

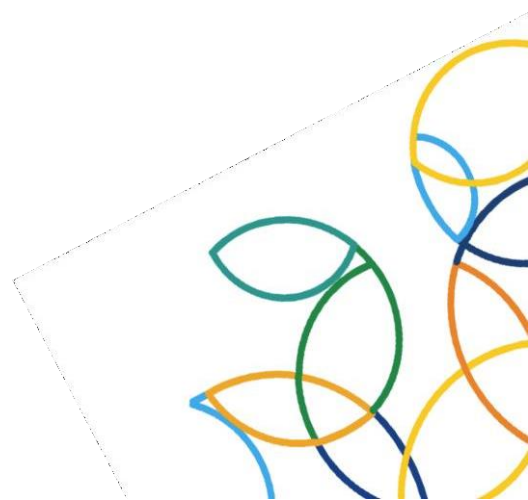


UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
ALIMENTOS

MAHYRA DA PAIXÃO E SILVA ALVES

**POTENCIAL DA RADIAÇÃO UV-C COMO MÉTODO ALTERNATIVO DE
SANITIZAÇÃO: EFEITOS SOBRE A SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA E A
MANUTENÇÃO DA QUALIDADE EM MAÇÃS *IN NATURA*, MINIMAMENTE
PROCESSADAS E SUCO CLARIFICADO DE MAÇÃ**

SEROPÉDICA, 2026





MAHYRA DA PAIXÃO E SILVA ALVES

**POTENCIAL DA RADIAÇÃO UV-C COMO MÉTODO ALTERNATIVO DE
SANITIZAÇÃO: EFEITOS SOBRE A SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA E A
MANUTENÇÃO DA QUALIDADE EM MAÇÃS *IN NATURA*, MINIMAMENTE
PROCESSADAS E SUCO CLARIFICADO DE MAÇÃ**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de concentração: Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Otniel Freitas-Silva

Coorientador: Prof. Dr. Amauri Rosenthal

Coorientadora: Andréia Hansen Oster

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A474p

Alves, Mahyra da Paixão e Silva, 1987-
POTENCIAL DA RADIAÇÃO UV-C COMO MÉTODO ALTERNATIVO
DE SANITIZAÇÃO: EFEITOS SOBRE A SEGURANÇA
MICROBIOLÓGICA E A MANUTENÇÃO DA QUALIDADE EM MAÇÃS IN
NATURA, MINIMAMENTE PROCESSADAS E SUCO CLARIFICADO DE
MAÇÃ / Mahyra da Paixão e Silva Alves. - VOLTA
REDONDA, 2026.
136 f.: il.

Orientador: OTNIEL FREITAS-SILVA.
Coorientador: AMAURI ROSENTHAL.
Coorientadora: ANDRÉIA HANSEN OSTER.
Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do
Rio de Janeiro, PPGCTA, 2026.

1. TECNOLOGIAS EMERGENTES. 2. SEGURANÇA DOS
ALIMENTOS. 3. RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA. 4. CONSERVAÇÃO
PÓS-COLHEITA. 5. QUALIDADE. I. FREITAS-SILVA, OTNIEL, ,
1966-, orient. II. ROSENTHAL, AMAURI, -, coorient.
III. OSTER, ANDRÉIA HANSEN, -, coorient. IV
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. PPGCTA.
V. Título.

**O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de
Financiamento 001.**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

MAHYRA DA PAIXÃO E SILVA ALVES

**POTENCIAL DA RADIAÇÃO UV-C COMO MÉTODO ALTERNATIVO DE SANITIZAÇÃO:
EFEITOS SOBRE A SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA E A MANUTENÇÃO DA
QUALIDADE EM MAÇÃS *IN NATURA*, MINIMAMENTE PROCESSADAS E SUCO
CLARIFICADO DE MAÇÃ**

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de concentração: Tecnologia de Alimentos.

Tese aprovada em 27 de abril de 2026.

BANCA EXAMINADORA:

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

ATA No 132

Seropédica, 27 de Abril de 2026

Documento assinado digitalmente
 OTNIEL FREITAS SILVA
Data: 29/04/2026 10:37:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Otniel Freitas-Silva - Orientador – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 CRISTIANE HESS DE AZEVEDO MELEIRO
Data: 29/04/2026 16:02:00-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Cristiane Hess de Azevedo-Meleiro - Membro interno – UFRRJ

Documento assinado digitalmente
 IZABELA ALVES GOMES
Data: 29/04/2026 12:12:20-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Izabela Alves Gomes - Membro externo – Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB)

Documento assinado digitalmente
 ANDRÉ FIORAVANTE GUERRA
Data: 29/04/2026 13:48:30-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

André Fioravante Guerra - Membro externo – CEFET - Valença

Documento assinado digitalmente
 JESSICA CAROLINE ARAUJO SILVA SANDES
Data: 29/04/2026 14:15:59-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jéssica Caroline Araújo Silva Sandes - Membro externo - Embrapa Agroindústria de Alimentos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me conceder, a cada manhã, a oportunidade de um recomeço e a certeza de que Sua graça, amor e misericórdia sempre estarão sobre mim.

Aos meus pais, Maria Helena e Ronei, pelo dom da vida, base e princípios que levo e levarei por toda a vida.

Aos meus irmãos, Thayana e Raoni, por compartilharem comigo a certeza de que somos apoio e porto seguro, mesmo que as circunstâncias da vida não nos permitam uma convivência mais próxima como gostaríamos.

Ao meu esposo, Carlos Geovane, por acreditar em meu potencial desde o mestrado, apoiar, confiar e me incentivar de forma imensurável e admirável, muitas vezes até mais do que eu mesma. Obrigada por caminhar ao meu lado em todas as etapas dessa trajetória.

À minha amada filha, Iolanda, que, da forma mais inocente e linda que existe, e sem nem mesmo imaginar, me inspira diariamente a evoluir como pessoa e a construir um mundo melhor para ela.

Aos meus professores, desde a graduação, por promoverem um interesse genuíno pelo conhecimento através das disciplinas ministradas.

Às amigas construídas ao longo dessa trajetória, em especial à Planta V (Embrapa Agroindústria de Alimentos) e meu orientador Otniel, que, para além dos aprendizados técnicos, tornaram os dias mais leves por meio das trocas, parcerias e convívio quase diário.

*“Porque sou eu que conheço os planos
que tenho para vocês, diz o Senhor,
planos de fazê-los prosperar e não de
causar dano, planos de dar a vocês
esperança e um futuro”.
(Jeremias 29:11)*

RESUMO GERAL

ALVES, Mahyra da Paixão e Silva. **Potencial da radiação UV-C como método alternativo de sanitização: efeitos sobre a segurança microbiológica e a manutenção da qualidade em maçãs *in natura*, minimamente processadas e suco clarificado de maçã.** 2026. 136 páginas. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

A maçã (*Malus domestica*) é uma das frutas mais cultivadas e consumidas mundialmente, valorizada por suas qualidades sensoriais e elevado teor de fibras, vitaminas e compostos bioativos. No entanto, a cadeia produtiva enfrenta desafios críticos, como perdas pós-colheita elevadas (chegando a 70%), oxidação enzimática e riscos microbiológicos em produtos processados. Esta tese avaliou a eficácia da radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) como uma tecnologia não térmica estratégica para melhorar a segurança e manter a qualidade de maçãs frescas, minimamente processadas e sucos clarificados, integrando também uma análise bibliométrica global sobre o tema. Experimentalmente, as matrizes foram submetidas a diferentes doses de radiação (exposições de 5 a 10 minutos) e armazenadas sob refrigeração. Os resultados demonstraram que a UV-C foi altamente eficaz no controle de microrganismos deteriorantes (bactérias e leveduras) e patogênicos, garantindo a ausência de *Salmonella* spp. e mantendo as contagens de *Escherichia coli* dentro dos limites estabelecidos pela legislação. Em frutos frescos e minimamente processados, a radiação auxiliou na manutenção da firmeza e da coloração (luminosidade e tom vermelho), além de reduzir o índice de escurecimento enzimático em maçãs fatiadas. Quanto aos atributos físico-químicos, os tratamentos preservaram os teores de sólidos solúveis e acidez total. Notadamente, a aplicação de UV-C induziu o fenômeno da hormese, resultando em um aumento significativo no conteúdo de compostos fenólicos totais e na capacidade antioxidante das amostras, elevando o valor funcional do produto final. A revisão bibliométrica corroborou a tendência de crescimento desta tecnologia, identificando Espanha, Estados Unidos e China como os principais pólos de pesquisa, e destacando a UV-C como uma ferramenta sustentável para substituir ou complementar o uso de compostos clorados. Conclui-se que a radiação UV-C é uma alternativa promissora e de baixo impacto térmico, capaz de assegurar a estabilidade microbiológica, prolongar a vida útil e preservar as características nutricionais e sensoriais da maçã e seus derivados,

embora ainda demande avanços na padronização para aplicações em escala industrial.

Palavras-chave: compostos bioativos; conservação pós-colheita; *Malus domestica*; radiação ultravioleta, segurança dos alimentos.

GENERAL ABSTRACT

ALVES, Mahyra da Paixão e Silva. **The potential of UV-C radiation as an alternative sanitization method: effects on microbiological safety and quality preservation in fresh, minimally processed apples, and clarified apple juice.** 2026. 136 pages. Thesis (Doctorate in Food Science and Technology) – Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

The apple (*Malus domestica*) is one of the most widely cultivated and consumed fruits worldwide, prized for its sensory qualities and high content of fiber, vitamins, and bioactive compounds. However, the production chain faces critical challenges, such as high post-harvest losses (reaching 70% due to rot), enzymatic oxidation, and microbiological risks in processed products. This thesis evaluated the efficacy of short-wavelength ultraviolet radiation (UV-C) as a strategic non-thermal technology to improve safety and maintain the quality of fresh, minimally processed apples, and clarified juices, while also incorporating a global bibliometric analysis on the topic. Experimentally, the matrices were subjected to different radiation doses (exposures of 5 to 10 minutes) and stored under refrigeration. The results demonstrated that UV-C was highly effective in controlling spoilage microorganisms (molds and yeasts) and pathogens, ensuring the absence of *Salmonella* spp. and keeping *Escherichia coli* counts within the limits established by law. In fresh and minimally processed fruits, the radiation helped maintain firmness and color (brightness and red hue), in addition to reducing the enzymatic browning index in sliced apples. Regarding physicochemical attributes, the treatments preserved soluble solids content and total acidity. Notably, the application of UV-C induced the hormesis phenomenon, resulting in a significant increase in the content of total phenolic compounds and the antioxidant capacity of the samples, thereby enhancing the functional value of the final product. The bibliometric review corroborated the growing trend of this technology, identifying Spain, the United States, and China as the main research hubs, and highlighting UV-C as a sustainable tool to replace or complement the use of chlorinated compounds. It is concluded that UV-C radiation is a promising alternative with low thermal impact, capable of ensuring microbiological stability, extending shelf life, and preserving the nutritional and sensory characteristics of apples and their derivatives, although further advances in standardization are still needed for industrial-scale applications.

Keywords: bioactive compounds; postharvest preservation; *Malus domestica*; ultraviolet radiation; food safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de fluxo do processo de revisão sistemática, incluindo pesquisa, triagem, seleção e síntese dos resultados	24
Figura 2. Evolução temporal dos trabalhos publicados	26
Figura 3. Diagrama de Sankey mostrando as principais revistas, anos de publicação e países dos principais grupos de pesquisa	28
Figura 4. Distribuição espacial das publicações científicas por país	29
Figura 5. Número de ocorrências das palavras-chave	30
Figura 6. Mapa de coocorrência de palavras-chave gerado com o software <i>VOSviewer</i>	31
Figura 7. Combinação de UV-C com outras tecnologias em maçãs frescas, maçãs minimamente processadas e suco de maçã	50
Figura 8. Metodologia utilizada para a análise de cor instrumental em maçãs frescas	71
Figura 9. Massa das amostras nos três tratamentos durante o armazenamento	75
Figura 10. Análise da firmeza (força em newtons necessária para a penetração da amostra) nos três tratamentos durante o período de armazenamento	76
Figura 11. Análise dos parâmetros de cor L^* (índice de clareza), a^* (variação entre as cores verde e vermelha) e b^* (variação entre as cores azul e amarela) nos três tratamentos ao longo do período de armazenamento	78
Figura 12. Análise de SST nos três tratamentos ao longo do período de armazenamento	79
Figura 13. Análise de ATT nos três tratamentos ao longo do período de armazenamento	80
Figura 14. Análise da capacidade antioxidante (controle, UV5 e UV10) ao longo do período de armazenamento	81
Figura 15. Análise de CFT (g) (controle, UV5 e UV10) ao longo do período de armazenamento	82
Figura 16. Maçã minimamente processada nos tratamentos controle (A), UV5 (B) e UV7,5 (C) em embalagem de polipropileno ao longo dos dias de armazenamento	95
Figura 17. Perda de massa em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	100

Figura 18. Análise da firmeza em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	101
Figura 19. Análise dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	103
Figura 20. Análise do índice de escurecimento em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	104
Figura 21. Comportamento de SST em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	105
Figura 22. Comportamento de ATT em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	106
Figura 23. Análise da capacidade antioxidante em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	106
Figura 24. Análise de CFT (g) em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	107
Figura 25. Biplot da análise de componentes principais (PC) para amostras de maçãs minimamente processadas, com interpretação dos resultados relativos à perda de massa, firmeza, cor, SST, ATT, capacidade antioxidante e compostos fenólicos totais nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5.	109
Figura 26. Maçãs selecionadas para processamento (A) Suco de maçã em embalagens tipo pouchet valvular (B)	120
Figura 27. Análise dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento.	123
Figura 28. Embalagens contendo amostras de suco clarificado de maçã, submetidos ou não à UV-C ao longo dos dias de armazenamento	125
Figura 29. Análise de SST em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento	125
Figura 30. Análise de ATT em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento	127
Figura 31. Análise de CFT (g) em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação entre dois tipos de emissores de UV-C: UV-LED e UV de mercúrio	34
Tabela 2. Comparação dos microrganismos-alvo e da faixa de fluência aplicada	38
Tabela 3. Combinação de UV-C com outras tecnologias em produtos de maçã	51
Tabela 4. Redução logarítmica da carga microbiana: UV-C vs. combinação de UV-C	56
Tabela 5. Avaliação microbiana em maçãs frescas nos tratamentos controle, UV5 e UV10 durante o armazenamento	83
Tabela 6. Avaliação microbiana em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento	108
Tabela 7. Análise microbiológica em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento	129

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	17
2. CAPÍTULO I: VISÃO GERAL GLOBAL DO USO E DA EFICÁCIA DA TECNOLOGIA DE RAIOS UV-C EM MAÇÃS FRESCAS MINIMAMENTE PROCESSADAS E EM SUCO DE MAÇÃ NOS ÚLTIMOS 10 ANOS	20
2.1 Introdução	21
2.2. Metodologia	23
2.2.1. Análise bibliométrica: estratégia de pesquisa e critérios de seleção	23
2.3. Resultados e discussão	25
2.3.1. Análise bibliométrica e desempenho científico	25
2.3.1.1. Tendências de publicação ao longo dos anos	25
2.3.2. Análise de mapeamento científico	27
2.3.3. Análise de palavras-chave	30
2.4. Radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) e seu princípio de ação	32
2.4.1. Uso de UV-C na sanitização de alimentos e outros produtos	36
2.4.2. Legislação e regulamentação do uso da tecnologia UV-C	40
2.4.3. Radiação UV-C em maçãs e subprodutos	42
2.4.3.1. Radiação UV-C X maçãs frescas	42
2.4.3.2. Radiação UV-C X maçã minimamente processada (<i>freshcut</i>)	44
2.4.3.3. Radiação UV-C X suco de maçã	46
2.4.4. UV-C e super-irradiação	48
2.4.5 UV-C associado a outras tecnologias	49
2.5. Conclusões e perspectivas futuras	60
2.6. Referências	62
3. CAPÍTULO II: MELHORIA DA QUALIDADE E SEGURANÇA GERAIS PÓS-COLHEITA DE MAÇÃS FRESCAS SUBMETIDAS À LUZ UV-C	67
3.1 Introdução	68
3.2 Materiais e métodos	70
3.2.1. Materiais	70
3.2.2. Métodos	70
3.2.2.1. Análises físico-químicas	70
3.2.2.1.1. Perda de massa	70
3.2.2.1.2. Firmeza	71
3.2.2.1.3. Análise de cor instrumental	71
3.2.2.1.4. Sólidos solúveis totais (SST)	72
3.2.2.1.5. Acidez titulável total (ATT)	72
3.2.2.1.6. Capacidade antioxidante	72
3.2.2.1.7. Fenólicos totais	73
3.2.2.1.8. Análise microbiológica	73
3.2.2.1.9. Análise estatística	74
3.3 Resultados e discussão	75
3.3.1. Perda de massa	75
3.3.2. Firmeza	76
3.3.3. Análise de cor instrumental	77
3.3.4. Sólidos solúveis totais (SST)	79
3.3.5. Acidez titulável total (ATT)	80
3.3.6. Capacidade antioxidante (método ABTS+)	80
3.3.7. Fenólicos totais (CFT)	81

3.3.8. Análise microbiológica	83
3.4. Conclusões	85
3.5. Referências	87

4. CAPÍTULO III: AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA E DA SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA EM MAÇÃS MINIMAMENTE PROCESSADAS SUBMETIDAS À RADIAÇÃO UV-C

4.1 Introdução	92
4.2. Materiais e métodos	93
4.2.1 Materiais	95
4.2.2 Métodos	96
4.2.2.1. Análises físico-químicas	96
4.2.2.1.1. Perda de massa	96
4.2.2.1.2. Firmeza	96
4.2.2.1.3. Análise de cor instrumental	96
4.2.2.1.4. Sólidos solúveis totais (SST)	97
4.2.2.1.5. Acidez total titulável (ATT)	97
4.2.2.1.6. Capacidade antioxidante	97
4.2.2.1.7. Fenólicos totais	98
4.2.2.1.8. Análise microbiológica	98
4.3. Resultados e discussão	100
4.3.1. Perda de massa	100
4.3.2. Firmeza	101
4.3.3. Análise de cor instrumental	102
4.3.4. Sólidos solúveis totais (SST)	104
4.3.5. Acidez total titulável (ATT)	105
4.3.6. Capacidade antioxidante (método ABTS+)	106
4.3.7. Fenólicos totais (CFT)	107
4.3.8. Análise microbiológica	108
4.3.9. Visão geral dos resultados	109
4.4. Conclusões	111
4.5. Referências	113

5. CAPÍTULO IV: TRATAMENTO COM RAIOS ULTRAVIOLETA C COMBINADO COMO ESTRATÉGIA NÃO TÉRMICA PARA MELHORAR A SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA E A QUALIDADE DO SUCO DE MAÇÃ CLARIFICADO

5.1 Introdução	116
5.2. Materiais e métodos	117
5.2.1 Materiais	119
5.2.2. Métodos	119
5.2.2.1. Análises físico-químicas	120
5.2.2.1.1. Análise de cor instrumental	121
5.2.2.1.2. Sólidos solúveis totais (SST)	121
5.2.2.1.3. Acidez titulável total (ATT)	121
5.2.2.1.4. Fenólicos totais	121
5.2.2.1.5. Análise microbiológica	122
5.3. Resultados e discussão	123
5.3.1. Análise de cor instrumental	123
5.3.2. Sólidos solúveis totais (SST)	125

	16
5.3.3. Acidez total titulável (ATT)	126
5.3.4. Fenólicos totais (CFT)	127
5.3.5. Análise microbiológica	128
5.4. Conclusões	131
5.5. Referências	133
6. CONCLUSÕES GERAIS	135

1 INTRODUÇÃO GERAL

A maçã (*Malus domestica*) destaca-se como uma das frutas mais cultivadas e consumidas globalmente, possuindo elevado valor econômico, social e nutricional. Além de suas qualidades degustativas, é uma fonte relevante de fibras, vitaminas (C e E), minerais e compostos bioativos, como polifenóis e flavonoides, que oferecem benefícios significativos à saúde. No cenário internacional, a produção ultrapassa 97 milhões de toneladas, enquanto no Brasil a safra atinge aproximadamente 1,1 milhão de toneladas, consolidando o país como um importante produtor no Hemisfério Sul.

Apesar de sua relevância, a cadeia produtiva da maçã enfrenta desafios críticos relacionados às perdas pós-colheita, estimadas entre 20% e 30% da produção global. Essas perdas são frequentemente causadas por danos mecânicos, padrões estéticos rigorosos do mercado e, principalmente, pelo apodrecimento fúngico, que figura entre as principais causas dessas perdas, podendo comprometer até 70% dos frutos. O bolor azul, causado pelo fungo *Penicillium expansum*, é a principal doença pós-colheita, comprometendo a firmeza dos tecidos e apresentando riscos à segurança dos alimentos devido à produção da micotoxina patulina (limite de 50µg/kg). Além disso, a presença de patógenos bacterianos como *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli* tem sido associada a surtos em produtos derivados da maçã.

Para reduzir o desperdício, a indústria de processamento de alimentos surge como uma alternativa estratégica, transformando frutos fora dos padrões comerciais em sucos, purês ou produtos minimamente processados. No segmento de frutas minimamente processadas, a conveniência atende à demanda crescente por alimentação saudável, embora o corte acelere o metabolismo e o escurecimento enzimático, mediado pelas enzimas polifenoloxidase (PPO) e peroxidase (POD). O processamento de maçãs, industrialmente, oferece um meio favorável à multiplicação microbiana, exigindo tecnologias que garantam estabilidade sem comprometer o frescor.

Tradicionalmente, a sanitização baseia-se no uso de compostos clorados, devido ao baixo custo e eficácia bactericida. Entretanto, essa prática, se não realizada de maneira correta conforme a legislação pode gerar subprodutos tóxicos, como trihalometanos, e tem sua eficiência reduzida na presença de matéria orgânica. Da mesma forma, tratamentos térmicos convencionais podem degradar atributos sensoriais e nutricionais sensíveis ao calor. Nesse contexto, as tecnologias não

térmicas, como a radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) na faixa de 200 a 280 nm, emergem como alternativas promissoras.

A radiação UV-C, com pico de eficácia antimicrobiana em 254 nm, atua penetrando nas membranas celulares e causando danos fotoquímicos no DNA e RNA microbiano, impedindo a replicação celular. Trata-se de uma tecnologia de baixo consumo energético, fácil operação, que não deixa resíduos químicos e tem o potencial de induzir o fenômeno da hormese, estimulando a biossíntese de metabólitos secundários e defesas naturais nos tecidos vegetais.

Dada a necessidade de sistemas de conservação mais sustentáveis e eficazes, esta tese propõe avaliar a aplicação da radiação UV-C em diferentes matrizes da cadeia da maçã.

O presente trabalho, estruturado em quatro capítulos, inicia-se com uma visão geral da produção científica relacionada ao uso da tecnologia em produtos de maçã. Seguido da avaliação dos efeitos da UV-C na qualidade e segurança pós-colheita de maçãs frescas e minimamente processadas durante o armazenamento. Por fim, a aplicação dessa tecnologia combinada como estratégia não térmica para a melhoria da segurança microbiológica e da qualidade do suco de maçã clarificado.

CAPÍTULO I

**VISÃO GERAL GLOBAL DO USO E DA EFICÁCIA DA TECNOLOGIA DE
RAIOS UV-C EM MAÇÃS FRESCAS MINIMAMENTE PROCESSADAS E EM
SUCO DE MAÇÃ NOS ÚLTIMOS 10 ANOS**

2 CAPÍTULO I: Visão geral global do uso e da eficácia da tecnologia de raios UV- C em maçãs frescas minimamente processadas e em suco de maçã nos últimos 10 anos

RESUMO

A maçã é uma fruta com grande valor econômico e um rico perfil nutricional, contendo altos níveis de fibras, vitaminas, minerais e compostos bioativos. No entanto, ela é suscetível à oxidação enzimática, à deterioração microbiana e doenças fitossanitárias. Para prolongar a vida útil, a radiação UV-C é uma tecnologia promissora, pois pode garantir a segurança microbiana sem comprometer a qualidade pós-colheita. Esta análise bibliométrica revisou publicações dos últimos dez anos sobre o uso da tecnologia UV- C em maçãs frescas e minimamente processadas e em suco de maçã como método alternativo de higienização. Os resultados demonstram a eficácia do UV-C, especialmente quando combinado com outras tecnologias. Entre as 52 publicações científicas selecionadas, as contribuições mais notáveis para a aplicação da radiação em maçãs frescas e seus derivados vieram da Espanha (11 artigos), dos Estados Unidos (9 artigos) e da China (7 artigos). A revista *Food Control* foi a principal fonte científica de informação. De modo geral, os resultados indicam que a UV-C pode aumentar a segurança microbiológica, prolongar a vida útil e preservar as qualidades sensoriais e nutricionais das maçãs e dos produtos derivados dela. No entanto, ainda persistem desafios importantes, tais como a penetração limitada da radiação, a falta de protocolos de aplicação padronizados e a necessidade de estudos que abordem as condições reais de processamento em escala industrial. Em resumo, a radiação UV-C surge como uma ferramenta promissora e sustentável para a higienização de maçãs e produtos derivados, com potencial para substituir ou complementar o uso do cloro. Portanto, o fortalecimento da pesquisa aplicada voltada para aplicações industriais será essencial para estabelecer essa tecnologia no setor de frutas e hortaliças.

Palavras-chave: análise bibliométrica; inativação microbiana; produtos de maçã; tecnologias não térmicas; 254 nm.

2.1 Introdução

A maçã (*Malus domestica*) está entre as frutas mais produzidas e consumidas em todo o mundo, com significativo valor econômico, social e nutricional. São ricas em fibras, vitaminas, minerais e compostos bioativos (ARNOLD; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2022). Em 2023, a produção global de maçãs ultrapassou 97 milhões de toneladas, com os principais produtores incluindo China, Estados Unidos, Turquia, Polônia e Índia (FAOSTAT, 2025). No Brasil, foram produzidas aproximadamente 1,1 milhão de toneladas, com as variedades Gala e Fuji liderando a preferência dos consumidores (ABPM, 2023).

Apesar de sua importância, a qualidade sensorial e comercial das maçãs pode ser comprometida por fatores microbiológicos e fisiológicos, especialmente durante o armazenamento e o processamento pós-colheita (ZHU et al., 2022). Processos fisiológicos, como o escurecimento enzimático, reduzem a aceitabilidade do consumidor, enquanto a contaminação por microrganismos pode representar uma deterioração acelerada por deteriorantes ou mesmo um risco à segurança por patógenos (HASAN et al., 2017).

As doenças pós-colheita em maçãs representam um desafio considerável na cadeia de abastecimento global, contribuindo para perdas e desperdícios alimentares que variam de 5% a 20% das colheitas (LUCIANO-ROSARIO et al., 2025; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023). A principal doença pós-colheita é o mofo azul, na maioria das vezes causado por espécies do fungo *Penicillium*, particularmente *Penicillium expansum*, que se destaca por sua capacidade de crescer em baixas temperaturas e continua sendo uma ameaça mesmo em armazenamento refrigerado, podendo ocasionar problemas gastrointestinais, hepatotoxicidade, imunotoxicidade, problemas neurológicos além de riscos genéticos e reprodutivos (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; RIOS DE SOUZA et al., 2020). Além do *Penicillium*, bactérias como *Listeria monocytogenes* e *Escherichia coli* O157:H7 estão associadas a surtos causados por maçãs (HO et al., 2020; MURRAY et al., 2018), e leveduras como *Saccharomyces* e *Zygosaccharomyces* podem crescer em temperaturas de refrigeração (4 °C), causando alterações na cor, textura, produção de gás e sabores indesejáveis (GRAÇA et al., 2020; XIANG et al., 2020).

A higienização das frutas é uma etapa crucial nas operações pós-colheita, desempenhando um papel fundamental na redução da carga microbiana superficial e na prevenção de doenças transmitidas por alimentos (DTHA: doenças de

transmissão hídrica e alimentar e DVA: doenças veiculadas por alimentos). Além de aumentar a segurança microbiológica, esse processo é vital para prolongar o prazo de validade e preservar as qualidades sensoriais e nutricionais das frutas (YUAN et al., 2022).

O cloro é amplamente utilizado para sanitizar frutas e vegetais devido ao seu baixo custo, ampla disponibilidade e comprovada eficácia antimicrobiana. No entanto, a formação de subprodutos clorados potencialmente tóxicos (trihalometanos, ácidos haloacéticos, cloraminas) presentes nos produtos quando a sanitização não é feita de forma correta (lavagem inicial em água corrente; 2,0 - 2,5% hipoclorito de sódio; 10 - 15 min de imersão; enxágue em água potável corrente para remoção de resíduos de cloro) e a redução da eficácia na presença de matéria orgânica constituem limitações notáveis, o que tem impulsionado a busca por tecnologias alternativas mais seguras, sustentáveis e eficazes (ARCOS-LIMIÑANA, MAESTRE-PÉREZ, PRATS-MOYA, 2025; SHIN et al., 2024; KIM, LEE e YOON, 2021).

A radiação ultravioleta C (UV-C) surgiu como uma alternativa promissora para a higienização de produtos vegetais, incluindo maçãs e seus produtos derivados (TIRONO, 2023; GABRIEL e ANCOG, 2019). Seu princípio ativo consiste na inativação de microrganismos por meio da destruição de seu material genético (DNA e RNA), com maior poder germicida em 254 nm. Além disso, estudos indicam que a aplicação de UV-C pode contribuir não apenas para a segurança microbiológica, mas também para a manutenção ou até mesmo o aumento de compostos bioativos relacionados à qualidade e ao valor funcional das frutas (ZHANG et al., 2023; KIM, LEE, & YOON, 2021).

Dado o número crescente de estudos sobre a radiação UV-C em maçãs e seus subprodutos, é importante utilizar uma abordagem bibliométrica para sistematizar e quantificar a produção científica nessa área. Essa estratégia permite compreender a evolução temporal e temática da pesquisa e destaca lacunas persistentes, como a falta de padronização nas doses e nos tempos de exposição, a heterogeneidade metodológica entre os estudos e a escassez de investigações em escala industrial. Essa abordagem oferece uma visão geral abrangente e estratégica do desenvolvimento do método, orientando pesquisas futuras e promovendo avanços técnicos e científicos no uso e na eficácia da radiação UV-C na cadeia de produção da maçã.

Portanto, o objetivo deste estudo foi realizar uma revisão bibliométrica

abrangente das publicações científicas sobre o uso da radiação UV-C na higienização de maçãs frescas e minimamente processadas, sucos e outros produtos derivados da maçã, enfatizando seus efeitos sobre a segurança microbiológica, a estabilidade química e a qualidade pós-colheita.

2.2. Metodologia

2.2.1. Análise bibliométrica: estratégia de pesquisa e critérios de seleção

Esta revisão sistemática foi conduzida de acordo com as Diretrizes para Relatórios de Revisões Sistemáticas e Metanálises (PRISMA). O mapeamento sistemático foi realizado utilizando o protocolo StArt (*State of the Art through Systematic Review*, versão 3.0.3 BETA), desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software (LaPES/UFSCar).

Durante a fase de planejamento, foram definidos os temas do estudo e as questões de pesquisa, juntamente com palavras-chave e cadeias de busca (combinações de palavras-chave utilizando operadores booleanos). A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*, selecionadas por sua abrangente cobertura da literatura revisada por pares e relevância para as áreas de ciência dos alimentos, processamento de alimentos e tecnologias aplicadas. Os resultados da pesquisa foram exportados no formato RIS e importados para o software StArt. Os critérios de inclusão (estudos: i) em maçãs frescas; ii) em maçãs minimamente processadas; iii) em suco de maçã; iv) em produtos derivados de maçã; v) utilizando a tecnologia UV-C de forma isolada; vi) utilizando a tecnologia UV-C de forma combinada a outras tecnologias) e exclusão (estudos: i) de revisão; ii) em línguas diferentes do inglês; iii) em frutas diferentes da maçã; iv) em blends de frutas; v) utilizando outras tecnologias diferentes da UV-C; vi) utilizando objetos de estudo diferentes da maçã) para a seleção dos estudos foram definidos de acordo com o objetivo principal desta revisão, que era identificar os principais impactos da aplicação da tecnologia UV-C como higienizante em maçãs e seus produtos derivados. Na fase de execução, foram realizadas pesquisas utilizando as sequências de termos estabelecidas, recuperando-se estudos da literatura. Após uma análise minuciosa dos documentos, os artigos foram classificados em três categorias: (i) aceitos, (ii) rejeitados ou (iii) duplicados, de acordo com os critérios definidos no protocolo.

Após a triagem dos artigos aceitos, a fase de resumo envolveu a organização

das informações no Excel, permitindo a consolidação dos resultados bibliométricos e a extração de dados de acordo com as variáveis previamente definidas. Essa fase teve como objetivo coletar informações contextuais dos estudos e organizá-las sistematicamente para permitir a comparação e a síntese dos resultados entre diferentes trabalhos.

O processo de revisão ocorreu em junho de 2025. Todas as etapas descritas acima nesta revisão bibliométrica estão detalhadas na Figura 1.

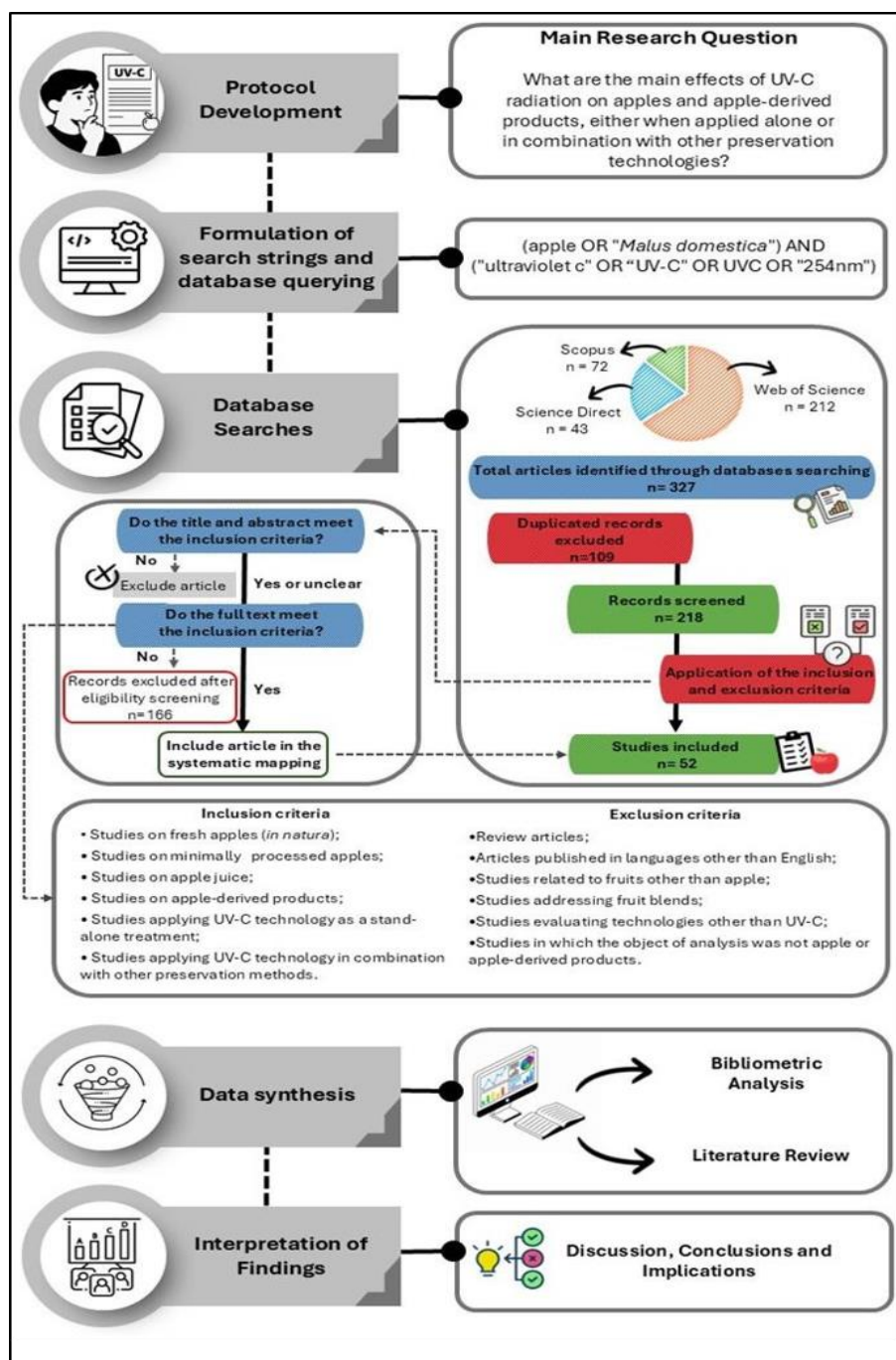


Figura 1. Diagrama de fluxo do processo de revisão sistemática, incluindo pesquisa, triagem, seleção e síntese dos resultados. Fonte: Próprios autores (2025).

Artigos de pesquisa publicados em periódicos com fator de impacto foram incluídos se o texto completo estivesse disponível em inglês, seja por acesso pago ou aberto, e publicados entre 1º de janeiro de 2015 e 10 de junho de 2025. Após a pesquisa nas bases de dados, foram identificadas 327 publicações: 72 da *Scopus*, 212 da *Web of Science* e 43 da *ScienceDirect*. Após a fase de triagem, 218 estudos foram avaliados na íntegra. Por fim, 52 artigos que atendiam aos critérios de inclusão foram selecionados para a extração de dados. Esses estudos abordam diretamente a questão principal da pesquisa e atendem aos critérios definidos no protocolo. Portanto, foram incluídos nesta revisão e são apresentados e discutidos nas seções a seguir.

Além de informações bibliométricas, como principais revistas, ano de publicação e países, também foram extraídos dados contextuais dos artigos selecionados, incluindo o tipo de produto estudado, condições específicas da aplicação de UV-C e se a tecnologia foi aplicada isoladamente ou em combinação com outras tecnologias emergentes (Tecnologia de Barreiras de Leistner).

A análise dos dados foi realizada por meio da criação de gráficos e figuras utilizando o *Google Charts* e mapas de rede com o *VOSviewer*.

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Análise bibliométrica e desempenho científico

2.3.1.1. Tendências de publicação ao longo dos anos

A Figura 2 mostra a evolução temporal das publicações sobre a aplicação da radiação UV-C em maçãs frescas e seus derivados, tais como maçãs minimamente processadas e suco de maçã, com foco na conservação e no prolongamento da vida útil de produtos vegetais. A figura indica uma continuidade no interesse científico neste tema. Em 2015, 21% dos estudos incluídos nesta revisão foram publicados, enquanto em 2016 e 2017, 8% e 13% das publicações foram registradas, respectivamente. Essa tendência reflete o crescente interesse em tecnologias emergentes para o processamento e a conservação de maçãs e produtos derivados. Também pode estar relacionada à necessidade de ampliar as estratégias de controle microbiológico, especialmente em resposta aos surtos de contaminação em produtos à base de maçã em todo o mundo, que aumentaram a demanda por métodos inovadores, como a radiação UV-C.

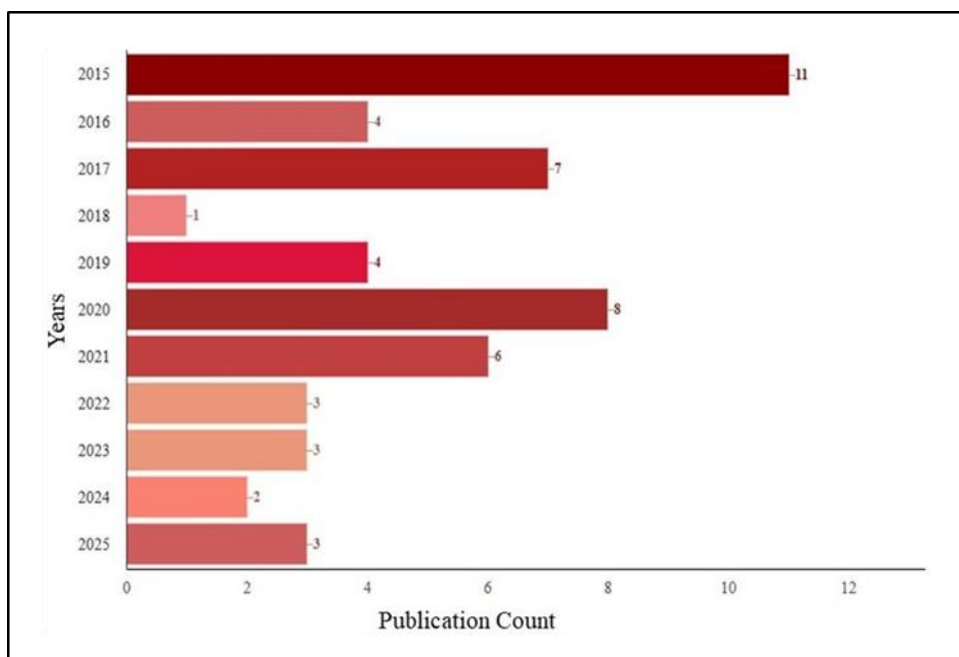


Figura 2. Evolução temporal dos trabalhos publicados. Fonte: Próprios autores, 2025.

Um surto de listeriose (*L. monocytogenes*) em 2014–2015 nos Estados Unidos, associado a maçãs caramelizadas, alertou a indústria e as instituições de pesquisa para os riscos microbianos em produtos à base de maçã, especialmente quando submetidos a tratamentos pós-colheita (Carstens et al., 2018). Vários artigos avaliados neste estudo investigaram a eficácia do UV-C isoladamente ou em combinação com barreiras adicionais (Tirono, 2023; Nicolau-Lapeña et al., 2022; Kim, Yoon e Lee, 2021; Green et al., 2020; Gabriel & Ancog, 2019; Murray et al., 2018; Adhikari et al., 2015; Gayán et al., 2015), como água eletrolisada levemente acidificada com ácido fumárico associada ao LED UV-C sobre maçãs minimamente processadas (Kim, Yoon e Lee, 2021). Em maçãs frescas, Murray et al. (2018) avaliaram uma estratégia sequencial para inativar *L. monocytogenes*, especificamente para a produção de maçãs caramelizadas. O tratamento combinou ozônio por ar forçado seguido por um processo de oxidação avançada que integra UV-C, ozônio e vapor de peróxido de hidrogênio.

Os anos de 2015, 2020, 2017 e 2021, respectivamente registraram os maiores volumes de estudos publicados sobre o tema. Isso sugere períodos de interesse renovado ou consolidação metodológica na aplicação da radiação UV-C em maçãs e seus derivados. O aumento nos estudos durante esse período coincidiu com o surto da pandemia de COVID-19. Durante esse período, as preocupações com a segurança dos alimentos tornaram-se mais proeminentes, impulsionando a

demanda por estratégias antimicrobianas eficazes para prolongar a vida útil dos alimentos. Como resultado, a conscientização global sobre o controle de patógenos e a higiene alimentar pode ter contribuído para o aumento do interesse nas aplicações da tecnologia UV-C para produtos frescos e processados.

O padrão de picos de publicações seguidos por períodos de menor produção, conforme observado nos anos subsequentes (2022–2025), indica intervalos de atividade reduzida ou uma mudança no foco da pesquisa. Embora a radiação UV-C seja uma tecnologia emergente amplamente estudada em diversos alimentos, esta revisão concentra-se exclusivamente em sua aplicação em maçãs e produtos derivados da maçã. Portanto, os resultados refletem especificamente o interesse científico no uso do UV-C para aumentar a segurança microbiológica e prolongar a vida útil de maçãs frescas, minimamente processadas ou processadas (sucos, purês), sem extrapolar para aplicações mais amplas da tecnologia UV-C em alimentos. O total de 52 artigos identificados por meio dessa abordagem metodológica demonstra um interesse científico contínuo na radiação UV-C para maçãs e seus derivados.

2.3.2. Análise de mapeamento científico

A Figura 3 apresenta o diagrama de Sankey que ilustra as principais revistas, os anos de publicação e os países. A análise bibliométrica identificou 52 publicações sobre o tema, publicadas em 24 revistas diferentes entre 2015 e 2025, demonstrando ampla divulgação científica e crescente interesse na aplicação da radiação UV-C em maçãs e produtos à base de maçã, como sucos. Para destacar as revistas mais relevantes, foram enfatizadas as nove principais revistas identificadas neste estudo bibliométrico. Entre elas, a *Food Control* destacou-se como a principal revista a publicar estudos sobre a aplicação da radiação UV-C em maçãs, contribuindo com nove artigos sobre o tema, com o maior número de publicações em 2015 e 2020, com três artigos em cada ano.

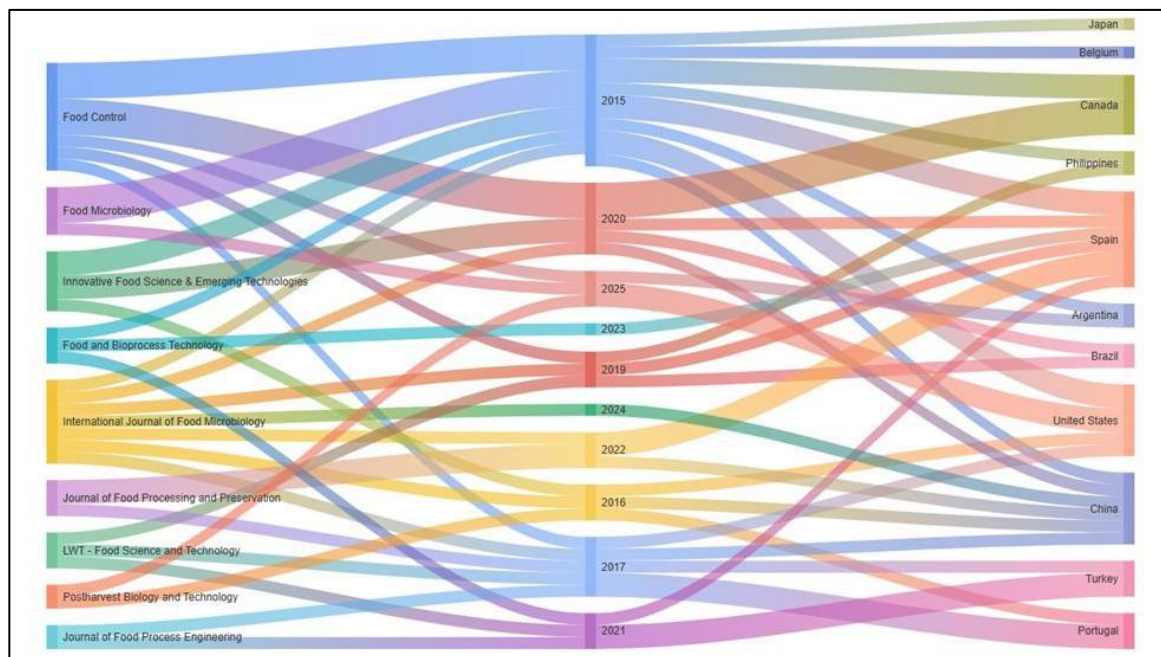


Figura 3. Diagrama de Sankey mostrando as principais revistas, anos de publicação e países dos principais grupos de pesquisa. Fonte: Próprios autores (2026).

A *International Journal of Food Microbiology* e a *Innovative Food Science & Emerging Technologies* também contribuíram com um número substancial de publicações, com sete e cinco artigos, respectivamente. As revistas identificadas neste estudo abrangem pesquisas sobre segurança dos alimentos e qualidade alimentar, bem como o desenvolvimento de medidas preventivas pós-colheita – áreas diretamente relacionadas ao uso da radiação UV-C como tecnologia não térmica para preservar e prolongar a vida útil de produtos vegetais.

A maioria das publicações surgiu em 2015, impulsionada por trabalhos liderados por grupos espanhóis e canadenses em revistas como *Food Microbiology* e *Food Control*. Desde 2017, Brasil, Portugal e Turquia emergiram como novos contribuintes científicos, com um aumento notável no número de publicações. Em 2020, o tema se consolidou, com o aumento das colaborações internacionais. Canadá, Espanha e China lideraram em número de artigos, com maior concentração em revistas como *Food Control* e *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. Em 2025, as publicações concentraram-se nos Estados Unidos e na Argentina, em revistas como *Food Control*, *Innovative Food Microbiology* e *Postharvest Biology and Technology*.

Entre os países com maiores contribuições científicas para a aplicação da radiação UV-C em maçãs frescas e seus derivados, destacam-se a Espanha (11

artigos), os Estados Unidos (9 artigos) e a China (7 artigos) (Figura 4). O fato da China e dos Estados Unidos apresentarem uma significativa produção de maçãs (49,6 e 5,2 milhões de toneladas, respectivamente, em 2023) pode ser o motivo de destaque em publicações sobre o assunto (FAOSTAT, 2025), bem como aos avanços na pesquisa sobre conservação e qualidade pós-colheita. As publicações desses países concentram-se na *Postharvest Biology and Technology* e no *Journal of Food Processing and Preservation*.

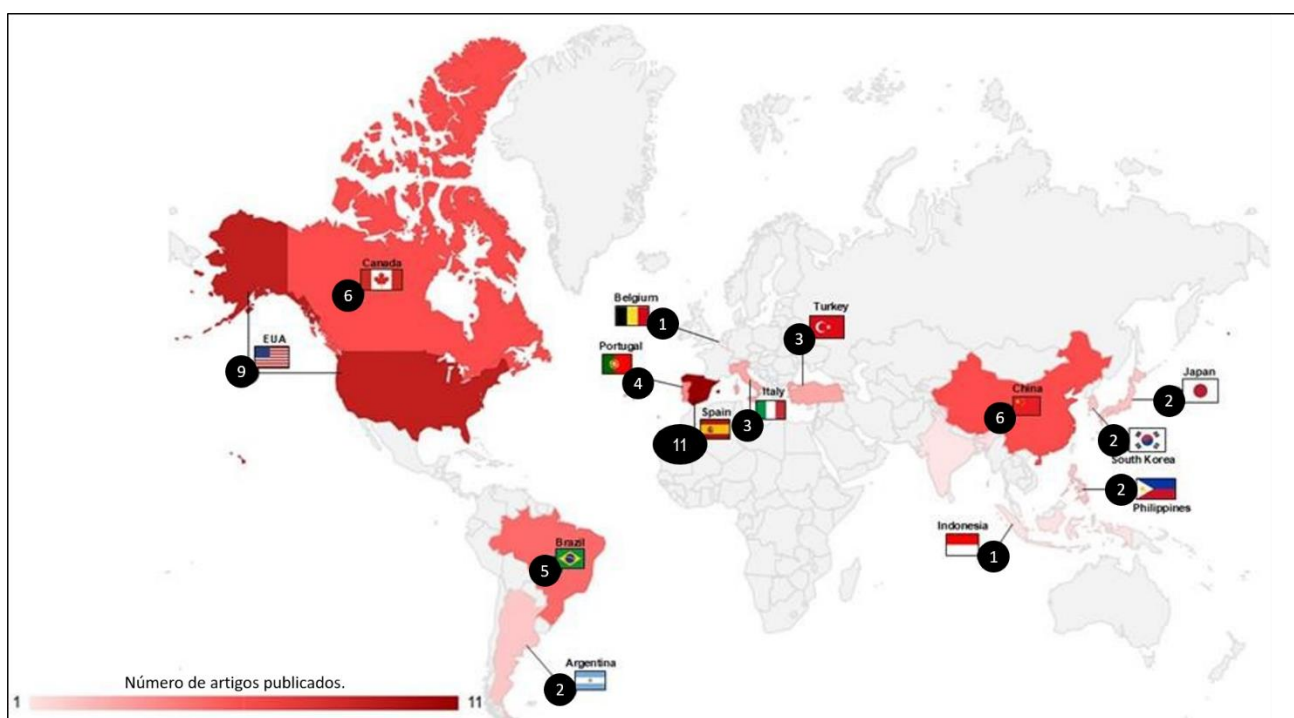


Figura 4. Distribuição espacial das publicações científicas por país. Fonte: Próprios autores (2026), software Google Charts.

A Espanha produziu cerca de 528 toneladas de maçãs, também em 2023 (FAOSTAT, 2025) e, embora seu volume de produção seja menor, detém uma parcela significativa das publicações sobre radiação UV-C aplicada a maçãs e apresenta o maior número de conexões, particularmente nas revistas *Innovative Food Science & Emerging Technologies* e *Food Control*. Isso pode estar relacionado não apenas ao interesse em produtos frescos, mas também ao papel notável da Espanha na pesquisa e inovação tecnológica focadas no processamento mínimo e na produção de sucos e purês de frutas. Conforme demonstrado nesta pesquisa bibliográfica, os artigos publicados ou co-autoria de pesquisadores espanhóis estão vinculados à Universidade de Saragoça (Instituto Agroalimentar de Aragão – IA2), à Universidade Autônoma de Barcelona (CIRTTA, XaRTA, TECNIO-CERTA e SPTA), à Universidade

de Lleida (Centro AGROTECNIO-CERCA) e à Universidade de Navarra (CEIT-BRTA). Esses centros fazem parte de redes de inovação agroalimentar com uma estrutura científica consolidada, o que explica a liderança da Espanha em publicações sobre esse tema.

2.3.3. Análise de palavras-chave

A análise das palavras-chave (Figura 5) revelou que os termos diretamente relacionados à aplicação da radiação UV-C em maçãs e seus derivados foram predominantes. O termo “suco de maçã” foi o que apareceu com maior frequência (13 registros), indicando que o suco é o principal produto utilizado em experimentos de irradiação com UV-C em maçãs.

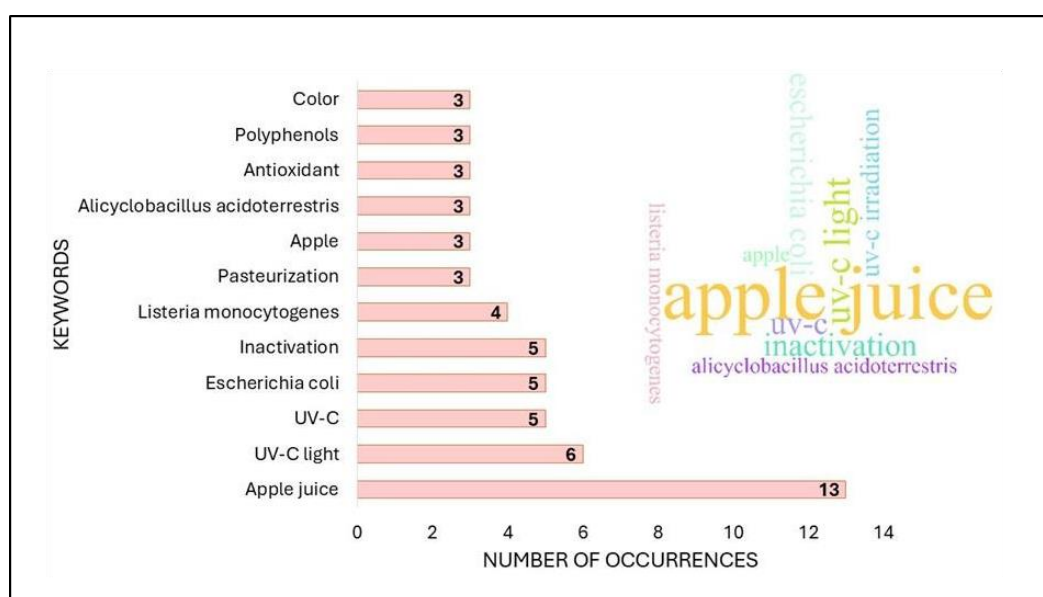


Figura 5. Número de ocorrências das palavras-chave. Fonte: Próprios autores.

Em seguida, “luz UV-C” (6 ocorrências), “UV-C”, “*Escherichia coli*” e “inativação” (5 ocorrências cada) demonstram o foco recorrente nos mecanismos de inativação microbiana e na avaliação da eficiência da radiação UV-C.

Termos como “pasteurização” (3 ocorrências), “Homogeneização por Ultra-Alta Pressão (UAP)” (2 ocorrências) e “ozônio” (1 ocorrência) indicam um interesse em avaliar diferentes tecnologias para preservar as propriedades físico-químicas, sensoriais e de segurança das maçãs e de seus produtos derivados, conforme discutido na Seção 3.5.

As palavras-chave destacam os pontos principais do artigo e o foco da pesquisa

neste campo. A Figura 6 mostra a análise de coocorrência das palavras-chave, realizada com o software *VOSviewer* (Universidade de Leiden, versão 1.6.x, Holanda). A análise de rede identificou sete clusters temáticos, representados por cores diferentes (vermelho, verde, roxo, amarelo, laranja, azul claro e azul escuro), que estruturam o campo de pesquisa sobre a aplicação da radiação UV-C em maçãs e produtos derivados da maçã. O *VOSviewer* analisa a frequência com que os termos aparecem juntos nos mesmos artigos. Se eles coocorrem com frequência, o software considera que possuem alta similaridade semântica, resultando em maior força de coocorrência. Cada cluster representa um subconjunto de termos com forte coocorrência.

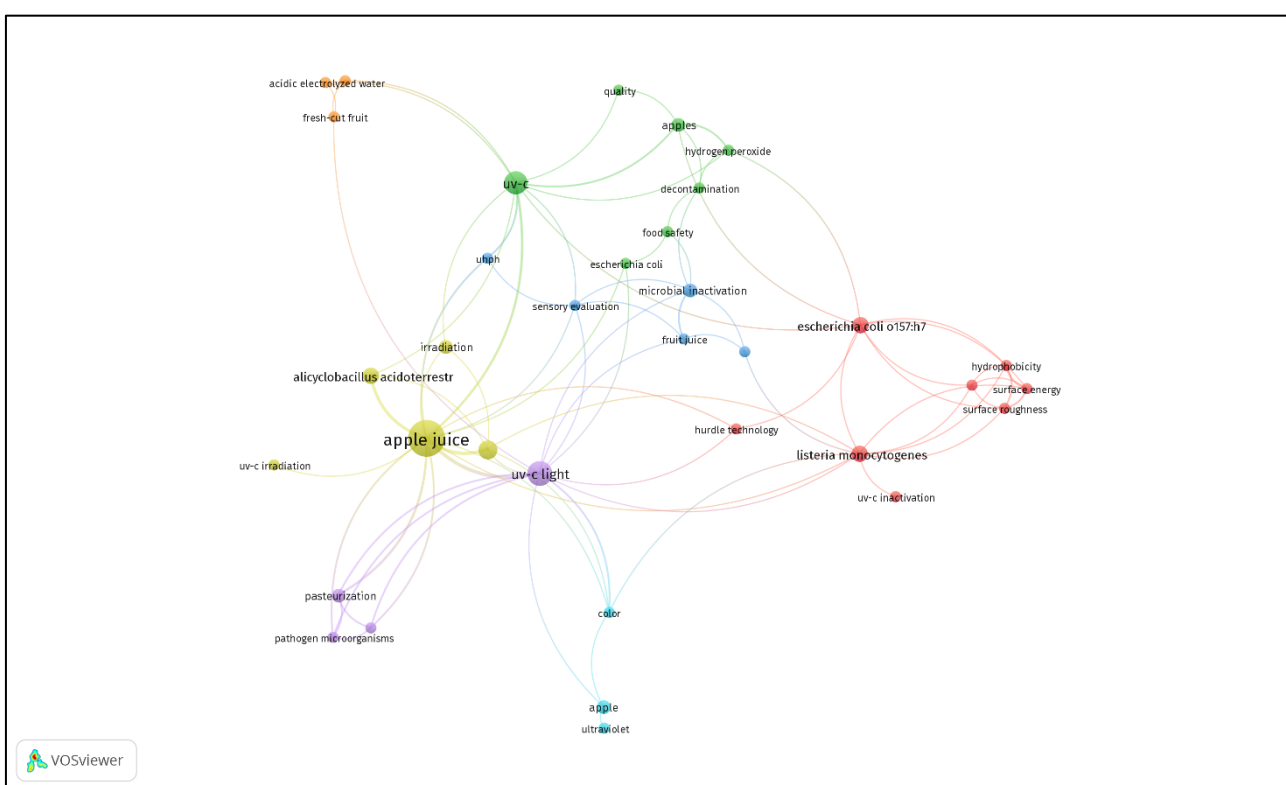


Figura 6. Mapa de coocorrência de palavras-chave gerado com o software *VOSviewer*.

A análise incluiu todas as palavras-chave extraídas dos 52 artigos revisados. O tamanho de cada nó é proporcional ao número de ocorrências do termo correspondente, e as cores dos clusters indicam grupos de palavras com associações mais fortes.

O cluster 1, mostrado em vermelho, contém oito palavras-chave e aborda os efeitos da tecnologia UV-C em patógenos alimentares, como *E. coli* O157:H7 e *L. monocytogenes*, com foco na inativação microbiológica e ênfase nas propriedades

físico-químicas com termos como rugosidade da superfície e hidrofobicidade. O cluster 2, destacado em verde-escuro, inclui sete palavras-chave e concentra-se na segurança e qualidade alimentar, associando termos como segurança dos alimentos, descontaminação, peróxido de hidrogênio e qualidade, e caracteriza pesquisas que combinam UV-C com oxidantes para a descontaminação de maçãs. O cluster 3, destacado em azul-escuro e contendo cinco palavras-chave, concentra-se em estudos de redução microbiana e impacto sensorial. Ele reúne termos como suco de fruta, inativação microbiana, HHP e avaliação sensorial, refletindo a busca por processos não térmicos para o suco de maçã que sejam microbiologicamente eficazes e mantenham a aceitação sensorial pelos consumidores. O cluster 4, em verde-claro, também contém cinco palavras-chave e se destaca por termos como *Alicyclobacillus acidoterrestris* e *P. expansum*, enfatizando o papel da irradiação UV-C na estabilidade microbiológica do suco de maçã, que é a palavra-chave mais frequentemente usada pelos autores dentro deste tópico de pesquisa. O cluster 5, em lilás, combina luz UV-C com pasteurização térmica e inclui quatro palavras-chave, traduzindo a eficiência dessa associação no combate a microrganismos patogênicos. O cluster 6, em azul-claro, contém três palavras-chave – maçã, cor e ultravioleta –, indicando preocupação com alterações visuais e oxidativas em produtos submetidos ao tratamento com UV-C. Por fim, o cluster 7, em laranja, destaca-se por agrupar três palavras-chave e representa a área emergente de tecnologias combinadas, abordando a água eletrolisada ácida e neutra em frutas recém-cortadas como alternativas aos higienizantes convencionais em produtos minimamente processados.

2.4. Radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) e seu princípio de ação

A luz ultravioleta é uma região do espectro eletromagnético que abrange comprimentos de onda entre 100 e 400 nm e é tradicionalmente dividida em três bandas principais: UV-A (315 a 400 nm), UV-B (280 a 315 nm) e UV-C (100 a 280 nm) (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; RIOS DE SOUZA et al., 2020; MENEZES et al., 2019).

A radiação UV-C é considerada com maior ação antimicrobiana dentre as três bandas UV, pois o DNA microbiano absorve os fótons UV com maior eficiência nessa faixa, com pico de absorção de aproximadamente 260 nm. A radiação em 253,7 nm, normalmente emitida por lâmpadas de mercúrio de baixa pressão (LPM),

é especialmente eficaz porque se aproxima bastante desse pico de absorção. Essas lâmpadas emitem cerca de 85% de sua energia nesse comprimento de onda, contribuindo para sua alta eficiência na inativação microbiana (AKWU et al., 2023; GREEN et al., 2020; MENEZES et al., 2020).

O principal dano causado pela luz UV-C é a formação de dímeros de pirimidina. Muitos microrganismos podem reparar esse dano por meio de dois mecanismos: (i) fotorreativação, que é dependente da luz e requer comprimentos de onda específicos entre 300 e 500 nm para completar o processo de reativação, e (ii) excisão de nucleotídeos (reparação no escuro), que é independente da luz e envolve múltiplas etapas para reverter a formação desses dímeros e os danos induzidos pelo UV-C (AKGÜN & ÜNLÜTÜRK, 2017; YIN et al., 2015).

Reconhecida como uma tecnologia de processamento não térmico (GABRIEL, 2015; GAYÁN et al., 2015), a radiação UV-C surgiu como uma alternativa promissora aos tratamentos térmicos, como a pasteurização, para a conservação de alimentos pela indústria. A Administração de Alimentos e Medicamentos (FDA) dos Estados Unidos (EUA) aprovou (1999-2001), seu uso no comprimento de onda de 254 nm como alternativa à pasteurização para a redução de patógenos humanos em sucos de frutas (CASCO et al., 2025; ISLAM et al., 2016a; ISLAM et al., 2016b; GOUMA et al., 2015a; GOUMA et al., 2015b). Seu objetivo principal é a inativação de microrganismos, sendo capaz de alcançar uma redução de 99,999% (equivalente a uma redução de 5 log) na concentração de *Escherichia coli* O157:H7, considerado o mais resistente e alvo específico das diretrizes de segurança da FDA (DIAS et al., 2017; ISLAM et al., 2016a).

Embora o comprimento de onda de 254 nm seja o mais comum e tradicionalmente estudado, novas fontes, como os diodos emissores de radiação UV-C (UV-LEDs), estão listadas na Tabela 1. Em comprimentos de onda próximos a 277 nm (266–280 nm), a luz UV-LED tem sido associada a uma inativação mais eficaz de patógenos alimentares em comparação com 253,7 nm em alguns estudos. Esse aumento na eficácia pode resultar de uma maior sobreposição do espectro de emissão com o espectro de ação antimicrobiana do organismo, de mecanismos adicionais de inativação ou de vantagens operacionais, como a ausência de mercúrio e o tamanho menor (CORSON et al., 2025; GREEN et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020; XIANG et al., 2020).

Tabela 1. Comparação entre dois tipos de emissores de UV-C: UV-LED e UV de mercúrio.

Tipo de Fonte	Comprimento de onda (nm)	Desempenho (UV-C de mercúrio a 254 nm)	Referência
LEDs (UV distante)/ Lâmpadas de excímero (KrCl*)	222	No suco de maçã, observou-se uma maior inativação da <i>E. coli</i> O157:H7 que nos comprimentos de onda 254 nm e 282 nm, com fluências semelhantes.	Yin et al. (2015)
LEDs	277	A taxa de inativação dos esporos de <i>P. expansum</i> em solução salina e na superfície das maçãs foi significativamente superior à observada a 253,7 nm.	Rios de Souza et al. (2020)
LEDs	279	Necessárias doses mais altas que 254 nm para inativar o vírus da hepatite A em solução salina e água de coco, possivelmente devido à degradação mais rápida das proteínas virais.	Corson et al. (2025)
LEDs (UV distante+)	282	Suco de maçã apresentou maior profundidade de penetração (0,074 cm) que a 222 nm ou a 254 nm.	Orlowska et al. (2015)

A transição tecnológica das lâmpadas de mercúrio de baixa pressão (LPM), fonte convencional e mais comum de radiação UV-C utilizada tanto em pesquisas científicas quanto em aplicações industriais para a descontaminação de alimentos e superfícies, para os diodos emissores de luz ultravioleta (UV-LEDs) na indústria alimentícia requer uma análise detalhada dos custos operacionais, da eficiência energética e da conformidade com as normas regulatórias internacionais (GREEN et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020; ORLOWSKA et al., 2015). Embora essas lâmpadas sejam fontes convencionais, os UV-LEDs, mesmo sendo uma tecnologia mais recente, surgiram como uma alternativa promissora, oferecendo benefícios econômicos de longo prazo e vantagem fundamental de não necessitar de período de aquecimento e alcance da máxima irradiância imediatamente, ao contrário das lâmpadas de mercúrio de baixa pressão, que podem levar até 30 minutos para se estabilizar (RIOS DE SOUZA et al., 2020; AKGUN & UNLUTURK, 2017; ORLOWSKA et al., 2015).

Além disso, as lâmpadas de mercúrio têm uma vida útil relativamente curta, variando de 4.000 a 10.000 horas, e são estruturalmente frágeis por serem feitas de vidro, o que representa um risco potencial de contaminação física e química em ambientes de processamento de alimentos (GREEN et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020; AKGUN & UNLUTURK, 2017). Em contrapartida, os LEDs UV podem operar por mais de 100.000 horas e são mais robustos e resistentes a impactos, permitindo o desenvolvimento de reatores mais compactos e flexíveis (XIANG et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020; AKGUN & UNLUTURK, 2017). Outra consideração importante é a presença de mercúrio nas lâmpadas convencionais, o que acarreta custos adicionais para o descarte adequado e riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente (GREEN et al., 2020; AKGUN & UNLUTURK, 2017). Os LEDs UV, por outro lado, são isentos de mercúrio, estão mais alinhados com as diretrizes de sustentabilidade e contribuem para reduzir os impactos ambientais (CORSON et al., 2025; KIM, LEE & YOON, 2021; RIOS DE SOUZA et al., 2020).

Ademais, fatores regulatórios e ambientais têm impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias de emissão de UV. A Convenção de Minamata sobre o Mercúrio (2020) estabelece diretrizes globais para reduzir o uso de mercúrio, incentivando a substituição de lâmpadas de mercúrio de baixa pressão (LPM) por tecnologias alternativas, como os LEDs UV (CORSON et al., 2025). Órgãos reguladores, incluindo a FDA e a Health Canada, exigiram dados robustos sobre a dose efetiva de radiação e a eficácia microbiológica de novos comprimentos de onda emitidos por LEDs, como 263 nm e 279 nm, antes de autorizar sua aplicação em escala industrial. Isso ressalta a importância de desenvolver e validar tecnologias mais seguras, eficientes e ambientalmente sustentáveis para o processamento de alimentos (CORSON et al., 2025; AKWU et al., 2023; ORLOWSKA et al., 2015).

As principais limitações da tecnologia UV-C estão relacionadas à baixa capacidade de penetração da radiação e ao efeito de sombreamento. No processamento de sucos, a turbidez, decorrente da presença de sólidos em suspensão, fibras e macromoléculas, constitui um dos principais fatores limitantes, uma vez que essas partículas absorvem e dispersam a radiação UV-C, reduzindo sua penetração e dificultando o alcance dos microrganismos presentes no líquido (CASCO et al., 2025; ; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; GOK, 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; MENEZES et al., 2019; GOUMA et al., 2015a). Em frutas, a eficácia da tecnologia pode ser comprometida pelo efeito de sombreamento,

ocasionado por microfissuras, poros, depressões e outras irregularidades topográficas da superfície, que favorecem o alojamento dos microrganismos em regiões protegidas da incidência direta da radiação UV-C (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; GRAÇA et al., 2020; GREEN et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020; ADHIKARI et al., 2015; GÁYAN et al., 2015). Como consequência, pode ocorrer o chamado efeito "cauda" nas curvas de inativação microbiana, caracterizado pela estabilização da redução microbiana mesmo diante do aumento da dose aplicada (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; GREEN et al., 2020). Além disso, a magnitude desses efeitos pode variar de acordo com o tipo de fruta e a topografia de sua superfície, resultando em diferentes níveis de eficácia do tratamento (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; KIM, LEE & YOON, 2021; ADHIKARI et al., 2015).

2.4.1. Uso de UV-C na sanitização de alimentos e outros produtos

A tecnologia UV-C é considerada vantajosa porque inativa uma ampla gama de microrganismos patogênicos (*Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella enterica* e *Listeria monocytogenes*) e causadores de deterioração (*Zygosaccharomyces bailii*, *Candida parapsilosis* e *Candida tropicalis*), com alterações mínimas na qualidade nutricional e sensorial dos alimentos (CASCO et al., 2025; GOUMA et al., 2015b; GAYÁN et al., 2015). No entanto, a eficácia dessa tecnologia é fortemente influenciada pelas características morfológicas da superfície da fruta (ADHIKARI et al., 2015; SYAMALADEVI et al., 2015). Superfícies lisas e menos hidrofóbicas, como as de maçãs e peras, resultam em taxas de inativação mais altas, enquanto superfícies mais ásperas e irregulares, como as de melões, morangos e framboesas, ou aquelas com rachaduras, cavidades ou tricomas, podem causar um efeito de sombreamento que protege os microrganismos da luz UV-C e requer doses mais altas para a inativação (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; RIOS DE SOUZA et al., 2020; ADHIKARI et al., 2015).

Em sucos de frutas, o uso da radiação UV-C tornou-se popular durante o processamento (GABRIEL & ANCOG, 2019). No entanto, a baixa profundidade de penetração da luz UV-C é o principal obstáculo à sua aplicação em líquidos (TIRONO, 2023; YIN et al., 2015). Sua eficácia é limitada pela turbidez do meio, que resulta da alta absorção de UV por componentes como sólidos em suspensão, fibras insolúveis, pigmentos, açúcares e ácidos orgânicos. Estratégias como o tratamento com película

finas são utilizadas para maximizar a área de superfície e diminuir a profundidade do produto (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; GOK, 2021; ORLOWSKA et al., 2015). Além de sua aplicação em alimentos líquidos, a radiação UV-C é amplamente utilizada para a desinfecção da água, incluindo águas residuais e soluções nutritivas hidropônicas (CASCO et al., 2025; TREMARIN, BRANDÃO & SILVA, 2017a). O UV-C também é aplicado na descontaminação de superfícies de ovos e mariscos e na descontaminação microbiológica de superfícies em geral (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2020).

As faixas de fluência da radiação UV-C variam significativamente dependendo do objetivo da pesquisa (inativação de patógenos ou fungos, ou degradação de micotoxinas) e da matriz alimentar utilizada (superfície da fruta ou sucos) (Tabela 2).

Tabela 2. Comparação dos alvos e da faixa de fluência aplicada

ALVO	FLUÊNCIA / DOSES APLICADA	ESTUDO (ANO)
<i>E. coli</i> O157:H7 e <i>L. monocytogenes</i> em superfícies de frutas	0 a 10.5 kJ/m ²	Adhikari et al. (2015)
<i>E. coli</i> (estirpes patogênicas e de substituição) em suco de maçã	0 a 5,14 kJ/m ² (a 254 nm)	Orlowska et al. (2015)
Polifenóis, vitaminas e microrganismos em suco de maçã	0 a 2,40 kJ/m ²	Islam et al. (2016a/b)
Maçãs Gala inteiras (qualidade e compostos fenólicos)	0 a 4.10 kJ/m ²	Dias et al. (2017)
Reações metabólicas em maçãs recém-cortadas	6, 12, e 24 kJ/m ²	Hasan et al. (2017)
Ascósporos de <i>N. fischeri</i> no suco de maçã	0 a 120 kJ/m ²	Menezes et al. (2019)
Ascósporos em suco clarificado de maçã	7.2 a 21.5 J/mL	Sauceda-Gálvez et al. (2019)
Leveduras em fatias de maçã	2.5 a 10 kJ/m ²	Graça et al. (2020)
<i>E. coli</i> e <i>Listeria monocytogenes</i> na casca da maçã e alface	0 a 10 kJ/m ²	Green et al. (2020)
<i>E. coli</i> e <i>A. niger</i> em maçãs (Processo Oxidativo Avançado)	11.7 a 62.3 kJ/m ²	Ho et al. (2020)
<i>A. fischeri</i> e <i>P. niveus</i> no suco de maçã	Até 25 kJ/m ²	Menezes et al. (2020)
Esporos bacterianos em suco de maçã turvo	25 a 125 J/mL	Sauceda-Gálvez (2021)
<i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i> e <i>Listeria monocytogenes</i> na casca e no suco	Casca: Até 106,66 kJ/m ² ; Suco: Até 36,44 kJ/m ²	Nicolau-Lapeña et al. (2022)
Inativação microbiana e vitaminas em suco opaco	0 a 1,60 kJ/m ²	Akwu et al. (2023)
Patulina em maçãs e sucos	Superfície: 8.8 a 35.1 kJ/m ² ; Suco: Até 450.6 kJ/m ²	Nicolau-Lapeña et al. (2023)
Estratégia combinada em suco de maçã	12,71 kJ/m ² (fixa)	Casco et al. (2025)
Vírus da hepatite A em suco e água de coco	Até ~0,0514 kJ/m ² (suco)	Corson et al. (2025)

A viabilidade da aplicação da radiação UV-C em escala industrial tem sido amplamente discutida na literatura, com foco principal em sua eficácia microbiológica, nos desafios relacionados às propriedades ópticas dos produtos e em seu potencial para operação de baixo custo (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; GOUMA et al., 2015a; GOUMA et al., 2015b).

No que diz respeito à viabilidade industrial e aos desafios técnicos, o UV-C é aprovado pela FDA para inativação de microrganismos em sucos, exigindo uma redução de 5 log em patógenos (GOK, 2021; ISLAM, 2016b; GOUMA, 2015a). Devido o obstáculo físico da turbidez em sucos, no caso do suco de maçã, 90% da absorção da radiação ocorre nos primeiros 0,67 mm (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023). Para resolver isso, a indústria utiliza reatores de película fina, nos quais o suco passa por camadas finas, ou sistemas que induzem turbulência (tecnologia Dean vortex), garantindo que todos os componentes do líquido sejam expostos à lâmpada (GOK, 2021; GOUMA et al., 2015a). Em termos de viabilidade industrial, também é considerada a utilização de calor moderado (45–60 °C), ultrassom ou aditivos (como DMDC - Dicarbonato de dimetila - ou natamicina) (CASCO et al., 2025; GABRIEL, 2015).

Por meio dessa sinergia de tecnologias, os padrões de segurança exigidos são atendidos com doses mais baixas e tempos de processamento mais curtos, evitando assim danos sensoriais ao produto (GOUMA et al., 2015a; GOUMA et al., 2015b). Ao analisar o consumo de energia, a eficiência energética é reconhecida como uma vantagem competitiva da radiação UV-C. Estudos recentes relatam que o consumo de energia dessa tecnologia pode ser de apenas 6% a 8% do consumo de tratamentos convencionais, como métodos térmicos, ôhmicos, de micro-ondas ou de alta pressão (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023). A transição para os UV-LEDs oferece viabilidade ainda maior, pois são mais eficientes em termos energéticos, livres de mercúrio, capazes de ligar e desligar instantaneamente e podem operar à temperatura ambiente, reduzindo os custos operacionais e de manutenção (RIOS DE SOUZA et al., 2020; XIANG et al., 2020). Além das vantagens econômicas e de mercado, juntamente com o baixo consumo de energia, a viabilidade industrial do UV-C é sustentada por seu baixo investimento inicial em comparação com tecnologias como a Alta Pressão Hidrostática (HHP); o UV-C requer um investimento menor, tornando-o acessível a processadores de pequena escala (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022). Além disso, os líquidos tratados com UV-C retêm melhor seu sabor, cor e teor de

vitaminas (como a vitamina C) do que os sucos pasteurizados termicamente, aumentando assim seu valor agregado (YANG et al., 2019).

2.4.2. Legislação e regulamentação do uso da tecnologia UV-C

No Brasil não há uma regulamentação brasileira específica que trate de forma exclusiva ou direta do uso de radiação UV-C em alimentos (ADHIKARI et al., 2015), a regulamentação vigente (RDC nº 21, de 26 de janeiro de 2001, da ANVISA) aprova o uso de radiações ionizantes, que não é o caso da UV-C (radiação não ionizante), sendo assim os estudos são baseados nas regulamentações preconizadas pela FDA (EUA). As regulamentações atuais sobre o uso de UV-C tratam da aprovação dessa tecnologia nos Estados Unidos (FDA) e na União Europeia. Em resposta aos surtos de doenças relacionadas a sucos, a Administração de Alimentos e Medicamentos dos EUA (FDA) ratificou o Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle para Sucos (*Juice* HACCP) e estabeleceu uma exigência de redução logarítmica de microrganismos resistentes, determinando que os sucos passem por etapas de processamento capazes de reduzir a população de um patógeno-alvo em pelo menos 5 ciclos logarítmicos (GABRIEL e ANCOG, 2019; GABRIEL, 2015; GÁYAN et al., 2015; GOUMA et al., 2015a; GOUMA et al., 2015b).

A FDA dos EUA aprovou o uso de luz UV-C, especificamente no comprimento de onda de 254 nm, para a redução microbiana em alimentos e sucos como alternativa à pasteurização térmica, a fim de reduzir patógenos humanos e outros microrganismos em sucos de frutas (CORSON et al., 2025; CHEN et al., 2016; ADHIKARI et al., 2015; YIN et al., 2015). A regulamentação que rege sua aplicação, 21 CFR Parte 179.39, refere-se à “radiação ultravioleta para processamento e tratamento de alimentos” (AKWU et al., 2023; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; GOMÉZ et al., 2015; SYAMALADEVI et al., 2015).

Desde 1999, a União Europeia adotou a Diretiva 1999/2/CE, que harmoniza a legislação entre seus países membros no que diz respeito ao tratamento de alimentos e ingredientes alimentares utilizando exclusivamente radiação ionizante. A diretiva visa reduzir o risco de doenças e deterioração dos alimentos causados por microrganismos patogênicos ou contaminantes, diminuir as perdas alimentares decorrentes de alterações fisiológicas e preservar a qualidade dos produtos vegetais. A Comunidade Europeia define fontes de radiação ionizante como aquelas que

emitem raios gama (^{60}Co e ^{137}Cs), raios X e elétrons, aplicadas aos alimentos a uma dose média global inferior a 10 kGy (Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, 1999).

De acordo com a legislação atual, o uso de radiação não ionizante, como a luz UV-C, não é explicitamente abordado nas leis europeias que visam a redução de microrganismos contaminantes nos alimentos. No entanto, o Regulamento de Execução (UE) 2017/2470 restringe o uso da radiação UV-C ao aumento da vitamina D em cogumelos (*Agaricus bisporus*), pão, fermento de pão (*Saccharomyces cerevisiae*) e leite, designando-os como novos alimentos após a aplicação dessa tecnologia (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022).

Este contexto regulatório destaca uma lacuna significativa na legislação europeia no que diz respeito ao uso da radiação UV-C não ionizante para a descontaminação de alimentos. Ao contrário dos Estados Unidos, que reconhecem a radiação UV-C como uma alternativa de processamento não térmico, a legislação europeia ainda não estabeleceu diretrizes específicas para aplicações relacionadas à segurança dos alimentos (TCHONKOUANG et al., 2023). Essa abordagem mais cautelosa deve-se, em parte, à filosofia regulatória da União Europeia, que enfatiza a avaliação de riscos e a precaução ao avaliar novas tecnologias de processamento de alimentos (SMEDT; VOS, 2022). Consequentemente, os tratamentos com radiação UV-C exigem aprovação caso a caso, particularmente quando podem afetar a composição dos alimentos ou gerar subprodutos químicos (SMEDT; VOS, 2022).

Internacionalmente, diferentes estruturas regulatórias podem afetar a aquisição e a comercialização da radiação UV-C. A harmonização das diretrizes de segurança dos alimentos desempenha um papel importante na facilitação do comércio exterior e na garantia de proteção consistente ao consumidor em todas as regiões (KEENER & KOUTCHMA, 2022). Nesse contexto, o *Codex Alimentarius*, estabelecido pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura e pela Organização Mundial da Saúde, fornece um conjunto de normas internacionalmente reconhecidas para a segurança dos alimentos e práticas de processamento (Fortin, 2023). Embora o *Codex Alimentarius* se concentre no controle de perigos, na higiene e na análise de riscos, ele contribui para o alinhamento regulatório global e pode servir de base para futuras discussões sobre a implementação segura de tecnologias emergentes de processamento de alimentos, como a radiação UV-C (FORTIN, 2023).

2.4.3. Radiação UV-C em maçãs e subprodutos

2.4.3.1. Radiação UV-C versus maçãs frescas

Os principais agentes microbianos responsáveis pela deterioração pós-colheita das maçãs frescas são *P. expansum* e *Botrytis cinerea*, ambos conhecidos por seu impacto considerável na qualidade de armazenamento e comercial da fruta. *P. expansum* causa o mofo azul, resultando em grave degradação dos tecidos, senescência acelerada e perda de firmeza. Além das perdas físicas e econômicas, a produção da micotoxina patulina representa um grande risco à segurança dos alimentos e tem sido associada a incidentes de contaminação em várias cadeias de produção em todo o mundo (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; RIOS DE SOUZA et al., 2020).

O *B. cinerea*, causador do mofo cinza, é mais comum durante o armazenamento prolongado e contribui para o apodrecimento secundário. Os principais métodos para o controle desses microrganismos incluem tecnologias não térmicas e o controle químico com higienizantes e fungicidas (LUCIANO-ROSARIO et al., 2025; ADHIKARI et al., 2015; KONSTANTINO et al., 2011).

O hipoclorito de sódio é amplamente reconhecido e comumente utilizado como higienizante aquoso para a desinfecção de produtos frescos, tornando-se o método mais frequente para a lavagem em escala industrial. Sua aplicação frequentemente envolve a cloração da água em tanques de descarga, uma prática documentada na indústria de processamento de maçãs (GREEN et al., 2020; ADHIKARI et al., 2015). O hipoclorito rompe as membranas citoplasmáticas microbianas, inibe irreversivelmente as enzimas e desnatura as proteínas. No entanto, sua eficácia é limitada contra altas cargas microbianas, e seu uso gera grandes volumes de águas residuais que requerem tratamento (LUCIANO-ROSARIO et al., 2025).

Para desenvolver alternativas aos desinfetantes à base de cloro, alguns estudos investigaram métodos emergentes para a higienização de maçãs utilizando luz UV-C de diferentes fontes, com níveis variáveis de fluência e tempos de exposição (PHONYIAM et al., 2021; DIAS et al., 2017; ADHIKARI et al., 2015; PATARO, DONSI e FERRARI, 2015).

O principal mecanismo de inativação microbiana por UV-C na casca da maçã é o dano fotoquímico direto ao DNA, resultando na formação de dímeros de pirimidina que impedem a replicação celular (SAUCEDA-GÁLVEZ, 2021; GABRIEL & ANCOG

et al., 2019; SAUCEDA-GÁLVEZ, 2019). A eficácia dessa tecnologia depende muito da morfologia da superfície; como as maçãs têm cascas relativamente lisas e menos hidrofóbicas, elas permitem uma interação mais direta entre a radiação e os microrganismos (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; CORREA et al., 2020). Em frutos inteiros, baixas doses de UV-C podem induzir uma resposta biológica (hormese), estimulando a biossíntese de metabólitos secundários e enzimas de defesa que auxiliam na preservação pós-colheita (DIAS et al., 2017; TREMARIN, BRANDÃO, & SILVA, 2017; PATARO, DONSI & FERRARI, 2015).

Phonyiam et al. (2021) testaram o efeito antimicrobiano da luz UV-C em maçãs inoculadas artificialmente com *Colletotrichum gloeosporioides*, fungo causador de podridão pós-colheita. O experimento incluiu três lotes de maçãs (n = 60): o primeiro lote foi exposto a uma fluência de 3 kJ/m² a uma distância de 25 cm da fonte de UV-C antes da inoculação, o segundo lote foi exposto aos mesmos parâmetros de radiação após a inoculação e o terceiro lote não foi irradiado (controle). Todos os lotes foram armazenados por 16 dias a 25 °C. A exposição à radiação UV-C reduziu significativamente o diâmetro das lesões causadas por *C. gloeosporioides* (controle: 5,04 ± 0,08 cm; pré-inoculação: 4,51 ± 0,15 cm; pós-inoculação: 4,49 ± 0,11 cm), independentemente do momento da exposição, em comparação com o grupo controle. No entanto, o tratamento com UV-C antes da inoculação foi mais eficaz na supressão desse microrganismo.

Adhikari et al. (2015) observaram reduções na contaminação superficial de maçãs por *E. coli* O157:H7 (2,9 log UFC/g) e *L. monocytogenes* (1,6 log UFC/g) após a aplicação de 0,92 kJ/m² de UV-C, corroborando o potencial dessa tecnologia para o controle de patógenos.

Além do efeito antimicrobiano, Dias et al. (2017) observaram melhorias na atividade antioxidante e no teor de compostos fenólicos, bem como a manutenção da firmeza, do pH, do teor de sólidos solúveis (SST), da acidez titulável (ATT) e da relação SST/ATT, concluindo que a radiação UV-C exerceu um efeito adicional na manutenção da qualidade físico-química da fruta. Pataro, Donsi e Ferrari (2015) aplicaram luz UV-C a uma distância de 30 cm da fonte com fluências de 2 J/cm² (1 hora de exposição) e 4 J/cm² (2 horas de exposição) em ambos os lados da fruta, utilizando luz pulsada. Após 28 dias de armazenamento, eles não observaram alterações notáveis na cor das frutas irradiadas, mas aumentos nos sólidos solúveis, na atividade antioxidante e nos compostos fenólicos totais, indicando efeitos positivos

na composição nutricional.

A patulina, um metabólito fúngico secundário classificado como micotoxina, é produzida principalmente por fungos como *P. expansum*, bem como pelas espécies *Aspergillus* e *Byssochlamys*. Ela pode causar toxicidade aguda e subaguda, bem como sintomas crônicos, incluindo imunotoxicidade, hepatotoxicidade e problemas gastrointestinais e neurológicos (Rios de Souza et al., 2020). Devido aos seus efeitos potencialmente nocivos e à resistência à maioria dos tratamentos físicos e químicos, a presença de patulina nos alimentos é regulamentada por lei, com o limite máximo estabelecido pela *Food and Drug Administration* (FDA) dos EUA e pela Administração de Alimentos e Medicamentos da China em 50 µg/kg para sucos de frutas (FAO, 2025; NICOLAU- LAPEÑA et al., 2023).

Nicolau-Lapeña et al. (2023) demonstraram que a aplicação de duas fluências distintas (UV1: 8,8 kJ/m² e UV2: 35,1 kJ/m²) reduziu eficazmente a patulina, uma micotoxina de grande relevância associada a surtos decorrentes da contaminação de maçãs e seus derivados, produzida por *P. expansum* (CMP-1). Reduções de 2,7 log UFC/g (UV1) e 99,9% da micotoxina (UV2) destacam a importância desta tecnologia no combate aos riscos toxigênicos.

Em geral, os resultados indicam que a radiação UV-C aplicada às maçãs frescas pode reduzir a deterioração e os microrganismos patogênicos, mantendo simultaneamente a estabilidade microbiológica durante o armazenamento. Esta é uma vantagem em relação ao cloro, cuja eficácia é frequentemente reduzida pela presença de matéria orgânica (HO et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020).

2.4.3.2. Radiação UV-C X maçã minimamente processada (*freshcut*)

A produção de alimentos minimamente processados é impulsionada pela procura dos consumidores por produtos com características de frescura e maior retenção de nutrientes, em contraste com a pasteurização térmica, que pode degradar as propriedades sensoriais e nutricionais (AKWU et al., 2023; TIRONO, 2023; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; YIN et al., 2015). O principal desafio durante o processamento e armazenamento destes produtos é garantir a segurança microbiológica e prevenir o escurecimento enzimático causado pelas etapas de corte no processamento mínimo (CORRÊA et al., 2020). Estudos sobre maçãs minimamente processadas tratadas com radiação UV-C demonstraram efeitos significativos na qualidade físico-química e na redução microbiológica (CHEN et al.,

2016). Kim, Lee e Yoon (2021) descobriram que um tratamento combinado (UV-C + água eletrolisada ligeiramente ácida (SAEW) + ácido fumárico (FA)) durante 3 minutos a 10 °C e 15 °C por 7 dias aumentou a luminosidade (parâmetro L^*) e a cor vermelha (parâmetro a^*) dos frutos. Do ponto de vista microbiológico, este tratamento também foi eficaz contra estirpes de *L. monocytogenes* inoculadas na superfície das amostras, resultando num efeito de desinfecção superior (redução de 0,51 a 2,63 log UFC/g) do que o tratamento apenas com SAEW ou o tratamento combinado parcial (SAEW mais FA), que alcançou reduções entre 0,31 e 2,17 log UFC/g. Os autores escolheram uma tecnologia de barreira (UV-C + água eletrolisada ligeiramente ácida + ácido fumárico) porque estudos anteriores (Guo et al., 2021; Hussain, Tango e Oh, 2019; Ngnitcho et al., 2017) relataram um efeito sinérgico para a redução microbiana superior ao tratamento apenas com água eletrolisada.

Chen et al. (2017) utilizaram um tratamento combinado de UV-C e água eletrolisada a 10 °C durante 14 dias e demonstraram que, durante o armazenamento de maçãs minimamente processadas, a *Salmonella enteritidis* permaneceu estável nas amostras tratadas, enquanto as amostras controle apresentaram um aumento de até 5 log UFC/g. No que diz respeito à qualidade físico-química, este tratamento combinado não comprometeu a cor, a firmeza ou o sabor das maçãs recém-cortadas, embora tenha causado uma ligeira deterioração nos atributos sensoriais do sabor (CHEN et al., 2017).

Graça et al. (2020), utilizando o mesmo tratamento combinado de UV-C + água eletrolisada a 4 °C durante 9 dias, verificaram que, apesar das reduções em leveduras como *Candida sake*, *Hanseniaspora uvarum*, *Pichia fermentans* e *Metschnikowia pulcherrima* (10^7 UFC/mL), o prazo de validade das amostras não foi prolongado. Isto indica limitações do método para o tratamento com UV-C e água eletrolisada em maçãs minimamente processadas. A água eletrolisada, frequentemente utilizada com UV-C, é um desinfetante ecológico produzido pela eletrólise de soluções salinas, como o cloreto de sódio, que passam por uma célula eletrolítica. Este processo gera uma mistura de substâncias antimicrobianas potentes. Embora o seu mecanismo de ação ainda não seja totalmente compreendido, sabe-se que está relacionado com o seu potencial oxidativo (GRAÇA et al., 2020). A atividade biocida dos raios UV-C e da água eletrolisada ocorre através da oxidação de componentes celulares, incluindo proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, ao romper a parede celular e a membrana, o que leva à perda de constituintes intracelulares (KIM, LEE, and YOON, 2021).

Green et al. (2020) também relataram reduções satisfatórias de *L. Monocytogenes* ($1,18 \pm 0,59$ log UFC/g (LPM) e $1,35 \pm 0,58$ log UFC/g (UV-C LED)) e *E. coli* O157:H7 ($1,5$ log CFU/g (LPM)) em maçãs minimamente processadas tratadas com radiação UV-C. Foram utilizadas duas fontes diferentes de UV-C: (i) lâmpadas de mercúrio (fluência de $8,55$ mW/cm² a 10 cm da fonte emissora) e (ii) LEDs (fluências de $2,33$ mW/cm² e $2,41$ mW/cm² a 25 °C e 4 °C, respectivamente, ambas a $14,4$ cm da fonte emissora), reforçando a eficácia desta tecnologia contra microrganismos patogênicos, independentemente da fonte de luz UV-C.

O escurecimento enzimático é um fator crítico em alimentos minimamente processados, uma vez que afeta diretamente a sua qualidade visual, sensorial e comercial. Este processo envolve a degradação natural dos alimentos processados por enzimas como a polifenol oxidase, que, quando em contato com compostos fenólicos e exposta ao oxigênio, acelera o escurecimento à medida que a enzima e o substrato interagem após o corte (YUAN et al., 2022). De acordo com estes autores, a aplicação de UV-C antes e após o processamento durante 5 minutos contribuiu positivamente para a qualidade visual e funcional das maçãs minimamente processadas. Neste estudo, após 14 dias de armazenamento a 4 °C, as amostras irradiadas apresentaram taxas de escurecimento enzimático significativamente mais baixas e sistemas antioxidantes melhorados em comparação com as amostras controle.

2.4.3.3. Radiação UV-C X suco de maçã

A aplicação de radiação UV-C ao suco de maçã revelou-se uma alternativa promissora para o controle microbiológico e a preservação da qualidade (CASCO et al., 2025). A distribuição uniforme da fluência nos sucos é um dos principais desafios técnicos na aplicação da radiação UV-C, devido às propriedades óticas da matriz. O suco de maçã, por exemplo, é considerado um meio altamente opaco à radiação UV-C, com taxas de transmissão que podem ser inferiores a $0,01\%$. Os compostos presentes no suco, tais como a vitamina C e polifenóis, absorvem fortemente os fótons, limitando a penetração da luz a camadas muito superficiais, frequentemente da ordem dos milímetros – aproximadamente $0,67$ mm para atingir 90% de absorção (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; GABRIEL, 2015; ORLOWSKA et al., 2015). Dada esta limitação, é essencial utilizar sistemas que promovam uma maior homogeneização do fluido, tais como regimes de fluxo

turbulento ou a geração de vórtices de Dean, que facilitam o movimento de partículas de regiões menos expostas para áreas próximas da fonte de radiação, aumentando assim a probabilidade de que toda a carga microbiana seja efetivamente exposta à fluência necessária para a inativação. (GOK, 2021; GABRIEL, 2015).

Gabriel (2015) combinou radiação UV-C (15 W a uma distância de 36 cm da fonte) com ultrassons (frequências alternando entre 28, 45 e 100 kHz em intervalos de 1 ms) e observou um intervalo de tempo mais curto (51,5 min: US + UV-C) para uma redução de 5 log UFC/mL de isolados de *E. coli* O157:H7 em amostras de suco de maçã, em comparação com o ultrassom isoladamente (77,5 min: US), demonstrando um efeito sinérgico entre as tecnologias.

Resultados consistentes para a redução de microrganismos em sucos após a aplicação de UV-C foram também relatados por Tremarin, Brandão e Silva (2017) ao avaliar amostras de suco inoculadas com esporos de *A. acidoterrestris*. Utilizando fluências de 11,50 e 13,44 W/m² durante 8 minutos, observaram-se reduções de até 5 ciclos logarítmicos nas amostras de suco, enquanto uma fluência mais baixa (0,34 W/m²) alcançou um efeito semelhante após 25 minutos de exposição. Isto indica que a eficácia do tratamento depende da intensidade e da duração da exposição à radiação. Yang et al. (2019), também em suco de maçã, relataram reduções de bactérias (2 log UFC/ml) e fungos e leveduras (1 log UFC/ml) como um aumento dos níveis de sólidos solúveis e de acidez total em amostras submetidas à radiação UV-C e subsequentemente armazenados a 4°C durante 35 dias.

O debate entre sistemas de processamento contínuo e em lote para o tratamento com radiação UV-C é fundamental para a transição da investigação laboratorial para a viabilidade industrial, especialmente no que diz respeito a sucos de fruta e às superfícies de produtos frescos.

Os sistemas contínuos são concebidos para processar grandes volumes e constituem a base da viabilidade comercial da tecnologia UV-C. Os seus reatores podem ser do tipo de película fina – reatores anulares sequenciais onde o fluido passa por uma fenda muito estreita (2 a 3 mm) para encurtar a distância que a luz deve percorrer – ou reatores do tipo *Dean Vortex*, que utilizam a geometria helicoidal do tubo para criar vórtices secundários que promovem uma mistura ideal do fluido, garantindo que mesmo as partículas em fluidos opacos sejam atraídas para perto da fonte de luz (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022; GOK, 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2020; GOUMA et al., 2015a ; GOUMA et al., 2015b).

Estima-se que o consumo de energia nos sistemas contínuos de UV-C represente apenas 39% da energia utilizada na pasteurização térmica convencional, sendo este modelo de tratamento ideal para garantir que todas as partes do produto recebam uma dose equivalente de radiação (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021).

Os sistemas em lote são frequentemente utilizados em estudos laboratoriais para estabelecer parâmetros fundamentais de inativação. As suas principais características e vantagens incluem: i) precisão na dosagem, em que equipamentos como o feixe colimado administram doses de UV-C altamente precisas, garantindo que a amostra esteja bem misturada e que fatores como a divergência e a reflexão sejam quantificados; e ii) controle experimental, o que facilita o estudo da cinética de inativação de microrganismos específicos e a degradação de toxinas em condições controladas (AKWU et al., 2023; NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; HASAN et al., 2017; ISLAM et al., 2016b).

De um modo geral, os estudos disponíveis mostram que a radiação UV-C, utilizada isoladamente ou combinada com outras tecnologias, tem um potencial significativo para inativar microrganismos e manter a qualidade do suco de maçã. No entanto, a sua eficácia depende da fluência aplicada, do tempo de exposição, das condições de armazenamento e das características do suco, tais como a turbidez e a opacidade, que podem reduzir a eficiência da radiação e exigir ajustes de fluência ou estratégias complementares (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; GÁYAN et al., 2015; GOUMA et al., 2015). Por conseguinte, a investigação sobre a combinação de UV-C com outras abordagens emergentes é especialmente relevante, um tema abordado na seção UV-C associada a outras tecnologias.

2.4.4. UV-C e super-irradiação

A irradiação excessiva pode ter efeitos nocivos tanto na estrutura física como na composição química dos alimentos; pode romper as membranas celulares, promover a desidratação progressiva e agravar a perda de massa, resultando na perda da compartimentação funcional, no aumento do contato entre enzimas e substratos e na aceleração das reações de oxidação (CHEN et al., 2016; GOMÉZ et al., 2015). A intensidades muito elevadas (por exemplo, 100–125 mW/cm²), o efeito térmico associado à radiação pode degradar substâncias naturais, resultando num escurecimento imediato (TIRONO, 2023).

Os efeitos sensoriais da irradiação UV-C dependem da matriz alimentar e da

dose aplicada. No que diz respeito à cor e à aparência, o principal sinal de sobre exposição em maçãs minimamente processadas é o aumento do escurecimento da superfície. Estudos indicam que doses baixas ou moderadas, como 3 kJ/m², podem não causar alterações imediatas na cor; no entanto, doses mais elevadas podem levar a um escurecimento perceptível durante o armazenamento (GOMÉZ et al., 2015; SYAMALADEVI et al., 2015). No caso do suco de maçã, a aplicação de doses excessivas de radiação, especialmente aquelas acima de 100 J/mL em sistemas de recirculação, está associada a um aumento do escurecimento e da turbidez (SAUCEDA-GÁLVEZ, 2021).

Por outro lado, no que diz respeito à firmeza do produto, estudos indicam que este parâmetro geralmente não é afetado negativamente pela radiação UV-C em comparação com o tratamento controle, representando uma vantagem em relação aos processos térmicos convencionais, que podem causar maior degradação da textura (SHIN et al., 2024; DIAS et al., 2017; CHEN et al., 2016). Gok et al. (2021) afirmam que os sucos tratados com doses elevadas de UV-C não apresentaram alterações significativas nas pontuações relativas à aparência, cor, odor e sabor entre painéis sensoriais treinados, indicando que estes atributos foram preservados.

2.4.5 UV-C associada a outras tecnologias

A combinação da radiação UV-C com outras tecnologias emergentes (tecnologia de barreira) tem sido estudada como uma alternativa para potenciar os efeitos microbiológicos, preservando simultaneamente as características sensoriais e nutricionais dos produtos à base de maçã (Figura 7 e Tabela 3). Esta abordagem demonstra que a combinação de métodos produz frequentemente um efeito sinérgico ou aditivo que é superior aos tratamentos individuais, tanto em termos de segurança dos alimentos como de qualidade (CASCO et al., 2025; KIM, LEE & YOON, 2021).

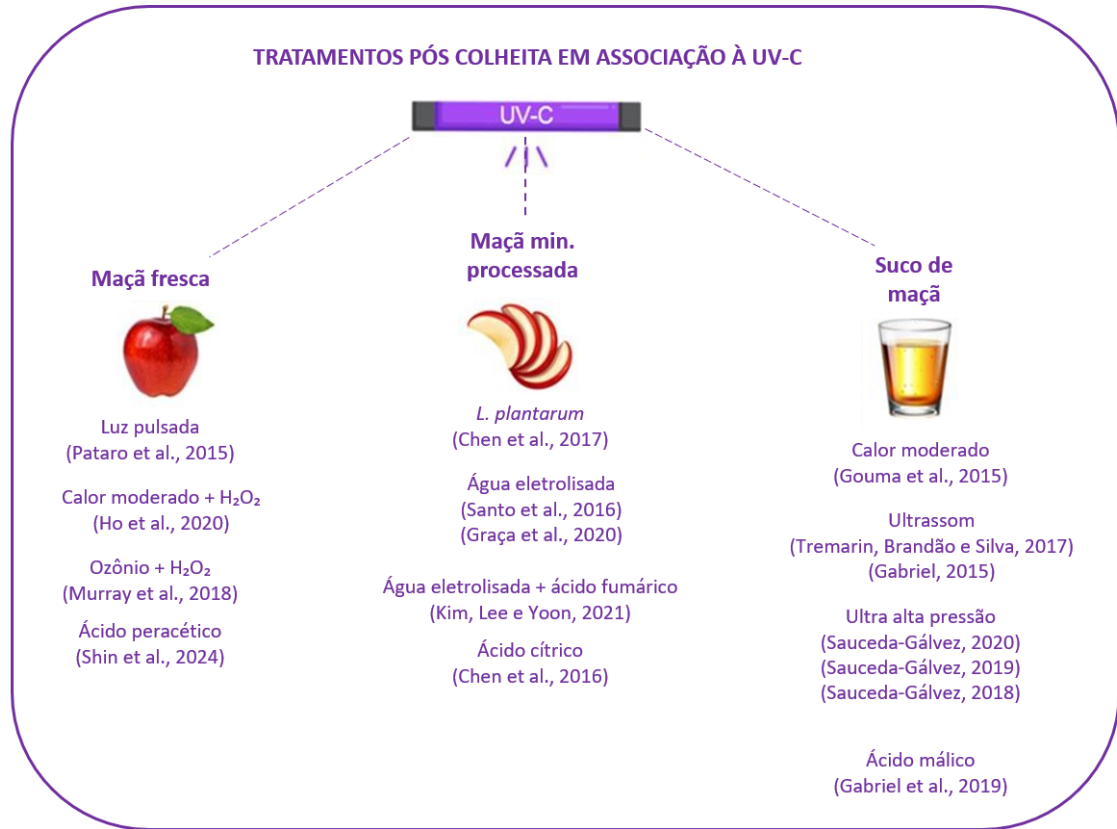


Figura 7. Combinação de UV-C com outras tecnologias em maçãs frescas, maçãs minimamente processadas e suco de maçã.

Tabela 3. Combinação de UV-C com outras tecnologias em produtos de maçã.

PRODUTO	ASSOCIAÇÃO DE TECNOLOGIAS	PRINCIPAIS RESULTADOS	REFERÊNCIA
Maçã fresca	UV-C + Luz Pulsada	Aumento antioxidantes; manutenção da qualidade	Pataro et al. (2015)
	UV-C + Ozônio	Redução <i>L. Monocytogenes</i> (2,12 a 3,07 log UFC/g)	Murray et al. (2018)
	UV-C + Calor	Degradação de inseticidas	Ho et al. (2020)
	UV-C + Ácido peracético	Inativação de patógenos (<i>E. coli</i> and <i>L. monocytogenes</i>); manutenção da firmeza	Shin et al. (2024)
Maçã minimamente processada	UV-C + Cálcio + Ácido ascórbico + Cloreto de cálcio	Redução microbiana (mesófilos: 1 e 2 log UFC/g), fungos e leveduras (2,0 a 2,5 log UFC/g); provocou escurecimento	Gómez et al. (2015)
	UV-C + Ácido cítrico	Redução do escurecimento; manutenção da textura	Chen et al. (2016)
	UV-C + Água eletrolisada	Redução <i>Cronobacter sakazakii</i> (1,7 a 2,2 log UFC/g)	Santo et al. (2016)
	UV-C + <i>L. plantarum</i>	Redução de <i>Salmonella enteritidis</i> (2,67 log UFC/g); manutenção da qualidade	Chen et al. (2017)
	UV-C + Luz pulsada	Alterou o sabor	Hasan et al. (2017)
	UV-C + Água eletrolisada	Inativou enzimas; reduziu escurecimento	Graça et al. (2020)
	UV-C + água eletrolisada + Ácido fumárico	Redução de <i>L. monocytogenes</i> (2,41 log UFC/g), e <i>S. Aureus</i> (1,48 log UFC/g)	Kim, Lee & Yoon (2021)

Suco de maçã	UV-C + Calor	Redução expressiva de <i>L. Monocytogenes</i> (5,63 log UFC/ml)	Gayán et al. (2015)
	UV-C + Ácido málico + Calor	Inativação sinérgica de <i>L. monocytogenes</i>	Gabriel et al. (2019)
	UV-C + Calor + DMDC	Redução de <i>E. Coli</i> (5 log UFC/ml); economia de tempo	Gouma et al. (2015)
	UV-C + Ultra alta pressão	Redução de <i>A. acidoterrestris</i> spores (5,5 log UFC/ml); alta retenção de nutrientes	Sauceda-Gálvez et al. (2020)
	UV-C + Ultrassom	Inativação sinérgica de <i>E. coli</i>	Gabriel, A. A. (2015)
	UV-C + Calor (60°C)	Redução de 89% no tempo de processamento	Gouma et al. (2015)
	UV-C + Calor moderado	Redução de <i>S. Cerevisiae</i> (5 log UFC/ml); economia de tempo.	Gouma et al. (2015)
	UV-C + Ultra alta pressão	Aumento de polifenóis; alteração de sabor	Sauceda-Gálvez et al. (2021)
	UV-C + Calor (40°C)	Enriquecimento de compostos bioativos.	Yikmis et al. (2021)
	UV-C + Ultrassom	Redução de <i>Alicyclobacillus acidoterrestris</i> (5 log UFC/ml)	Tremarin, Brandão e Silva (2017)
Suco de maçã	UV-C + Calor + Natamicina	Inativação completa; aumento de antioxidantes.	Casco et al. (2025)
	UV-C + Ultra alta pressão	Redução <i>Talaromyces macrosporus</i> (3,6 log UFC/ml); aumento de antioxidantes.	Sauceda-Gálvez et al. (2019)

Estudos reforçam o potencial das tecnologias baseadas na radiação UV-C e nos processos de oxidação avançada como alternativas promissoras aos métodos convencionais de descontaminação de maçãs, destacando a sua ação antimicrobiana e a preservação da qualidade sensorial (SHIN et al., 2024; HO et al., 2020; MURRAY et al., 2018; PATARO et al., 2015).

Pataro, Donsi e Ferrari (2015) demonstraram que a aplicação pós-colheita de UV-C (2–4 J/cm²) e luz pulsada nas maçãs estimulou a síntese de compostos bioativos, aumentando o teor fenólico e a atividade antioxidante sem alterar o pH, a acidez titulável ou a cor da fruta durante o armazenamento. Estes resultados indicam um efeito hormético da radiação UV-C, em que doses moderadas induzem respostas metabólicas benéficas nas frutas.

A tecnologia de luz pulsada é uma forma de radiação que induz stress nos tecidos vegetais, estimulando a biossíntese de metabólitos de defesa secundária com atividade antimicrobiana e antioxidante. Ao ativar estas defesas, a sua combinação com UV-C constitui um método eficaz para prolongar a frescura do produto e preservar ou mesmo aumentar o teor e a atividade dos compostos antioxidantes, prolongando assim o prazo de validade e melhorando o valor nutricional (PATARO, DONSI e FERRARI, 2015).

Estudos mostram que a resposta dos antioxidantes varia significativamente entre as matrizes, dependendo da dose aplicada e do tempo de armazenamento. Em frutas inteiras ou minimamente processadas, a radiação UV-C atua frequentemente como um fator de estresse que estimula a síntese de antioxidantes (efeito hormético), aumentando o teor fenólico total e a atividade antioxidante por até 90 dias de armazenamento refrigerado (DIAS et al., 2017). Outro estudo sobre a variedade Annurca demonstrou que a radiação UV-C aumentou os níveis de compostos fenólicos na casca, observando-se um efeito localizado, uma vez que o aumento se restringe geralmente à camada superficial (casca), com pouca ou nenhuma alteração detectada na polpa da fruta fresca (PATARO, DONSI & FERRARI, 2015).

No suco de maçã, a aplicação de radiação UV-C promove geralmente a degradação ou a retenção de compostos bioativos. Vários estudos relatam reduções significativas em polifenóis-chave, tais como o ácido clorogênico e a epicatequina, especialmente a doses de radiação mais elevadas (AKWU et al., 2023; ISLAM et al., 2016a; ISLAM et al., 2016b). Da mesma forma, a utilização de LEDs UV-C tem sido

associada a uma diminuição da atividade antioxidante e do teor fenólico total, demonstrando uma resposta dependente da dose (XIANG et al., 2020).

No entanto, quando são utilizadas doses comercialmente relevantes, como aproximadamente 40 mJ/cm², o teor fenólico total tende a manter-se praticamente inalterado, sem alterações significativas (ISLAM et al., 2016a; ISLAM et al., 2016b).

Além disso, alguns autores relataram um aumento na atividade antioxidante do suco após o tratamento com UV-C, atribuindo este efeito à possível liberação de compostos fenólicos anteriormente ligados às paredes celulares ou à inativação da enzima polifenol oxidase (PPO), o que poderia reduzir a oxidação desses compostos (CASCO et al., 2025; GOK et al., 2021). Em geral, enquanto a aplicação de radiação UV-C na superfície das maçãs tende a estimular um aumento biológico dos compostos antioxidantes associados aos mecanismos de defesa do tecido vegetal, no suco de maçã os compostos bioativos já presentes na matriz são predominantemente mantidos ou degradados quimicamente.

Murray et al. (2018) e Ho et al. (2020) investigaram a utilização da tecnologia AOP, que combina peróxido de hidrogênio, ozônio e radiação UV-C, para a inativação microbiana e a degradação de resíduos químicos em maçãs. Murray et al. (2018) alcançaram reduções de até 3 log de *L. monocytogenes* em maçãs destinadas à produção de maçãs caramelizadas, tanto na superfície como no interior da fruta, através da aplicação de gás ozônio seguida de um processo oxidativo contínuo com UV-C a 54 mJ/cm² durante 20 minutos. Numa experiência semelhante, Ho et al. (2020) demonstraram uma degradação de 59% do pesticida clorpirifós, juntamente com uma redução superior a 6 log em *E. coli* O157:H7 e *Aspergillus niger*, destacando o potencial da AOP como uma abordagem de dupla função para o controle tanto microbiológico como químico.

Mais recentemente, Shin et al. (2024) propuseram a combinação de ácido peracético (PAA) e luz UV-C (280 nm) para controlar patógenos na água e na superfície de maçãs. Conseguiram a inativação completa de *E. coli* O157:H7 e *L. monocytogenes* em apenas 5 minutos, sem afetar significativamente a cor ou a firmeza. O estudo destaca o efeito sinérgico entre o PAA e o UV-C (em fluências de 0–4 mJ/cm² e 0–15 mL/cm²) na geração de espécies reativas de oxigênio, que intensificam os danos nas membranas e no DNA microbiano.

Em geral, os autores concordam que a utilização da radiação UV-C isoladamente ou combinada com outros sistemas (luz pulsada, ozônio, H₂O₂ ou

PAA) reduz eficazmente a carga microbiana e, em alguns casos, estimula compostos de defesa nas frutas sem comprometer a qualidade. No entanto, subsistem lacunas na padronização das doses e na avaliação dos efeitos a longo prazo sobre os atributos sensoriais, os compostos bioativos e a segurança química residual. Além disso, a escalabilidade industrial e os custos energéticos associados continuam a representar um desafio para a adoção em grande escala destas tecnologias.

Os estudos analisados avaliam a eficácia da luz UV-C combinada com agentes químicos (sais de cálcio, ácido ascórbico, ácido cítrico e água eletrolisada) e tratamentos térmicos (escaldagem) para prolongar o prazo de validade de maçãs minimamente processadas. O foco principal é a inativação microbiana (flora nativa, leveduras e agentes patogénicos como *L. monocytogenes*, *S. aureus* e *Cronobacter sakazakii*) e a manutenção dos atributos de qualidade (cor/escurecimento, firmeza e propriedades viscoelásticas) (KIM, LEE e YOON 2021; CHEN et al., 2016; SANTO et al., 2016; GÓMEZ et al., 2015).

A utilização de luz UV-C é aprovada pela *Food and Drug Administration* para a descontaminação de alimentos e superfícies, e os estudos visam otimizar as doses (fluências) e combinações para maximizar a redução microbiana, minimizando ou evitando efeitos negativos nas características sensoriais e estruturais (CHEN et al., 2016; GÓMEZ et al., 2015).

Existe consenso de que a radiação UV-C é uma ferramenta valiosa para reduzir a carga microbiana inicial e, conseqüentemente, diminuir a multiplicação de microrganismos durante o armazenamento refrigerado (Tabela 4). Gómez et al. (2015) relataram que a luz UV-C reduziu a carga microbiana em maçãs fortificadas com cálcio (1,3 log UFC/g) e diminuiu a multiplicação microbiana durante 7 dias de armazenamento a frio (0,7 a 2,6 log UFC/g). Chen et al. (2016) e Kim et al. (2021), ao combinarem UV-C com outras tecnologias (ácido cítrico e água eletrolisada mais ácido fumárico, respectivamente), observaram uma redução na multiplicação microbiana e mantiveram as contagens bacterianas em níveis mais baixos do que os tratamentos controle durante o armazenamento.

Tabela 4. Redução logarítmica da carga microbiana: UV-C vs. combinação de UV-C

Matriz Alimentar	Alvo Microbiano	Redução UV-C Isolado (log)	Redução UV-C Combinado (log)	Tecnologia Combinada
Suco de Maçã (Clarificado)	<i>E. coli</i> / Patógenos	1,2 a 4,6 AKWU et al., 2023 GOUMA et al., 2015b	> 6,0 GOUMA et al., 2015b	UV-H + DMDC (55°C)
Suco de Maçã (Clarificado)	Leveduras / Fungos	1,6 a 3,2 CASCO et al., 2025 GOUMA et al., 2015a	3,8 a 5,9 CASCO et al., 2025	UV-H (Calor suave 50-60°C)
Suco de Maçã (Turvo)	<i>E. coli</i> K12	1,1 a 2,0 AKGUN & UNLUTURK, 2017	3,2 a 4,4 AKGUN & UNLUTURK, 2017	UV-LED acoplado (280/365nm)
Suco de Maçã (Turvo)	<i>A. acidoterrestris</i>	~ 1,0 (passagem única) SAUCEDA-GALVÉZ et al., 2021	> 5,0 SAUCEDA-GALVÉZ et al., 2021	UV-C com Recirculação
Superfície da Maçã	<i>L. monocytogenes</i>	0,7 a 1,7 NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022 ADHIKARI et al., 2015	2,3 a 2,9 MURRAY et al., 2018	UV + Ozônio + (AOP)
Superfície da Maçã	<i>E. coli</i> O157:H7	1,2 a 3,8 CORREA et al., 2020 ADHIKARI et al., 2015	> 7,0 HO et al., 2020	UV + (66°C)
Maçã Cortada	Flora Nativa / Leveduras	1,3 a 1,8 GRAÇA et al., 2020 GOMÉZ et al., 2015	2,0 CORRÊA et al., 2020	UV-C + PDI (Curcumina)

Ao aplicar fluências de 7,5 e 10 kJ/m², Santo et al. (2016) observaram reduções significativamente maiores de *C. sakazakii* (2–2,4 log UFC/g) em maçãs, concluindo que esta tecnologia era mais eficaz do que a água eletrolisada (AEW/NEW) e o hipoclorito de sódio (SH). Kim, Lee e Yoon (2021) confirmaram que a combinação de SAEW, FA e UVC W-LED resultou em reduções mais elevadas de *S. aureus* (1,65 log UFC/g) e *L. monocytogenes* (2,63 log UFC/g) em frutas cortadas, demonstrando que esta combinação melhora a desinfecção através de múltiplos mecanismos de ação contra microrganismos, proporcionando assim maior segurança dos alimentos e qualidade para maçãs frescas cortadas. Da mesma forma, Chen et al. (2017) relataram que o tratamento combinado de UV-C e bactérias do ácido láctico reduziu substancialmente as contagens de *Salmonella enteritidis* em maçãs minimamente processadas, com maior estabilidade em comparação com as amostras controle.

Os tratamentos de higienização são essenciais para garantir a segurança dos alimentos, no entanto, a manutenção da cadeia de frio também é indispensável. Santo et al. (2016) e Graça et al. (2020) concordaram que o armazenamento de frutas frescas cortadas a 4 °C inibiu a multiplicação de agentes patogênicos (*C. sakazakii*) e leveduras.

Chen et al. (2016) e Kim et al. (2021) relataram que tratamentos combinados (UV-C + ácido cítrico e UV-C + água eletrolisada + ácido fumárico) reduziram significativamente as reações de escurecimento e mantiveram valores de L* mais elevados do que as amostras controle, indicando maior brilho ou clareza nas amostras tratadas. Chen et al. (2016) atribuíram a inibição do escurecimento à formação de uma película fina e seca induzida pela radiação UV-C, que atua como uma barreira ao oxigênio. Em contrapartida, Hasan et al. (2017) observaram que a exposição à luz UV-C causou danos adicionais na membrana, refletidos num ligeiro aumento do escurecimento nas maçãs irradiadas após três dias de armazenamento.

No suco de maçã, a investigação sobre UV-C combinada com outras tecnologias tem-se centrado principalmente na inativação de microrganismos patogênicos e causadores de deterioração. Esta abordagem funciona como uma tecnologia de barreira para melhorar a segurança dos alimentos e minimizar os impactos negativos na qualidade do produto. Os principais parâmetros avaliados incluem a cinética de inativação microbiana e a influência das características intrínsecas do meio e das condições de pré-tratamento (GABRIEL, 2015; GOUMA et al., 2015). Em amostras de suco de maçã turvo, a tecnologia UV-C revelou-se

significativamente menos eficaz do que em amostras de suco clarificado, como seria de esperar, uma vez que as partículas em suspensão protegem o suco, bloqueando a penetração da luz UV-C e reduzindo a eficácia da radiação (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2020).

O efeito letal sinérgico da radiação UV-C (2,9 J/mL) e do calor resulta da inibição dos mecanismos de reparação do ADN celular, possivelmente devido à fluidização da membrana citoplasmática induzida pelo calor (GOUMA et al., 2015a). Para *L. monocytogenes*, a letalidade do UV-C aumentou sinergicamente com a temperatura entre 50 °C e 60 °C, enquanto para *E. coli* e *Salmonella enterica*, a sinergia máxima ocorreu entre 50 °C e 55 °C, alcançando uma inativação de 5 log CFU/mL de *E. coli* sem comprometer a qualidade do produto (GAYÁN et al., 2015; GOUMA et al., 2015a; GOUMA et al., 2015b). No caso das leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*), o tratamento combinado (UV-C [3,92 J/mL] + calor) apresentou uma sinergia menos pronunciada em comparação com as bactérias (GOUMA et al., 2015a).

A combinação de UV-C e ultrassom (US) foi avaliada para a inativação de *E. coli* O157:H7 e esporos de *A. acidoterrestris*. Foram observadas taxas de inativação mais elevadas de *E. coli* O157:H7 com o tratamento combinado em comparação com as tecnologias individuais. Este efeito pode ser atribuído à agitação (cavitação) induzida pelo ultrassom, que aumenta a exposição dos microrganismos ao UV-C no meio opaco (GABRIEL, 2015). Em contrapartida, Tremarin, Brandão e Silva (2017a), utilizando a mesma combinação (US + UV-C) para inativar esporos de *A. acidoterrestris*, concluíram que as duas tecnologias exibiram efeitos aditivos em vez de sinérgicos.

A cavitação é a formação e o colapso violento de microbolhas, gerando temperatura e pressão extremas, bem como cisalhamento mecânico localizado. Este fenómeno beneficia o processamento de alimentos e a desinfecção ao (i) danificar as membranas celulares microbianas, o que facilita a entrada de espécies reativas, e (ii) melhorar a mistura e a penetração de substâncias como o oxigênio e os compostos fenólicos nos materiais. Ao romper estruturas e aumentar a permeabilidade, o ultrassom melhora a eficácia de tratamentos subsequentes, como a radiação UV-C (LAUTERI et al., 2021; CHAR et al., 2011).

Outra combinação amplamente estudada na literatura é a pressão hidrostática ultra-alta (HHP) (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2020;

SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019). Esta tecnologia aplica pressões entre 300 e 600 MPa uniformemente em todo o produto durante alguns minutos, resultando em (i) desnaturação de proteínas enzimáticas e estruturais, (ii) danos irreversíveis nas membranas microbianas e (iii) inativação parcial de enzimas oxidativas, tais como PPO e POD. Ao contrário do tratamento térmico convencional, o HHP preserva o aroma, a cor e as vitaminas, uma vez que o processo envolve temperaturas moderadas (geralmente inferiores a 45 °C), o que impede a degradação de compostos sensíveis ao calor e mantém as qualidades sensoriais e nutricionais do produto fresco (GORAYA et al., 2024; OEY et al., 2008).

Foram estudadas as interações dos raios UV-C na inativação de esporos microbianos resistentes, tendo-se observado que a alta pressão (HHP) aplicada previamente deformava ligeiramente a parede celular (criando fissuras e espinhos comprimidos), tornando os ascósporos mais vulneráveis aos danos causados pelos raios UV-C (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019).

A combinação de HHP e UV-C também foi avaliada para a inativação de esporos de *A. acidoterrestris* em amostras de suco de maçã clarificado, e o tratamento com HHP não melhorou significativamente as taxas de inativação. Em amostras de suco de maçã turvo, o HHP alterou as propriedades da matriz, aumentando a turbidez. O aumento da opacidade causado pelo HHP aparentemente reduziu a eficácia da radiação na dose mais elevada testada (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2020).

Os efeitos de aditivos químicos, tais como o dicarbonato de dimetila (DMDC) e a natamicina, combinados com UV-C e calor (H), foram também avaliados. UV-C + H (55 °C) + DMDC, um potente inibidor microbiano que inativa enzimas celulares, em concentrações de 25, 50 e 75 mg/L no suco de maçã para a inativação microbiana de *E. coli*, produziu um efeito sinérgico satisfatório. A adição de 75 mg/L de DMDC antes do tratamento com UV-C/H permitiu uma redução de 5 log CFU/mL em apenas 1,8 minutos, representando uma redução de 44% no tempo de processamento e na dose de UV-C (GOUMA et al., 2015b).

A adição de natamicina, um antifúngico natural utilizado para prevenir a deterioração por leveduras, em concentrações de 30 ppm ou 45 ppm após o tratamento com UV-C/H (50 °C) no suco de maçã resultou na inativação sinérgica do cocktail de leveduras durante o armazenamento refrigerado. Esta sinergia é atribuída a alterações fisiológicas e estruturais induzidas pelo UV-C e pelo calor, tais como o aumento da permeabilidade da membrana, que aceleram a ação da natamicina nos

componentes celulares (CASCO et al., 2025).

2.5. Conclusões e perspectivas futuras

A utilização da radiação UV-C em maçãs e seus derivados surgiu como uma alternativa promissora para o controle microbiológico e a manutenção da qualidade pós-colheita. Em geral, os estudos analisados indicam que, quando aplicada a fruta fresca, esta tecnologia ajuda a reduzir ou estabilizar a carga microbiana e a preservar as características físico-químicas, embora a sua eficácia dependa da dose e do tempo de exposição (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; PHONYIAM et al., 2021; ADHIKARI et al., 2015; PATARO, DONSI & FERRARI, 2015).

Para produtos minimamente processados, o UV-C é eficaz na redução de microrganismos patogênicos, tais como *L. monocytogenes* e *E. coli*, e no retardamento do escurecimento enzimático, sem comprometer significativamente as características do produto. No entanto, a penetração limitada da radiação em tecidos vegetais cortados ou superfícies irregulares continua a ser um desafio para a aplicação em grande escala (YUAN et al., 2022; KIM, YOON & LEE, 2021; GREEN et al., 2020; GRAÇA et al., 2020; CHEN et al., 2017; CHEN et al., 2016).

Quando aplicado a sucos de maçã e derivados líquidos, o UV-C é altamente eficaz na redução de bactérias e esporos e ajuda a manter a qualidade durante o armazenamento refrigerado, prolongando assim o prazo de validade (YANG et al., 2019; AKGÜN & ÜNLÜTÜRK, 2017; TREMARIN, BRANDÃO & SILVA, 2017b; GABRIEL, 2015). No entanto, a turbidez e a opacidade do suco podem reduzir a eficácia da radiação, exigindo ajustes de fluência ou estratégias adicionais.

Em geral, os resultados mostram que a radiação UV-C pode aumentar a segurança microbiológica, prolongar o prazo de validade e preservar as características sensoriais e nutricionais das maçãs e dos seus derivados (YANG et al., 2019). Apesar destes avanços, subsistem desafios importantes, incluindo a penetração limitada da radiação UV-C, a falta de protocolos de aplicação padronizados e a necessidade de estudos que considerem condições reais de processamento à escala industrial (GRAÇA et al., 2022; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021).

Para as perspectivas futuras, recomenda-se expandir a investigação nas seguintes áreas: (i) avaliações econômicas e ambientais para validar a viabilidade da utilização industrial em grande escala, e (ii) normalização internacional de doses,

protocolos e regulamentações para garantir a eficácia e a segurança da tecnologia.

Em resumo, a radiação UV-C é um método promissor e sustentável para higienizar maçãs e produtos relacionados, com potencial para substituir ou complementar a utilização de cloro. Oferece uma alternativa economicamente mais vantajosa devido aos seguintes fatores: i) Redução do consumo de água – o UV-C é um método de desinfecção a seco, eliminando a necessidade de grandes volumes de água para lavagem e os custos associados à eliminação e tratamento de águas residuais (GRAÇA et al., 2020; GREEN et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020); ii) Relação custo-benefício para pequenos processadores – a tecnologia é considerada uma opção de baixo custo, especialmente atraente para pequenos produtores de sucos e frutas frescas devido ao menor investimento inicial e à manutenção simples (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2022); iii) Custos operacionais de insumos – enquanto o cloro requer a compra contínua de produtos químicos e a monitorização de resíduos tóxicos, o UV-C utiliza apenas energia elétrica (GRAÇA et al., 2020; RIOS DE SOUZA et al., 2020).

No entanto, o aumento da investigação aplicada em aplicações industriais será essencial para estabelecer esta tecnologia na indústria de frutas e legumes.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código Financeiro 001), da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ E-26/201.302.2022), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 309528/2025-9) e do INCT Frutas Tropicais (465335/2014-4).

Declaração de Ética

Os autores não têm nada a relatar.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto

ao autor correspondente, mediante solicitação razoável.

2.6. Referências

ABPM. Associação Brasileira de Produtores de Maçã. Disponível em: www.abpm.org.br.

ADHIKARI, A. et al. Ultraviolet-C light inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on organic fruit surfaces. *International Journal of Food Microbiology*, [s. l.], vol. 210, p. 136–142, 2015.

AKGÜN, M. P.; ÜNLÜTÜRK, S. Effects of ultraviolet light emitting diodes (LEDs) on microbial and enzyme inactivation of apple juice. *International Journal of Food Microbiology*, [s. l.], vol. 260, p. 65–74, 2017.

AKWU, A. S. Effect of germicidal short wave-length ultraviolet light on the polyphenols, vitamins, and microbial inactivation in highly opaque apple juice. *Journal of Food Safety*, vol. 43, n.º 3, 13037. 2023.

CASCO, M. de los A. et al. A novel approach using UV-C light assisted by mild heat and natamycin as a hurdle strategy to preserve juice from non-commercial-grade apples. *Food Control*, [s. l.], vol. 171, 2025.

CHEN, C. et al. Combined treatment of ultraviolet-C and *L. plantarum* on *Salmonella enteritidis* and quality control of fresh-cut apple. *Journal of Food Processing and Preservation*, <https://doi.org/10.1111/jfpp.13349>. 2017.

CHEN, C. et al. Effect of citric acid combined with UV-C on the quality of fresh-cut apples. *Postharvest Biology and Technology*, [s. l.], vol. 111, p. 126–131, 2016.

CORREIA, T. Q. Effects of ultraviolet light and curcumin-mediated photodynamic T inactivation on microbiological food safety: A study in meat and fruit. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, vol. 30, 101678. 2020.

CORSON, E. et al. Hepatitis A virus inactivation in phosphate buffered saline, apple juice and coconut water by 254 nm and 279 nm ultraviolet light systems. *Food Microbiology*, vol. 129, 104756. 2025

DIAS, T. G. Physicochemical characterization, antioxidant activity and total phenolic content in 'Gala' apples subjected to different UV-C radiation doses. *Acta Scientiarum*, vol. 39, n.º 1, p. 67-73. 2017.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization. Available at: www.fao.org.

FORTIN, N.D. Chapter 11: Global governance of food safety: the role of the FAO, WHO and Codex Alimentarius in regulatory harmonization. *Research Handbook on International Food Law*, p. 227-242, 2023.

GABRIEL, A. A. Combinations of selected physical and chemical hurdles to inactivate *Escherichia coli* O157: H7 in apple and orange juices. *Food Control*, [s. l.], vol. 50, p. 722–728, 2015.

GABRIEL, A. A.; ANCOG, M. M. L. Effects of suboptimal growth conditions on the subsequent UV-C resistance of *Listeria monocytogenes* in coconut liquid endosperm and apple juice. *LWT*, [s. l.], vol. 99, p. 460–467, 2019.

GAYÁN, E. et al. Environmental and biological factors influencing the UV-C resistance of *Listeria monocytogenes*. Food Microbiology, [s. l.], vol. 46, p. 246–253, 2015.

GOK, S. B. Treatment of Apple and Grape Juices by Modified UV-C Reactor Based on Dean Vortex Technology: Microbial, Physicochemical and Sensorial Parameters Evaluation. Food and Bioprocess Technology, vol. 14, p. 1055–1066. 2021.

GÓMEZ, P. L. et al. Potential of UV-C Light for Preservation of Cut Apples Fortified with Calcium: Assessment of Optical and Rheological Properties and Native Flora Dynamics. Food and Bioprocess Technology, [s. l.], vol. 8, no 9, p. 1890–1903, 2015.

GOUMA, M. et al. Inactivation of spoilage yeasts in apple juice by UV-C light and in combination with mild heat. Innovative Food Science and Emerging Technologies, [s. l.], vol. 32, p. 146–155, 2015a.

GOUMA, M. et al. Influence of dimethyl dicarbonate on the resistance of *Escherichia coli* to a combined UV-Heat treatment in apple juice. Frontiers in Microbiology, [s. l.], vol. 6, no MAIO, 2015b.

GOUMA, M. Modelling microbial inactivation kinetics of combined UV-H treatments in apple juice. Innovative Food Science & Emerging Technologies, vol. 27, p. 111-120. 2015c.

GRAÇA, A. et al. The effect of UV-C and electrolyzed water on yeasts on fresh-cut apple at 4 °C. Journal of Food Engineering, [s. l.], vol. 282, 2020.

GREEN, A. et al. The efficacy of UVC LEDs and low pressure mercury lamps for the reduction of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria monocytogenes* on produce. Innovative Food Science and Emerging Technologies, [s. l.], vol. 64, 2020.

GUO et al. Efficacy and mechanism of ultrasound combined with slightly acidic electrolyzed water for inactivating *Escherichia coli*. Journal of Food Quality, vol. 1, 6689751, p. 1-10. 2021.

HO, J. et al. Degradation of chlorpyrifos and inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 and *Aspergillus niger* on apples using an advanced oxidation process. Food Control, [s. l.], vol. 109, 2020.

HUSSAIN, M.S., TANGO, C.N., OH, D.H. Inactivation kinetics of slightly acidic electrolyzed water combined with benzalkonium chloride and mild heat treatment on vegetative cells, spores and biofilms of *Bacillus cereus*. Food Research International, vol. 116, p. 157-167. 2019.

KIM, G. H.; LEE, C. L.; YOON, K. S. Combined hurdle technologies using UVC waterproof LED for inactivating foodborne pathogens on fresh-cut fruits. Foods, [s. l.], vol. 10, no 8, 2021.

KEENER, L.; KOUTCHMA, T. . Chapter 27 – Capacity building: Harmonization and achieving food safety in an era of unilateral legislation. Ensuring Global Food Safety (second edition), p. 489-502, 2022.

ISLAM, M. S. et al. Effect of UV Irradiation on the Nutritional Quality and Cytotoxicity of Apple Juice. Journal of Agricultural and Food Chemistry, vol. 64, p. 7812–7822. 2016a.

ISLAM, M. S. et al. UV-C irradiation as an alternative disinfection technique: Study of its effect on polyphenols and antioxidant activity of apple juice. Innovative Food Science and

Emerging Technologies, vol. 34, p. 344–351. 2016b.

LUCIANO-ROSARIO, D. et al. Mold in, mold out: Harvest bins harbor viable inoculum that can be reduced using novel sanitation methods to manage blue mold decay of apples. *Postharvest Biology and Technology*, vol. 221, 113323. 2025.

MENEZES, N. M. C. et al. Effect of soluble solids concentration on *Neosartorya fischeri* inactivation using UV-C light. *International Journal of Food Microbiology*, vol. 296, p. 43–47. 2019.

MENEZES, N. M. C. et al. Modeling the inactivation of *Aspergillus fischeri* and *Paecilomyces niveus* ascospores in apple juice by different ultraviolet light irradiances. *International Journal of Food Microbiology*, vol. 333, 108773. 2020.

MURRAY, K. et al. Inactivation of *Listeria monocytogenes* on and within apples destined for caramel apple production by using sequential forced air ozone gas followed by a continuous advanced oxidative process treatment. *Journal of Food Protection*, [s. l.], vol. 81, no 3, p. 357–364, 2018.

NICOLAU-LAPEÑA, I. et al. Ultraviolet Applications to Control Patulin Produced by *Penicillium expansum* CMP-1 in Apple Products and Study of Further Patulin Degradation Products Formation and Toxicity. *Food and Bioprocess Technology*, [s. l.], vol. 16, no 4, p. 804–823, 2023.

NICOLAU-LAPEÑA, I. et al. Inactivation of *Escherichia coli*, *Salmonella enterica* and *Listeria monocytogenes* on apple peel and apple juice by ultraviolet C light treatments with two irradiation devices. *International Journal of Food Microbiology*, [s. l.], vol. 364, 2022.

NGNITCHO et al. Inactivation of bacterial pathogens on lettuce, sprouts and spinach using hurdle technology. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 43, p. 68–76. 2017.

ORLOWSKA, M. et al. Surrogate organisms for pathogenic O157:H7 and non-O157 *Escherichia coli* strains for apple juice treatments by UV-C light at three monochromatic wavelengths. *Food Control*, vol. 47, 647–655. 2015.

PATARO, G.; DONSI, G.; FERRARI, G. Post-harvest UV-C and PL irradiation of fruits and vegetables. *Chemical Engineering Transactions*, [s. l.], vol. 44, p. 31–36, 2015.

EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. 1999.

PÉREZ-LORENZO, E. et al. Reduction of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria from natural apple cider by UV-C irradiation. *Journal of Food Processing and Preservation*, vol. 46, n.º 11, e17136. 2022.

PHONYIAM, O. et al. UV-C irradiation before or after inoculation with *Colletotrichum gloeosporioides* affected phytohormones and antioxidants in apple fruit (*Malus domestica* Borkh). *European Journal of Horticultural Science*, [s. l.], vol. 86, no 6, p. 620–628, 2021.

RIOS DE SOUZA, V. et al. A comparative study on the inactivation of *Penicillium expansum* spores on apple using light emitting diodes at 277 nm and a low-pressure mercury lamp at 253.7 nm. *Food Control*, [s. l.], vol. 110, 2020.

SANTO, D. et al. Survival and growth of *Cronobacter sakazakii* on fresh-cut fruit and the effect of UV-C illumination and electrolyzed water in the reduction of its population.

International Journal of Food Microbiology, [s. l.], vol. 231, p. 10–15, 2016.

SAUCEDA-GÁLVEZ, J. N. et al. Short wave ultraviolet light (UV-C) effectiveness in the inactivation of bacterial spores inoculated in turbid suspensions and in cloudy apple juice. *Beverages*, [s. l.], vol. 7, no 1, 2021.

SAUCEDA-GÁLVEZ, J. N. et al. Effect of single and combined UV-C and ultra-high pressure homogenisation treatments on inactivation of *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores in apple juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, [s. l.], vol. 60, 2020.

SAUCEDA-GÁLVEZ, J. N. et al. Inactivation of ascospores of *Talaromyces macrosporus* and *Neosartorya spinosa* by UV-C, UHPH and their combination in clarified apple juice. *Food Control*, [s. l.], vol. 98, p. 120–125, 2019.

SHIN, M. et al. Application of combined treatment of peracetic acid and ultraviolet-C for inactivating pathogens in water and on surface of apples. *International Journal of Food Microbiology*, [s. l.], vol. 411, 2024.

SMEDT, K.; VOS, E. The application of the Precautionary Principle in the EU. *The Responsibility of Science*, vol. 57, p. 163-186, 2022.

SYAMALADEVI, R. M. et al. Ultraviolet-C light inactivation of *Penicillium expansum* on fruit surfaces. *Food Control*, vol. 50, 297-303. 2015.

TCHONKOUANG, R. D. Et al. UV-C light: A Promising Preservation Technology for Vegetable-Based Nonsolid Food Products. *Foods*, vol. 12 (17), 3227, 2023.

TIRONO, M. The Effectiveness of UV-C Light for Inactivating *Listeria monocytogenes* Bacteria and its Impact on Apple Juice. *The Open Biotechnology Journal*, [s. l.], vol. 17, no 1, 2023.

TREMARIN, A.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Application of ultraviolet radiation and ultrasound treatments for *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores inactivation in apple juice. *LWT*, [s. l.], vol. 78, p. 138–142, 2017a.

TREMARIN, A.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Inactivation kinetics of *Alicyclobacillus acidoterrestris* in apple juice submitted to ultraviolet radiation. *Food Control*, [s. l.], vol. 73, p. 18–23, 2017b.

YANG, Y. et al. Effect of thermal pasteurization and ultraviolet treatment on the quality parameters of not-from-concentrate apple juice from different varieties. *CYTA - Journal of Food*, [s. l.], vol. 17, no 1, p. 189–198, 2019.

YIN, F. et al. Inactivation and potential reactivation of pathogenic *Escherichia coli* O157:H7 in apple juice following ultraviolet light exposure at three monochromatic wavelengths. *Food Microbiology*, vol. 46, pp. 329–335. 2015.

XIANG, Q. et al. Effect of UVC light-emitting diodes on apple juice: Inactivation of *T. Zygosaccharomyces rouxii* and determination of quality. *Food Control*, vol. 111, 107082. 2020.

CAPÍTULO II

MELHORIA DA QUALIDADE E SEGURANÇA GERAIS PÓS COLHEITA DE MAÇÃS FRESCAS SUBMETIDAS À LUZ UV-C

3 CAPÍTULO II: Melhoria da qualidade e segurança gerais pós-colheita de maçãs frescas submetidas à luz UV-C

RESUMO

Amplamente cultivada e consumida em todo o mundo, a maçã (*Malus domestica*) destaca-se tanto por suas qualidades degustativas quanto por seu potencial valor nutricional. No entanto, ela está sujeita a perdas pós-colheita consideráveis, principalmente devido ao apodrecimento, que pode representar até 70% dos descartes. Por isso, há uma necessidade de tecnologias que contribuam para prolongar a vida útil após a colheita. Avaliamos os parâmetros de qualidade pós-colheita e a segurança microbiológica de maçãs frescas após terem sido submetidas à radiação UV-C. A fruta foi exposta à radiação UV-C por dois períodos pré-estabelecidos (5 e 10 minutos) e, em seguida, armazenada a 7 °C por 14 dias. Os parâmetros físico-químicos analisados foram cor, textura, acidez titulável, sólidos solúveis, fenólicos e capacidade antioxidante. Na avaliação microbiológica (*Salmonella* spp., *E. coli*, bactérias mesofílicas, bolores e leveduras), as maçãs irradiadas por 10 minutos apresentaram controle microbiano com contagem estável ao longo dos dias de armazenamento, bem como valores mais elevados de firmeza, ATT, compostos fenólicos e preservação da cor vermelha. A exposição aos raios UV-C não alterou negativamente os parâmetros de qualidade da fruta irradiada.

Palavras-chave: inativação microbiana; irradiação; ultravioleta c.

3.1 Introdução

A maçã (*Malus domestica*), além de ser uma fruta cultivada e consumida em todo o mundo por suas qualidades degustativas, possui um valor nutricional promissor e níveis significativos de fibras, vitaminas C e E, minerais e compostos fenólicos (ARNOLD; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2022). Em 2023, a produção global foi de 97.339.338 toneladas, sendo a China, os EUA, a Turquia, a Polônia e a Índia os maiores produtores (FAOSTAT, 2025).

Em nível nacional, a produção no Brasil foi de 1.183.794 toneladas, sendo Santa Catarina o maior estado produtor (48% da área plantada no Brasil), seguido pelo Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais (IBGE, 2023). As variedades mais consumidas no país são a 'Gala' e a 'Fuji'. De toda a produção nacional, destaca-se o consumo *in natura* (75%) restando cerca de 25% para a produção de suco e produtos derivados (ABPM, 2023).

Embora as maçãs sejam um alimento amplamente consumido em todo o mundo, seu principal obstáculo são as perdas pós-colheita - responsáveis pela eliminação de cerca de 70% da fruta - especialmente aquelas causadas pela podridão (ARGENTA et al., 2021).

Como o metabolismo da fruta continua após a colheita, observam-se alterações em sua composição e qualidade durante o armazenamento, o que acelera o processo de senescência e acaba prejudicando o valor comercial da fruta e reduzindo sua vida útil (HASAN et al., 2024; LAUŽIKĚ et al., 2024). Estudos revelaram que, em média, 7,5% das maçãs (variedade Fuji) são descartadas durante o armazenamento devido à deterioração. Quando analisado ao longo de todo o prazo de validade (7 dias a 22 °C), esse descarte sobe para uma média de 19,8% (ARGENTA et al., 2021).

A luz ultravioleta de onda curta (UV-C) abrange a faixa de comprimento de onda de 100 a 280 nm, mas é em 254 nm que apresenta o maior poder antimicrobiano no espectro UV. Ela atua danificando o DNA dos microrganismos, impedindo assim sua reprodução celular. (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; PÉREZ-LORENZO et al., 2022; BARRETO et al., 2021). Além de alimentos, a tecnologia é utilizada para purificar o ar, a água e bebidas, bem como para esterilizar ferramentas sensíveis, como instrumentos médicos (HASAN et al., 2024; PANTOJA FREIRE et al., 2024).

Os tratamentos térmicos são comumente utilizados devido à sua eficaz inativação bacteriana, mas têm um alto impacto no conteúdo nutricional e na qualidade sensorial no caso das maçãs. Como alternativa promissora para a

desinfecção, a tecnologia de radiação UV-C pode preservar as propriedades nutricionais e sensoriais, aumentando a vida útil dos alimentos (ARCOS-LIMIÑANA, MAESTRE-PÉREZ; PRATS-MOYA, 2025).

Apesar dos estudos na literatura que aplicaram luz UV-C a alimentos, há pouco uso dessa tecnologia como alternativa à higienização convencional (baseada em compostos clorados).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe o estudo do efeito da luz UV-C na inativação microbiana e na manutenção das propriedades nutricionais e sensoriais de maçãs frescas.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1. Materiais

As maçãs, da variedade Fuji, foram adquiridas em um mercado local (Rio de Janeiro) e foram selecionadas, lavadas em água corrente e secas com papel-toalha para remover o excesso de água da superfície. Os frutos apresentavam um peso médio de 160 g e eram provenientes do mesmo lote. Foram realizadas duas réplicas em triplicata, totalizando seis maçãs por tratamento. Após esta etapa, elas foram divididas em três tratamentos: o primeiro com amostras de controle (não tratadas), o segundo com amostras expostas à radiação UV-C por 5 minutos (UV5) e o terceiro com amostras expostas à radiação UV-C por 10 minutos (UV10).

3.2.2. Métodos

Para a exposição à radiação UV-C, utilizou-se um irradiador modelo UV-C 0214/UV-C 0314 da marca Hortifruti (Caxias do Sul, Brasil). As maçãs foram irradiadas por 5 e 10 minutos e reposicionadas na metade do período de exposição, permitindo que ambas as faces recebessem a radiação e assegurando uma distribuição homogênea do tratamento sobre toda a superfície do fruto.

As fluências (KJ/m²) utilizadas foram calculadas com base na seguinte equação proposta por Weis et al. (2022):

$$D = I \times t; \text{ onde:}$$

I: irradiância; e

t: tempo de exposição

As maçãs foram embaladas em bandejas de poliestireno expandido e mantidas refrigeradas a 6 °C, sendo analisadas após 0, 7 e 14 dias de armazenamento. A umidade relativa no interior da câmara frigorífica foi de 98%.

3.2.2.1. Análises físico-químicas

3.2.2.1.1. Perda de massa

A perda de massa foi determinada a partir da diferença entre a massa fresca inicial e a massa fresca em cada dia de análise, obtida com uma balança *E-line* modelo ELP-10 (São Paulo, Brasil). Os resultados foram expressos como % de perda de

massa fresca, de acordo com Oliveira et al. (2025).

3.2.2.1.2. Firmeza

Foi determinada utilizando o texturômetro *Stable Micro Systems TA-XT2* (São Paulo, Brasil), com resultados expressos em Newtons (N), referindo-se à força máxima necessária para que a sonda cilíndrica de 2 mm do equipamento penetrasse (1,0 mm/s) na casca da maçã (OLIVEIRA et al., 2025).

3.2.2.1.3. Análise de cor instrumental

A medição instrumental da cor da fruta foi realizada utilizando um colorímetro portátil *Konica Minolta CR 400* (Japão), e as leituras da amostra foram feitas em dois pontos ortogonais da fruta, levando em consideração a cor irregular da casca (Figura 8). O método de medição utilizado reflete a cor real da casca da maçã (KIM; LEE; YOON, 2021).

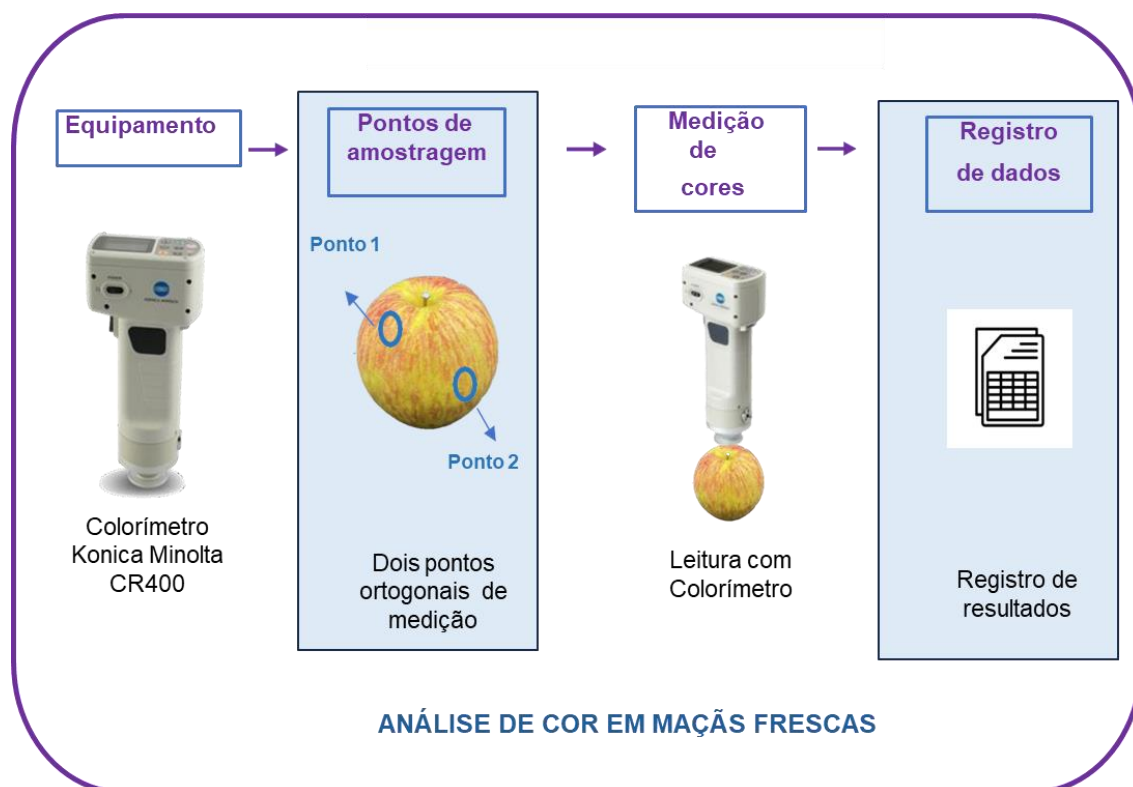


Figura 8. Metodologia utilizada para a análise de cor instrumental em maçãs frescas.

3.2.2.1.4. Sólidos solúveis totais (SST)

Os SST foram determinados por leitura direta com um refratômetro Atago Pal- 1 (Japão), utilizando a polpa de cada amostra. Os resultados foram expressos em graus Brix (ISO 2173, 1978).

3.2.2.1.5. Acidez titulável total (ATT)

A análise da acidez titulável total foi realizada em triplicata utilizando um titulador *Metrohm Titrino Plus 848* (Herisau, Suíça), de acordo com a norma ISO 1842 (1991). Os resultados foram expressos em g de ácido málico por 100 g de amostra.

3.2.2.1.6. Capacidade antioxidante

A atividade antioxidante foi determinada pelo método ABTS+, com os resultados apresentados em capacidade antioxidante equivalente a Trolox (TEAC).

Os extratos foram preparados de acordo com o método descrito por Rufino et al. (2007), utilizando metanol a 50% (v/v), seguido de acetona a 70%. Este extrato foi avaliado utilizando o ensaio do ácido 2,2-azino-bis-3- etilbenzotiazolina-6-sulfônico (ABTS) e a absorvância foi medida a 734 nm utilizando um espectrofotômetro (Bel Photonics®, Piracicaba, Brasil) (RE et al., 1999).

Para essa extração, as amostras foram preparadas na proporção de 1:1 (maçã: água). Primeiramente, 4 g dessa amostra foram pesados em um tubo Falcon de 50 mL. Em seguida, 10 mL de metanol a 50% foram pipetados em cada tubo e agitados para homogeneizar o conteúdo, posteriormente a mistura foi deixada em repouso por 1 hora. Após esse tempo, foi centrifugado a 4000 RPM por 10 minutos para separação de fases. O sobrenadante foi removido do tubo e vertido em um balão volumétrico âmbar. A polpa (a parte sólida da mistura) permaneceu no tubo, e foi adicionada acetona a 70%. Cada tubo foi novamente agitado para homogeneizar o conteúdo e a mistura também foi deixada em repouso por 1 hora. Após esse tempo, foi novamente centrifugada a 4000 RPM por 10 minutos para separação de fases. Em seguida, o sobrenadante foi removido do tubo e vertido no mesmo balão volumétrico âmbar mencionado acima e 5 mL de água destilada foram adicionados ao balão. A polpa restante no tubo foi descartada.

As análises foram realizadas em triplicata e os resultados foram apresentados em μmol de equivalente de trolox por 100 g de amostra.

3.2.2.1.7. Fenólicos totais

Os compostos fenólicos totais foram determinados utilizando o método espectrofotométrico proposto por Singleton e Rossi (1965), conforme modificado por Georgé et al. (2005).

Para a extração, as amostras foram preparadas na proporção de 1:1 (maçã: água). Em seguida, pesaram-se 2 g dessa amostra em um balão volumétrico âmbar de 25 mL e adicionaram-se 25 mL de acetona a 70%. Colocou-se uma barra magnética em cada balão e estes foram mantidos em agitação por 30 minutos. Ao final desse período, o conteúdo do balão foi filtrado, obtendo-se o extrato.

O teor de compostos fenólicos foi determinado pelo ensaio de *Folin-Ciocalteu*, de acordo com Georgé et al. (2005). Uma alíquota do reagente de *Folin-Ciocalteu* (2,5 mL a 10%) foi adicionada a um frasco juntamente com 500 µL do extrato e reagiu por 2 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, foram adicionados 2 mL de carbonato de sódio (7,5% p/v) e os frascos foram colocados em banho-maria a 50 °C por 15 minutos, resfriados e colocados em banho de gelo. A absorbância foi medida a 760 nm utilizando um espectrofotômetro (Shimadzu®, Kyoto, Japão). As análises foram realizadas em triplicata e os resultados são apresentados em mg Eq de ácido gálico.100 g⁻¹ de extrato.

3.2.2.1.8. Análise microbiológica

As amostras foram analisadas para *Salmonella* spp. (ISO 6579-1:2017), *Escherichia coli* (Método Oficial AOAC 991.14) e contagem de aeróbios mesófilos, leveduras e fungos, de acordo com o Compêndio de Métodos para o Exame Microbiológico de Alimentos (2015), com os limites aceitáveis estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 2022).

Uma amostra de maçã fresca foi pesada e a primeira diluição 1:10 do fruto em água peptonada estéril a 0,1% foi realizada em um saco *Stomacher*, sendo homogeneizada por 2 minutos. A partir da diluição inicial, uma alíquota de 100 µL foi semeada em placas de Petri com meio DRBC para análise de fungos filamentosos e leveduras, seguida de incubação a 25 °C por 120 ± 2h. Outra alíquota de 100 µL da diluição inicial foi semeada em meio PCA para contagem de bactérias aeróbias mesófilas, seguida de incubação a 37 °C durante 48 ± 2h. Após os respectivos tempos de incubação, as colônias de fungos filamentosos e leveduras (15 - 150 UFC/mL), e de aeróbios mesófilos (25 - 250 UFC/mL) foram enumeradas.

3.2.2.1.9. Análise estatística

Os resultados foram expressos como média $\pm$ desvio padrão. Foi aplicada uma ANOVA bidirecional para avaliar o efeito dos dois fatores: Tratamentos (níveis: sem tratamento, radiação UV-C por 5 minutos – UV5 e radiação UV-C por 10 minutos – UV10) e tempo (níveis: 0, 7 e 14 dias). Em seguida, foi realizado um teste post hoc de comparação de médias de Tukey, quando necessário, nos casos em que foram detectadas diferenças. Para todos os testes, foi considerado um nível de significância de 5%. Os cálculos estatísticos foram realizados utilizando o software R, versão 3.3.1 (CORE_TEAM, 2017).

3.3 Resultados e discussão

3.3.1. Perda de massa

A radiação UV-C pode influenciar a perda de massa em maior ou menor grau. A Figura 9 mostra o comportamento da massa das amostras nos três tratamentos ao longo dos dias de armazenamento e sugere que a radiação UV-C, nas fluências avaliadas, não alterou os mecanismos de transpiração e respiração responsáveis pela perda de água dos frutos, mantendo comportamento semelhante ao observado no tratamento controle.

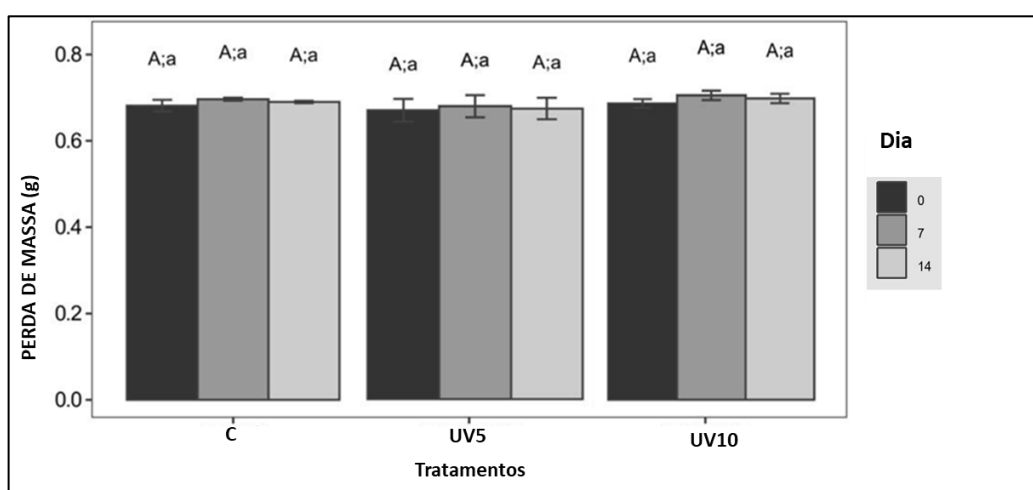


Figura 9. Massa das amostras nos três tratamentos durante o armazenamento. ANOVA bidirecional.

A perda de massa das maçãs permaneceu baixa ao longo dos 14 dias de armazenamento, apresentando valores próximos de 0,7% em todos os tratamentos avaliados. O tratamento controle apresentou valores entre aproximadamente 0,68 e 0,69%, enquanto as amostras submetidas à radiação UV-C por 5 minutos (UV5) variaram de 0,67 a 0,68% e aquelas tratadas por 7,5 minutos (UV7,5) de 0,68 a 0,70%. Embora pequenas oscilações tenham sido observadas ao longo do armazenamento, não houve diferenças significativas entre os tratamentos, conforme indicado pelas letras minúsculas iguais ("a"), demonstrando que a aplicação da radiação UV-C não influenciou a perda de massa dos frutos ($p > 0,05$). Da mesma forma, as letras maiúsculas iguais ("A") evidenciam que esse parâmetro permaneceu estável durante todo o período de armazenamento ($p > 0,05$).

Assim como neste estudo, outros autores aplicaram doses de UV-C, como Menaka et al. (2024) em goiabas (2 KJ/m^2), Araújo et al. (2022) em cagaitas e Barreto et al. (2016) em maçãs 'Fuji' minimamente processadas ($2,71 \text{ KJ/m}^2$). Estes últimos

autores observaram maior massa nas amostras submetidas à radiação UV-C em comparação com as amostras controle.

O resultado oposto (maior perda de massa nas amostras controle) foi observado por Ma et al. (2021) em um estudo com pimentões verdes. De acordo com Manzocco et al. (2011), a exposição prolongada à radiação UV-C pode resultar na fragmentação das membranas celulares, contribuindo para a desidratação e o aumento da perda de massa. Esses autores sustentaram que doses menores de radiação permitem maior estabilidade da perda de massa ao longo do armazenamento.

A menor perda de massa em frutas irradiadas com UV pode ser atribuída à sua capacidade de desacelerar processos fisiológicos, como respiração e transpiração, reduzindo consequentemente a perda de água nas frutas tratadas com UV (ABDIPOUR; HOSSEINIFARAH; NASERI, 2019).

3.3.2. Firmeza

A firmeza é um aspecto qualitativo importante para os consumidores, uma vez que indica o grau de maturação da fruta (ARNOLD; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2022). A Figura 10 mostra a firmeza alcançada nos três tratamentos.

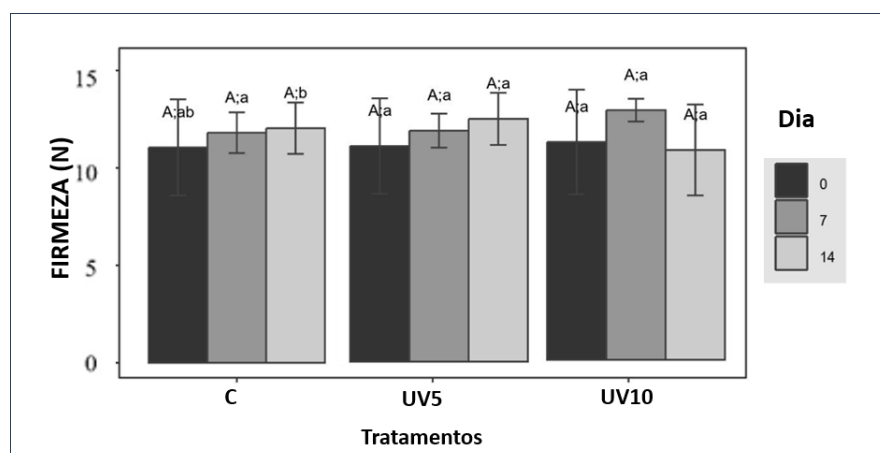


Figura 10. Análise da firmeza (força em newtons necessária para a penetração da amostra) nos três tratamentos durante o período de armazenamento.

O tratamento UV10 produziu a maior firmeza observada ($p \leq 0,05$), chegando a 12,82 N no sétimo dia de armazenamento.

Os tratamentos controle e UV5 apresentaram comportamentos semelhantes (Figura 10) ao longo dos dias do experimento, com firmeza inicial de 11,05 N (controle) e 11,07 N (UV5) e final de 12,04 N (controle) e 12,46 (UV5). Não

houve diferença significativa nesses tratamentos ao longo dos dias.

Assim como neste trabalho, Menaka et al. (2024) encontraram valores mais elevados de firmeza para amostras de goiaba submetidas a UV-C quando comparados às amostras controle.

Abdipour et al. (2019), em um estudo com pêssegos irradiados com UV-C e posteriormente armazenados a 4 °C por 25 dias, observaram uma melhora nas propriedades físico-químicas e sensoriais ao longo do armazenamento em comparação com frutas irradiadas com UV-B.

A diminuição da firmeza entre os estágios de maturação e senescência é geralmente explicada pela ação de enzimas que atuam despolimerizando e solubilizando a parede celular da fruta. Essa perda, além de ser prejudicial, influencia diretamente a comercialização dos produtos (MENAKA et al., 2024; GALLON et al., 2010).

3.3.3. Análise de cor instrumental

A Figura 11 mostra os resultados dos parâmetros de cor ao longo dos dias de armazenamento.

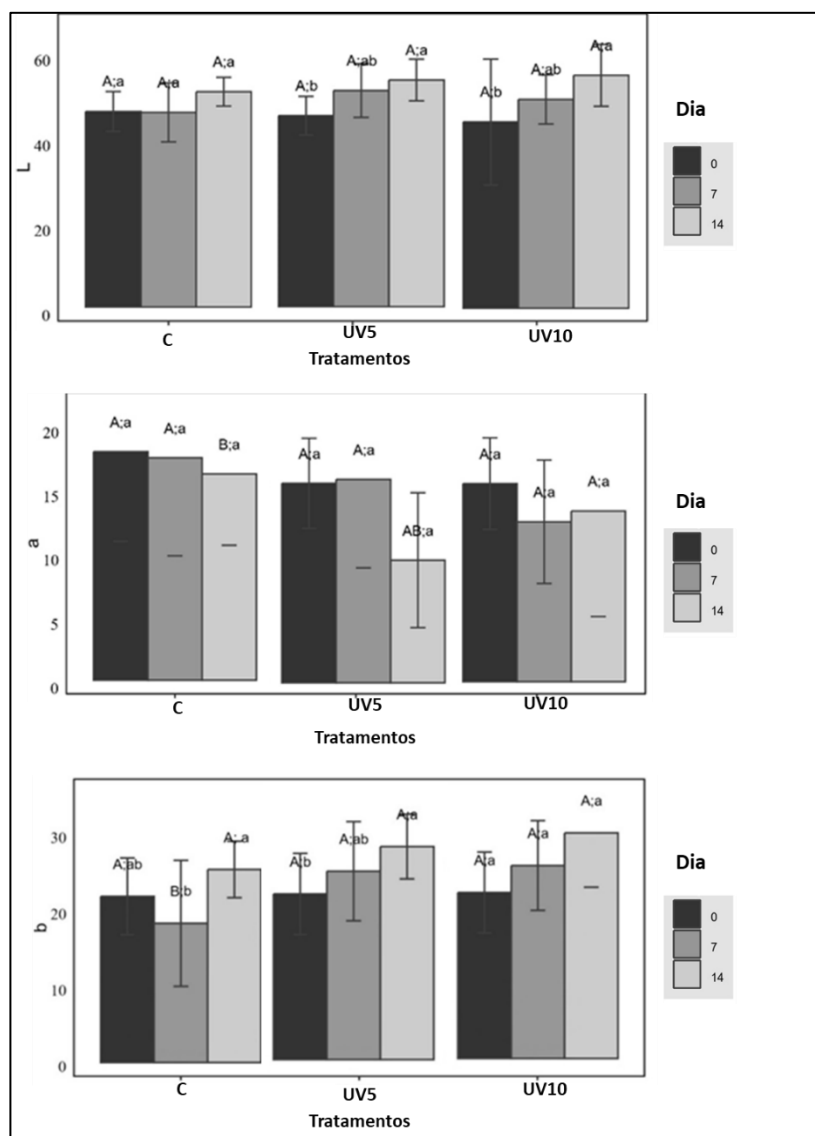


Figura 11. Análise dos parâmetros de cor L^* (índice de clareza), a^* (variação entre as cores verde e vermelha) e b^* (variação entre as cores azul e amarela) nos três tratamentos ao longo do período de armazenamento.

Os três tratamentos apresentaram um aumento no parâmetro de luminosidade (L^*) (controle: 46,1-50,7; UV5: 44,9-53,4; UV10: 43,9-54,9) ao longo dos dias de armazenamento (Figura 11). Não houve diferença significativa entre os tratamentos por dia de análise. Os tratamentos UV5 e UV10 apresentaram diferenças significativas ($p \leq 0,05$) com tons distintos na cor do fruto ao longo dos dias de armazenamento.

Observou-se um declínio seguido de ligeiro aumento no valor de a^* no décimo quarto dia de armazenamento, nas amostras expostas à radiação por mais tempo (UV10). Outros estudos revelaram um aumento no parâmetro a^* em frutas como maçãs, morangos e tomates expostos à radiação UV-C, o que está em consonância com os resultados aqui apresentados (MENAKA et al., 2024; SHIN et al. 2024; HO et

al. 2020; PATARO et al. 2015). Mendonça et al. (2017), em um estudo com caquis, não encontraram diferença significativa na avaliação dos parâmetros de cor (L^* , a^* e b^*) entre as amostras controle e as irradiadas com UV-C. Um resultado semelhante foi observado por Ramalingam et al. (2024), em um estudo com uvas.

3.3.4. Sólidos solúveis totais (SST)

Os valores obtidos para esta análise foram muito próximos entre os tratamentos (Figura 12), sendo:

- i) dia 0: 6,62 (C); 6,56 (UV5); 6,48 (UV10)
- ii) dia 7: 6,86 (C); 7,07 (UV5); 7 (UV10)
- iii) dia 14: 7,03 (C); 6,84 (UV5); 6,96 (UV10)

Ao longo dos dias de armazenamento, foi observado um aumento dos SST nas amostras controle e um aumento seguido de declínio nas amostras irradiadas.

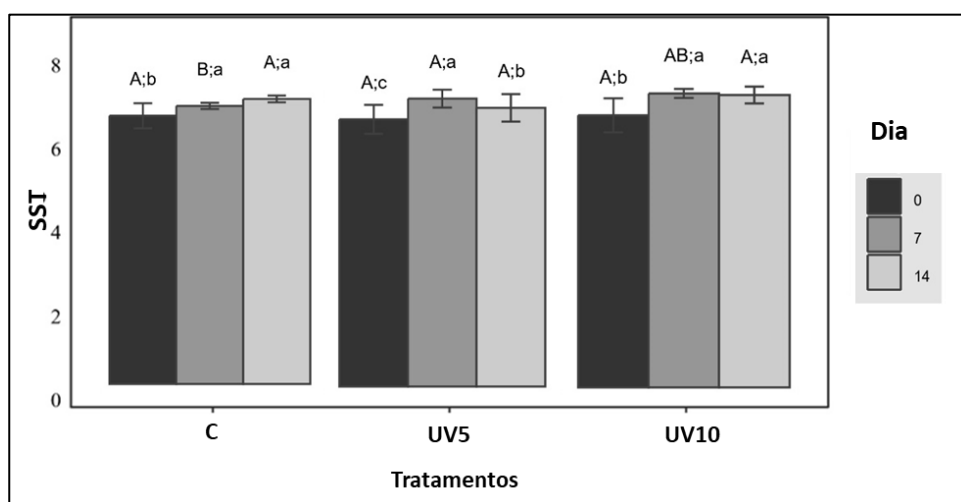


Figura 12. Análise de SST nos três tratamentos ao longo do período de armazenamento.

Os teores de sólidos solúveis totais (SST) apresentaram pequenas variações ao longo do armazenamento, com valores entre, aproximadamente 6,7 e 7,4 °Brix. O tratamento controle apresentou aumento significativo no sétimo dia de armazenamento, enquanto os tratamentos UV5 e UV10 permaneceram estáveis ao longo do período avaliado. Diferenças entre os tratamentos foram observadas nos dias 0 e 7, conforme indicado pelas letras minúsculas distintas ("a", "b" e "c") e, ao final do armazenamento (dia 14), apenas no tratamento UV5. Esses resultados indicam que a aplicação da radiação UV-C não afetou significativamente o teor de SST das maçãs, contribuindo para a manutenção desse importante atributo de

qualidade.

Riikonen et al. (2024) e Terao et al. (2021) também observaram uma redução dos SST após um período de armazenamento de morangos e melões tratados com UV-C, indicando um atraso no processo de amadurecimento dessas frutas. Xiang et al. (2020) não encontraram diferenças no teor de SST de amostras de suco de maçã antes e depois da irradiação, bem como no presente trabalho sem diferença significativa na redução de sólidos solúveis.

3.3.5. Acidez titulável total (ATT)

Apenas o tratamento UV5 apresentou uma diferença significativa (Figura 13) na análise da ATT.

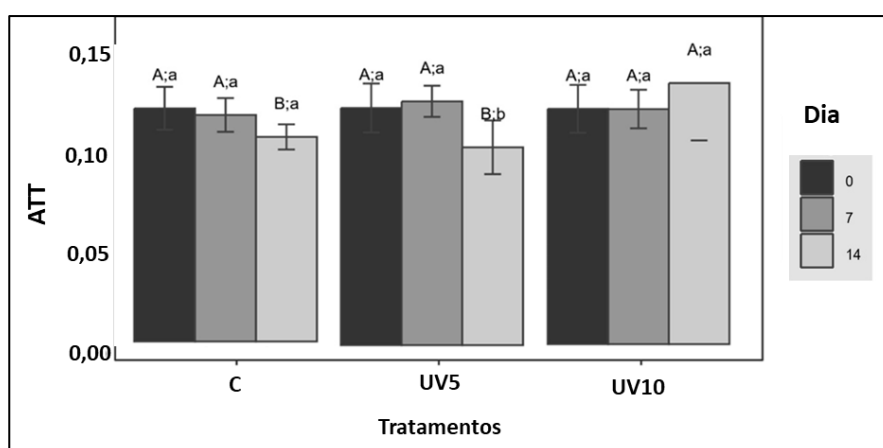


Figura 13. Análise de ATT nos três tratamentos ao longo do período de armazenamento.

Entre os tratamentos com maçãs frescas, UV10 apresentou maior valor de ATT ($p \leq 0,05$), com um valor inicial próximo a 0,12g no dia 0 e um valor final de aproximadamente 0,13g no dia 14. Os tratamentos controle e UV5 apresentaram médias de ATT de 0,11g e 0,11g, respectivamente, revelando uma queda nos valores médios de ATT analisados.

A exposição de melões, bem como sucos de uva, lichia, maçã e laranja à radiação UV-C não afetou significativamente os níveis de acidez titulável dessas amostras (PINTO et al., 2022; VISUTHIWAN; ASSATARAKUL, 2021; TERA0 et al., 2021; XIANG et al., 2020; LA CAVA & SGROPPO, 2019).

3.3.6. Capacidade antioxidante (método ABTS+)

Os três tratamentos apresentaram uma diminuição (controle: 0,71-0,67; UV5: 0,72-0,63; UV10: 0,71-0,67) ($p \leq 0,05$) ao longo dos dias de armazenamento (Figura

14), sendo que o tratamento UV5 apresentou a maior redução na capacidade antioxidante. Quando os tratamentos foram comparados por dia, não houve diferença ($p>0,05$) entre os tratamentos.

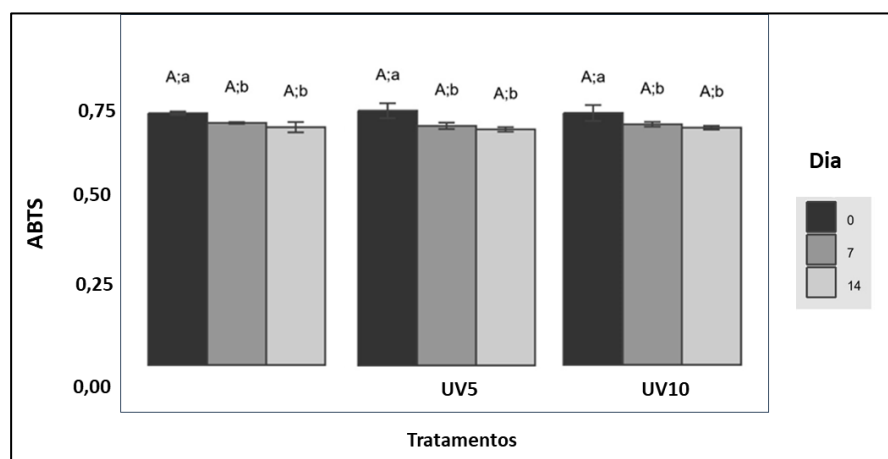


Figura 14. Análise da capacidade antioxidante (controle, UV5 e UV10) ao longo do período de armazenamento.

Yuan et al. (2022) também observaram uma diminuição na capacidade antioxidante de maçãs recém-cortadas submetidas a UV-C, concluindo que amostras submetidas à radiação no pré-processamento podem aumentar a capacidade de eliminar radicais livres. Resultados semelhantes foram encontrados por Saucedo-Galvez et al. (2021), com suco de maçã homogeneizado a ultra-alta pressão submetido a UV-C e Menaka et al. (2024), goiabas tratadas com UV-C a uma fluência de 2 kJ/m².

O declínio na atividade antioxidante na fase final do armazenamento pode ser atribuído à natureza transitória do estresse induzido por UV-C, ao avanço do amadurecimento, à senescência da fruta e às reações de fotooxidação na presença de luz e oxigênio durante o armazenamento, que favorecem a degradação e a depleção de compostos antioxidantes. Além disso, a dose de radiação aplicada influencia diretamente na estabilidade desses compostos, uma vez que doses não otimizadas para a cultivar ou o estágio de maturação podem limitar seus efeitos ao longo do armazenamento (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; AKWU et al., 2023; PATARO, DONSI E FERRARI, 2015).

3.3.7. Fenólicos totais (CFT)

Os tratamentos de controle e UV5 provocaram uma queda na concentração de

compostos fenólicos ao longo dos dias, ao contrário do tratamento UV10, que apresentou um aumento considerável no décimo quarto dia de armazenamento (Figura 15).

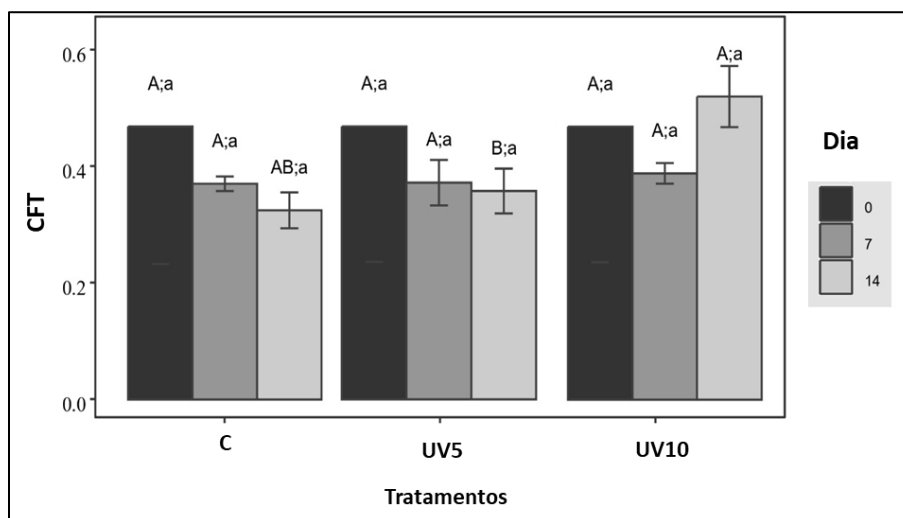


Figura 15. Análise de CFT (g) (controle, UV5 e UV10) ao longo do período de armazenamento.

Isso pode ser explicado pelo fenômeno da hormese, um mecanismo de defesa que modifica a parede celular vegetal após o estresse UV, caracterizado pela síntese de polifenóis secundários (ARCOS-LIMIÑANA; MAESTRE-PÉREZ; PRATS-MOYA, 2025).

No primeiro e no sétimo dia de armazenamento, não foram observadas diferenças significativas, enquanto no décimo quarto dia foram observadas diferenças entre os três tratamentos, conforme sugerem as letras distintas “AB”, “B” e “A”.

Dias et al. (2017), em um estudo com maçãs frescas submetidas a UV-C (4,10 KJ/m²), observaram um aumento de 65,37% no teor de compostos fenólicos após 90 dias de armazenamento em comparação com os outros tratamentos, o que pode indicar que o fenômeno da hormese foi responsável por um aumento na síntese de polifenóis em suas amostras, assim como neste estudo, mesmo com um tempo de armazenamento mais curto. Esse aumento também foi observado por Meneses- Espinosa et al. (2024), que relataram altos níveis de fenólicos, licopeno e atividade antioxidante ao expor tomates à luz UV-C.

Em maçãs recém-cortadas, Yuan et al. (2022) observaram um aumento inicial seguido por um declínio nos níveis de CFT. Em geral, as amostras

apresentaram reduções significativas em comparação com as amostras de controle.

3.3.8. Análise microbiológica

Os resultados obtidos na análise microbiológica são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Avaliação microbiana em maçãs frescas nos tratamentos controle, UV5 e UV10 durante o armazenamento

Tempo (dias)	Tratamento	Bolores e leveduras (log UFC/g)	Bactérias aeróbias mesófilas (log UFC/g)	<i>E. coli</i> (log UFC/g)	<i>Salmonella</i> spp. (log UFC/g)
0	Controle	3,57	2,78	<1,00 est.	Ausência
	UV5	3,00	1,48		
	UV10	2,59	1,47		
7	Controle	2,34	1,30	<1,00 est.	Ausência
	UV5	2,57	1,30		
	UV10	2,51	2,00		
14	Controle	2,95	2,53	<1,00 est.	Ausência
	UV5	1,85	2,08		
	UV10	2,48	1,60		

Foi detectada ausência total de *Salmonella* spp. e valores estimados de *Escherichia coli* abaixo do limite especificado (10^2 /g) pela legislação brasileira vigente (BRASIL, 2002) em todas as amostras. A análise de bolores e leveduras revelou uma redução na carga microbiana nas amostras irradiadas com UV-C durante o armazenamento, tendo o tratamento UV5 apresentado o resultado mais satisfatório, o que aponta para a eficiência da tecnologia no controle desses microrganismos.

Os valores das contagens de bactérias aeróbias mesófilas apresentaram contagens muito próximas entre os tratamentos UV5 e UV10, e para essa análise, em particular, o tratamento controle apresentou melhor resultado demonstrando controle microbiano durante os dias de armazenamento.

Kim, Lee e Yoon (2021) observaram que o tratamento combinado de água eletrolisada acidificada (SAEW) + ácido fumárico (FA) e UV-C levou a reduções de 1,48 log UFC/g (*Staphylococcus aureus*) e 2,41 log UFC/g (*Listeria monocytogenes*)

em maçãs recém-cortadas, quando comparado à sanitização convencional (hipoclorito de sódio a 100 ppm). Resultados positivos em relação ao uso da irradiação também foram encontrados por Shin et al. (2024). Eles relataram que o UV-C, em associação com ácido peracético, causou reduções significativas em *E. coli* O157:H7 (6,04 log UFC/g) e *Listeria monocytogenes* (4,42 log UFC/g) na superfície das maçãs.

Outro estudo analisou o poder de higienização do UV-C contra *E. coli* em tomates, alface e cenouras (237 nm) e relatou uma redução de até 2,7 log UFC/g nessas matrizes (MENESES-ESPINOSA et al., 2024).

3.4. Conclusões

Os resultados obtidos mostram que a aplicação de radiação UV-C em maçãs frescas foi eficaz no controle de microrganismos ao longo do período de armazenamento, sem comprometer os parâmetros de qualidade do produto. Entre os tratamentos avaliados, a dose mais alta de UV-C (UV10) destacou-se por proporcionar melhor preservação da firmeza (9,97 – 12,53 N), da acidez total (0,12 – 0,13 g de ácido málico por 100 g de amostra), teor de compostos fenólicos (28,11 – 51,59 mg Eq de ácido gálico.100 g⁻¹ de extrato) e cor vermelha da casca baseado no parâmetro a^* (8,41 – 16,63), apresentando desempenho superior em comparação com as outras condições estudadas.

Além disso, a exposição à radiação UV-C induziu um estresse fisiológico moderado, capaz de modular vias metabólicas secundárias, favorecendo a biossíntese de compostos fenólicos. Esses efeitos representam uma vantagem significativa do uso dessa tecnologia no contexto da conservação pós-colheita.

De modo geral, os resultados confirmam que a radiação UV-C é uma alternativa não térmica promissora para manter a qualidade e a segurança microbiológica de maçãs frescas durante o armazenamento, reforçando seu potencial para aplicação em sistemas de processamento e conservação de alimentos.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ E-26/201.302.2022), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 311108/2021-0) e INCT Frutas Tropicais (465335/2014-4).

Declaração de Ética

Os autores não têm nada a relatar.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto ao autor correspondente mediante solicitação razoável.

3.5. Referências

- ABDIPOUR, M.; HOSSEINIFARAHI, M.; NASERI, N., "Combination method of UV-B and UV-C prevents post-harvest decay and improves organoleptic quality of peach fruit" *Scientia Horticulturae* 256 (2019): 108564, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.scienta.2019.108564>.
- ABPM. Brazilian Apple Producers Association. Available at: www.abpm.org.br.
- AKWU, A. S. Effect of germicidal short wave-length ultraviolet light on the polyphenols, vitamins, and microbial inactivation in highly opaque apple juice. *Journal of Food Safety*, vol. 43, no. 3, 13037. 2023.
- ARCOS-LIMIÑANA, V.; MAESTRE-PÉREZ, S.; PRATS-MOYA, M. S., "A comprehensive review on ultraviolet disinfection of spices and culinary seeds and its effect on quality" *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 24, no. 1, (2025): 1-29, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1111/1541-4337.70076>.
- ARAÚJO, Kari et al., "Post-harvest characterization of cagaitas subjected to UV-C radiation" *Conciliun* 22, no. 6, (2022): 274–288, 10.53660/CLM-552-643.
- ARGENTA, L. C. et al., "Characterization and quantification of postharvest losses of apple fruit stored under commercial conditions" *HortScience* 56, no. 5, (2021): 608–616, 10.21273/HORTSCI15771-21.
- ARNOLD, M.; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, A., "Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review" *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 21, no. 6, (2022): 5038–5076, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1111/1541-4337.13059>.
- BARRETO, C. F. et al., "Influence of ultraviolet radiation and additives on minimally processed kiwi conservation" *Brazilian Journal of Food Technology* 24 (2021): e2020024, <https://doi.org/10.1590/1981-6723.02420>.
- BARRETO, C. F. et al., "Use of additives in combination with UV-C for the conservation of minimally processed Fuji Suprema apples" *African Journal of Agricultural Research* 11, no. 48, (2016): 4917–4923, 10.5897/AJAR2016.11574.
- BRAZIL, REGULATORY INSTRUCTION - IN No. 161, OF JULY 1, 2022. "Establishes microbiological standards for food". 2022.
- COMPENDIUM OF METHODS FOR THE MICROBIOLOGICAL EXAMINATION OF FOODS. 5. ed. Washington: American Public Health Association (APHA), 995 p. 2015.
- DIAS, T. et al., "Physical-chemical characterization, antioxidant activity, and total phenolic content in Gala apples subjected to different doses of UV-C radiation" *Acta Scientiarum - Agronomy* 39, no. 1, (2017): 67–73, <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i1.30979>.
- FAOSTAT. Food and Agriculture Organization. Available at: www.fao.org.
- FAO. Guidance for Industry: Juice Hazard Analysis Critical Control Point Hazards and Controls Guidance, First Edition. Available at: www.fda.gov.
- GALLON, C. Z. Early pulp softening and its relationship with cell wall modifications in "Golden" papayas. 2010. 111 p. Thesis (Doctorate in Plant Physiology and Biochemistry) -

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

GEORGÉ, S. et al., "Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant derived products" *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53, no. 5, (2005): 1370–1373, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1021/jf048396b>.

HASAN, M. UI et al., "Water Loss: A Postharvest Quality Marker in Apple Storage" *Food and Bioprocess Technology* 17, no. 8, (2024): 2155–2180, <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03305-9>.

IBGE. Brazilian Institute of Geography and Statistics. Available at: www.ibge.gov.br.

ISO 1842. Fruit and vegetable products - Determination of pH. Edition 2 (1991).

ISO 2173. Fruit and Vegetable Products Determination of Soluble Solids Content – Refractometric Method, Int. Organ. Stand, Edition 2 (1978).

KIM, G. H.; LEE, C. L.; YOON, K. S., "Combined hurdle technologies using UVC waterproof LED for inactivating foodborne pathogens on fresh-cut fruits" *Foods* 10, no. 8, (2021): 1712, <https://doi.org/10.3390/foods10081712>.

LA CAVA, E. L. M.; SGROPPO, S. C., "Combined Effect of UV-C Light and Mild Heat on Microbial Quality and Antioxidant Capacity of Grapefruit Juice by Flow Continuous Reactor" *Food and Bioprocess Technology* 12 (2019): 645–653, <https://doi.org/10.1007/s11947-019-2239-1>.

LAUŽIKĖ, K. et al., "The Impact of Growing Conditions on the Shelf Life and Storage Rot of cv. Rubin Apples" *Horticulturae* 10, no. 10, (2024): 1064, <https://doi.org/10.3390/horticulturae10101064>.

MA, Lili et al., "UV-C irradiation delays the physiological changes of bell pepper fruit during storage" *Postharvest Biology and Technology* 180 (2021): 111506, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.postharvbio.2021.111506>.

MANZOCCO, L. et al., "Surface decontamination of fresh-cut apple by UV-C light exposure: Effects on structure, colour and sensory properties" *Postharvest Biology and Technology* 61, no. 2–3, (2011): 165–171, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.postharvbio.2011.03.003>.

MENAKA, M. et al., "UV-C Irradiation Enhances the Quality and Shelf-Life of Stored Guava Fruit via Boosting the Antioxidant Systems and Defense Responses" *Food and Bioprocess Technology* 17, no. 11, (2024): 3704–3715, <https://doi.org/10.1007/s11947-024-03338-8>.

MENDONCA, V. Z. de et al., "Physical-chemical and Biochemical Properties of Rama Forte Persimmons Submitted to UV-C Radiation" *The Natural Products Journal* 7, no. 1, (2017): 75–81, [10.2174/2210315506666161017124034](https://doi.org/10.2174/2210315506666161017124034).

MENESES-ESPINOSA, E. et al., "Advantages and Disadvantages of Using Emerging Technologies to Increase Postharvest Life of Fruits and Vegetables" *Food Reviews International* 40, no. 5, (2024): 1348–1373, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1080/87559129.2023.2212061>.

NICOLAU-LAPEÑA, I. et al., "Ultraviolet Applications to Control Patulin Produced by *Penicillium expansum* CMP-1 in Apple Products and Study of Further Patulin Degradation

Products Formation and Toxicity" *Food and Bioprocess Technology* 16, no. 4, (2023): 804–823, <https://doi.org/10.1007/s11947-022-02943-9>.

OLIVEIRA, P. S. de et al., "Effects of electron-beam (E-beam) irradiation on the postharvest quality of 'golden' papayas" *Food Physics* 2 (2025): 100054, <https://doi.org/10.1016/j.foodp.2025.100054>.

PANTOJA FREIRE, J. O. et al., "UVC light as a strategy for disinfection of hospital air and surfaces" *ACTA Paulista de Enfermagem* 37 (2024): eAPE002191, 10.37689/actaape/2024AO00002191.

PATARO, G.; DONSI, G.; FERRARI, G. Post-harvest UV-C and PL irradiation of fruits and vegetables. *Chemical Engineering Transactions*, [s. l.], vol. 44, p. 31–36, 2015.

PÉREZ-LORENZO, E. et al., "Reduction of lactic acid bacteria and acetic acid bacteria from natural apple cider by UVC irradiation" *Journal of Food Processing and Preservation* 46, no. 11, (2022): e17136, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1111/jfpp.17136>.

PINTO, E. P. et al., "Phenolic compounds are dependent on cultivation conditions in face of UV-C radiation in 'Concord' grape juices (*Vitis labrusca*)" *LWT* 154 (2022): 112681, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112681>.

RAMALINGAM, S. et al., "UV-C treatment elicits resistant responses against *Botrytis cinerea* infection and the improvement of fruit characteristics in grapevines" *Horticulture Environment and Biotechnology* 65, no. 4, (2024): 707-724, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s13580-024-00602-w>.

RE, R. et al., "Antioxidant activity applying and improved ABTS radical cation decolorization assay" *Free Radical Biological and Medicine* 26, no. 9-10, (1999): 1231-1237, [https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/S0891-5849(98)00315-3).

RIIKONEN, J. et al., "Impact of pre-harvest UVC treatment on powdery mildew infection and strawberry quality in tunnel production in Nordic conditions" *Scientia Horticulturae* 338 (2024): 113706, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.scienta.2024.113706>.

RUFINO, M. S. M. et al., "Scientific Methodology: Determination of Total Antioxidant Activity in Fruit by DPPH Free Radical Scavenging" *Embrapa* 127 (2007).

SAUCEDA-GÁLVEZ, J. N. et al., "Combined effects of ultra-high pressure homogenization and short-wave ultraviolet radiation on the properties of cloudy apple juice" *LWT* 136 (2021): 110286, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.lwt.2020.110286>.

SHIN, M. et al., "Application of combined treatment of peracetic acid and ultraviolet-C for inactivating pathogens in water and on surface of apples" *International Journal of Food Microbiology* 411 (2024): 110519, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.ijfoodmicro.2023.110519>.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J.A., "Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents" *Am. J. Enol. Vitic* 16, no. 3, (1965): 144-158, 10.5344/ajev.1965.16.3.144.

TERAO, D. et al., "Control of *Fusarium* rot in Galia melon and preservation of fruit quality with UV-C radiation and hot water treatments" *Tropical Plant Pathology* 46 (2021): 350-359, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s40858-021-00432-6>.

VISUTHIWAN, S.; ASSATARAKUL, K., "Kinetic modeling of microbial degradation and antioxidant reduction in lychee juice subjected to UV radiation and shelf life during cold storage" Food Control 123 (2021): 107770, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.foodcont.2020.107770>.

XIANG, Q. et al., "Effect of UVC light-emitting diodes on apple juice: Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and determination of quality" Food Control 111, (2020): 107082, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.foodcont.2019.107082>.

WEIS, G. L. Device construction for UV-C Ultraviolet Irradiation. Research, Society and Development, v. 11, n. 15, e72111536844, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.36844>.

YUAN, J. et al., "UV-C irradiation delays browning of fresh-cut "Fuji" apples" Journal of Food Processing and Preservation 46, no. 9, (2022): 16338, <https://doi-org.ez30.periodicos.capes.gov.br/10.1111/jfpp.16338>

CAPÍTULO III

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICA E DA SEGURANÇA MICROBIOLÓGICA EM MAÇÃS MINIMAMENTE PROCESSADAS SUBMETIDAS À RADIAÇÃO UV-C

4 CAPÍTULO III: Avaliação da qualidade físico-química e da segurança microbiológica em maçãs minimamente processadas submetidas à radiação UV-C

RESUMO

As maçãs minimamente processadas mantêm em determinadas condições controladas as qualidades sensoriais e nutricionais características da fruta fresca, tornando-as uma opção prática e saudável para o consumo diário. No entanto, apesar da crescente demanda por esse mercado no Brasil e da ampla aceitação do público, a qualidade sensorial e comercial do produto é comprometida pelo escurecimento enzimático, que se intensifica após o corte e os danos mecânicos durante o processamento. Foi avaliada a manutenção da qualidade físico-química e da segurança microbiológica das maçãs minimamente processadas após a exposição à radiação UV-C. As amostras foram expostas por 5 e 7,5 minutos e, em seguida, armazenadas por 8 dias. Os parâmetros físico-químicos analisados foram cor, firmeza, acidez titulável, teor de sólidos solúveis, capacidade antioxidante e compostos fenólicos. Para a avaliação microbiológica, foram realizadas análises para *Salmonella*, *E. coli*, bactérias mesófilas, fungos e leveduras. As amostras irradiadas apresentaram resultados mais satisfatórios em termos de cor, perda de massa e compostos fenólicos, bem como maior controle de microrganismos deteriorantes, reforçando a eficácia da tecnologia UV-C na promoção da segurança microbiológica sem comprometer a qualidade do produto.

Palavras-chave: maçã *freshcut*; qualidade pós colheita; irradiação UV-C; vida útil.

4.1 Introdução

A maçã (*Malus domestica*) é amplamente consumida e cultivada em todo o mundo devido às qualidades sensoriais e alto valor nutricional que possui, especialmente seu significativo teor de fibras, vitaminas C e E, minerais e compostos fenólicos (ARNOLD; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2022). Esses benefícios nutricionais podem ser preservados mesmo em frutas minimamente processadas (submetidas às etapas do processamento mínimo), tornando as maçãs uma opção prática e saudável para o consumo diário. A produção global de maçãs totalizou 97.339.338 toneladas em 2023, com China, Estados Unidos, Turquia, Polônia e Índia figurando entre os principais produtores (FAOSTAT, 2025).

A produção nacional foi estimada em aproximadamente 1,1 milhão de toneladas em 2024, sendo as principais variedades “Gala” e “Fuji”. Isso consolida o país como um importante produtor no Hemisfério Sul (USDA, 2024). Da produção total, 25% são utilizados para a produção de suco de fruta (ABPM, 2023).

Embora ainda esteja em seus estágios iniciais, o segmento brasileiro de frutas minimamente processadas está em crescimento, especialmente no varejo e na restauração, refletindo a demanda por praticidade e alimentação saudável (IBGE, 2023). Nos EUA, cerca de 5% das maçãs vendidas são oferecidas fatiadas, o que corresponde a aproximadamente 100.000 toneladas por ano, sendo 30.000 toneladas destinadas a programas de alimentação escolar (USDA, 2022). Apesar de sua ampla aceitação no mercado consumidor, as qualidades sensoriais e comerciais da fruta são comprometidas pelo escurecimento enzimático, um processo desencadeado principalmente após o corte e danos mecânicos. Esse fenômeno é causado principalmente pelas enzimas polifenoloxidase (PPO) e peroxidase (POD) e é considerado um dos principais obstáculos tecnológicos nesse setor, reconhecido como a principal causa de perda de qualidade e redução da preferência do consumidor (ZHU et al., 2022; KAMRUL, MOROZOVA & SCAMPICCHIO, 2017).

O cloro é tradicionalmente utilizado como sanitizante de frutas e vegetais devido à sua aplicação simples, baixo custo e eficácia bactericida. No entanto, a sua utilização apresenta limitações significativas, como a formação de subprodutos clorados e a redução da atividade bactericida na presença de matéria orgânica. Por conseguinte, várias estratégias, tais como água eletrolisada acidificada, radiação UV-C e ozônio, têm sido investigadas como alternativas ao cloro (KIM; LEE; YOON, 2021; SHIN, NA & KANG, 2024).

Nesse cenário, tecnologias não térmicas, como a radiação UV-C — cujo maior poder antimicrobiano se concentra na faixa de 254 nm —, representam alternativas promissoras. Além de seu efeito antimicrobiano, a radiação UV-C pode ajudar a manter atributos de qualidade, incluindo cor, firmeza e compostos fenólicos, e aumentar a vida útil desses produtos (ARCOS-LIMIÑANA, MAESTRE-PÉREZ; PRATS-MOYA, 2025; ZHANG et al., 2023; KIM, LEE e YOON, 2021). Diante dessas evidências, o presente estudo teve como objetivo avaliar o impacto da radiação UV-C nos atributos físico- químicos e microbiológicos de maçãs minimamente processadas, avaliando sua eficácia como método alternativo de sanitização para prolongar a vida útil e melhorar a segurança do produto.

4.2. Materiais e métodos

4.2.1 Materiais

As maçãs, da variedade Fuji, foram adquiridas em um mercado local no Rio de Janeiro, depois selecionadas, lavadas em água corrente e secas com papel-toalha para remover o excesso de água da superfície. Em seguida, foram minimamente processadas com um cortador de aço inoxidável devidamente esterilizado, sendo cada maçã cortada em oito fatias em forma de meia-lua. As sementes e o caroço foram descartados. As fatias foram submersas em uma solução de ácido ascórbico a 0,03% por 1 minuto e, em seguida, deixadas para secar ao ar à temperatura ambiente. Posteriormente, as amostras foram colocadas em embalagens de polipropileno, com quatro fatias por embalagem (Figura 16). As amostras foram então divididas em três tratamentos: o tratamento A continha amostras controle (sem exposição a UV-C), o segundo (tratamento B) continha amostras expostas à radiação por 5 minutos (UV5) e o terceiro (tratamento C) continha amostras expostas à radiação por 7,5 minutos (UV7,5).



Figura 16. Maçã minimamente processada nos tratamentos controle (A), UV5 (B) e UV7,5 (C) em embalagem de polipropileno ao longo dos dias de armazenamento.

4.2.2 Métodos

Para a exposição à radiação UV-C, utilizou-se um irradiador modelo UV-C 0214/UV-C 0314 da marca Hortifruti (Caxias do Sul, Brasil). As embalagens foram irradiadas por 5 e 7,5 minutos e giradas na metade do período de exposição, permitindo que ambas as faces da embalagem recebessem radiação de forma homogênea. As fluências (kJ/m^2) utilizadas foram calculadas com base na seguinte equação proposta por Weis et al. (2022):

$$D = I \times t,$$

onde:

I é a irradiância e

t é o tempo de exposição

Os experimentos foram realizados com duas réplicas, cada uma delas em triplicata, utilizando um plano fatorial 2K com ponto central. As maçãs foram refrigeradas a 4 °C e analisadas nos dias 0, 2, 4 e 6 de armazenamento. A umidade relativa no interior da câmara de refrigeração foi de 98%.

4.2.2.1. Análises físico-químicas

4.2.2.1.1. Perda de massa

A perda de massa foi determinada calculando a diferença entre a massa fresca inicial e a massa fresca medida diariamente, utilizando uma balança E-line modelo ELP-10 (São Paulo, Brasil). Os resultados foram expressos como percentagem de perda de massa fresca, de acordo com Oliveira et al. (2025).

4.2.2.1.2. Firmeza

Foi determinada utilizando o texturômetro *Stable Micro Systems* TA-XT2 (São Paulo, Brasil), com resultados expressos em Newtons (N), referindo-se à força máxima necessária para que a sonda cilíndrica de 2 mm do equipamento penetrasse (1,0 mm/s) na polpa da maçã (OLIVEIRA et al., 2025).

4.2.2.1.3. Análise de cor instrumental

A medição instrumental da cor da fruta foi realizada utilizando um colorímetro portátil Konica Minolta CR 400 (Sakai, Japão), com leituras da amostra efetuadas em dois pontos ortogonais na polpa da fruta. O método de medição utilizado reflete a cor

real da polpa da maçã (KIM, LEE & YOON, 2021).

4.2.2.1.4. Sólidos solúveis totais (SST)

O teor de SST foi determinado por leitura direta com um refratômetro Atago Pal-1 (Japão), utilizando a polpa de cada amostra. Os resultados foram expressos em graus Brix (ISO 2173:1978).

4.2.2.1.5. Acidez total titulável (ATT)

A análise da ATT foi realizada em triplicata, utilizando um titulador Metrohm Titrino Plus 848 (Herisau, Suíça), de acordo com a norma ISO 1842 (1991). Os resultados foram expressos em g de ácido málico por 100 g de amostra.

4.2.2.1.6. Capacidade antioxidante

A atividade antioxidante foi determinada utilizando o método ABTS+, com os resultados expressos como capacidade antioxidante equivalente a trolox (TEAC).

Para esta extração, as amostras foram preparadas batendo em processador na proporção de 1:1 (fatias de maçã: água). Primeiro, pesaram-se 4 g da amostra num tubo Falcon de 50 mL. Em seguida, pipetou-se 10 mL de metanol a 50% em cada tubo e o conteúdo foi agitado para homogeneizar, após essa etapa, a mistura foi deixada em repouso durante 1 hora. Após este período, a mistura foi centrifugada a 4000 RPM durante 10 minutos para separar as fases. O sobrenadante foi removido e vertido para um balão volumétrico âmbar. A polpa (parte sólida) que permaneceu no tubo, foi tratada com acetona a 70%. Cada tubo foi novamente agitado para homogeneizar o conteúdo e deixado em repouso durante 1 hora. Após este tempo, a mistura foi novamente centrifugada a 4000 RPM durante 10 minutos para separação de fases. O sobrenadante foi então removido e vertido para o mesmo balão volumétrico âmbar, tendo-se adicionado 5 mL de água destilada ao balão. A polpa restante no tubo foi descartada (RUFINO et al., 2007).

Os compostos antioxidantes foram extraídos seguindo o método descrito por Rufino et al. (2007), utilizando metanol a 50% (v/v), seguido de acetona a 70%. Este extrato foi avaliado utilizando o ensaio 2,2-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfônico) (ABTS), e a absorbância foi medida a 734 nm com um espectrofotômetro (Bel Photonics®, Piracicaba, Brasil) (RE et al., 1999). As análises foram realizadas em triplicata, e os resultados são apresentados como μmol de equivalente de trolox por

100 g de amostra.

4.2.2.1.7. Fenólicos totais

O teor total de compostos fenólicos foi determinado utilizando o método espectrofotométrico proposto por Singleton e Rossi (1965), conforme modificado por Georgé et al. (2005). Para a extração, as amostras foram preparadas batendo em processador na proporção de 1:1 (fatias de maçã:água). Em seguida, 2 g dessa amostra foram pesados em um balão volumétrico âmbar de 25 mL, e foram adicionados 25 mL de acetona a 70%. Uma barra magnética foi colocada em cada frasco, e os frascos foram agitados por 30 minutos. Ao final desse período, o conteúdo do frasco foi filtrado. O teor de compostos fenólicos foi determinado utilizando o ensaio de Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Georgé et al. (2005).

Adicionou-se uma alíquota de reagente de Folin-Ciocalteu (2,5 mL a 10 %) a um frasco contendo 500 µL do extrato e deixou-se reagir por 2 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, foram adicionados 2 mL de carbonato de sódio (7,5% p/v), e os frascos foram colocados em banho-maria a 50 °C por 15 minutos, sendo depois resfriados em banho de gelo. A absorbância foi medida a 760 nm utilizando um espectrofotômetro (Shimadzu®, Kyoto, Japão). As análises foram realizadas em triplicata, e os resultados são apresentados em mg de equivalentes de ácido gálico por 100 g de extrato.

4.2.2.1.8. Análise microbiológica

As amostras de maçãs minimamente processadas foram analisadas para *Salmonella* spp. (ISO 6579-1:2017), *Escherichia coli* (Método Oficial AOAC 991.14) e contagem de aeróbios mesófilos, bolores e leveduras, de acordo com o Compêndio de Métodos para o Exame Microbiológico de Alimentos (2015), com limites aceitáveis estabelecidos pela legislação brasileira (Brasil, 2022).

Pesou-se uma amostra de maçã recém-cortada e preparou-se uma diluição de 1:10 em água com peptona a 0,1% estéril, utilizando um saco Stomacher, e homogeneizou-se durante 2 minutos. A partir da diluição inicial, uma alíquota de 100 µL foi semeada em placas de Petri com meio DRBC para análise de bolores e leveduras, seguida de incubação a 25 °C por 120 ± 2h. Outra alíquota de 100 µL da diluição inicial foi semeada em meio PCA para contagem de bactérias aeróbias mesófilas, seguida de incubação a 37 °C durante 48 ± 2h. Após os respectivos

tempos de incubação, as colônias de bolores e leveduras (15 - 150 UFC/mL), e de aeróbios mesófilos (25 - 250 UFC/mL) foram enumeradas.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Perda de massa

As amostras expostas à radiação exibiram menor perda de massa em comparação às amostras controle, com valores iniciais e finais : 0,1608 g – 0,1663 g (controle); 0,1623 g – 0,1233 g (UV5) e 0,1578 g – 0,1196 g (UV7,5). A Figura 17 apresenta o comportamento da perda de massa ao longo do período de armazenamento.

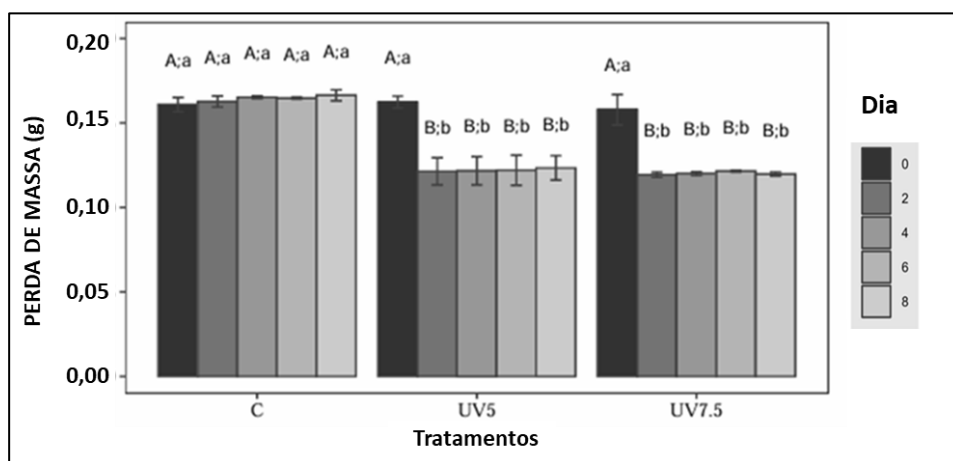


Figura 17. Perda de massa em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

De acordo com o gráfico, observa-se que o tratamento controle (C) manteve valores estáveis ao longo do armazenamento, conforme indicado pelas letras maiúsculas e minúsculas iguais (A;a), evidenciando ausência de diferenças significativas entre os tempos avaliados. Em contraste, os tratamentos UV5 e UV7,5 apresentaram redução significativa da perda de massa após o início do armazenamento, uma vez que os valores do dia 0 diferiram dos demais períodos, conforme demonstrado pela mudança das letras de A para B. Adicionalmente, as letras minúsculas indicam diferenças significativas entre o controle e os frutos tratados com UV-C (a e b), mostrando que a radiação promoveu menores valores de perda de massa em comparação ao controle.

Barreto et al. (2016), ao avaliarem maçãs Fuji submetidas a um processamento mínimo e tratadas com UV-C, observaram menor perda de massa nas amostras irradiadas do que nas amostras controle. Da mesma forma, Chen et al. (2016) constataram que, após 15 dias de armazenamento a 5 °C, as maçãs tratadas com UV-C perderam aproximadamente 12% de sua massa, enquanto as amostras controle perderam cerca de 19%. Isso sugere que a radiação UV-C pode promover a

formação de uma fina película superficial que atua como uma barreira parcial à desidratação durante o armazenamento.

Em contrapartida, Kim, Lee e Yoon (2021), ao investigarem maçãs Fuji minimamente processadas armazenadas durante sete dias, não observaram uma diferença significativa na perda de massa entre os frutos irradiados e os controle, observando que os resultados podem estar relacionados à dose aplicada, às condições e ao tempo de armazenamento e às características fisiológicas da cultivar. A menor perda de massa observada nas frutas submetidas à radiação UV pode estar associada à atenuação dos processos fisiológicos pós- colheita, especialmente à redução das taxas respiratórias e de transpiração. Este efeito contribui para a diminuição da perda de água e, conseqüentemente, para a manutenção da integridade estrutural e da qualidade das frutas durante o armazenamento (ABDIPOUR; HOSSEINIFARAH; NASERI, 2019).

4.3.2. Firmeza

A firmeza é um aspecto de qualidade importante para os consumidores, uma vez que indica o grau de maturação da fruta (ARNOLD; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, 2022). A Figura 18 mostra a firmeza observada nos três tratamentos.

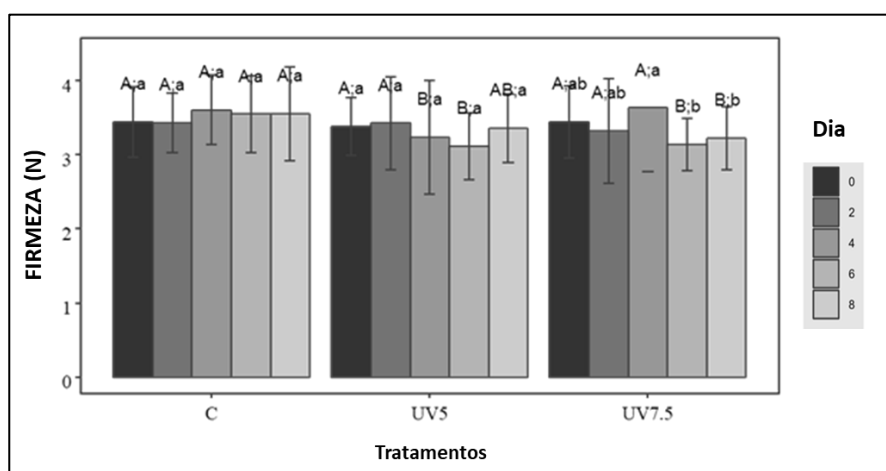


Figura 18. Análise da firmeza em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

O tratamento controle apresentou valores de firmeza (3,44 – 3,55 N) relativamente estáveis ao longo do período de armazenamento, com um ligeiro aumento no quarto dia. Os tratamentos UV5 e UV7,5 exibiram redução progressiva na força utilizada na análise, 3,38 N – 3,35 N e 3,44 N – 3,22 N respectivamente,

seguida de um ligeiro aumento no oitavo dia de armazenamento e, entre eles, UV7,5 apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$) quando comparado ao tratamento controle, de acordo com as letras “a” e “b” exibidas no gráfico.

Rios de Souza et al. (2020), ao avaliarem maçãs armazenadas durante 12 semanas, observaram uma perda gradual de firmeza tanto na casca como na polpa da fruta, independentemente da aplicação de radiação, com um padrão de variação muito semelhante entre os tratamentos avaliados. Da mesma forma, Gomez et al. (2015), ao investigar maçãs minimamente processadas submetidas a radiação UV-C, não identificaram quaisquer efeitos adversos na firmeza em comparação com as amostras controle. Estes autores concluíram que a aplicação de UV-C pode ser utilizada como estratégia para prolongar o prazo de validade das maçãs recém-cortadas, com impacto mínimo ou nulo na textura da fruta.

A redução da firmeza observada durante a transição da maturação para a senescência está geralmente associada às enzimas responsáveis pela despolimerização e solubilização dos componentes da parede celular. Este processo enfraquece os tecidos, resultando num amolecimento progressivo da fruta. Para além de comprometer a textura e a qualidade sensorial, a perda de firmeza tem um impacto negativo na vida útil e na comercialização, uma vez que está diretamente relacionada com a aceitação por parte do consumidor (MENAKA et al., 2024; GALLON et al., 2010).

4.3.3. Análise de cor instrumental

De acordo com a Figura 19 observa-se que o tratamento controle apresentou uma redução (74,8-72,5) no brilho (L^*) das amostras ao longo do período de armazenamento, indicando um escurecimento progressivo. Em contrapartida, os tratamentos UV5 (74,8-75,4) e UV7,5 (74,9-75,4) mantiveram uma coloração mais clara. Especificamente, para UV7,5, não se observou diferença significativa ($p > 0,05$) entre os momentos avaliados (apenas letra “A”), ao contrário dos outros tratamentos (letras “A”, “B” e “C”). No entanto, considerando o efeito do armazenamento, observou-se uma diferença significativa ($p \leq 0,05$) ao longo dos dias para os três tratamentos (“a”, “b”, “c” e “d”).

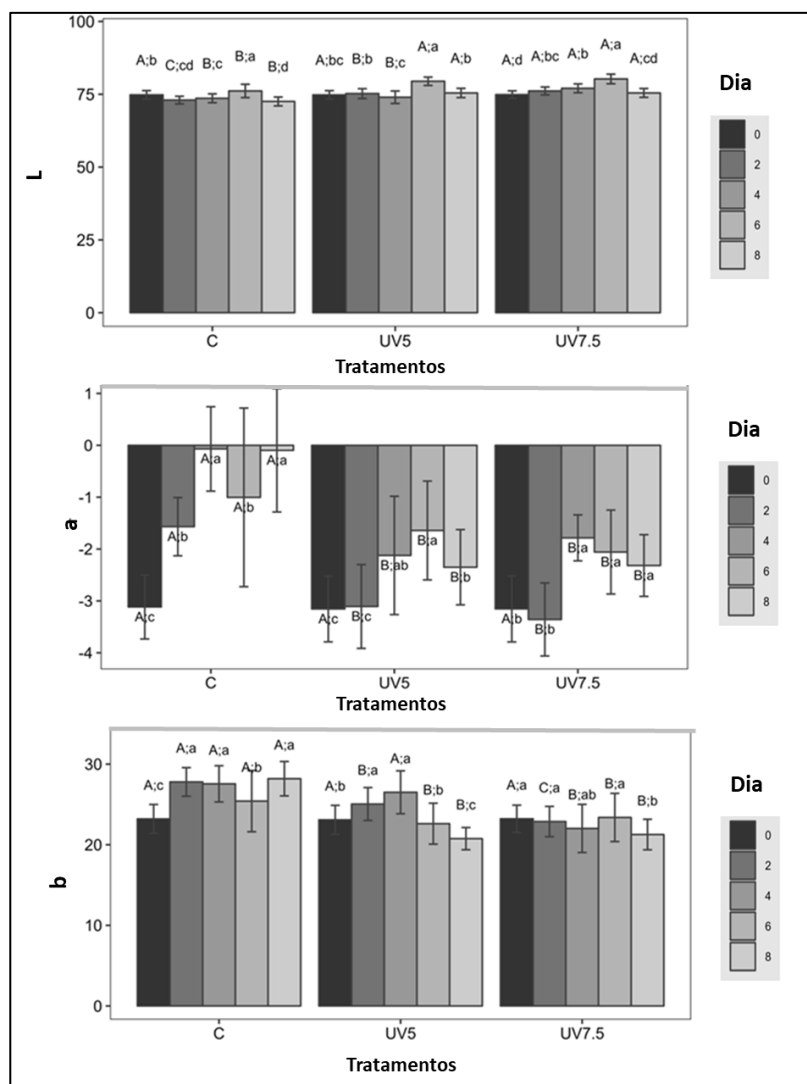


Figura 19. Análise dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

Para o parâmetro a^* , observou-se uma diferença significativa entre os tratamentos expostos à radiação UV-C, de acordo com a variação nas letras “A” e “B” exibidas, bem como ao longo do período de armazenamento para todos os tratamentos onde encontram-se as letras “a”, “b” e “c”. Neste parâmetro a maior redução observada foi no tratamento controle (-3,11 para -0,09).

Para o parâmetro b^* , apenas o tratamento controle não apresentou diferença significativa ($p > 0,05$) com a letra “A” em todos os dias, enquanto se observaram variações nos tratamentos com UV-C, onde foram exibidas as letras “A”, “B” e “C”. Além disso, observaram-se diferenças significativas ($p \leq 0,05$) em todos os tratamentos para este parâmetro ao longo do período de armazenamento (letras “a”, “b” e “c”).

O índice de escurecimento (Figura 20), que mede a intensidade do

escurecimento nas amostras durante o armazenamento, é calculado a partir dos parâmetros de cor L^* , a^* e b^* . Os resultados mostraram valores mais baixos do índice de escurecimento para as amostras irradiadas, corroborando conclusões anteriores relativas ao parâmetro de claridade (L^*), nas quais os tratamentos com UV-C mantiveram melhor a coloração clara.

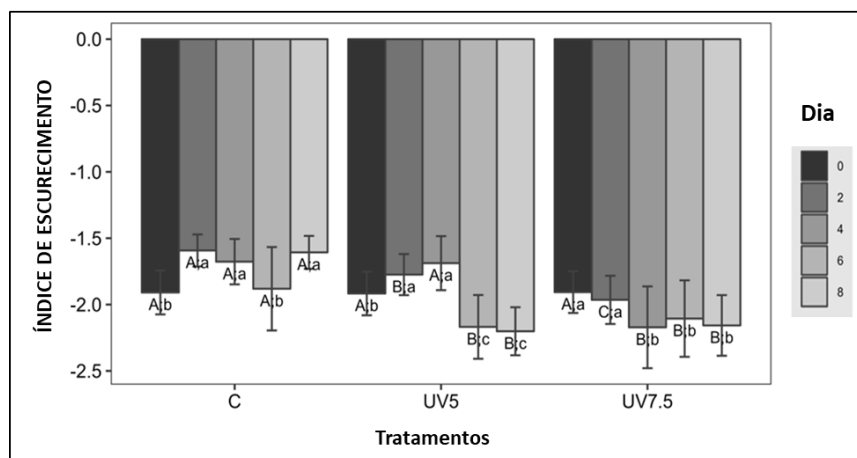


Figura 20. Análise do índice de escurecimento em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

O tratamento controle (-1,6 a -1,9) apresentou os maiores valores do índice de escurecimento ao final do armazenamento. O tratamento UV5 (-1,6 a -2,2) apresentou uma das maiores reduções no índice ao longo dos dias e UV7,5 (-1,9 a -2,1), com comportamento semelhante a UV5 porém alcançando a estabilidade no quarto dia de armazenamento.

Resultados semelhantes foram relatados por Chen et al. (2016), que observaram taxas mais baixas de escurecimento em maçãs minimamente processadas submetidas à radiação UV-C durante o armazenamento. Além disso, Kim, Lee e Yoon (2021) constataram que as frutas tratadas com UV-C apresentaram valores de luminosidade (L^*) significativamente mais elevados do que as amostras de controle, indicando que essa tecnologia pode ajudar a reduzir o escurecimento e a preservar melhor a aparência visual do produto durante o armazenamento.

4.3.4. Sólidos solúveis totais (SST)

Os valores obtidos na análise de SST (C: 7,56 – 7; UV5: 6,4 – 6,18; UV7,5: 6,34 – 6,35) (Figura 21) mostraram equilíbrio entre os tratamentos. O tratamento controle

diferiu dos tratamentos irradiados, no dia 0, de acordo com as letras apresentadas (“A” e “B”). Durante os dias de armazenamento, apenas UV7,5 não apresentou diferença significativa (somente letra “a”) ($p > 0,05$).

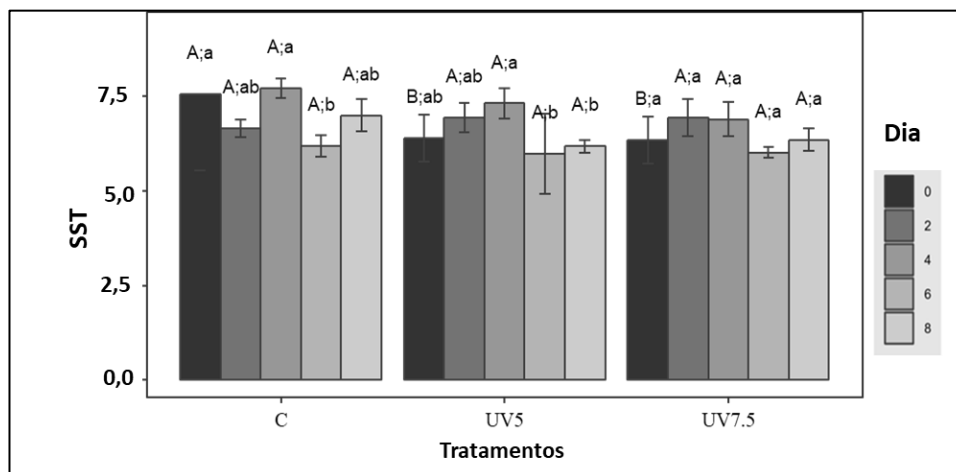


Figura 21. Comportamento de SST em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

Estudos indicam que o tratamento com UV-C não altera significativamente o teor de sólidos solúveis, quer imediatamente ou após 24 horas à aplicação da irradiação, onde as amostras tratadas apresentaram uma evolução semelhante às amostras não irradiadas (NICOLAU-LAPEÑA et al., 2023; SYAMALADEVI et al., 2015). Em estudos com maçãs submetidas à radiação e armazenadas por até 12 semanas, Rios de Souza et al. (2020) observaram que a taxa de variação dos sólidos solúveis foi muito semelhante entre os frutos tratados e o controle, atribuindo isso à degradação natural da fruta, em vez do impacto direto da tecnologia UV-C.

4.3.5. Acidez total titulável (ATT)

Os três tratamentos avaliados apresentaram comportamento semelhante nos valores de acidez (C: 0,11 – 0,13; UV5: 0,10 – 0,15; UV7,5: 0,10 – 0,18) (Figura 22), demonstrando relativa estabilidade ao longo do período de armazenamento. Observou-se uma diminuição nos valores até o quarto dia, seguida por um aumento a partir do sexto dia nas amostras expostas à radiação UV- C. Não foi encontrada diferença significativa no tratamento controle (letra “A”) ($p > 0,05$) diferentemente dos tratamentos irradiados (letras “A” e “B”) ($p \leq 0,05$). No entanto, observou-se uma variação significativa nos valores de acidez ao longo do período de armazenamento (letras “a” e “b”) ($p \leq 0,05$) nos tratamentos controle e UV5.

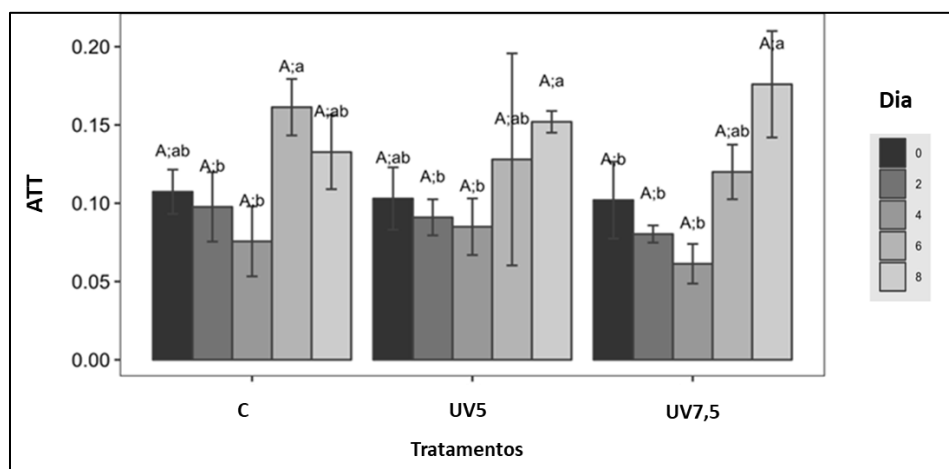


Figura 22. Comportamento de ATT em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

Pataro, Donsi e Ferrari (2015) relataram que as amostras de maçã expostas à radiação UV-C apresentaram valores de acidez titulável semelhantes aos das amostras controle, indicando que essa tecnologia não causa alterações significativas nessa propriedade físico-química.

4.3.6. Capacidade antioxidante (método ABTS+)

Não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (letra “A”) ($p > 0,05$) (Figura 23). No entanto, ao longo do período de armazenamento, o tratamento UV5 apresentou variação significativa (letras “a” e “b”) ($p \leq 0,05$).

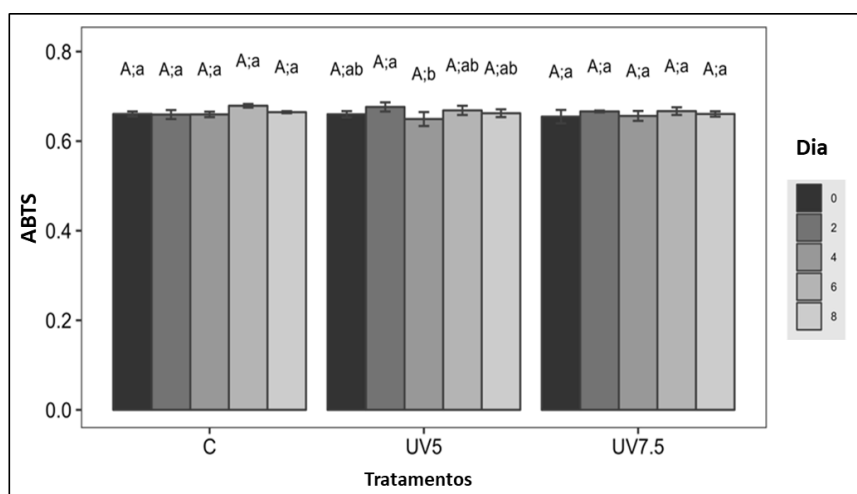


Figura 23. Análise da capacidade antioxidante em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

Em estudos com maçãs minimamente processadas, Kim, Lee e Yoon (2021) constataram que o tratamento com UV-C aumentou significativamente a atividade antioxidante nas amostras irradiadas, em comparação com os grupos controles.

4.3.7. Fenólicos totais (CFT)

Os resultados mostraram uma diferença significativa entre o tratamento controle e o tratamento UV7,5 (letras “A” e “B”) ($p \leq 0,05$). Ao longo do período de armazenamento, observou-se uma variação significativa entre os três tratamentos (letras “a” e “b”) ($p \leq 0,05$). Para a concentração de compostos fenólicos, os tratamentos controle e UV5 seguiram tendências semelhantes, com um decréscimo inicial (controle: 32,5 – 8,8; UV5: 32,5 – 15,2) seguido de um aumento (controle: 8,8 - 12,1; UV5: 15,2 - 15,6) no oitavo dia de armazenamento. Em contrapartida, o tratamento UV7,5 apresentou um aumento na concentração destes compostos (32,5 – 11,4 até o quarto dia; 14,2 - 16,8 do sexto ao oitavo dia) iniciando no sexto dia de armazenamento (Figura 24), indicando uma resposta diferente em comparação com os outros tratamentos durante o período avaliado.

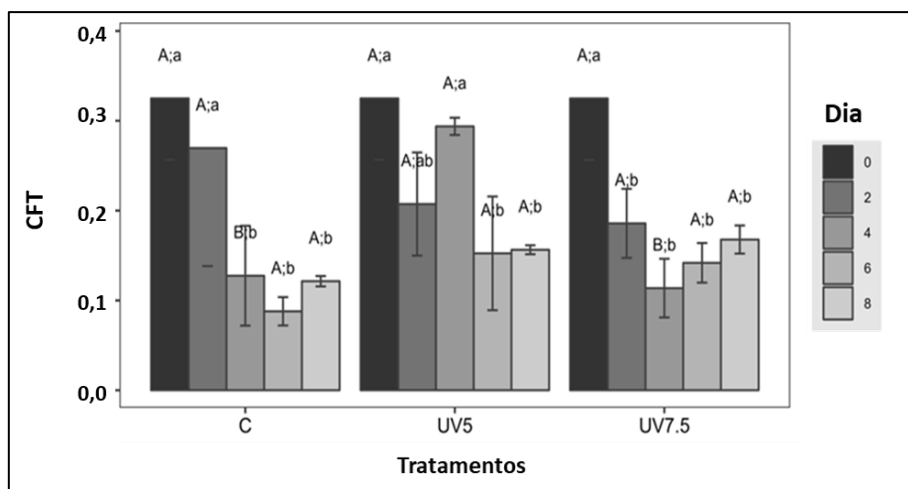


Figura 24. Análise de CFT(g) em maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

Isto pode ser explicado pelo fenômeno da hormese, um mecanismo de defesa que altera a parede celular vegetal após o estresse UV e se caracteriza pela síntese de polifenóis secundários (ARCOS-LIMIÑANA; MAESTRE-PÉREZ; PRATS-MOYA, 2025).

Em contrapartida, Yuan et al. (2022) observaram que os níveis de CFT em maçãs recém-cortadas primeiro aumentaram e então diminuíram.

4.3.8. Análise microbiológica

Para os estudos microbiológicos, bolores e leveduras, *E. coli*, mesófilos e *Salmonella* spp foram analisados. Os resultados da análise microbiológica são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Avaliação microbiana de maçãs minimamente processadas nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5 durante o armazenamento.

Tempo (dias)	Tratamento	Bolores e leveduras (log UFC/g)	Bactérias aeróbias mesófilas (log UFC/g)	<i>E. coli</i> (log UFC/g)	<i>Salmonella</i> spp. (log UFC/g)
0	Controle	3,36	2,00 est.	<1,00 est.	Ausência
	UV5	2,40	2,48 est.		
	UV7,5	2,39	2,47 est.		
2	Controle	2,40	2,54 est.	<1,00 est.	Ausência
	UV5	2,74	2,30 est.		
	UV7,5	2,00	2,00 est.		
4	Controle	2,40	3,00 est.	<1,00 est.	Ausência
	UV5	2,00	2,74 est.		
	UV7,5	<2,00	2,00 est.		
6	Controle	1,86	2,69 est.	<1,00 est.	Ausência
	UV5	2,00	3,84		
	UV7,5	2,30	2,40 est.		

As análises microbiológicas não detectaram *Salmonella* spp. em nenhuma das amostras avaliadas, e os valores de *Escherichia coli* permaneceram abaixo dos limites estabelecidos (10^2 /g) pela legislação brasileira vigente (BRAZIL, 2002), indicando a conformidade microbiológica do produto. No que diz respeito às contagens de bolores e leveduras, as amostras tratadas com radiação UV-C apresentaram um controle da carga microbiana com redução na contagem dos microrganismos considerando o primeiro e último dia de armazenamento, demonstrando o efeito da tecnologia ao estabilizar a multiplicação destes microrganismos. Para a contagem de microrganismos mesófilos, os valores mantiveram-se mais estáveis no tratamento UV7,5 durante o armazenamento, enquanto as amostras controle e UV5 apresentaram um aumento progressivo da população microbiana.

Estudos demonstram que a radiação UV-C é altamente eficaz na redução de microrganismos patogênicos e causadores de deterioração nas maçãs. A tecnologia também é eficaz no controle de fungos e bolores, tais como *Penicillium expansum* (bolor azul), com reduções de até 1,8 log UFC/g. Em maçãs inoculadas com *Colletotrichum gloeosporioides*, a aplicação de UV-C diminuiu significativamente o diâmetro das lesões e retardou o amolecimento da fruta (Phonyian et al., 2021; Syamaladevi et al., 2015). Também foram observados resultados positivos quando a radiação UV-C é combinada com outros agentes higienizantes. Kim, Lee e Yoon (2021) relataram que o tratamento combinado com água eletrolisada acidificada (SAEW), ácido fumárico (FA) e UV-C, reduziu o *Staphylococcus aureus* em 1,48 log UFC/g e a *Listeria monocytogenes* em 2,41 log UFC/g em maçãs minimamente processadas, em comparação com a higienização convencional com hipoclorito de sódio (100 ppm).

4.3.9. Visão geral dos resultados

O gráfico no formato de Análise de Componentes Principais (ACP) (Figura 25) visualiza conjuntos de dados complexos com múltiplas variáveis, projetando-os em um espaço bidimensional. Essa abordagem ajuda a identificar padrões, tendências e possíveis valores atípicos e, quanto mais próximo do vetor sinalizado com a análise está o tratamento, melhor foram os resultados encontrados.

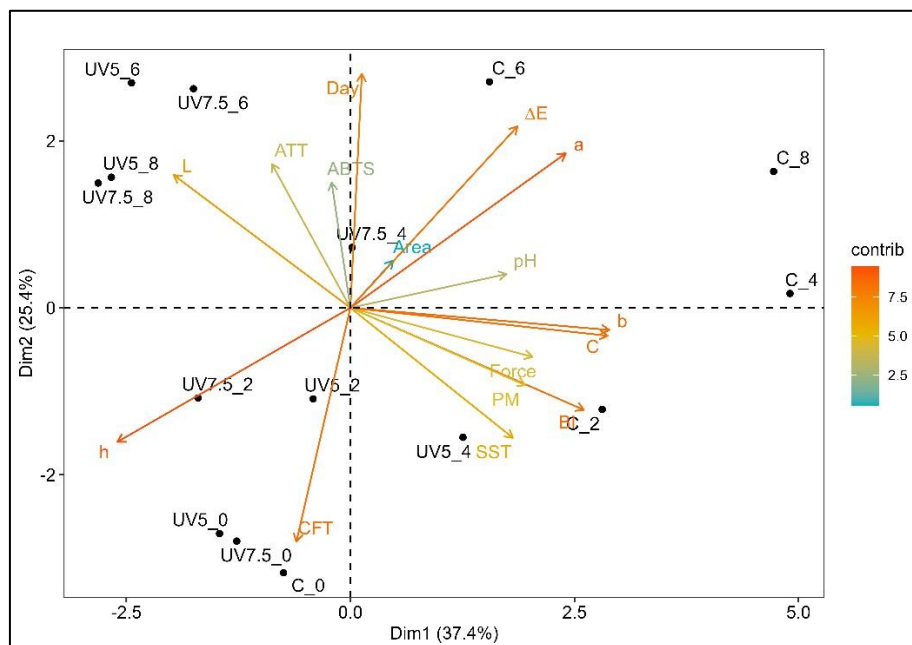


Figura 25. Biplot da análise de componentes principais (PC) para amostras de maçãs minimamente processadas, com interpretação dos resultados relativos à perda de massa, firmeza, cor, SST, ATT, capacidade antioxidante e compostos fenólicos totais nos tratamentos controle, UV5 e UV7,5.

A representação gráfica reforça e integra os resultados discutidos anteriormente, destacando o desempenho superior dos tratamentos irradiados (UV5 e UV7,5), que apresentaram melhores resultados em perda de massa, cor e teor fenólico total em comparação com o controle.

A análise de componentes principais (PCA) corroborou a estabilidade físico-química observada, onde os tratamentos UV5 e UV7.5 demonstraram uma trajetória de conservação de atributos de textura e compostos bioativos (CFT e ABTS+) superior ao controle ao longo dos 8 dias de estocagem, conforme evidenciado pela proximidade vetorial dessas amostras no biplot.

4.4. Conclusões

Os tratamentos com UV-C, nas condições UV5 e UV7,5, apresentaram desempenho superior ao do grupo de controle na preservação da qualidade das amostras. As amostras irradiadas mantiveram melhor o brilho, enquanto o grupo de controle apresentou maior escurecimento durante o armazenamento. Além disso, as amostras tratadas com UV-C apresentaram menor perda de massa, o que pode ser atribuído à diminuição da atividade enzimática relacionada à degradação da parede celular, resultando em menor desidratação e melhor preservação da integridade estrutural do tecido.

O tratamento UV7,5 destacou-se entre as condições avaliadas, apresentando uma concentração final mais elevada de compostos fenólicos em comparação tanto com o controle quanto com o UV5, sugerindo uma possível indução de mecanismos metabólicos associados à resposta ao estresse fisiológico. No que diz respeito ao controle de microrganismos deteriorantes, esse tratamento também se mostrou mais eficaz, promovendo um maior controle da multiplicação microbiana durante o período de armazenamento, conforme indicado na contagem de bactérias aeróbias mesófilas e fungos e leveduras.

De modo geral, os resultados destacam o potencial da radiação UV-C, nos tratamentos UV5 e UV7,5, como uma estratégia promissora para a conservação de maçãs minimamente processadas. Essas descobertas reforçam a eficácia da tecnologia UV-C na promoção da segurança microbiológica sem comprometer a qualidade do produto.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código de Financiamento 001), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ, concessão E-26/201.302/2022), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, concessão 311108/2021-0) e pelo INCT Frutas Tropicais (bolsa 465335/2014-4).

Declaração de Ética

Os autores não têm nada a relatar.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto ao autor correspondente, mediante solicitação razoável.

4.5. Referências

ABDIPOUR, M.; HOSSEINIFARAHI, M.; NASERI, N. Combination method of UV-B and UV-C prevents post-harvest decay and improves organoleptic quality of peach fruit. *Scientia Horticulturae*, v. 256. 2019.

ARCOS-LIMIÑANA, V.; MAESTRE-PÉREZ, S.; PRATS-MOYA, M. S. A comprehensive review on ultraviolet disinfection of spices and culinary seeds and its effect on quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. John Wiley and Sons Inc. 2025.

ARNOLD, M.; GRAMZA-MICHAŁOWSKA, A. Enzymatic browning in apple products and its inhibition treatments: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 21, n. 6. 2022. DOI:10.1111/1541-4337.13059.

BARRETO, C. F. et al. Use of additives in combination with UV-C for the conservation of minimally processed Fuji Suprema apples. *African Journal of Agricultural Research*, v. 11, n. 48, p. 4917–4923. 2016.

BRAZIL, REGULATORY INSTRUCTION - IN No. 161, OF JULY 1, 2022. Establishes microbiological standards for food. 2022.

CHEN, C. et al. Effect of citric acid combined with UV-C on the quality of fresh-cut apples. *Postharvest Biology and Technology*, v. 111, p. 126-131, 2016. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.08.005.

GALLON, C. Z. Early pulp softening and its relationship with cell wall modifications in "Golden" papayas. 2010. 111 p. Thesis (Doctorate in Plant Physiology and Biochemistry) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

GEORGÉ, S. et al. Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant derived products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 53, n. 5, p. 1370–1373. 2005. DOI: 10.1021/jf048396b.

GÓMEZ, P. et al. Potential of UV-C Light for Preservation of Cut Apples Fortified with Calcium: Assessment of Optical and Rheological Properties and Native Flora Dynamics. *Food and Bioprocess Technology*, v. 8, p. 1890–1903, 2015. DOI: 10.1007/s11947-015-1545-5.

ISO 1842. Fruit and vegetable products - Determination of pH. Edition 2 (1991).

ISO 2173. Fruit and Vegetable Products Determination of Soluble Solids Content – Refractometric Method, Int. Organ. Stand, Edition 2 (1978).

KAMRUL H. S. M., MOROZOVA, K., SCAMPICCHIO, M. Effects of ascorbic acid and light on reactions in fresh apples cut by microcalorimetry. *Thermochimica Acta*, v. 649, p. 63-68. 2017. DOI: 10.1016/j.tca.2017.01.008.

KIM, G. H.; LEE, C. L.; YOON, K. S. Combined hurdle technologies using UVC waterproof LED for inactivating foodborne pathogens on fresh-cut fruits. *Foods*, v. 10, n. 8. 2021.

MENAKA, M. et al. UV-C Irradiation Enhances the Quality and Shelf-Life of Stored Guava Fruit via Boosting the Antioxidant Systems and Defense Responses. *Food and Bioprocess Technology*. 2024.

NICOLAU-LAPEÑA, I. et al. Ultraviolet Applications to Control Patulin Produced by *Penicillium expansum* CMP-1 in Apple Products and Study of Further Patulin Degradation Products Formation and Toxicity. Food and Bioprocess Technology, v. 16, p. 804–823, 2023. DOI: 10.1007/s11947-022-02943-9.

OLIVEIRA, P. S. de et al. Effects of electron-beam (E-beam) irradiation on the postharvest quality of 'golden' papayas. Food Physics, v. 2, p. 100054. 2025.

RE, R. et al. Antioxidant activity applying and improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biological and Medicine, v. 26, n. 9-10, 1231-1237. 1999. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

RIOS DE SOUZA, V. et al. A comparative study on the inactivation of *Penicillium expansum* spores on apple using light emitting diodes at 277 nm and a low-pressure mercury lamp at 253.7 nm. Food Control, v. 110, 107039, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.10703>.

RUFINO, M. S. M. et al. Scientific Methodology: Determination of Total Antioxidant Activity in Fruit by DPPH Free Radical Scavenging. Embrapa 127. 2007.

SHIN, M.; NA, G.; KANG, J.; KANG, D. Application of combined treatment of peracetic acid and ultraviolet-C for inactivating pathogens in water and on surface of apples. International Journal of Food Microbiology, v. 411, p. 110519. 2024.

SYAMALADEVI, R. et al. Ultraviolet-C light inactivation of *Penicillium expansum* on fruit surfaces. Food Control, v. 50, p. 297-303, 2015. DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.09.006

WEIS, G. L. Device construction for UV-C Ultraviolet Irradiation. Research, Society and Development, v. 11, n. 15, e72111536844, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.36844>.

YUAN, J. et al. UV-C irradiation delays browning of fresh-cut "Fuji" apples. Journal of Food Processing and Preservation, v. 46, n. 9, 1. 2022.

CAPÍTULO IV

**TRATAMENTO COM RAIOS ULTRAVIOLETA C COMBINADO COMO
ESTRATÉGIA NÃO TÉRMICA PARA MELHORAR A SEGURANÇA
MICROBIOLÓGICA E A QUALIDADE DO SUCO DE MAÇÃ CLARIFICADO**

5 CAPÍTULO IV: Tratamento com raios ultravioleta c combinado como estratégia não térmica para melhorar a segurança microbiológica e a qualidade do suco de maçã clarificado

RESUMO

O suco de maçã, assim como a fruta fresca, contém altos níveis de compostos bioativos, incluindo polifenóis, flavonoides e antioxidantes. Além disso, o encaminhamento de frutas que não atendem aos padrões comerciais para a indústria de processamento tem se mostrado uma estratégia eficaz para reduzir o desperdício. No entanto, apesar de seu valor nutricional, o suco constitui um meio propício para a multiplicação microbiana, tornando necessário o uso de tecnologias que garantam sua qualidade e segurança. Nesse contexto, o presente estudo avaliou a preservação da qualidade físico-química e da segurança microbiológica do suco de maçã clarificado submetido aos seguintes tratamentos: controle –, controle +, UV5 e UV7,5. As amostras foram expostas à radiação UV-C por 5 e 7,5 minutos e armazenadas por 6 dias. Os parâmetros físico-químicos analisados incluíram cor, sólidos solúveis totais (SST), acidez titulável total (ATT) e compostos fenólicos. A avaliação microbiológica incluiu análises de *Salmonella*, *Escherichia coli*, bactérias mesófilas e psicrófilas, além de bolores e leveduras. Os tratamentos com UV-C não causaram alterações indesejáveis na cor nem comprometeram atributos essenciais de qualidade, como SST e ATT. Além disso, observou-se um aumento no teor de compostos fenólicos nas amostras irradiadas. Do ponto de vista microbiológico, o tratamento UV5 proporcionou maior controle da multiplicação dos microrganismos deteriorantes (bolores e leveduras) em comparação aos tratamentos controle. De modo geral, a radiação UV-C provou ser uma estratégia promissora para garantir a segurança microbiológica e manter a qualidade do suco de maçã clarificado, sem os efeitos negativos associados aos tratamentos térmicos convencionais.

Palavras-chave: *Malus domestica*; segurança dos alimentos; processamento não térmico; radiação UV-C; 254 nm.

5.1 Introdução

A maçã é uma das frutas mais cultivadas e consumidas em todo o mundo, amplamente utilizada para consumo *in natura* e como matéria-prima essencial nas indústrias de bebidas e alimentos processados (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019).

O suco de maçã, assim como a própria fruta, contém altos níveis de compostos benéficos à saúde, incluindo polifenóis, flavonoides e antioxidantes. O ácido málico é o principal ácido orgânico presente e é responsável pela acidez característica que contribui para o equilíbrio do sabor e a conservação do produto. No entanto, apesar de seu valor nutricional, o suco também contém nutrientes que podem promover a multiplicação microbiana, tornando necessário o uso de estratégias tecnológicas para garantir a qualidade e a segurança do produto (CASCO et al., 2025; GABRIEL & ANCOG, 2019; GOUMA et al., 2015b).

Um dos principais desafios na cadeia de produção de frutas e hortaliças são as perdas pós-colheita, estimadas entre 20% e 30% da produção global, devidas principalmente aos padrões estabelecidos pelo mercado (cor, formato entre outros), aos danos causados durante o manuseio e às ineficiências nas cadeias de abastecimento (CASCO et al., 2025). Nesse contexto, o encaminhamento de frutas que não atendem aos padrões comerciais para a indústria de processamento tem se mostrado uma alternativa importante para a redução do desperdício.

No mercado internacional, o suco de maçã é muito popular, especialmente nos países desenvolvidos, ocupando o terceiro lugar no mercado de sucos de fruta e néctares da União Europeia (GOUMA et al., 2015b). Pela sua ampla distribuição global, os sucos industrializados requerem tratamentos térmicos ou não térmicos para garantir a segurança microbiológica do produto (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019). Na Argentina, por exemplo, a produção anual de maçãs é de aproximadamente 600.000 toneladas, das quais cerca de 40% (240.000 toneladas) são classificadas como “calibre não comercial”, principalmente devido a defeitos no tamanho, na forma ou na coloração dos frutos. Para evitar perdas, grande parte dessa produção é direcionada à indústria de processamento para a fabricação de sucos e purês (CASCO et al., 2025).

No Brasil, a produção de maçã atingiu 1.183.794 toneladas, sendo o estado de Santa Catarina o maior produtor, responsável por cerca de 48% da área plantada do país, seguido pelos estados do Rio Grande do Sul, Paraná, São Paulo e Minas Gerais. As variedades mais consumidas em todo o país são ‘Gala’ e ‘Fuji’ (ABPM, 2023;

IBGE,2023).

A radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) é uma tecnologia de processamento não térmico que se tornou popular na indústria alimentícia como alternativa à pasteurização tradicional, especialmente para sucos de frutas. Ela opera na faixa de 200 a 280 nm do espectro ultravioleta, com eficácia antimicrobiana máxima tipicamente entre 250 e 270 nm; 254 nm é o comprimento de onda padrão comumente utilizado para o tratamento de sucos. A radiação penetra nas membranas celulares e é absorvida pelas bases nitrogenadas do DNA microbiano, bloqueando a transcrição e a replicação do DNA, o que resulta na incapacidade de reprodução e, eventualmente, na morte celular (SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019; TREMARIN, BRANDÃO E SILVA, 2017; GÁYAN et al., 2015; GOUMA et al., 2015a).

A radiação UV-C é uma tecnologia de processamento não térmica promissora, que oferece menor consumo de energia do que os tratamentos térmicos convencionais, além de facilidade de operação e manutenção, sem geração de resíduos tóxicos. No entanto, sua principal limitação é a reduzida profundidade de penetração em matrizes líquidas com alta turbidez ou altos coeficientes de absorção, onde as partículas em suspensão podem atuar como barreiras à radiação, protegendo os microrganismos e comprometendo a eficácia do processo (CASCO et al., 2025; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019; GABRIEL, 2015; GOUMA et al., 2015a; GOUMA et al., 2015b).

Dada a crescente demanda por bebidas seguras e nutritivas que mantenham suas características sensoriais, é importante investigar tecnologias alternativas que garantam a estabilidade microbiológica sem comprometer a qualidade do produto. Nesse contexto, este estudo propõe avaliar o efeito da exposição à radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) em amostras de suco de maçã clarificado, com o objetivo de avaliar seu potencial para manter as características físico-químicas e sensoriais, garantindo ao mesmo tempo a segurança microbiológica da bebida.

5.2. Materiais e métodos

5.2.1 Materiais

As maçãs, da variedade Fuji, foram adquiridas em um mercado local no Rio de Janeiro, depois selecionadas, lavadas em água corrente, higienizadas com hipoclorito de sódio a 200 ppm, enxaguadas com água corrente e secas à temperatura ambiente para remover o excesso de umidade da superfície (etapas comuns ao processamento de suco). Em seguida, o suco de maçã foi extraído utilizando um extrator Omega Juicer Cold Press de 200 W. O material extraído foi dividido em quatro tratamentos: o primeiro continha apenas a fruta processada (controle -); o segundo continha fruta processada com adição da enzima pectinase e ácido ascórbico (0,03%) (controle +); o terceiro continha a fruta processada com adição da enzima pectinase e ácido ascórbico (0,03%), a mistura foi submetida à radiação UV-C por 5 minutos (UV5); e o quarto continha a fruta processada com adição da enzima pectinase e ácido ascórbico (0,03%), a mistura foi submetida à radiação UV-C por 7,5 minutos (UV7,5)

Ao material extraído (suco), foi adicionada a enzima pectinase com o objetivo de reduzir a viscosidade e promover uma clarificação eficiente, em seguida o suco foi colocado em banho-maria a 40°C por 1 hora para esfriar. Posteriormente, adicionou-se ácido ascórbico (0,03%) e o suco ficou em repouso por 1 minuto, seguido do envase em embalagens tipo pouchet valvular de 200 mL (Figura 26). As embalagens foram armazenadas em câmara refrigerada a 4 °C e as análises foram realizadas após 0, 1, 3 e 5 dias de armazenamento. A umidade relativa dentro da câmara refrigerada foi de 98%.

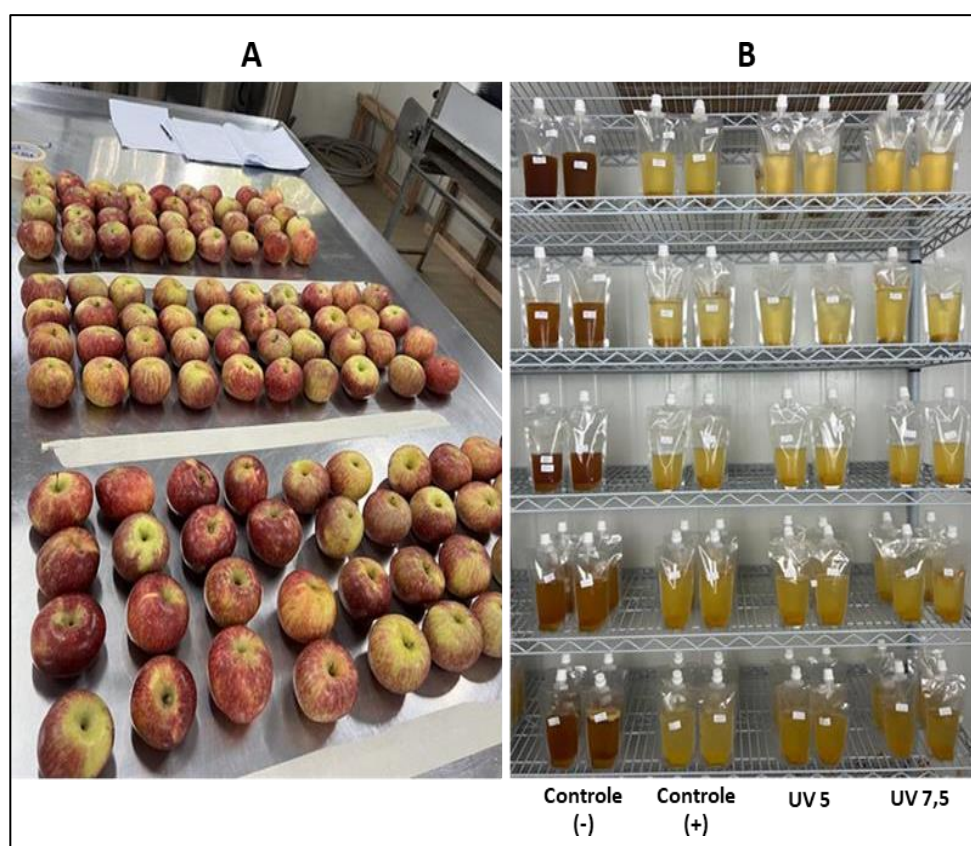


Figura 26. Mações selecionadas para processamento (A). Suco de maçã em embalagens tipo *pouchet valvular* (B).

5.2.2. Métodos

Para a exposição à radiação UV-C, o suco de maçã em embalagem pouchet foi submetido a um irradiador UV-C (modelo Hortifruti UV-C 0214/UV-C 0314 (Caxias do Sul, Brasil)), expostas à radiação por 5 e 7,5 minutos sendo viradas na metade do tempo, garantindo a exposição em todo o conteúdo da embalagem.

As fluências (kJ/m^2) utilizadas foram calculadas utilizando a seguinte fórmula proposta por Weis et al. (2022):

$$D = I \times t,$$

onde:

I é a irradiância e

t é o tempo de exposição

As experiências foram conduzidas com duas replicatas, cada uma em triplicata, utilizando um plano fatorial 2K com ponto central. As embalagens foram refrigeradas a 4 °C e analisadas nos dias 0, 1, 3 e 5 de armazenamento. A umidade relativa no interior da câmara de refrigeração foi de 98%.

5.2.2.1. Análises físico-químicas

5.2.2.1.1. Análise de cor instrumental

A análise instrumental da cor foi realizada por transmitância utilizando um dispositivo Color Quest XE nas escalas CIELAB e CIELCh, com uma abertura de 1,00 polegada de diâmetro e um iluminante D65/10.

Os parâmetros de cor medidos foram:

L^* = luminosidade (0 = preto, 100 = branco);

a^* (-80 a 0 = verde, 0 a +100 = vermelho);

b^* (-100 a 0 = azul, 0 a +70 = amarelo);

C^* (croma) = $(a^2 + b^2)^{1/2}$, que define a intensidade ou saturação da cor e é determinado pela distância do ângulo de matiz ao centro do diagrama tridimensional. Valores próximos de zero indicam cores neutras (branco ou cinza), enquanto valores em torno de 60 indicam cores vivas ou intensas (FERNANDES et al., 2010);

h° (ângulo de matiz) = $\arctan(b^*/a^*)$, o que indica a posição da cor em um diagrama tridimensional, onde os ângulos de 0° ou 360° representam o vermelho puro, 90° representa o amarelo puro, 180° representa o verde puro e 270° representa o azul puro (MCGUIRE, 1992). Três réplicas da amostra foram analisadas no modo TTRAN – Transmissão Total.

5.2.2.1.2. Sólidos solúveis totais (SST)

O teor de SST foi determinado por leitura direta com um refratômetro Atago Pal-1 (Japão) utilizando polpa de cada amostra. Os resultados foram expressos em graus Brix (ISO 2173: 1978).

5.2.2.1.3. Acidez titulável total (ATT)

A análise ATT foi realizada em triplicata utilizando um titulador Metrohm Titrino Plus 848 (Herisau, Suíça), em conformidade com a norma ISO 1842 (1991). Os resultados foram expressos em g de ácido málico por 100 g de amostra.

5.2.2.1.4. Fenólicos totais

O teor total de compostos fenólicos foi determinado utilizando o método espectrofotométrico proposto por Singleton e Rossi (1965), conforme modificado por

Georgé et al. (2005). Para a extração, as amostras foram preparadas na proporção de 1:1 (maçã: água). Em seguida, 2 g dessa amostra foram pesados em um balão volumétrico âmbar de 25 mL, e foram adicionados 25 mL de acetona a 70%. Uma barra magnética foi colocada em cada balão, e os balões foram agitados por 30 minutos. Após esse período, o conteúdo do balão foi filtrado.

O teor de compostos fenólicos foi determinado utilizando o ensaio de Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Georgé et al. (2005). Uma alíquota do reagente de Folin-Ciocalteu (2,5 mL a 10%) foi adicionada a um frasco contendo 500 µL do extrato e deixada em reação por 2 minutos à temperatura ambiente. Em seguida, foram adicionados 2 mL de carbonato de sódio (7,5% p/v), e os frascos foram colocados em banho-maria a 50 °C por 15 minutos, depois resfriados e colocados em banho de gelo. A absorvância foi medida a 760 nm utilizando um espectrofotômetro (Shimadzu®, Kyoto, Japão). As análises foram realizadas em triplicata, e os resultados são apresentados em mg de equivalentes de ácido gálico por 100 g de extrato.

5.2.2.1.5. Análise microbiológica

As amostras foram analisadas para *Salmonella* spp. (ISO 6579-1:2017), *Escherichia coli* (Método Oficial AOAC 991.14) e contagem de aeróbios mesófilos, psicrotróficos e fungos e leveduras, de acordo com o Compêndio de Métodos para o Exame Microbiológico de Alimentos (2015), com os limites aceitáveis estabelecidos pela legislação brasileira (BRASIL, 2022).

Uma amostra de suco de maçã foi pesada, e a primeira diluição de 1:10 em água peptonada estéril a 0,1% foi preparada em um saco Stomacher e homogeneizada por 2 minutos. A partir da diluição inicial, uma alíquota de 100 µL foi semeada em placas de Petri com meio DRBC para análise de bolores e leveduras, seguida de incubação a 25 °C por 120 ± 2h. Outra alíquota de 100 µL da diluição inicial foi semeada em meio PCA para contagem de bactérias aeróbias mesófilas, seguida de incubação a 37 °C durante 48 ± 2h. Após os respectivos tempos de incubação, as colônias de fungos filamentosos e leveduras (15 - 150 UFC/mL), e de aeróbios mesófilos (25 - 250 UFC/mL) foram enumeradas. Para a contagem de psicrotróficos foram seguidos os mesmos passos, com mesmo meio de cultivo, porém com incubação a 7°C por 10 dias.

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Análise de cor instrumental

No que diz respeito ao parâmetro L^* (Figura 27), observaram-se diferenças significativas entre os tratamentos (A, B e C) e ao longo do período de armazenamento (a, b, c e d) ($p \leq 0,05$). Quanto ao desempenho, o controle + apresentou um valor final (41,0) de L^* superior ao valor inicial (32,5), indicando uma melhor manutenção da luminosidade da amostra quando comparada aos demais tratamentos.

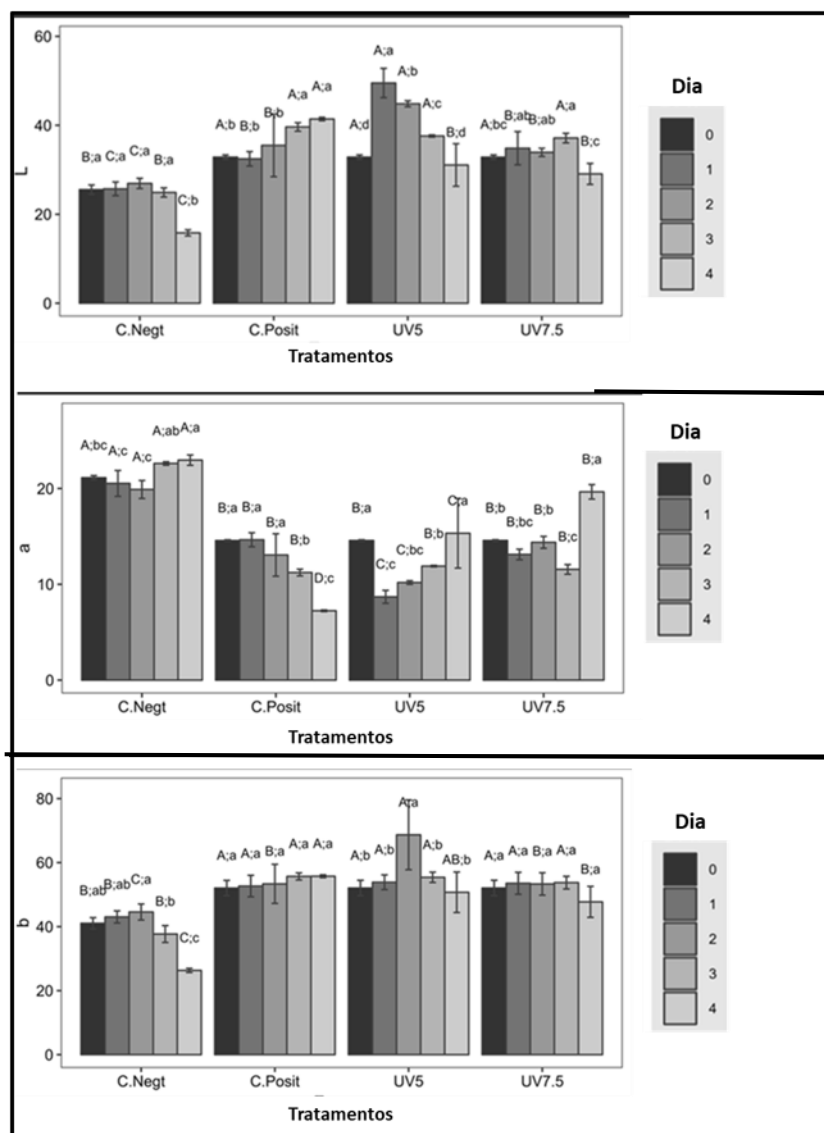


Figura 27. Análise dos parâmetros de cor L^* , a^* , e b^* em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento.

Quanto ao parâmetro a^* , houveram diferenças significativas entre os tratamentos, de acordo com as letras (A, B e C) e ao longo do período de armazenamento (a, b e c) ($p \leq 0,05$). No tratamento UV7,5 foi observada uma queda

nos valores nos dias 1,2 e 3 (chegando a cerca de 11,5 no terceiro dia) seguida de aumento significativo (20) no último dia de armazenamento.

Para o parâmetro b^* , foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos, conforme indicado pelas letras maiúsculas distintas (A, B e C), bem como ao longo do armazenamento nos tratamentos controle - e UV5, evidenciadas pelas letras minúsculas diferentes (a, b e c) ($p \leq 0,05$). Em contrapartida, os tratamentos controle + e UV7,5 não apresentaram variações significativas durante o período de armazenamento, uma vez que todas as médias foram acompanhadas pela mesma letra minúscula (a) ($p > 0,05$).

Casco et al. (2025) constataram, em seu estudo sobre suco de maçã exposto à radiação UV-C, que as amostras não irradiadas apresentaram aumento da opacidade e da turbidez, enquanto as amostras irradiadas inativaram a microbiota e, embora tenha ocorrido uma alteração inicial na cor, o aumento progressivo da opacidade associado à deterioração microbiana foi evitado.

O estudo de Saucedá-Gálvez (2021), que utilizou um sistema de recirculação em suco de maçã turvo com ácido ascórbico, constatou que doses mais elevadas de UV-C levaram a um aumento no índice de escurecimento em doses superiores a 100 J/mL.

Xiang et al. (2020) demonstraram que altas doses de UV-C (até 1200 mJ/cm²) causaram reduções significativas na coordenada a^* (perda da coloração verde / vermelha) e um aumento em b^* (amarelecimento), resultando em uma diferença de cor total claramente visível.

A Figura 28 mostra a variação nas amostras de suco de maçã sob os tratamentos estudados ao longo dos dias de armazenamento.

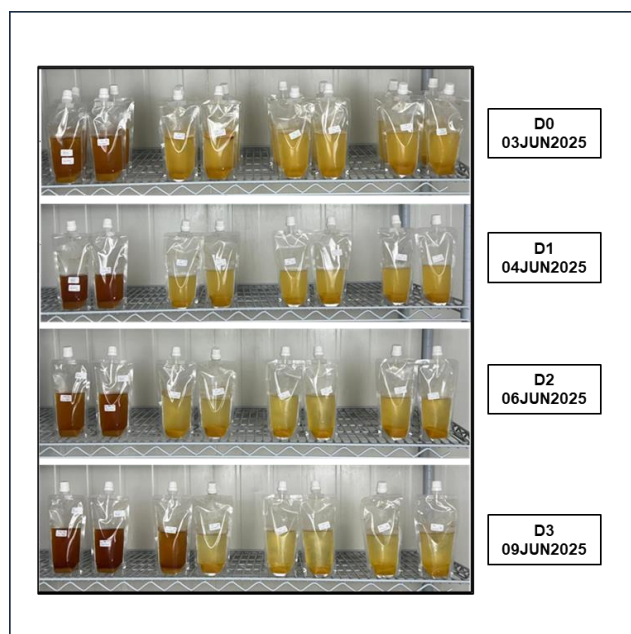


Figura 28. Embalagens contendo amostras de suco clarificado de maçã, submetidos ou não à UV-C ao longo dos dias de armazenamento.

5.3.2. Sólidos solúveis totais (SST)

Embora visualmente tenham ocorrido variações proporcionais (entre 14,8° e 16° Brix), foram detectadas diferenças significativas entre os tratamentos conforme indicado pelas letras maiúsculas distintas (A, B e C) e ao longo do período de armazenamento conforme indicado pelas letras minúsculas distintas (a, b, c e d) (Figura 29; $p \leq 0,05$). Entretanto, não foi observada uma tendência consistente de aumento ou redução dos SST ao longo do armazenamento, sugerindo que a aplicação da radiação UV-C não promoveu alterações expressivas nesse parâmetro e que os teores de sólidos solúveis do suco de maçã foram preservados.

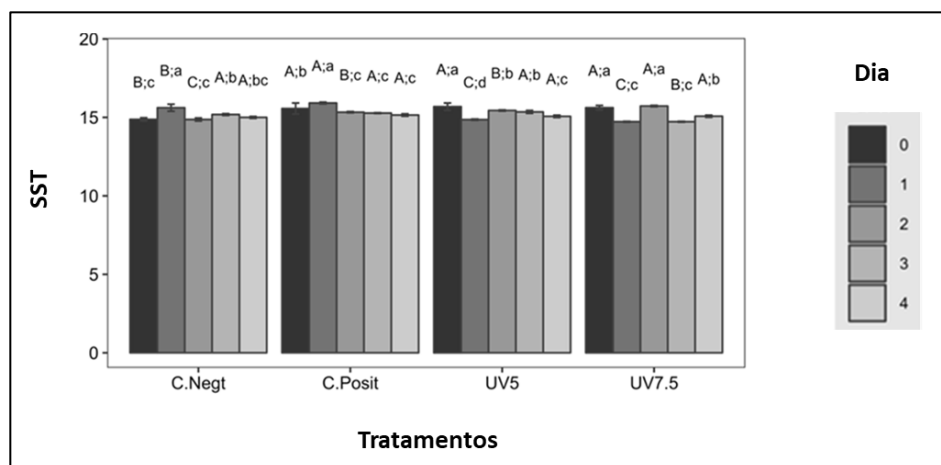


Figura 29. Análise de SST em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento.

Diferentemente do presente estudo, investigações anteriores não relataram diferenças significativas ($p > 0,05$) no teor de sólidos solúveis totais entre amostras não tratadas e aquelas submetidas a diferentes doses de UV-C (YANG et al., 2019; XIANG et al., 2020; GÖK, 2021).

A preservação do teor total de sólidos solúveis, juntamente com o pH e a acidez titulável, ajuda a manter a qualidade “semelhante à do produto fresco” do suco e evita o desenvolvimento de sabores de cozido comumente associados à pasteurização térmica, um método amplamente utilizado no processamento de sucos de frutas (Yang et al., 2019). Essa estabilidade é uma vantagem importante das tecnologias não térmicas, pois ajuda a preservar a doçura natural da fruta, um atributo de qualidade fundamental para a aceitação do consumidor (GOUMA et al., 2015a).

5.3.3. Acidez total titulável (ATT)

Os valores de ATT (0,20 a 0,29) variaram durante o armazenamento, indicando diferenças significativas tanto entre os tratamentos quanto entre os períodos de armazenamento, conforme indicado pelas letras maiúsculas (A, B e C) e minúsculas (a, b, c e d) distintas ($p \leq 0,05$). Embora tenham sido observadas diferenças estatísticas, as variações observadas foram de baixa magnitude, indicando limitada relevância prática sobre a acidez do suco de maçã e contribuição para a manutenção desse parâmetro.

Essa preservação pode ser atribuída ao efeito térmico mínimo do processamento por UV- C, que impede a evaporação da água e reações químicas drásticas que poderiam alterar a concentração de ácidos orgânicos (Nicolau-Lapeña et al., 2023).

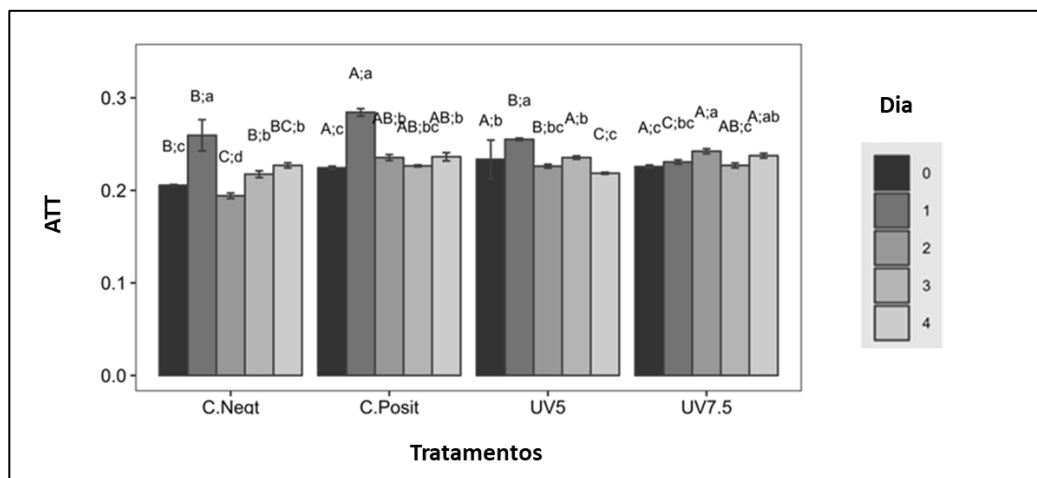


Figura 30. Análise de ATT em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento.

Em consonância com os presentes resultados, Casco et al. (2025) relataram um comportamento semelhante da acidez total titulável (ATT) entre os tratamentos (calor moderado e natamicina) durante 23 dias de armazenamento refrigerado. Em uma avaliação sensorial realizada pelos mesmos autores, a acidez do suco recebeu boa aceitação dos consumidores, com uma pontuação média de aproximadamente 3,48 em uma escala hedônica de 5 pontos. Da mesma forma, Nicolau-Lapeña et al. (2023), Gök (2021), Xiang et al. (2020), Yang et al. (2019) e Islam et al. (2016b) também relataram alta estabilidade de ATT em suco de maçã clarificado após tratamento com UV-C, indicando que essa tecnologia não afeta significativamente esse atributo físico-químico.

5.3.4. Fenólicos totais (CFT)

Os resultados (Figura 31) indicam que, apesar das diferenças significativas entre os quatro tratamentos e ao longo do período de armazenamento ($p \leq 0,05$), exibido também pelas letras distintas no gráfico (A, B) e (a,b, c e d), todas as amostras mostraram um teor fenólico total substancialmente mais elevado no final do armazenamento, controle -: 0,22 a 1,35, controle +: 0,37 a 1,23, UV5: 0,38 a 1,18 e UV7,5: 0,38 a 1,20, em comparação com o dia inicial.

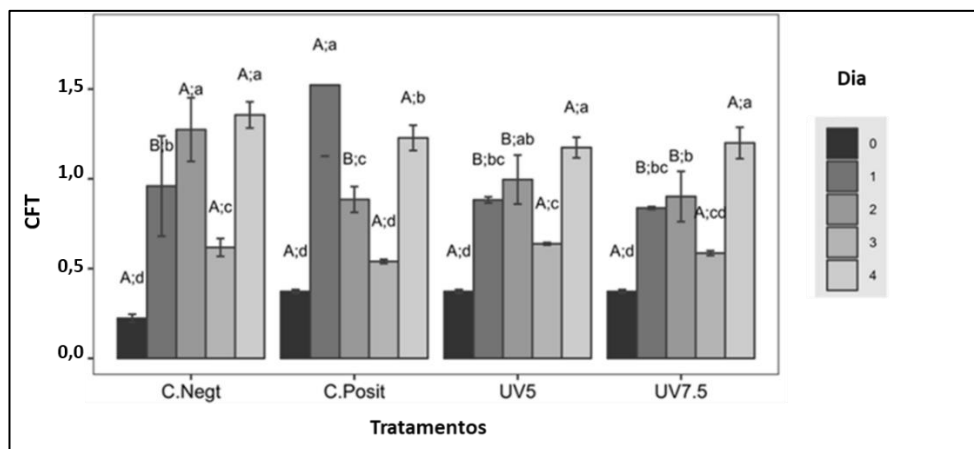


Figura 31. Análise de CFT (g) em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento.

Este aumento no final do período de armazenamento pode ser explicado pelo fenômeno da hormese, um mecanismo de defesa que modifica a parede celular vegetal em resposta ao estresse UV e que se caracteriza pela síntese de polifenóis secundários (Arcos-Limiñana, Maestre-Pérez, Prats-Moya, 2025).

Nesta análise, observaram-se tendências semelhantes entre as amostras irradiadas e não irradiadas.

5.3.5. Análise microbiológica

Os resultados da análise microbiológica são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Análise microbiológica em suco de maçã clarificado, tratado ou não com UV-C, ao longo do período de armazenamento.

Tempo (dias)	Tratamento	Bolores e leveduras (log UFC/ml)	Bactérias aeróbias mesófilas (log UFC/ml)	Bactérias aeróbias psicrótróficas (log UFC/ml)	<i>E. coli</i> (log UFC/ml)	<i>Salmonella</i> spp. (log UFC/ml)
0	Controle -	2,70 est.	2,18 est.	2,00 est.	<1,00 est.	Ausência
	Controle +	2,40 est.	2,30 est.	2,74 est.		
	UV5	2,65 est.	2,40 est.	2,08 est.		
	UV7,5	2,39 est.	1,70 est.	2,17 est.		
1	Controle -	2,11 est.	2,60 est.	2,36 est.	<1,00 est.	Ausência
	Controle +	2,23 est.	1,69 est.	2,97 est.		
	UV5	2,18 est.	1,69 est.	2,30 est.		
	UV7,5	2,87 est.	2,00 est.	2,30 est.		
3	Controle -	2,95	2,00 est.	2,83	<1,00 est.	Ausência
	Controle +	2,93	2,00 est.	2,00 est.		
	UV5	2,20	2,48 est.	2,20 est.		
	UV7,5	2,64	2,39 est.	2,90 est.		
5	Controle -	2,84 est.	3,58	5,18	<1,00 est.	Ausência
	Controle +	2,00	2,39 est.	3,75		
	UV5	2,15	2,84 est.	3,38		
	UV7,5	2,00 est.	2,18 est.	3,08 est.		

As análises microbiológicas não revelaram a presença de *Salmonella* spp. em nenhuma das amostras avaliadas, enquanto os valores de *Escherichia coli* permaneceram abaixo dos limites estabelecidos (10^2 /ml) pela legislação brasileira vigente (BRAZIL, 2002), indicando a conformidade microbiológica do produto.

Foram observadas contagens mais elevadas e mais variáveis de bolores e leveduras nas amostras controle e UV7,5. O tratamento UV5, apresentou maior estabilidade e contagens mais baixas ao longo dos dias de armazenamento, indicando um efeito positivo sobre esses microrganismos nesse tratamento.

Para os microrganismos mesófilos, comparando os dias 0 e 5, observou-se um aumento progressivo da carga microbiana na amostra controle negativo, que apresentou os valores mais elevados no último dia de armazenamento quando comparado aos outros tratamentos. Uma tendência semelhante foi observada para

os microrganismos psicrotróficos, com multiplicação em todos os tratamentos e destaque para o controle negativo.

De modo geral, os resultados indicam que a aplicação de radiação UV-C, auxiliou na manutenção da multiplicação microbiana, com destaque para o tratamento UV5 na contagem de bolores e leveduras.

Resultados semelhantes em sucos após o tratamento com UV-C também foram descritos por Tremarin, Brandão e Silva (2017), que ao avaliarem amostras inoculadas com esporos de *A. Acidoterrestis* verificaram na exposição de 11,50 e 13,44 W/m² por 8 minutos, reduções de até 5 ciclos logarítmicos. Por outro lado, uma fluência inferior (0,34 W/m²) proporcionou efeito comparável após 25 minutos de exposição, evidenciando que a eficiência do processo está diretamente relacionada à intensidade da radiação e ao tempo de aplicação. De forma complementar, Yang et al. (2019) observaram reduções de até 2 log em bactérias e 1 log em fungos e leveduras em sucos de maçã tratados com UV-C e armazenados a 4 °C por 35 dias.

Estudos demonstraram que a radiação UV-C é eficaz na inativação de uma ampla gama de microrganismos, incluindo bactérias patogênicas, leveduras e esporos fúngicos altamente resistentes e sua eficácia varia significativamente dependendo da dose aplicada, do tipo de microrganismo e do uso de tecnologias combinadas (CASCO et al. 2025; SHIN et al. 2024; Gok, 2021; SAUCEDA-GÁLVEZ et al., 2019; TREMARIN, BRANDÃO E SILVA, 2017).

5.4. Conclusões

Os resultados deste estudo mostram que a radiação UV-C é uma tecnologia não térmica eficaz para preservar a qualidade e a segurança microbiológica do suco de maçã clarificado durante o armazenamento. Os tratamentos com UV-C, particularmente o UV5, proporcionaram maior estabilidade na manutenção de microrganismos deteriorantes (bolores e leveduras) em comparação às amostras controle -.

No que diz respeito aos parâmetros físico-químicos, a aplicação de UV-C não comprometeu atributos de qualidade essenciais, tais como sólidos solúveis totais e acidez titulável, que se mantiveram relativamente estáveis ao longo do armazenamento. Além disso, observou-se um aumento na capacidade antioxidante e no teor fenólico total, sugerindo possível indução de mecanismos metabólicos associados à resposta ao estresse oxidativo.

No que diz respeito à cor instrumental, embora tenham sido observadas variações durante o armazenamento, os resultados indicam que o tratamento com UV-C não causou alterações indesejáveis que pudessem comprometer a qualidade do produto.

Em geral, os resultados reforçam o potencial da radiação UV-C na manutenção de microrganismos patógenos, uma vez que apresentaram contagens similares às amostras não irradiadas, como uma estratégia na garantia da segurança microbiológica e manutenção da qualidade do suco clarificado de maçã sem os efeitos negativos associados aos tratamentos térmicos convencionais.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Código Financeiro 001), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ, concessão E-26/201.302.2022), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, concessão 311108/ 2021-0) e pelo INCT Frutas Tropicais (concessão 465335/2014-4).

Declaração de Ética

Os autores não têm nada a relatar.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Declaração de Disponibilidade de Dados

Os dados que sustentam as conclusões deste estudo estão disponíveis junto ao autor correspondente, mediante solicitação razoável.

5.5. Referências

ABPM. Associação Brasileira de Produtores de Maçã. Disponível em: www.abpm.org.br.

ARCOS-LIMIÑANA, V.; MAESTRE-PÉREZ, S.; PRATS-MOYA, M. S. A comprehensive review on ultraviolet disinfection of spices and culinary seeds and its effect on quality. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. John Wiley and Sons Inc. 2025.

BRAZIL, REGULATORY INSTRUCTION - IN No. 161, OF JULY 1, 2022. Establishes microbiological standards for food. 2022.

CASCO, M. de los A. *et al.* A novel approach using UV-C light assisted by mild heat and natamycin as a hurdle strategy to preserve juice from non-commercial-grade apples. **Food Control**, [s. l.], vol. 171, 2025.

FERNANDES, A. M *et al.* Qualidade físico-química e de fritura de tubérculos de cultivares de batata na safra de inverno. **Horticultura Brasileira**, v. 28, n. 3, p. 299-304, 2010.

GABRIEL, A. A. Combinations of selected physical and chemical hurdles to inactivate *Escherichia coli* O157: H7 in apple and orange juices. **Food Control**, [s. l.], vol. 50, p. 722–728, 2015.

GABRIEL, A. A.; ANCOG, M. M. L. Effects of suboptimal growth conditions on the subsequent UV-C resistance of *Listeria monocytogenes* in coconut liquid endosperm and apple juice. **LWT**, [s. l.], vol. 99, p. 460–467, 2019.

GAYÁN, E. *et al.* Environmental and biological factors influencing the UV-C resistance of *Listeria monocytogenes*. **Food Microbiology**, [s. l.], vol. 46, p. 246–253, 2015.

GEORGÉ, S. *et al.* Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant derived products. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 5, p. 1370–1373. 2005. DOI: 10.1021/jf048396b.

GÖK, S. UV-C Treatment of Apple and Grape Juices by Modified UV-C Reactor Based on Dean Vortex Technology: Microbial, Physicochemical and Sensorial Parameters Evaluation. **Food and Bioprocess Technology**, v. 14, p. 1055–1066, 2021. DOI: 10.1007/s11947-021-02624-z.

GOUMA, M. *et al.* Inactivation of spoilage yeasts in apple juice by UV-C light and in combination with mild heat. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [s. l.], vol. 32, p. 146–155, 2015a.

GOUMA, M. *et al.* Influence of dimethyl dicarbonate on the resistance of *Escherichia coli* to a combined UV-Heat treatment in apple juice. **Frontiers in Microbiology**, [s. l.], vol. 6, n° MAY, 2015b.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: www.ibge.gov.br.

ISO 1842. Fruit and vegetable products - Determination of pH. Edition 2 (1991).

ISO 2173. Fruit and Vegetable Products Determination of Soluble Solids Content – Refractometric Method, Int. Organ. Stand, Edition 2 (1978).

MCGUIRE RG. 1992. Reporting of objective color measurements. **Horticultural Science**, v. 27, n. 12, p. 1254-1255, 1992.

NICOLAU-LAPEÑA, I. et al. Ultraviolet Applications to Control Patulin Produced by *Penicillium expansum* CMP-1 in Apple Products and Study of Further Patulin Degradation Products Formation and Toxicity. **Food and Bioprocess Technology**, v. 16, p. 804–823, 2023. DOI: 10.1007/s11947-022-02943-9.

RE, R. et al. Antioxidant activity applying and improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 26, n. 9-10, 1231-1237. 1999. DOI: 10.1016/S0891-5849(98)00315-3.

RUFINO, M. et al. Metodologia Científica: Determinação da Atividade Antioxidante Total em Frutas por Captura de Radicais Livres DPPH. **Embrapa** 127. 2007.

SAUCEDA-GÁLVEZ, J. N. et al. Short wave ultraviolet light (UV-C) effectiveness in the inactivation of bacterial spores inoculated in turbid suspensions and in cloudy apple juice. **Beverages**, [s. l.], vol. 7, nº 1, 2021.

SAUCEDA-GÁLVEZ, J. N. et al. Inactivation of ascospores of *Talaromyces macrosporus* and *Neosartorya spinosa* by UV-C, UHPH and their combination in clarified apple juice. **Food Control**, [s. l.], vol. 98, p. 120–125, 2019.

TREMARIN, A.; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Application of ultraviolet radiation and ultrasound treatments for *Alicyclobacillus acidoterrestris* spores inactivation in apple juice. **LWT**, [s. l.], vol. 78, p. 138–142, 2017a.

XIANG, Q. et al. Effect of UVC light-emitting diodes on apple juice: Inactivation of *Zygosaccharomyces rouxii* and determination of quality. **Food Control**, v. 111, 107082, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.107082>.

WEIS, G. L. Device construction for UV-C Ultraviolet Irradiation. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, e72111536844, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.36844>.

YANG, Y. et al. Effect of thermal pasteurization and ultraviolet treatment on the quality parameters of not-from-concentrate apple juice from different varieties. **CyTA - Journal of Food**, v. 17, n. 1, p. 189-198, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/19476337.2019.1569725>.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O presente trabalho demonstrou que a radiação ultravioleta de onda curta (UV-C) constitui uma tecnologia não térmica eficaz e sustentável para a preservação da qualidade e segurança microbiológica de microrganismos deteriorantes na cadeia produtiva da maçã. Através da análise integrada de frutos frescos, minimamente processados e suco clarificado, observou-se que a tecnologia não apenas é eficaz na manutenção da multiplicação microbiana mas também preserva e, em certos casos, incrementa atributos de valor nutricional e funcional.

Do ponto de vista da segurança microbiológica, a aplicação da UV-C garantiu a ausência de *Salmonella spp.* e contagens de *Escherichia coli* e mesófilos dentro dos limites estabelecidos pela legislação (10^2), além de agir na manutenção das contagens de bolores e leveduras ao longo do armazenamento. Em particular no suco clarificado, a tecnologia demonstrou potencial como alternativa à pasteurização, alcançando estabilidade microbiológica sem os efeitos deletérios do calor para os parâmetros avaliados.

Quanto à manutenção da qualidade físico-química, a UV-C demonstrou ser uma tecnologia conservativa. Parâmetros essenciais como sólidos solúveis totais (SST) e acidez total titulável (ATT) permaneceram estáveis em todas as matrizes, preservando o frescor e o sabor natural do fruto. Destaca-se o impacto positivo na preservação da cor e redução de perdas de massa em maçãs minimamente processadas onde o tratamento UV-C reduziu o índice de escurecimento enzimático e a perda de umidade, possivelmente pela formação de uma barreira física superficial que atenua processos respiratórios e de transpiração.

Uma das constatações mais relevantes desta pesquisa refere-se ao fenômeno da hormese, em que a exposição controlada à radiação UV-C induziu um estresse fisiológico moderado nos tecidos vegetais, estimulando a biossíntese de metabólitos secundários. Esse mecanismo resultou em um aumento significativo no conteúdo de compostos fenólicos totais e na capacidade antioxidante tanto nos frutos frescos e processados quanto no suco, elevando o valor funcional dos produtos finais.

A análise bibliométrica corroborou a tendência global de crescimento desta tecnologia, identificando-a como uma alternativa viável ao uso de compostos clorados. As vantagens operacionais, como o baixo consumo energético, a ausência de resíduos químicos e a facilidade de implementação, posicionam a UV-C como uma ferramenta estratégica para a indústria. No entanto, a revisão também destacou

desafios persistentes, como a necessidade de padronização de doses e a superação das limitações de penetração em matrizes de alta turbidez.

Em suma, os resultados validam a radiação UV-C como uma ferramenta estratégica na redução do desperdício pós-colheita e uma forma alternativa de sanitização já que elimina a necessidade de substâncias cloradas, alinhando-a com as demandas de sustentabilidade e conveniência do mercado contemporâneo.

Como desdobramento deste estudo, recomenda-se a realização de pesquisas voltadas à otimização e validação dos parâmetros de aplicação da radiação UV-C em condições industriais, de modo a estabelecer protocolos padronizados para sua utilização em larga escala. A consolidação dessa tecnologia poderá contribuir para a redução das perdas pós-colheita e para a disponibilização de maçãs com maior vida útil, qualidade e valor funcional aos consumidores.