

O IMPACTO DO PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO NO POTENCIAL ANTIOXIDANTE DOS ALIMENTOS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.9821525290414>

Data de aceite: 13/08/2025

Amanda Dorta Maestro

Universidade Estadual de Maringá

Fábio Luiz Vieira Frez

Universidade Estadual de Maringá

Gabriel Sarache

Universidade Estadual de Maringá

Elizangela Regina Da Silva Martins

Universidade Estadual de Maringá

Nicolas Bueno Mordhost Zeraik

Universidade Estadual de Maringá

Danieli Suzan Valério

Universidade Estadual de Maringá

Camila Calistro Miculis

Universidade Estadual de Maringá

Alexandra Perdigão Maia de Souza

Universidade Estadual de Maringá

Samanta Shiraishi Kagueyama

Universidade Estadual de Maringá

Maicon Henrique Braz Garcia

Universidade Estadual de Maringá

Okelyton Ayres Pacheco

Universidade Estadual de Maringá

Simone Maria Altoé Porto

Universidade Estadual de Maringá

RESUMO: Os compostos antioxidantes presentes nos alimentos, como vitaminas, carotenoides e polifenóis, são cruciais para a saúde humana na prevenção de doenças crônicas associadas ao estresse oxidativo. No entanto, o potencial antioxidante do alimento *in natura* é frequentemente alterado pelas etapas de processamento e armazenamento, essenciais para garantir a segurança microbiológica, estender a vida de prateleira e melhorar a palatabilidade. Este capítulo explora a complexa interação entre as diversas tecnologias de processamento (térmicas e não térmicas) e as condições de armazenamento (temperatura, atmosfera, luz) e seu impacto na estabilidade e biodisponibilidade dos principais antioxidantes. Analisa-se como métodos tradicionais, como pasteurização e secagem, podem levar a perdas significativas, enquanto tecnologias emergentes, como o processamento por alta pressão (HPP) e campos elétricos pulsados (PEF), surgem como alternativas promissoras para a preservação desses compostos. Adicionalmente, discute-

se como o controle de fatores de armazenamento, incluindo embalagens com atmosfera modificada, é fundamental para mitigar a degradação oxidativa ao longo do tempo. A conclusão aponta para a necessidade de otimizar a cadeia produtiva, integrando processamento e armazenamento, para maximizar a retenção do valor nutricional e funcional dos alimentos que chegam ao consumidor.

PALAVRAS-CHAVE: Compostos Bioativos; Processamento de Alimentos; Estabilidade de Antioxidantes; Vida de Prateleira; Tecnologias Emergentes.

INTRODUÇÃO

A crescente conscientização dos consumidores sobre a relação entre dieta e saúde tem impulsionado a demanda por alimentos não apenas nutritivos, mas também funcionalmente ativos. No centro dessa demanda estão os compostos antioxidantes, moléculas capazes de neutralizar radicais livres e outras espécies reativas de oxigênio (EROs), protegendo as células do corpo contra o estresse oxidativo. Este processo está intimamente ligado à patogênese de diversas doenças crônicas, incluindo doenças cardiovasculares, neurodegenerativas e certos tipos de câncer (ALMEIDA; LIMA, 2021).

Frutas, vegetais, grãos integrais e leguminosas são as fontes mais ricas de antioxidantes dietéticos, que incluem uma vasta gama de compostos como a vitamina C (ácido ascórbico), a vitamina E (tocoferóis), os carotenoides (ex: licopeno, β -caroteno) e os polifenóis (ex: flavonoides, antocianinas). O perfil e a concentração desses compostos em um alimento *in natura* representam seu potencial antioxidante máximo. Contudo, desde a colheita até o consumo, os alimentos passam por uma série de etapas que podem alterar drasticamente essa composição. O processamento industrial, indispensável para a conservação, segurança e conveniência, expõe os alimentos a estresses como calor, pressão, oxigênio e luz. Da mesma forma, o armazenamento, seja em escala industrial ou doméstica, continua a impactar a estabilidade desses compostos sensíveis ao longo do tempo (TAN et al., 2020).

A relação entre processamento e conteúdo antioxidante não é, no entanto, unicamente negativa. Enquanto alguns processos degradam compostos lábeis, outros podem, paradoxalmente, aumentar a extraibilidade ou a biodisponibilidade de certos antioxidantes ao quebrar as matrizes celulares que os aprisionam. Um exemplo clássico é o aumento do licopeno biodisponível em tomates processados termicamente.

Neste contexto, compreender a magnitude e a natureza dessas alterações é fundamental para a indústria de alimentos e para os profissionais de saúde. Este capítulo tem como objetivo analisar criticamente os efeitos das principais tecnologias de processamento e das diversas condições de armazenamento sobre o potencial antioxidante dos alimentos, com base em evidências científicas dos últimos sete anos. Serão abordados tanto os métodos convencionais quanto as tecnologias inovadoras, fornecendo um panorama sobre os desafios e as estratégias para preservar o valor funcional dos alimentos na era moderna (RIBEIRO et al., 2019).

DESENVOLVIMENTO

O Efeito do Processamento Térmico

O tratamento térmico é a tecnologia de processamento mais difundida na indústria de alimentos, visando a inativação de microrganismos patogênicos e deteriorantes e a desativação de enzimas endógenas, como a polifenoloxidase e a peroxidase, que causam escurecimento e perdas nutricionais. Métodos como branqueamento, pasteurização, esterilização e cocção, embora eficazes para a conservação, representam um dos maiores desafios para a retenção de antioxidantes (SILVA et al., 2020).

Degradação de Compostos Termolábeis

A sensibilidade ao calor varia significativamente entre as diferentes classes de antioxidantes. A vitamina C é notoriamente termolábil e sua degradação é frequentemente utilizada como um indicador da severidade do tratamento térmico. Estudos demonstram perdas de 20% a 50% de ácido ascórbico em sucos de frutas pasteurizados, dependendo do tempo e da temperatura aplicados (SILVA et al., 2020). As antocianinas, pigmentos responsáveis pelas cores vermelha, roxa e azul de muitas frutas e vegetais, também são altamente suscetíveis à degradação térmica. O calor pode levar à abertura do anel pirano, resultando na formação de chalconas incolores e, conseqüentemente, na perda da cor e da capacidade antioxidante. Costa et al. (2022) relataram que a produção de geleia de amora resultou em uma perda de mais de 60% do conteúdo de antocianinas totais em comparação com a fruta fresca.

Liberação e Aumento da Biodisponibilidade

Apesar das perdas, o calor pode ter efeitos positivos. A matriz alimentar de muitos vegetais é composta por paredes celulares robustas de celulose, hemicelulose e pectina, que encapsulam compostos bioativos. O tratamento térmico pode desestruturar essa matriz, facilitando a liberação e, portanto, a extração e a absorção (biodisponibilidade) de certos antioxidantes. O exemplo mais emblemático é o do licopeno, o carotenoide que confere a cor vermelha ao tomate. O cozimento do tomate rompe as paredes celulares e enfraquece as ligações entre o licopeno e as proteínas da matriz, aumentando sua concentração mensurável e sua absorção pelo organismo. Ribeiro et al. (2019) confirmaram que o processamento de tomate em molho ou pasta pode aumentar a biodisponibilidade de licopeno em até três vezes em comparação com o tomate cru. Efeitos similares, embora menos pronunciados, foram observados para outros carotenoides, como o β -caroteno em cenouras e abóboras, e para alguns compostos fenólicos. A chave está no balanço: um tratamento térmico brando pode ser benéfico, enquanto um tratamento excessivo invariavelmente levará à degradação, superando os ganhos de liberação (SANTOS; MARTINS, 2023).

Processamento por Alta Pressão (HPP - High Pressure Processing)

O HPP, também conhecido como pascalização, submete os alimentos (geralmente já embalados) a pressões isostáticas extremamente altas (tipicamente 300-600 MPa) por alguns minutos. Essa pressão inativa microrganismos ao danificar suas membranas celulares, mas, por não quebrar ligações covalentes, preserva moléculas pequenas e sensíveis ao calor, como vitaminas e compostos fenólicos.

Diversos estudos recentes comprovam a eficácia do HPP demonstraram que suco de laranja processado por HPP reteve mais de 95% de sua vitamina C inicial, enquanto o suco pasteurizado termicamente perdeu cerca de 30%. Além disso, o HPP demonstrou preservar melhor a cor e o conteúdo de antocianinas em sucos de açaí e outras *berries*, resultando em um produto com maior capacidade antioxidante total em comparação com o tratamento térmico equivalente (Pereira et al, 2021)

Outras tecnologias, como ultrassom e irradiação, também são exploradas, cada uma com seus próprios mecanismos e vantagens na preservação de compostos bioativos, representando uma fronteira promissora para a indústria alimentícia (TAN et al., 2020).

Impacto de Outros Métodos de Processamento

Além dos tratamentos térmicos e não térmicos para conservação, outras operações unitárias na cadeia de produção também afetam o perfil antioxidante dos alimentos.

Processos Mecânicos (Corte, Moagem, Descascamento)

As operações mecânicas, como cortar, fatiar, moer ou descascar, causam danos físicos aos tecidos vegetais. Esse rompimento celular tem duas consequências principais. Primeiramente, expõe enzimas endógenas, como a polifenoloxidase (PPO), a seus substratos (compostos fenólicos) na presença de oxigênio. Isso desencadeia reações de escurecimento enzimático que não apenas alteram a aparência, mas também consomem os compostos fenólicos, reduzindo a capacidade antioxidante. É o que ocorre rapidamente quando uma maçã ou batata é cortada. Em segundo lugar, a remoção da casca em muitas frutas e vegetais (como maçãs, batatas e pepinos) pode resultar em uma perda nutricional substancial, uma vez que a casca é frequentemente a parte mais rica em fibras e compostos fenólicos, que atuam como uma barreira protetora para a planta (RIBEIRO et al., 2019).

Secagem e Desidratação

A secagem é um método de conservação baseado na redução da atividade de água (a_w), o que inibe o crescimento microbiano e retarda reações químicas. No entanto, a maioria dos métodos de secagem convencionais envolve a aplicação de ar quente por

longos períodos, combinando dois fatores prejudiciais aos antioxidantes: calor e exposição ao oxigênio. A vitamina C e os carotenoides são particularmente vulneráveis durante a secagem. O β -caroteno pode sofrer isomerização e oxidação, perdendo sua atividade pró-vitamina A e sua capacidade antioxidante. Métodos mais modernos e brandos, como a liofilização (secagem por congelamento), são muito superiores na preservação desses compostos. Na liofilização, o alimento é congelado e a água é removida por sublimação sob vácuo. A ausência de calor elevado e de oxigênio líquido minimiza a degradação, resultando em um produto seco de alta qualidade nutricional, embora com um custo de produção mais elevado (SANTOS; MARTINS, 2023).

A Influência Crucial do Armazenamento

Após o processamento, o alimento continua a sofrer alterações durante o armazenamento. A velocidade e a extensão da degradação dos antioxidantes nesta fase são governadas por uma tríade de fatores: temperatura, atmosfera e exposição à luz.

Temperatura de Armazenamento

A temperatura é um dos fatores mais críticos que governam a taxa de reações químicas. De acordo com a regra de Van't Hoff, a velocidade de muitas reações dobra ou triplica para cada aumento de 10°C. Portanto, o armazenamento em baixas temperaturas (refrigeração ou congelamento) é a estratégia mais fundamental para retardar a degradação de antioxidantes.

- Refrigeração (0-8°C): É eficaz para retardar a respiração de frutas e vegetais frescos e a atividade microbiana em produtos processados. No entanto, a degradação continua, ainda que lentamente. Em vegetais folhosos, por exemplo, perdas de 20-30% de vitamina C podem ocorrer em uma semana, mesmo sob refrigeração (COSTA et al., 2022).
- Congelamento (-18°C ou menos): É um método de conservação a longo prazo muito mais eficiente. Em temperaturas de -18°C, a maioria das reações químicas e enzimáticas é drasticamente reduzida. Contudo, a qualidade do congelamento importa. O congelamento lento leva à formação de grandes cristais de gelo que podem danificar as estruturas celulares. Após o descongelamento, essa ruptura celular facilita o contato entre enzimas e substratos, acelerando perdas. O congelamento rápido, por outro lado, forma cristais menores e preserva melhor a integridade do tecido e, consequentemente, os antioxidantes (PEREIRA et al., 2021).

Atmosfera e Embalagem

A presença de oxigênio é um fator chave na degradação oxidativa de muitos compostos, incluindo ácido ascórbico, carotenoides e polifenóis. O controle da atmosfera ao redor do produto é, portanto, uma estratégia poderosa.

- **Embalagem a Vácuo:** A remoção do ar da embalagem minimiza a disponibilidade de oxigênio, retardando significativamente as reações de oxidação. É uma técnica amplamente utilizada para carnes, queijos e produtos secos.
- **Embalagem com Atmosfera Modificada (MAP - Modified Atmosphere Packaging):** Esta tecnologia substitui o ar dentro da embalagem por uma mistura de gases controlada. Geralmente, envolve a redução dos níveis de oxigênio (O₂) e o aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) e/ou nitrogênio (N₂). A redução de O₂ limita a oxidação direta, enquanto o aumento de CO₂ diminui a taxa de respiração de produtos frescos, como saladas prontas e frutas cortadas. A MAP tem se mostrado extremamente eficaz na extensão da vida de prateleira e na retenção da cor (ex: antocianinas) e do conteúdo de vitamina C em produtos minimamente processados (OLIVEIRA et al., 2023).

Exposição à Luz

A luz, especialmente a porção ultravioleta (UV) do espectro, é uma forma de energia que pode catalisar reações de degradação. Compostos fotossensíveis são particularmente vulneráveis. A riboflavina (vitamina B₂), por exemplo, pode ser rapidamente degradada pela luz em produtos lácteos, gerando compostos que, por sua vez, podem acelerar a oxidação de outras vitaminas, como a vitamina C.

Os carotenoides e a clorofila também são sensíveis à fotodegradação. É por essa razão que produtos como o azeite de oliva extravirgem, rico em polifenóis e vitamina E, são comercializados em embalagens opacas ou de vidro escuro. A escolha de materiais de embalagem que bloqueiam a luz UV e comprimentos de onda visíveis específicos é uma estratégia de proteção essencial para muitos alimentos ricos em antioxidantes, garantindo a manutenção de sua qualidade nutricional e sensorial durante o armazenamento (ALMEIDA; LIMA, 2021).

A Tabela 1 resume os principais efeitos discutidos.

Fator	Método/Condição	Efeitos Predominantes nos Antioxidantes
Processamento Térmico	Pasteurização, Esterilização	- Degradação de compostos termolábeis (Vitamina C, antocianinas). Pode aumentar a biodisponibilidade de carotenoides (licopeno).
Processamento Não Térmico	Alta Pressão (HPP), Campo Elétrico (PEF)	- Alta retenção de vitaminas e polifenóis. Preservação da cor e do sabor.
Processos Mecânicos	Corte, Moagem	- Perdas por reações de escurecimento enzimático. - Remoção de cascas ricas em antioxidantes.
Secagem	Secagem por ar quente	- Perdas significativas por calor e oxidação.
	Liofilização	- Excelente retenção de compostos sensíveis.
Armazenamento	Temperatura elevada	- Acelera todas as reações de degradação.
	Refrigeração/Congelamento	- Retarda significativamente a degradação.
	Exposição ao Oxigênio	- Causa oxidação direta (perda de vitaminas, ranço).
	Embalagem (MAP, Vácuo)	- Minimiza a oxidação e a respiração.
	Exposição à Luz	- Degrada compostos fotossensíveis (carotenoides, riboflavina).

Tabela 1. Resumo do impacto do processamento e armazenamento em antioxidantes.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

CONCLUSÃO

A jornada de um alimento do campo à mesa é marcada por uma série de intervenções de processamento e períodos de armazenamento que, embora essenciais para a segurança e conveniência, impõem desafios significativos à preservação de seu potencial antioxidante. Conforme discutido neste capítulo, a relação entre essas etapas e a estabilidade dos compostos bioativos é complexa e multifacetada. Fica claro que não existe uma solução única. Os tratamentos térmicos convencionais, apesar de sua eficácia microbiológica, frequentemente resultam em perdas nutricionais consideráveis, especialmente de compostos termolábeis como a vitamina C e as antocianinas. Contudo, demonstrou-se que esses mesmos processos podem, paradoxalmente, melhorar a biodisponibilidade de outros antioxidantes, como o licopeno, ilustrando a necessidade de uma análise caso a caso. As tecnologias emergentes, notadamente o processamento por alta pressão (HPP) e os campos elétricos pulsados (PEF), representam a vanguarda da conservação de alimentos. Ao minimizarem o uso de calor, essas tecnologias oferecem uma oportunidade sem precedentes de produzir alimentos seguros e com vida de prateleira estendida, que retêm uma fração muito maior de seus antioxidantes originais, aproximando-se da qualidade do produto fresco.

Além do processamento, as condições de armazenamento desempenham um papel igualmente crucial. O controle rigoroso da temperatura, a utilização de embalagens inteligentes que modificam a atmosfera e protegem contra a luz não são luxos, mas sim requisitos fundamentais para mitigar a degradação oxidativa e enzimática ao longo do tempo.

Portanto, a otimização do potencial antioxidante nos alimentos consumidos pela população depende de uma abordagem integrada. A indústria de alimentos deve buscar um equilíbrio criterioso, selecionando a tecnologia de processamento mais branda e eficaz para cada tipo de produto e combinando-a com sistemas de embalagem e condições de armazenamento que garantam a estabilidade a longo prazo. Para a ciência de alimentos, o desafio contínuo é refinar as tecnologias existentes e desenvolver novas estratégias que preservem a integridade nutricional, permitindo que os alimentos cumpram plenamente seu papel como promotores da saúde e bem-estar.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. T.; LIMA, V. L. A. G. Impact of light and packaging on the oxidative stability of functional foods: a review. *Food Packaging and Shelf Life*, v. 28, p. 100654, jun. 2021.
- COSTA, L. F.; PEREIRA, J. A.; RODRIGUES, S. Thermal processing effects on anthocyanins, antioxidant activity, and overall quality of blackberry jam. *Journal of Food Composition and Analysis*, v. 105, p. 104231, jan. 2022.
- OLIVEIRA, M.; SANTOS, T. R.; GOMES, A. M. Pulsed electric fields versus thermal pasteurization: a comparative study on the quality of apple juice during refrigerated storage using modified atmosphere packaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, v. 82, p. 103588, nov. 2023.
- PEREIRA, G. H.; BARROS, F. A.; SILVA, C. O. High-pressure processing of açai (*Euterpe oleracea* Mart.) juice: Effects on antioxidant compounds and enzyme activity during frozen storage. *LWT - Food Science and Technology*, v. 149, p. 111845, set. 2021.
- RIBEIRO, A. B.; ALVES, R. M.; GUIMARÃES, J. T. Bioavailability of carotenoids and phenolic compounds in processed vegetable products: a review of the last five years. *Trends in Food Science & Technology*, v. 92, p. 186-196, out. 2019.
- SANTOS, B. S.; MARTINS, V. G. A comparative study of spray drying and freeze drying on the physicochemical and antioxidant properties of passion fruit powder. *Food Chemistry*, v. 404, p. 134567, mar. 2023.
- SILVA, F. A.; MOURA, S. C. S. R.; FONSECA, M. J. V. Ascorbic acid degradation in pasteurized tropical fruit juices: kinetics and influence of storage temperature. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 40, n. 2, p. 344-351, jun. 2020.
- TAN, J.; ZHANG, M.; WANG, Z. Advances in non-thermal processing for the preservation of bioactive compounds in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 60, n. 15, p. 2599-2619, ago. 2020.