



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

ELAINE CRISTINA MACIEL PORTO

PLASMA FRIO COMO TECNOLOGIA DE MODULAÇÃO QUÍMICA:
AVALIAÇÃO DOS PERFIS VOLÁTIL E FENÓLICO DO SUCO DE ABACAXI

FORTALEZA

2025

ELAINE CRISTINA MACIEL PORTO

PLASMA FRIO COMO TECNOLOGIA DE MODULAÇÃO QUÍMICA: AVALIAÇÃO
DOS PERFIS VOLÁTIL E FENÓLICO DO SUCO DE ABACAXI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Produtos de Origem Microbiana e Enzimática.

Orientador: Profa. Dra. Sueli Rodrigues.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- P881p Porto, Elaine Cristina Maciel.
Plasma frio como tecnologia de modulação química : Avaliação dos perfis volátil e fenólico do suco de abacaxi / Elaine Cristina Maciel Porto. – 2025.
72 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza, 2025.
Orientação: Profª. Dra. Sueli Rodrigues.
1. compostos voláteis. 2. compostos fenólicos. 3. aromas. 4. descarga de barreira dielétrica. 5. descarga luminosa. I. Título.

CDD 664

ELAINE CRISTINA MACIEL PORTO

PLASMA FRIO COMO TECNOLOGIA DE MODULAÇÃO QUÍMICA: AVALIAÇÃO
DOS PERFIS VOLÁTIL E FENÓLICO DO SUCO DE ABACAXI

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Ceará como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Área de concentração: Ciência e Tecnologia de Produtos de Origem Microbiana e Enzimática.

Aprovada em: 27/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Sueli Rodrigues (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pedro Henrique Campelo Félix
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Dra. Dayanne Lara Holanda Maia
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Thatyane Vidal Fonteles
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Elenilson Godoy Alves Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Ao meu amado esposo, Alex Miranda.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar essa conquista. Como o Pai zeloso que é, carregou-me em Seus braços em todos os momentos e capacitou-me a alcançar este título. À Ele dedico tudo que tenho e que sou. Que meu coração jamais esqueça de nenhum de Seus benefícios!

Ao meu esposo, Alex Miranda, por todo o suporte e apoio, não somente emocional, mas também acadêmico. Por compartilhar comigo horas de estudo. Por ter sido meu parceiro incansável nas leituras, nos debates científicos e nos momentos de reflexão que tanto contribuíram para o amadurecimento deste trabalho. Agradeço, especialmente, por seu imenso cuidado comigo, pela atenção dedicada à minha saúde física e mental e por sua extrema compreensão em todos os momentos desta trajetória. Te dedico, com todo meu amor e profunda gratidão.

Aos meus pais Wilson e Izabel, pelo amor incondicional, compreensão constante, incentivo e orações ao longo de toda a minha vida acadêmica. Vocês são minha base.

À profa. Dra. Sueli Rodrigues, pela excelente orientação, pela compreensão, pelos ensinamentos valiosos e pela confiança depositada em mim durante todo este percurso. Sem seu apoio e incentivo, esta tese não teria se concretizado.

Ao prof. Dr. Fabiano André Narciso Fernandes, pela orientação, ensinamentos e conhecimentos generosamente compartilhados, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho.

À banca examinadora, os doutores Pedro Henrique Campelo, Elenilson Godoy Alves Filho, Thatyane Vidal Fonteles e Dayanne Lara Holanda Maia, pela leitura atenta, pelas valiosas contribuições e pelas considerações que enriqueceram este trabalho. A participação de cada um foi muito relevante para o aprimoramento desta tese.

Aos professores e pesquisadores do LABIOTEC, especialmente à Dra. Thatyane Vidal Fonteles, por suas contribuições científicas, sua constante solicitude, dedicação e, muitas vezes, sábios conselhos que foram de grande importância tanto acadêmica quanto pessoalmente.

À toda equipe do LABIOTEC, em especial aos meus colegas Cristiano, Rhonyele, Betina e Eciângela. por compartilharem comigo momentos de aprendizado e incentivo mútuo. Às minhas amigas Fátima, Brenda, Karol, Sannara e Raquel — e Priscila, que mesmo à distância segue sendo parte importante dessa amizade — meu agradecimento carinhoso. Com vocês, os dias se tornaram mais leves. Foi um privilégio dividir as alegrias, os desafios, os risos e as lágrimas da caminhada profissional com pessoas tão queridas. A amizade de vocês é um

dos maiores presentes que esse trabalho me proporcionou.

Aos professores e pesquisadores do Laboratório de Análise e Desenvolvimento de Processos (A&DP), pela infraestrutura e pelo acesso aos equipamentos indispensáveis à realização de parte dos experimentos deste trabalho. Em especial, à Dra. Dayanne Lara Holanda Maia, pela generosidade em compartilhar seus conhecimentos científicos, pela disponibilidade constante e pela valiosa colaboração ao longo deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto Nacional de Frutos Tropicais (INCT-FT) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro.

À Universidade Federal do Ceará, por ter sido o espaço da minha formação acadêmica e científica ao longo desses anos.

RESUMO

O plasma frio é uma tecnologia inovadora com potencial para modular seletivamente compostos químicos em alimentos, visando melhorias sensoriais e nutricionais. Este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de dois tipos de plasma frio – descarga de barreira dielétrica (DBD) e descarga luminosa (DL) – sobre a composição volátil e fenólica do suco de abacaxi (*Ananas comosus*), bem como suas consequências sensoriais no aroma da bebida. No plasma DBD foram avaliadas frequências de excitação (50, 500 e 1000 Hz) durante 10 e 20 min, enquanto no plasma DL foram avaliados diferentes fluxos de gás (10, 20 e 30 mL/min) durante 20 min. A composição volátil, analisada por GC-MS, revelou que o tratamento por plasma promoveu principalmente sucessivas reações de desmetilação de ésteres de cadeia longa e conversão de ésteres metílicos em etílicos. Essas alterações químicas permitiram melhorar as notas sensoriais frescas e frutadas e reduzir o aroma pungente do hexanoato de metila (especialmente nas condições de DBD 50 Hz/10 min, DBD 500Hz/ 10 e 20 min, DL 20mL/min por 10 e 20 min), mantendo equilíbrio aceitável entre frescor e notas sulfurosas. Em relação ao perfil fenólico, onze compostos foram identificados por GC-MS, sendo o ácido sirínico o mais abundante. Ambos os tratamentos por plasma resultaram em mudanças significativas nesses compostos, com destaque para o aumento expressivo de ácido sirínico e redução significativa do ácido vanílico especialmente nos tratamentos DBD em 500 Hz e DL em 20 mL/min, indicando ativação da via fenilpropanóide e seletividade das enzimas envolvidas em função das condições de processamento. Modificações estruturais em derivados do ácido benzóico sugeriram reações específicas como abstração de grupos metila induzidas pelas espécies reativas do plasma. Esses resultados reforçam que o plasma frio, se ajustado eficientemente, pode otimizar o perfil volátil e fenólico do suco de abacaxi, melhorando suas propriedades sensoriais e nutricionais. Esta capacidade abre caminho para sua aplicação em bebidas funcionais adaptadas às preferências sensoriais e demandas nutricionais dos consumidores.

Palavras-chave: compostos voláteis; compostos fenólicos; aromas; descarga de barreira dielétrica; descarga luminosa.

ABSTRACT

Cold plasma is an innovative technology with potential to selectively modulate chemical compounds in foods, enhancing both sensory and nutritional properties. This study aimed to evaluate the effects of two types of cold plasma—dielectric barrier discharge (DBD) and glow discharge (GD)—on the volatile and phenolic composition of pineapple juice (*Ananas comosus*), as well as their sensory impacts on juice aroma. DBD plasma was applied at excitation frequencies of 50, 500, and 1000 Hz for 10 and 20 min, while GD plasma was conducted at varying gas flow rates of 10, 20, and 30 mL/min for 20 min. Volatile composition analysis, performed via GC-MS, revealed that plasma treatment primarily promoted successive demethylation of long-chain esters and the conversion of methyl esters into ethyl esters. These chemical modifications improved fresh and fruity sensory notes and reduced the pungently sweet aroma of methyl hexanoate, particularly under the conditions DBD at 50 Hz/10 min, DBD at 500 Hz/10 and 20 min, and GD at 20 mL/min for 10 and 20 min, maintaining an acceptable balance between freshness and sulfurous notes. Regarding the phenolic profile, eleven compounds were identified by GC-MS, with syringic acid being the most abundant. Both plasma treatments resulted in significant changes to these phenolic compounds, notably increasing syringic acid concentrations and significantly reducing vanillic acid levels, especially under DBD at 500 Hz and GD at 20 mL/min, indicating activation of the phenylpropanoid pathway and selectivity of the involved enzymes depending on processing conditions. Structural changes in benzoic acid derivatives suggested specific reactions such as methyl group abstraction induced by plasma-generated reactive species. These findings reinforce that cold plasma, when optimally adjusted, can enhance the volatile and phenolic profiles of pineapple juice, improving its sensory and nutritional properties. Such capabilities pave the way for its application in functional beverages tailored to consumer sensory preferences and nutritional demands.

Key-words: volatile compounds; phenolic compounds; aroma; dielectric barrier discharge; luminous discharge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Variedades de abacaxi cultivadas no Brasil: Smooth Cayenne (A) e Pérola (B)	16
Figura 2	– Esquema (a) e fotografia (b) do processamento por plasma frio atmosférico gerado por barreira dielétrica	24
Figura 3	– Configuração básica do sistema de geração de plasma à vácuo (ou de Descarga Luminosa)	25
Figura 4	– Principais alterações químicas dos constituintes dos alimentos durante o processamento por plasma frio	26
Figura 5	– Reações de abstração de metila induzidas pelos Plasmas DBD e DL nos ésteres do suco de abacaxi	44
Figura 6	– Reações de adição de metilas em tioésteres provocadas pelo processamento por Plasma	45
Figura 7	– Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DBD: a) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 50 Hz/10 min; b) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 50 Hz/20 min; c) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 50 Hz/10 min; d) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 50 Hz/20 min	49
Figura 8	– Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DBD: a) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 500 Hz/10 min; b) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 500 Hz/20 min; c) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 500 Hz/10 min; d) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 500 Hz/20 min	51
Figura 9	– Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DBD: a) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 1000 Hz/10 min; b) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 1000 Hz/20 min; c) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a	

condição 1000 Hz/10 min; d) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 1000 Hz/20 min	52
Figura 10 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DL: a) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 10mL/ min - 10 min; b) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 10mL/ min - 20 min; c) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 10mL/ min - 10 min; d) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 10mL/ min - 20 min	54
Figura 11 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DL: a) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 20mL/ min - 10 min; b) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 20mL/ min - 20 min; c) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 20mL/ min - 10 min; d) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 20mL/ min - 20 min	55
Figura 12 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DL: a) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 30mL/ min - 10 min; b) Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 30mL/ min - 20 min; c) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 30mL/ min - 10 min; d) Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 30mL/ min - 20 min	56
Figura 13 – Estrutura química dos compostos fenólicos identificados no suco de abacaxi	58
Figura 14 – Perfis voláteis dos sucos de abacaxi baseado em suas frações mássicas antes e após os processamentos por Plasma Frio (DBD e DL)	59
Figura 15 – Representação esquemática da via fenilpropanóide e seus principais produtos fenólicos	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição aproximada da polpa de abacaxi consumida no Brasil e do suco de abacaxi (valores por 100g de produto)	17
Tabela 2	– Parâmetros físico-químicos gerais do suco de abacaxi fresco e pasteurizado	18
Tabela 3	– Principais compostos voláteis identificados em suco de abacaxi fresco	20
Tabela 4	– Estudos sobre o efeito do plasma frio no perfil volátil de polpas e sucos de frutas	28
Tabela 5	– Estudos sobre o efeito do plasma frio sobre os compostos fenólicos de suco de frutas	32
Tabela 6	– Abundância relativa de compostos voláteis (% m/m) do suco de abacaxi submetido ao plasma DBD em diferentes condições	41
Tabela 7	– Frações mássicas de compostos voláteis (% p/p) do suco de abacaxi submetido ao plasma de descarga luminosa em diferentes condições	42
Tabela 8	– Compostos voláteis identificados no suco de abacaxi e seus respectivos Descritores Primários, Descritores Secundários e Odor treshhold em água	46
Tabela 9	– Valores de atividade de odor (OAV) dos descritores primários de aroma do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma DBD	47
Tabela 10	– Valores de atividade de odor (OAV) dos descritores primários de aroma do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma de Descarga Luminosa	47
Tabela 11	– Valores de atividade de odor (OAV) das notas secundárias dos compostos de aroma frutado do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma DBD	48
Tabela 12	– Valores de atividade de odor (OAV) das notas secundárias dos compostos de aroma frutado do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma de Descarga Luminosa	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Suco de abacaxi	16
<i>2.1.1</i>	<i>Características do abacaxi, mercado e composição química do suco</i>	<i>16</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Compostos voláteis</i>	<i>18</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Compostos fenólicos</i>	<i>21</i>
2.2	Plasma Frio	22
<i>2.2.1</i>	<i>Definições</i>	<i>22</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Descarga de Barreira Dielétrica x Descarga Luminosa</i>	<i>23</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Alterações químicas nos principais constituintes dos alimentos</i>	<i>26</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Efeito do Plasma Frio nos compostos voláteis</i>	<i>27</i>
<i>2.2.5</i>	<i>Efeito do Plasma Frio nos compostos fenólicos</i>	<i>31</i>
3	OBJETIVOS	35
3.1	Objetivo geral	35
3.2	Objetivos específicos	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	Preparo do suco de caju	36
4.2	Processamento por Plasma Frio	36
4.3	Identificação do perfil volátil	36
<i>4.3.1</i>	<i>Cromatografia Gasosa Acoplada a Espectrômetro De Massas (CG-MS)</i>	<i>36</i>
<i>4.3.2</i>	<i>Análises descritivas dos aromas</i>	<i>37</i>
4.4	Identificação do perfil fenólico	38
<i>4.4.1</i>	<i>Extração e concentração</i>	<i>38</i>
<i>4.4.2</i>	<i>Hidrólise alcalina</i>	<i>38</i>
<i>4.4.3</i>	<i>Cromatografia gasosa – espectrometria de massas</i>	<i>39</i>
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	Mudanças no perfil volátil do suco de abacaxi induzidas por Plasma	40
<i>5.1.1</i>	<i>Alterações químicas nos compostos voláteis induzidas pelos Plasmas DBD x Descarga Luminosa</i>	<i>40</i>
<i>5.1.2</i>	<i>OAV's dos compostos voláteis e Agrupamento das Notas descritivas do aroma do suco de abacaxi processado e não processado</i>	<i>45</i>

5.1.3	<i>Perfil aromático Controle x Plasma DBD</i>	48
5.1.4	<i>Perfil aromático Controle x Plasma DL</i>	53
5.2	Alterações químicas no perfil fenólico do suco de abacaxi: DBD x DL	58
6	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a conscientização dos consumidores a respeito da relação direta entre dieta, saúde e longevidade aumentou. Essa mudança de perfil tem causado um aumento expressivo do consumo de frutas e da demanda por alimentos processados que sejam mais saudáveis e nutritivos, que promovam algum benefício à saúde, sem excesso de aditivos químicos e que conservem características sensoriais similares aos naturais (Pinheiro *et al.*, 2011; Wibowo *et al.*, 2019). A pandemia de COVID-19 reforçou ainda mais essa tendência no Brasil. É o que mostram resultados preliminares do estudo NutriNet, da Universidade de São Paulo (Steele *et al.*, 2020).

As decorrências do aumento dessa procura impulsionaram a indústria de alimentos a buscar processamentos que sejam eficientes e incorram em mínimas alterações na qualidade geral do alimento. Tratamentos térmicos se consolidaram ao longo dos anos como principais métodos de conservação na indústria em razão da escala, eficiência e viabilidade. Entretanto, quando se trata do processamento de produtos à base de frutas, costumam causar redução de nutrientes e alterações negativas no sabor e no aroma do produto final, devido a degradação de compostos termossensíveis (Putnik *et al.*, 2019).

Em alternativa aos tratamentos térmicos, uma forte tendência no estudo de processamentos de alimentos são as tecnologias Não Térmicas. Filtração por membrana, radiação ultravioleta (UV), alta pressão, luz pulsada, plasma frio, ultrassom e ozônio são exemplos dessas tecnologias e tem recebido atenção especial nas últimas décadas, pois tem como principal vantagem promover a preservação dos alimentos reduzindo os impactos negativos geralmente associados aos tratamentos que utilizam altas temperaturas (Jambrak, 2019).

Nos últimos dez anos, houve uma expansão nas pesquisas sobre o uso Plasma Frio no processamento de alimentos. O plasma consiste em um gás total ou parcialmente ionizado que contém uma série de espécies reativas tais como elétrons, íons positivos, íons negativos, radicais livres e fótons. A indução desse estado pode ser realizada em qualquer gás neutro, desde que seja fornecida energia suficiente capaz de causar sua ionização (Mandal; Singh; Pratap Singh, 2018). O Plasma Frio para o processamento de alimentos pode ser gerado por diversos métodos que incluem descarga de barreira dielétrica (DBD), descarga luminosa (DL), descarga por radiofrequência (RF), descarga por micro-ondas e jato de plasma (Asl *et al.*, 2022).

Estudos reportam resultados promissores deste processamento na inativação dos principais microrganismos patógenos de origem alimentar (Bourke *et al.*, 2018), tratamento de

embalagens para alimentos (Pankaj *et al.*, 2014), degradação de toxinas (Ten Bosch *et al.*, 2017) e inativação de enzimas deteriorantes (Misra *et al.*, 2016) em produtos de origem vegetal. Dependendo das condições do processo, é possível observar melhores retenções e, em alguns casos o incremento, de compostos bioativos (Rodríguez *et al.*, 2017). É importante destacar que todos estes efeitos são decorrentes das reações químicas produzidas pelo plasma e, por isso, são variáveis e fortemente dependentes da composição da matriz alimentar (Alves Filho; Brito; Rodrigues, 2020).

Por isso, apesar de todas as informações disponíveis sobre o plasma, conhecer e explicar as mudanças químicas que podem ocorrer nos alimentos durante o processo ainda é um desafio. O impacto do plasma sobre aromas, por exemplo, ainda é pouco conhecido, pois estudos que investiguem a natureza das alterações no perfil volátil ainda são escassos. Já foram verificadas modificações na composição volátil de sucos de tomate (Ma; Lan, 2015), laranja (Alves Filho *et al.*, 2019), camu-camu (Alves Filho *et al.*, 2021) e maçã (Wang *et al.*, 2020) tratados por plasma frio. Os resultados observados variam principalmente em razão das condições de operação e da matriz vegetal. Esses estudos são necessários pois representam um relevante avanço na consolidação da tecnologia, ajudando a estabelecer condições otimizadas à matéria-prima.

A possibilidade de modular quimicamente os perfis volátil e fenólico de alimentos por meio do plasma frio tem ganhado destaque entre os avanços no processamento de frutas e seus derivados. Estudos demonstraram, em aplicação no suco de camu-camu, que tanto o plasma de barreira dielétrica (DBD) quanto o plasma de descarga luminosa (DL) foram capazes de modular seletivamente o aroma de sucos ricos em terpenos e sesquiterpenos, ressaltando notas aromáticas e abrindo caminho para a aplicação da tecnologia de modulação em outras matrizes (Campelo *et al.*, 2020).

Além dos compostos voláteis, o plasma frio também tem sido investigado quanto aos seus efeitos sobre os compostos fenólicos de frutas e sucos. A literatura demonstra que estes compostos podem tanto ser degradados por reações de oxidação quanto liberados por ruptura de membranas celulares, ou até mesmo produzidos através da ativação de vias biossintéticas, dependendo da matriz e das condições do processo (Fernandes; Rodrigues, 2021). Estudos demonstram alterações na concentração de compostos fenólicos em sucos de fruta, como camu-camu, seriguela e acerola, após o tratamento com plasma frio (Castro *et al.*, 2020; Fernandes; Santos; Rodrigues, 2019; Paixão *et al.*, 2019).

Contudo, a maioria dos estudos que investigam esse efeito em sucos de frutas limitam-se a relatar ganhos ou perdas no conteúdo de compostos fenólicos totais (TPC), sem

detalhar de forma aprofundada os mecanismos de reação química decorrente dessas mudanças. Em geral, a justificativa se dá pela interação das espécies reativas (ozônio, radicais hidroxila, radicais superóxido, entre outras) com a matriz do alimento, mas raramente são identificados passos reacionais ou intermediários formados (Fernandes; Rodrigues, 2021).

Quando se pondera acerca da escolha de uma matéria-prima abundante, com aroma e sabor característicos, fonte de compostos bioativos, baixo custo, com boa oferta e versátil, considera-se o uso do abacaxi (*Ananas comosus*). O abacaxi é uma fruta tropical amplamente cultivada na América do Sul que pode ser consumida fresca ou processada em vários produtos alimentícios. É reconhecidamente uma fonte rica em minerais, vitaminas e compostos antioxidantes que oferecem uma série de benefícios à saúde. Semelhante a outros sucos de frutas, o aroma e sabor característicos do suco de abacaxi são provenientes de uma complexa gama de compostos químicos voláteis que contribuem significativamente para que a bebida tenha uma boa aceitação (Ali *et al.*, 2020; Facundo *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2021).

Quanto ao perfil fenólico, estudos recentes que aplicaram plasma frio em suco de abacaxi também adotaram uma abordagem mais generalista ao descrever os resultados, relacionando o aumento ou a queda nos TPC's à provável oxidação ou liberação de compostos pelas espécies reativas do plasma, sem identificar em quais compostos e por quais vias essas modificações aconteceram (Pipliya; Kumar; Srivastav, 2023, 2024). Essa limitação ressalta a necessidade de análises mais direcionadas, incluindo a quantificação individual de fenólicos, por exemplo, via cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC-MS) ou cromatografia gasosa acoplada a espectômetro de massas (CG-MS).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral investigar os efeitos de diferentes fontes de plasma frio — descarga de barreira dielétrica (DBD) e descarga luminosa (DL) — sobre os perfis volátil e fenólico do suco de abacaxi, com ênfase na modulação química seletiva e na compreensão das possíveis rotas reacionais envolvidas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Suco de abacaxi

2.1.1 Características do abacaxi, mercado e composição química do suco

O abacaxi é uma fruta amplamente cultivada na América do Sul, ocupando o terceiro lugar na produção mundial de frutas tropicais, depois da banana e dos cítricos. Devido ao seu aroma e sabor atraentes e riqueza de nutrientes, tem se tornado cada vez mais popular. No entanto, o alto teor de umidade o torna bastante perecível e questões de colheita e logística de distribuição dificultam mais ainda a preservação da fruta fresca. O processamento do abacaxi em produtos como sucos, geleias, doces e compotas é, portanto, uma alternativa atrativa para prolongar sua vida útil e reduzir desperdícios. Dentre os produtos derivados, o suco de abacaxi é um dos mais populares (Ali *et al.*, 2020).

Todas as variedades de abacaxi cujo interesse é o fruto, seja para consumo *in natura* ou para processamento, pertencem a espécie *Ananas comosus* var. *comosus*. O Brasil é o quarto produtor mundial de abacaxi, com 1.558 bilhões de frutos colhidos em cerca de 64,147 mil hectares em 2022, sendo as cultivares mais difundidas a Pérola e a Smooth Cayenne (Figura 1). A fruta é a quinta mais produzida no país, atingindo aproximadamente R\$ 2,758 bilhões em valor de produção (IBGE, 2022).

Figura 1 – Variedades de abacaxi cultivadas no Brasil: Smooth Cayenne (A) e Pérola (B)



Fonte: adaptado de EMBRAPA (2022).

Embora o Brasil esteja entre os principais produtores, a produção brasileira destina-se predominantemente ao mercado interno, especialmente na forma de frutas frescas. De acordo com o IBGE, o estado do Pará é o maior produtor de abacaxi do país, com base na sua produtividade por hectare. Além da comercialização da fruta *in natura*, o estado também é sede da maior indústria de suco concentrado de abacaxi do Brasil, que é quase em sua totalidade destinado à exportação para os EUA, Europa e alguns países do MERCOSUL. Contudo, apesar de promissora, a participação do Brasil ainda é muito discreta nas estatísticas de exportação mundial de abacaxi e derivados (EMBRAPA, 2022). O processamento e comercialização do suco de abacaxi ainda necessitam de avanços no que diz respeito às boas práticas de cultivo da abacaxicultura, melhoria da qualidade dos frutos, combate de doenças e pragas e uso responsável de agrotóxicos (ADEPARA, 2017).

O grau de maturação, o tipo de cultivar, as condições climáticas e o manejo pós-colheita são fatores que influenciam na composição e nas propriedades químicas e bioquímicas do abacaxi. Os constituintes da polpa de abacaxi variam em termos de composição centesimal, minerais e vitaminas, mas em geral contém primariamente água e açúcares sendo também fonte de fibras dietéticas, ácidos orgânicos, vitaminas e minerais (Tabela 1) (TACO, 2020).

Tabela 1 – Composição aproximada da polpa de abacaxi consumida no Brasil (valores por 100g de produto)

Constituinte	Polpa de abacaxi
Carboidratos totais (g)	11,6 g
Proteínas (g)	0,68 g
Lipídios (g)	0,33 g
Fibras (g)	1,12 g
Potássio (mg)	137 mg
Cálcio (mg)	18,4 mg
Magnésio (mg)	16,6 mg
Fósforo (mg)	10,5
Sódio (mg)	2,84
Ferro (mg)	0,47
Vitamina C (mg)	33
Folato (µg)	11,3
Niacina (mg)	0,3
Tiamina (mg)	0,17
Riboflavina (mg)	0,02

Fonte: Adaptado de TACO (2020).

A Tabela 2 apresenta parâmetros físico-químicos gerais do suco de abacaxi. pH, densidade, sólidos solúveis totais, acidez titulável e índice de formol são importantes

parâmetros de qualidade do suco, contribuindo para caracterização e monitoramento de possíveis adulterações.

Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos gerais do suco de abacaxi fresco e pasteurizado

	Suco natural	Suco pasteurizado
pH	3,7	3,7
Densidade (g/cm ³)	1,047	1,045
Sólidos solúveis totais (SST) (°brix)	11,8	11,9
Acidez titulável (AT)	0,5	0,5
Doçura (SST/AT)	23,5	23,5
Índice de formol	9	7,7

Fonte: Difonzo *et al.* (2018) e Vollmer *et al.* (2020).

2.1.2 Compostos voláteis

Os compostos voláteis são moléculas com alta pressão de vapor em temperatura ambiente, devido ao seu baixo ponto de ebulição, o que faz com que uma grande quantidade deles evapore e fique no ar. Devido a essa alta volatilidade, são comumente responsáveis pelo aroma e sabor característicos dos alimentos (Zhang; Cao; Liu, 2020). A composição volátil do abacaxi desempenha um papel significativo nas notas sensoriais de aroma e sabor, por isso constituem importantes atributos de qualidade que afetam diretamente a preferência e aceitação do consumidor (Vollmer *et al.*, 2021).

Existem muitos caminhos envolvidos na biossíntese destes compostos. Podem ser formados a partir de lipídios, aminoácidos, terpenóides, carotenóides, dentre outros. A diversidade de voláteis formados é alcançada por meio de reações químicas de modificação tais como acilação, metilação, oxi/redução e fechamento de anel aromático (George *et al.*, 2023). Como o conteúdo desses compostos no abacaxi depende dos fatores citados anteriormente (variedade, estádios de amadurecimento, condições climáticas, armazenamento pós-colheita), o perfil volátil pode ser utilizado para fins de autenticação e classificação de variedades de abacaxi bem como para o controle de qualidade de produtos processados à base de abacaxi, principalmente durante o armazenamento (Lasekan; Hussein, 2018).

Estudos prévios mostram que a composição volátil do abacaxi conta com uma grande variedade de ésteres, aldeídos, furanonas, lactonas, álcoois, ácidos, hidrocarbonetos e compostos contendo enxofre. É importante destacar que nem todos os compostos voláteis presentes são atribuídos ao aroma característico do produto. Embora cerca de 280 substâncias

voláteis já tenham sido identificadas e reportadas na fruta fresca ou em processados à base de abacaxi, apenas alguns compostos representam significativamente seus aromas típicos (Ali *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2012). Dentre estes, destacam-se: 1) os ésteres metilados (frutados, típicos de abacaxi); 2) as furanonas (doces, semelhante a abacaxi e caramelo), e aldeídos metilados (frutados, semelhante à maçã) (Tabela 3) (Elss *et al.*, 2005; Vollmer *et al.*, 2021).

Tabela 3 – Principais compostos voláteis identificados em suco de abacaxi fresco

Composto	Fórmula molecular	Classe	Descrição olfativa	Referências
4-hidroxi-2,5-dimetil-3 (2h) - furanona	C ₆ H ₈ O ₃	lactona (éster)	doce, semelhante a abacaxi e caramelo	(Difonzo <i>et al.</i> , 2018; Elss <i>et al.</i> , 2005; George <i>et al.</i> , 2023; Steingass <i>et al.</i> , 2017; Vollmer <i>et al.</i> , 2021; Wu <i>et al.</i> , 2021)
2-metilpropanoato de etila	C ₄ H ₈ O ₂	éster	floral, frutado semelhante à maçã	
2-metilbutanoato de metila	C ₆ H ₁₂ O ₂	éster	floral, verde, frutal, semelhante à maçã	
2-metilbutanoato de etila	C ₆ H ₁₂ O ₂	éster	frutado, semelhante ao abacaxi	
3-metilbutanoato de etila	C ₆ H ₁₂ O ₂	éster	frutado, doce, semelhante ao abacaxi	
Pentanoato de etila	C ₇ H ₁₄ O ₂	éster	frutado, semelhante ao abacaxi	
Hexanoato de metila	C ₈ H ₁₆ O ₂	éster	frutado, tropical, semelhante ao abacaxi	
Hexanoato de etila	C ₈ H ₁₆ O ₂	éster	doce, semelhante a abacaxi, frutado, verde	
Heptanoato de etila	C ₉ H ₁₈ O ₂	éster	frutado, semelhante ao abacaxi	
Sulfeto de dietila	C ₄ H ₁₀ S	tiol	sulfuroso, cremoso	(Xiao <i>et al.</i> , 2021)
1-propanotiol	C ₃ H ₈ S	tiol	sulfuroso, aleáceo	
3-mercaptop-1-hexanol	C ₆ H ₁₄ OS	tiol	sulfuroso, tropical, semelhante à uva	

Fonte: Elaborado pela autora.

Nesse sentido, para identificar os aromáticos ativos é necessário levar em consideração o limiar de detecção, concentração, interação com outros compostos e volatilidade. Os compostos contendo enxofre, por exemplo, mesmo sendo encontrados em baixas concentrações em frutas, podem contribuir de forma importante para o aroma devido aos seus baixos limiares de detecção (Xiao *et al.*, 2019). Além disso, estudos sugerem que a interação entre ésteres e compostos com enxofre podem mascarar ou acentuar aromas característicos do abacaxi (Xiao *et al.*, 2021).

Embora o suco de abacaxi fresco tenha um aroma doce e frutado, agradável e apreciado pelos consumidores, os sucos de abacaxi industrializados frequentemente apresentam notas de aroma indesejável, semelhantes a legumes cozidos, devido à degradação térmica de voláteis como butanoato de metila, 2-metilbutirato de etila, hexanoato de metila e hexanoato de etila, e formação de *off-flavors*, como o metional, e ao dimetil di-, tri- e tetra-sulfeto. Segundo Steinhaus, Thomas e Schieberle (2014) essa é uma das principais razões para uma participação relativamente baixa do abacaxi como matéria prima no mercado de sucos industrializados.

2.1.3 Compostos fenólicos

Os compostos fenólicos são substâncias derivadas do metabolismo secundário das plantas, caracterizados pela presença de ao menos um anel aromático ligado a um ou mais grupos hidroxila ($-OH$). Essa estrutura confere alta reatividade química e diversas funções biológicas (Edo *et al.*, 2024).

Em termos de classificação, esses compostos podem ser agrupados em ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos, ligninas e taninos. Cada classe exibe variações estruturais e desempenha papéis específicos tanto na fisiologia da planta quanto em potenciais benefícios para a saúde humana. No metabolismo vegetal, os fenólicos atuam principalmente em mecanismos de defesa contra patógenos e estresses abióticos (como radiação UV e ferimentos), além de participarem da pigmentação e da cicatrização tecidual (Edo *et al.*, 2024).

A síntese da maior parte dos compostos fenólicos ocorre pela via fenilpropanoide, cujo ponto de partida começa pela via do ácido chiquímico, que sintetiza aminoácidos aromáticos, como a fenilalanina e tirosina. A partir da desaminação da fenilalanina pela enzima fenilalanina amônia-liase (PAL), forma-se o ácido cinâmico, que, por meio de sucessivas reações de hidroxilação, metilação e acoplamento, dá origem a ácidos hidroxicinâmicos (como p-cumárico, ferúlico e sinápico) e seus derivados. Outras enzimas-chave como cinamato 4-

hidroxilase (C4H), 4-cumaroil-CoA ligase (4CL) e catecol O-metiltransferase (COMT) participam dessas rotas, dando origem a uma ampla variedade de fenólicos. A expressão dessas enzimas pode ser estimulada por estresses ambientais ou bióticos, elevando a concentração de compostos fenólicos no tecido vegetal (Heleno *et al.*, 2015).

Nas frutas, os fenólicos exercem influência na cor, sabor (adstringência e amargor) e aroma, afetando diretamente a aceitação sensorial do produto (Arfaoui, 2021). Do ponto de vista nutricional, esses compostos são considerados importantes antioxidantes que podem auxiliar na prevenção de doenças crônicas, como as cardiovasculares e neurodegenerativas, e do câncer, em razão da habilidade de modular vias celulares associadas a processos inflamatórios e oxidativos (Cory *et al.*, 2018).

O abacaxi apresenta uma composição fenólica em que se destacam, principalmente, os ácidos fenólicos (ácido p-cumárico, ferúlico, sinápico e derivados), em grande parte ocorrendo em suas formas conjugadas, ou seja, ligados a açúcares ou a outras moléculas, como glutathione ou cisteína. No suco de abacaxi, a concentração de compostos fenólicos pode variar em função do cultivar, clima, solo e manejo agrícola; do estágio de maturação, que altera a expressão enzimática na via fenilpropanóide e, assim, as proporções de cada fenólico; e do processamento (técnicas de extração e preservação que influenciam a liberação ou degradação desses compostos). Entre os fenólicos mais frequentemente relatados, destacam-se o ácido gálico, o ácido sirínico, o ácido sinápico, o ácido ferúlico e o ácido p-cumárico. Esses compostos podem contribuir positivamente para a atividade antioxidante do suco, bem como para o sabor e estabilidade do produto durante o armazenamento (Difonzo *et al.*, 2018; Steingass *et al.*, 2015).

2.2 Plasma Frio

2.2.1 Definições

O plasma é considerado o quarto estado da matéria e existe na forma de uma mistura gasosa ionizada constituída de grande número e variedade de espécies quimicamente reativas, tais como elétrons, íons positivos e negativos, radicais livres, fótons, moléculas em estado fundamental ou de excitação. Qualquer fonte de energia que seja suficiente para ionizar um gás pode ser utilizada para geração de plasma. Essa energia aplicada pode ser de origem mecânica,

elétrica, eletromagnética (radiofrequência, raios X, etc) ou nuclear, entre outras (Mandal; Singh; Pratap Singh, 2018).

A energização de um gás neutro pode ocorrer sob condições de temperatura e pressão variadas, e de acordo com o equilíbrio termodinâmico das espécies, o plasma gerado pode ser classificado como Térmico ou Não-térmico. O plasma Térmico é gerado quando altas temperaturas, geralmente na ordem de 20.000 K, são fornecidas ao gás para atingir a ionização e o sistema está em equilíbrio termodinâmico, portanto a temperatura dos elétrons é igual à dos íons neutros e do gás por completo. Este tipo de plasma é mais utilizado em aplicações que exigem muito calor, como processos da engenharia metalúrgica que incluem cortes e soldagens, por exemplo. Já no Plasma Não-Térmico, somente a temperatura dos elétrons é elevada e conduz os processos de ionização. Como a troca de calor entre os elétrons e o gás total é baixa, o sistema não está sob equilíbrio termodinâmico e, conseqüentemente, todo o sistema permanece em baixa temperatura (<60 °C) (Chizoba Ekezie; Sun; Cheng, 2017). Por esta razão, é chamado de Plasma Frio e somente ele é utilizado na área de alimentos.

Em geral, os compostos reativos gerados pelo plasma incluem as chamadas espécies reativas de oxigênio (ROS) e as espécies reativas de nitrogênio (RNS). Elas podem se apresentar na forma de radicais livres, por exemplo hidroxilas (HO•), superóxidos (O₂•-), alcóxilas (RO•), peróxilas (ROO•) e óxido nítrico (NO•), bem como na forma não-radical, como moléculas de ozônio (O₃), peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e oxigênio singleto (¹O₂). A composição do gás, o tipo de tecnologia e as condições do processamento e do ambiente definem as espécies reativas formadas pelo plasma frio, influenciando diretamente a eficiência e a sua ação nos alimentos (Scholtz *et al.*, 2015).

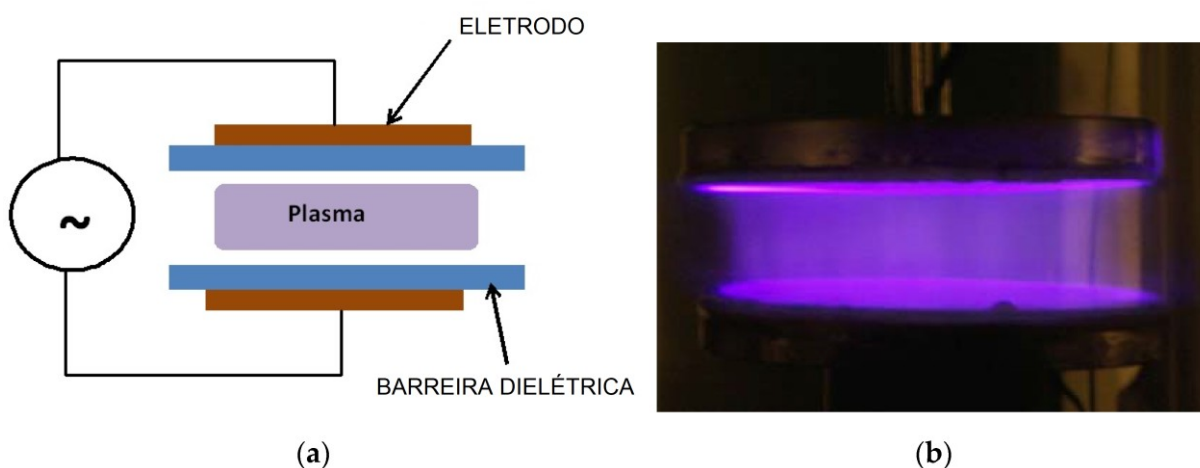
2.2.2 Descarga de Barreira Dielétrica x Descarga Luminosa

Dentre todas as tecnologias usadas para formar plasma frio, a Descarga de Barreira dielétrica (DBD) e a Descarga Luminosa (DL) são as fontes mais estudadas para aplicação em frutas e sucos de frutas. A principal diferença entre os dois são as condições de pressão e as espécies reativas formadas.

O plasma DBD é gerado por uma alta voltagem aplicada entre dois eletrodos de metal. Um ou ambos os eletrodos são cobertos por um material dielétrico isolante e separados por uma distância que pode variar de 0,1 mm a vários centímetros. A descarga elétrica produzida pela diferença de potencial ioniza o ar ambiente e gera o plasma de forma rápida e

segura (Figura 2). Este processo não requer sistemas de vácuo e pode operar utilizando o próprio ar atmosférico, por isso há um grande interesse da indústria de alimentos por esta tecnologia, também chamada de Plasma Frio Atmosférico (Feizollahi; Misra; Roopesh, 2020).

Figura 2 – Esquema (a) e fotografia (b) do processamento por plasma frio atmosférico gerado por barreira dielétrica

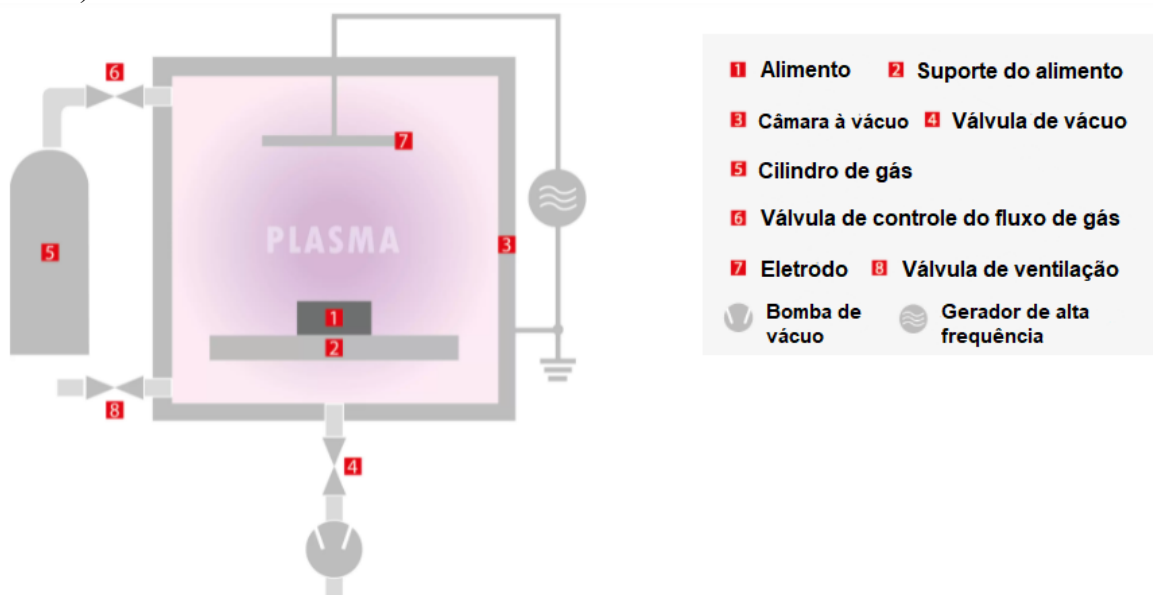


Fonte: Adaptado de Laroussi (2018).

O plasma de Descarga Luminosa, também chamado de plasma de baixa pressão ou à vácuo, tem sido usado em alimentos e processamento de materiais, porém como sua aplicação requer vácuo, há uma limitação em seu uso relacionada à custos com energia e ao tipo de matéria-prima utilizada. A descarga luminosa é gerada pela aplicação de altas tensões ($>100V$) em um gás ou mistura de gases sob baixa pressão (entre 1–1000 Pa) (Figura 3). Neste tipo de tecnologia, as principais vantagens seriam o processamento de volumes maiores de alimentos, à baixas temperaturas e danos mínimos à qualidade do produto final (Pankaj; Keener, 2018; Sakudo; Misawa; Yagyu, 2020).

Na geração de plasma, o tipo de gás é um aspecto de extrema importância. É possível utilizar o ar natural, ar sintético, nitrogênio, oxigênio, gases nobres ou a mistura entre eles. A composição química do gás e a ação individual e/ou sinérgica entre as espécies reativas determinarão a natureza das reações que ocorrem durante o processamento e o efeito delas no alimento (Saremnezhad *et al.*, 2021).

Figura 3 – Configuração básica do sistema de geração de plasma à vácuo (ou de Descarga Luminosa)



Fonte: ELETRONIC DIENER PLASMA SURFACE THECHNOLOGY (2022).

Os gases hélio e argônio foram os primeiros a serem empregados nos estudos sobre aplicação de plasma frio em alimentos e formam espécies praticamente inertes aos principais componentes dos alimentos, principalmente os compostos bioativos das frutas, o que contribuiu para propagar a ideia de que o plasma frio não altera a qualidade dos alimentos. No entanto, com o avanço da tecnologia, o uso dos gases nobres passou a ser substituído pelo nitrogênio e oxigênio, que produzem as ROS e as RNS (Fernandes; Rodrigues, 2021), que interagem com os componentes dos alimentos podendo alterar sua composição de forma positiva ou negativa.

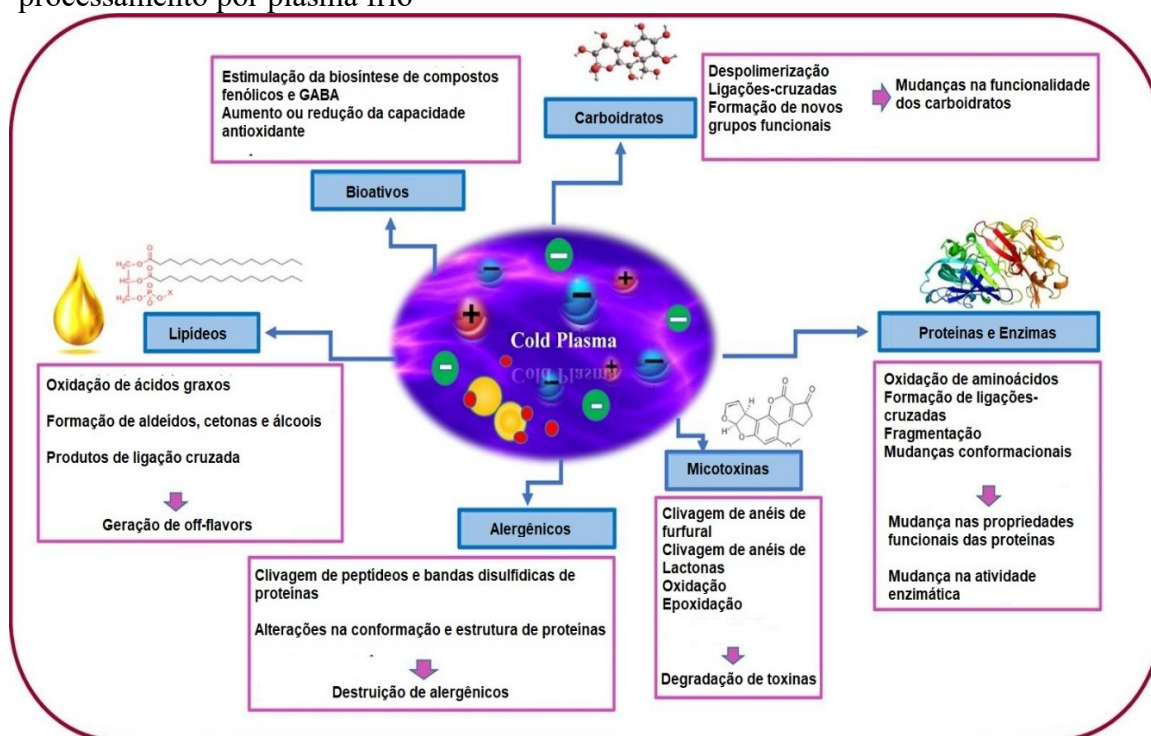
O plasma de DBD aplicado no ar gera predominantemente RNS, enquanto a presença de oxigênio singleto e radicais hidroxila são detectados em menor quantidade. Dependendo da frequência de excitação da fonte de energia, pode haver a geração de ozônio por DBD. Frequências baixas (< 200 Hz) geram baixas concentrações de ozônio, enquanto frequências mais altas (> 800 Hz) geram concentrações maiores. Já no plasma DL, embora as espécies de nitrogênio também predominem, os radicais OH e a concentração de óxido nítrico são muito maiores que o plasma DBD (Fernandes; Rodrigues, 2021).

Quanto aos tipos de reação, o plasma DBD tenderá a causar mais reações de oxidação e hidrogenação, enquanto o plasma DL pode induzir hidrólises, fixação de nitrogênio e formação de álcoois (Fernandes; Rodrigues, 2021).

2.2.3 Alterações químicas nos principais constituintes dos alimentos

Nas duas últimas décadas, as pesquisas demonstram que é possível usufruir da eficiência da tecnologia de plasma frio para diferentes aplicações da produção de alimentos, com o intuito de melhorar as características de qualidade microbiológica, fisiológica e química dos mais variados tipos de alimentos. Diversos artigos revisam o efeito do plasma frio na estrutura química de diferentes constituintes dos alimentos, bem como sua influência nas características de qualidade. Uma maior ênfase tem sido dada aos estudos recentes sobre os mecanismos de ação do plasma e alterações químicas de diferentes macro e micromoléculas (Figura 4) (Alves Filho; de Brito; Rodrigues, 2020; Han; Cheng; Sun, 2019; Hemmati *et al.*, 2021; Kopuk; Gunes; Palabiyik, 2022; Laroque *et al.*, 2021; Saremnezhad *et al.*, 2021; Sonawane; T; Patil, 2020; Sruthi *et al.*, 2022; Ucar *et al.*, 2021).

Figura 4 – Principais alterações químicas dos constituintes dos alimentos durante o processamento por plasma frio



Fonte: Adaptado de Saremnezhad *et al.* (2021).

Quando se trata especificamente da composição de frutas, as espécies químicas geradas pelo plasma podem reagir com praticamente todos os seus constituintes, como açúcares, amidos, aminoácidos, lipídios, vitaminas, carotenoides, terpenos, fenólicos, antocianinas e outros compostos bioativos. As mudanças decorrentes das reações influenciam em várias

características de qualidade das frutas e seus produtos derivados, como pH, sabor, aroma, cor e textura. Essas alterações têm sido compiladas em recentes artigos de revisão (Asl *et al.*, 2022; Fernandes; Rodrigues, 2021; Ozen; Singh, 2020; Pankaj; Keener, 2018; Waghmare, 2021).

Segundo Fernandes e Rodrigues (2021), dentre as tecnologias disponíveis, o plasma DBD parece ser mais adequado para tratar frutas e sucos de frutas do que o plasma DL, uma vez que grande parte das características sensoriais dos frutos provêm de compostos químicos voláteis que podem evaporar sob condições de vácuo, induzindo alterações no aroma e sabor. Por outro lado, o plasma DL vem demonstrando capacidade de melhoramento da qualidade nutricional do produto, induzindo o aumento do teor de vitamina C e compostos fenólicos nas frutas. Considerando todas as informações acerca das duas tecnologias, a escolha do método dependerá dos objetivos estabelecidos para o produto e os principais componentes químicos que o caracterizam.

2.2.4 Efeito do Plasma Frio nos Compostos voláteis

Como visto anteriormente, transformações químicas induzidas por plasma têm sido extensivamente estudadas no que diz respeito aos macros e micronutrientes bem como propriedades físicas, químicas e nutricionais dos alimentos, em especial dos sucos de fruta. Por outro lado, as pesquisas que avaliam alterações de sabor e odor em processos alternativos aos térmicos baseiam-se predominantemente em avaliações com percepções humanas, que em geral apresentam resultados construídos com certa carga de subjetividade e relativizações (Campelo *et al.*, 2020).

Além disso, a maioria os estudos que propõem avaliações químicas das alterações do perfil volátil dos alimentos predominantemente atribuem as mudanças às espécies reativas de oxigênio (ROS) e espécies reativas de nitrogênio (RNS), apresentando sentenças simplistas e pouco aprofundadas sobre os mecanismos de reação. É preciso, no entanto, destacar que a detecção das espécies originadas do plasma frio é realizada mais comumente por espectroscopia de emissão óptica, que exige um equipamento de alto custo e poucos laboratórios que aplicam plasma em alimentos dispõem de recursos para esse tipo de análise. Portanto, ainda faltam muitas informações que possam melhorar o entendimento sobre como as diferentes fontes de plasma e a concentração das principais espécies reativas impactam na composição volátil, e consequentemente, no aroma e sabor dos alimentos (Fernandes; Rodrigues, 2021).

Tabela 4 – Estudos sobre o efeito do plasma frio no perfil volátil de polpas e sucos de frutas.

Matriz	Tipo de plasma	Condições	Abordagem	Referências
Polpa de Camu-camu	DBD	Frequência de 200, 420, 580, 700 e 960 Hz a 20 kV por 15min; Frequência de 12000 e 30000 Hz a 10kV por 5 min	Modulação de aroma e sabor	(Campelo <i>et al.</i> , 2020)
Polpa de Camu-camu	Descarga Luminosa (DL)	Fluxo de gás: 10, 20 e 30 mL/min Tempo de exposição: 10, 20 e 30 min	Modulação de aroma e sabor	(Campelo <i>et al.</i> , 2020)
Suco de Camu-camu	DBD e Descarga Luminosa	DBD: Frequência de 200, 420, 530, 700 e 960 Hz a 24kV por 15 min GP: fluxo de gás de 10, 20 e 30mL/min e tempos de exposição de 10, 20 e 30 min	Abordagem quimiométrica de dados de CG-MS para detecção de variações na composição do suco causadas pelo DBD e pelo GL	(Alves Filho <i>et al.</i> , 2021)
Suco de Laranja	DBD	Voltagem: 70 kV Tempo de exposição: 60s Exposição direta e indireta	Abordagem quimiométrica de dados de GC-MS para detecção de variações dos voláteis causadas pelo DBD	(Alves Filho <i>et al.</i> , 2019)
Suco de Tomate	Descarga Elétrica	Voltagem: 10kV por 5min	Comparação do perfil volátil do suco processado por plasma e por esterilização térmica	(Ma; Lan, 2015)
Suco de Acerola	Descarga Luminosa (DL)	Fluxo de gás: 30 mL/min Tempo de exp osição: 10 e 20 min	Abordagem quimiométrica de dados de CG-MS para detectar as mudanças na composição do suco	(Alves Filho <i>et al.</i> , 2018)
Suco de Caju	DBD	Frequências de 50, 500 E 1000 Hz a 20 kV por 5, 10 e 20 min cada	Modulação de aroma	(Maia; Rodrigues; Fernandes, 2024)

(Continua)

Tabela 4 – Estudos sobre o efeito do plasma frio no perfil volátil de polpas e sucos de frutas (conclusão)

Matriz	Tipo de plasma	Condições	Abordagem	Referências
Suco de Caju	Descarga Luminosa (GP)	Fluxo de gás: 10, 20 e 30 mL/min Tempo de exposição: 10 e 20 min	Modulação de Aroma	(Maia; Rodrigues; Fernandes, 2023)
Suco De Laranja Pasteurizado	DBD	Frequências de 50, 200, 400, e 600 Hz por 15 min	Influência no aroma e mitigação de <i>off-flavors</i>	(Campelo <i>et al.</i> , 2020)

Fonte: elaborado pela autora.

Uma avaliação quimiométrica não direcionada do efeito do plasma DBD nos compostos voláteis do suco de laranja demonstrou a possibilidade de redução de *off-flavors* (α -terpineol, linalol e terpinen-4-ol) convertendo-os de volta em moléculas de sabor característico (Alves Filho *et al.*, 2019).

Considerando não somente a potencial capacidade de reverter efeitos negativos, mas destacar intencionalmente determinadas características do produto, Campelo *et al.* (2020) e Alves Filho *et al.* (2021) utilizaram a polpa e o suco de camu-camu para demonstrar a modulação de aromas por Plasma Frio. O plasma DL durante 20 min a fluxo de 10 mL/min diminuiu as notas amadeiradas em 15,3% devido à diminuição de α -humuleno, α -bulneseno, γ -cadineno, cadina-1(2),4-dieno e α -calacorene. O menor tempo de processamento e o baixo fluxo alteraram as notas canforáceas do suco, que diminuíram 15,5% devido à diminuição de canfeno, borneol e α -fenchol. A alta taxa de fluxo de plasma e o maior tempo de processamento diminuíram as notas amadeiradas e terpênicas em 15,4 e 26,7%, respectivamente.

Frequências de excitação entre 420 e 700 Hz e acima 12000 Hz no plasma DBD induziram maior quantidade de reações de desidrogenação, com diminuição da concentração de β -cariofileno, e aumento de seus compostos desidrogenados como α -humuleno, α -bulneseno, γ -cadineno, cadina-1(2),4 -dieno, selina-3,7(11)-dieno, α -calacoreno e germacreno B. Já as frequências de excitação de 200 Hz e 900 Hz induziram maior quantidade de reações de hidrogenação com o aumento da concentração de β -cariofileno, e a consequente redução da concentração de γ -cadineno, cadina-1(2),4-dieno, selina-3,7(11)-dieno, α -calacoreno e germacreno B. As mudanças nos compostos voláteis tiveram efeito direto no perfil aromático, principalmente nas notas amadeiradas, cítricas e herbais da fragrância da polpa; e no perfil de sabor, principalmente nas notas amadeiradas e canforáceas do sabor da polpa.

Posteriormente, Fernandes e Rodrigues (2021) estudaram o efeito do plasma de descarga luminosa (DL) no aroma do suco de laranja pasteurizado. O tratamento com plasma de descarga luminosa induziu reações químicas nos terpenoides presentes no suco, resultando na formação de alguns aldeídos. Quimicamente, a aplicação deste tipo de plasma tende a isomerizar compostos derivados de radicais terpenil em compostos derivados de radicais pinenil. O impacto destas alterações no aroma foi o aumento de descritores aldeídicos típicos de aroma de laranja no suco, melhorando seu aroma sem perder os descritores cítricos predominantes. O estudo mostra ainda que o plasma de descarga luminosa foi eficaz na mitigação de *off-flavor* causado pelo α -terpineol, com uma redução de 61% na concentração dessa substância no suco tratado com fluxo de 10 mL/min por 20 min.

Estudos semelhantes foram realizados por Maia, Rodrigues e Fernandes (2023) e Maia, Rodrigues e Fernandes (2024) com o suco de caju, o qual foi submetido a ambos os processamentos (DBD e DL). O processamento por plasma DBD gerou quantidades significativas de espécies reativas de oxigênio, que contribuíram para a oxidação de aldeídos e aumento de álcoois. As frequências de 50 e 500 Hz foram mais eficazes na produção de radicais hidroxila e ânion superóxido, enquanto 1000 Hz produziu maior conteúdo de peróxido de hidrogênio. A principal reação observada foi a cisão interna de ácidos graxos de cadeia longa e ésteres, dependendo das condições operacionais. Com relação ao perfil de aroma, embora o frutado continue predominante, a contribuição de notas aldeídicas e balsâmicas aumentou significativamente com tempos de processamento curtos (5 min), mas foi reduzida com tempos de processamento mais longos. Os tratamentos, porém, não foram suficientes para eliminar completamente o estireno, um importante composto *off-flavor* no suco de caju.

Portanto, a literatura atual demonstra o potencial do plasma frio no melhoramento dos perfis químicos e sensoriais dos sucos, mas também destaca a necessidade de elucidar os mecanismos de ação da tecnologia e otimizar as condições de tratamento para alcançar os resultados desejados.

2.2.5 Efeito do Plasma Frio nos compostos fenólicos

Os compostos fenólicos compreendem classes diversas, como ácidos fenólicos, flavonoides e taninos, e exercem papel importante na qualidade sensorial (cor, sabor, aroma) e nutricional (capacidade antioxidante) de sucos de frutas. A aplicação de plasma frio em alimentos tem demonstrado efeitos variados sobre o conteúdo de compostos fenólicos, que podem aumentar, diminuir ou permanecer inalterados após o tratamento. Essas respostas divergentes estão fortemente relacionadas a diversas variáveis experimentais, como: tipo de plasma (DBD, luminoso, jato de plasma, etc), condições do processamento (tempo, tensão aplicada, gás utilizado, etc), além de fatores intrínsecos ao alimento, como a matriz vegetal e a composição química (Zargarchi *et al.*, 2024).

A Tabela 5 apresenta um resumo dos estudos que avaliaram os efeitos do tratamento com plasma frio em sucos de frutas, com ênfase nas condições de processamento aplicadas e nos principais resultados relacionados aos compostos fenólicos.

De modo geral, quando o tratamento é moderado (exposição curta e tensão adequada), observa-se que o plasma frio pode inativar enzimas deteriorantes (polifenoloxidase

Tabela 5 – Estudos sobre o efeito do plasma frio sobre os compostos fenólicos de suco de frutas

Matriz	Tipo de plasma	Condições	Resultados	Referências
Suco de Camu-camu	DBD	DBD: Frequência de 200, 420, 583, 698 e 960 Hz por 15 min	Manteve os TPC's até 583 Hz Redução discreta dos TPC's em 698Hz Aumento dos TPC's (>100%) em 960 Hz	(Castro <i>et al.</i> , 2020)
Suco de Maçã	Plasma Atmosférico – Reator Contínuo	Fluxo de ar: 470 L/h Ar sintético + Argônio	Redução de 24,6% dos polifenóis, melhor retenção comparada ao tratamento térmico	(Wang <i>et al.</i> , 2025)
Suco de Siriguela	Descarga Luminosa	Fluxo de nitrogênio: 10 a 30 mL/min Tempo de exposição: 5 a 15 min	Aumento de 58% dos TPC's no fluxo 20 mL/min por 15 min	(Paixão <i>et al.</i> , 2019)
Suco de Acerola	Descarga Luminosa	Fluxo de nitrogênio: 10, 15 e 20 mL/min Tempo de exposição: 5, 10 e 15 min	TPC's reduzido em função do fluxo e do tempo. Redução máxima de 30% na condição mais severa	(Fernandes; Santos; Rodrigues, 2019)
Suco de Mirtilo	Jato de Plasma	Frequência: 1000 Hz Fluxo de Oxigênio: 0,5 e 1% Tempo de exposição: 2, 4 e 6 min	Aumento dos TPC's em função da [O ₂] e tempo de exposição	(Hou <i>et al.</i> , 2019)
Suco de Abacaxi	DBD	Vtagem: 25 a 45 kV Tempo: 120 a 900 s	Aumento gradual dos TPC's Redução na condição extrema	(Pipliya; Kumar; Srivastav, 2023)
Suco de Abacaxi	Descarga Luminosa	Trat. otimizado: 38 kV/631 s Trat. extremo: 45 kV/900 s	Manteve os TPC's	(Pipliya; Kumar; Srivastav, 2024)

Fonte: Elaborado pela autora.

e peroxidase, por exemplo) e também romper estruturas celulares, facilitando a liberação de compostos fenólicos conjugados. Nesse cenário, diversos estudos reportam um aumento do teor de fenólicos em sucos como o de tomate, abacaxi, caju e camu-camu (Castro *et al.*, 2020; Ma; Lan, 2015; Pipliya; Kumar; Srivastav, 2023; Rodríguez *et al.*, 2017). Em contrapartida, se o processo gera um excesso de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio e é feito por tempo prolongado, pode ocorrer a oxidação e degradação dos fenólicos, resultando numa redução significativa de seus níveis. Este efeito foi observado em sucos como o de abacaxi, camu-camu e acerola.

A via principal de oxidação dos compostos fenólicos inclui reações envolvendo radicais livres (especialmente hidroxila e superóxido) e ozônio. Esses radicais podem romper o anel aromático e levar à formação de subprodutos. Já o incremento de fenólicos é atribuído à quebra da parede celular e outras estruturas da matriz vegetal e à consequente liberação de compostos intracelulares e/ou antes ligados a açúcares ou proteínas. Assim, ajustes na tensão e no tempo de exposição são essenciais para maximizar a retenção ou aumento desses compostos (Fernandes; Rodrigues, 2021; Kumar; Pipliya; Srivastav, 2023).

Há ainda relatos em que o plasma não promove alterações significativas nos compostos fenólicos totais. Essa estabilidade pode ocorrer quando o tratamento é aplicado em condições mais brandas ou em matrizes onde os fenólicos estão menos acessíveis ou protegidos por ligações com proteínas, fibras ou outras estruturas (Kumar; Pipliya; Srivastav, 2023). No entanto, isso não significa que não houve nenhuma mudança no perfil fenólico, uma vez que o plasma pode induzir modificações individuais nos compostos (isomerizações, adição ou abstração de radicais, hidrogenação, etc), sem haver efetiva alteração no conteúdo total.

A umidade da matriz alimentar é um fator importante na resposta dos compostos fenólicos ao tratamento com plasma, influenciando significativamente tanto a liberação quanto a modificação dessas moléculas. Em alimentos com alto teor de água, como frutas e sucos, o plasma interage eficientemente com os constituintes da matriz devido à maior disponibilidade de moléculas de água para ionização e dissociação, resultando na formação de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), ânions superóxido (O_2^-), peróxidos, nitratos e nitritos. Além disso, a presença de água favorece reações de hidrólise e aumenta a mobilidade iônica, fatores que intensificam a atividade das espécies reativas formadas pelo plasma, e podem contribuir para uma maior extração de fenólicos (Kumar; Pipliya; Srivastav, 2023; Perinban; Orsat; Raghavan, 2019).

No caso do suco de abacaxi, estudos recentes demonstraram que o tratamento com plasma frio atmosférico, em condições moderadas de tensão e tempo (por exemplo, 50 kV por 2 min), pode favorecer a retenção ou até mesmo um leve incremento nos teores de compostos fenólicos totais quando comparado ao suco in natura ou ao submetido à pasteurização térmica (95 °C por 2 min). Esse aumento tem sido atribuído à ação das espécies reativas geradas pelo plasma que atuam na desestruturação das paredes celulares, facilitando a liberação de fenólicos dos compartimentos intracelulares. Em contrapartida, quando se aplicam condições mais intensas de plasma (como 70 kV por 5 min), observa-se uma redução significativa no conteúdo fenólico, o que pode estar relacionado à degradação oxidativa desses compostos. Os resultados indicam que o equilíbrio entre a liberação e a degradação dos fenólicos depende diretamente dos parâmetros de aplicação do plasma (Pipliya; Kumar; Srivastav, 2023, 2024).

Apesar desses avanços, a maioria dos estudos que avaliam o efeito do plasma frio sobre os compostos fenólicos em sucos de frutas — incluindo os de abacaxi — se limita à quantificação do conteúdo fenólico total, utilizando ensaios colorimétricos como o de Folin-Ciocalteu, sem aprofundar os mecanismos químicos que levam ao aumento ou à degradação desses compostos. A escassez de informações detalhadas sobre quais compostos sofreram modificações, bem como sobre os mecanismos químicos responsáveis pelas transformações observadas, representa uma limitação relevante para a compreensão dos efeitos reais promovidos pelo plasma. Esse cenário revela a necessidade de abordagens analíticas mais detalhadas, capazes de identificar não apenas o conteúdo fenólico total, mas também os caminhos reacionais e os compostos intermediários formados durante o processamento.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar os efeitos de duas tecnologias de plasma frio — plasma de descarga de barreira dielétrica (DBD) e plasma de descarga luminosa (DL) — sobre os compostos voláteis e fenólicos do suco de abacaxi, com ênfase na modulação seletiva desses constituintes, na análise do impacto sobre o aroma da bebida e na investigação dos possíveis mecanismos químicos responsáveis pelas possíveis alterações.

3.2 Objetivos específicos

- Aplicar diferentes configurações de plasma frio (DBD e descarga luminosa) ao suco de abacaxi, variando frequência (no DBD) e fluxo de gás (no DL), a fim de avaliar os efeitos do tempo e da intensidade do tratamento sobre os perfis químicos da matriz.
- Caracterizar os compostos voláteis do suco de abacaxi tratado e não tratado, através de cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), com posterior análise descritiva com base em notas primárias e secundárias disponíveis nas bases de dados e demais literaturas.
- Calcular os valores de atividade de odor (OAVs) dos compostos voláteis identificados, e por agrupamento das principais notas descritivas, montar perfis sensoriais no formato de gráficos de radar, para avaliar alterações qualitativas e quantitativas nos descritores aromáticos do suco processado.
- Analisar o perfil fenólico por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS), com identificação dos compostos baseada em bibliotecas espectrais e cálculo das frações mássicas relativas de cada um.
- Avaliar os efeitos das configurações de plasma DBD e DL sobre os perfis volátil e fenólico do suco de abacaxi, destacando alterações seletivas, tendências químicas e potenciais rotas de transformação envolvidas.

4 METODOLOGIA

4.1 Preparo do suco de abacaxi

Os abacaxis foram obtidos de um distribuidor local de frutas (Fortaleza, Ceará), higienizados e processados em centrífuga para obtenção do suco puro. As amostras de suco processadas e não processadas foram armazenadas em sacos plásticos, em porções de 150 mL e acondicionadas a -18 °C.

4.2 Processamentos por Plasma Frio

Para o processamento por Plasma de Descarga de Barreira Dielétrica (DBD) foi utilizado um gerador de plasma Inergiae modelo PLS0130 acoplado a uma câmara contendo dois discos de alumínio de 8 cm de diâmetro separados a uma distância de 15 mm. Duas chapas de acrílico de 5 mm de espessura foram utilizadas como barreira dielétrica. Aliquotas de 30 mL de suco foram acondicionadas em placas de Petri e submetidas a exposição direta ao plasma. As condições de processamento utilizadas foram as frequências mínima, intermediária e máxima fornecidas pelo equipamento (50, 500 e 1000 Hz, respectivamente), fixando a voltagem em 20kV, durante 10 e 20 min cada.

Para o processamento por Plasma de Descarga Luminosa (DL), o plasma foi gerado a partir de ar sintético (grau FID 4.0, pureza 99,95%, White Martins, Brasil) em um sistema de bancada PE-50 (Plasma Etch, EUA). Foi utilizada uma fonte de frequência de rádio de 50 kHz para excitar os íons, aplicação de voltagem de 80 kV através dos eletrodos para gerar o plasma e uma bomba de vácuo para manter a câmara de processamento em baixa pressão. As condições de processamento utilizadas foram: fluxo de gás 10, 20 e 30 mL/min previamente estudadas pelo nosso grupo de (Alves Filho *et al.*, 2021; Campelo *et al.*, 2020) durante 10 e 20 min cada.

4.3 Identificação do perfil volátil

4.3.1 Cromatografia Gasosa Acoplada a Espectrômetro De Massas (CG-MS)

A identificação do perfil de compostos voláteis das amostras processadas e não processadas foi realizada através da análise de Cromatografia Gasosa acoplada a espectrômetro

de massas (GC-MS), de acordo com estudo prévio de Alves Filho *et al.* (2019), com as devidas adaptações para o preparo das amostras de suco de abacaxi, que foram estabelecidas em um teste preliminar realizado em suco de abacaxi *in natura*.

Uma alíquota de 5 mL de suco de abacaxi foi adicionada a um vial de 10 mL contendo 2 g de cloreto de sódio e termostatizados em 40 °C por 10 min fechadas e sem agitação. Os compostos voláteis foram extraídos e absorvidos através da técnica de Microextração em Fase Sólida (SPME). Uma fibra revestida com 50/30 µm de Divinilbenzeno/Carboxeno/Polidimetilsiloxano (DVB/CAR/PDMS) foi exposta ao *headspace* da amostra, com a temperatura mantida a 40°C, por 30 min sem agitação. Após a extração, os voláteis foram dessorvidos em um cromatógrafo gasoso (Termo Scientific, modelo ISQ) acoplado à um espectrômetro de massas (Trace CG Ultra MS), também acoplado a um detector de íon trap operando no modo EI a 70 eV e 200 °C com uma faixa de varredura de massa de 40 a 400 m/z a uma taxa de amostragem de 3,0 µs. O gás de arraste foi o hélio a 1,0 mL/min. A rampa de temperatura no CGMS foi: início a 40 °C, segurando por 4 min, subiu para 80 °C a 2.5 °C/min, subiu para 110°C a 5.0°C/min, subiu para 250°C a 10°C/min e mantida após atingir 250°C por 1 min. O injetor estava a 230°C, a linha de transferência do MS a 250°C e a fonte de íons do MS a 200 °C. A coluna utilizada foi uma DB-5MS.

4.3.2 Análises descritivas dos aromas

Os principais compostos voláteis identificados nos sucos de abacaxi processados e não processados foram agrupados de acordo com o odor primário de cada um com base nas informações disponíveis no banco de dados da “*The Good Scent Company*” (COMPANY, 2021).

Os valores de odor ativo (OAV) foram calculados com base na fração mássica de cada composto dividido pelo seu odor *threshold* na água (Grosch, 2001). Os valores para o odor *threshold* na água foram consultados na literatura (Padrayuttawat *et al.*, 1997).

As cinco principais notas descritivas que representam os odores obtidos para o suco de abacaxi foram usadas para montar o perfil descritivo das amostras e apresentadas sob a forma de gráficos de radar para melhor entendimento e percepção das alterações, segundo a metodologia de W. Grosch (Grosch, 2001; Teixeira *et al.*, 2014).

4.4 Identificação do perfil fenólico

4.4.1 Extração e concentração

Os compostos fenólicos foram extraídos seguindo a metodologia descrita por Steingass *et al.* (2015) com algumas adaptações. Primeiramente, 10 mL de suco de abacaxi foram misturados com 20 mL de metanol gelado (4 °C), 0,01 mL de HCl e 0,10 g de ácido ascórbico e refrigerados por 18 h a 4 °C. A mistura foi centrifugada. A fase líquida foi separada e armazenada (primeira alíquota). A fase sólida foi misturada com 10 mL de metanol frio, 0,005 mL de HCl e 0,05 g de ácido ascórbico e uma nova extração aconteceu por 3 h. A mistura foi centrifugada e a fase líquida foi separada e armazenada junto com a primeira alíquota. A fase líquida contendo os fenólicos foi concentrada em um rotoevaporador (Tecnal modelo TE211, Piracicaba, Brasil) operando a 40 °C e 200 mmHg de vácuo para remoção do metanol. Os fenólicos da fase líquida concentrada foram isolados por Extração em Fase Sólida utilizando um cartucho DSC-18. Uma solução de HCl 0,01% (5 mL) foi passada através do cartucho antes de eluir os fenólicos com 3 mL de metanol. O extrato metanólico contendo os compostos fenólicos passou por completa secagem em um concentrador de vácuo rotacional (modelo Christ RVC 2-18, Osterode am Harz, Alemanha) operando a 40°C e 200 mmHg de vácuo.

4.4.2 Hidrólise alcalina

Os extratos fenólicos secos foram ressuspensos em 3 mL de água destilada e transferidos para um tubo Falcon de 15 mL. Em seguida, adicionou-se 1 mL de NaOH 1 M para promover a hidrólise alcalina da amostra, visando separar os compostos fenólicos conjugados de suas frações glicosídicas e, assim, favorecer sua detecção no cromatógrafo gasoso. Os tubos Falcon foram mantidos sob agitação a 200 rpm por 24 h em um termoagitador (Kasvi modelo K80-200, São José dos Pinhás, Brasil). Após a hidrólise alcalina, o pH das amostras foi ajustado para 1,25 usando uma solução de HCl 1 M. Em seguida, os compostos fenólicos foram extraídos com acetato de etila. A extração foi realizada adicionando 1 mL de acetato de etila ao tubo Falcon, misturando vigorosamente as fases por 10 s usando um vórtice (Tecnal modelo TE211, Piracicaba, Brasil), aguardando 1 min e coletando a fase acetato de etila. Este procedimento foi realizado 3 vezes, e as fases acetato de etila foram misturadas. A fase de acetato de etila contendo os compostos fenólicos foi secas em um concentrador de vácuo rotacional

(modelo Christ RVC 2-18, Osterode am Harz, Alemanha), operando a 40 °C e 200 mmHg de vácuo.

4.4.3 Cromatografia Gasosa - espectrometria de massas

Antes da análise cromatográfica, os compostos fenólicos foram derivatizados seguindo a metodologia apresentada por Zuo, Wang e Zhan (2002). Em resumo, 30 µL de piridina e 70 µL de BSTFA com 1% de TMS foram adicionados ao Eppendorf contendo os fenólicos secos. Os Eppendorfs foram incubados a 600 rpm por 1,5 h em um termoagitador (Kasvi modelo K80-200, São José dos Pinhás, Brasil) operando a 70 °C. Após a derivatização, 0,1 µL das amostras foram injetadas no cromatógrafo gasoso.

As amostras foram detectadas usando um espectrômetro de massas (Thermos modelo ISQ) acoplado ao cromatógrafo gasoso. As temperaturas do injetor e da interface foram de 250 °C, trabalhando no modo splitless. As separações cromatográficas foram realizadas usando uma coluna Equity-1 (30 m × 0,25 mm ID × 0,25 filme). A programação de temperatura começou em 80 °C por 4 min, aumentou para 80 °C a 2,5 °C/min, aumentou para 100 °C a 5,0 °C/min, mantendo-se nessa temperatura por 1 min, e então aumentou para 250 °C a 10,0 °C/min, mantendo a temperatura final por 1 min. O detector de íons operou no modo EI a 70 eV e 200 °C com uma faixa de varredura de massa de 50 a 400 m/z. O gás transportador foi hélio, com uma taxa de fluxo de 1,0 mL/min. Os espectros de massa foram comparados com a biblioteca de espectros de massa do NIST e da Wiley. As áreas dos picos foram usadas para calcular os conteúdos relativos de compostos fenólicos. Os resultados foram expressos como frações mássicas (%).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mudanças no perfil volátil do suco de abacaxi induzidas por Plasma

5.1.1 Alterações químicas nos compostos voláteis induzidas pelos Plasmas DBD x Descarga Luminosa

As Tabelas 6 e 7 apresentam os compostos voláteis identificados no suco de abacaxi controle, bem como suas respectivas frações mássicas (% m/m) sob cada condição de processamento DBD e PL, respectivamente. O perfil volátil do suco de abacaxi foi caracterizado principalmente por ésteres (71,4%), seguidos por dois tioésteres (14,8%) e outros compostos minoritários (ácidos, aldeídos, furanos e hidrocarbonetos, totalizando 13,8%). Dentre esses compostos, hexanoato de metila (53,2%), 3-(metiltio)propanoato de metila (12,5%), hexanoato de etila (10,0%) e 2-metilbutanoato de metila (7,8%) destacaram-se como os principais constituintes no suco de abacaxi controle e estão de acordo com a literatura.

Tabela 6 – Abundância relativa de compostos voláteis (% m/m) do suco de abacaxi submetido ao plasma DBD em diferentes condições

Compostos	Controle	Plasma DBD (frequência e tempo)					
		50 Hz 10 min	50 Hz 20 min	500 Hz 10 min	500 Hz 20 min	1000 Hz 10 min	1000 Hz 20 min
Acetato de etila	3,48	5,10	6,95	5,95	2,31	12,14	12,20
Butanoato de metila	1,70	4,52	0,81	5,27	1,02	1,38	0,79
2-metilbutanoato de metila	7,84	8,32	3,70	9,70	9,81	9,75	5,14
2-metilbutanoato de etila	1,54	1,82	1,17	2,13	1,66	2,09	1,22
Hexanoato de metila	53,16	42,32	23,91	11,65	27,88	27,53	28,69
Hexanoato de etila	10,00	10,25	6,45	1,98	7,52	8,33	8,64
3-(metiltio)propanoato de metila	12,55	16,29	16,14	38,29	18,82	21,39	16,97
3-(metiltio)propanoato de etila	2,28	3,76	3,71	8,31	4,33	5,09	4,36
Octanoato de metila	2,44	0,53	0,42	0,00	0,49	0,42	0,29
1,3,5-undecatrieno	0,56	1,89	0,45	0,00	0,52	1,49	1,71
Ácido octanoico	0,03	0,88	0,47	1,43	0,54	1,06	1,12
Octanoato de etila	0,07	1,71	0,14	2,00	1,27	0,85	0,28
Decanal	0,00	0,00	0,94	0,00	1,79	0,00	0,00
5-hidroximetil-2-furfural	0,00	0,00	0,00	0,00	0,66	0,00	0,11
Acetato de feniletila	0,17	0,62	0,99	0,72	0,88	0,66	1,19
5-butilidido-2(3h)-furanona	0,17	0,44	0,91	0,51	0,60	0,48	0,74
Linoleato de metila	0,98	1,42	2,18	1,66	1,72	1,56	1,42

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 – Frações mássicas de compostos voláteis (% p/p) do suco de abacaxi submetido ao plasma de descarga luminosa em diferentes condições

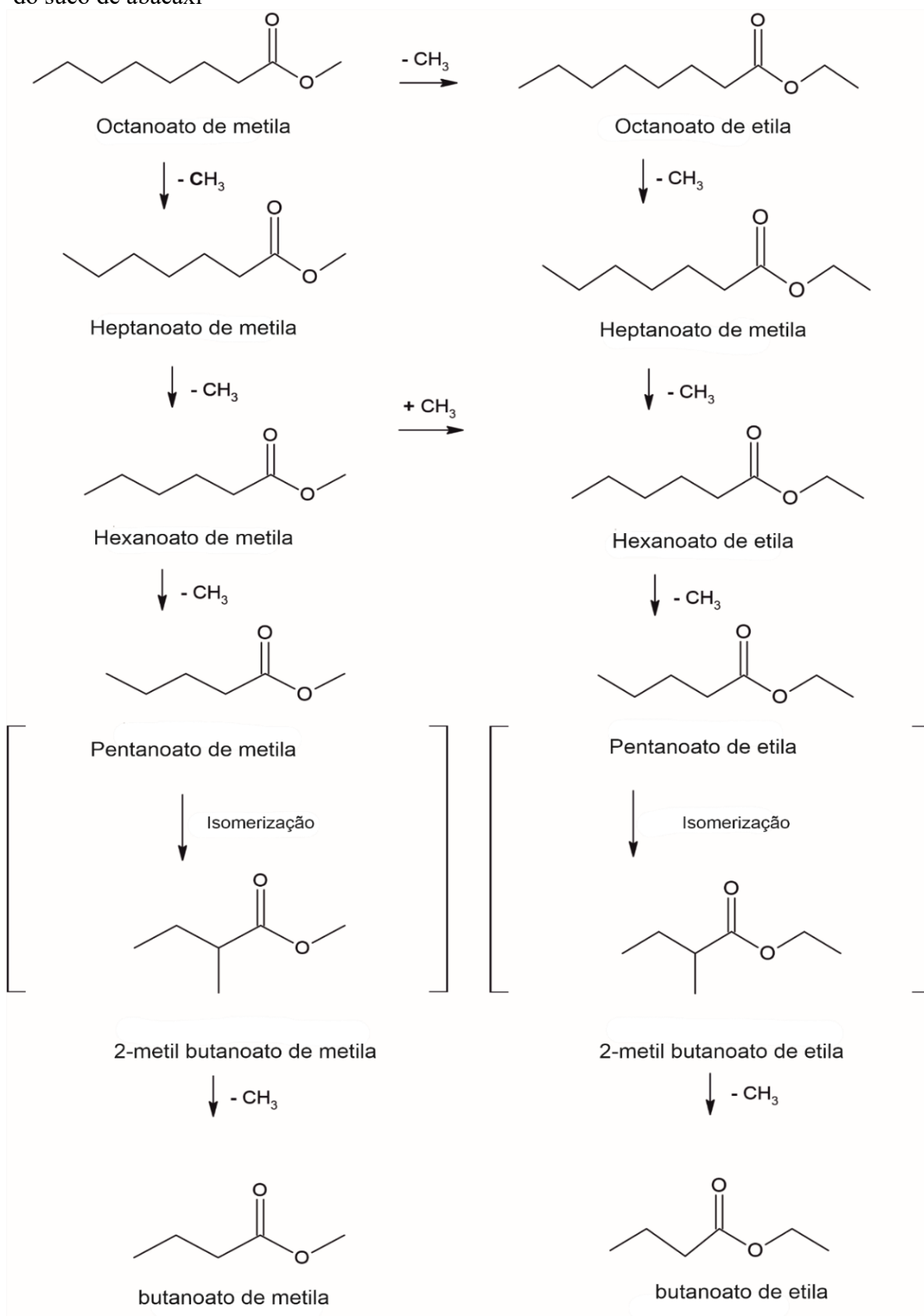
Compostos	Controle	Plasma de Descarga Luminosa (fluxo de ar e tempo)					
		10 mL/min 10 min	10 mL/min 20 min	20 mL/min 10 min	20 mL/min 20 min	30 mL/min 10 min	30 mL/min 20 min
Acetato de etila	3,48	3,41	2,98	2,97	0,00	2,99	0,30
Butanoato de metila	1,70	1,53	1,35	1,41	3,94	1,40	3,87
2-metilbutanoato de metila	7,84	8,85	8,54	8,70	11,67	7,41	7,78
2-metilbutanoato de etila	1,54	1,24	1,49	1,97	2,18	1,56	1,73
Hexanoato de metila	53,16	51,04	46,79	46,73	42,73	33,40	42,32
Hexanoato de etila	10,00	8,80	8,37	8,70	9,51	7,78	10,25
3-(metiltio)propanoato de metila	12,55	14,58	17,27	14,72	15,38	22,41	16,29
3-(metiltio)propanoato de etila	2,28	2,52	3,22	2,71	3,65	5,62	3,76
Octanoato de metila	2,44	0,88	0,75	0,61	0,00	0,32	0,53
1,3,5-undecatrieno	0,56	0,78	0,67	0,93	1,28	0,70	1,89
Ácido octanoico	0,03	0,00	0,00	0,66	0,69	1,82	0,88
Octanoato de etila	0,07	0,02	0,04	0,08	0,10	0,11	0,07
Decanal	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5-hidroximetil-2-furfural	0,00	0,15	0,90	1,62	0,81	0,98	0,12
Acetato de feniletila	0,17	0,58	0,32	0,36	0,44	0,71	0,52
5-butilidido-2(3h)-furanona	0,17	0,37	0,29	0,33	0,37	0,50	0,33
Linoleato de metila	0,98	1,12	0,89	1,28	1,34	1,08	1,85

Fonte: Elaborado pela autora.

Avaliando as frações mássicas (%), é possível observar que a aplicação de Plasma DBD reduziu consideravelmente a abundância relativa de ésteres, em especial aqueles com maior número de carbonos, como hexanoato de metila, hexanoato de etila e octanoato de metila. Os cálculos de balanço de massa realizados com os compostos ésteres indicaram que o plasma promoveu a abstração de unidades metila dos ésteres, reduzindo continuamente o número de carbonos dessas moléculas. O efeito do Plasma de descarga luminosa foi semelhante, porém mais discreto, indicando modificações menos intensas. A Figura 5 mostra uma possível via química proposta para esse tipo de alteração. A abstração de metila ocorreu principalmente em ésteres com mais de seis carbonos, enquanto compostos com menos carbonos mostraram-se menos afetados por essa remoção de metila. Dessa forma, o produto final dessas reações ocasionou aumento na fração mássica de acetato de etila, butanoato de metila e 2-metilbutanoato de metila (ésteres de cadeia carbônica menor). A abstração de grupos metila já foi relatada em algumas aplicações de plasma frio, como em furanos e pirazinas ramificadas em café pronto para o consumo (Fernandes; Rodrigues, 2021), e em filmes à base de amido de milho (Goiana *et al.*, 2021).

Além da redução de ésteres metilados de cadeia longa, observou-se em ambos os tipos de plasma uma conversão parcial de ésteres metílicos em ésteres etílicos, como a formação de 2-metilbutanoato de etila a partir do 2-metilbutanoato de metila. Essa transformação pode ser explicada pela ocorrência de reações de etilação induzidas por espécies reativas presentes no plasma, como radicais livres e íons, que favorecem a substituição de grupos metila ($-\text{CH}_3$) por grupos etila ($-\text{C}_2\text{H}_5$).

Figura 5 – Reações de abstração de metila induzidas pelos Plasmas DBD e DL nos ésteres do suco de abacaxi



Fonte: elaborado pela autora.

de avaliadores sensoriais treinados, conforme já é realizado (Teixeira *et al.*, 2014). A Tabela 8 apresenta as notas descritivas de odor, obtidas na plataforma *The Good Scent Company*, e o valor *odor threshold* dos principais compostos voláteis nos sucos de abacaxi.

Tabela 8 – Compostos voláteis identificados no suco de abacaxi e seus respectivos Descritores Primários, Descritores Secundários e Odor *threshold* em água

Compostos	Descritor de Odor Primário	Descritor De Odor Secundário	Odor Threshold (mg/L em água)
Acetato de etila	etéreo	-	25
Butanoato de metila	frutado	doce/maçã	0,076
2-metilbutanoato de metila	frutado	etéreo	0,00025
2-metilbutanoato de etila	frutado	doce acentuado	0,0003
Hexanoato de metila	frutado	etéreo	0,084
Hexanoato de etila	frutado	doce	0,001
3-(metiltio)propanoato de metila	sulfuroso	-	0,18
3-(metiltio)propanoato de etila	sulfuroso	-	0,007
Octanoato de metila	ceroso	-	0,2
1,3,5-undecatrieno	frutado	Frescor/verde	0,00002
Ácido octanoico	gorduroso	-	0,91
Octanoato de etila	ceroso	-	0,005
Decanal	aldeídico	-	0,03
5-hidroximetil-2-furfural	gorduroso	-	100
Acetato de feniletila	floral	-	0,65
5-butilidido-2(3h)-furanona	gorduroso	-	0,007
Linoleato de metila	etéreo	-	2

Fonte: elaborado pela autora.

Para a construção do perfil aromático do suco de abacaxi, foram calculados os valores de odor ativo (OAVs), definidos como a razão entre a concentração relativa de cada composto volátil e seu respectivo limiar de detecção (*threshold*). Em seguida, os compostos foram classificados segundo seus descritores aromáticos predominantes — frutado, sulfuroso, gorduroso, ceroso, floral e aldeídico — com base em descrições encontradas na literatura especializada (COMPANY, 2021). Para cada condição de tratamento com Plasma DBD e Plasma DL, bem como para a amostra controle, os OAV's foram somados dentro de cada grupo descritivo, gerando valores que representam a contribuição relativa de cada nota sensorial para

o aroma total dos sucos (Tabelas 9 e 10). Esses valores foram utilizados para a construção dos gráficos radar, permitindo a visualização comparativa do impacto sensorial de cada condição. Para discutir as principais mudanças no aroma dos sucos tratados, cada condição de processamento foi comparada com o perfil descritivo do suco natural (controle).

Tabela 9 – Valores de atividade de odor (OAV) dos descritores primários de aroma do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma DBD

Notas Descritivas	Plasma DBD (Frequência e tempo)						
	Controle	50 Hz 10 min	50 Hz 20 min	500 Hz 10 min	500 Hz 20 min	1000 Hz 10 min	1000 Hz 20 min
Frutado	75305	68560	20809	79950	127779	140294	86513
Sulfuroso	396	620	1400	723	846	718	1013
Gorduroso	24	63	132	73	86	70	108
Ceroso	26	345	29	402	256	171	58
Floral	0,27	0,95	1,52	1,11	1,36	1,01	1,83
Aldeídico	0	0,0	31	0	60	0	0

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 10 – Valores de atividade de odor (OAV) dos descritores primários de aroma do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma de Descarga Luminosa

Notas Descritivas	Plasma de Descarga Luminosa (Fluxo de ar e tempo)						
	Controle	10 mL/min 10 min	10 mL/min 20 min	20mL/min 10 min	20 mL/min 20 min	30 mL/min 10 min	30 mL/min 20 min
Frutado	75305	87769	81710	97023	110519	78201	141960
Sulfuroso	396	441	556	470	606	927	628
Gorduroso	24	53	42	48	54	74	49
Ceroso	26	9	12	20	21	23	17
Floral	0,27	0,90	0,50	0,55	0,67	1,09	0,80
Aldeídico	0	3,5	0	0	0	0	0

Fonte: elaborado pela autora.

As tabelas 11 e 12 apresentam os valores de odor ativo (OAVs) das notas descritivas secundárias do aroma frutado. Elas também foram avaliadas para melhor discussão dos resultados, pois o aroma frutado foi predominante no suco de abacaxi, mesmo após os processamentos. O tratamento dos dados foi o mesmo aplicado para construção dos gráficos de radar com base nos descritores primários.

Tabela 11 – Valores de atividade de odor (OAV) das notas secundárias dos compostos de aroma frutado do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma DBD

Notas Descritivas	Plasma DBD (Frequência e tempo)						
	Controle	50 Hz 10 min	50 Hz 20 min	500 Hz 10 min	500 Hz 20 min	1000 Hz 10 min	1000 Hz 20 min
Maçã/doce	15168	12589	5887	14680	13870	15640	12483
Etéreo	32005	33554	14922	39129	39553	39348	20769
Frescor/Verde	28133	22417	0	26141	74355	85306	53261

Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 12 – Valores de atividade de odor (OAV) das notas secundárias dos compostos de aroma frutado do suco de abacaxi não tratado e tratados com Plasma de Descarga Luminosa

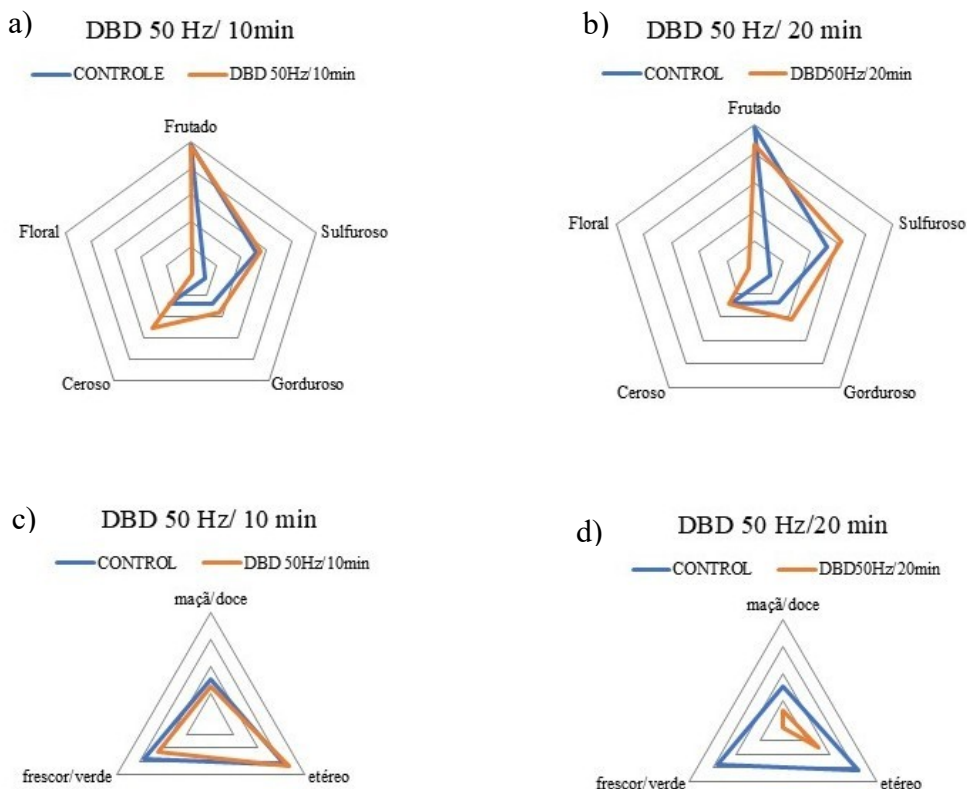
Notas Descritivas	Plasma de Descarga Luminosa (fluxo de ar e tempo)						
	Controle	10 mL/min 10 min	10 mL/min 20 min	20mL/min 10 min	20 mL/min 20 min	30 mL/min 10 min	30 mL/min 20 min
Maçã/doce	15168	12961	13348	15289	16838	12986	16054
Etéreo	32005	36005	34730	35370	47180	30031	31608
Frescor/Verde	28133	38803	33631	46364	63801	35183	94298

Fonte: elaborado pela autora.

5.1.3 Perfil aromático Controle x Plasma DBD

O processamento por plasma em DBD em baixa frequência (50 Hz) promoveu alterações principalmente no descritor frutado do aroma do suco de abacaxi. Embora os ésteres característicos desse suco tenham sido modificados após o tratamento, a contribuição total do descritor frutado manteve-se semelhante após um curto tempo de exposição (10 min) (Figura 7.a.). No entanto, com tempos de processamento mais prolongados (20 min), a relevância desse descritor diminuiu, embora ainda permanecesse como o principal descritor aromático (Figura 7.b.). O suco de abacaxi natural apresentou um perfil equilibrado entre as notas secundárias doces, etéreas e frescas. Já em baixas frequências e longo tempo de exposição (50 Hz/20 min), as amostras perderam completamente a nota fresca, e a nota etérea passou a predominar no aroma frutado (Figura 7.d.). Esse efeito ocorreu devido à ausência de 1,3,5-undecatrieno após processamento nessas condições. Em alguns estudos, esse composto é citado como importante contribuinte para o odor típico de abacaxi em diferentes cultivares (Lasekan; Hussein, 2018; Pino, 2013; Wu *et al.*, 2021).

Figura 7 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DBD: **a)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 50 Hz/10 min; **b)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 50 Hz/20 min; **c)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 50 Hz/10 min; **d)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 50 Hz/20 min



Fonte: elaborado pela autora.

O descritor sulfuroso aumentou em baixa frequência e longo tempo de processamento (50 Hz/20 min) em razão do incremento na fração mássica de 3-metil(tio)propanoato de etila e 3-metil(tio)propanoato de metila (Figura 7.a). Já o descritor gorduroso se intensificou após a aplicação de plasma DBD em baixa frequência, em todos os tempos de processamento, devido ao aumento significativo na fração mássica de 5-butil-diidro-2(3H)-furanona e ácido octanoico, sendo esse aumento ainda mais expressivo em tempos de processamento prolongados (Figura 7.b).

O aroma ceroso elevou-se depois de 10 min de exposição em baixa frequência em função do aumento no teor de etil octanoato (>100%). Contudo, o processamento mais demorado (50 Hz/20 min) reduziu a intensidade do aroma ceroso em consequência da queda significativa nas concentrações de metil e etil octanoato, compostos que conferem essa nota aromática ao suco de abacaxi (Figuras 7. a e b). De acordo com a via de reação observada para

os ésteres (Figura 5), os compostos octanoato de metila e de etila se transformaram em ésteres de cadeia mais curta, associados a notas frutadas.

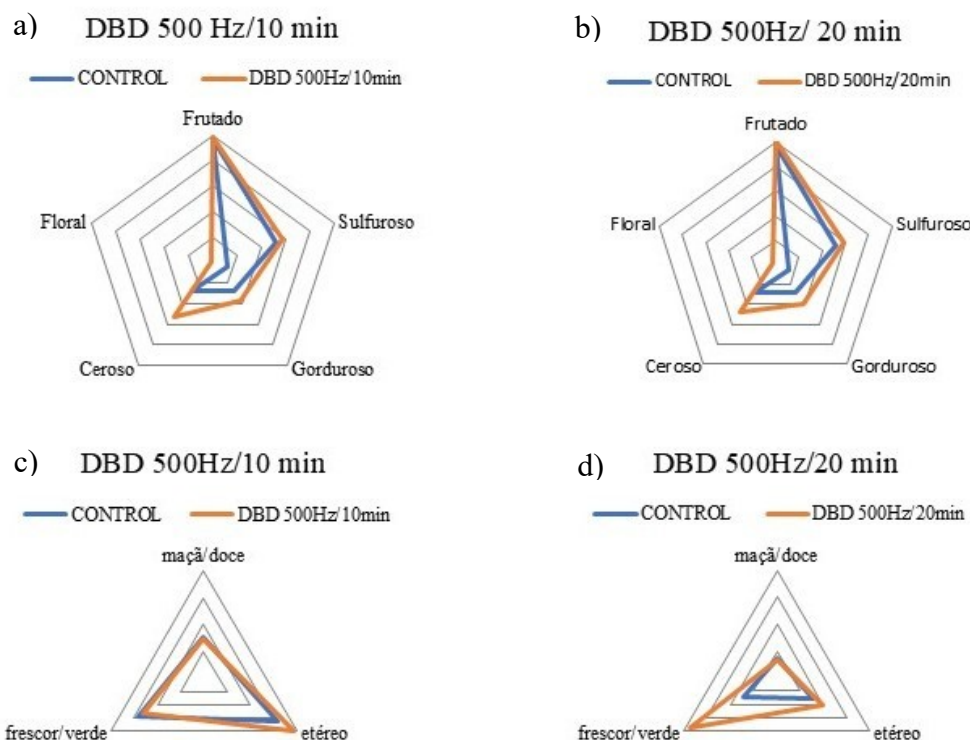
O processamento prolongado (20 min) em baixa frequência resultou no surgimento de uma nota aldeídica, proveniente da formação de decanal, gerado pela cisão de pequenas quantidades de ésteres de ácidos graxos no suco (Campelo *et al.*, 2020). Entretanto, o OAV dessa nota aldeídica foi insignificante quando comparado aos demais descritores aromáticos principais, não afetando a qualidade sensorial do suco.

Em frequência intermediária (500 Hz), o descritor frutado apresentou maior impacto no aroma, comparado ao suco natural. As notas secundárias desse descritor indicaram um aumento expressivo da nota fresca em tempos de processamento mais longos (20 min), enquanto as notas doce e etérea permaneceram nos mesmos níveis observados no suco natural (Figura 8). O crescimento da nota fresca está associado ao aumento na concentração de 1,3,5-undecatrieno.

Os aromas de gorduroso e ceroso também aumentaram no tratamento com plasma a 500 Hz. O aroma gorduroso tornou-se 258% mais intenso devido ao aumento significativo na concentração de 5-butildiidro-2(3H)-furanona e ácido octanoico nos primeiros 10 min de tratamento. Um aumento adicional foi observado após 20 min, com a formação de 5-hidroximetil-2-furaldeído. O aumento de octanoato de etila intensificou o aroma ceroso. No suco de abacaxi fresco, a intensidade do aroma ceroso é atribuída a quantidades equilibradas de octanoato de metila e etila. No suco tratado com plasma, o octanoato de metila foi convertido em octanoato de etila (mecanismo semelhante ao da Figura 6), passando a ser o responsável pela caracterização do aroma ceroso (Figura 8. a e b).

Na condição 500 Hz, o aroma frutado permaneceu como o principal descritor aromático do suco de abacaxi, apesar da redução na concentração de ésteres de cadeia longa. Isso se deve ao fato de ésteres de cadeia longa apresentarem valores de odor *threshold* maiores, enquanto ésteres de cadeia curta apresentam valores de odor *threshold* menores (Tabela 8). Essa diferença manteve estável a soma dos valores de atividade de odor (OAVs) dos compostos frutados.

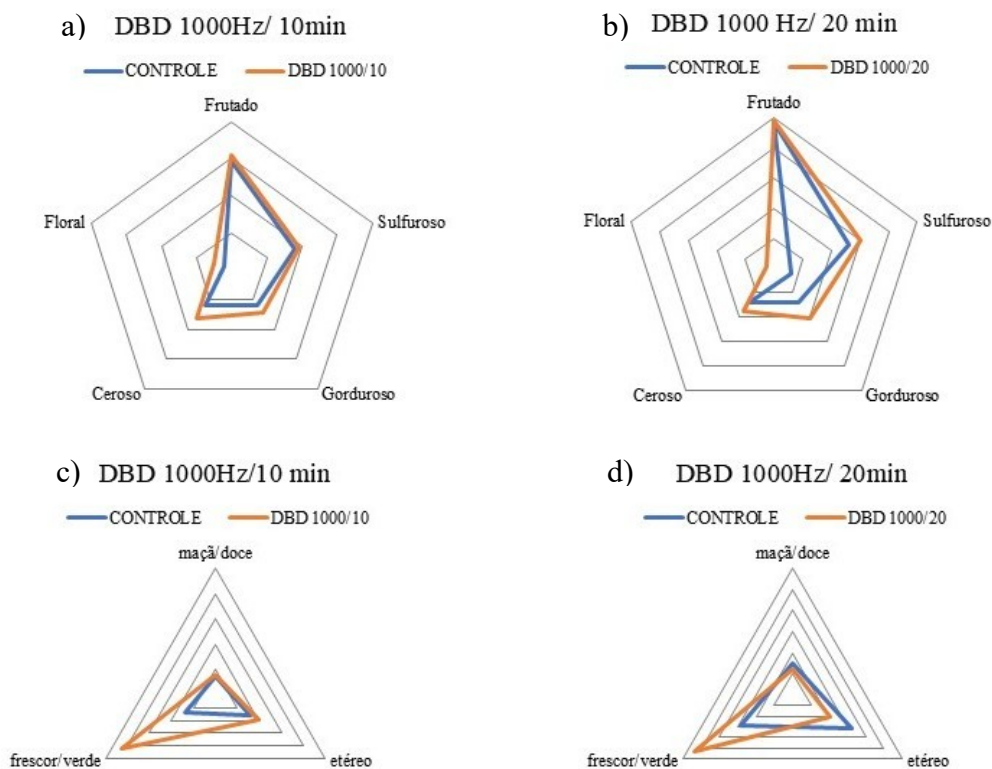
Figura 8 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DBD: **a)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 500 Hz/10 min; **b)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 500 Hz/20 min; **c)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 500 Hz/10 min; **d)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 500 Hz/20 min



Fonte: elaborado pela autora.

Em alta frequência (1000 Hz), o impacto do descritor frutado no aroma também aumentou, de forma mais expressiva após 10 min de tratamento. (Figura 9.a e b). As notas descritivas secundárias do aroma frutado seguiram a mesma tendência observada na frequência intermediária (500Hz), com aumento da nota de frescor/verde e redução da nota etérea. O aumento da nota fresca está relacionado ao aumento na concentração de 1,3,5-undecatrieno (Figura 9. c e d).

Figura 9 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DBD: **a)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 1000 Hz/10 min; **b)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 1000 Hz/20 min; **c)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 1000 Hz/10 min; **d)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 1000 Hz/20 min



Fonte: elaborado pela autora.

O aumento de OAV mais relevante na condição 1000Hz foi o do descritor sulfuroso. Nesta condição operacional aplicada durante tempo de tratamento prolongado (20 min), a razão entre os OAV's frutado e sulfuroso diminuiu de 190,1 (natural) para 85,4 (após o tratamento). É importante destacar este resultado, pois indica maior contribuição do aroma sulfuroso, o que pode comprometer o equilíbrio olfativo do suco de abacaxi e causar certa rejeição ao consumidor.

Um comportamento ainda mais acentuado foi observado sob 50 Hz por 20 min, com razão reduzida para apenas 15, refletindo uma perda crítica do aroma frutado. Essa condição, que foi associada à completa ausência do 1,3,5-undecatrieno — composto que apresenta o menor limiar de detecção — comprometeu a percepção de frescor em sua totalidade. A combinação da perda desse marcador aromático com o aumento da nota sulfurosa resultou

em um perfil desbalanceado e potencialmente indesejável. Assim, ambas as condições (50 Hz/20 min e 1000 Hz/20 min) não são recomendadas para o processamento do suco de abacaxi.

O OAV dos descritores gorduroso e ceroso também aumentou após tratamento com alta frequência (1000Hz), acompanhando a mesma tendência observada no suco tratado em frequência intermediária.

Um efeito positivo da aplicação do plasma DBD foi a redução expressiva do hexanoato de metila, éster de cadeia longa que confere um aroma doce e pungente ao abacaxi e é considerado um *off-flavor* por alguns consumidores (Vollmer *et al.*, 2021) Essa redução foi mais acentuada especificamente na condição 500 Hz por 10 min. A redução na percepção desse aroma pode tornar o suco de abacaxi mais agradável a consumidores mais sensíveis a essas notas.

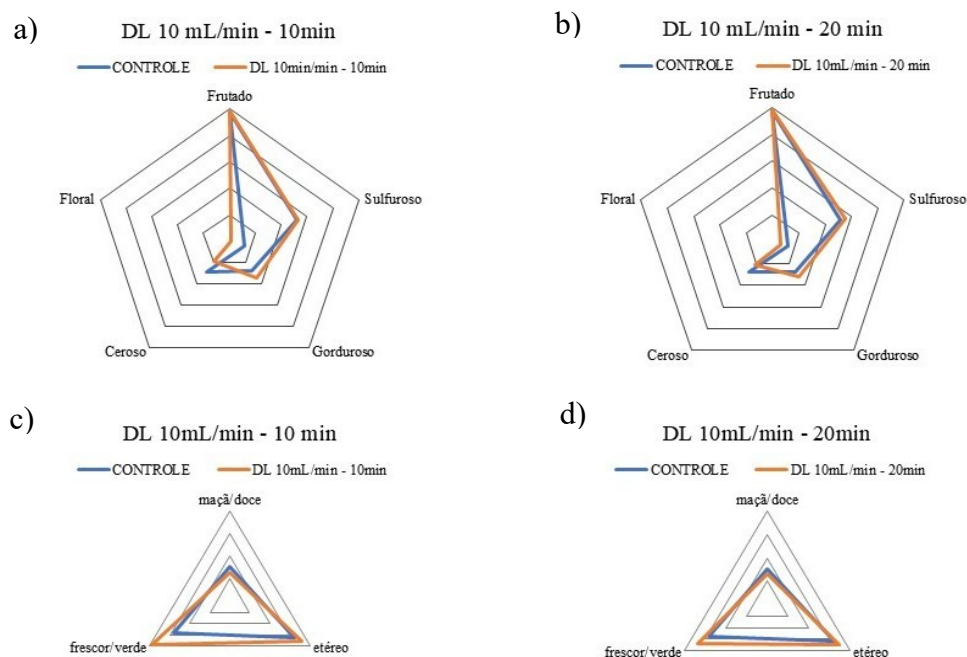
A avaliação dos descritores de aroma nas três frequências testadas indicou que o tratamento com plasma a 500 Hz promove a intensificação das notas de frescor no suco de abacaxi. Por outro lado, a aplicação da menor frequência (50Hz) e da maior frequência (1000Hz) não são recomendadas, uma vez que reduzem significativamente o descritor frutado e suas características de frescor, além de aumentar a razão entre as notas frutada e sulfurosa.

5.1.4 Perfil aromático Controle x Plasma DL

A aplicação do plasma de descarga luminosa (DL) no suco de abacaxi também promoveu alterações no perfil aromático em comparação ao suco não processado. O suco controle apresentou, como já visto, um perfil equilibrado entre as notas doces (associadas a ésteres de cadeia curta como butanoato de metila), etéreas (como hexanoato de metila) e frescas (associadas ao 1,3,5-undecatrieno).

O descritor frutado manteve-se como principal nota aromática em todas as condições de DL testadas. Sob fluxo de ar de 10mL/min, houve leve incremento nas frações mássicas dos ésteres frutados de cadeia curta (2-metilbutanoato de metila) e do 1,3,5-undecatrieno, e redução das frações mássicas dos ésteres de cadeia longa (hexanoato de metila e etila). Estas ligeiras mudanças contribuíram para manutenção das notas secundárias doce e etérea, e para um discreto aumento da nota de frescor (Figura 10. c e d).

Figura 10 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DL: **a)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 10mL/ min - 10 min; **b)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 10mL/ min - 20 min; **c)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 10mL/ min - 10 min; **d)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 10mL/ min - 20 min



Fonte: elaborado pela autora.

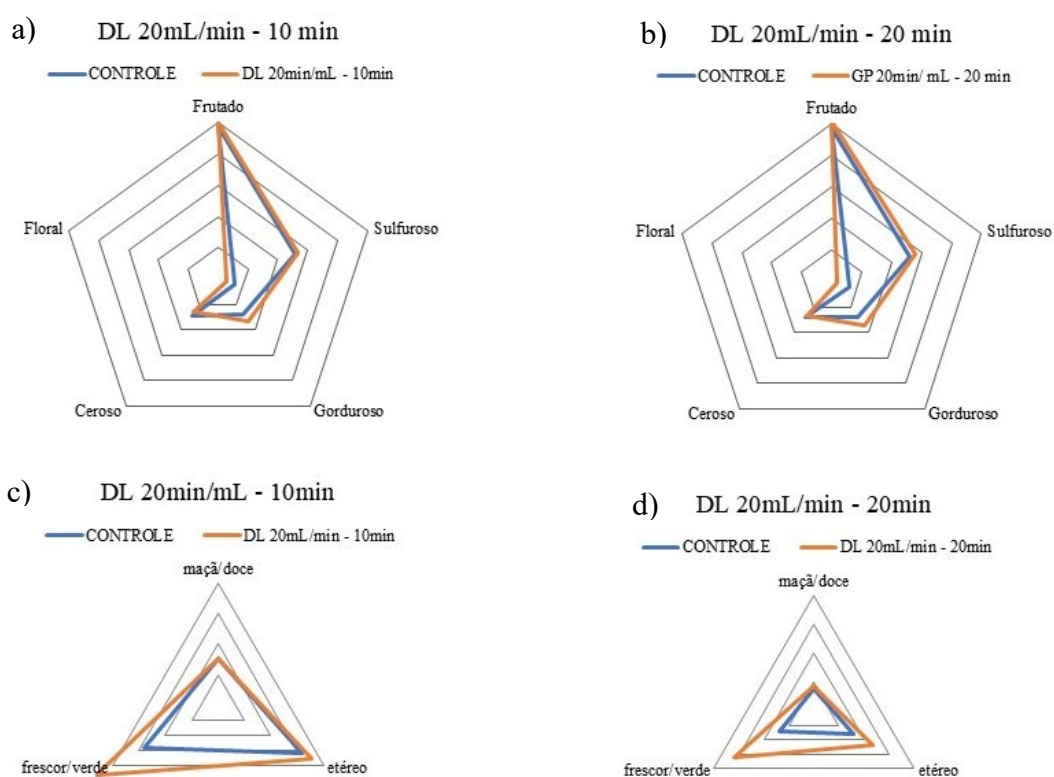
O descritor sulfuroso apresentou aumento discreto e progressivo com o maior tempo de exposição, ainda que esteja relacionado à redução de ésteres de maior OAV e aumento de ésteres de menor OAV. O descritor gorduroso apresentou aumento sutil nas condições em função do aumento da fração mássica de 5-butil-diidro-2(3H)-furanona. O descritor ceroso apresentou menor participação em ambos tempos de processamento, associada à redução das frações mássicas dos ésteres de cadeia longa octanoato de metila e octanoato de etila (Figura 10. a e b).

O processamento em baixo fluxo de ar e curto tempo de exposição (10 mL/min por 10 min) também resultou no surgimento de uma nota aldeídica, representada pela presença de decanal, gerado pela cisão de pequenas quantidades no suco (Campelo *et al.*, 2020). Entretanto, assim como nas condições de baixa frequência do plasma DBD, o OAV dessa nota aldeídica foi igualmente insignificante quando comparado aos demais descritores aromáticos principais, não exercendo influência no perfil sensorial do suco de abacaxi.

Sob condições de intermediárias de fluxo (20 mL/min), observou-se aumento mais

expressivo do descritor frutado, especialmente após 20 min. Houve intensificação marcante da nota de frescor no perfil secundário, resultado do aumento da fração mássica do 1,3,5-undecatrieno (Figura 11. b e c).

Figura 11 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DL: **a)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 20mL/min - 10 min; **b)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 20mL/min - 20 min; **c)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 20mL/min - 10 min; **d)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 20mL/min - 20 min

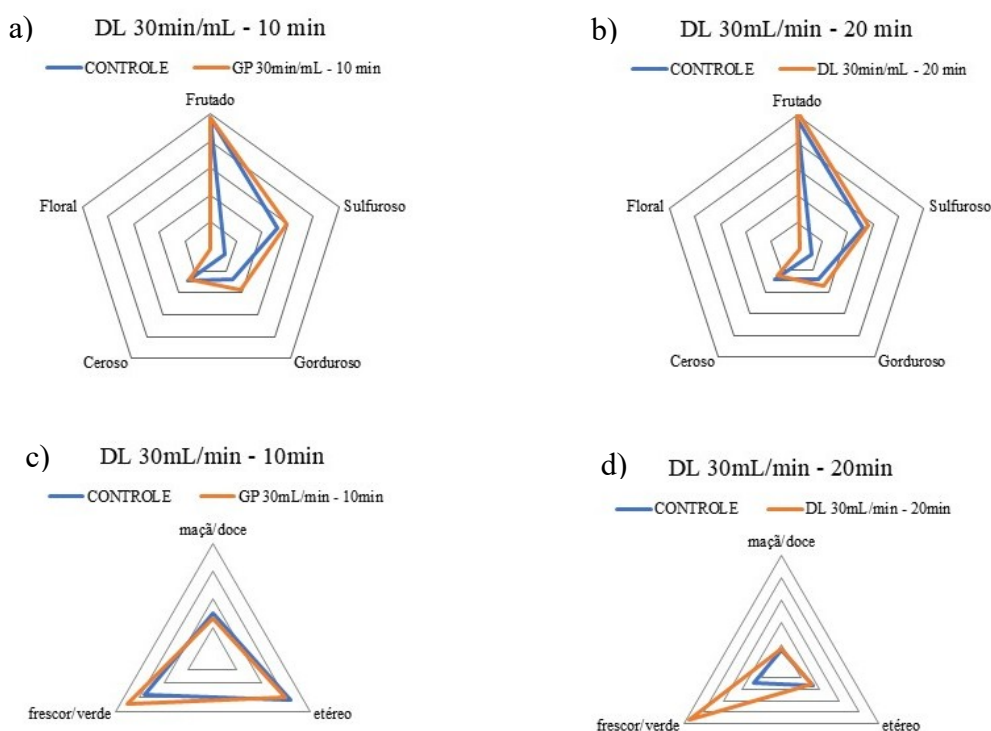


Fonte: elaborado pela autora.

O descritor sulfuroso também aumentou de forma sutil e progressiva nas condições de fluxo de 20mL, devido ao acréscimo na fração mássica de 3-(metiltio)propanoato de metila e 3-(metiltio)propanoato de etila. O descritor gorduroso apresentou discreto aumento, em função do acúmulo nas frações mássicas de ácido octanoico e 5-butil-diidro-2(3H)-furanona, que não variou em função do aumento no tempo de exposição. O descritor ceroso apresentou redução associada à diminuição das frações mássicas dos ésteres de cadeia longa octanoato de metila e octanoato de etila (Figura 11 a e b).

O perfil aromático dos sucos submetidos a condições de maior fluxo de ar (30mL/min) sofreu modificações mais significativas dentre as amostras processadas por DL, e apresentou comportamento distinto em função do tempo de exposição (Figura 12). A maior intensidade do descritor frutado foi observada em fluxo de ar 30 mL/min por 20 min, onde a contribuição da nota fresca superou as demais. Esta modificação está associada ao aumento expressivo da fração mássica do 1,3,5-undecatrieno (de 0,6% para 1,9%). Já no tratamento mais rápido (10 min), a contribuição do descritor frutado permaneceu semelhante ao controle. (Figura c e d).

Figura 12 – Radares do perfil de aroma do suco de abacaxi submetido à aplicação de plasma DL: **a)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral da condição 30mL/ min - 10 min; **b)** Perfil geral das amostras não tratadas x Perfil geral sob condição 30mL/ min - 20 min; **c)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 30mL/ min - 10 min; **d)** Perfil das notas secundárias do aroma frutado das amostras não tratadas x Perfil das notas secundárias sob a condição 30mL/ min - 20 min



Fonte: elaborado pela autora.

A maior contribuição do descritor sulfuroso foi observada na condição de fluxo de ar 30mL/min por 10 min. Nesta condição, o incremento da contribuição dos tioésteres foi cerca

de 2,3 vezes maior, enquanto a contribuição do descritor frutado se manteve. Neste caso, a razão frutado/sulfuroso reduziu de 190 (controle) para 84, indicando desequilíbrio aromático e possível efeito negativo na qualidade sensorial do suco de abacaxi (Figura 12. a e b).

Já no tratamento prolongado (20 min), o aumento do descritor sulfuroso foi menor e proporcional ao aumento do descritor frutado, resultando em uma razão frutado/sulfuroso mais elevada, o que favoreceu a manutenção do equilíbrio sensorial característico do suco de abacaxi. Esta condição operacional promoveu destaque para a nota de frescor, podendo melhorar a aceitação do suco de abacaxi por consumidores mais sensíveis à odores pungentes.

O descritor gorduroso teve sua influência aumentada na condição de 30 mL/min durante 10 min de processamento. As frações mássicas do ácido octanoico e da 5-butil-diidro-2(3H)-furanona atingiram o maior valor entre as amostras, justificando o incremento da nota. Entretanto, o efeito não se manteve com o prolongamento do tempo (DL 30mL/min por 20min), indicando que o efeito foi mais pontual e não cumulativo ao longo do tempo.

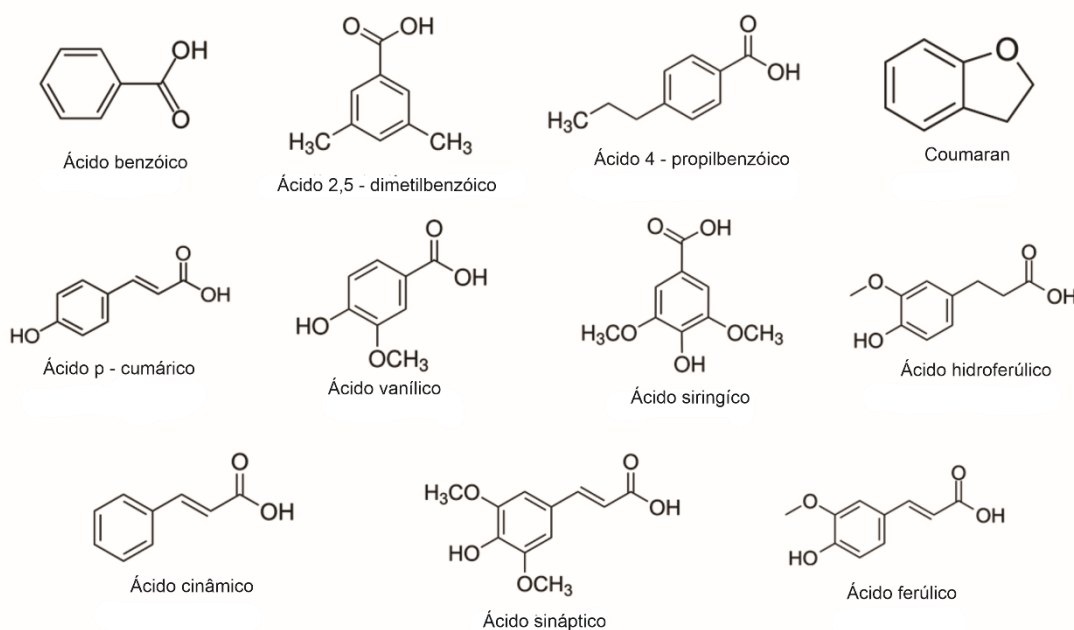
O descritor ceroso também apresentou discreta redução no maior fluxo (30 mL/min) associada à diminuição das frações mássicas dos ésteres de cadeia longa octanoato de metila e octanoato de etila, entretanto, a participação desta nota se manteve muito próxima ao suco não tratado. Esse comportamento contrasta com os resultados obtidos para o plasma de barreira dielétrica (DBD), nos quais a nota cerosa foi intensificada em algumas condições de tratamento. No DBD, observou-se a conversão parcial de octanoato de metila em octanoato de etila, sem redução acentuada das frações totais de ambos os compostos, que resultou em maior contribuição dessa nota no aroma final.

De forma geral, os resultados obtidos demonstram que o plasma de descarga luminosa foi capaz de modular seletivamente o perfil aromático do suco de abacaxi, promovendo intensificação das notas frutadas e de frescor em condições de fluxo intermediárias, enquanto condições mais intensas favoreceram o aumento de descritores sulfurosos e gordurosos. A comparação com os resultados do plasma DBD reforça que a resposta sensorial depende não apenas da composição da matriz, mas também do tipo de plasma e da configuração operacional aplicada. As alterações observadas confirmam o potencial do plasma DL como tecnologia de modulação química e sensorial, desde que parâmetros de processamento sejam cuidadosamente ajustados para preservar o equilíbrio aromático da bebida.

5.2 Alterações químicas no perfil fenólico do suco de abacaxi: DBD x DL

Onze compostos fenólicos foram identificados no suco de abacaxi fresco: ácido benzóico, ácido 2,5-dimetilbenzóico, ácido 4-propilbenzóico, cumaran, ácido p-cumárico, ácido vanílico, ácido siríngico, ácido hidroferúlico, ácido cinâmico, ácido sinápico e ácido ferúlico. O ácido siríngico foi o principal composto fenólico encontrado, compreendendo 40,6% (m/m) do conteúdo fenólico total do suco, seguido pelo ácido vanílico (24,6%), ácido ferúlico (10,2%) e ácido 4-propilbenzóico (8,5%). Os demais compostos fenólicos foram encontrados em menores concentrações. A Figura 13 mostra as estruturas químicas de todos os compostos fenólicos identificados no suco de abacaxi.

Figura 13 – Estrutura química dos compostos fenólicos identificados no suco de abacaxi



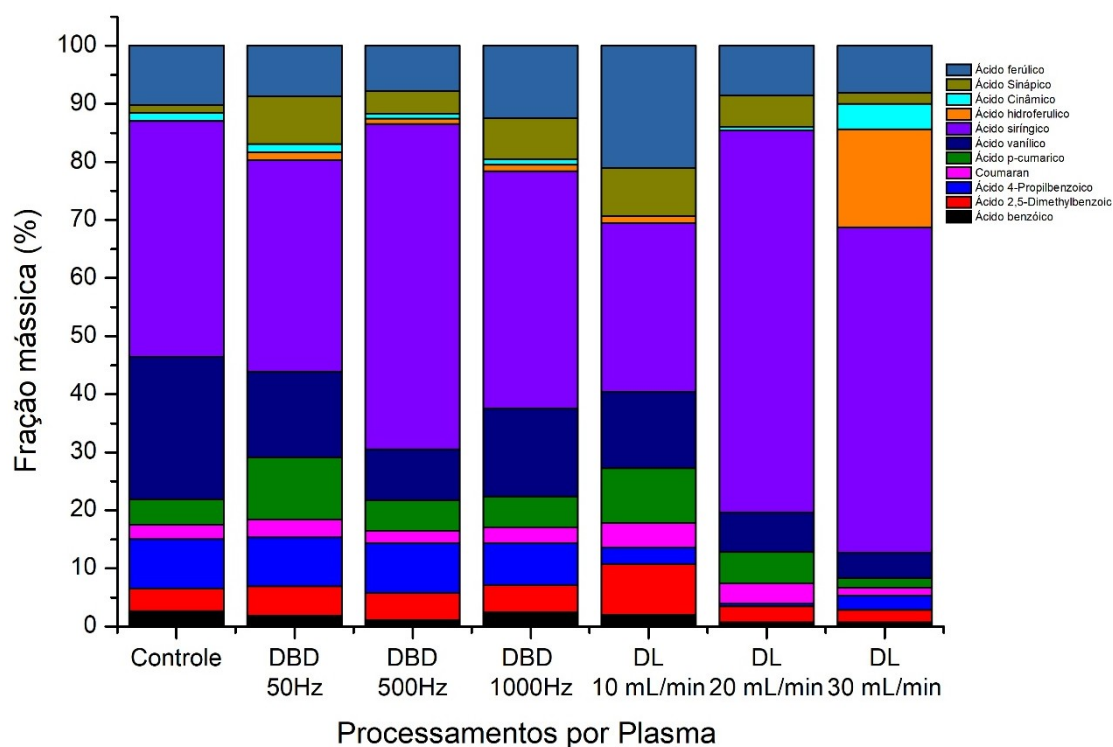
Fonte: elaborado pela autora.

De acordo com a literatura disponível, o perfil fenólico do abacaxi é composto principalmente por ácidos fenólicos. O ácido sinápico e suas formas derivadas são os principais compostos relatados na maioria dos estudos. Steingass *et al.* (2015) observaram que os principais compostos fenólicos na polpa de abacaxi eram derivados dos ácidos p-cumárico e sinápico. Da mesma forma, Difonzo et al. (2018) e Steingass *et al.* (2017) relataram que os compostos fenólicos mais abundantes no suco de abacaxi eram derivados do ácido sinápico em suas formas ligadas. Esses mesmos autores propuseram que pequenas quantidades de isocitratos

cafeoil e p-cumaroil podem ser consideradas marcadores para avaliar a autenticidade do suco de abacaxi. As diferenças encontradas entre os estudos podem estar relacionadas à diversidade química de frutas de diferentes regiões e às variações nas técnicas de detecção utilizadas. Ainda assim, a maioria dos compostos obtidos neste estudo era esperada, pois são sintetizados pela mesma via metabólica daqueles relatados em outros trabalhos.

Não foram detectados novos compostos fenólicos após o processamento com plasma frio, porém ocorreram diversas modificações no perfil fenólico do suco de abacaxi, sobretudo na fração mássica de cada composto fenólico. A figura 14 ilustra as mudanças no perfil fenólico do suco de abacaxi submetido aos tratamentos de plasma por descarga de barreira dielétrica e descarga luminosa.

Figura 14 – Perfis voláteis dos sucos de abacaxi baseado em suas frações mássicas antes e após os processamentos por Plasma Frio (DBD e DL)



Fonte: elaborado pela autora.

O ácido siríngico manteve-se como o composto mais abundante após o processamento com plasma, embora seu teor percentual tenha variado conforme a tecnologia e as condições operacionais. No processamento por DBD, o ácido siríngico aumentou de 40,6% para 56,0% quando submetido a 500 Hz, enquanto sofreu uma leve redução (de 40,6% para 36,5%) em 50 Hz. Nenhuma diferença foi observada em 1000 Hz em comparação ao suco não

tratado. Já no processamento por plasma de descarga luminosa, o ácido siríngico diminuiu de 40,6% para 29,7% com fluxo de ar de 10 mL/min, mas aumentou para 65,7% e 56,0% nos fluxos de 20 mL/min e 30 mL/min, respectivamente.

O ácido vanílico apresentou redução em todos os tratamentos, mais expressivamente no Plasma de Descarga Luminosa. As maiores reduções foram observadas com nos fluxos ar de 20 mL/min (de 29,6% para 6,8%) e 30 mL/min (de 24,6% para 4,4%). Em contrapartida, o ácido ferúlico permaneceu estável na maior parte das condições, exceto na vazão de ar de 10 mL/min, em que houve um aumento de 10,2% para 21,0%.

Não houve alterações na fração mássica de ácido 4-propil benzoico durante o processamento por plasma DBD. Contudo, verificou-se uma redução significativa no tratamento por plasma de descarga luminosa, com destaque para a vazão de 20 mL/min (de 8,5% para 0,6%).

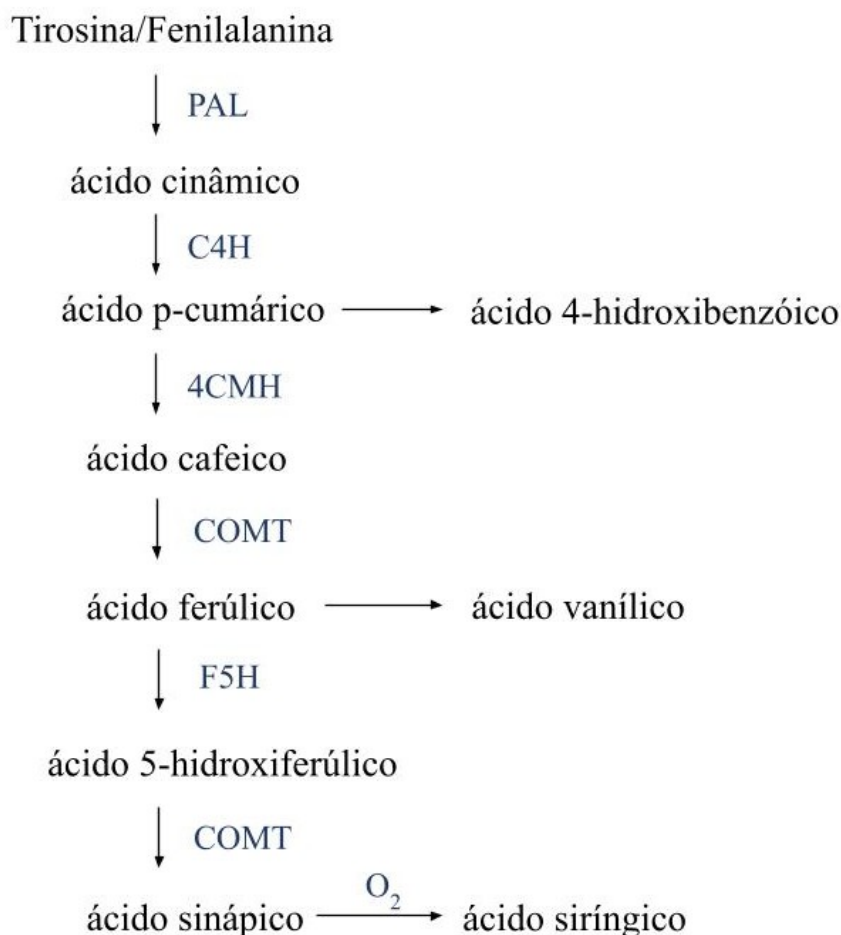
O ácido sinápico aumentou em todas as condições avaliadas, sobretudo no processamento por plasma DBD a 50 Hz e no plasma DL a 10 mL/min (variando de 1,4% para 8,2% e 8,3%, respectivamente). Por fim, o ácido hidroferúlico também demonstrou um leve crescimento em todos os tratamentos, porém apresentou um aumento relevante no fluxo 30 mL/min (de 0,1% para 16,9%).

O tratamento com plasma pode desencadear a ativação da via fenilpropanóide, um importante mecanismo biossintético responsável pela produção de compostos fenólicos em plantas (Figura 15).

A exposição à radiação UV e às espécies reativas de oxigênio (ERO) geradas pelo plasma induz estresse metabólico, sinalizando o início das respostas de defesa do tecido vegetal. Esses estressores abióticos regulam as reações de estresse, mediadas principalmente pelas enzimas PAL, C4H, 4CMH, COMT e CL, promovendo a síntese e o acúmulo de metabólitos secundários, como os ácidos fenólicos (Heleno *et al.*, 2015).

As mudanças no perfil fenólico indicam que o plasma ativou as enzimas da via fenilpropanóide. O grau de ativação variou de acordo com as condições de plasma aplicadas, com algumas enzimas sendo mais expressas do que outras.

Figura 15 – Representação esquemática da via fenilpropanóide e seus principais produtos fenólicos



Fonte: Adaptado de Srinivasulu *et al.* (2018)

Uma vez que a via fenilpropanóide é ativada e a expressão enzimática aumenta, a rota metabólica tende a favorecer a produção de ácido siríngico, o produto final desse mecanismo. Consequentemente, o aumento em seus níveis pode ser atribuído à conversão de açúcares ou de outros substratos fenólicos nesse composto. O ácido siríngico está presente em muitos alimentos de origem vegetal, como açaí, suco de uva, vinho tinto e mel. Estudos na literatura demonstram diversas atividades terapêuticas, incluindo efeitos antioxidantes, anti-inflamatórios, anticancerígenos, antimicrobianos, antidiabéticos e hepatoprotetores (Bartel *et al.*, 2023). As propriedades biológicas do ácido siríngico podem ser atribuídas à sua estrutura, que contém grupos metoxi (OCH₃) nas posições 3 e 5 do anel benzênico, além de grupos hidroxila (OH) e carboxila (COOH) (Srinivasulu *et al.*, 2018).

Na via fenilpropanóide (Figura 15), duas rotas possíveis partem do ácido ferúlico: a formação de ácido vanílico ou a continuação até a produção de ácido siríngico. A redução na

quantidade relativa de ácido vanílico corrobora o aumento nos níveis de ácido sirínico, indicando que a via prioriza principalmente a rota do ácido sirínico.

Os níveis de ácido ferúlico permaneceram estáveis devido à natureza progressiva da via metabólica que conduz ao ácido sirínico. O aumento observado no tratamento com plasma de descarga luminosa a um fluxo de ar de 10 mL/min sugere que, nessa condição específica, a atividade enzimática se intensifica até o estágio do ácido ferúlico, mas não necessariamente avança nas etapas subsequentes. Esse direcionamento seletivo é influenciado pelas diferentes proporções de radicais livres gerados em cada condição de plasma.

O aumento no ácido sinápico, especialmente em 50 Hz e 10 mL/min, indica ativação seletiva de enzimas na via, redirecionando parte da produção de fenólicos para esse composto. Nessas mesmas condições, também se observou uma redução no ácido vanílico, apoiando a hipótese de que a via seja desviada preferencialmente de ácido vanílico para a síntese de outros ácidos fenólicos, como o ácido sinápico.

O aumento expressivo de ácido hidroferúlico no fluxo de ar de 30 mL/min indica que as espécies reativas geradas nessa condição direcionam a via fenilpropanóide para a produção de ácido sirínico. Porém, a ativação parcial da enzima COMT e a ausência de certas reações oxidativas fazem com que o processo seja interrompido no estágio do ácido 5-hidroxi ferúlico, resultando no acúmulo desse composto.

Li *et al.* (2019) analisaram os efeitos do plasma DBD (60kV por 5 min) no acúmulo de compostos fenólicos em pitayas minimamente processadas e demonstraram que este tratamento ativa significativamente as enzimas da via fenilpropanóide (PAL, C4H e 4CL). O estudo evidenciou um aumento na expressão gênica dessas enzimas, indicando que a exposição ao plasma eleva o teor de fenólicos ao estimular a transcrição das enzimas-chave envolvidas nessa via. Esse incremento na expressão enzimática está associado às maiores concentrações de espécies reativas de oxigênio geradas pelo plasma observadas no estudo, que funcionaram como moléculas sinalizadoras, desencadeando respostas de estresse e a produção de metabólitos secundários na pitaya. Esses resultados reforçam que tratamentos com plasma, ao ativar a via fenilpropanóide, podem promover a síntese e o acúmulo de compostos fenólicos em produtos vegetais, melhorando seu perfil bioativo.

O tratamento com plasma frio desencadeou mudanças nos compostos fenólicos do suco de romã sob diferentes condições experimentais (variações de tempo de exposição, fluxo de gás e volume da amostra (Herceg *et al.*, 2016). Em todas as combinações testadas, observou-se a despolimerização das elagitaninas, que foram liberadas da matriz celular, resultando em

maior formação de ácido elágico. Em paralelo, ácidos hidroxicinâmicos como o clorogênico e o ferúlico também exibiram concentrações mais elevadas, enquanto outros como ácido protocatecuico e ácido caféico sofreram reduções. Essas transformações, contudo, não alteraram o conteúdo total de ácidos fenólicos, demonstrando equilíbrio entre a formação e a degradação de fenólicos, moduladas pelas espécies reativas geradas pelo plasma. Comportamento semelhante foi reportado para o suco de aronia (chokeberry) (Kovačević *et al.*, 2016).

Os ácidos 4-propilbenzóico e 2,5-dimetilbenzóico não estão diretamente vinculados ao mecanismo fenilpropanóide descrito anteriormente, pois são derivados de ácido benzóico. Conforme discutido anteriormente na subseção 5.1.1, o plasma frio pode promover a abstração de grupos metila em cadeias lineares de ésteres voláteis do suco de abacaxi. Nesse contexto, a redução no teor de ácido 4-propilbenzóico e o concomitante aumento de ácido 2,5-dimetilbenzóico, observados após o processamento com plasma de descarga luminosa, podem ser atribuídos à abstração de metila induzida pelas espécies reativas produzidas durante o processamento e à sua subsequente reinserção em outra molécula. Esse efeito foi especialmente evidente quando o plasma de descarga luminosa foi aplicado a um fluxo de ar de 10 mL/min.

Todos estes resultados reforçam o potencial do plasma frio para reconfigurar seletivamente o perfil fenólico de sucos, possibilitando adaptá-los a dietas específicas e atender diferentes demandas nutricionais.

6 CONCLUSÃO

Os processamentos por plasma frio, tanto a tecnologia de barreira dielétrica (DBD) quanto a de descarga luminosa (DL), promoveram alterações importantes nos perfis volátil e fenólico do suco de abacaxi. No que se refere ao aroma, a análise por CG-MS identificou os principais compostos voláteis dos sucos processados e não processados. O plasma frio induziu principalmente a desmetilação sucessiva dos ésteres de cadeia longa e a conversão dos ésteres metílicos em etílicos. Os tioésteres demonstraram ser mais estáveis quimicamente sob o tratamento com plasma, embora suas participações no aroma tenham sido evidenciadas em algumas condições. Estas modificações químicas tiveram efeito direto no perfil aromático dos sucos. De maneira geral, foi possível observar a melhoria dos descritores frescos e frutados, a redução do aroma intensamente adocicado e pungente do hexanoato de metila e o aumento da influência dos descritores sulfurados em ambas tecnologias.

No processamento por Plasma DBD, frequências baixas reduzem o aroma pungente do hexanoato de metila quando o processo é realizado por até 10 min, enquanto tratamentos mais prolongados reduzem a sensação de frescor da bebida e acentuam a influência dos descritores sulfurosos de forma crítica. Frequências intermediárias melhoram os descritores frescos e frutados do suco durante tratamentos prolongados, mantendo um equilíbrio frutado/sulfuroso aceitável. Frequências elevadas promovem as mesmas melhorias, porém o tempo de processamento prolongado acentua a influência dos descritores sulfurados de forma potencialmente negativa.

No processamento por Plasma DL, as alterações foram menos intensas que o Plasma DBD em termos de frações mássicas dos ésteres de cadeia longa relacionados ao odor frutado e pungente, especialmente o hexanoato de metila. Fluxos de ar baixos aumentam discretamente a expressão do aroma frutado e do aroma sulfuroso, mantendo o equilíbrio entre notas frescas e doces. Fluxos de ar intermediários melhoram a expressão do descritor frutado, reduzindo o aroma pungente do hexanoato de metila e aumentando a sensação de frescor da bebida. Altos fluxos de ar alteram mais drasticamente o perfil do suco. Tratamentos até 10 min aumentam a expressão do aroma sulfuroso, causando percepção desagradável no suco. Tratamentos prolongados aumentam expressivamente o aroma frutado, com predominância de notas de frescor.

Em relação aos compostos fenólicos, onze compostos fenólicos foram identificados nos sucos de abacaxi, sendo o ácido sirínico o mais abundante. Os tratamentos com plasma promoveram aumentos significativos neste composto, especialmente na frequência de 500 Hz

no processamento por DBD e no fluxo de 20 mL/min por descarga luminosa, evidenciando a capacidade do plasma em ativar a via fenilpropanóide. Essas mudanças foram acompanhadas por reduções no ácido vanílico, reforçando que a via metabólica direciona preferencialmente a produção de fenólicos para compostos finais mais estáveis, como o ácido sirínico. Adicionalmente, foram observados aumentos significativos no ácido sinápico em 50 Hz e 10 mL/min, e no ácido hidroferúlico em 30 mL/min. Esses resultados sugerem uma ativação enzimática seletiva dentro da via fenilpropanóide, direcionando a síntese desses compostos sob condições específicas do plasma. Além disso, derivados do ácido benzóico, como o ácido 4-propilbenzóico e o ácido 2,5-dimetilbenzóico, exibiram alterações estruturais, indicando a ocorrência de reações de abstração de grupos metila, assim como observado nos compostos voláteis.

Os resultados desta pesquisa demonstram a capacidade do plasma frio de modular os perfis volátil e fenólico do suco de abacaxi. Os mecanismos químicos propostos nesta tese oferecem novos *insights* sobre os modos específicos através dos quais ambas tecnologias afetam os compostos de interesse deste produto. O ajuste das condições de frequência, voltagem, tempo de exposição e fluxo de gás possibilita direcionar reações químicas específicas, permitindo melhorar os atributos sensoriais, adaptar o perfil aromático às preferências dos consumidores e potencializar a presença de compostos com alta atividade biológica no suco de abacaxi.

REFERÊNCIAS

- ADEPARA. **Abacaxi faz o Pará despontar como o maior produtor nacional do fruto**. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.adepara.pa.gov.br/artigos/abacaxi-faz-o-par%C3%A1-despontar-como-o-maior-produtor-nacional-do-fruto>. Acesso em: 30 abr. 2020.
- ALI, Maimunah Mohd *et al.* Pineapple (Ananas comosus): A comprehensive review of nutritional values, volatile compounds, health benefits, and potential food products. **Food Research International**, [s. l.], v. 137, p. 109675, 2020.
- ALVES FILHO, Elenilson G. *et al.* An untargeted chemometric evaluation of plasma and ozone processing effect on volatile compounds in orange juice. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 53, p. 63–69, 2019.
- ALVES FILHO, Elenilson G. *et al.* Effect of Glow and Dielectric Barrier Discharges Plasma on Volatile and Non-volatile Chemical Profiling of Camu-Camu Juice. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 1275–1286, 2021.
- ALVES FILHO, Elenilson G. *et al.* Evaluation of thermal and non-thermal processing effect on non-prebiotic and prebiotic acerola juices using ¹H q NMR and GC–MS coupled to chemometrics. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 265, p. 23–31, 2018.
- ALVES FILHO, Elenilson G.; DE BRITO, Edy S.; RODRIGUES, Sueli. Effects of cold plasma processing in food components. *In: Advances In Cold Plasma Applications For Food Safety And Preservation*. [s. l.]: Elsevier, 2020. p. 253–268.
- ARFAOUI, Leila. **Dietary plant polyphenols: Effects of food processing on their content and bioavailability**. [s. l.]: MDPI AG, 2021.
- ASL, Parisa Jafarian *et al.* Non-thermal plasma technique for preservation of fresh foods: A review. **Food Control**, [s. l.], v. 134, p. 108560, 2022.
- BARTEL, Iga *et al.* Nutraceutical Properties of Syringic Acid in Civilization Diseases—Review. **Nutrients**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 10, 2023.
- BOURKE, Paula *et al.* The Potential of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production. **Trends in Biotechnology**, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 615–626, 2018.
- CAMPELO, Pedro H. *et al.* Modulation of aroma and flavor using dielectric barrier discharge plasma technology in a juice rich in terpenes and sesquiterpenes. **LWT**, [s. l.], v. 130, p. 109644, 2020.
- CASTRO, Debora Raquel Gomes *et al.* Improvement of the Bioavailability of Amazonian Juices Rich in Bioactive Compounds Using Glow Plasma Technique. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 670–679, 2020.
- CHIZOBA EKEZIE, Flora-Glad; SUN, Da-Wen; CHENG, Jun-Hu. A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 69, p. 46–58, 2017.

COMPANY. **The Good Scents Company Database**. [S. l.: s. n.], 2021.

CORY, Hannah *et al.* **The Role of Polyphenols in Human Health and Food Systems: A Mini-Review**. [s. l.]: Frontiers Media S.A., 2018.

DIFONZO, Graziana *et al.* Characterisation and classification of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice from pulp and peel. [s. l.], 2018.

EDO, Great Iruoghene *et al.* **A review on the composition, extraction and applications of phenolic compounds**. [s. l.]: Ecological Society of China, 2024.

ELETRONIC DIENER PLASMA SURFACE TECHNOLOGY. **Low-pressure plasma Plasma treatment in the low-pressure range**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.plasma.com/en/low-pressureplasma/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ELSS, Sandra *et al.* Aroma profiles of pineapple fruit (*Ananas comosus* [L.] Merr.) and pineapple products. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 263–274, 2005.

EMBRAPA. **Abacaxi**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/abacaxi#:~:text=As%20cultivares%20mais%20conhecidas%20no,Pernambuco%2C%20Smooth%20Cayenne%20e%20Jupi>. Acesso em: 8 ago. 2025.

FACUNDO, Heliofábia Virgínia de Vasconcelos *et al.* CHANGES IN FLAVOR QUALITY OF PINEAPPLE JUICE DURING PROCESSING. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 508–519, 2009.

FEIZOLLAHI, Ehsan; MISRA, N. N.; ROOPESH, M. S. Factors influencing the antimicrobial efficacy of Dielectric Barrier Discharge (DBD) Atmospheric Cold Plasma (ACP) in food processing applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 61, n. 4, p. 666–689, 2020.

FERNANDES, Fabiano A. N.; RODRIGUES, Sueli. Cold Plasma Processing on Fruits and Fruit Juices: A Review on the Effects of Plasma on Nutritional Quality. **Processes**, [s. l.], v. 9, n. 12, p. 2098, 2021.

FERNANDES, Fabiano A.N.; SANTOS, Valéria O.; RODRIGUES, Sueli. Effects of glow plasma technology on some bioactive compounds of acerola juice. **Food Research International**, [s. l.], v. 115, p. 16–22, 2019.

GEORGE, Jenson *et al.* Review of the Aroma Chemistry of Pineapple (*Ananas comosus*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 71, n. 9, p. 4069–4082, 2023.

GOIANA, Mayara Lima *et al.* Corn starch based films treated by dielectric barrier discharge plasma. **International Journal of Biological Macromolecules**, [s. l.], v. 183, 2021.

GROSCH, Werner. Evaluation of the key odorants of foods by dilution experiments, aroma models and omission. **Chemical Senses**, [s. l.], v. 26, n. 5, p. 533–545, 2001.

HAN, Yongxu; CHENG, Jun Hu; SUN, Da Wen. Activities and conformation changes of food enzymes induced by cold plasma: A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 59, n. 5, p. 794–811, 2019.

HELENO, Sandrina A. *et al.* Bioactivity of phenolic acids: Metabolites versus parent compounds: A review. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 173, p. 501–513, 2015.

HEMMATI, Vahid *et al.* Impact of cold atmospheric plasma on microbial safety, total phenolic and flavonoid contents, antioxidant activity, volatile compounds, surface morphology, and sensory quality of green tea powder. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 44, p. 2212–4292, 2021.

HERCEG, Zoran *et al.* Gas phase plasma impact on phenolic compounds in pomegranate juice. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 190, p. 665–672, 2016.

HOU, Yanan *et al.* Effect of cold plasma on blueberry juice quality. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 290, n. October 2018, p. 79–86, 2019.

IBGE. **Produção de Abacaxi no Brasil**. [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/abacaxi/br>. Acesso em: 8 ago. 2025.

JAMBRAK, Anet Režek. Non-thermal and Innovative Processing Technologies. **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, [s. l.], p. 477–483, 2019.

KOPUK, Berkay; GUNES, Recep; PALABIYIK, Ibrahim. Cold plasma modification of food macromolecules and effects on related products. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 382, p. 132356, 2022.

KOVAČEVIĆ, Danijela Bursać *et al.* Stability of polyphenols in chokeberry juice treated with gas phase plasma. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 212, p. 323–331, 2016.

KUMAR, Sitesh; PIPLIYA, Sunil; SRIVASTAV, Prem Prakash. **Effect of cold plasma on different polyphenol compounds: A review**. [s. l.]: John Wiley and Sons Inc, 2023.

LAROQUE, Denise Adamoli *et al.* Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. [s. l.], 2021.

LAROUSSE, Mounir. Plasma Medicine: A Brief Introduction. **Plasma**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 47–60, 2018.

LASEKAN, Ola; HUSSEIN, Fatma Khalifa. Classification of different pineapple varieties grown in Malaysia based on volatile fingerprinting and sensory analysis. **Chemistry Central Journal**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 140, 2018.

LI, Xiaolan *et al.* Cold plasma treatment induces phenolic accumulation and enhances antioxidant activity in fresh-cut pitaya (*Hylocereus undatus*) fruit. **LWT**, [s. l.], v. 115, p. 108447, 2019.

MA, T. J.; LAN, W. S. Effects of non-thermal plasma sterilization on volatile components of tomato juice. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], v.

12, n. 12, p. 3767–3772, 2015.

MAIA, Dayanne L.H.; RODRIGUES, Sueli; FERNANDES, Fabiano A.N. Influence of dielectric barrier discharge plasma processing in the volatile compounds and aroma of cashew apple juice. **Food Bioscience**, [s. l.], v. 59, p. 104244, 2024.

MAIA, Dayanne L. H.; RODRIGUES, Sueli; FERNANDES, Fabiano A. N. Influence of Glow Discharge Plasma Treatment on Cashew Apple Juice's Aroma Profile and Volatile Compounds. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 2023, p. 1–13, 2023.

MANDAL, Ronit; SINGH, Anika; PRATAP SINGH, Anubhav. Recent developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 80, p. 93–103, 2018.

MISRA, N.N. *et al.* Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 55, p. 39–47, 2016.

OZEN, Emine; SINGH, Rakesh Kumar Atmospheric cold plasma treatment of fruit juices: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 103, p. 144–151, 2020.

PADRAYUTTAWAT, Areeya *et al.* **Optical Isomers and Odor Thresholds of Volatile Constituents in Citrus sud achi** **Food Sci. Technol. Int. Tokyo**. [S. l.: s. n.], 1997.

PAIXÃO, Livia *et al.* Cold Plasma Effects on Functional Compounds of Siriguela Juice. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 110–121, 2019.

PANKAJ, Shashi Kishor *et al.* Applications of cold plasma technology in food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 5–17, 2014.

PANKAJ, Shashi Kishor; KEENER, Kevin M. Cold Plasma Processing of Fruit Juices. *In*: FRUIT JUICES. [s. l.]: Elsevier, 2018. p. 529–537.

PERINBAN, Sellam; ORSAT, Valérie; RAGHAVAN, Vijaya. **Nonthermal Plasma–Liquid Interactions in Food Processing: A Review**. [s. l.]: Blackwell Publishing Inc., 2019.

PINHEIRO, Flávia de Abreu *et al.* Perfil de Consumidores em Relação à Qualidade de Alimentos e Hábitos de Compras. **Unopar**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 95–102, 2011.

PINO, Jorge A. Odour-active compounds in pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merrill cv. Red Spanish). **International Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 564–570, 2013.

PIPLIYA, Sunil; KUMAR, Sitesh; SRIVASTAV, Prem Prakash. Effect of dielectric barrier discharge nonthermal plasma treatment on physicochemical, nutritional, and phytochemical quality attributes of pineapple [*Ananas comosus* (L.)] juice. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 88, n. 11, p. 4403–4423, 2023.

PIPLIYA, Sunil; KUMAR, Sitesh; SRIVASTAV, Prem Prakash. Effect of Thermal and Non-thermal Plasma Treatment on Particle Size Distribution, Protein Secondary Structure, Fuzzy Logic Sensory Evaluation, Rheological, and Selected Quality Attributes of Pineapple Juice: A

Comparative Analysis. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 17, n. 11, p. 3615–3636, 2024.

PUTNIK, Predrag *et al.* Comparing the effects of thermal and non-thermal technologies on pomegranate juice quality: A review. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 279, p. 150–161, 2019.

RODRÍGUEZ, Óscar *et al.* Effect of indirect cold plasma treatment on cashew apple juice (*Anacardium occidentale* L.). **LWT**, [s. l.], v. 84, p. 457–463, 2017.

SAKUDO, Akikazu; MISAWA, Tatsuya; YAGYU, Yoshihito. Equipment design for cold plasma disinfection of food products. **Advances in Cold Plasma Applications for Food Safety and Preservation**, [s. l.], p. 289–307, 2020.

SAREMNEZHAD, Solmaz *et al.* Chemical changes of food constituents during cold plasma processing: A review. **Food Research International**, [s. l.], v. 147, p. 110552, 2021.

SCHOLTZ, Vladimir *et al.* Nonthermal plasma — A tool for decontamination and disinfection. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 1108–1119, 2015.

SONAWANE, Sachin K; T, Marar; PATIL, Sonal. Non-thermal plasma: An advanced technology for food industry. **Food Science and Technology International**, [s. l.], v. 26, n. 8, p. 727–740, 2020.

SRINIVASULU, Cheemanapalli *et al.* **Syringic acid (SA) – A Review of Its Occurrence, Biosynthesis, Pharmacological and Industrial Importance**. [s. l.]: Elsevier Masson SAS, 2018.

SRUTHI, N U *et al.* Impacts of cold plasma treatment on physicochemical, functional, bioactive, textural, and sensory attributes of food: A comprehensive review. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 368, p. 130809, 2022.

STEELE, Eurídice Martínez *et al.* Mudanças alimentares na coorte NutriNet Brasil durante a pandemia de covid-19. **Revista de Saúde Pública**, [s. l.], v. 54, p. 91, 2020.

STEINGASS, Christof Björn *et al.* Light-induced alterations of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice volatiles during accelerated ageing and mass spectrometric studies into their precursors. **Food Research International**, [s. l.], v. 100, p. 366–374, 2017.

STEINGASS, Christof B. *et al.* Studies into the phenolic patterns of different tissues of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) infructescence by HPLC-DAD-ESI-MSn and GC-MS analysis. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, [s. l.], v. 407, n. 21, 2015.

STEINHAUS, Martin; THOMAS, Karin; SCHIEBERLE, Peter. Molecular Insights into Off-Flavor Formation during Pineapple Juice Processing. *In: FLAVOUR SCIENCE*. [s. l.]: Academic Press, 2014. p. 87–90.

TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.tabelatacoonline.com.br/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

TEIXEIRA, Miguel A. *et al.* Perfumery Radar 2.0: A Step toward Fragrance Design and

Classification. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 53, n. 21, p. 8890–8912, 2014.

TEN BOSCH, Lars *et al.* Plasma-Based Degradation of Mycotoxins Produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* Species. **Toxins**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 97, 2017. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6651/9/3/97>.

UCAR, Yilmaz *et al.* Application of cold plasma technology in the food industry and its combination with other emerging technologies. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 114, p. 355–371, 2021.

VOLLMER, Kathrin *et al.* Non-thermal Processing of Pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) Juice Using Continuous Pressure Change Technology (PCT): Effects on Physical Traits, Microbial Loads, Enzyme Activities, and Phytochemical Composition. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 1833–1847, 2020.

VOLLMER, Kathrin *et al.* Non-thermal processing of pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice using continuous pressure change technology (PCT): HS-SPME-GC–MS profiling, descriptive sensory analysis, and consumer acceptance. **Food Chemistry**, [s. l.], v. 345, p. 128786, 2021.

WAGHMARE, Roji. Cold plasma technology for fruit based beverages: A review. **Trends in Food Science and Technology**, [s. l.], v. 114, n. August 2020, p. 60–69, 2021.

WANG, Ying *et al.* Application of electrical discharge plasma on the inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* in apple juice. **LWT**, [s. l.], v. 121, 2020.

WANG, Xiaoyang *et al.* Continuous cold plasma reactor for the processing of NFC apple juice: Effect on quality control and preservation stability. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, [s. l.], v. 100, p. 103905, 2025.

WIBOWO, Scheling *et al.* Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses. [s. l.], 2019.

WU, Wanlin *et al.* Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. **Food Control**, [s. l.], v. 130, p. 108293, 2021.

XIAO, Zuobing *et al.* Evaluation of the Interaction Between Esters and Sulfur Compounds in Pineapple Using Feller's Additive Model, OAV, and Odor Activity Coefficient. **Food Analytical Methods**, [s. l.], 2021.

XIAO, Zuobing *et al.* Evaluation of the Perceptual Interaction among Sulfur Compounds in Mango by Feller's Additive Model, Odor Activity Value, and Vector Model. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 67, n. 32, 2019.

ZHANG, Wencan; CAO, Xu; LIU, Shao Quan. Aroma modulation of vegetable oils—A review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s. l.], v. 60, n. 9, p. 1538–1551, 2020.

ZHENG, Liang Yong *et al.* Aroma volatile compounds from two fresh pineapple varieties in China. **International Journal of Molecular Sciences**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 7383–7392, 2012.

ZUO, Yuegang; WANG, Chengxia; ZHAN, Jian. Separation, Characterization, and Quantitation of Benzoic and Phenolic Antioxidants in American Cranberry Fruit by GC–MS. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 50, n. 13, p. 3789–3794, 2002.