



CAPÍTULO 5

Farinhas de resíduos de frutas irradiadas: Estabilidade, funcionalidade e perspectivas para a indústria de alimentos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.479142606015>

Luz Mérida Rondán Flores

João Pedro Alves de Azevedo Barros

Anna Lucia Casañas Haasis Villavicencio

RESUMO: O processamento agroindustrial de frutas gera volumes expressivos de resíduos, como cascas, sementes e bagaços, que, embora frequentemente descartados, constituem fontes ricas em fibras dietéticas, compostos fenólicos, carotenoides e pigmentos bioativos como as betalaínas. A transformação desses resíduos em farinhas representa uma estratégia alinhada aos princípios da economia circular e com elevado potencial para o desenvolvimento de ingredientes funcionais de alto valor agregado. Este capítulo analisa o papel da radiação ionizante como tecnologia de processamento não térmico aplicada à produção e estabilização de farinhas obtidas a partir de resíduos de frutas, com ênfase na farinha de casca de pitaya vermelha (*Hylocereus costaricensis*) como modelo experimental. São discutidos os efeitos da irradiação, em doses que variam de 1 a 20 kGy, sobre as características físico-químicas (cor, atividade de água, granulometria), a microestrutura (cristalinidade, porosidade, integridade da parede celular), o perfil de compostos bioativos (betalainas, compostos fenólicos totais, atividade antioxidante) e as propriedades tecnológico-funcionais (capacidade de absorção de água e óleo, solubilidade) dessas farinhas. Adicionalmente, são abordados os aspectos de segurança microbiológica, destacando a eficácia da irradiação na redução de patógenos como *Salmonella* spp. e *Listeria monocytogenes*, e o marco regulatório vigente no Brasil (RDC ANVISA nº 21/2001) e no âmbito internacional (Codex Alimentarius). Os resultados consolidados na literatura indicam que doses moderadas de irradiação (1 a 10 kGy) são capazes

de promover a descontaminação microbiológica e modular favoravelmente as propriedades funcionais dessas farinhas, sem comprometimento significativo de seus compostos bioativos, posicionando a irradiação ionizante como ferramenta estratégica para a valorização de resíduos agroindustriais e o desenvolvimento de ingredientes inovadores para a indústria de alimentos.

PALAVRAS-CHAVE: irradiação ionizante; resíduos agroindustriais; farinha de frutas; pitaya vermelha; compostos bioativos; segurança microbiológica; economia circular.

Flours from irradiated fruit waste: Stability, functionality and prospects for the food industry.

ABSTRACT: The agro-industrial processing of fruits generates substantial volumes of by-products, such as peels, seeds, and pomaces, which, although frequently discarded, constitute rich sources of dietary fiber, phenolic compounds, carotenoids, and bioactive pigments such as betalains. The transformation of these residues into flours represents a strategy aligned with circular economy principles and with high potential for the development of high-value functional ingredients. This chapter analyzes the role of ionizing radiation as a non-thermal processing technology applied to the production and stabilization of flours obtained from fruit by-products, with emphasis on red pitaya (*Hylocereus costaricensis*) peel flour as an experimental model. The effects of irradiation, at doses ranging from 1 to 20 kGy, on the physicochemical characteristics (color, water activity, particle size), microstructure (crystallinity, porosity, cell wall integrity), bioactive compound profile (betalains, total phenolic compounds, antioxidant activity), and techno-functional properties (water and oil absorption capacity, solubility) of these flours are discussed. Additionally, microbiological safety aspects are addressed, highlighting the efficacy of irradiation in reducing pathogens such as *Salmonella* spp. and *Listeria monocytogenes*, as well as the current regulatory framework in Brazil (ANVISA RDC No. 21/2001) and internationally (Codex Alimentarius). The evidence consolidated in the literature indicates that moderate irradiation doses (1 to 10 kGy) are capable of promoting microbiological decontamination and favorably modulating the functional properties of these flours without significant impairment of their bioactive compounds, positioning ionizing radiation as a strategic tool for the valorization of agro-industrial by-products and the development of innovative ingredients for the food industry.

KEYWORDS: ionizing radiation; agro-industrial by-products; fruit flour; red pitaya; bioactive compounds; microbiological safety; circular economy.

INTRODUÇÃO

O aumento da produção e do processamento industrial de frutas tem intensificado a geração de resíduos agroindustriais ao longo da cadeia produtiva de alimentos. Estima-se que uma parcela expressiva da biomassa original seja descartada na forma de cascas, sementes e frações residuais de polpa, materiais frequentemente subutilizados ou destinados a aplicações de baixo valor agregado. Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias tecnológicas capazes de promover o reaproveitamento desses subprodutos de maneira segura, estável e economicamente viável.

Do ponto de vista composicional, resíduos de frutas apresentam elevado conteúdo de fibras alimentares, minerais e compostos bioativos, muitos dos quais se concentram nos tecidos externos da planta. Essas características conferem aos resíduos potencial significativo para aplicação como ingredientes alimentares, especialmente em formulações voltadas ao desenvolvimento de produtos com atributos funcionais. Contudo, a elevada atividade de água, a suscetibilidade à deterioração microbiológica e a variabilidade físico-química constituem desafios relevantes para sua incorporação direta em sistemas alimentares.

A transformação desses resíduos em farinhas representa uma alternativa tecnológica eficaz para superar tais limitações, uma vez que permite redução da umidade, aumento da estabilidade durante o armazenamento e maior versatilidade de aplicação industrial. Entretanto, as propriedades finais das farinhas obtidas dependem fortemente das condições de processamento adotadas, incluindo tratamentos prévios e tecnologias complementares aplicadas à matriz vegetal.

Nesse contexto, a radiação ionizante tem sido amplamente investigada como método não térmico de processamento de alimentos, reconhecida por sua eficiência na redução de carga microbiana e no controle de pragas, sem comprometer significativamente atributos sensoriais e nutricionais. Além de seus efeitos sanitários, estudos recentes têm demonstrado que a radiação pode induzir modificações estruturais em tecidos vegetais, influenciando propriedades tecnológicas relevantes para ingredientes derivados de resíduos agroindustriais.

A produção de farinhas a partir de resíduos de frutas irradiadas insere-se, portanto, em uma abordagem integrada que alia segurança, funcionalidade e sustentabilidade. A compreensão dos efeitos da radiação ionizante sobre essas matrizes é fundamental para orientar aplicações industriais e ampliar o uso de subprodutos na cadeia de alimentos. Assim, este capítulo tem como objetivo discutir os principais aspectos relacionados à obtenção de farinhas de resíduos de frutas irradiadas, com foco na estabilidade, nas alterações estruturais e nas perspectivas tecnológicas para a indústria de alimentos.

RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DE FRUTAS E SUA RELEVÂNCIA TECNOLÓGICA

O processamento agroindustrial de frutas gera grandes volumes de resíduos sólidos, predominantemente constituídos por cascas, sementes e tecidos não aproveitados da polpa. Esses materiais, embora historicamente tratados como rejeitos, apresentam composição química complexa, com elevado teor de polissacarídeos estruturais, minerais e metabólitos secundários. A relevância tecnológica desses resíduos está associada tanto à sua disponibilidade em larga escala quanto ao seu potencial de aplicação como ingredientes funcionais.

Diversos estudos apontam que resíduos de frutas concentram compostos bioativos em níveis superiores aos observados nas frações comestíveis, resultado de mecanismos fisiológicos relacionados à proteção da planta contra estresses ambientais. Essa característica confere aos resíduos valor estratégico para o desenvolvimento de ingredientes destinados à indústria de alimentos, desde que sejam adotadas tecnologias capazes de assegurar estabilidade e segurança microbiológica (Oliveira *et al.*, 2023).

A conversão desses resíduos em farinhas amplia as possibilidades de aplicação industrial, favorecendo operações unitárias como mistura, transporte e incorporação em diferentes matrizes alimentares. Entretanto, a estabilidade dessas farinhas depende do controle de fatores como atividade de água, composição química e carga microbiana. Nesse sentido, a integração de tecnologias não térmicas, como a radiação ionizante, apresenta-se como alternativa promissora para a valorização efetiva desses subprodutos.

RADIAÇÃO IONIZANTE COMO MÉTODO DE PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS

A radiação ionizante consiste na aplicação controlada de energia capaz de promover ionizações e excitações moleculares, desencadeando efeitos físicos, químicos e biológicos nos materiais tratados. No processamento de alimentos, essa tecnologia é amplamente reconhecida como método não térmico eficiente para redução da carga microbiana e extensão da vida útil, com impacto limitado sobre atributos sensoriais quando aplicada dentro de faixas de dose estabelecidas.

A radiação ionizante atua sobre os constituintes dos alimentos por meio de dois mecanismos fundamentais: o efeito direto e o efeito indireto. No efeito direto, a energia da radiação é absorvida diretamente pelas moléculas-alvo, como proteínas, lipídios, polissacarídeos e ácidos nucleicos, promovendo ionização, excitação eletrônica e ruptura de ligações covalentes. No efeito indireto, predominante em sistemas com

alto teor de umidade, a radiação interage primariamente com as moléculas de água, gerando espécies reativas de oxigênio (EROs), como o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), o radical hidrogênio ($\text{H}\bullet$) e o elétron aquoso ($\text{e}^{-\text{aq}}$), que subsequentemente reagem com os componentes orgânicos da matriz alimentar (Song *et al.*, 2022; Sunder *et al.*, 2022).

Em matrizes de baixa atividade de água, como farinhas e pós desidratados, o efeito direto torna-se proporcionalmente mais relevante, resultando na formação de radicais livres estáveis que podem ser detectados por Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE/EPR) — técnica utilizada tanto para identificar alimentos irradiados quanto para estimar a dose absorvida (Rondán-Flores *et al.*, 2025a). A estabilidade desses radicais em matrizes secas é significativamente maior do que em sistemas úmidos, o que confere às farinhas irradiadas características espectrais persistentes e mensuráveis ao longo do tempo (Barros *et al.*, 2026).

O entendimento desses mecanismos de ação em nível molecular é fundamental não apenas para a otimização dos processos de irradiação, mas também para embasar cientificamente os limites de dose estabelecidos pelos organismos regulatórios internacionais e nacionais, que definem o uso seguro e tecnologicamente justificado dessa tecnologia em alimentos.

Do ponto de vista regulatório, as fontes de radiação ionizante aprovadas para uso em alimentos incluem: raios gama provenientes de fontes de Cobalto-60 (Co-60) ou Césio-137 (Cs-137); feixes de elétrons acelerados com energia máxima de 10 MeV; e raios X com energia máxima de 5 MeV (ou 7,5 MeV quando gerados por elétrons acelerados). No Brasil, a RDC ANVISA nº 21, de 26 de janeiro de 2001, regulamenta o uso da irradiação em alimentos, estabelecendo que a dose mínima deve ser suficiente para alcançar o propósito tecnológico desejado, enquanto a dose máxima não deve comprometer a segurança, a integridade nutricional ou as propriedades sensoriais do produto. Em âmbito internacional, o Codex Alimentarius (CAC/RCP 19-1979, revisado em 2003) estabelece que qualquer dose abaixo de 10 kGy é considerada segura e não requer testes toxicológicos adicionais (Villavicencio, 2021).

Revisões recentes destacam que a radiação ionizante pode atuar não apenas como método de conservação, mas também como ferramenta de modulação estrutural, influenciando propriedades físico-químicas e tecnológicas de matrizes vegetais (Yang *et al.*, 2024). Em resíduos agroindustriais, a tecnologia tem sido associada à reorganização da estrutura da parede celular e à modificação das interações intermoleculares, favorecendo a obtenção de ingredientes mais estáveis e funcionais.

No contexto da valorização de resíduos, a radiação ionizante tem sido apontada como alternativa estratégica para promover segurança microbiológica e ampliar a

aplicabilidade industrial de subprodutos, alinhando-se a princípios de economia circular e inovação tecnológica (Barros *et al.*, 2026).

Entre os componentes macromoleculares sensíveis à radiação ionizante em matrizes vegetais destacam-se os polissacarídeos estruturais, como celulose, hemicelulose e pectina, e o amido. A radiação promove a clivagem das cadeias glicosídicas por meio de reações de despolimerização, resultando em redução da massa molecular média, aumento da solubilidade e modificação das propriedades de absorção de água e óleo (Zhu *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022; Barros *et al.*, 2026). No caso específico das fibras dietéticas solúveis, a irradiação gama demonstrou aumentar a proporção da fração solúvel em detrimento da fração insolúvel, o que pode ampliar o potencial funcional do ingrediente em aplicações alimentares (Li *et al.*, 2022). Esses mecanismos de modificação estrutural são particularmente relevantes no contexto das farinhas de resíduos de frutas, cujas propriedades tecnológicas e funcionais são fortemente determinadas pela composição e organização de sua parede celular vegetal, aspectos que serão detalhados na seção seguinte.

FARINHAS DE RESÍDUOS DE FRUTAS IRRADIADAS

Conforme discutido na seção anterior, os resíduos agroindustriais de frutas constituem matérias-primas de elevado potencial para a produção de ingredientes funcionais. A conversão dessas frações em farinhas envolve uma sequência de etapas tecnológicas, como seleção e higienização, separação das frações de interesse, redução de tamanho, secagem, moagem e peneiramento, cujo controle rigoroso é determinante para a qualidade físico-química, funcional e microbiológica do produto final (Oliveira *et al.*, 2023). Entre essas etapas, a secagem é a que mais impacta a preservação dos compostos termossensíveis: enquanto a secagem convencional em estufa (55–70 °C) oferece menor custo operacional, a liofilização preserva com maior fidelidade betalaínas, compostos fenólicos e a estrutura celular da matriz vegetal, sendo indicada quando a qualidade funcional é prioritária (Barros *et al.*, 2026). A aplicação da irradiação ionizante como etapa complementar a esse processamento tem sido investigada com crescente interesse, dado seu potencial de promover descontaminação microbiológica e modular propriedades funcionais sem o uso de calor ou aditivos químicos (Yang *et al.*, 2024; Barros *et al.*, 2026). Nesse contexto, a farinha de casca de pitaya vermelha (*Hylocereus costaricensis*) destaca-se como modelo experimental relevante, por seu rico perfil de betalaínas, fibras e compostos fenólicos e pela crescente disponibilidade como resíduo do processamento da polpa (Rondán-Flores *et al.*, 2025a; Santos *et al.*, 2022). O fluxograma de produção dessa farinha é apresentado na Figura 1.

A etapa de secagem merece atenção especial, pois é a que mais impacta a preservação dos compostos termossensíveis presentes nos resíduos de frutas. Métodos convencionais, como a secagem em estufa com circulação de ar quente (55–70 °C), são amplamente utilizados pela sua simplicidade e menor custo operacional, porém podem promover a degradação parcial de pigmentos, vitaminas e compostos fenólicos. A liofilização (*freeze-drying*), por sua vez, opera sob baixíssimas temperaturas e pressão reduzida, preservando com maior fidelidade a estrutura celular e os compostos bioativos da matriz vegetal, sendo indicada quando a qualidade funcional do ingrediente é prioritária (Barros *et al.*, 2026). Independentemente do método de secagem adotado, a etapa de moagem e peneiramento é essencial para garantir a homogeneidade granulométrica da farinha, parâmetro que influencia diretamente suas propriedades tecnológicas, como a capacidade de absorção de água e óleo, e sua aplicabilidade em formulações alimentares.

A aplicação da irradiação ionizante como etapa complementar ao processamento de farinhas de resíduos de frutas tem sido investigada com crescente interesse científico, dado seu potencial de promover a descontaminação microbiológica e de modular as propriedades físico-químicas e funcionais do produto sem o uso de calor ou aditivos químicos (Yang *et al.*, 2024; Barros *et al.*, 2026). Nesse contexto, a farinha de casca de pitaya vermelha (*Hylocereus costaricensis*) tem se destacado como um modelo experimental relevante, por reunir características que tornam sua produção e irradiação especialmente interessantes: elevado teor de betalaínas, fibras dietéticas e compostos fenólicos; coloração magenta intensa; e disponibilidade crescente como resíduo do processamento da polpa, amplamente consumida in natura e na forma de sucos e sorvetes (Rondán-Flores *et al.*, 2025a; Santos *et al.*, 2022). O fluxograma de produção dessa farinha, desde a seleção dos frutos até a obtenção do produto final, é apresentado na Figura 1 e serve como referência metodológica para as discussões desenvolvidas nas subseções seguintes.

A produção de farinha a partir da casca de pitaya vermelha (*Hylocereus costaricensis*) envolve uma sequência de etapas tecnológicas que visam preservar ao máximo os compostos bioativos da matriz vegetal, ao mesmo tempo em que garante a segurança e a estabilidade microbiológica do produto final. O fluxograma de processamento é apresentado na Figura 1, compreendendo seis etapas principais: seleção e higienização dos frutos, separação das frações comestíveis e não comestíveis, picagem da casca, secagem (convencional em estufa ou por liofilização), trituração e peneiramento, resultando na farinha pronta para uso (Barros *et al.*, 2026).

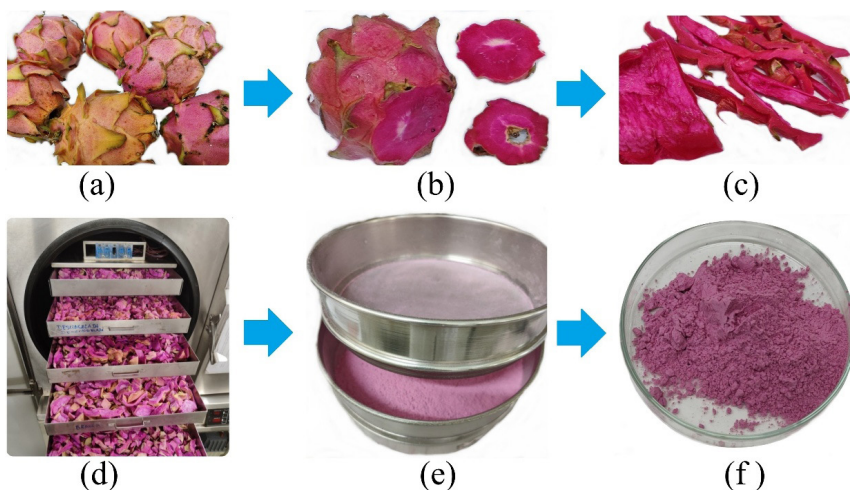


Figura 1. Fluxograma de produção da farinha de casca de pitaya vermelha (*Hylocereus costaricensis*). (a) Frutos inteiros de pitaya selecionados para processamento; (b) Fruto seccionado com separação da polpa (destinada ao consumo in natura ou processamento de sucos) e da casca (resíduo agroindustrial de interesse); (c) Casca picada em fragmentos para facilitar a secagem; (d) Secagem da casca por liofilização, com preservação dos compostos bioativos termossensíveis; (e) Trituração e peneiramento do material seco para obtenção de granulometria homogênea; (f) Farinha de casca de pitaya vermelha obtida, com coloração magenta característica, pronta para uso em análises ou aplicações alimentares.

Fonte: Os autores.

A escolha do método de secagem representa uma decisão tecnológica crítica no processo. A secagem convencional em estufa (geralmente entre 55 e 70 °C) é uma alternativa de menor custo operacional, porém pode promover a degradação parcial de compostos termossensíveis, como as betalainas (pigmentos responsáveis pela coloração característica e pelas propriedades antioxidantes da casca de pitaya vermelha). A liofilização (*freeze-drying*), por sua vez, opera sob condições de baixíssima temperatura e pressão reduzida, preservando com maior eficiência a estrutura celular, a atividade de água e os compostos bioativos da matriz, sendo o método de escolha quando se prioriza a qualidade funcional do produto, ainda que com custo operacional mais elevado (Rondán-Flores *et al.*, 2025b; Barros *et al.*, 2026). A etapa de peneiramento final garante a homogeneidade granulométrica da farinha, parâmetro relevante tanto para a reprodutibilidade das análises científicas quanto para a padronização do ingrediente em aplicações industriais.

Características físico-químicas e estabilidade

As propriedades físico-químicas das farinhas obtidas de resíduos de frutas irradiadas são fortemente influenciadas pela composição da matriz vegetal e pelas condições de processamento. Parâmetros como atividade de água, pH e distribuição de tamanho de partículas desempenham papel central na estabilidade durante o armazenamento. A aplicação da radiação ionizante pode contribuir para a redução da carga microbiana e para a estabilização dessas propriedades, favorecendo maior segurança e previsibilidade no uso industrial.

A cor é um dos parâmetros físico-químicos mais imediatamente perceptíveis em farinhas irradiadas e constitui um indicador indireto de reações oxidativas e de degradação de pigmentos. Estudos com farinhas de casca de pitaya vermelha (*Hylocereus costaricensis*) demonstraram que a irradiação gama em doses de até 10 kGy promoveu alterações nos parâmetros colorimétricos L* (luminosidade), a* (vermelho-verde) e b* (amarelo-azul), com tendência ao escurecimento em doses mais elevadas, possivelmente associada à oxidação de betalaínas e à formação de produtos de reação de Maillard em estado sólido (Santos *et al.*, 2022). De forma complementar, Jabin *et al.* (2023) observaram que a irradiação gama em cascas de manga (*Mangifera indica*) em doses de 1 a 3 kGy não comprometeu significativamente a cor do produto, sugerindo que doses moderadas podem ser aplicadas sem prejuízo visual relevante.

A atividade de água (Aw) e o teor de umidade são parâmetros críticos para a estabilidade microbiológica e química das farinhas. A irradiação, por ser um processo não térmico, não promove evaporação direta de água; contudo, pode induzir alterações na estrutura dos polissacarídeos que modificam a capacidade de retenção de água da matriz, impactando indiretamente a Aw do produto final (Bhat *et al.*, 2024). A manutenção de Aw abaixo de 0,60 é essencial para garantir a estabilidade microbiológica de farinhas durante o armazenamento, independentemente do tratamento de irradiação aplicado.

Estudos conduzidos com frutas tropicais irradiadas demonstram que doses baixas de radiação são capazes de preservar atributos físicos e retardar processos degradativos durante o armazenamento, reforçando o papel da tecnologia na estabilização de matrizes vegetais sensíveis (Rondán-Flores *et al.*, 2025b).

Alterações estruturais e microestruturais induzidas pela radiação

As alterações microestruturais induzidas pela radiação ionizante incluem desorganização parcial da parede celular, fragmentação de polissacarídeos e aumento da porosidade da matriz vegetal. Essas modificações influenciam diretamente

propriedades tecnológicas como solubilidade, capacidade de retenção de água e comportamento reológico das farinhas.

Além das alterações nos polissacarídeos estruturais, a interação da radiação ionizante com a matriz sólida das farinhas gera radicais livres estáveis, cuja caracterização analítica fornece informações complementares sobre a extensão e a natureza das modificações microestruturais induzidas pelo tratamento.

A Espectroscopia de Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR/RPE) constitui uma ferramenta analítica de alta relevância para o estudo de farinhas irradiadas, permitindo a identificação e quantificação de radicais livres estáveis gerados pela interação da radiação ionizante com a matriz sólida. Em farinhas de casca de pitaya vermelha liofilizada, Rondán-Flores *et al.* (2025a) identificaram sinais característicos de EPR associados a radicais centrados em carbono e oxigênio, cuja intensidade apresentou correlação positiva com a dose de irradiação aplicada, viabilizando o uso desta técnica como método de dosimetria retrospectiva, ou seja, para estimar a dose original recebida pelo produto mesmo após o processamento. Esses radicais, estáveis em matrizes secas, decaem progressivamente com o tempo de armazenamento, o que torna o intervalo entre a irradiação e a análise um fator crítico para a confiabilidade da detecção (Barros *et al.*, 2026).

Em termos de microestrutura, a irradiação gama promove a desorganização da parede celular vegetal, com fragmentação das fibrilas de celulose, redução do grau de cristalinidade e aumento da porosidade superficial das partículas de farinha. Esses efeitos têm sido confirmados por Espectroscopia Raman, que detecta alterações nas bandas características de celulose (região de 1095–1120 cm^{-1}) e lignina (região de 1600–1650 cm^{-1}), e por Difractometria de Raios X (DRX), que evidencia a redução do índice de cristalinidade com o aumento da dose (Zhu *et al.*, 2022; Bhat *et al.*, 2024). O aumento da porosidade e a redução da cristalinidade resultam em maior área superficial específica das partículas, o que pode favorecer a absorção de água e óleo, bem como a biodisponibilidade de compostos bioativos encapsulados na matriz fibrosa.

Técnicas espectroscópicas têm sido empregadas para compreender essas alterações em nível molecular, permitindo avaliar modificações estruturais e a formação de espécies reativas em matrizes irradiadas. Estudos baseados em espectroscopia Raman e ressonância paramagnética eletrônica contribuem para a interpretação dos efeitos tecnológicos da irradiação sobre resíduos de frutas e farinhas derivadas (Huang *et al.*, 2025; Rondán-Flores *et al.*, 2025a).

Compostos bioativos e propriedades funcionais

Os resíduos de frutas são fontes expressivas de compostos bioativos associados a propriedades funcionais. A radiação ionizante pode influenciar tanto a estabilidade quanto a acessibilidade desses compostos, com efeitos dependentes da dose aplicada e da natureza da matriz vegetal. Em determinados sistemas, a tecnologia favorece a liberação de compostos associados à estrutura celular, enquanto em outros pode induzir transformações químicas que exigem avaliação criteriosa.

O comportamento dos compostos fenólicos totais em resposta à irradiação é dose-dependente e varia significativamente conforme a matriz vegetal e o método analítico empregado. Em cascas de manga irradiadas com doses de 1 a 3 kGy, Jabin *et al.* (2023) observaram aumento nos teores de compostos fenólicos totais e na atividade antioxidante (avaliada pelos métodos DPPH e FRAP), sugerindo que a irradiação em doses moderadas pode promover a liberação de compostos fenólicos ligados à parede celular, tornando-os mais acessíveis à extração e à bioatividade. Mecanismo semelhante foi descrito por Li *et al.* (2022) para a fibra dietética solúvel de casca de laranja umbigo (*Citrus sinensis*), onde a irradiação gama (5–30 kGy) aumentou a solubilidade da fibra e melhorou suas propriedades de adsorção de colesterol e capacidade antioxidante *in vitro*.

Por outro lado, doses elevadas de irradiação (acima de 10 kGy) podem promover a degradação oxidativa de compostos fenólicos e carotenoides, resultando em redução da atividade antioxidante total. Santos *et al.* (2022), ao estudar farinhas de casca de pitaya vermelha irradiadas com doses de 5 a 20 kGy, observaram redução progressiva nos teores de betalaínas (betacianinas e betaxantinas) com o aumento da dose, compostos responsáveis pela coloração característica e pelas propriedades antioxidantes desta fruta. Esses resultados reforçam a necessidade de otimização da dose de irradiação em função do objetivo tecnológico e do perfil de compostos bioativos de cada matriz.

No que se refere às propriedades tecnológico-funcionais, a irradiação gama demonstrou capacidade de modular parâmetros como a capacidade de absorção de água (CAA), a capacidade de absorção de óleo (CAO) e a solubilidade. Bhat *et al.* (2024), em estudo com farinhas de trigo sarraceno, feijão-caupi, aveia e arroz integral irradiadas com doses de 1 a 20 kGy, observaram que a irradiação promoveu aumento dose-dependente na solubilidade das proteínas e na capacidade de absorção de água, atribuído à despolimerização parcial de polissacarídeos e à desnaturação parcial de proteínas, que expõe grupos hidrofílicos previamente encobertos. Esses achados têm implicações diretas para o uso de farinhas irradiadas como ingredientes funcionais em produtos de panificação, bebidas e alimentos funcionais.

Revisões recentes destacam a necessidade de equilíbrio entre preservação funcional e segurança microbiológica na aplicação da radiação ionizante em resíduos destinados à produção de ingredientes alimentares (Yang *et al.*, 2024; Barros *et al.*, 2026).

Contudo, para que essas propriedades funcionais possam ser efetivamente exploradas em aplicações industriais, é imprescindível que as farinhas irradiadas atendam também aos critérios de segurança microbiológica, aspecto abordado na subseção seguinte.

Segurança microbiológica de farinhas de resíduos de frutas irradiadas

Farinhas obtidas a partir de resíduos agroindustriais de frutas, como cascas, sementes e bagaços, apresentam elevada susceptibilidade à contaminação microbiológica em decorrência de sua composição rica em carboidratos, compostos nitrogenados e umidade residual, aliada às condições de manipulação durante o processamento. A presença de microrganismos deteriorantes e patogênicos nessas matrizes representa um risco à segurança alimentar e compromete a vida útil do produto, limitando seu potencial de aplicação industrial (Barros *et al.*, 2026; Bhat *et al.*, 2024).

A irradiação ionizante constitui um dos métodos mais eficazes para a descontaminação microbiológica de farinhas e ingredientes secos, atuando por meio da indução de danos letais ao DNA dos microrganismos, incluindo quebras de fita simples e dupla, formação de ligações cruzadas e oxidação de bases nitrogenadas, sem que haja necessidade de elevação de temperatura ou adição de conservantes químicos (Barros *et al.*, 2026; Song *et al.*, 2022). A eficácia do tratamento é expressa em termos de redução logarítmica da contagem microbiana (log UFC/g) e é diretamente dependente da dose absorvida, do tipo de microrganismo-alvo e das características físico-químicas da matriz irradiada.

Em farinhas de origem vegetal, doses entre 1 e 3 kGy são geralmente suficientes para reduzir significativamente a carga de bolores e leveduras, bem como de bactérias mesófilas aeróbias totais, enquanto doses entre 5 e 10 kGy são recomendadas para a eliminação de patógenos de maior resistência radiológica, como *Salmonella* spp. e *Listeria monocytogenes* (Bhat *et al.*, 2024; Sunder *et al.*, 2022). Bhat *et al.* (2024), ao irradiar farinhas de trigo sarraceno, feijão-caupi, aveia e arroz integral com doses de 1 a 20 kGy, observaram reduções dose-dependentes na contagem de bolores e leveduras e na contagem bacteriana total, com eliminação completa de coliformes totais e *Salmonella* spp. em doses iguais ou superiores a 5 kGy.

No contexto específico das farinhas de casca de pitaya vermelha, a irradiação gama demonstrou eficácia na redução da carga microbiológica sem comprometimento significativo das propriedades físico-químicas e bioativas do produto em doses moderadas (Santos *et al.*, 2022; Rondán-Flores *et al.*, 2025a,b). Esse resultado é particularmente relevante considerando que a casca de pitaya, por ser um resíduo agroindustrial frequentemente exposto ao ambiente durante a colheita e o transporte, apresenta carga microbiológica inicial elevada, tornando a irradiação uma etapa de processamento estratégica para viabilizar seu uso como ingrediente alimentar seguro (Barros *et al.*, 2026).

Do ponto de vista regulatório, a aplicação de irradiação para fins de descontaminação microbiológica em farinhas e ingredientes de origem vegetal é amparada pela RDC ANVISA nº 21/2001, que permite o uso de qualquer dose de irradiação desde que tecnologicamente justificada e que não comprometa a segurança e a qualidade nutricional do produto. Em âmbito internacional, o Codex Alimentarius (CAC/RCP 19-1979, Rev. 2003) estabelece que a irradiação pode ser aplicada para reduzir a carga de patógenos em alimentos, desde que combinada com boas práticas de fabricação (BPF) e controle de qualidade ao longo de toda a cadeia produtiva.

É importante ressaltar que a irradiação não substitui as boas práticas de higiene e fabricação, mas atua como uma barreira adicional no conceito de segurança alimentar por múltiplos obstáculos (*hurdle technology*). A combinação da irradiação com embalagens adequadas (atmosfera modificada ou vácuo) e controle rigoroso da atividade de água ($A_w < 0,60$) potencializa os efeitos do tratamento e garante a estabilidade microbiológica das farinhas ao longo do armazenamento (Bhat *et al.*, 2024; Sunder *et al.*, 2022).

APLICAÇÕES INDUSTRIAIS E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS

As propriedades físico-químicas, funcionais e microbiológicas das farinhas de resíduos de frutas irradiadas, discutidas nas subseções anteriores, fundamentam diretamente seu potencial de aplicação em diferentes segmentos da indústria de alimentos.

As farinhas de resíduos de frutas irradiadas apresentam amplo potencial de aplicação na indústria de alimentos, especialmente em produtos de panificação, bebidas, snacks e formulações funcionais. A estabilidade conferida pela radiação ionizante favorece seu uso em sistemas que demandam maior vida de prateleira e segurança microbiológica, ampliando as possibilidades de incorporação industrial.

Além disso, a utilização dessas farinhas contribui para a diversificação de matérias-primas e para a redução de desperdícios, fortalecendo práticas alinhadas

à economia circular. As perspectivas futuras envolvem a otimização de processos e o aprofundamento da compreensão dos efeitos da radiação sobre diferentes matrizes vegetais, subsidiando aplicações industriais mais robustas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização de resíduos agroindustriais de frutas por meio da produção de farinhas representa uma estratégia tecnológica de crescente relevância científica e industrial, especialmente em um contexto global marcado pela necessidade de redução de desperdícios e pelo fortalecimento de cadeias produtivas mais sustentáveis. Os resultados consolidados neste capítulo demonstram que a radiação ionizante constitui uma ferramenta eficaz e versátil para o processamento dessas matrizes, atuando simultaneamente como agente de descontaminação microbiológica, modulador de propriedades físico-químicas e promotor de alterações estruturais que ampliam o potencial funcional dos ingredientes obtidos.

Os efeitos da irradiação sobre as farinhas de resíduos de frutas são intrinsecamente dependentes da dose aplicada, da composição da matriz vegetal e das condições de processamento adotadas, em especial o método de secagem. A liofilização, ao preservar com maior fidelidade os compostos bioativos termossensíveis como betalaínas e compostos fenólicos, potencializa os benefícios da irradiação quando aplicada em doses moderadas, resultando em ingredientes com perfil funcional superior. A secagem convencional, por sua vez, representa uma alternativa economicamente viável para aplicações em que a preservação integral dos compostos bioativos não é o critério prioritário.

Do ponto de vista da segurança microbiológica, a irradiação demonstrou eficácia comprovada na redução de carga microbiana em farinhas de origem vegetal, incluindo a eliminação de patógenos relevantes como *Salmonella* spp. e *Listeria monocytogenes* em doses entre 5 e 10 kGy, sem comprometimento significativo das propriedades sensoriais e nutricionais do produto. Esse resultado é particularmente estratégico para resíduos como a casca de pitaya vermelha, cujo elevado potencial funcional — associado ao rico perfil de betalaínas, fibras e compostos fenólicos, só pode ser plenamente explorado industrialmente quando aliado à garantia de segurança microbiológica.

As evidências reunidas ao longo deste capítulo indicam que a integração da tecnologia de irradiação ao processamento de resíduos agroindustriais não apenas amplia a segurança e a estabilidade dos ingredientes derivados, mas também abre perspectivas concretas para o desenvolvimento de produtos funcionais inovadores. A aplicação dessas farinhas em sistemas alimentares como panificação, bebidas, snacks e formulações enriquecidas representa um campo de inovação com potencial

significativo, desde que sustentado por abordagens científicas rigorosas que considerem a otimização de dose, a caracterização completa das propriedades funcionais e a conformidade com os marcos regulatórios vigentes, em especial a RDC ANVISA nº 21/2001 e as diretrizes do Codex Alimentarius.

Por fim, ressalta-se que a produção de farinhas irradiadas a partir de resíduos de frutas insere-se de forma coerente nos princípios da economia circular, ao transformar subprodutos de baixo valor agregado em ingredientes de alto desempenho tecnológico e funcional. O avanço nessa área demanda a continuidade de estudos que aprofundem a compreensão dos mecanismos de ação da radiação em diferentes matrizes vegetais, a avaliação de efeitos em escala industrial e a investigação da aceitabilidade sensorial e da percepção do consumidor em relação a ingredientes irradiados. A consolidação desse conhecimento é fundamental para que a tecnologia de irradiação seja amplamente adotada como ferramenta estratégica de inovação e sustentabilidade na indústria de alimentos.

REFERÊNCIAS

ANVISA — BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 21, de 26 de janeiro de 2001. Regulamento técnico para irradiação de alimentos. Brasília: ANVISA, 2001.

BARROS, J. P. A. A.; SPAGNOL, V.; RONDÁN-FLORES, L. M.; NEGRÃO, B. G.; BENEDETTI, V. F.; VILLAVICENCIO, A. L. C. H. Application of ionizing radiation technology in agro-industrial waste: A review. *Radiation Physics and Chemistry*, 2026. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2026.113690.

BHAT, N. A.; WANI, I. A.; HAMDANI, A. M.; GANI, A. Dose-dependent effects of gamma irradiation on microbiological, antioxidant, and functional properties of buckwheat, cowpea, oat, and brown rice flour. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 2024, art. 1196594, 2024. DOI: 10.1155/2024/1196594.

CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. CAC/RCP 19-1979: Recommended International Code of Practice for the Operation of Irradiation Facilities Used for the Treatment of Foods. Rev. 2. Rome: FAO/WHO, 2003.

HUANG, Y.; WANG, H.; HUANG, H.; TAN, Z.; HOU, C.; ZHUANG, J.; TANG, Y. Raman spectroscopy and its application in fruit quality detection. *Agriculture*, v. 15, n. 2, art. 195, 2025. DOI: 10.3390/agriculture15020195.

JABIN, T.; AKTER, S.; HOSSAIN, M. A.; ISLAM, M. S.; RAHMAN, M. M.; HOSSAIN, M. S. Effect of gamma irradiation on chemical composition, antioxidant activity, antibacterial activity, shelf life, and cytotoxicity in the peels of two mango varieties grown in Bangladesh. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 16, n. 6, art. 104708, 2023. DOI: 10.1016/j.arabjc.2023.104708.

LI, X.; CHEN, X.; XIAO, Y.; XIAO, W.; LIU, S.; ZHONG, H.; CHEN, J. Effect of γ -irradiation on structure, physicochemical property and bioactivity of soluble dietary fiber in navel orange peel. *Food Chemistry*: X, v. 14, art. 100274, 2022. DOI: 10.1016/j.fochx.2022.100274.

OLIVEIRA, T. C. G.; CALEJA, C.; OLIVEIRA, M. B. P. P.; PEREIRA, E.; BARROS, L. Reuse of fruits and vegetables biowaste for sustainable development of natural ingredients. *Food Bioscience*, v. 53, art. 102711, 2023. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.102711.

RONDÁN-FLORES, LUZ M.; GUNDU RAO, T. K.; VILLAVICENCIO, ANNA L. C. H.; CANO, NILO F. Effect of gamma radiation on freeze-dried red pitaya (*Hylocereus costaricensis*) skin powder: an EPR study to assess the original dose. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 325, 125144 (2025a).

RONDÁN-FLORES, L. M.; NEGRÃO, B. G.; BARROS, J. P. A. A.; KITAHARA, S. E.; VILLAVICENCIO, A. L. C. H. Physical properties of irradiated red pitaya (*Hylocereus costaricensis*) during storage. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, v. 12, n. 4A, p. 01–11, e2751 (2025b). DOI: <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2025.2751>

SANTOS, A. L.; ALENCAR, E. R.; BOTELHO, S. C. C.; FERREIRA, W. F. S.; MENDONÇA, M. A. Effect of gamma irradiation on the physicochemical, functional and bioactive properties of red pitaya (*Hylocereus costaricensis*) bark flour. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 199, art. 110371, 2022. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110371.

SONG, H.-Y.; SHIN, Y. J.; SONG, K. B. Ionizing radiation technology to improve the physicochemical and biological properties of natural compounds by molecular modification: a review. *Radiation Physics and Chemistry*, v. 194, art. 110013, 2022. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2022.110013.

SUNDER, M.; MUMBREKAR, K. D.; MAZUMDER, N. Gamma radiation as a modifier of starch: physicochemical perspective. *Current Research in Food Science*, v. 5, p. 141–149, 2022. DOI: 10.1016/j.crfs.2022.01.001.

VILLAVICENCIO, A. L. C. H. Irradiação de alimentos. In: KHOURY, H. J.; LEVY, D. (org.). *Investigando as aplicações da radioatividade: curiosidades sobre diferentes áreas de atuação para inspirar professores e jovens pesquisadores*. 1. ed. São Paulo: Recanto das Letras, 2021. p. 164.

YANG, J.; PAN, M.; HAN, R.; YANG, X.; LIU, X.; YUAN, S.; WANG, S. Food irradiation: an emerging processing technology to improve the quality and safety of foods. *Food Reviews International*, v. 40, n. 8, p. 2321–2343, 2024. DOI: 10.1080/87559129.2023.2272961.

ZHU, L.; LI, Z.; ZHAO, L.; LI, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, H. Comparisons of the micronization, steam explosion, and gamma irradiation treatment on chemical composition, structure, physicochemical properties, and in vitro digestibility of dietary fiber from soybean hulls. *Food Chemistry*, v. 366, art. 130618, 2022. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130618.