



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

HANNA BARBOSA LEMOS

DESCONTAMINAÇÃO DE AFLATOXINAS EM TORTA DE CASTANHA-DA-AMAZÔNIA COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTAR A SEGURANÇA NA FORMULAÇÃO DE PRODUTOS

SEROPÉDICA
2026





HANNA BARBOSA LEMOS

DESCONTAMINAÇÃO DE AFLATOXINAS EM TORTA DE CASTANHA-DA-AMAZÔNIA COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTAR A SEGURANÇA NA FORMULAÇÃO DE PRODUTOS

Dissertação 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 Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Área de concentração: Ciência de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Otniel Freitas Silva

Coorientadora: Prof. Dra. Ariane Mendonça Kluczkovski

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

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

L544d Lemos, Hanna, 2000-
DESCONTAMINAÇÃO DE AFLATOXINAS EM TORTA DE
CASTANHA-DA-AMAZÔNIA COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTAR A
SEGURANÇA NA FORMULAÇÃO DE PRODUTOS / Hanna Lemos. -
Seropédica, 2026.
57 f.

Orientador: Otniel Freitas Silva.
Coorientadora: Ariane Mendonça Kluczkovski.
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro, Ciência e Tecnologia de
Alimentos, 2026.

1. Micotoxina. 2. Tecnologias não térmicas. 3.
Torta de castanha. 4. Resíduos. I. Freitas Silva,
Otniel , 1966-, orient. II. Mendonça Kluczkovski,
Ariane , 1974-, coorient. III Universidade Federal
Rural do Rio de Janeiro. Ciência e Tecnologia de
Alimentos. IV. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta TFC/Dissertação/Tese, desde que seja citada a
fonte

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior (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

HANNA BARBOSA LEMOS

DESCONTAMINAÇÃO DE AFLATOXINAS EM TORTA DE CASTANHA-DA-AMAZÔNIA COMO ESTRATÉGIA PARA AUMENTAR A SEGURANÇA NA FORMULAÇÃO DE PRODUTOS

Dissertação 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 Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Dissertação aprovada em: 09 de março de 2026.

BANCA EXAMINADORA:



Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

ATA Nº 522

Seropédica, 09 de Março de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br VICTOR JONAS DA ROCHA ESPERANÇA
Data: 09/03/2026 13:51:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. VICTOR JONAS DA ROCHA ESPERANÇA

Examinador Externo à Instituição
Documento assinado digitalmente

gov.br FELIPE MACHADO TROMBETE
Data: 09/03/2026 16:58:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. FELIPE MACHADO TROMBETE, UFSJ

Examinador Externo à Instituição

Documento assinado digitalmente
gov.br OTNIEL FREITAS SILVA
Data: 09/03/2026 13:39:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. OTNIEL FREITAS SILVA, EMBRAPA

Presidente

Documento assinado digitalmente
gov.br HANNA BARBOSA LEMOS
Data: 09/03/2026 13:43:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

HANNA BARBOSA LEMOS

Mestranda

Dedico este trabalho à memória de minha tia Marilena Paes de Lemos,
cuja história de vida, transmitida por meu pai Agamenon,
foi referência de força e motivou meu compromisso com os estudos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e a toda a espiritualidade, pela vida e pela orientação nos caminhos que trilhei até aqui.

Aos meus pais, Agamenon e Giselda, expresso profunda gratidão pelo esforço e dedicação em minha formação, garantindo que eu tivesse acesso ao melhor ensino possível e mostrando-me que a educação é capaz de transformar vidas.

Ao meu marido, Lucas Teixeira, agradeço por estar ao meu lado desde o processo seletivo, incentivando-me e fortalecendo minha confiança em cada etapa. Seu apoio diário foi essencial para que eu pudesse concluir essa etapa.

Ao meu irmão, João Lemos, agradeço o apoio constante e pelas risadas que aliviaram a saudade nos momentos mais difíceis.

À minha família Barbosa e Lemos, reconheço o suporte oferecido em diferentes etapas da minha trajetória acadêmica e pessoal.

Aos meus sogros, Maria Aparecida e Luiz, agradeço o apoio fundamental nesse período de mudança.

Ao meu orientador, Dr. Otniel Freitas-Silva, registro minha sincera gratidão pela acolhida, pela orientação e pelos ensinamentos que tanto contribuíram para meu crescimento acadêmico e científico.

À minha coorientadora, professora Dra. Ariane Kluczkovski, agradeço por compartilhar seu entusiasmo pela ciência de alimentos e micotoxinas, transmitindo-me motivação e inspiração para seguir neste caminho.

Ao professor Dr. Fábio Borges, expresso minha sincera gratidão por acreditar neste projeto, viabilizar a integração com o CBPF e colaborar ativamente no desenvolvimento do plasma frio DBD. Sua generosa partilha de conhecimento e dedicação foram contribuições indispensáveis para o avanço e consolidação desta pesquisa.

Ao Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), ao Dr. Alexandre Mello e a todos os integrantes do Laboratório de Plasma Aplicado, agradeço pela parceria na execução do projeto e pelo desenvolvimento do plasma frio DBD. Ao Dr. Fernando Stavale, pela disponibilidade dos equipamentos do Laboratório de Interfaces, fundamentais para o andamento desta pesquisa.

À Embrapa Agroindústria de Alimentos, registro minha gratidão, em especial à analista Marianna Ramos, pela paciência e dedicação ao transmitir conhecimentos sobre análises em HPLC e pela colaboração nas etapas de preparo e análise das amostras.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos (PPGCTA) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), agradeço pela oportunidade de realizar este mestrado, pelo acolhimento e pela formação acadêmica de excelência.

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

Às agências de fomento CNPq e FAPERJ, pelo financiamento e apoio concedidos, para a realização deste trabalho.

Aos colegas e amigos que tive a felicidade de conhecer durante o mestrado, agradeço a convivência e apoio. Em especial, à Caroline Rodrigues e Cinthia Couto, pela acolhida na Planta V e à Francislaine Valente, por ter sido minha parceira nas aulas e por me auxiliar na adaptação à cidade.

Por fim, agradeço a mim mesma. Desde a infância, sonhei em ser cientista e professora. Este trabalho representa apenas o início dessa caminhada, e sinto orgulho por cada passo dado até aqui.

*"Que a castanheira dá seu fruto alto,
mas sua raiz sempre está no chão."
(Gabriê, Saudade de Casa.)*

RESUMO

LEMOS, Hanna Barbosa. **Descontaminação de aflatoxinas em torta de castanha-da-amazônia como estratégia para aumentar a segurança na formulação de produtos**. 2026. n° 55. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

A torta de castanha-da-amazônia, subproduto do processamento da amêndoa, apresenta elevado valor nutricional e potencial de utilização em formulações alimentares humanas e animais. Contudo, a contaminação por aflatoxinas (AFs), especialmente a aflatoxina B₁(AFB₁), representa um risco significativo para a segurança alimentar e para a comercialização destes produtos. Este trabalho teve como objetivo avaliar estratégias de descontaminação de AFs na torta de castanha-da-amazônia, de forma a aumentar a segurança da sua utilização em diferentes formulações. O Capítulo 1 consistiu numa revisão abrangente sobre métodos de descontaminação aplicados a tree nuts, destacando avanços e limitações das tecnologias em investigação nos últimos 20 anos. O Capítulo 2 apresentou os ensaios realizados com plasma frio (CP) de descarga de barreira dielétrica (DBD) e radiação UV-C, comparando a sua eficácia na degradação das AFs. Os resultados demonstraram que o plasma frio DBD foi o método mais eficiente, promovendo uma redução aproximadamente de 66% para AFT e 75% AFB₁, após 10 minutos de exposição, enquanto o tratamento com UV-C evidenciou limitações analíticas, reforçando a necessidade de técnicas complementares, como LC-MS/MS e RMN, para confirmar os produtos de degradação e avaliar a sua toxicidade residual. Este estudo reforça a importância da inovação tecnológica como estratégia para a segurança alimentar e para a valorização da cadeia produtiva amazônica.

Palavras-chave: micotoxinas, tecnologias não térmicas, torta da castanha, resíduos.

ABSTRACT

LEMOS, Hanna Barbosa. **Decontamination of aflatoxins in Brazil nut cake as a strategy to increase the safety of product formulation**. 2026. No. 54. Master's Dissertation in Food Science and Technology – Institute of Technology, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, 2026.

Brazil nut cake, a by-product of almond processing, has high nutritional value and potential for use in human and animal food formulations. However, contamination by aflatoxins (Afs), especially aflatoxin B₁ (AFB₁), poses a significant risk to food safety and the commercialization of these products. This study aimed to evaluate aflatoxin decontamination strategies in Brazil nut cake to increase the safety of its use in various formulations. Chapter 1 consisted of a scoping review of decontamination methods applied to tree nuts, highlighting advances and limitations of technologies reported in the last 20 years. Chapter 2 presented experiments using dielectric barrier discharge (DBD) cold plasma (CP) and UV-C radiation, comparing their effectiveness in aflatoxin degradation. The results showed that DBD cold plasma was the most efficient method, achieving a reduction of approximately 66% for AFT and 75% for AFB₁, after 10 minutes of exposure, while UV-C treatment revealed analytical limitations, reinforcing the need for complementary techniques such as LC-MS/MS and NMR to confirm degradation products and assess their residual toxicity. This study emphasizes the importance of technological innovation as a strategy for food safety and for adding value to the Amazon production chain.

Keywords: mycotoxins; non-thermal technologies; Brazil nut cake; agro-industrial by-products.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFB₁- Aflatoxina B₁

AFs- Aflatoxinas

AFB₂-Aflatoxina B₂

AFG₁-Aflatoxina G₁

AFG₂-Aflatoxina G₂

AFT- Aflatoxinas totais

UV-C-Radiação ultravioleta

CP- Cold plasma

DBD- Descarga de barreira dielétrica

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO I.....	16
AFLATOXIN DECONTAMINATION IN TREE NUTS: A SCOPING REVIEW OF PHYSICAL, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL ADVANCES.....	16
ABSTRACT	17
1 Introduction	18
2. Materials and Methods	19
2.1 Protocol	19
2.2 Eligibility criteria	19
2.3 Search strategy	19
2.4 Study selection	20
2.5 Data extraction	20
2.6 Data analysis	20
3. Results and discussion.....	20
3.1 Study selection	20
3.2 Description of the included studies	21
3.3 Physical methods.....	22
3.4 Chemical methods.....	28
3.5 Biological methods.....	30
4.Conclusion.....	33
5.References	34
CAPÍTULO II.....	39
INFLUÊNCIA DO PLASMA FRIO DBD E UV-C NA DESCONTAMINAÇÃO DE AFLATOXINA EM TORTA DE CASTANHA-DA-AMAZÔNIA	39
RESUMO	40
1.Introdução.....	41
2.Material e métodos.....	42
2.1 Produtos químicos e reagentes	42
2.2 Amostragem	43
2.3 Tratamento com plasma frio DBD	43
2.4 Tratamento UV-C.....	43
2.5 Espectroscopia ATR-FTIR.....	43
2.6 Quantificação de aflatoxinas	44
2.6.1 Pré-derivatização por TFA	44
2.6.2 Parâmetros cromatográficos.....	44
2.6.3 Validação do método.....	45
2.7 Determinação de cor instrumental	45
2.8 Análise estatística.....	45
3.Resultados e discussão	46
3.1 Quantificação de aflatoxinas	46
3.2 Análise de cor.....	51

4.Conclusão	52
5.Referências	52
CONCLUSÕES GERAIS	57
PERSPECTIVAS FUTURAS	57

1 INTRODUÇÃO

A castanha-da-amazônia é amplamente apreciada pelo sabor característico e pelas qualidades nutricionais relevantes. Sua composição apresenta de 60 a 70% de lipídios, predominantemente ácidos graxos poli-insaturados, e de 15 a 20% de proteínas de elevada qualidade biológica. Além disso, é reconhecida como fonte de selênio, cálcio, fósforo, magnésio e vitaminas do complexo B. O consumo regular da castanha-da-amazônia tem sido associado à redução do risco de doenças crônicas, efeito atribuído aos altos teores de ácidos oleico e linoleico, compostos fenólicos, γ -tocoferol e selênio, fitoquímicos capazes de modular os sistemas antioxidante e anti-inflamatório (Ferrari, 2020).

O resíduo obtido após a extração do óleo por prensagem da amêndoa é denominado torta. Estudos comparativos entre a composição centesimal da amêndoa e da torta de castanha-da-amazônia demonstram que a torta apresenta maior concentração de selênio, além de teores mais elevados de proteínas, fibras e cinzas (Tonetto et al., 2025). Esses atributos reforçam seu potencial como ingrediente funcional em formulações alimentícias.

Entretanto, a segurança alimentar da castanha e de seus derivados ainda enfrenta desafios significativos. A contaminação por aflatoxinas (AFs), micotoxinas produzidas por fungos em condições tropicais, compromete a qualidade e a comercialização desses produtos. A presença de fungos toxigênicos e de micotoxinas em alimentos é uma preocupação mundial e um desafio para a indústria de alimentos, devido aos riscos potenciais à saúde, uma vez que algumas micotoxinas apresentam efeitos mutagênicos, teratogênicos e carcinogênicos (Nan; Xue; Bi, 2022). Durante o processamento e armazenamento, condições inadequadas de umidade e temperatura favorecem a proliferação de fungos filamentosos toxigênicos, resultando na produção de micotoxinas (Galván et al., 2022).

Embora o tratamento térmico seja utilizado há mais de dois séculos e ainda represente uma das tecnologias mais aplicadas na indústria de alimentos, sua utilização pode ocasionar efeitos negativos, como alterações de cor, textura e perda de nutrientes. Esses impactos têm impulsionado pesquisas voltadas para alternativas não térmicas de processamento (Harikrishna et al., 2023). Nesse sentido, tecnologias não convencionais vêm ganhando destaque como alternativas promissoras, entre elas o plasma frio atmosférico e a radiação ultravioleta (UV) (Jadhav; Choudhary, 2024).

Sendo a radiação UV uma tecnologia não térmica, os benefícios da sua utilização são vários: a menor perda de nutrientes e qualidade sensorial dos alimentos, ausência de resíduos tóxicos e baixo consumo energético em comparação com outros tratamentos térmicos normalmente

aplicados para a descontaminação de alimentos. Este último é o principal objetivo desta técnica devido à sua eficácia na inativação de microrganismos patogênicos e deteriorantes (Deng et al., 2020; Zeraatpisheh et al., 2023). O plasma atmosférico tem atraído interesse como uma nova ferramenta de processamento físico com efeitos antimicrobianos de amplo espectro e altamente eficazes. Em alimentos, tem sido usado em diversas aplicações, desde a remoção de micotoxinas (Liu *et al.*, 2024) e inativação de microrganismos patogênicos, como *Staphylococcus aureus* e *L. monocytogenes* (Gök *et al.*, 2019) até na inativação de enzimas, remoção de toxinas, modificações de embalagens de alimentos e no tratamento de pesticidas residuais (Aguiar et al., 2021).

Diante desse contexto, a presente dissertação foi organizada em dois capítulos complementares. O primeiro, “Aflatoxin Decontamination in Tree Nuts: A Scoping Review of Physical, Chemical, and Biological Advances”, apresenta uma revisão de escopo sobre os principais avanços científicos relacionados à descontaminação de aflatoxinas em nozes de árvores, destacando tecnologias físicas, químicas e biológicas, suas limitações e perspectivas futuras. O segundo capítulo, “Eficácia da descontaminação de aflatoxina por plasma frio DBD e UV-C em torta de castanha-da-amazônia”, aborda de forma experimental a aplicação de tecnologias não térmicas emergentes em torta de castanha-da-amazônia, avaliando a eficácia da descontaminação e os impactos nos parâmetros cromáticos. Assim, este trabalho busca contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre descontaminação de AFs e para o fortalecimento da cadeia produtiva da castanha-da-amazônia.

Referências

AGUIAR, Maristela Mendes; ALMEIDA, Glaucia Moreira de; CAMARGO FILHO, Wander Luiz de; ROSÁRIO, Denes Kaic Alves do; ARAÚJO, Liliane Andrade; NAVES, Emiliane Andrade Araújo. Alta pressão hidrostática, campos elétricos pulsados e plasma frio na cadeia produtiva de alimentos: Princípios e aplicabilidade industrial. **Research, Society and Development**, [N.p.], vol. 10, p. e50310212670, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12670>.

Carlos K B Ferrari. Anti-atherosclerotic and cardiovascular protective benefits of Brazilian nuts. **Front. Biosci.** (Schol Ed) 2020, 12(1), 38–56. DOI: <https://doi.org/10.2741/S539>

DENG, Li-Zhen; TAO, Yang; MUJUMDAR, Arun S; PAN, Zhongli; CHEN, Chang; YANG, Xu-Hai; LIU, Zi-Liang; WANG, Hui; XIAO, Hong-Wei. Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods.

Trends in Food Science & Technology, [N.p.], vol. 106, pp. 104–112, 2020. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.012>.

GALVÁN, Ana Isabel; DE GUÍA CÓRDOBA, María; RODRÍGUEZ, Alicia; MARTÍN, Alberto; LÓPEZ-CORRALES, Margarita; RUIZ-MOYANO, Santiago; SERRADILLA, Manuel Joaquín. Evaluation of fungal hazards associated with dried fig processing. **International Journal of Food Microbiology**, vol. 365, p. 109541, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109541>.

GÖK, Veli; AKTOP, S; ÖZKAN, Mehmet; TOMAR, O. The effects of atmospheric cold plasma on inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* and some quality characteristics of pastırma—A dry-cured beef product. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [N.p.], vol. 56, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102188>.

HARIKRISHNA, Sadhula; ANIL, Pawase Prashant; SHAMS, Rafeeya; DASH, Kshirod K. Cold plasma as an emerging nonthermal technology for food processing: A comprehensive review. **Journal of Agriculture and Food Research**, vol. 14, 1 dez. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100747>.

JADHAV, Harsh B.; CHOUDHARY, Pintu. Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: a review. **Discover Food**, vol. 4, nº 1, 1 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00089-5>.

LIU, Mengjie; FENG, Junxia; YANG, Xudong; YU, Bo; ZHUANG, Jie; XU, Hangbo; XIANG, Qisen; MA, Ruonan; JIAO, Zhen. Recent advances in the degradation efficacy and mechanisms of mycotoxins in food by atmospheric cold plasma. **Academic Press**, vol. 270, 15 Jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115944>.

NAN, Mina; XUE, Huali; BI, Yang. Contamination, Detection and Control of Mycotoxins in Fruits and Vegetables. **Toxins**, vol. 14, nº 5, 2022. DOI 10.3390/toxins14050309. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6651/14/5/309>.

Tonetto ML, Lopes Teixeira G, Amboni RDMC, Block JM, Bornhorst GM, Laurindo JB, Feltes MMC. Upcycling Brazil nut press cake as an ingredient of an innovative spread and evaluation of its nutritional, functional, and sensory properties. **J Sci Food Agric**. 2025 Jun;105(8):4306-4316. doi: 10.1002/jsfa.14182. Epub 2025 Feb 24. PMID: 39989441.

CAPÍTULO I

AFLATOXIN DECONTAMINATION IN TREE NUTS: A SCOPING REVIEW OF PHYSICAL, CHEMICAL, AND BIOLOGICAL ADVANCES

CAPÍTULO I: Aflatoxin decontamination in tree nuts: a scoping review of physical, chemical, and biological advances

ABSTRACT

This scoping review examined recent scientific advances in aflatoxin decontamination methods for tree nuts. The study followed the JBI Manual for Evidence Synthesis and was reported according to PRISMA-ScR guidelines, guided by the question: “What are the most effective methods and techniques for aflatoxin decontamination in tree nuts?” After the selection process, 40 eligible studies were included. Physical approaches, such as atmospheric cold plasma, demonstrated a high capacity to degrade the most toxic forms while often preserving the sensory and technological characteristics of the food. Among chemical methods, ozonation and the use of organic acids achieved detoxification rates close to 100%, while inorganic selenium emerged as a promising alternative by combining efficacy with quality preservation. Biological methods showed significant sustainable potential, with relevant results using microorganisms such as *Bacillus* spp., *Bifidobacterium lactis*, and *Lactobacillus kefir*. Although various strategies have demonstrated significant efficacy, further technical advances, practical applicability studies, and industrial-scale validation are still needed to establish these approaches as part of integrated aflatoxin management systems in tree nuts.

Keywords: aflatoxins; reduction; nuts.

1 Introduction

Nuts and tree nuts are susceptible to infection by *Aspergillus fungi*, particularly *A. flavus* and *A. parasiticus*, during harvesting, storage, and processing (Ma et al. 2021). Aspergilli can survive in agricultural soils and infect many types of crops, producing aflatoxins that contaminate agricultural products and water (He et al. 2023). AFs are toxic and carcinogenic metabolites with strong chemical stability. AFs form deoxyribonucleic acid (DNA) adducts with guanine, inducing the development of cancerous cells (Wang et al. 2023). More than 20 types of AFs have been identified, with AFB₁, AFB₂, AFG₁, and AFG₂ being the most common; among them, AFB₁ is the most toxic (He et al. 2025). AFs are food and environmental contaminants that pose health risks, as they can cause acute and chronic poisoning, including carcinogenic, teratogenic, genotoxic, hepatotoxic, and immunotoxic effects in humans and other animals (He et al. 2023)

Mycotoxin contamination can cause economic losses in several ways, including reduced agricultural production, disposal and destruction of contaminated products, losses in animal production, increased healthcare costs, and higher expenses for analytical research (Leite et al. 2023). Plant-based products contaminated with mycotoxins generate more notifications in the European Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) than other hazards. AFs, the main fungal toxins, are most frequently associated with notifications concerning tree nuts and their products (Kowalska and Manning, 2021). RASFF notifications between 2011 and 2021 for “Nuts, Nut Products and Seeds” reported 52% (n = 1,545) for peanuts, 27% (n = 795) for pistachios, 10% (n = 311) for hazelnuts, 5% (n = 149) for almonds, 0.7% (n = 22) for Brazil nuts, 0.1% (n = 4) for walnuts, and 0.03% (n = 1) for pine nuts (Owolabi et al. 2023).

AFs are molecules that, once formed, are difficult to eliminate because they are heat-stable and decompose only at temperatures around 220 °C (Bashir et al., 2022). Strong oxidizing agents, such as chlorine and ozone, can destroy them. Due to the presence of the lactone ring, they are susceptible to bases. They have low molecular weight, are highly soluble in moderately polar solvents such as chloroform, methanol, and dimethyl sulfoxide, and are poorly soluble in water. They are particularly sensitive to ultraviolet light, especially when dissolved in polar solutions, and can be destroyed by autoclaving in the presence of ammonia or by treatment with hypochlorite (Freitas-Silva, Morales-Valle, Venâncio, 2013).

To reduce or eliminate AFs contamination and ensure food safety, decontamination methods may be physical, chemical, or biological. Their effectiveness depends on factors such as the chemical stability of mycotoxins, the nature of the process, the type and interaction with the

food matrix, and interactions with multiple mycotoxins (Rushing; Selim, 2019). It must be taken into account that these methods should inactivate, destroy, or remove the toxin; not produce or leave toxic residues; preserve the nutritional value of the food; not alter its acceptability or technological properties; and, if possible, destroy fungal spores to prevent proliferation and the production of new mycotoxins (MATEUS et al., 2021).

Therefore, to track and compile the methods used for Afs decontamination in tree nuts over the past 20 years (2005–2025), this scoping review was conducted to identify and discuss the existing literature on the subject.

2. Materials and Methods

2.1 Protocol

This scoping review was conducted in accordance with the JBI Manual for Evidence Synthesis and reported following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses extension for Scoping Reviews (PRISMA-ScR). The review was guided by the main research question: “What are the most effective methods and techniques for decontaminating aflatoxins in tree nuts?”

2.2 Eligibility criteria

Articles investigating methods for decontamination or reduction of aflatoxins in nuts were included if published between 2005 and 2025. Studies conducted in any geographical context were eligible for inclusion. Non-original works, such as commentaries, reviews, letters to the editor, case reports, theses, abstracts, and review articles, were excluded. Studies conducted exclusively on other food matrices, involving different mycotoxins, in vitro studies, and those that did not perform a before-and-after comparison of the applied methodology were also excluded.

2.3 Search strategy

A search for original articles was conducted using the following electronic bibliographic databases: PubMed, Web of Science, Scopus, and ScienceDirect. Keywords were selected from the Descriptors in Health Sciences (DeHS), using the search strategy: aflatoxins AND (decontamination OR reduction) AND (nuts OR “tree nuts”), with a publication date filter from 2005 to 2025. The search was performed in article titles, keywords, and abstracts.

The search strategy was not restricted by language. The last search was conducted on February 2, 2026.

2.4 Study selection

The authors conducted study selection in three phases: title screening, abstract review, and full-text reading and comprehension. Divergent decisions were resolved by consensus when necessary. Duplicate articles across different databases were identified and excluded using Rayyan QCRY® Software, and the peer review process was conducted within the same software, ensuring independent evaluation by the authors.

2.5 Data extraction

From the eligible studies, the reviewers extracted relevant information by reading the full articles and creating an extraction table based on criteria established by the researchers: (i) first author's name and year of publication; (ii) tree nuts; (iii) type of method; (iv) specific method applied; (v) type of aflatoxin; and (vi) reduction rate or efficiency. The extracted information is presented in Tables 1, 2, and 3.

2.6 Data analysis

The data extracted from the selected studies were summarized in Tables 1, 2, and 3 and categorized by decontamination method. The studies were organized chronologically by year of publication, beginning with the earliest identified study.

3. Results and discussion

3.1 Study selection

A total of 207 records were identified through database searches (PubMed, ScienceDirect, Scopus, and Web of Science). After 83 duplicates were removed, 124 unique records remained. After abstract screening, 43 records were retained. Full-text assessment resulted in the inclusion of 40 studies that met all eligibility criteria for this scoping review. Reasons for exclusion of the remaining studies are detailed in Figure 1.

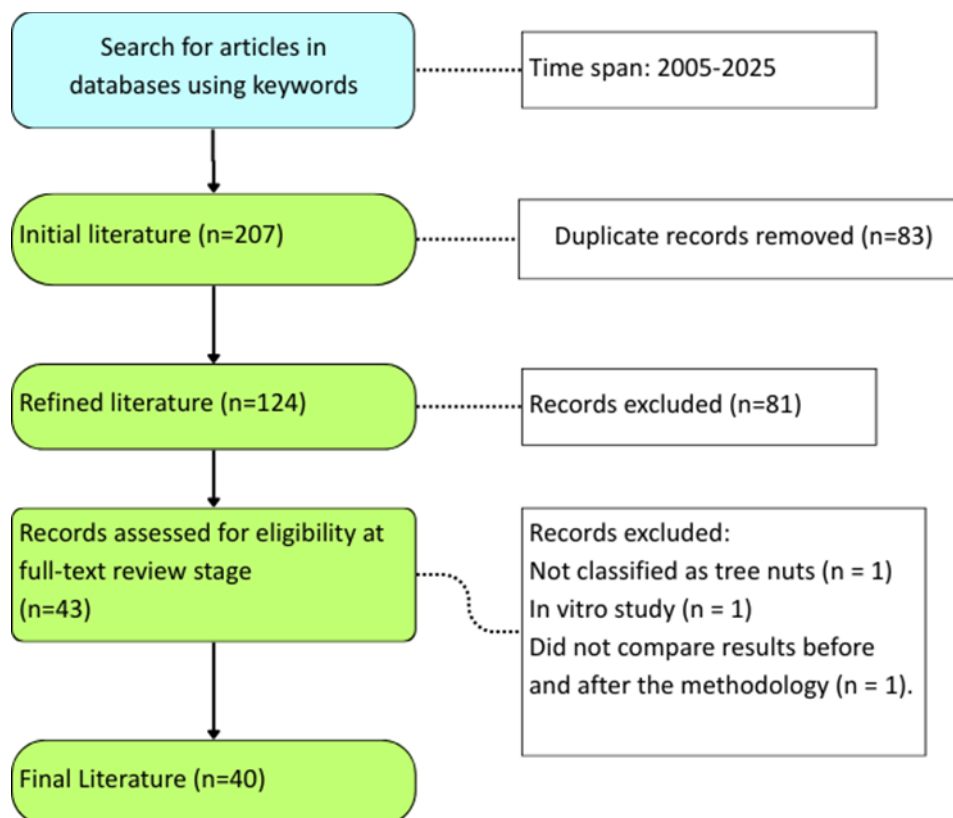


Figure 1. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) flow diagram. Number of records identified at each stage of retrieval, screening, and data extraction.

3.2 Description of the included studies

The studies included in this scoping review examined various methods for decontaminating or reducing aflatoxins in tree nuts, with most publications appearing between 2005 and 2025, reflecting growing scientific interest in food safety and mycotoxin control. The most frequently assessed food matrices were almonds, pistachios, Brazil nuts, hazelnuts, and walnuts, although some studies included other varieties. The decontamination methods analyzed included physical treatments such as radiation, heat, and pressure; chemical methods using oxidizing agents and adsorbents; and biological approaches involving microorganisms or enzymes. Most studies focused on AFB₁, recognized as the most toxic and prevalent aflatoxin, although some research included other variants such as AFB₂, AFG₁, and AFG₂. Reduction rates varied widely, ranging from modest outcomes to efficiencies exceeding 80%, with effectiveness influenced by both the applied method and the specific characteristics of

the tree nuts. The data extracted from the studies are summarized in Tables 1, 2, and 3, organized by decontamination method and year of publication.

Table 1 – Summary of the included studies applying physical methods on aflatoxins degradation.

Physical method				
References	Tree nuts	Applied technique	Aflatoxin	Efficiency/Reduction
Thermal				
Yazdanpanah et al. 2005	Pistachio	Industrial roasting	AFB ₁ /AFB ₂	95%
García-Cela et al. 2013	Pistachio	Industrial roasting	AFT	86.74%
Costa et al. 2017	Brazil nut	Natural convection drying	AFT	86%
Rastegar et al. 2017	Pistachio	Roasting + citric acid/lemon	AFB ₁	93,10%
Siciliano et al. 2017	Hazelnut	Roasting (hot air + infrared)	AFT	85-95%
Mahoney et al. 2020	Almonds	Blanching	AFT	76%
Morshedi et al. 2020	Pistachio	Roasting + infrared	AFT	90-95%
Valente et al. 2020	Hazelnut	Drying + storage	AFT	100%
Non-Thermal				
Basaran et al. 2008	Pistachio/Hazelnut	Cold plasma LPCP	AFT	50%
Basaran et al. 2009	Hazelnut	UV-C	AFT	25%
Jubeen et al. 2012	Pistachio	UVC irradiation	AFT	92%
Siciliano et al. 2016	Hazelnut	Cold plasma DBD	AFT	70%
Hassanpour et al. 2021	Pistachio	Gamma irradiation + MCNP simulation	AFB ₁	95%
Makari et al. 2021	Pistachio	Gamma irradiation (Co-60)	AFB ₁	86.36%
Makari et al. 2021	Pistachio	Cold plasma DBD	AFB ₁	52.42%
Esmacili et al. 2023	Pistachio	Cold plasma DBD	AFT	65%
Zeraatpisheh et al. 2023	Pistachio	UV-C + cold plasma	AFT	85%
Dinç et al. 2025	Mixed nuts	Atmospheric Pressure Cold Plasma	AFT	72.6%
Combined methods				
Sadeghi et al. 2023	Pistachio	Gamma irradiation/microwave	AFT	Confirmed reduction
Rastegar et al. 2017	Pistachio	Roasting + citric acid/lemon	AFB ₁	93,10%

AFT:Total aflatoxin; AFB₁:Aflatoxin B₁;AFB₂:Aflatoxin B₂

3.3 Physical methods

Physical methods are interventions that modify physical variables of the environment or food, such as temperature, humidity, radiation, pressure, or atmospheric composition, to affect the stability of mycotoxins. These methods do not involve directly adding chemical substances to the food, although they may trigger secondary chemical reactions, such as thermal or oxidative degradation of the toxins. These treatments primarily work by removing or limiting factors essential to fungal metabolism, such as available water and oxygen, or by exposing the food to lethal or inhibitory conditions, such as heat or anoxic atmospheres. Physical methods are notable for their applicability in post-harvest stages, as they do not leave chemical

residues and, in many cases, preserve the sensory and nutritional quality of treated foods.

Detailing each method analyzed in this study ($n = 19$), roasting is considered an essential technological process because, in addition to improving sensory characteristics, it also reduces the risks associated with mycotoxins. This treatment not only promotes partial degradation of toxins but also decreases the moisture content of the kernels, which limits fungal growth and mycotoxin production during storage. Despite its effectiveness, different studies report variable results influenced by factors such as temperature, exposure time, initial moisture, and contamination level. In this context, roasting applied for 30, 60, and 90 minutes at temperatures of 90, 120, and 150 °C showed distinct effects: the mildest treatment (90 °C for 30 minutes) resulted in lower degradation, whereas the most intense treatment led to a reduction greater than 95% of AFB₁, but with a burnt appearance of pistachios. Meanwhile, roasting at 150 °C for 30 minutes promoted a significant reduction of AFB₁ and AFB₂ without perceptible changes in the sample's flavor (Garcia-Cela et al. 2013; Yazdanpanah et al. 2005). Combined methods have also been reported, such as roasting with infrared heating. Studies indicate that applying either static hot air or infrared at 140 °C for 40 minutes to hazelnuts significantly reduces AFs levels, with infrared showing superior performance. Furthermore, the process does not compromise the nutritional profile of hazelnuts, preserving unsaturated fatty acids. Another important finding is that a large portion of the toxins concentrates in the perisperm after roasting, suggesting that removing the skin may further enhance product safety. Similar results were obtained in Iranian pistachios subjected to infrared roasting, where significant reductions in both AFs levels and microbial load were observed. Optimized conditions of 70 V for round-type pistachios and 90 V for long-type pistachios, at 10 cm from the heat source, achieved reductions close to 90–95%. These findings across different food matrices reinforce infrared roasting as a versatile and highly effective technology for decontamination, ensuring compliance with food safety standards without compromising nutritional quality (Siciliano et al. 2017; Morshedi and Razavi 2020).

A variation demonstrated that combining roasting with the application of organic acids, such as lemon juice and citric acid, significantly degrades AFB₁ in naturally contaminated pistachios. The mechanism involves synergy between heat and medium acidification: roasting at 120 °C for 60 minutes induces structural changes in the AFB₁ molecule, while organic acids facilitate chemical reactions such as lactone ring opening and modification of the 8,9 double bonds in the furan ring, both critical regions for toxin toxicity. This combination resulted in reductions of up to 93.1% of AFB₁, proving more effective than using heat or acids alone. Citric acid was more efficient than lemon juice due to its higher concentration and

greater ability to promote degradation reactions. Thus, thermal treatment combined with organic acids represents a promising approach for reducing AFs in nuts, with potential for industrial-scale application, provided the sensory quality of the food is preserved (Rastegar et al. 2017).

Cold plasma (CP) is an emerging technology for food decontamination, particularly for nuts and seeds that are susceptible to colonization by mycotoxin-producing fungi. Plasma, considered the fourth state of matter, consists of ions, electrons, and highly reactive neutral species that can break covalent bonds and initiate chemical reactions to inactivate microorganisms. Cold atmospheric pressure plasma generates highly reactive species without significantly increasing the temperature of the food matrix. This plasma is produced by ionizing gases such as pure nitrogen or nitrogen/oxygen mixtures, and its effectiveness depends on gas composition, applied power, and exposure time. The mechanism of action involves the production of reactive oxygen species (ROS) and reactive nitrogen species (RNS), including hydroxyl radicals (OH), ozone (O₃), hydrogen peroxide (H₂O₂), and oxygen ions, which directly attack the chemical structures of aflatoxins. In particular, the presence of the C8–C9 double bond in AFB₁ and AFG₁ makes these molecules more susceptible to oxidation, promoting furan ring opening and lactone modification, thus reducing their toxicity. Therefore, cold atmospheric plasma is effective in both fungal inactivation and chemical degradation of mycotoxins, providing a non-thermal alternative for decontaminating heat-sensitive foods such as hazelnuts. Application at 1150 W for 12 minutes reduced AFB₁ and total aflatoxins by about 70%, while treatment at 1000 W for 12 minutes left only 25.8% residual toxins. Additionally, the temperature increase was limited (maximum +28.9 °C), preserving the organoleptic characteristics of hazelnuts. This study demonstrated that cold atmospheric plasma is a promising technique for hazelnut decontamination, showing greater efficacy against the most toxic forms (AFB₁ and AFG₁) while maintaining sensory quality (Siciliano et al. 2016).

The application of cold plasma to pistachios using ambient air as the working gas, operating at 130 W power, 20 kHz frequency, and 15 kV voltage, with exposure times between 15 and 180 seconds, resulted in a maximum reduction of 52.42% in AFB₁, highlighting the technique's potential for detoxification. In terms of pistachio quality, a decrease in pigments (chlorophylls and carotenoids) was observed, causing the nuts to become darker, along with a reduction in soluble proteins and an increase in malondialdehyde (MDA), indicating greater lipid oxidation. However, total phenolics remained stable and antioxidant activity showed a slight increase, suggesting that cold plasma may be a promising alternative for

decontamination, balancing antimicrobial efficiency and detoxification with moderate impacts on nutritional and sensory quality. In another study, the use of a cold atmospheric plasma jet generated by dielectric barrier discharge (DBD), with a mixture of air and argon under optimized conditions (15 minutes, 20 kV, and about 62% argon), achieved a maximum reduction of 5.14 log in *Aspergillus flavus* population and reductions of 83.7% for AFB₁, 74.36% for AFB₂, 41.39% for AFG₁, and 50.74% for AFG₂. Importantly, this treatment did not alter quality parameters such as color, flavor, odor, moisture, free fatty acids, peroxides, or polyphenols, reinforcing the potential of cold plasma as an innovative and sustainable technology to ensure food safety in pistachios without compromising their sensory and nutritional characteristics (Makari et al. 2021; Esmaeili et al. 2022).

The simultaneous application of ultraviolet radiation (UV-C) and cold plasma in pistachios is a highly effective strategy for reducing AFs. UV-C radiation, emitted at approximately 254 nm, acts through direct photodegradation by breaking chemical bonds in aflatoxin molecules and damaging the DNA and RNA of microorganisms, thereby inhibiting their multiplication. When combined, these techniques have a synergistic effect, with UV-C photolysis and cold plasma oxidation working complementarily, resulting in reductions greater than 90% for AFB₁ and over 85% for other AFs, without compromising the sensory or nutritional quality of pistachios. This demonstrates the potential of this integrated approach as an innovative and sustainable alternative to ensure food safety in tree nuts (Zeraatpisheh et al. 2023).

Studies evaluating the effectiveness of UV-C radiation in reducing fungi and degrading AFs in contaminated nuts have shown promising, though variable, results. In contaminated hazelnuts, the application of UV-C (254 nm) at doses up to 9.99 J/cm² for 6 hours reduced *Aspergillus parasiticus* spore counts on the surface by up to 2 log. For AFs, a single 6-hour exposure resulted in approximately a 25% reduction in AFB₁ and AFG₁ levels, with no significant effect on AFB₂ and AFG₂. The mechanism of UV-C radiation against fungi involves alterations in cell wall permeability and rupture of spore membranes, causing loss of intracellular components essential for viability and reproduction, as well as direct microbial DNA damage, which compromises genetic integrity and the ability to synthesize toxins (Basaran 2009; Jubeen et al. 2012).

The application of UV-C radiation at 265 nm for up to 45 minutes to naturally contaminated pistachios, almonds, walnuts, and peanuts showed first-order degradation kinetics, with reductions of up to 91.4% for AFB₁, 99.1% for AFB₂, and 100% for AFG₂ in pistachios. Effectiveness was greater in samples with lower moisture content ($10 \pm 3\%$), and pistachios were more sensitive to decontamination than peanuts but less sensitive than walnuts. The

mechanism of UV-C action on AFs involves absorption of radiation by the chromophore groups of the toxins, especially in AFB₁, which has absorption peaks at 222, 265, and 362 nm. This absorption leads to the breakdown of the terminal furan ring, eliminating the active binding site of the toxin and promoting its degradation. Additionally, UV-C exposure induces the formation of reactive oxygen species (ROS), which contribute to the oxidation and fragmentation of aflatoxin molecules. The formation of up to 12 degradation products of AFB₁ has also been suggested, indicating significant structural modifications. These results reinforce the potential of UV-C radiation as an effective non-thermal physical technology for fungal control and aflatoxin reduction, particularly in pistachios, although its efficacy may vary depending on matrix type, exposure time, and moisture content (Jubeen et al. 2012).

Studies evaluating the effectiveness of gamma irradiation in pistachios have also been conducted. Using a cobalt-60 source, the method involved applying increasing doses of radiation under controlled temperature and humidity conditions, demonstrating a dose-dependent effect on both microbial inactivation and toxin degradation. At higher doses of 4 and 6 kGy, reductions of approximately 5 log in *A. flavus* populations and degradation of 73.27% and 86.36% of AFB₁, respectively, were observed. The mechanism of action involves the emission of high-energy photons that cause direct DNA damage in microorganisms and generate free radicals through water radiolysis, which oxidize and break aflatoxin molecules. Importantly, despite changes in parameters such as pigments and antioxidant activity at higher doses, the treatment did not significantly compromise the nutritional or sensory quality of pistachios, reinforcing gamma irradiation as an effective and safe non-thermal technology to reduce risks associated with aflatoxin contamination (Makari et al. 2021).

The application of combined microwave irradiation to pistachios was more effective, resulting in the lowest residual levels of AFB₁ and total AFs. Additionally, samples treated with this combined method did not show significant differences in sensory characteristics compared to control samples, indicating that pistachio quality was preserved (Sadeghi et al. 2022).

Drying is a post-harvest method used for fungal control and the prevention of aflatoxin contamination in tree nuts. Its effectiveness is directly related to the reduction of moisture content and water activity (Aw), which are essential factors for the growth of toxigenic fungi such as *Aspergillus flavus* and the biosynthesis of AFs. By limiting water availability in the substrate, drying creates a hostile environment for microbial proliferation and mycotoxin production. Additionally, depending on the temperature and duration applied, the process may also affect spore viability and, in some cases, promote partial degradation of toxins already present. Studies by Costa et al. (2017) and Valente et al. (2020) show that different drying

techniques vary in their ability to reduce fungal load and aflatoxin levels, making the choice of method and operational conditions critical for ensuring product safety and quality.

The effects of blanching on aflatoxin contamination in almonds have also been studied, focusing on both toxin reduction in contaminated almonds and the risk of cross-contamination. Blanching, performed by immersing almonds in hot water to facilitate skin removal, was effective in partially reducing aflatoxin levels, with reductions ranging from 13% to 76% in naturally contaminated almonds, depending on batch quality and process conditions. The main mechanism involves the partitioning of AFs from the almond into the blanching water and the skin, which retains a significant portion of the toxin. Additionally, some AFB₁ becomes unrecoverable after blanching, possibly due to binding with soluble almond components such as denatured proteins or partial degradation of the toxin in the heated aqueous medium. Blanching can therefore be a useful step in AFs control in almonds if measures are taken to prevent secondary contamination through reuse of the water (Mahoney et al. 2020).

Although the effectiveness of physical methods varies depending on the type of treatment, exposure time, temperature, humidity, and the food matrix, the studies analyzed indicate that these approaches, whether applied individually or in combination, show great potential for safe and efficient application in the tree nut production chain. However, it is essential to ensure that the processes used do not result in the formation of more toxic by-products during Afs degradation, requiring additional evaluations regarding the safety of the compounds generated. Another relevant aspect is that many of these methods preserve the sensory and nutritional properties of foods, which enhances their feasibility for industrial use. Thus, physical methods are established as promising, non-chemical, and sustainable alternatives for mycotoxin control, contributing to food safety and the commercial value of products.

Table 2 – Summary of the included studies using chemical methods on aflatoxin degradation.

References	Tree nuts	Chemical method		Efficiency/Reduction
		Applied technique	Aflatoxin	
Akbas and Ozdemir,2006	Pistachio	Ozonization	AFT	24%
Scussel et al. 2011	Brazil nut	O3 reducing atmosphere	AFT	100%
Jubeen et al. 2020	Mixed tree nuts	Organic acids	AFT	97%
Ribeiro et al. 2020	Brazil nut	Hypochlorite / peracetic	AFT	Not effective
Atakan and Caner,2021	Hazelnut	Ozonization	AFT	31.35%
Gammoh et al. 2023	Walnuts/Pistachio	Selenium treatment	AFB ₁ /AFG ₁	100% in walnuts
Kaminiaris et al. 2025	Pistachio	Fungicides	AFT	100%

AFT:Total aflatoxin; AFB₁:Aflatoxin B₁;AFB₂:Aflatoxin B₂

3.4 Chemical methods

Chemical methods ($n = 7$) have been studied as alternatives for AFs decontamination in foods, particularly in high-value products such as tree nuts. These methods use agents that can reduce or inactivate the toxins, thereby improving food safety. Although they show promising results, their use requires caution because they may cause undesirable changes in the nutritional and sensory quality of foods. This section discusses the main studies that investigated chemical methods for reducing aflatoxins, highlighting the efficiency achieved and the impacts observed on the quality of treated products.

Ozonation has been studied as a chemical method for reducing AFs in tree nuts and is recognized for its effectiveness and non-residual nature. Research indicates that ozone application can reduce AFT by approximately 24% in pistachios and about 31% in hazelnuts. The mechanism of action is linked to the strong oxidizing capacity of ozone, which reacts with the double bonds in the aflatoxin structure, particularly the C₈–C₉ bond of the furan ring in AFB₁ and AFG₁, resulting in derivatives with lower molecular weight and reduced toxicity. In whole pistachios, no significant changes were observed in quality parameters such as pH, moisture, color, fatty acid composition, or sensory acceptability, although sensory modifications were reported in ground pistachios. In hazelnuts, the treatment caused only a slight increase in peroxide values and a reduction of up to 29% in α -tocopherol content, without compromising color or texture (Akbas and Ozdemir 2006; Atakan and Caner 2021). Additionally, research has evaluated the use of oxygen-reducing modified atmospheres for storing shelled Brazil nuts, showing that ozone treatment was the only method capable of completely degrading AFs. In addition to degrading toxins, ozone also reduced the surface moisture of the nuts and fully eliminated fungi and yeasts through its oxidative action on cell wall components and microbial membranes. The use of ozone, particularly in combination with vacuum, appears to be a promising strategy for aflatoxin decontamination and fungal control in tree nuts, effectively degrading toxins while preserving product quality and sensory attributes (Scussel et al. 2011).

Organic acids have been shown to promote detoxification in pistachios and other nuts, with citric acid being particularly effective, achieving reductions of up to 99% for AFB₁ and 97% for total AFs in walnuts. The proposed mechanism involves acid hydrolysis of the lactone ring in AFB₁, resulting in the formation of less toxic compounds, whose toxicity is reported to be up to 450 times lower than that of the original molecule. Partial conversion of AFB₁ into the less toxic AFB₂ has also been observed, especially after treatment with lactic acid. Additional evidence shows that citric acid is highly effective in reducing AFs in pistachios, achieving a

degradation rate of 93.1% for AFB₁ when applied at 6 g for 1 hour at 120 °C. These findings indicate that the use of organic acids is a promising, safe, and effective chemical strategy for aflatoxin detoxification in nuts. In most cases, final aflatoxin levels remained below maximum permissible limits. However, ultimate safety depends on confirming that the degradation by-products are non-toxic and that the nutritional and sensory quality of the food is preserved. These factors were favorably observed in these studies but require case-by-case evaluation for industrial-scale applications (Jubeen et al. 2020; Rastegar et al. 2017).

Among chemical approaches, recent studies have highlighted innovative strategies capable of achieving complete aflatoxin reduction in tree nuts. The use of commercial fungicides in pistachios demonstrated remarkable efficacy, with compounds such as cyprodinil, fludioxonil, pyrimethanil, and flusilazole reducing *Aspergillus flavus* growth and eliminating aflatoxin production by up to 100% in laboratory assays; these results were later confirmed in two-year field trials. Additionally, the application of aqueous selenate solutions followed by drying at 50 °C proved equally promising, eliminating AFB₁ and reducing other mycotoxins such as AFG₁ and zearalenone by up to 89%, without compromising sensory quality. Together, these findings emphasize the innovative potential of chemical methods for aflatoxin decontamination, combining high efficacy with preservation of product quality. However, their practical application still requires thorough regulatory validation and toxicological assessment to ensure safety and sustainability in commercial production systems (Kaminiaris et al., 2025; Gammoh et al., 2023).

Despite promising advances in chemical methods for aflatoxin decontamination in tree nuts, several challenges remain before these methods can be applied at an industrial scale. Key obstacles include validating the toxicological safety of by-products formed during mycotoxin degradation and ensuring that the sensory and nutritional qualities of foods are not compromised. It is also essential to establish standardized, economically viable protocols that meet international regulatory requirements and can be integrated into production chains without health risks. The lack of data on the stability of residual compounds, variability among different food matrices, and consumer acceptance of chemical agents presents significant barriers. Therefore, future efforts should focus on multidisciplinary studies to establish these methods as safe and effective alternatives for aflatoxin control.

Table 3 – Summary of the included studies applying biological methods on aflatoxin degradation.

References	Tree nuts	Biological method		
		Applied technique	Aflatoxin	Efficiency/Reduction
Rahaie et al. 2010	Pistachio	Immobilized <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	AFB ₁	73%
Afsah-Hejri et al. 2013	Pistachio	Saprophytic yeasts	AFB ₁	89.10%
Gorran et al. 2013	Pistachio	Medicinal plants (Lamiaceae)	AFB ₁	97%
Doster et al. 2014	Pistachio	Atoxigenic strain AF36	AFB ₁	45%
Ansari et al. 2015	Pistachio	Kefir grains (RSM)	AFG ₁	96.80%
Hontanaya et al. 2015	Pistachio	Mustard flours	AFT	87%
Ansari et al. 2016	Pistachio	Kefir grains	AFB ₁	96%
Farzaneh et al. 2016	Pistachio	<i>Bacillus subtilis</i> UTBSP1 (fengycin/surfactin)	AFB ₁	100%
Siahmoshteh et al. 2017	Pistachio	<i>Bacillus subtilis</i> / <i>B. amyloliquefaciens</i>	AFT	84%
Abdolshahi et al. 2018	Pistachio	<i>Saccharomyces mannoprotein</i>	AFB ₁	84.40%
Ben Taheur et al. 2019	Almonds	Lactic acid bacteria	AFB ₁ /AFB ₂	82.27%/83.94%
Moradi et al. 2020	Pistachio	Native yeasts	AFB ₁	98.30%
Pakizeh et al. 2022	Pistachio	<i>Bifidobacterium lactis</i>	AFB ₁	59.40%
Karami-Osboo et al. 2023	Pistachio	Encapsulated essential oil (<i>Zataria multiflora</i>)	AFT	99%

AFT: Total aflatoxin; AFB₁: Aflatoxin B₁; AFB₂: Aflatoxin B₂; AFG₁: Aflatoxin G₁

3.5 Biological methods

Biological methods (n = 14) for aflatoxin decontamination have emerged as sustainable and safe alternatives to the chemical and physical approaches traditionally used. These methods rely on microorganisms, enzymes, and natural compounds, utilizing mechanisms such as degradation, adsorption, or inhibition of toxin synthesis by the producing fungi. In addition to reducing the risks associated with the formation of toxic by-products, they are compatible with more natural and environmentally friendly processing practices. In the context of tree nuts, the use of lactic acid bacteria, yeasts, and oxidative enzymes has shown significant potential to mitigate contamination, reinforcing the importance of biological strategies as part of an integrated food safety system.

Studies highlight the potential of microorganisms as biological agents for controlling AFs in pistachios. *Bacillus subtilis* and *B. amyloliquefaciens* significantly reduced the incidence of *Aspergillus parasiticus*, achieving reductions of up to 72% for AFB₁, 64% for AFB₂, and nearly complete elimination of AFG₁ and AFG₂ (approximately 99.8%), resulting in an overall decrease of 84% in total AFs in pistachios (Siahmoshteh et al. 2017). Additionally, *B. subtilis* UTBSP1, which produces the lipopeptides surfactin and fengycin, reduced *A. flavus* spores by 94.1% and eliminated AFB₁ in pistachios treated with 10⁷ CFU/mL, confirming the synergistic role of these compounds in fungal membrane destruction (Farzaneh et al. 2016). The mechanism of action was attributed to the combined production of surfactin and

fengycin, which destabilize the cell membrane by forming pores and altering permeability, leading to spore death and reduced toxin levels.

More recently, the use of *Bifidobacterium lactis* in pistachio paste has been reported, achieving reductions of 59.4% in AFB₁ under optimal conditions and up to 73% in specific treatments. The mechanism of action primarily involved adsorption and possible biodegradation of the toxin, along with additional benefits such as nutritional and sensory enrichment of the product (Pakizeh et al. 2022). Together, these studies reinforce that both *Bacillus* spp. and probiotics such as *B. lactis* are effective and safe alternatives for mitigating aflatoxin contamination in pistachios, particularly in the post-harvest period and in derivatives such as pistachio paste.

The use of lactic acid bacteria (LAB) has also proven to be a promising biological strategy for reducing contamination by toxigenic fungi and their mycotoxins in tree nuts. Research has shown that strains such as *Lactobacillus kefir* FR7 can significantly inhibit the growth of *A. flavus* and *A. carbonarius*, while markedly reducing the production of AFs and ochratoxin A. In artificially contaminated almonds, treatment achieved reductions of 85.27% for AFB₁ and 83.94% for AFB₂ after seven days of incubation. The mechanisms involved include the production of organic acids, hydrogen peroxide, and bacteriocins, as well as the ability of bacterial cells to adsorb or partially biodegrade the toxins (Ben Taheur et al. 2019).

Kefir grains, consisting of a symbiotic association of LAB and yeasts embedded in a polysaccharide matrix, have also been evaluated as biological agents. Research has shown that the microorganisms in kefir grains can adsorb and reduce AFG₁ and AFB₁ in pistachios by binding to cell walls, thereby decreasing their bioavailability without altering the chemical structure of the toxins. The application of preheated kefir grains at 70 °C and 110 °C to pistachios contaminated with AFG₁ resulted in a maximum predicted reduction of 96.8% under optimal conditions: an initial toxin concentration of 20 ng/g, 10% kefir grains, 6 hours of contact, and incubation at 30 °C. In pistachios contaminated with AFB₁, the maximum reduction was 96%, achieved with an initial concentration of 20 ng/g, 20% kefir grains, 6 hours of contact, and incubation at 30 °C (Ansari et al. 2015).

Studies with yeasts in pistachios demonstrate various biocontrol mechanisms against *A. flavus* and the production of AFB₁. Rahaie et al. (2010) showed that immobilized *Saccharomyces cerevisiae* reduced AFB₁ by 40–70%, with efficiency increasing to 60–73% after acid treatment of the cell wall, acting mainly through physical adsorption of the toxin to β -glucans and mannans. Afsah-Hejri (2013) isolated saprophytic yeasts from pistachio fruits and leaves, such as *Pseudozyma fusiformata* and *Cryptococcus albidus*, which reduced *A. flavus*

sporulation by up to 84.6% and AFB₁ production by up to 89.1%, through competition for nutrients and space and the production of exopolysaccharides that limit fungal colonization. More recently, Moradi et al. (2020) identified native yeasts such as *Pichia kudriavzevii* and *Lachancea thermotolerans*, which can reduce *A. flavus* growth by up to 60% and AFB₁ production by 90.6–98.3%, as well as decrease fungal density in soil, leaves, and pistachio shells by up to 99.7%. These effects occur through the production of volatile and non-volatile compounds that interfere with spore germination and the gene expression involved in aflatoxin biosynthesis. These findings indicate that various groups of industrial, saprophytic, and native yeasts provide complementary and effective strategies to reduce aflatoxin contamination in pistachios, with mechanisms including stable adsorption, ecological competition, and metabolic inhibition.

Doster et al. (2014) evaluated the atoxigenic strain AF36 in pistachio orchards. The product, composed of sterilized wheat seeds colonized by AF36, was applied to the soil at 11.2 kg/ha. Application significantly increased the frequency of the vegetative compatibility group YV36, reaching up to 93% of *A. flavus* isolates in treated orchards, without increasing fruit rot incidence. In commercial orchards, reductions in samples contaminated with AFB₁ ranged from 20% to 45%, depending on the year. The mechanism of action was attributed to ecological competition and competitive exclusion, in which the atoxigenic isolate replaces toxigenic strains of *A. flavus* and *A. parasiticus*, thereby reducing aflatoxin production.

Medicinal plants employ various natural strategies to reduce aflatoxin contamination in pistachios. Research has shown that essential oils and extracts from *Thymus daenensis*, *Satureja khozistanica*, and *Satureja macrosiphonia* can be highly effective. Essential oils of *T. daenensis* and *S. khozistanica* at 375 mg/L completely inhibited the growth of *A. flavus* and the biosynthesis of AFB₁, while an aqueous extract of *T. daenensis* directly degraded 97% of AFB₁ at 2000 mg/L, converting the toxin into a non-fluorescent compound (Gorran et al. 2013).

Mustard flour, both oriental and yellow, have also been used as sources of glucosinolates, which release isothiocyanates (ITCs) after enzymatic hydrolysis by myrosinase. In pistachios contaminated with *A. parasiticus*, oriental mustard flour reduced up to 100% of AFT with average reductions of 88–89% under simulated storage conditions, through the volatile action of allyl isothiocyanate (AITC), which binds to thiol and amino groups of fungal proteins and inhibits essential enzymes (Hontanaya et al. 2015). More recently, encapsulation of *Zataria multiflora* essential oil in chitosan nanoparticles (CS-ZEO) produced particles of 293 ± 17 nm with an encapsulation efficiency of 87.4%. In contaminated pistachios, free ZEO reduced

AFB₁ by 90.5%, while CS-ZEO achieved a 99.0% reduction, practically eliminating the toxin due to the antifungal action of phenolic compounds (thymol acetate, carvacrol acetate) combined with the controlled and prolonged release of the oil by the chitosan matrix (Karami-Osboo et al. 2023).

Together, these studies demonstrate that plant extracts and essential oils, whether applied directly, through volatile compound release, or via encapsulation, offer complementary mechanisms for inhibiting biosynthesis, promoting chemical degradation, and blocking the metabolism of AFs in pistachios.

Biological methods for controlling AFs in tree nuts still face significant challenges for industrial-scale application. Effectiveness demonstrated under laboratory conditions may decrease in real environments due to variability in factors such as temperature, humidity, food matrix composition, and initial fungal load. Additionally, the stability and viability of microorganisms during storage and application in dry products remain limited. The mechanisms of action, including adsorption, production of antifungal metabolites, and partial biodegradation, require further molecular and toxicological clarification, especially regarding the safety of generated by-products. The lack of standardized protocols and the need for validation across different tree nut matrices also impede commercial adoption. Therefore, although these methods represent safe and sustainable alternatives, biological approaches still require technical, regulatory, and economic advancements to become established components of integrated aflatoxin management strategies.

4. Conclusion

Analysis of studies shows that there is no single universal method for aflatoxin decontamination in tree nuts. Instead, different physical, chemical, and biological approaches offer varying degrees of effectiveness and applicability. Among physical methods, atmospheric cold plasma and UV-C radiation stand out, both demonstrating a high capacity to degrade the most toxic forms of aflatoxins (AFB₁ and AFG₁), often while preserving the sensory characteristics of the products. In chemical methods, ozonation and the use of organic acids excel due to their high detoxification rates, achieving reductions close to 100% under certain conditions, although validation of the safety of the resulting by-products is still required. Selenate also appears to be a promising alternative, combining efficacy with preservation of sensory quality. Biological methods offer significant sustainable potential, with notable results achieved by microorganisms such as *Bacillus spp.*, *Bifidobacterium lactis*, and *Lactobacillus kefir*, which act through adsorption, ecological competition, and

production of antifungal metabolites. The use of medicinal plants has also shown antifungal and detoxifying activity, especially when combined with encapsulation technologies. Among the matrices studied, pistachios are the predominant experimental model, followed by hazelnuts and almonds. This preference is due to the high susceptibility of pistachios to contamination by *Aspergillus flavus* and the economic importance of the product in the international market. The future of aflatoxin decontamination in tree nuts involves integrating multiple strategies that combine efficiency, toxicological safety, and economic feasibility. It also be essential to validate these techniques on an industrial scale, assess consumer acceptance, and meet international regulatory requirements to ensure safe and sustainable application in global production chains.

Acknowledgments

This study was financed by Carlos Chagas Filho Research Support Foundation of the State of Rio de Janeiro (FAPERJ E-26/200.270/2026); Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES - 0001); and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq -309528.2025-9).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

5. References

1. Abdolshahi, Anna, Farideh Tabatabaie yazdi, Ali Akbar Shabani, Seyed Ali Mortazavi, and Leila Monjazez Marvdashti. 2018. "Aflatoxin Binding Efficiency of *Saccharomyces Cerevisiae* Mannoprotein in Contaminated Pistachio Nuts." *Food Control* 87 (May): 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.12.008>.
2. Akbas, Meltem Yesilcimen, and Murat Ozdemir. 2006. "Effect of Different Ozone Treatments on Aflatoxin Degradation and Physicochemical Properties of Pistachios." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 86 (13): 2099–104. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2579>.
3. Ansari, F., K. Rezaei, F. Khodaiyan, and A. Rahmani. 2016. "Optimisation of Aflatoxin B1 Reduction in Pistachio Nuts by Kefir Grains Using Statistical Experimental Methods." *Quality Assurance and Safety of Crops and Foods* 8 (4): 509–17. <https://doi.org/10.3920/QAS2015.0619>.
4. Ansari, Farzaneh, Faramarz Khodaiyan, Karamatollah Rezaei, and Anosheh Rahmani. 2015. "Modelling of Aflatoxin G1 Reduction by Kefir Grain Using Response Surface Methodology." *Journal of Environmental Health Science and Engineering* 13 (1). <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0190-2>.

5. Atakan, Orhan, and Cengiz Caner. 2021. "Evaluation of Different Ozonation on Aflatoxin Degradation and Physicochemical Characteristics of Hazelnuts." *Journal of Food Processing and Preservation* 45 (3). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15276>.
6. Basaran, Pervin, Nese Basaran-Akgul, and Lutfi Oksuz. 2008. "Elimination of *Aspergillus Parasiticus* from Nut Surface with Low Pressure Cold Plasma (LPCP) Treatment." *Food Microbiology* 25 (4): 626–32. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2007.12.005>.
7. Bashir, Omar, Vasudha Sharma, Syed Zameer Hussain, et al. 2022. "Effect of Roasting and Frying Treatments on Aflatoxins and Capsaicinoids Content and Nutritional Profile of Green Chilies (*Capsicum Annum* L.)." *Food Science and Nutrition* 10 (11): 3672–79. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2966>.
8. Carvajal, Magda. 2013. *Carvajal, M.: Formación Del Cancerígeno AFB 1 de Los Alimentos 109 Diciembre, 2013 D.R. © TIP Revista Especializada En Ciencias Transformación de La afluToxina B 1 de alimenTos, En El Cancerígeno Humano, aducTo afB 1-Adn*. Vol. 16. no. 2.
9. Dinç, Mithat, Murat Taşan, Ibrahim Palabiyik, Muhammed Talha Akbulut, and Recep Gunes. 2025. "Effect of Atmospheric Pressure Cold Plasma on Aflatoxins in Mixed Nuts: A Comparative Study Using Natural and Spiked Samples." *Food Chemistry* 494 (December). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146203>.
10. Doster, Mark A., Peter J. Cotty, and Themis J. Michailides. 2014. "Evaluation of the Atoxigenic *Aspergillus Flavus* Strain AF36 in Pistachio Orchards." *Plant Disease* 98 (7): 948–56. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-13-1053-RE>.
11. Esmaeili, Zahra, Bahram Hosseinzadeh Samani, Firouzeh Nazari, Sajad Rostami, and Alireza Nemati. 2023a. "The Green Technology of Cold Plasma Jet on the Inactivation of *Aspergillus Flavus* and the Total Aflatoxin Level in Pistachio and Its Quality Properties." *Journal of Food Process Engineering* 46 (1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14189>.
12. Esmaeili, Zahra, Bahram Hosseinzadeh Samani, Firouzeh Nazari, Sajad Rostami, and Alireza Nemati. 2023b. "The Green Technology of Cold Plasma Jet on the Inactivation of *Aspergillus Flavus* and the Total Aflatoxin Level in Pistachio and Its Quality Properties." *Journal of Food Process Engineering* 46 (1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14189>.
13. Esmaeili, Zahra, Bahram Hosseinzadeh Samani, Firouzeh Nazari, Sajad Rostami, and Alireza Nemati. 2023c. "The Green Technology of Cold Plasma Jet on the Inactivation of *Aspergillus Flavus* and the Total Aflatoxin Level in Pistachio and Its Quality Properties." *Journal of Food Process Engineering* 46 (1). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14189>.
14. Farzaneh, Mohsen, Zhi Qi Shi, Masoud Ahmadzadeh, Liang bin Hu, and Alireza Ghassempour. 2016. "Inhibition of the *Aspergillus Flavus* Growth and Aflatoxin B1 Contamination on Pistachio Nut by Fengycin and Surfactin-Producing *Bacillus Subtilis* UTBSP1." *Plant Pathology Journal* 32 (3): 209–15. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.11.2015.0250>.
15. Freitas-Silva, Otniel, Héctor Morales-Valle, and Armando Venâncio. 2013. "Potential of Aqueous Ozone to Control Aflatoxigenic Fungi in Brazil Nuts." *ISRN Biotechnology* 2013 (July): 1–6. <https://doi.org/10.5402/2013/859830>.
16. Gammoh, Sana, Muhammad H. Alu'datt, Mohammad N. Alhamad, et al. 2023. "Determination of Mycotoxins in Nuts, Cereals, Legumes, and Coffee Beans and Effectiveness of a Selenium-Based Decontamination Treatment." *Journal of Food Safety* 43 (6). <https://doi.org/10.1111/jfs.13087>.

17. García-Cela, E., A. J. Ramos, V. Sanchis, and S. Marin. 2013. "Risk Management towards Food Safety Objective Achievement Regarding to Mycotoxins in Pistachio: The Sampling and Measurement Uncertainty Issue." *Food Control* 31 (2): 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.039>.
18. Gorran, Akbar, Mohsen Farzaneh, Mahmud Shivazad, Maryam Rezaeian, and Alireza Ghassempour. 2013. "Aflatoxin B1-Reduction of *Aspergillus Flavus* by Three Medicinal Plants (Lamiaceae)." *Food Control* 31 (1): 218–23. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.09.024>.
19. Hassanpour, Mehdi, Mohammadreza Rezaie, Mohammad Rashed Iqbal Faruque, and Mayeen Uddin Khandaker. 2021. "A Novel Approach for the Reduction of Aflatoxin in Pistachio Nuts Using Experimental and MCNP Simulation." *Radiation Physics and Chemistry* 189 (December). <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109752>.
20. He, Danfeng, Ruijing Cheng, Xiaolin Zhang, Xu Han, and Fujiang Zhou. 2025. "Environmentally Friendly Detoxification of Pistachios from Aflatoxins Using Citric Acid and Glycine-Based Bio-MOF." *Food Chemistry* 476 (June). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.143448>.
21. He, Kaiyu, Haoran Quan, Liu Wang, et al. 2023. "Engineering Cotton Fibers with Zirconium Metal-Organic Frameworks as a Recyclable Material for Sensing and Removing Aflatoxins in Water." *Sensors and Actuators B: Chemical* 397 (December). <https://doi.org/10.1016/j.snb.2023.134673>.
22. Hontanaya, C., G. Meca, F. B. Luciano, J. Mañes, and G. Font. 2015. "Inhibition of Aflatoxin B1, B2, G1 and G2 Production by *Aspergillus Parasiticus* in Nuts Using Yellow and Oriental Mustard Flours." *Food Control* 47: 154–60. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.07.008>.
23. Jubeen, Farhat, Farooq Sher, Abu Hazafa, Fatima Zafar, Mariam Ameen, and Tahir Rasheed. 2020. "Evaluation and Detoxification of Aflatoxins in Ground and Tree Nuts Using Food Grade Organic Acids." *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 29 (October). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101749>.
24. Kaminiaris, Michail D., Maria Varveri, Myrto G. Dimakopoulou, and Dimitrios I. Tsitsigiannis. 2025. "Effective Chemical Management of *Aspergillus Flavus* and Aflatoxin Contamination in Pistachio Nuts and Orchards." *Pest Management Science* 81 (9): 5062–70. <https://doi.org/10.1002/ps.8860>.
25. Karami-Osboo, Rouhollah, Marjan Mahboubifar, Mansoureh Mirabolfathy, Laleh Hosseinian, and Amir Reza Jassbi. 2023a. "Encapsulated *Zataria Multiflora*'s Essential Oil Inhibited the Growth of *Aspergillus Flavus* and Reduced Aflatoxins Levels in Contaminated Pistachio Nut." *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 51 (August). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102796>.
26. Karami-Osboo, Rouhollah, Marjan Mahboubifar, Mansoureh Mirabolfathy, Laleh Hosseinian, and Amir Reza Jassbi. 2023b. "Encapsulated *Zataria Multiflora*'s Essential Oil Inhibited the Growth of *Aspergillus Flavus* and Reduced Aflatoxins Levels in Contaminated Pistachio Nut." *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 51 (August). <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102796>.
27. Kyei-Baffour, Vincent Owusu, John Edem Kongor, George Anyebuno, Agnes Simpson Budu, Saalia Kwesi Firibu, and Emmanuel Ohene Afoakwa. 2021. "A Validated HPLC – FLD Method for the Determination of Mycotoxin Levels in Sun Dried Fermented Cocoa Beans: Effect of Cola Nut Extract and Powder." *LWT* 148 (August). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111790>.
28. Leite, Marta, Andreia Freitas, Jorge Barbosa, and Fernando Ramos. 2023. "Mycotoxins in Raw Bovine Milk: UHPLC-QTrap-MS/MS Method as a Biosafety Control Tool." *Toxins* 15 (3). <https://doi.org/10.3390/toxins15030173>.

29. Ma, Fei, Xinfu Cai, Jin Mao, Li Yu, and Peiwu Li. 2021. "Adsorptive Removal of Aflatoxin B1 from Vegetable Oils via Novel Adsorbents Derived from a Metal-Organic Framework." *Journal of Hazardous Materials* 412 (June). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125170>.
30. Mahoney, Noreen E., Luisa W. Cheng, and Jeffrey D. Palumbo. 2020. "Effect of Blanching on Aflatoxin Contamination and Cross-Contamination of Almonds." *Journal of Food Protection* 83 (12): 2187–92. <https://doi.org/10.4315/JFP-20-218>.
31. Makari, Mina, Mohammad Hojjati, Samira Shahbazi, and Hamed Askari. 2021a. "Effect of Co-60 Gamma Irradiation on *Aspergillus Flavus*, Aflatoxin B1 and Qualitative Characteristics of Pistachio Nuts (*Pistacia Vera L.*)." *Journal of Food Measurement and Characterization* 15 (6): 5256–65. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01060-z>.
32. Makari, Mina, Mohammad Hojjati, Samira Shahbazi, and Hamed Askari. 2021b. "Elimination of *Aspergillus Flavus* from Pistachio Nuts with Dielectric Barrier Discharge (DBD) Cold Plasma and Its Impacts on Biochemical Indices." *Journal of Food Quality* 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9968711>.
33. Mateus, Ana Rita Soares, Sílvia Barros, Angelina Pena, and Ana Sanches Silva. 2021. "Mycotoxins in Pistachios (*Pistacia Vera L.*): Methods for Determination, Occurrence, Decontamination." In *Toxins*, vol. 13. no. 10. Preprint, MDPI, October 1. <https://doi.org/10.3390/toxins13100682>.
34. Moradi, Mohammad, Maryam Rohani, Seyed Reza Fani, Mohammad Taghi Hamed Mosavian, Claudia Probst, and Pejman Khodaygan. 2020. "Biocontrol Potential of Native Yeast Strains against *Aspergillus Flavus* and Aflatoxin Production in Pistachio." *Food Additives and Contaminants - Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment* 37 (11): 1963–73. <https://doi.org/10.1080/19440049.2020.1811901>.
35. Mshanga, John Pancras, Edna Edward Makule, and Francis Muigai Ngure. 2023. "Physical Methods for Reduction of Aflatoxins Exposure in Groundnuts in Some Low-Income Countries: A Review." In *Current Research in Nutrition and Food Science*, vol. 11. no. 2. Preprint, Enviro Research Publishers, August 1. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.11.2.04>.
36. Owolabi, Iyiola O., Nitsara Karoonuthaisiri, Christopher T. Elliott, and Awanwee Petchkongkaew. 2023. "A 10-Year Analysis of RASFF Notifications for Mycotoxins in Nuts. Trend in Key Mycotoxins and Impacted Countries." In *Food Research International*, vol. 172. Preprint, Elsevier Ltd, October 1. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112915>.
37. Pakizeh, Mehdi, Leila Nouri, and Mohammad Hossein Azizi. 2022. "Probiotic-Based Optimization of Pistachio Paste Production and Detoxification of Aflatoxin B1 Using *Bifidobacterium Lactis*." *Journal of Food Quality* 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2504482>.
38. Rahaie, S, Z Emam-Djomeh, S H Razavi, and M Mazaheri. 2010. "IMMOBILIZED *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* AS A POTENTIAL AFLATOXIN DECONTAMINATING AGENT IN PISTACHIO NUTS." *Brazilian Journal of Microbiology* 41: 82–90.
39. Rastegar, Hossein, Shahram Shoeibi, Hassan Yazdanpanah, et al. 2017. "Removal of Aflatoxin B1 by Roasting with Lemon Juice and/or Citric Acid in Contaminated Pistachio Nuts." *Food Control* 71 (January): 279–84. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.06.045>.

40. Ribeiro, M. S.S., O. Freitas-Silva, I. M. Castro, et al. 2020. "Efficacy of Sodium Hypochlorite and Peracetic Acid against *Aspergillus Nomius* in Brazil Nuts." *Food Microbiology* 90 (September). <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103449>.
41. Rushing, Blake R, and Mustafa I Selim. 2019. "Aflatoxin B1: A Review on Metabolism, Toxicity, Occurrence in Food, Occupational Exposure, and Detoxification Methods." *Food and Chemical Toxicology* 124: 81–100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.11.047>.
42. Siahmoshteh, Fatemeh, Ilenia Siciliano, Houda Banani, et al. 2017. "Efficacy of *Bacillus Subtilis* and *Bacillus Amyloliquefaciens* in the Control of *Aspergillus Parasiticus* Growth and Aflatoxins Production on Pistachio." *International Journal of Food Microbiology* 254 (August): 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2017.05.011>.
43. Siciliano, Ilenia, Barbara Dal Bello, Giuseppe Zeppa, Davide Spadaro, and Maria Lodovica Gullino. 2017. "Static Hot Air and Infrared Rays Roasting Are Efficient Methods for Aflatoxin Decontamination on Hazelnuts." *Toxins* 9 (2). <https://doi.org/10.3390/toxins9020072>.
44. Siciliano, Ilenia, Davide Spadaro, Ambra Prella, et al. 2016. "Use of Cold Atmospheric Plasma to Detoxify Hazelnuts from Aflatoxins." *Toxins* 8 (5). <https://doi.org/10.3390/toxins8050125>.
45. Taheur, Fadia ben, Chalbja Mansour, Bochra Kouidhi, and Kamel Chaieb. 2019. "Use of Lactic Acid Bacteria for the Inhibition of *Aspergillus Flavus* and *Aspergillus Carbonarius* Growth and Mycotoxin Production." *Toxicon* 166 (August): 15–23. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2019.05.004>.
46. Wang, Su Yan, Daniela D. Herrera-Balandrano, Xin Chi Shi, Xin Chen, Feng Quan Liu, and Pedro Laborda. 2023. "Occurrence of Aflatoxins in Water and Decontamination Strategies: A Review." In *Water Research*, vol. 232. Preprint, Elsevier Ltd, April 1. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119703>.
47. Zeraatpisheh, Fatemeh, Fatemeh Mosallaie, Farideh Sanaei, Fereshteh Falah, Alireza Vasiee, and Farideh Tabatabaee Yazdi. 2023. "The Simultaneous Influence of Ultraviolet Rays and Cold Plasma on the Physicochemical Attributes and Shelf Life of Dried Pistachios during the Storage Period." *Journal of Food Process Engineering* 46 (9). <https://doi.org/10.1111/jfpe.14403>.

CAPÍTULO II

INFLUÊNCIA DO PLASMA FRIO DBD E UV-C NA DESCONTAMINAÇÃO DE AFLATOXINA EM TORTA DE CASTANHA-DA-AMAZÔNIA

CAPÍTULO II: Influência do plasma frio DBD e da radiação UV-C na descontaminação de aflatoxina em torta de castanha-da-amazônia

RESUMO

A castanha-da-amazônia é um dos principais produtos da região amazônica, amplamente valorizada pelo seu elevado teor nutricional e potencial econômico. Durante o processamento, gera-se a torta de castanha, subproduto que pode ser aproveitado na alimentação humana e animal. No entanto, a presença de micotoxinas, especialmente a AFB₁, representa um risco para a segurança alimentar e para a comercialização destes produtos. Este estudo avaliou a eficácia de tecnologias não térmicas na degradação de AFs presentes na torta de castanha-da-amazônia. Foram comparados os tratamentos com plasma frio DBD (Descarga de Barreira Dielétrica) e radiação UV-C, utilizando análises por HPLC-FLD para monitorizar os níveis de AFT. Os resultados demonstraram que o plasma frio DBD promoveu uma redução de 66% para AFT e 75% AFB₁, após 10 minutos de exposição, confirmando o seu potencial como método eficiente de descontaminação. Em contraste, o tratamento com UV-C apresentou limitações, evidenciando a necessidade de métodos analíticos complementares, como LC-MS/MS e RMN, para confirmar os produtos de degradação e avaliar a sua toxicidade residual. Este trabalho reforça a importância da inovação tecnológica como estratégia para a segurança alimentar e valorização da cadeia produtiva amazônica, além de abrir perspectivas para aplicação em escala industrial e em diferentes matrizes alimentares.

Palavras-chave: *Bertholletia excelsa*, aflatoxinas, mitigação, processos não-térmicos.

1.Introdução

A castanha-da-amazônia (*Bertholletia excelsa*) é um dos produtos mais importantes do agroextrativismo brasileiro, ocupando posição de destaque entre os alimentos de origem florestal. O setor envolve mais de 60 mil famílias de povos e comunidades tradicionais e cerca de 100 organizações comunitárias, incluindo cooperativas, associações e agroindústrias. Nos últimos anos, sua demanda apresentou crescimento expressivo, movimentando entre US\$ 300 e US\$ 400 milhões anuais no mercado mundial, principalmente com a castanha descascada e beneficiada (Wadt et al., 2023).

Além do impacto econômico, a castanha-da-amazônia possui elevado valor nutricional, sendo fonte de selênio e rica em proteínas, minerais e vitaminas. Por isso, tem sido cada vez mais valorizada pelas indústrias alimentícia, nutracêutica e cosmética, movimentando um mercado global estimado em US\$ 450 milhões por ano (BRASIL, 2020). Os principais importadores são os Estados Unidos, Reino Unido, Alemanha, Holanda, Canadá e Austrália, com expansão recente para Rússia e Coreia do Sul (FAOSTAT, 2022).

Os produtos resultantes da prensagem da amêndoa têm diferentes aplicações: o óleo é amplamente utilizado na indústria cosmética (Barbosa Abrantes et al., 2024), enquanto a torta pode ser transformada em farinha para pães, biscoitos, gelados e outros produtos, ou utilizada como fonte proteica em rações para animais (Wadt et al., 2023). Este subproduto apresenta um elevado teor proteico, rico em aminoácidos essenciais, especialmente sulfurados como a metionina e a cisteína (Vasquez-Rojas et al., 2021), o que reforça o seu potencial como ingrediente funcional. A bebida vegetal de castanha-da-amazônia é outro derivado de destaque, produzida a partir da torta, sendo uma alternativa ao leite de origem animal para pessoas com intolerância à lactose, adeptos de dietas vegetarianas ou preocupados com a saúde e o bem-estar (McClements, 2020).

Apesar de nutritiva, a amêndoa da castanha-da-amazônia tem sido frequentemente associada à contaminação por micotoxinas, principalmente aflatoxinas (AFs), metabólitos fúngicos com reconhecida atividade mutagênica, teratogênica e carcinogênica (Kluczkowski et al., 2022). A produção destas toxinas depende de condições favoráveis ao crescimento dos fungos, como atividade de água, teor de umidade, temperatura, pH e composição química do alimento – fatores amplamente presentes em regiões tropicais, onde a castanha é recolhida (Kluczkowski et al., 2023). Este cenário reforça a necessidade de atenção quanto à segurança dos seus derivados, avaliando se estão dentro dos limites seguros de consumo de AFs. No Brasil, a Resolução n.º 722, de 1 de julho de 2022, da ANVISA, estabeleceu limites máximos de aflatoxinas totais (AFT) em castanha-da-amazônia sem casca de até 10 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ para consumo

direto e $15 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ para processamento, além de $20 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ para castanha com casca (BRASIL, 2022). Contudo, a legislação vigente ainda não contempla limites específicos para a torta de castanha-da-amazônia, restringindo-se apenas à amêndoa.

Diversas abordagens físicas, químicas e biológicas têm sido propostas para prevenir o crescimento fúngico e reduzir as micotoxinas. Os métodos físicos tradicionais, embora eficazes em alguns casos, são geralmente demorados, exigem elevado consumo energético e podem afetar negativamente a qualidade dos alimentos (FOLIGNI et al., 2022; MAKARI et al., 2021). Por estas razões, cresce o interesse da indústria alimentar por tecnologias emergentes não térmicas, como a irradiação ultravioleta (UV), luz pulsada e plasma frio. Estas técnicas promovem a degradação das micotoxinas através da alteração da sua estrutura química, com vantagens como menor perda de nutrientes, preservação da qualidade sensorial, ausência de resíduos tóxicos e baixo consumo energético (DENG et al., 2020; ZERAATPISHEH et al., 2023).

Entre estas alternativas, o plasma frio tem demonstrado superar muitas limitações dos métodos convencionais, apresentando elevada eficiência na descontaminação com impacto mínimo na qualidade dos alimentos (FOLIGNI et al., 2022). Embora estudos anteriores tenham apresentado resultados promissores na degradação de micotoxinas em diferentes matrizes alimentares, até ao momento não existem trabalhos publicados sobre os efeitos da aplicação de radiação UV-C e plasma frio especificamente em torta de castanha-da-amazônia. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia da descontaminação de AFs por plasma frio DBD e radiação UV-C em torta de castanha-da-amazônia, analisando a taxa de redução das AFs e os parâmetros cromáticos.

2. Material e métodos

2.1 Produtos químicos e reagentes

As aflatoxinas padrão (AFB_1 , AFB_2 , AFG_1 e AFG_2) foram adquiridas da Restek lote: 031323 (St. Louis, MO, EUA). Os reagentes KCl da marca Proquimicos, NaCl da marca Dinâmica, KH_2PO_4 da Vetec e Na_2HPO_4 da marca Nuclear. O ácido trifluoroacético para HPLC da Tedia (São Paulo, Brasil). Os solventes orgânicos hexano, clorofórmio, acetonitrila e metanol de grau HPLC foram da Merck (São Paulo, Brasil); A água ultrapura foi obtida usando um sistema de purificação Rios/Milli-Q (Millipore, Danvers, MA, EUA). Papéis de filtro quantitavos foram adquiridos da JProLab (São José dos Pinhais, PR) e os filtros de polipropileno HPLC de 13 mm com membrana de PVDF de $0,45 \mu\text{m}$ Durapore (Millipore,

Danvers, MA, EUA) foram adquiridos da Merck (São Paulo, Brasil).

2.2 Amostragem

A castanha-da-amazônia, naturalmente contaminada, foi obtida numa indústria localizada em Manaus, Amazonas. O lote tinha sido descartado pela empresa por apresentar níveis de AFT acima do limite máximo permitido pela legislação em vigor. As amêndoas foram posteriormente prensadas numa prensa automática da marca Ecirtec (Bauru, SP), modelo MPE-40 AC, para obtenção da torta, procedimento realizado no Laboratório NECTA da Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade Federal do Amazonas.

2.3 Tratamento com plasma frio DBD

Os padrões do equipamento seguiram Esmaeli et al., 2023, com adaptação. O equipamento de plasma frio do tipo DBD foi desenvolvido no Laboratório de Plasma Aplicado do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). O procedimento experimental consistiu em posicionar a torta de castanha-da-amazônia preenchendo uma camada uniforme de 0,5 cm no fundo de um recipiente de vidro hermeticamente fechado, no qual inicialmente foi realizado vácuo e em seguida se introduziu uma pequena quantidade de gás argônio (aproximadamente 5% em pressão) chegando a uma pressão de trabalho da ordem de 6,0 mbar. Em seguida, o plasma foi gerado no interior do recipiente por meio de uma fonte alternada de alta tensão com acoplamento capacitivo (descarga tipo DBD), utilizando aproximadamente uma voltagem de 15 kV, uma potência de 200 W e frequência de 20 kHz. O tratamento das amostras foi conduzido em diferentes tempos de exposição ao plasma, variando entre 5, 7, 10 e 15 minutos.

2.4 Tratamento UV-C

Os tratamentos com UV-C foram realizados de acordo com Hassan et al., 2020, com pequenas modificações. As tortas foram acondicionadas em bandejas e colocadas numa câmara equipada com uma lâmpada UV-C. As tortas foram expostas às doses de UV-C durante 5, 7, 10 e 15 minutos. Durante os tratamentos, as tortas foram colocadas a uma distância de 20 cm da fonte de UV-C com potência de 570W, modelo UVC-0314 da marca UV Hortifruti.

2.5 Espectroscopia ATR-FTIR

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR), Bruker Vertex 70 (Billerica, MA, EUA), foi realizada no Laboratório de Interfaces do CBPF, em uma amostra

de controle sem tratamento e em amostras tratadas com plasma frio DBD durante 7 e 15 minutos, com o objetivo de identificar os grupos funcionais presentes antes e após o tratamento com plasma frio. Para a aquisição dos espectros, utilizou-se um acessório de Reflexão Total Atenuada (ATR) equipado com cristal de ZnSe, adequado para análise de sólidos. As tortas foram posicionadas diretamente sobre a superfície do cristal, garantindo contato adequado para adquirir o espectro da radiação refletida. O detector MIR registrou os espectros na faixa de 400–4000 cm^{-1} , intervalo habitualmente utilizado para caracterização de compostos orgânicos. Os espectros obtidos permitiram identificar ligações moleculares relevantes, fornecendo informações sobre grupos funcionais associados à composição química da amostra e potenciais alterações relacionadas com a redução da toxicidade da AFB₁.

2.6 Quantificação de aflatoxinas

A análise foi realizada segundo o método de Castro et al., 2013 e Ribeiro et al., 2020, com adaptações. Foram pesados aproximadamente 25 g das tortas de castanha-da-Amazônia e transferidos para o recipiente de vidro do dispersor de alta velocidade Omni Mixer®. Em seguida, adicionaram-se 5 g de cloreto de sódio, 150 mL de metanol a 80% e 50 mL de hexano (ambos de grau HPLC). A mistura foi agitada durante 3 minutos a 800 rpm e filtrada em papel de filtro rápido, sendo posteriormente filtrada em membrana de PTFE utilizando sistema de vácuo. Um volume de 10 mL do filtrado foi transferido para um frasco, ao qual foram adicionados 60 mL de tampão PBS. A solução foi passada por uma coluna de imunoabsorção AFLAPREP P07 da R-Biopharm, instalada num manifold, com fluxo de 2 mL/min. A coluna foi lavada com 15 mL de água deionizada e seca com ar. As AFs foram eluídas com a adição de 2 mL de metanol, utilizando o sistema de vácuo. O eluato contendo as AFs foi evaporado sob fluxo de nitrogênio em banho-maria a 40 °C.

2.6.1 Pré-derivatização por TFA

Sob capela, dissolveu-se o resíduo seco em 600 mL de acetonitrila e agitou-se no vórtex durante 30 s. Filtrou-se com membrana para o vidro de derivatização e acrescentaram-se 1,2 mL de derivatizante (10 mL de ácido trifluoroacético + 5 mL de ácido acético + 35 mL de água Milli-Q), agitando novamente no vórtex por 30 s. Colocou-se em banho-maria a 65 °C durante 8 minutos e 30 segundos e transferiu-se 1 mL para o vial.

2.6.2 Parâmetros cromatográficos

Curva padrão – A partir de uma solução padrão certificada contendo as quatro aflatoxinas

(AFs), prepararam-se soluções com diferentes concentrações para sete pontos da curva. As concentrações da curva analítica variaram entre 2,104 e 25,250 µg/mL. As análises foram realizadas num sistema cromatográfico LC-20A (Shimadzu), acoplado ao sistema HPLC/DFL.

Coluna cromatográfica X-Bridge® RP18 (Waters Technologies), 5 µm (4,6 × 150 mm). Fase móvel composta por acetonitrila/metanol/água ultrapura na proporção 175:175:650 (v/v), com fluxo de 0,8 mL/min em modo isocrático. Detector de fluorescência: excitação a 360 nm e emissão a 440 nm. Volume de injeção: 10 µL.

2.6.3 Validação do método

O método analítico utilizado neste estudo foi validado por Castro et al., 2013, com os valores de LD e LQ, respetivamente: 0,04 e 0,13 µg/kg (AFB₁), 0,02 e 0,08 µg/kg (AFB₂), 0,03 e 0,10 µg/kg (AFG₁) e 0,03 e 0,11 µg/kg (AFG₂).

2.7 Determinação de cor instrumental

A cor das amostras foi determinada antes e após os tratamentos, utilizando um colorímetro digital modelo Chroma Meter (Konica Minolta; CR-400). Utilizou-se a escala CIELab para determinar os parâmetros: L1*, que indica a luminosidade da amostra; L2*, luminosidade inicial da amostra-padrão; a1*, parâmetro de cor vermelho/verde da amostra; a2*, parâmetro inicial de cor vermelho/verde da amostra-padrão; b1*, parâmetro da cor azul/amarelo da amostra; b2*, parâmetro inicial da cor azul/amarelo da amostra-padrão.

Além disso, a diferença total de cor entre as amostras antes e após o tratamento foi determinada pelo índice ΔE*, segundo a equação:

$$[\Delta E^* = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}]$$

Estes parâmetros permitiram avaliar alterações na aparência das amostras em função dos diferentes tratamentos aplicados.

2.8 Análise estatística

A redução dos níveis de AFs foi avaliada por análise de variância (ANOVA), considerando como fatores independentes o tipo de tratamento (UV-C e plasma frio) e o tempo de exposição (5, 7, 10 e 15 minutos). As possíveis interações entre estes fatores também foram analisadas para identificar efeitos combinados. Paralelamente, os parâmetros cromáticos (L*, a*, b*, C* e h°) foram submetidos a ANOVA, com o objetivo de verificar diferenças

significativas entre os tratamentos e tempos de exposição.

As análises estatísticas foram realizadas com os softwares RStudio e Excel. Quando foram identificadas diferenças significativas, aplicou-se o teste de Tukey para comparações múltiplas, adotando-se um nível de significância de $p < 0,05$.

3.Resultados e discussão

3.1 Quantificação de aflatoxinas

A análise de variância revelou diferenças significativas entre os tratamentos, confirmadas pelo teste de Tukey (Tabela 1). O tratamento CP10 (cold Plasma 10 min) apresentou as menores médias para AFG₁, AFB₁ e o AFT, sugerindo maior eficácia na redução, embora não tenha diferido estatisticamente da amostra controle. Em contraste, os tratamentos UV (UV5, UV7 e UV15) apresentaram as maiores médias, significativamente superiores, indicando menor eficiência. Para AFG₂ e AFB₂ não foram observadas diferenças significativas, reforçando que os efeitos dos tratamentos se concentram em AFG₁ e AFB₁.

Tabela 1-Efeito do Plasma Frio (CP) e UV- C na redução de aflatoxinas em torta de castanha-da Amazônia

Tratamentos	AFG ₁ (μg/kg)	AFB ₁ (μg/kg)	AFG ₂ (μg/kg)	AFB ₂ (μg/kg)	AFT(μg/kg)
controle	2,38±0,51 ^{ab}	3,11 ± 0,76 ^{abc}	0,14± 0,02 ^a	0,30± 0,10 ^a	5,94 ± 1,38 ^{abc}
CP5	2,48± 0,35 ^{ab}	3,48 ± 0,31 ^{bc}	0,13± 0,01 ^a	0,31± 0,03 ^a	6,40 ± 0,70 ^{abc}
UV5	3,67± 1,03 ^b	4,88± 0,71 ^c	0,17± 0,09 ^a	0,51± 0,16 ^a	9,23± 2,00 ^c
CP7	1,61± 0,32 ^{ab}	1,23± 0,02 ^{ab}	0,05± 0,01 ^a	0,11± 0,03 ^a	2,99± 0,44 ^{ab}
UV7	3,74± 1,24 ^b	4,81± 1,17 ^c	0,18± 0,05 ^a	0,52± 0,03 ^a	9,24± 2,49 ^c
CP10	1,10 ± 0,03 ^a	0,79± 0,09 ^a	0,04± 0,05 ^a	0,08± 0,01 ^a	2,01± 0,18 ^a
UV10	2,34 ± 0,51 ^{ab}	3,72± 1,03 ^{bc}	0,10 ± 0,01 ^a	0,38± 0,06 ^a	6,54 ± 1,61 ^{abc}
CP15	3,12± 0,46 ^{ab}	3,49± 0,19 ^{bc}	0,23± 0,11 ^a	0,62± 0,41 ^a	7,46± 1,17 ^{bc}
UV15	3,13± 0,07 ^{ab}	4,10± 0,05 ^c	0,14± 0,01 ^a	0,41± 0,01 ^a	7,79± 0,04 ^{bc}

Médias (± desvio-padrão) dos níveis de aflatoxinas (AFG₁, AFB₁, AFG₂, AFB₂ e AFT) quantificados por HPLC-FLD.

A análise dos resultados revelou reduções expressivas nos níveis de AFT e de AFB₁ nos tratamentos CP10 e CP7 em comparação com o controle. Para a AFT, o tratamento CP10 promoveu uma redução aproximada de 66%; estas reduções também podem ser observadas nos cromatogramas (Figura 1), enquanto o CP7 reduziu cerca de 50%. Estes valores indicam que ambos os tratamentos foram eficazes, com destaque para o CP10, que apresentou a maior taxa de redução. No caso da AFB₁, o tratamento CP10 reduziu aproximadamente 75% em

relação ao controle, enquanto o CP7 apresentou uma redução de cerca de 60%. Estes resultados estão de acordo com os observados por Esmaeili et al., 2022, que investigaram o uso de plasma frio em pistácio e observaram reduções máximas de 83,7% para AFB₁, 74,4% para AFB₂, 41,4% para AFG₁ e 50,7% para AFG₂ em tratamento durante 15 minutos (Esmaeili et al., 2022).

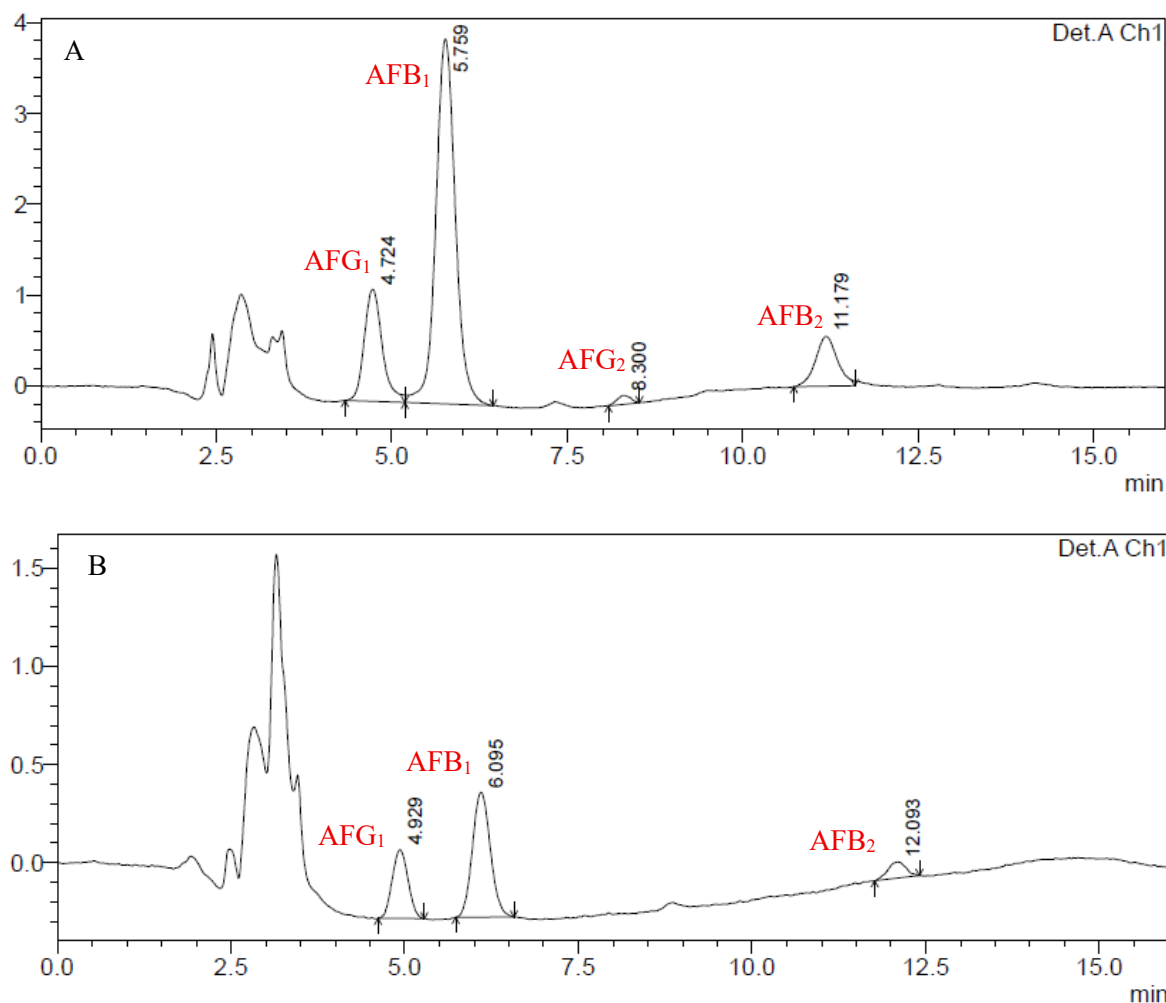


Figura 1 – A: Cromatograma da amostra sem tratamento; B: Cromatograma da amostra após tratamento com plasma frio DBD durante 10 minutos.

A AFB₁ é considerada a micotoxina mais tóxica e carcinogênica. A sua estrutura química apresenta grupos funcionais críticos, como carbonilas, lactona e sistemas aromáticos conjugados, que explicam os padrões característicos observados nos espectros de FTIR. Estes espectros exibem picos marcantes em regiões específicas: 2850–3100 cm⁻¹ (estiramento aromático –C–H e CH₂), 1670–1820 cm⁻¹ (carbonila C=O), 1400–1600 cm⁻¹ (C=C aromático), além de bandas em 1364–1369 cm⁻¹ (–CH₃ próximo do anel epóxi) e 1040–1050 cm⁻¹ (C–O–C da lactona). Estes comprimentos de onda permitem confirmar a presença de

AFB₁ em alimentos, embora possam ser percebidas diferenças subtis na intensidade ou posição dos picos, refletindo variações da matriz ou das condições de análise (Sein et al., 2024; Salisu; Almajir, 2020).

Com a realização do ATR-FTIR nas amostras tratadas com plasma frio durante 7 e 15 minutos (Figura 2), observou-se uma redução progressiva das bandas em 1587 cm⁻¹ (C=C aromático), 1393 cm⁻¹ (-CH₃ próximo ao anel epóxi) e 1038 cm⁻¹ (C-O-C da lactona), características da AFB₁. A análise do espectro evidencia que a ação do plasma frio promove a hidrólise da lactona, pela redução da banda em ~1038 cm⁻¹, oxidação do anel aromático (1587 cm⁻¹) e desalquilação de grupos metilo/metileno (1393 cm⁻¹), mecanismos que desestabilizam a estrutura conjugada da molécula (Honjnik et al., 2021).

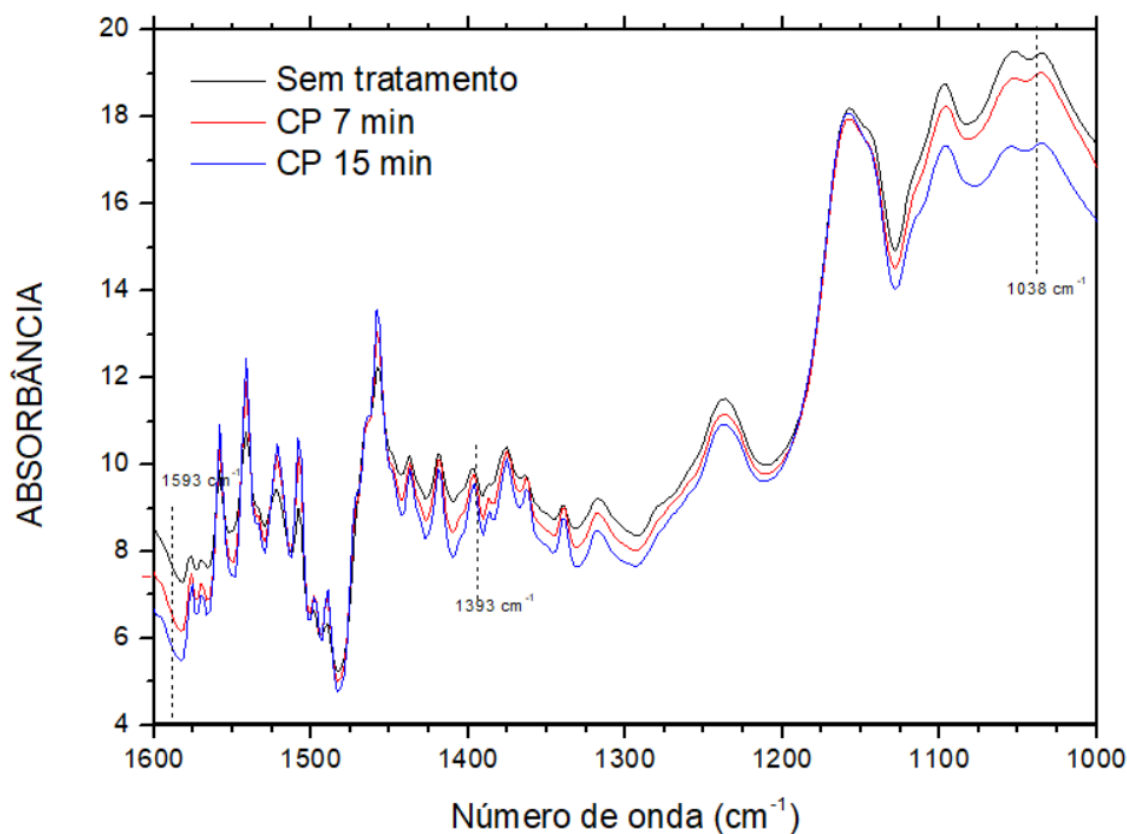


Figura 2 – Espectrograma das amostras após tratamento durante 7 e 15 minutos.

Estudos de Wielogorska et al. e Hojnik et al. relatam que o mecanismo de ação do plasma de barreira dielétrica (DBD) sobre a AFB₁ baseia-se na geração de uma ampla gama de espécies reativas de oxigênio e nitrogênio (RONS), como radicais hidroxilo (OH), hidroperóxido (HO₂), ozônio (O₃), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), óxido nítrico (NO) e dióxido de

nitrogênio (NO_2). Estas espécies, altamente oxidantes, interagem com a molécula da aflatoxina principalmente na dupla ligação $\text{C}_8=\text{C}_9$ do anel furano terminal, considerada o ponto mais crítico para a sua toxicidade. A ruptura dessa ligação compromete a capacidade da toxina de formar adutos com o DNA, reduzindo drasticamente o seu potencial carcinogênico (Hojnik et al., 2021). Como resultado destas reações, são gerados vários subprodutos de degradação ($\text{C}_{17}\text{H}_{15}\text{O}_7$, $\text{C}_{16}\text{H}_{11}\text{O}_6$, $\text{C}_{15}\text{H}_{13}\text{O}_7$, $\text{C}_{14}\text{H}_{10}\text{O}_6$) (Figura 3), identificados por Hojnik et al. (2021) através de espectrometria de massas e RMN, que apresentam toxicidade significativamente reduzida (Wielogorska et al., 2019)

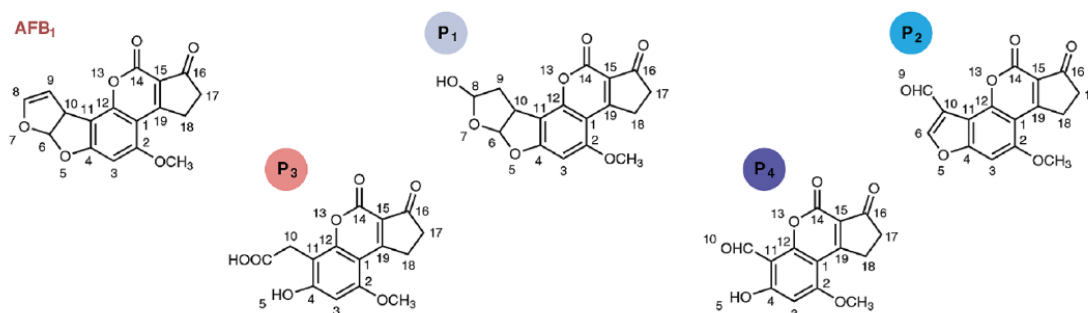


Figura 3-Produtos da degradação da AFB₁ após aplicação do plasma frio.

Fonte: Hojnik et al., 2021

Em contraste, os tratamentos com radiação UV (UV5, UV7, UV15) apresentaram valores significativamente superior na análise por HPLC-FLD, sugerindo menor eficiência e até um aparente aumento nos níveis de AFs. Este resultado pode ser explicado por estudos prévios que apontam limitações da radiação UV na degradação de micotoxinas, devido à formação de subprodutos e à possibilidade de interferência em métodos baseados em imunoafinidade. No estudo de Zou et al., a aplicação de UV em AFB₁, AFB₂ e AFG₁ resultou em taxas de degradação superiores a 80% em apenas 10 minutos, com identificação de múltiplos produtos de degradação por UPLC-Q/TOF-MS. Os principais fragmentos observados incluíram derivados de hidroxilação, oxidação, abertura do anel lactônico e perda de grupos metoxi ou carbonila. Apesar da redução significativa da toxicidade, os autores destacaram que estes produtos preservam parte do núcleo aromático das AFs, o que pode levar à interferência em análises convencionais (Zou et al., 2024). Complementarmente, Zhang et al. investigaram a degradação da AFB₁ em óleos vegetais e confirmaram vias semelhantes de modificação estrutural (Figura 4), incluindo desmetilação, oxidação, hidrólise e perda de CO. Ao aplicar análises de ESP, os autores demonstraram que todos esses produtos apresentam perfis eletrônicos distintos da AFB₁, resultando em baixa reatividade cruzada com os anticorpos

seletivos desenvolvidos no próprio estudo. Esta evidência reforça que o aumento aparente de aflatoxina observado por HPLC-FLD após tratamento com UV pode não corresponder à molécula original de AFB₁, mas sim à fluorescência de derivados capturados durante a etapa de imunoafinidade. (Zhang et al.,2026)

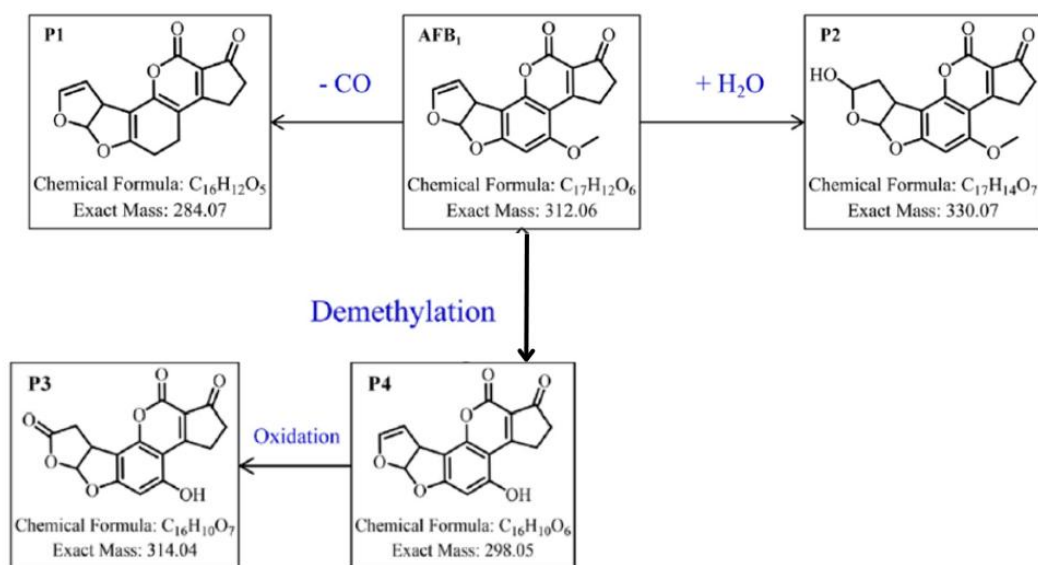


Figura 4- Produtos da degradação de AFB₁ após tratamento por UV-C

Fonte: adaptado de Zhang et al.,2026

A possibilidade de interferência destes derivados não se restringe às análises com radiação UV. Nos tratamentos com plasma frio (CP5 e CP15), também se observou aumento nos níveis de AFs por HPLC-FLD. Contudo, ao analisar o espectro de FTIR do tempo CP15, verificou-se uma redução clara dos sinais característicos das estruturas de AFB₁, evidenciando que a molécula foi efetivamente degradada. Este resultado comprova que a hipótese é válida: o aumento aparente dos níveis de AFs em HPLC-FLD resulta da interferência de produtos de degradação fluorescentes, e não da presença da toxina intacta.

Estes resultados destacam a necessidade de desenvolver métodos analíticos capazes de caracterizar os produtos de degradação da aflatoxina e reduzir interferências que podem originar resultados falso-positivos. O uso de técnicas confirmatórias, como a espectrometria de massas (LC-MS/MS) e a espectroscopia de infravermelho (FTIR), constitui alternativas robustas para a análise estrutural desses derivados e para garantir maior confiabilidade nos processos de monitorização da detoxificação.

3.2 Análise de cor

A análise estatística dos parâmetros cromáticos, realizada pelo teste de Tukey (Tabela 2), evidenciou que os tratamentos com UV-C e plasma frio tiveram efeitos distintos sobre a cor da torta de castanha-da-amazônia. Em relação à luminosidade (L^*), os tratamentos UV10, UV15, CP7, CP10 e CP15 apresentaram valores significativamente superiores ao controle, indicando um clareamento perceptível das amostras. Este resultado pode ser atribuído à degradação parcial de pigmentos e à oxidação de compostos fenólicos, que aumentam a reflexão da luz. A retenção destes compostos fenólicos na torta contribui para alguma estabilidade cromática, uma vez que atuam como antioxidantes naturais, retardando a oxidação dos pigmentos (Mexis et al., 2009; Vasquez-Rojas et al., 2021)

Tabela 2- Parâmetros de cor da torta de castanha-da-amazônia após os tratamentos por plasma frio DBD e à UV-C.

	L^*	a^*	b^*	C^*	h°	ΔE^*
Controle	67,36±1,19 ^b	2,98±0,37 ^b	19,31±0,99 ^c	19,54±0,95 ^a	81,19±1,31 ^b	
UV5	68,99±0,39 ^{ab}	2,16±0,35 ^{ab}	19,41±0,35 ^c	22,86±5,45 ^a	84,65±0,31 ^{ab}	1,82613
UV7	68,96±0,62 ^{ab}	2,27±0,31 ^{ab}	19,91±1,19 ^{abc}	20,04±1,20 ^a	83,50±0,84 ^a	1,85653
UV10	71,16±1,03 ^a	2,02±0,24 ^{ab}	19,64±0,48 ^{bc}	19,97±0,84 ^a	84,15±0,57 ^a	3,93494
UV15	70,23±0,55 ^a	1,96±0,50 ^a	20,50±0,22 ^{abc}	20,60±0,24 ^a	84,55±1,37 ^a	3,27583
CP5	69,40±0,63 ^{ab}	2,31±0,30 ^{ab}	20,59±0,83 ^{abc}	20,72±0,85 ^a	83,60±0,67 ^{ab}	2,49598
CP7	69,97±0,88 ^a	2,46±0,63 ^{ab}	21,90±0,65 ^a	22,05±0,70 ^a	83,62±1,49 ^{ab}	3,71139
CP10	70,18±0,17 ^a	2,25±0,09 ^{ab}	21,64±0,24 ^{ab}	21,76±0,23 ^a	84,06±0,29 ^a	3,73096
CP15	69,92±1,16 ^a	2,4±0,3 ^{ab}	21,7±1,0 ^{ab}	21,8±1,0 ^a	83,7±1,1 ^{ab}	3,52057

No parâmetro a^* , apenas o tratamento UV15 apresentou redução significativa da tonalidade avermelhada, sugerindo degradação pontual de fenólicos ligados a carboidratos que contribuem para colorações mais escuras. Já o parâmetro b^* apresentou aumento significativo nos tempos de plasma frio (7, 10 e 15 minutos), evidenciando intensificação da tonalidade amarelada. Este comportamento pode ser explicado pela elevada presença de lipídios insaturados, como oleico e linoleico, e de minerais como ferro e cobre na torta, que favorecem reações oxidativas quando submetidos ao plasma frio. Além disso, o alto teor proteico e de carboidratos presente na torta também desempenha um papel relevante nas alterações cromáticas, pois a sua degradação liberta fenóis e modifica o equilíbrio de cor, especialmente nos tratamentos mais longos, intensificando o amarelo. Por outro lado, o parâmetro C^* não apresentou alteração significativa, indicando que a saturação da cor foi preservada independentemente do tratamento aplicado (Sharani et al., 2020; Vasquez-Rojas et al., 2021).

O ângulo de matiz (h°) também foi alterado por UV7, UV10, UV15 e CP10, reforçando que a UV-C modificou de forma mais ampla o equilíbrio cromático, deslocando o matiz para tons mais amarelados. Estudos prévios em amêndoas e outros frutos secos, nos quais a radiação e o plasma frio foram associados à degradação de fenólicos e carotenoides, resultaram num aumento da tonalidade amarela e numa maior saturação da cor (Prasetyo et al., 2008; Hertwig et al., 2017). A classificação de ΔE^* proposta por Atalar et al. (2019) também auxilia na interpretação dos resultados: valores superiores a 3 indicam diferenças perceptíveis ao olho humano. Na tabela, os tratamentos UV10, CP7, CP10 e CP15 apresentam ΔE^* acima desse limiar, indicando que os tratamentos com plasma frio e UV-C em tempos mais longos modificaram de forma relevante a percepção visual da cor da torta de castanha-da-amazônia (Millena et al., 2025). Assim, conclui-se que, enquanto o UV-C promoveu alterações mais evidentes no matiz, o plasma frio exerceu maior impacto sobre a percepção global da cor, especialmente em tempos superiores a 7 minutos, possivelmente devido à oxidação de pigmentos naturais e à maior disponibilidade de substratos para reações oxidativas.

4. Conclusão

Os resultados demonstraram que o tratamento com plasma frio DBD foi o mais eficaz na degradação da AFB₁ na torta de castanha-da-amazônia, especialmente após 10 minutos de exposição, quando se observou uma redução de 66% para AFT e 75% para AFB₁ na análise por HPLC-FLD. Em contraste, o tratamento com UV-C evidenciou limitações do método de quantificação, reforçando a necessidade de empregar métodos analíticos acoplados, como LC-MS/MS e RMN, para confirmar as moléculas e avaliar a toxicidade residual dos produtos de degradação. Estas técnicas garantem maior confiabilidade na interpretação dos resultados. Assim, este projeto evidencia o potencial do plasma frio como alternativa inovadora para reduzir a contaminação por AFs em alimentos e destaca a importância da padronização dos métodos em diferentes matrizes, visando uma aplicação segura e eficaz em escala industrial.

5. Referências

1. ATALAR, I.; GUL, O.; MORTAS, M.; GUL, L. B.; SARICA OGLU, F. T.; YAZICI, F. Effect of thermal treatment on microbiological, physicochemical and structural properties of high pressure homogenised hazelnut beverage. **Quality Assurance and Safety of Crops and Foods**, [N.p.], vol. 11, no. 6, pp. 561–570, 2019. <https://doi.org/10.3920/QAS2018.1493>.
2. BARBOSA ABRANTES, Karen Keli; COLOMBO PIMENTEL, Tatiana; DA

- SILVA, Camila; SANTOS JUNIOR, Oscar de Oliveira; BARÃO, Carlos Eduardo; CARDOZO-FILHO, Lucio. Brazil Nut Semi-Defatted Flour Oil: Impact of Extraction Using Pressurized Solvents on Lipid Profile, Bioactive Compounds Composition, and Oxidative Stability. **Plants**, [N.p.], vol. 13, no. 19, 1 Oct. 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13192678>.
3. DENG, Li-Zhen; TAO, Yang; MUJUMDAR, Arun S; PAN, Zhongli; CHEN, Chang; YANG, Xu-Hai; LIU, Zi-Liang; WANG, Hui; XIAO, Hong-Wei. Recent advances in non-thermal decontamination technologies for microorganisms and mycotoxins in low-moisture foods. **Trends in Food Science & Technology**, [N.p.], vol. 106, pp. 104–112, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.10.012>. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092422442030635X>.
 4. FAOSTAT. **Estatística da Organização para Alimentação e Agricultura**. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/>
 5. FOLIGNI, Roberta; MANNOZZI, Cinzia; ISMAIEL, Lama; CAPELLI, Filippo; LAURITA, Romolo; TAPPI, Silvia; DALLA ROSA, Marco; MOZZON, Massimo. Impact of Cold Atmospheric Plasma (CAP) Treatments on the Oxidation of Pistachio Kernel Lipids. **Foods**, [N.p.], vol. 11, no. 3, 2022. DOI: 10.3390/foods11030419. Available at: <https://www.mdpi.com/2304-8158/11/3/419>.
 6. HASSAN, Amro B; AL MAIMAN, Salah A; SIR ELKHATIM, Khitma A; ELBADR, Nawal A; ALSULAIM, Sarah; OSMAN, Magdi A; MOHAMED AHMED, Isam A. Effect of UV-C radiation treatment on microbial load and antioxidant capacity in hot pepper, fennel and coriander. **LWT**, [N.p.], vol. 134, p. 109946, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109946>. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002364382030935X>.
 7. HERTWIG, Christian; LESLIE, Andriani; MENESES, Nicolas; REINEKE, Kai; RAUH, Cornelia; SCHLÜTER, Oliver. Inactivation of Salmonella Enteritidis PT30 on the surface of unpeeled almonds by cold plasma. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [N.p.], vol. 44, pp. 242–248, 1 Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.02.007>.
 8. HOJNIK, Nataša; MODIC, Martina; WALSH, James L.; ŽIGON, Dušan; JAVORNIK, Uroš; PLAVEC, Janez; ŽEGURA, Bojana; FILIPIČ, Metka; CVELBAR, Uroš. Unravelling the pathways of air plasma induced aflatoxin B1 degradation and detoxification. **Journal of Hazardous Materials**, [N.p.], vol. 403, 5 Feb. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123593>.

9. JADHAV, Harsh B.; CHOUDHARY, Pintu. Emerging techniques for the processing of food to ensure higher food safety with enhanced food quality: a review. **Springer Nature**, vol. 4, no. 1, 1 Dec. 2024. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00089-5>.
10. KLUCZKOVSKI, Ariane; BEZERRA, Leticia; JANUÁRIO, Beatriz; LIMA, Emerson; CAMPELO, Pedro; MACHADO, Marcos; BEZERRA, Jaqueline. Nuclear Magnetic Resonance Approach in Brazil Nut Oil and the Occurrence of Aflatoxins. **Journal of Oleo Science**, [N.p.], vol. 71, no. 10, pp. 1439–1444, 2022. <https://doi.org/10.5650/jos.ess22067>.
11. KLUCZKOVSKI, Ariane Mendonça; BARROS, Heloisa; BARRONCAS, Janaína; VIANA, Cibele; LIMA, Emerson S. Aflatoxins in raw Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H.B.K.). **Journal of Agricultural Studies**, [N.p.], vol. 11, no. 2, p. 14, 10 Apr. 2023. <https://doi.org/10.5296/jas.v11i2.20741>.
12. MAKARI, Mina; HOJJATI, Mohammad; SHAHBAZI, Samira; ASKARI, Hamed. Elimination of *Aspergillus flavus* from Pistachio Nuts with Dielectric Barrier Discharge (DBD) Cold Plasma and Its Impacts on Biochemical Indices. **Journal of Food Quality**, [N.p.], vol. 2021, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9968711>.
13. MCCLEMENTS, David Julian. Development of next-generation nutritionally fortified plant-based milk substitutes: Structural design principles. **MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute**, vol. 9, no. 4, 1 Apr. 2020. <https://doi.org/10.3390/foods9040421>.
14. MEXIS, S. F.; BADEKA, A. v.; KONTOMINAS, M. G. Quality evaluation of raw ground almond kernels (*Prunus dulcis*): Effect of active and modified atmosphere packaging, container oxygen barrier and storage conditions. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [N.p.], vol. 10, no. 4, pp. 580–589, Oct. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2009.05.002>.
15. MILLENA, C. G.; OSTONAL, K. C.L.; MORENO, P. J.F.N.; RENOVALLES, K. A.; VICERA, L. N.; GUERINÁ, V. C.; PINEDA, M. L. Effect of thermal and non-thermal treatments on the physicochemical properties and fungal load of pili nut (*Canarium ovatum* Engl.) kernel with testa. **Food Research**, [N.p.], vol. 9, no. 3, pp. 332–343, 1 June 2025. [https://doi.org/10.26656/fr.2017.9\(3\).030](https://doi.org/10.26656/fr.2017.9(3).030).
16. PRASETYO, M.; CHIA, M.; HUGHEY, C.; WERE, L. M. Utilization of electron beam irradiated almond skin powder as a natural antioxidant in ground top round beef. **Journal of Food Science**, [N.p.], vol. 73, no. 1, Jan. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00553.x>.

17. RIBEIRO, M S S; FREITAS-SILVA, O; CASTRO, I M; TEIXEIRA, A; MARQUES-DA-SILVA, S H; SALES-MORAES, A C S; ABREU, L F; SOUSA, C L. Efficacy of sodium hypochlorite and peracetic acid against *Aspergillus nomius* in Brazil nuts. *Food Microbiology*, vol. 90, p. 103449, 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103449>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0740002020300381>.
18. SALISU, Bahauddeen Dandashire; ALMAJIR, Ibrahim Raubilu. Aflatoxins and aflatoxigenic fungal contamination of common poultry feed products in Katsina State, Nigeria. **Novel Research in Microbiology Journal**, [N.p.], vol. 4, no. 1, pp. 653–665, 1 Jan. 2020. <https://doi.org/10.21608/nrmj.2020.73438>.
19. SEIN, Thin Thin; MONGMONSIN, Urairat M.; CHATCHAWAL, Patutong; WONGWATTANAKUL, Molin; SRICHAIYAPOL, Oranee; PATTANAKUL, Rungrueang; TIPPAYAWAT, Patcharaporn. Detection of aflatoxin B1 in chili powder using attenuated total reflectanceFourier transform infrared spectroscopy. **Journal of Food and Drug Analysis**, [N.p.], vol. 32, no. 2, pp. 184–193, 2024. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.3497>.
20. SHIRANI, Khatereh; SHAHIDI, Fakhri; MORTAZAVI, Seyed Ali. Investigation of decontamination effect of argon cold plasma on physicochemical and sensory properties of almond slices. **International Journal of Food Microbiology**, [N.p.], vol. 335, p. 108892, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108892>. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016816052030386X>.
21. VASQUEZ-ROJAS, Wilson v.; MARTÍN, Diana; MIRALLES, Beatriz; RECIO, Isidra; FORNARI, Tiziana; CANO, M. Pilar. Composition of Brazil nut (*Bertholletia excels HBK*), its beverage and by-products: A healthy food and potential source of ingredients. **Foods**, [N.p.], vol. 10, no. 12, 1 Dec. 2021. <https://doi.org/10.3390/foods10123007>.
22. WADT, Lúcia Helena de Oliveira; MAROCCOLO, Julianna Fernandes; GUEDES, Marcelino Carneiro; SILVA, Kátia Emídio da. Castanha-da-Amazônia: estudos sobre a espécie e sua cade de valor: ecologia e manejo de castanhais nativos. Brasília: Embrapa, 2023.
23. WIELOGORSKA, Ewa; AHMED, Y.; MENEELY, J.; GRAHAM, William G.; ELLIOTT, Christopher T.; GILMORE, Brendan F. A holistic study to understand the detoxification of mycotoxins in maize and impact on its molecular integrity using cold atmospheric plasma treatment. **Food Chemistry**, [N.p.], vol. 301, 15 Dec. 2019.

- <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125281>.
24. ZERAATPISHEH, Fatemeh; MOSALLAIE, Fatemeh; SANAEI, Farideh; FALAH, Fereshteh; VASIEE, Alireza; YAZDI, Farideh Tabatabaee. The simultaneous influence of ultraviolet rays and cold plasma on the physicochemical attributes and shelf life of dried pistachios during the storage period. **Journal of Food Process Engineering**, [N.p.], vol. 46, no. 9, 1 Sept. 2023. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14403>.
 25. ZHANG, Jie; ZHOU, Yalin; YUAN, Jian; LI, Guanglei; LI, Peng; YAN, Wenjing; XING, Changrui. Development of a new antibody with high organic solvent tolerance for the detection of AFB1 in plant oils and monitoring UV decontamination processes. **Food Control**, [N.p.], vol. 182, 1 Apr. 2026. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2025.111866>.
 26. ZOU, Linjun; SUN, Zhaocui; LI, Qinglong; YANG, Erlan; YANG, Meihua; ZHANG, Jiawen; SUN, Zhonghao; WU, Haifeng; LUO, Zuliang; MA, Guoxu; XU, Xudong. UV light treatment (278 nm) for detoxification of aflatoxins and application in edible and medicinal herb coix seed. **International Journal of Food Science and Technology**, [N.p.], vol. 59, no. 6, pp. 3723–3734, 1 June 2024. <https://doi.org/10.1111/ijfs.17114>.

CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho reforça a importância da inovação tecnológica como ferramenta estratégica para a segurança alimentar e para a valorização da cadeia produtiva amazônica. Os resultados obtidos demonstram o potencial do plasma frio como método eficiente de descontaminação, ao mesmo tempo em que revelam as restrições do uso isolado da radiação UV-C, ampliando o conhecimento científico sobre diferentes abordagens não térmicas. Além disso, abrem perspectivas para futuras pesquisas voltadas à otimização das condições de aplicação, à avaliação em escala industrial e à exploração dos efeitos em diferentes matrizes alimentares. Dessa forma, a dissertação contribui para consolidar a castanha-da-amazônia como um produto seguro para comercialização, reduzindo riscos de embargos na exportação e ampliando o potencial de utilização de seus resíduos de forma segura para o consumo.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Com base nos resultados obtidos, futuras investigações poderão aprofundar a caracterização estrutural dos produtos de degradação da AFB₁ gerados por tratamentos físicos, como UV-C e plasma frio, aplicados à torta de castanha-da-amazônia. Para tal, técnicas de alta resolução, como LC-HRMS e RMN, serão fundamentais para a identificação precisa dos derivados formados, permitindo avaliar a sua toxicidade residual, estabilidade química e eventuais implicações regulatórias. Para além da caracterização molecular, será relevante investigar o impacto destes tratamentos na composição centesimal da matriz, incluindo lipídios, proteínas e umidade, bem como realizar análises de minerais e sensorial para verificar a preservação das propriedades do produto. Por fim, a validação dos protocolos de descontaminação em escala industrial será essencial para viabilizar a aplicação prática destas tecnologias na cadeia produtiva, contribuindo para a segurança alimentar e o aproveitamento sustentável de subprodutos amazônicos.