre 10^7 e 10^8 na primeira hora de fermentação, bem como as bactérias lácticas que ficaram entre 10^5 e 10^6 UFC/mL. Dessa forma, o resultado para as bactérias nesta pesquisa pode ser considerado adequado visto que ficaram $\leq 10^5$ UFC/mL para mosto em fermentação (Brexó; Sant'Ana, 2018).

Portugal *et al.* (2016), avaliando a dinâmica das principais populações microbianas na fermentação do caldo da cana-de-açúcar em onze dias, observaram que a partir do sétimo dia ocorre a concentração de etanol no meio em níveis expressivos, causando declínio na população de não-*Saccharomyces*. A interação microbiana de natureza negativa é mais desejada no processo de fermentação alcoólica, essa pode

ocorrer quando microrganismos produzem um composto antibiótico que mata o outro ou dificulta o seu crescimento e acesso a nutrientes (Torres-Guardado *et al.*, 2022). Portanto, a tolerância às condições de estresses abióticas, principalmente o etanol, impactam positivamente a dominância de *S. cerevisiae* em detrimento de espécies não-*Saccharomyces* (Comitini *et al.*, 2021).

Além disso, vale ressaltar que o grupo de maturação e época de colheita da variedade pode afetar a eficiência da fermentação, pois esses fatores estão diretamente ligados à quantidade de açúcares e microbiota presente nos colmos. Martini *et al.* (2010), avaliando microbiota (leveduras) do caldo de três variedades de cana-de-açúcar em três épocas de colheita, descreveram que o cultivar RB835486 (precoce) apresentou estabilidade no número de *Saccharomyces* ante as variedades médio-tardio (RB72454 e RB867515). Martini *et al.* (2011), concluíram que a proporção (%) de *Saccharomyces* aumenta com a maturidade da cana e indicaram para preparação do fermento natural as variedades de maturidade precoce a média, pois apresentam maior proporção de *Saccharomyces* no início da colheita.

Nesse contexto, as variedades desta pesquisa que poderiam ser indicadas para elaboração de um fermento natural, são RB966928 (precoce), CTC9003 (precoce), e CTC9002 (média) com base no grupo de maturação, como evidenciado por Martini *et al.* (2010 e 2011). Portanto, no processo fermentativo o controle dos fatores abióticos e bióticos, bem como o manejo varietal é de extrema importância, visto como a diversidade de microrganismos (leveduras e bactérias), o nível de sólidos solúveis (°Brix), o pH no mosto em fermentação e os grupos de maturação podem influenciar o sistema de produção da cachaça.

2.8.2 Características físico-químicas da cachaça (qualidade)

Os resultados das análises físico-químicas das cachaças foram realizados para cada variedade (Tabela 2). Portanto, os exames organolépticos figuraram normais, bem como todos os outros parâmetros analisados conforme os limites estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 2022), exceto para o teor de cobre da variedade CTC9003.

Tabela 2 - Resultados das análises físico-químicas das cachaças por variedade (cana-planta), safra 2022/23. Alambique João Cassiano, Candeias, Minas Gerais.

Parâmetros analisados								
Variedade	Grau alcoólico (% v/v)	Exame Org.	Compostos secundários (mg/100 mL) ^x					Congêneres (a, b, c, d, e)
			Acidez volátil ^a	Álcoois superiores ^b	Aldeídos ^c	Ésteres ^d	Furfural ^e	
RB867515	45,75±0,00	N	27,34±2,27	315,93±5,24	23,04±0,00	33,96±0,00	ND	400,27
RB966928	45,02±0,01	N	32,68±0,00	318,34±4,86	22,73±0,33	36,43±0,00	ND	410,18
RB036066	46,88±0,04	N	21,97±0,02	302,75±2,72	22,71±0,02	35,91±1,27	ND	383,34
CTC9002	46,55±0,02	N	25,29±0,01	308,83±9,98	23,76±0,29	30,60±1,28	ND	388,48
CTC9003	40,15±0,04	N	31,16±2,63	270,02±5,67	15,16±0,38	19,35±0,28	ND	335,69
Máx. Limite	48,0 - 38,0	-	150,0	360,0	30,0	200,0	5,0	650,0 - 200,0
Média Geral	44,87	-	27,68	303,17	21,48	31,25	ND	383,59

¹média ± desvio-padrão. Exame Org. = Exame organoléptico. N = Normal. ^xResultados corrigidos para mg/100 mL de etanol anidro. ^aComo ácido acético. ^cComo acetaldeído.

^dComo acetato de etila.

Com relação ao exame organoléptico (cor, aroma e sabor) todas as variedades apresentaram características normais, indicando que houve controle de qualidade (Granato *et al.*, 2014) nos processos de destilação (Vicente *et al.*, 2006) e, principalmente, do processo de fermentação (Amorim *et al.*, 2016). Portanto, a comunidade microbiana controlada durante o processo de fermentação é crucial na geração de compostos intermediários e secundários que possuem características organolépticas significativas (Gomes *et al.*, 2009). Na presente pesquisa o “pé-de-cuba” foi preparado com levedura selecionada (CA-11), o que pode estar intrinsecamente ligado com as características organolépticas normais. Ribeiro *et al.* (2017), quando comparou as leveduras nativas com a levedura CA-11, observaram que essa última promoveu cachaça com melhores características químicas.

Nesse sentido, é importante salientar que as leveduras não *Saccharomyces* frequentemente demonstram baixa eficiência na fermentação, contudo, a proliferação intensa desses microorganismos pode resultar em níveis prejudiciais de ácido acético, carbamato de etila, glicerol, sulfeto de hidrogênio e acetaldeído (Oliveira *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2009). Portanto, manter o controle eficiente dos processos fermentativos é essencial para reduzir a necessidade frequente de substituir e deslocar a microbiota ativa por potenciais microrganismos deteriorantes em cada ciclo de fermentação (Dato *et al.*, 2005).

O grau alcoólico apresentou maior média para as variedades RB036066 e CTC9002 (Tabela 2), porém destaca-se que todas as matérias ficaram dentro do padrão (54,0-38,0% v/v) estabelecido pela legislação (Brasil, 2022). O etanol é o principal álcool formado pela fermentação alcoólica, tem um limiar de percepção muito alto (100 ppm) e aroma pouco marcante, visto isso tem menos representatividade na formação do aroma da bebida (Cardoso, 2020; Silva *et al.*, 2023).

Apesar de sua importância existem poucas informações relacionando ao grau alcoólico na cachaça e a variedade de cana-de-açúcar. Na pesquisa de Cravo *et al.* (2019), que avaliaram as diferenças das características físico-químicas das variedades RB867515, SP832847, IAC862480, SP80-3280 e CTC11, descreveram que todas apresentaram bebidas com concentrações alcoólicas dentro dos limites exigidos para serem denominadas cachaça, porém vale ressaltar que as variedades não foram plantadas, fermentadas e destiladas no mesmo padrão.

Nestas variedades foram plantadas nas mesmas condições, conduzidas em um delineamento em blocos ao acaso, colhidas com a mesma idade e processadas sob as

mesmas condições e tempo. Essa padronização reforça a confiabilidade dos dados, reduzindo o efeito de outros fatores distintos, e destaca a importância dos nossos resultados para uma análise precisa da influência das variedades de cana-de-açúcar na composição da cachaça.

O resultado de acidez volátil para a variedade RB036066 foi o melhor e apesar das variações entre os materiais, todos ficaram dentro do padrão de 150 mg/100 mL de álcool anidro (Brasil, 2022). Nesta pesquisa as variedades apresentaram em média geral um valor de acidez de 27,68 mg/100 mL de álcool anidro. Por outro lado, com variedades sobre manejo agrônomico, fermentação e destilação de forma distinta a cachaça apresentou em média geral 31,65 mg/100 mL de álcool anidro para acidez volátil, como descreve Cravo *et al.* (2019). Os níveis de acidez em cachaças podem variar consideravelmente devido a vários elementos como a falta de higiene, a inclusão de frutas cítricas no mosto durante a fermentação, a presença de bactérias acética, ao oxigênio e ao tipo de levedo, logo isso tudo pode influenciar a conversão de açúcar para ácido acético (Cardoso, 2020).

Entretanto, vale ressaltar que o manejo agrônomico também pode influenciar nesta característica. Silva *et al.* (2020), avaliando cachaças de alambiques produzidas com diferentes cultivares (RB867515, RB966928 e RB855453) de cana-de-açúcar e manejo agrícola (ausência de adubação, adubação orgânica e convencional), observaram em média geral valores de 19,23 (variedades) e 23,05 (adubação orgânica e convencional) e 13,58 (ausência de adubação) mg/100mL de álcool anidro. Portanto, quando comparado estes resultados com os da presente pesquisa é notório que as cinco variedades em média geral apresentou maior acidez volátil, possivelmente devido à adubação convencional e ao ambiente de produção.

Além disso, é importante destacar que o armazenamento por mais de 24 horas após a colheita e o tipo de levedura utilizado na fermentação são outros fatores que podem afetar este parâmetro (Cravo *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2009). Com base nisso, é possível ressaltar que uma padronização desde o manejo agrônomico até os processos de fermentação e destilação também pode contribuir para a redução da variação da acidez volátil das cachaças produzidas no Brasil.

Os álcoois superiores são expressos pela soma dos álcoois n-propanol, isobutanol e isoamílico, em 100 mL de álcool anidro, com isso destacam-se as variedades RB966928 e RB036066, respectivamente, pois apresentaram a maior e menor concentração na bebida (Tabela 2), e analisando a média geral dos materiais é

possível observar que ficaram situados 18,74% abaixo do limite máximo de 360 mg por 100 mL de álcool anidro (Brasil, 2022). A formação desses compostos é maior quando a fermentação é conduzida de maneira lenta, devido à fraca atividade do fermento, à temperatura elevada e ao pH ácido (Cardoso, 2020).

Além disso, a cana quando é estocada antes da moagem também pode contribuir na formação de álcoois superiores (Cardoso, 2020). Conseqüentemente, os álcoois superiores, que são geralmente produzidos durante a fermentação, desempenham um papel crucial na definição do sabor e aroma da cachaça quando estão nos limites estabelecidos pela legislação (Nonato *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2019). Portanto, as condições de fermentação, a densidade de células de levedura, a temperatura e o teor alcoólico final podem ter um impacto substancial na sua produção (Ratkovich *et al.*, 2023).

Silva *et al.* (2020), observaram que os álcoois superiores das variedades RB867515, RB966928 e RB855453 apresentaram valores em média, respectivamente, de 262,06, 202,77 e 224,17 mg por 100 mL de álcool anidro, independentemente do manejo de adubação adotado. Este parâmetro na presente pesquisa apresentou maiores resultados respeitando o limite máximo permitido na bebida, e isto pode ser atribuído a fatores de higienização no momento da fermentação, composição microbiana do cultivar e, principalmente, a influência da separação das frações (“cabeça”, “coração” e “cauda”) de forma correta, visto que cada parte apresenta concentrações distintas de álcoois (Cardoso, 2020).

Dessa forma, o produtor deve se atentar que fora dos limites permitido os álcoois superiores e a acidez volátil são os componentes que apresentaram irregularidades mais significativas (Lima *et al.*, 2022). Portanto, o conhecimento das variedades, do ambiente de produção e das técnicas de fermentação e destilação são fatores cruciais para melhoria contínua dos processos de produção de cachaça, logo fundamental para promover o cumprimento dos padrões de qualidade e segurança.

A concentração de aldeídos totais na variedade CTC9003 apresentou o menor valor médio e juntamente com os demais materiais ficaram dentro dos limites aceitáveis, conforme mostra a Tabela 2 (Brasil, 2022). Estes são de grande importância na composição da cachaça, sendo os principais aldeídos o acetaldeído, o furfural e o hidroximetilfurfural, os quais apresentam odores enjoativos e são associados ao mal-estar, logo baixos teores são desejados em uma cachaça de boa qualidade (Silva *et al.*, 2020). A média geral de aldeídos obtida foi de 21,48 mg por 100 mL de álcool anidro,

representado 39,66% a menos que o limite máximo. Silva *et al.* (2020), estudando variedades de cana-de-açúcar observaram que o valor médio geral de 24,30 mg por 100 mL de álcool anidro e, baseado no manejo da cana-de-açúcar, atribuíram o maior teor (> 24,0 mg por 100 mL de álcool anidro) a adubação convencional ou orgânica.

Por outro lado, é importante mencionar que um dos principais aldeídos, o furfural, não foi detectado na bebida (Tabela 2), este quando presente pode contribuir para o odor pungente. Santiago *et al.* (2015), descreveram 3,5% de não conformidade para furfural em cachaça produzida em Minas Gerais. Bortoletto e Alcarde (2015), avaliando a qualidade química da aguardente de cana-de-açúcar e de cachaça, constataram que 2,10% das amostras não atendiam aos limites estabelecidos pela legislação (furfural + hidroximetilfurfural).

Portanto, a não detecção do furfural pode estar associado à ausência de queima da cana-de-açúcar na pré-colheita, a temperatura de destilação adequada (≤ 90 °C) e o baixo teor de sólidos presentes no vinho fermentado (Lima *et al.*, 2022). Além disso, a separação das frações da cachaça é um ponto crítico para controlar a concentração do furfural, onde a “cauda” por apresentar uma temperatura de ebulição mais alta e, compostos voláteis solúveis em água, concentra mais furfural (Ratkovich *et al.*, 2023).

No contexto geral, sobre os aldeídos totais e variedades de cana-de-açúcar é possível observar uma tendência de acúmulo no material RB867515, o qual na presente pesquisa em conjunto com a variedade CTC9002 foram os detentores dos maiores valores. SILVA *et al.* (2020), também observaram este comportamento na variedade RB867515 (28,21 mg/100 mL de álcool anidro) dentre os demais materiais analisados, com proximidade de 94,03% ao limite estabelecido pela legislação brasileira. Cravo *et al.* (2019), seguindo o mesmo padrão de descrição, observaram que o cultivar RB867515 (26,48 mg/100 mL de álcool anidro) apresentou a maior concentração sob as mesmas condições tanto edáficas e climáticas quanto de fermentação e destilação desta pesquisa.

Para a concentração de ésteres todas as variedades ficaram dentro do limite estabelecido pela legislação (Brasil, 2022), sendo a menor concentração para CTC9003 (Tabela 2). Portanto, este constituinte está presente na maioria dos compostos que promovem flavor e aroma das bebidas alcoólicas (Moreira *et al.*, 2012). Sua formação está ligada ao metabolismo de ácidos graxos por leveduras (através da alcoólise dos compostos Acil-CoA) ou, mais especificamente, em menor ocorrência pela esterificação entre ácidos graxos e álcoois (Serafim; Lanças, 2019). O acetato de etila e o lactato de

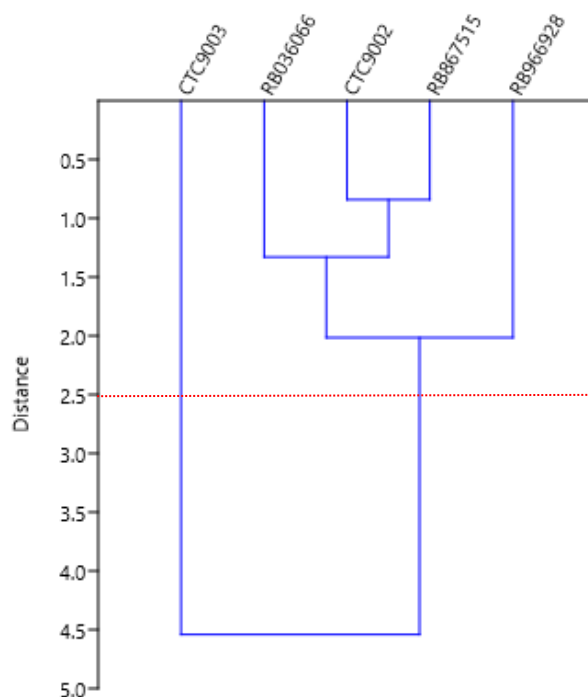
etíla são os principais componentes encontrados em bebidas alcoólicas destiladas, esses ésteres contribuem para o refrescante aroma floral e frutado da bebida (Gao *et al.*, 2014).

Dessa forma, vale ressaltar que a cachaça produzida em alambiques de cobre, como nesta pesquisa, apresentam teores mais elevados de acetato de etila e lactato de etila, quando comparado com a bebida destilada de colunas de aço inoxidável, pois estas apresentam maiores concentrações de octanoato de etila, decanoato de etila e laurato de etila (Nascimento *et al.*, 2008; Ratkovich *et al.*, 2023). Entretanto, nos destilados de cana-de-açúcar, os ésteres aromáticos são predominantemente formados durante o processo de envelhecimento, conferindo ao produto seu aroma forte característico e contribuindo para seu *bouquet* (Chaves; Póvoa, 1992).

Em suma, analisando o total dos compostos secundários é possível observar que as variedades RB966928 e RB867515 apresentaram a maior concentração devido ao elevado teor dos álcoois superiores, apesar disso todas as cachaças ficaram dentro do padrão da legislação (Brasil, 2022). Portanto, as variedades apresentaram em média geral 383,59 mg/100mL de álcool anidro, sendo este resultado com proximidade de 52,13% e 69,45%, respectivamente, ao limite mínimo e máximo de concentração permitida na cachaça.

No que concerne à análise de agrupamentos, com a aplicação do método Clássico, foi obtido o dendrograma, como mostra a Figura 2, para os valores médios de cinco parâmetros (grau alcoólico, acidez volátil, álcoois superiores, aldeídos e ésteres). Como pode ser visualizado, de forma inicial, podem ser indicados 2 (dois) grupos, a partir da variância existentes entre as referidas variedades de cana-de-açúcar.

Figura 2 – Dendrograma de dissimilaridade fenotípica



A variedade CTC9003 (grupo 1) e RB036066, CTC9002, RB867515 e RB966928 (grupo 2), possuem valores mais discrepantes e foram classificados em grupos distintos. Considerando o comportamento gerado no dendrograma, nota-se que a variedade CTC9003, a mais isolada e distante (Figura 1), por apresentar valores abaixo da média dos cinco parâmetros avaliados. Contudo, as demais variedades destacaram positivamente, com valores acima da média dos parâmetros avaliados, sendo os parâmetros de acidez volátil, álcoois superiores e ésteres para a variedade RB966928; aldeídos para CTC9002 e; grau alcóolico para RB036066.

2.8.3 Características físico-químicas da cachaça (contaminantes)

Os resultados das análises de contaminantes das cachaças foram realizados para cada variedade (Tabela 3). Portanto, é possível observar que todos os parâmetros médios analisados ficaram em conforme os limites estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 2022).

Tabela 3 - Resultados dos contaminantes das cachaças por variedade (cana-planta), safra 2022/23. Alambique João Cassiano, Candeias, Minas Gerais.

Variedade	Contaminantes					
	Cobre ^a	Álcool Metílico ^b	Álcool sec-butílico ^b	Álcool n-butílico ^b	Carbamato de etila ^c	Acroleína ^b
RB867515	2,35±0,32 ¹	<0,19±0,00	<0,48±0,00	<1,22±0,00	8,04±0,04	<0,48±0,00
RB966928	3,63±0,25	<0,19±0,00	<0,48±0,00	<1,22±0,00	8,81±0,17	<0,48±0,00
RB036066	2,70±0,08	<0,19±0,00	<0,48±0,00	<1,22±0,00	9,05±1,44	0,50±0,00
CTC9002	2,93±0,02	<0,19±0,00	<0,48±0,00	<1,22±0,00	8,77±0,64	<0,48±0,00
CTC9003	7,22±0,00	<0,19±0,00	<0,48±0,00	<1,22±0,00	9,99±0,65	<0,48±0,00
Limite Máx.	5,0	20,0	10,0	3,0	210,0	5,0
Média Geral	3,77	0,19	0,48	1,22	8,93	0,48

¹média ± desvio-padrão. ^aConcentração em mg/L; ^bResultados corrigidos para mg/100 mL de etanol anidro. ^cConcentração em µg/L.

O cobre apresentou maior concentração na bebida oriunda da variedade CTC9003 e ficou acima do limite máximo estabelecido pelo MAPA (Tabela 2). E isto pode ser justificado pela higienização ineficiente do alambique de cobre e ao fato da destilação iniciar com este material, pois em seguida o equipamento foi higienizado novamente e as demais variedades permaneceram em média 86,96% abaixo do limite aceitável deste metal na bebida destilada brasileira. Portanto, a correta sanitização para remover impurezas e o preenchimento do alambique e das serpentinas com água para diminuir a oxidação do cobre são ações que diminuem significativamente o risco de contaminação da cachaça por esse metal (Cardoso, 2020; Duarte *et al.*, 2014).

Na legislação brasileira o limite de cobre é 5,0 mg/L em bebidas destiladas (Brasil, 2022), porém em outros países as regulamentações são mais rígidas, limitando o teor a 2,0 mg/L (Ratkovich *et al.*, 2023). Dessa forma, é possível observar que as cachaças das variedades RB867515, RB036066 e CTC9002 apresentaram teor de cobre próximo ao exigido na legislação internacional, possivelmente devido a maior higienização do alambique após a destilação das primeiras variedades, respectivamente, CTC9003 e RB966928.

O aroma e sabor da cachaça são favorecidos pelo cobre presente na composição do alambique, mas este pode prejudicar o corpo humano e catalisar a formação de carbamato de etila quando presente em altas concentrações (Silva *et al.*, 2020). Para a redução do cobre quando presente na bebida pode ser adotado algumas medidas como o uso de carvão ativado (Lima *et al.*, 2006), matrizes de argila e carvão ativado (Zacaroni

et al., 2015), argilas de caulinita (Duarte *et al.*, 2014) e, fibra de coco como adsorvente deste metal na cachaça (Barbosa *et al.*, 2022).

O álcool metílico (metanol) apresentou concentração dentro dos limites da legislação e um padrão de presença na bebida para todos as variedades. Dessa forma, os resultados ficaram 99,05% abaixo do limite máximo, indicando como as boas práticas no tratamento do caldo da cana-de-açúcar são primordiais. A presença desse componente na cachaça está associada à presença de fragmentos (bagacilhos) de cana, os quais contém pectina que ao serem degradada durante o processo fermentativo por enzimas libera o metanol (Cardoso, 2020; Ratkovich *et al.*, 2023).

O metanol, quando ingerido por humanos, é oxidado em ácido fórmico, e depois em dióxido de carbono, o que pode causar acidose grave (aumento da acidez sanguínea), afetando o sistema respiratório, podendo causar coma e até morte (Maia, 1994). Vilela *et al.* (2021) avaliaram 38 amostras de aguardente de cana e todas as amostras apresentaram concentrações de metanol inferiores a 20 mg por 100 ml de álcool anidro.

Silva *et al.* (2020), descreveram que as variedades RB867515 e RB966928, respectivamente, apresentaram para o metanol 3,42 e 3,30 mg por 100 mL de álcool anidro, bem como houve efeito significativo do manejo com adubação orgânica, que apresentou menor concentração, do que as cachaças cuja cana na presença e ausência de adubação convencional. Apesar de estarem dentro do limite da legislação, as cachaças procedentes dessas variedades apresentaram maiores concentrações quando comparadas aos valores da presente pesquisa, indicando como o tratamento adequado do caldo e o manejo agrônomo da cana-de-açúcar pode afetar este parâmetro.

O álcool n-butílico e sec-butílico apresentaram concentração dentro dos limites da legislação e um padrão de presença na bebida para todos as variedades (Brasil, 2022). Dessa forma, os resultados ficaram 40,66% e 99,05% abaixo do limite máximo, respectivamente, para n-butílico e sec-butílico. A presença desse componente na cachaça está associada à fase de fermentação devida contaminação pela bactéria *Clostridium acetobutylicum*, suas toxicidades são relativamente elevadas em relação ao etanol (Santiago *et al.*, 2020).

Algumas pesquisas, como a realizada por Bortoletto e Alcarde (2015), com o objetivo de determinar a composição química da aguardente de cana e das cachaças brasileiras, descreveram que os contaminantes 2-butanol e n-butanol foram responsáveis, respectivamente, por 12,5% e 7,7% das amostras irregulares. Silva *et al.*

(2020), observaram que as variedades (RB867515, RB966928 e RB865453), para o n-butanol, independente do manejo de adubação, variaram de 0,96 a 1,20 mg por 100 mL de álcool anidro. Portanto, a contaminação bacteriana pode ser reduzida não deixando a cana próxima de estábulos ou locais de ordenha e não utilizar cana armazenada (Maia; Campelo, 2006; Cardoso, 2013).

O carbamato de etila (CE) para todas as variedades ficou dentro do padrão estabelecido pela legislação (Brasil, 2022), com proximidade média geral (8,92 µg/L) de apenas 4,25% do limite máximo. Este composto potencialmente carcinogênico que normalmente está presente em bebidas destiladas tem como precursores para sua formação a ureia, que pode estar presente no caldo de cana ou ter sido indevidamente adicionado ao mosto e, com o íon cianeto oriundo da degradação enzimática de glicosídeos cianogênicos presentes na cana-de-açúcar (Silva *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2022).

Dessa forma, vale destacar que a concentração desse componente ficou no limite máximo da antiga (<150 µg/L) e atual (<210 µg/L) legislação brasileira (Brasil, 2014; 2022). Na pesquisa de D'Ávila *et al.* (2016), quantificando o carbamato de etila de cachaças oriundas de alambiques de cobre e sob diferentes sistemas de fermentação, ambiente de produção e manejo agrônomico de variedades, observaram variação de concentração na cachaça da RB867515 no estado de Minas Gerais, nas cidades de Santa Barbara do Tugúrio (fermento natural), Toledo (levedura CA-11) e Perdões (fermento natural), respectivamente, 31,37, 14,21 e 12,29 µg/L. Cravo *et al.* (2019), analisando variedades em distintos manejos agrônomico, tanto quanto de fermentação e destilação, observaram uma grande variabilidade (4,47 - 49,48 µg/L) na concentração de carbamato de etila na cachaça.

A acroleína para todas as variedades ficou dentro do limite estabelecido pela legislação (Brasil, 2022). Os resultados em média gerais ficaram abaixo de aproximadamente 90% do limite máximo estabelecido. Este é um aldeído que pode ser formado durante a destilação da cachaça a partir da desidratação do glicerol ou pelos *lactobacilos* do mosto, que converte o glicerol em β-hidroxiacetaldeído (Ratkovich *et al.*, 2023). Masson *et al.* (2012), avaliaram setenta e uma amostras de aguardente de cana-de-açúcar provenientes de alambiques de pequeno e médio porte, descreveram que 9,85% das amostras testadas apresentaram níveis de acroleína acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira.

Na pesquisa de Ribeiro *et al.* (2017), sobre a composição e a qualidade do destilado final, comparando o fermento natural e selecionado (CA-11) no caldo da variedade SP83-2847, observaram acroleína nas bebidas apenas no processo de fermentação utilizando-se o fermento natural, porém dentro dos limites da legislação brasileira. Em consonância, na presente pesquisa utilizando a mesma levedura (CA-11) selecionada houve uma baixa presença deste componente.

Em suma, a variedade CTC9003 apresentou uma concentração elevada de cobre na cachaça, ultrapassando o limite estabelecido pela legislação brasileira, devido à higienização insuficiente do alambique de cobre. Além disso, o metanol, dentro dos limites legais, apresentou um padrão consistente em todas as amostras, destacando a importância das práticas adequadas no tratamento do caldo da cana-de-açúcar. A presença dos álcoois n-butílico e sec-butílico também permaneceram dentro dos limites estabelecidos, indicando boa prática na fermentação. Quanto ao carbamato de etila, todas as variedades mantiveram-se dentro dos padrões legais juntamente com a concentração de acroleína. Portanto, é de suma importância o controle de qualidade desde o plantio até a obtenção da cachaça para garantir níveis seguros desses componentes.

3. CONCLUSÃO

A fermentação inicialmente figurou dentro da normalidade com relação à quantidade tanto de leveduras quanto de bactérias no mosto em fermentação. Para a composição química da cachaça todas as amostras estavam dentro dos padrões legais para metanol, álcoois superiores, aldeídos, ésteres, carbamato de etila e acroleína, demonstrando a importância do controle de qualidade durante o processo de produção.

O cultivo de diversas variedades de cana-de-açúcar é vital para melhorar o desempenho agrônômico. Alinhamentos com a variedade RB036066 e CTC9002 mostraram potencial em vários aspectos avaliados, mas é necessário monitoramento contínuo para garantir que os padrões de qualidade sejam atendidos em todas as fases da produção. Este estudo enfatiza a importância de práticas de gestão e organização na produção de cachaça, com o objetivo de aumentar a produtividade e a excelência em qualidade.

REFERÊNCIAS

- AGU, K. C.; ODUOLA, M. K. Kinetic modeling of ethanol production by batch fermentation of sugarcane juice using immobilized yeast. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, Pune, v. 7, n. 1, p. 124-136, 2021.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, Hamburgo, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMORIM, J. C. *et al.* Sugar cane spirit (cachaça): Effects of mixed inoculum of yeasts on the sensory and chemical characteristics. **Food Research International**, Oxford, v. 85, n. 1, p. 76-83, 2016.
- BADOTTI, F. *et al.* Switching the mode of sucrose utilization by *Saccharomyces cerevisiae*. **Microbial Cell Factories**, Heidelberg, v. 7, n. 4, p. 1-11, 2008.
- BARBOSA, R. B. *et al.* Kinetic, thermodynamic and physical-chemical study of the removal of copper from cachaça using coconut fibers. **Food Additives & Contaminants**, Abingdon, v. 39, n. 9, p. 1544-1554, 2022.
- BASSI, A. P. G. *et al.* Effects of single and combined cell treatments based on low pH and high concentrations of ethanol on the growth and fermentation of *Dekkera bruxellensis* and *Saccharomyces cerevisiae*. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 29, n. 1, p. 1661-1676, 2013.
- BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Assessment of chemical quality of Brazilian sugar cane spirits and cachaças. **Food Control**, Oxford, v. 54, n. 1, p. 1-6, 2015.
- BOKOSSA, I. P. *et al.* Biosynthesis of invertase by *Saccharomyces cerevisiae* with sugarcane molasses as substrate. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 9, n. 1, p. 662-663, 1993.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 13, de 30 de junho de 2005**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 142, n. 124, p. 18, 30 jun. 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 28, de 8 de agosto de 2014**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 151, n. 154, p. 20, 11 ago. 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução Normativa nº 539, de 26 de dezembro de 2022**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 144, n. 250, p. 32, 27 dez. 2022.
- BREXÓ, R. P.; SANT'ANA, A. S. Microbial interactions during sugar cane must fermentation for bioethanol production: does quorum sensing play a role? **Critical reviews in biotechnology**, Boca Raton, v. 38, n. 2, p. 231-244, 2018.
- CARDOSO, M. G. Produção de aguardente de cana. 3. ed. Lavras: UFLA, 2013. 340 p.
- CARDOSO, M. G. Produção de aguardente de cana. 4. ed. Lavras: UFLA, 2020. 445 p.
- CARDOSO, M. G. *et al.* Volatile Compounds Formation in Cachaça. In: REIS, F. R.; SANTOS, C. M. E. (Eds). **Volatile Compounds Formation in Specialty Beverage**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 15-31.

- COMITINI, F. *et al.* Yeast interactions and molecular mechanisms in wine fermentation: A comprehensive review. **International Journal of Molecular Sciences**, Basel, v. 22, n. 14, p. 7754, 2021.
- CHAVES, J. B. P.; POVOA, M. E. B. A qualidade da aguardente de cana-de-açúcar. In: MUTTON, M. J. R.; MUTTON, M. A. (Eds.). **Aguardente de cana-de-açúcar: Produção e Qualidade**. 1. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1992. p. 93-132.
- CRAVO, F. D. C. *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**, Hong Kong, v. 10, n. 2, p. 339-350, 2019.
- DA-SILVA, V. P. *et al.* Cachaça production: from sugar cane to spirit. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 129, n. 4, p. 259-275, 2023.
- DATO, M. C. F. *et al.* Analysis of the secondary compounds produced by *Saccharomyces cerevisiae* and wild yeast strains during the production of “cachaça”. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 70–74, 2005.
- DUARTE, F. C. *et al.* Removal of copper in cachaças using clays. **Ciênt Agrotecnologia**, v. 38, n. 4, p. 382-389, 2014.
- D'AVILA, G. B. *et al.* Quantification of ethyl carbamate in cachaça produced in different agro-industrial production systems. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 122, n. 2, p. 299-303, 2016.
- DIJKEN, J. P. V. *et al.* Kinetics of growth and sugar consumption in yeasts. **Antonie van Leeuwenhoek**, Dordrecht, v. 63, n. 1, p. 343-352, 1993.
- GAO, W. *et al.* Characterization of the key odorants in light aroma type Chinese liquor by gas chromatography–olfactometry, quantitative measurements, aroma recombination, and omission studies. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 62, n. 25, p. 5796-5804, 2014.
- GOMES, F. C. O. *et al.* Comparison between two selected *Saccharomyces cerevisiae* strains as fermentation starters in the production of traditional cachaça. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 52, n. 2, p. 449-455, 2009.
- GRANATO, D. *et al.* Feasibility of different chemometric techniques to differentiate commercial Brazilian sugarcane spirits based on chemical markers. **Food Research International**, Toronto, v. 60, n. 1, p. 212-217, 2014.
- HUANG, H. *et al.* Evaluation of the quantity and composition of sugars and lipid in the juice and bagasse of lipid producing sugarcane. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, Oxford, v. 10, n. 1, p. 148-155, 2017.
- HAMMER, O. *et al.* PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. **Paleontologia Electronica**, Santos, v. 4 n. 1, p. 9. 2001.
- HERWING, C. *et al.* Quantitative analysis of the regulation scheme of invertase expression in *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnol Bioeng**, Hoboken, v. 76, n. 1, p. 247-258, 2001.
- LIMA, A. D. J. B. *et al.* Emprego do carvão ativado para remoção de cobre em cachaça. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 2, p. 247-250, 2006.
- LIMA, C. M. G. *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**, Oxford, v. 106, n. 1, p. e104338, 2022.

- LIN, Y. *et al.* 2012. Factors affecting ethanol fermentation using *Saccharomyces cerevisiae* BY4742. **Biomass Bioenergy**, Oxford, v. 47, n. 1, p. 395-401, 2012.
- LIU, X. *et al.* Effect of initial pH on growth characteristics and fermentation properties of *Saccharomyces cerevisiae*. **Journal of food science**, Chicago, v. 80, n. 4, p. M800-M808, 2015.
- MAIA, A. B. Componentes secundários da aguardente. **Revista STAB**, São Paulo, v. 12, n. 6, p. 29-34, 1994.
- MAIA, A. B. R. A.; CAMPELO, E. A. P. **Tecnologia da cachaça de alambique**. 1 ed. Belo Horizonte: Sebrae/Sindbebedidas, 2006. 129 p.
- MARTINI, C. *et al.* 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, p. 808-813, 2010.
- MARTINI, C. *et al.* Yeast composition of sugar cane juice in relation to plant varieties and seasonality. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 5, p. 710-717, 2011.
- MASSON, J. *et al.* Determination of acrolein, ethanol, volatile acidity, and copper in different samples of sugarcane spirits. **Food Science and Technology**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 568-572, 2012.
- MEDEIROS, A. B. P. *et al.* Cachaça and Rum. In: PANDEY, A. *et al.* (Eds). **Current developments in biotechnology and bioengineering**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2017. p. 451-468.
- MULLER, G. *et al.* Comparative Genomic Analysis and Phenotypic Characterization of *Saccharomyces cerevisiae* Strains used in Sugarcane-based Fermentation Processes to Improve Sucrose Fermentation by an Industrial Fuel-ethanol Yeast Strain. **Journal of Fungi**, Basel, v. 9, n. 1, p. 808, 2023.
- MOREIRA, R. F. A. *et al.* A fração volátil das aguardentes de cana produzidas no Brasil. **Química Nova**, São Paulo, v. 35, n. 9, p. 1819-1826, 2012.
- NARENDRANATH, N. V.; POWER, R. Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of *Lactobacilli* and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 71, n. 5, p. 2239-2243, 2005.
- NASCIMENTO, E. S. P. *et al.* Quantitative Ester Analysis in Cachaça and Distilled Spirits by Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC–MS). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 56, n. 1, p. 5488–5493, 2008.
- NONATO, E. A. *et al.* A Headspace Solid-Phase Microextraction Method for the Determination of Some Secondary Compounds of Brazilian Sugar Cane Spirits by Gas Chromatography. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 49, n. 8, p. 3533–3539, 2001.
- OLIVEIRA, E. S. *et al.* Fermentation characteristics as criteria for selection of cachaça yeasts. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 20, n. 1, p. 19-24, 2004.
- PIMENTEL, G. V.; ANDRADE, L. A. B. Produção de aguardente de cana. In: CARDOSO, M. G. (Org.). *Cultura da cana-de-açúcar*. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 25-61.

- PORTUGAL, C. B. *et al.* The role of spontaneous fermentation for the production of cachaça: a study of case. **European Food Research and Technology**, Heidelberg, v. 242, n. 1, p. 1587-1597, 2016.
- RATKOVICH, N. *et al.* The Spirit of Cachaça Production: An Umbrella Review of Processes, Flavour, Contaminants and Quality Improvement. **Foods**, Basel, v. 12, n. 17, p. 3325, 2023.
- RIBEIRO, M. L. D. *et al.* Physico-chemical treatment of sugarcane juice produces quality cachaça. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 3, p. 458-463, 2017.
- SANTIAGO, W. D. *et al.* Multivariate analysis for the characterization of physico-chemical profile of cachaça produced in copper stills on period for six years on Minas Gerais state. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 121, n. 1, p. 244-250, 2015.
- SANTIAGO, W. D. *et al.* Investigação sobre cachaças brasileiras quanto a sua padronização e qualidade. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 9, n. 7, p. e387974117, 2020.
- SERAFIM, F.A.; LANÇAS, F.M. Sugarcane spirits (cachaça) quality assurance and traceability: an analytical perspective. In: GRUMEZESCU, A.M.; HOLBAN, A. M. (Eds.). 1 ed. Production and Management of Beverages. Woodhead Publishing, 2019. p. 335-359.
- SILVA, P. H. A. *et al.* Avaliação cromatográfica de compostos voláteis de cachacas produzidas com leveduras de diferentes procedências. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, n. 1, p. 100-106, 2009.
- SILVA, J. H. D. N. E. *et al.* Monitoring the content of ethyl carbamate and copper in organic and conventional cachaça. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 77, n. 5, p. e20190027, 2020.
- SILVA, V. P. *et al.* Cachaça production: from sugar cane to spirit. **Journal of the Institute of Brewing**, London, v. 129, n. 4, p. 1-1, 2023.
- SCHWAN, R. F. *et al.* Microbiology and physiology of cachaça (aguardente) fermentations. **Antonie van Leeuwenhoek**, Holanda, v. 79, n. 1, p. 89-96, 2001.
- SCHWAN, R. F.; DIAS, D. R. Fermentação. In: CARDOSO, M. G. **Produção de aguardente de cana**. 4. ed. Lavras: Editora UFLA, 2020. p. 91-111.
- TEIXEIRA, V. *et al.* Using Moringa oleifera Lamarck seed extract for controlling microbial contamination when producing organic cachaça. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v. 308, n. 1, p. e108287, 2019.
- TORRES-GUARDADO, R. *et al.* Microbial interactions in alcoholic beverages. **International Microbiology**, Barcelona, v. 25, n. 1, p. 1-15, 2022.
- VICENTE, M. A. *et al.* Isolation of *Saccharomyces cerevisiae* strains producing higher levels of flavoring compounds for production of “cachaça” the Brazilian sugarcane spirit. **International journal of food microbiology**, Amsterdam, v. 108, n. 1, p. 51-59, 2006.
- VILELA, A. F. *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**, São Paulo, v. 41, n. 3, p. 661-668, 2021.

ZACARONI, L. M. *et al.* Natural clay and commercial activated charcoal: Properties and application for the removal of copper from cachaça. **Food Control**, Amsterdã, v. 47, n. 1, p. 536–544. 2015.

ANEXOS

ANEXO A – Dornas utilizadas para a fermentação.



ANEXO B – Sistema de destilação com alambique de cobre.

