

Radiação Ionizante na Agroindústria: Revisão sobre as vantagens, efeitos e possibilidades de uso em alimentos de origem vegetal no Brasil

Ionizing Radiation in Agroindustry: Review of the advantages, effects and possibilities of use in foods of plant origin in Brazil

Ana Carolina Loro

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, Piracicaba, SP
ana2003_41@hotmail.com

Victor Wilson Botteon

Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, Piracicaba, SP
victor_botteon2@hotmail.com

Jessica Bomtorin Aranha

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, Piracicaba, SP
jessica.aranha@usp.br

Talita Costa Negri

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, Piracicaba, SP
talita.negri@usp.br

Marta Helena Fillet Spoto

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP, Piracicaba, SP
martaspoto@usp.br

Thiago Mastrangelo

Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, Piracicaba, SP
piaui@cena.usp.br

Resumo: Desenvolvimento de métodos que objetivem a redução de perdas e o aumento da oferta de alimentos seguros e de qualidade para uma população mundial em expansão são necessários. Esse trabalho de revisão objetivou abordar a irradiação de alimentos, com ênfase na aplicação da radiação ionizante em produtos de origem vegetal. A irradiação de alimentos é uma alternativa viável para promover a conservação de produtos de origem vegetal, com as finalidades de redução da contaminação causada por microrganismos patogênicos, aumento de vida útil dos alimentos, retardo do amadurecimento e diminuição das perdas pós-colheita. Como tratamento fitossanitário, pode ser utilizada visando atender aos requisitos do mercado internacional e às barreiras quarentenárias impostas pelos países importadores, não deixando resíduos tóxicos nos alimentos e não alterando significativamente suas propriedades sensoriais. A aplicação de radiação ionizante em alimentos é considerada segura para o consumidor, destacando que é imprescindível obedecer aos limites mínimos e máximos específicos para cada alimento e para cada finalidade pretendida para não prejudicar a qualidade nutricional e produzir compostos indesejáveis no processo. Apesar das vantagens e

possibilidades da irradiação de alimentos, esse método ainda é subutilizado e pouco difundido no Brasil, sendo necessários maiores investimentos e pesquisas para explorar mercados na área, tornando os produtos agropecuários mais competitivos internacionalmente.

Palavras-chave: irradiação de alimentos; segurança alimentar; quarentena; barreiras fitossanitárias.

Abstract: Development of methods that aim the reduction of losses and increasing the supply of safe food for a growing global population are necessary. This paper presents a review of food irradiation, with emphasis on application of ionizing radiation on vegetable products. Food irradiation is a viable alternative to promote the conservation of vegetable products, consisting of a physical process that can reduce contamination caused by pathogenic microorganisms, increase shelf life, delay ripening and allow reduction of post-harvest losses. As phytosanitary treatment, it can be used in order to meet the requirements of international market and quarantine barriers imposed by importing countries, leaving no toxic residues in food and not significantly altering their sensorial and organoleptic properties, assisting in quality and food safety. The application of ionizing radiation in food is considered safe for the consumer, stressing that it is imperative to comply with the specific minimum and maximum limits for each food and for each intended purpose so as not to impair nutritional quality and produce undesirable compounds in the process. Despite the advantages and possibilities of food irradiation, this method is still underused in Brazil and greater investments and studies are required in order to open markets and to become more competitive internationally.

Key words: food irradiation; food security; quarantine; phytosanitary barriers.

1 Introdução

Os alimentos desperdiçados no mundo somam aproximadamente 1,3 bilhões de t/ano [1, 2]. A essas perdas, adicionam-se os custos socioeconômicos das doenças causadas por alimentos contaminados por microrganismos. Portanto, pode-se observar nesse contexto que a redução de perdas pós-colheita e a eliminação de patógenos dos alimentos são componentes críticos para a segurança alimentar da humanidade nas próximas décadas.

A crescente demanda por parte dos consumidores por variedade e qualidade de produtos de origem vegetal impulsiona o comércio internacional destes produtos e métodos alternativos são necessários para a redução de perdas e aumento da oferta de alimentos seguros e de qualidade para uma população mundial em crescente expansão [3, 4]. Uma técnica alternativa que permite o aumento da segurança e vida útil de produtos hortícolas seria a irradiação de alimentos.

O uso comercial da irradiação para desinfestação de produtos agrícolas frescos para exportação vem crescendo e visa atender o mercado internacional e facilitar o comércio [5, 6]. Atualmente, cerca de 60 países possuem legislação autorizando o uso da radiação ionizante para conservação de mais de 100 tipos de alimentos; o Brasil segue normas internas regulamentadas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) e recomendações sugeridas no *Codex Alimentarius*, consistindo em uma compilação de normas alimentares adotadas internacionalmente, pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) e pela *Inter-*

national Atomic Energy Agency (IAEA) [7].

A irradiação de alimentos pode ser considerada um tratamento físico que consiste no uso de radiação ionizante para redução da contaminação de microrganismos patogênicos, conservação e retardo do amadurecimento dos alimentos, diminuição das perdas pós-colheita e aumento do tempo de vida útil, facilitando a comercialização de produtos alimentícios ao atender as exigências quarentenárias do mercado externo [8]. Além disso, o método oferece vantagens por ser operacionalmente simples e seguro, sem produção de resíduos tóxicos e alteração significativa nos aspectos sensoriais e nutricionais dos alimentos [8, 9].

No ano de 1997, a OMS aprovou e recomendou a irradiação de produtos alimentícios, em doses que não comprometam significativamente suas propriedades físico-químicas. Desde então, o processo de irradiação vem sendo aprovado pelas autoridades de saúde de inúmeros países para utilização em diversos tipos de alimentos. Os estudos sobre irradiação de alimentos no Brasil não são recentes, ganhando destaque após a II Guerra Mundial, mas ainda é possível perceber que falta muito a ser compreendido e explorado, principalmente na área comercial [10]. A primeira pesquisa com irradiação de alimentos foi desenvolvida pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em 1968, na área de Radioentomologia [10, 11]. A primeira regulamentação surgiu em 1973, e, desde então, diversos tipos de produtos foram irradiados e inúmeras pesquisas foram realizadas [10].

Apesar da popularização da técnica pelo mundo, a irradiação de alimentos no Brasil ainda é subutilizada, pouco difundida para os consumidores e há pouco investimento na área, apresentando um grande nicho de mercado a ser explorado e desenvolvido. Nesse contexto, esse trabalho objetivou abordar o tema irradiação de alimentos, com ênfase na aplicação da radiação ionizante em alimentos de origem vegetal, por meio de revisão bibliográfica por pesquisa de palavras-chave em português e em língua inglesa (e.g. “Irradiação de Alimentos”, “Food Irradiation”), com publicações indexadas em diversas plataformas brasileiras e internacionais (“*Google Scholar*”, “*Pubmed*”, “*SciELO*”, “*Web of Science*”), no período compreendido entre os anos de 1970 (início das pesquisas na área) até os dias atuais (ano de 2018), escolhidas aleatoriamente e de forma a compreender cada assunto abordado detalhadamente.

2 Legislação

O procedimento de irradiação de alimentos foi aprovado por diversos órgãos, como a Comissão da União Europeia [12, 13]; *Food and Drug Administration* (FDA) [14]; OMS [15, 16] e Comissão do *Codex Alimentarius* [17, 18]. Conforme a *United Fresh Fruit – Vegetable Association*, em 1986 [19], a utilização de radiações ionizantes na desinfecção de alimentos e no aumento da conservação pós-colheita de frutas e hortaliças deveria levar critérios compatíveis com a legislação vigente do país importador e os aspectos legais estabelecidos pelas autoridades sanitárias.

No Brasil, a primeira legislação de regulamentação alimentar a respeito da irradiação de alimentos ocorreu em 1973, com o Decreto n° 72.718, de 29 de agosto, o qual estabelece normas gerais sobre irradiação de alimentos, sendo revisado e estendido na Portaria DINAL no. 9 do Ministério da Saúde de 08/03/1985 e a Resolução RDC n° 21, de 26 de janeiro de 2001, a qual aprovou o Regulamento Técnico para Irradiação de Alimentos [20, 21]. De acordo com o primeiro decreto citado, a irradiação de alimentos, visando a sua comercialização ou industrialização, só poderia ser efetuada por estabelecimentos devidamente licenciados pelas autoridades competentes e após autorização da Comissão Nacional de Energia Nu-

clear (CNEN), somente sendo autorizado o processo de irradiação em grupos de alimentos sobre os quais se dispusesse de trabalhos técnicos e científicos, desde que se comprovasse a inocuidade para o consumo do alimento irradiado, a sanidade do alimento irradiado e a eficiência da irradiação para a finalidade que se pretendia atingir, além da extensão do efeito da irradiação sobre os princípios nutritivos essenciais do alimento.

Em 26 de janeiro de 2001, foi aprovada pela Diretoria Colegiada da ANVISA a Resolução (RDC) n° 21, regulamentando o tratamento de alimentos: “qualquer alimento poderá ser tratado por radiação desde que a dose máxima absorvida seja inferior àquela que comprometeria as propriedades funcionais e/ou os atributos sensoriais do alimento”, além da exigência de adequada rotulagem de alimentos e ingredientes irradiados, segundo as normas vigentes [22]. A Instrução Normativa (IN) n° 9 de 2011, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), complementa a RDC n° 21, reconhecendo o uso da radiação ionizante como tratamento fitossanitário, apresentando como objetivo a prevenção de introdução ou disseminação de pragas que possuem elevado impacto nas relações comerciais de produtos alimentícios [23].

3 Radiações Ionizantes

As radiações são formas de energia que podem ser classificadas como ondas eletromagnéticas e partículas, as quais propagam com elevada velocidade e produzem diversos efeitos ao interagirem com a matéria. Nesse processo, a radiação penetra no alimento alvo com a finalidade de produzir o efeito desejado, a uma determinada velocidade e energia absorvida, sem que o alimento entre em contato direto com a fonte emissora de radiação e se contamine [16, 24].

A absorção de radiações do tipo não ionizantes pela matéria pode levar somente à excitação de um elétron de um átomo ou de uma molécula para um nível energético mais elevado, sem ejeção do mesmo, podendo citar como exemplos as ondas de rádio, a luz visível, o infravermelho, dentre outras [25, 26]. As radiações são ditas ionizantes quando produzem íons, em virtude de a energia ser suficiente para ejetar um ou mais elétrons orbitais de um átomo ou de uma molécula, podendo ser emitidas pelo processo de decaimento radioativo de núcleos instáveis, pela excitação de átomos e seus núcleos em reatores nucleares, aceleradores de partículas, dentre outros dispositivos [26, 27].

As partículas elementares carregadas se classificam basicamente em partícula α ; partícula β^- ; partícula β^+ (antipartícula do elétron) e elétrons de conversão, cada tipo com suas respectivas características e especificidades. Os principais tipos de radiação ionizante eletromagnéticas são os raios gama (γ) e os raios-X. Os raios γ são ondas eletromagnéticas (fótons) de alta energia e extremamente penetrantes, produzidos em processos nucleares, como a fissão nuclear e o decaimento de radioisótopos. Os raios-X são ondas que apresentam propriedades similares, diferindo quanto à origem (eletrosfera) [26]. Após as radiações serem empregadas de forma controlada e sob normas de proteção radiológica, é necessário realizar a aferição do material irradiado por meio de diferentes dosímetros para quantificar a dose absorvida pelo material alvo.

A irradiação produz efeitos diretos e indiretos nos alvos irradiados, quebrando cadeias de DNA, alterando as estruturas moleculares e provocando alterações bioquímicas em processos fisiológicos, sendo, portanto, essencial a avaliação dos efeitos provocados pela interação da radiação ionizante com o alimento após o devido tratamento com a finalidade de assegurar a qualidade nutricional [28, 29].

4 Tipos de Irradiadores

O método mais utilizado de irradiação de alimentos é o por meio de radiação ionizante proveniente de irradiadores de raios gama (γ). Esses irradiadores produzem radiação devido ao decaimento natural de radioisótopos, como, por exemplo, o Cobalto-60 (^{60}Co) e o Césio-137 (^{137}Cs). Atualmente, o ^{60}Co é o radioisótopo mais utilizado para aplicações industriais devido, principalmente, a meia-vida ($T_{1/2}$) de 5,27 anos, emitindo dois raios- γ de 1,17 e 1,33 MeV, podendo ser empregado em irradiadores de armazenamento da fonte em água [30, 31].

O ^{137}Cs possui meia-vida de 30,2 anos e para sua obtenção ocorre a separação do césio dos outros resíduos da fissão nuclear na forma de *CsCl*. O material é triplamente encapsulado em recipientes de aço inoxidável por ser um produto solúvel em água e, se em algum momento vazar, pode causar a contaminação do ambiente [31]. Emite um raio gama de 0,66 MeV e partículas beta para a estabilização do Bário (Ba), em seu decaimento. A menor preferência do emprego do ^{137}Cs está na menor energia e, principalmente, na possibilidade de contaminação ambiental se ocorrer algum tipo de acidente [31].

Os irradiadores são configurados de modo que a dose absorvida seja a mais homogênea possível, sendo compostos de uma blindagem (chumbo ou urânio exaurido), mecanismo de transporte e fonte irradiadora. Segundo a *Specific Safety Guide* [30] de 2010 da IAEA, os irradiadores são classificados pelas suas características, independentemente da finalidade, em 4 categorias: I (auto blindado); II (panorâmico e com armazenagem da fonte a seco); III (auto blindado com água); IV (panorâmico e de armazenagem da fonte em água). Além dos mecanismos de segurança obrigatórios e fundamentais para o devido funcionamento das instalações de irradiação de alimentos, cumpre destacar também que não são acumulados rejeitos radioativos.

Além da radiação do tipo gama, pode-se citar as fontes emissoras de raio-X com energia de até 5 MeV, consistindo em radiação denominada de freamento (ou *Bremsstrahlung*), onde os elétrons são acelerados em um dispositivo elétrico e parados abruptamente ante a um alvo, geralmente revestido com um material de elevado número atômico, como tungstênio ou ouro. Os aceleradores de partículas também podem ser utilizados com energia máxima de 10 MeV, consistindo em equipamentos que aceleram partículas com base em campos eletromagnéticos. Os aceleradores de elétrons, por sua vez, aceleram elétrons dentro de um sistema a vácuo, sendo que o feixe de elétrons produzido pode ser utilizado para irradiar os produtos diretamente ou para produzir raios-X [30].

Os custos relacionados com o procedimento de irradiação são considerados competitivos quando comparados aos métodos convencionais para conservação de alimentos, os quais podem depender de inúmeros fatores como o tipo de produto a ser irradiado, quantidade, taxa de dose, objetivo da irradiação e distância do campo de produção até a fonte irradiadora, com valores variando na faixa entre 10 e 15 dólares por tonelada em aplicação de dose baixa (até 1 kGy) e entre 100 e 250 dólares por tonelada em altas doses (acima de 10 kGy) [32, 33].

5 Irradiação de Produtos de Origem Vegetal

Frutas e hortaliças podem ser irradiadas para diversas finalidades, como na inibição de brotamento, quarentena e desinfestação de insetos, aumento de tempo de prateleira (*shelf life*), para retardar o amadurecimento e senescência. Métodos de conservação de produtos de origem vegetal são fundamentais, uma vez que, após a colheita, a atividade biológica continua, reduzindo a vida útil do alimento rapidamente se não forem tomados os devidos

cuidados [34].

O uso da radiação gama como tecnologia de conservação de produtos de origem vegetal está basicamente relacionado ao tipo de alimento a ser irradiado, a dose aplicada e ao tempo de exposição do alimento à fonte [35]. Geralmente, a irradiação com doses até 1 kGy possui a finalidade de inibição de brotamento, atraso na maturação, desinfestação de insetos e inativação de parasitas; doses médias de 1 a 10 kGy são empregadas visando à redução da carga de microrganismos ou eliminação de patógenos não formadores de esporos; já doses acima de 10 kGy geralmente visam a redução do número de microrganismos e bactérias esporuladas [36, 37].

Na área quarentenária, a irradiação tem sido aplicada para desinfestação de pragas como uma alternativa aos métodos como fumigação com brometo de metila, cuja utilização foi proibida em países desenvolvidos devido à sua elevada toxicidade [38, 39]. Gases como óxidos de etileno e brometo de metila são eficientes para promoverem desinfestação de produtos de origem vegetal, mas estão sendo banidos pelo fato de deixarem resíduos químicos e por serem potencialmente mutagênicos [40], fazendo da aplicação de radiação ionizante uma alternativa segura [41].

A irradiação de alimentos para controle de insetos no intervalo de doses entre 0,1 e 1,0 kGy nem sempre resulta na morte imediata do organismo, sendo imprescindível a realização de estudos para determinação das doses a serem aplicadas para os diferentes grupos de insetos [42]. A sensibilidade dos insetos aos efeitos provocados pela radiação ionizante pode variar consideravelmente com relação à espécie, sexo, idade e ao estágio de vida em que se encontram. Os Estados Unidos têm exigido por muitas décadas um padrão de eficiência probit-9 para o tratamento de pragas de grande importância para *commodities* hortícolas, como as moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae). O Probit-9 requer a mortalidade de 99.9968329 % de uma praga depois de um tratamento [43]. Atualmente, a dose de 150 Gy, por exemplo, é aceita como tratamento fitossanitário genérico para todos os hospedeiros de moscas-das-frutas e outras pragas [44].

Além da eliminação de insetos, a radiação ionizante também pode ser empregada para eliminar parasitas e alguns microrganismos patogênicos presentes nos alimentos. A irradiação é utilizada na descontaminação de vários tipos de hortaliças desidratadas, como aipo, salsa e alho-poró [45]. O processo de radurização para redução da carga microbiológica utiliza doses baixas (entre 0,4 e 2,5 kGy), promovendo também o controle de infestação por insetos e ácaros [46, 48]. A radicação visa à eliminação de agentes parasitas e à redução de bactérias patogênicas não esporuladas e deteriorantes dos alimentos, como *Salmonella*, *Streptococcus* e *Campylobacter*, utilizando doses entre 2 e 8 kGy. Já a radapertização utiliza doses da ordem de 25 a 45 kGy com a finalidade de eliminação de microrganismos patogênicos formadores de esporos e deterioradores mais resistentes, como o *Clostridium*, *Moraxella* e *Acinetobacter* [46, 48].

A radiorresistência dos microrganismos é diversa, dependendo de fatores intrínsecos, como espécie ou linhagem, e influenciada por condições ambientais ou extrínsecas [49, 52]. A descontaminação de alimentos por meio de radiação ionizante também pode ser utilizada visando à eliminação de compostos alergênicos ou tóxicos, podendo-se citar o efeito de altas doses, entre 10 e 30 kGy, com a finalidade de redução da contaminação por aflatoxina em milho e amendoim [53].

Um dos principais objetivos do processo de irradiação de produtos vegetais, além do tratamento fitossanitário e redução da carga microbiana, é o aumento da shelf life. As doses comumente utilizadas para esses fins são de até 1 kGy. A irradiação permite prolongar a vida útil dos alimentos, inibindo, por exemplo, a germinação de batatas, cebola, inhame e

alho com doses entre 0,02 e 0,15 kGy. A vida útil de cebolas e alhos irradiados pode ser estendida em até 9 meses [54, 55]. Martin e colaboradores [56] conduziram estudos sobre o armazenamento de alimentos de origem vegetal submetidos ao processo de irradiação, obtendo uma redução de perdas pós-colheita de 30-45 % em cebolas e 12-22 % em leguminosas, durante 6-8 meses sob umidade e temperatura ambiente. Doses baixas de radiação (50 a 150 Gy) têm sido utilizadas comercialmente em muitos países para inibir o brotamento de muitos produtos como batatas, inhames, nabo, beterraba, alcachofra, cebola, cenoura, alho e gengibre. Doses maiores do que 150 Gy podem causar efeitos negativos em tubérculos e bulbos, como alterações nos teores de ácido ascórbico e aminoácidos livres [57].

Já com o objetivo de retardar o amadurecimento ou senescência de frutos, geralmente são empregadas doses da ordem de 0,12 a 0,75 kGy [58]. A eficiência do processo para atingir seus objetivos depende de vários fatores, entre os quais a dose de radiação, taxa de dose, características dos cultivares irradiados e condições de armazenamento antes e após a irradiação [59]. A vida útil de goiaba irradiada com 250 Gy pode aumentar em 4 dias, além de reduzir a incidência de antracnose pelo atraso no amadurecimento [60].

O processo de irradiação também pode ser uma alternativa aos métodos convencionais de conservação em raízes, como em cenouras minimamente processadas, reduzindo a carga microbiana, atrasando a senescência, e prevenindo perdas de açúcar e β -caroteno, embora possa ocorrer até 20 % de diminuição de ácido ascórbico e ligeira alteração da coloração da mesma [61].

6 Irradiação de Especiarias e Outros Produtos

As especiarias apresentam grande quantidade de agentes patogênicos e podem chegar às indústrias de alimentos já contaminadas de forma endógena ou por meio de contaminantes exógenos [62]. Nesse contexto, a irradiação de condimentos pode contribuir para a redução de organismos patogênicos [63]. A irradiação de temperos desidratados já foi inclusive adotada em muitos países para a redução de bactérias e fungos patogênicos, substituindo a fumigação com produtos químicos [64]. A eficiência no controle microbiológico pela irradiação faz dessa técnica uma das mais utilizadas para a descontaminação de especiarias há décadas em vários países e a combinação com outras técnicas de conservação pode diminuir os possíveis efeitos adversos da irradiação sobre a qualidade dos produtos [63].

Atualmente, no Brasil, os produtos irradiados mais comercializados são basicamente os condimentos, sendo as doses estabelecidas pelo Instituto de Pesquisa Energéticas Nucleares (IPEN) da ordem de 8 a 30 kGy [64], destaca-se que a dose mínima absorvida deve ser suficiente para atingir o objetivo e a dose máxima deverá ser inferior a que comprometa as propriedades funcionais e sensoriais do produto alimentício [65].

De acordo com Polovka e Suhaj [66], a atividade antioxidante, teor de matéria seca e conteúdo total de compostos fenólicos de dez especiarias expostas a doses de radiação de até 30 kGy foram avaliados em diferentes intervalos de tempo por meio de espectrofotometria, indicando pequenas alterações no armazenamento subsequente [66]. A radiação gama combinada com oxigênio na embalagem resultou em efeitos desejáveis sobre a qualidade de especiarias variando nas contagens bacterianas, de leveduras e fungos, diminuindo para níveis indetectáveis após irradiação com 7 a 12 kGy, sobre alecrim, cominho, pimenta do reino e tomilho [67].

A irradiação ionizante tem sido apontada como uma tecnologia eficaz para a redução da carga microbiológica de produtos de origem vegetal [68]. Uma dose de 5 kGy pode diminuir

populações de *Escherichia coli* O157:H7 e *Salmonella typhimurium*, sem causar alteração de coloração de várias especiarias, demonstrando o potencial da irradiação como um processo não-térmico para a inativação de agentes patogênicos [69]. Lima [70] irradiou cominho e colorau e observou redução da contaminação de mesófilos à medida que foram aplicadas doses crescentes, sendo considerada satisfatória a dose de 8 kGy, a qual levou à redução significativa no número de microrganismos.

O processo de irradiação na pimenta vermelha (*Capsicum annum* L.) seca, demonstrou resultados satisfatórios para a dose de 10 kGy em relação ao tratamento com vapor para descontaminação microbiana, as quais não obtiveram alterações sensoriais [71]. Para a pimenta-do-reino inoculada com esporos de *Bacillus cereus* e bactérias aeróbias mesófilas, a tecnologia de irradiação reduziu a níveis não detectáveis estas bactérias a partir da aplicação da dose de 5 kGy, sendo considerada um método eficiente para redução da carga microbiológica e eliminação de bactérias esporuladas nesse tipo de produto [72].

Outra aplicação importante consiste na viabilidade do uso da farinha de resíduos de frutas irradiada como ingrediente alimentício. Farinhas de resíduos de frutas são produtos que possuem elevados teores de nutrientes, mas que são pouco explorados para o consumo [73]. Após o processo de irradiação de farinha de resíduos de frutase, apesar do ligeiro escurecimento observado, as doses de 2 e 3 kGy foram consideradas eficazes para a manutenção da qualidade microbiológica e características físico-químicas do produto, indicando outra possibilidade importante na área de irradiação de alimentos [73].

7 Efeitos nas Propriedades Nutricionais dos Alimentos

O processo de irradiação apresenta diversas vantagens na área agroindustrial, mas também pode afetar a qualidade de alimentos, dependendo da dose aplicada. As radiações ionizantes apresentam a propriedade de penetrar nos alimentos e os produtos formados a partir das interações com as radiações são denominados de produtos radiolíticos. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para estudar mais aspectos desses produtos e a relação com o alimento e os efeitos provocados [74]. Fellows [75], por exemplo, menciona em seu trabalho pequenas alterações nas propriedades organolépticas de alimentos embalados e congelados.

Do ponto de vista estrutural, cada nutriente do alimento responde de forma específica às radiações ionizantes. De forma geral, a proporção das interações primárias e secundárias ocorridas nos macros e micronutrientes dos alimentos é proporcional também à quantidade de água presente durante o processo de irradiação, em virtude da radiólise da água, cujos radicais livres instáveis e altamente reativos se combinam ou recombina para formar estruturas mais estáveis. Assim, o conteúdo de água e outros fatores como temperatura, pH, atmosfera, presença de substâncias radioprotetoras e sensibilizadoras, dentre outros, podem influenciar a interação da radiação com os constituintes do alimento e provocar alterações, sendo que as principais ocorrem em vitaminas e lipídios, e em menor proporção em carboidratos e proteínas [76, 80]. Os radicais radioinduzidos podem produzir componentes indesejáveis, destruir e alterar a funcionalidade de nutrientes essenciais por meio de reações de oxidação, polimerização, descarboxilação ou desidratação [81].

Doses elevadas podem propiciar a quebra do grupo sulfidril de aminoácidos, resultando em alterações no sabor e aroma nos alimentos. A produção de sulfeto de hidrogênio (H_2S) e de metilmercaptana ($-SCH_3$) provenientes da quebra da estrutura de aminoácidos como cisteína e metionina em alimentos irradiados pode comprometer o odor e sabor. Os carboidratos podem ser hidrolisados e oxidados a compostos mais simples, tornando-se

mais suscetíveis à hidrólise enzimática [78, 79]. Os monossacarídeos podem formar ácidos carboxílicos, os oligossacarídeos podem formar monossacarídeos e os polissacarídeos como amido, celulose ou glicogênio, podem formar unidades menores como glicose, maltose e dextrinas [78].

As proteínas menores podem sofrer radiólise, ocorrendo aumento de aminoácidos livres. Os aminoácidos sulfurados e aromáticos são mais sensíveis à irradiação do que os demais. As reações químicas ocasionadas nas proteínas dependem de diversos parâmetros, como por exemplo: a estrutura e estado da proteína, a composição, presença de outras substâncias e as próprias condições da irradiação (dose, temperatura e presença de oxigênio). Reações que ocorrem nas proteínas, quando irradiadas, podem incluir: desaminação, descarboxilação, quebra das ligações dissulfeto, oxidação dos grupos sulfidrilas, modificações das moléculas dos aminoácidos, quebra ou agregação das ligações peptídicas [79].

Nos lipídeos o efeito é semelhante ao da autoxidação, produzindo radicais livres que resultam em alterações desagradáveis no odor, não sendo indicada a irradiação com altas doses. As reações químicas resultantes da irradiação dos lipídeos são também dependentes de diversos fatores, como composição dos ácidos graxos, a presença de outras substâncias como antioxidantes, e se a fração lipídica se encontra no estado sólido ou líquido [77]. Além disso, estudos identificaram que elevadas doses de irradiação em alimentos ricos em lipídios podem acarretar na formação de compostos radiolíticos, pelo rompimento das cadeias de ácidos graxos, formando 2-ACBs (2- alquilciclobutanonas) [82]. Este composto tem sido associado com a genotoxicidade de células [83], mas ainda há poucas evidências para a comprovação dessa afirmação [82].

Além da redução da carga microbiana e do indesejável efeito sobre propriedades nutricionais dos alimentos, a radiação ionizante também pode exercer efeitos positivos sobre toxinas presentes nos produtos. A ocratoxina A (OTA), por exemplo, é uma das principais micotoxinas que pode ser encontrada nos alimentos, sendo sensível à irradiação em soluções aquosas, mas apresentando-se resistente em sua forma seca e em matrizes alimentares [84]. Em alimentos, doses de 30 kGy de radiação γ eliminaram no máximo 24 % da OTA [84]. Os efeitos da irradiação são específicos para cada produto, e estudos para cada tipo de alimento devem ser conduzidos. Por exemplo, a irradiação de frutas na Austrália, como manga, litchia, limão, tangerina, nectarina, pêsego e caqui, provoca poucas alterações nos teores de sólidos solúveis, pH, cor da polpa, vitamina C, ácidos orgânicos e açúcares [81]. Em diversas especiarias, a radiação gama pode aumentar a oxidação e alterar valores de cor [67]. Já o teor de óleo essencial de pimenta-do-reino não foi afetado, com doses de até 30 kGy, no estudo de Piggott e Othman [85]. Embora tenha reduzido a concentração de antioxidantes e conteúdo de compostos fenólicos totais de diversas especiarias [86, 89], foi demonstrado o aumento de compostos voláteis da noz-moscada com o processo de irradiação [90].

Em avelãs, doses de 0,5, 1 e 1,5 kGy de radiação γ reduziram os valores de vitamina E proporcionalmente à dose e aumentaram significativamente os valores de gordura total, refletindo nas análises sensoriais. As avelãs tratadas com 0,5 kGy apresentaram os menores valores de ácido graxo livre e peróxido, sendo a dose preliminarmente recomendada pelos autores [91].

Em amostras secas e fatiadas do cogumelo *Boletus edulis Bull*, o tratamento com radiação gama de até 10 kGy apresentou um efeito ligeiramente positivo na manutenção da maioria dos compostos bioativos e não foram observadas alterações graves em sua composição química. A exceção se deu com relação ao prolongado período de armazenamento de 12 meses, período o qual alterações relevantes foram detectadas, demonstrando que, além do efeito da radiação ionizante nas propriedades nutricionais dos alimentos, pode existir a

influência do tempo de armazenamento nas características do produto [92].

8 Possibilidades da Irradiação de Alimentos no Brasil

A conservação de alimentos, aumento da produtividade, redução de perdas e a segurança alimentar são constantes preocupações dos pesquisadores em todo o mundo [93]. A irradiação é uma alternativa viável para o aumento da vida útil e redução de agentes patogênicos de produtos de origem vegetal, utilizada isoladamente ou em combinação com outras técnicas de conservação e processamento de alimentos, podendo auxiliar na garantia da segurança alimentar e constituindo-se em uma ferramenta no combate contra o desperdício e a fome ao reduzir as perdas pós-colheita. A aplicação de radiação ionizante em alimentos é recomendada pela OMS e considerada segura para o consumidor [37], destacando que é imprescindível obedecer aos limites mínimos e máximos específicos para cada alimento e para cada finalidade pretendida para não prejudicar a qualidade nutricional e produzir compostos indesejáveis no processo [29].

De acordo com Kader [94], fatores como custos, aceitação dos consumidores e problemas logísticos podem limitar a utilização do processo de irradiação. Os consumidores apresentam dúvidas sobre a utilização de radiações no processamento de alimentos e desconfiam sobre a segurança da tecnologia para a saúde [95], sendo fundamental promover a educação da população para desmistificar equívocos e garantir a aceitação pública da técnica [96]. Em um trabalho recente, um questionário online foi aplicado a habitantes de Palmas-TO, Brasil, indicando que 57% dos participantes desconheciam sobre os alimentos irradiados e que 74% não sabia sobre o símbolo de alimentos irradiados no rótulo dos produtos, demonstrando ainda que a população precisa ser melhor informada e se conscientizar sobre o tema [97].

Para competir na exportação de frutas e hortaliças frescas é fundamental investir em tecnologias e em inovação para aceitação comercial e garantia de produtos de qualidade [98]. No comércio de alimentos irradiados, o crescimento do uso da tecnologia tem sido lento em países subdesenvolvidos [99]. Em face do volume de produção e exportação global, a China vem se destacando na aplicação de técnicas nucleares para garantir a qualidade e segurança dos alimentos [100]. No Brasil, por outro lado, a tecnologia de irradiação de alimentos ainda é subutilizada e necessita ser mais difundida, principalmente entre os consumidores para melhor aceitação, utilização e abrangência no território nacional [7].

Atualmente, os fatores limitantes da adoção da irradiação no Brasil são basicamente: o baixo número de instalações radioativas que realizam a irradiação de alimentos em escala comercial; ausência de uma definição clara por parte da indústria da necessidade da técnica e a desinformação dos consumidores; pouca mão-de-obra especializada e agentes de fiscalização na área; produção distribuída por grandes áreas, o que acaba dificultando a logística de armazenamento e transporte; a produção enviada para pequenos galpões de empacotamento locais, onde não há uma instalação que centralize a produção da região; o baixo valor das frutas e hortaliças em geral e o elevado custo inicial de investimento para instalação do centro de irradiação. Além disso, é fundamental a disponibilidade de métodos analíticos para detectar o uso do tratamento, atender aos requisitos legais e exigências de rotulagem para a regulamentação e aprovação de irradiação no setor alimentício [101].

9 Considerações Finais

Com a regulamentação de normas de irradiação de alimentos como processo fitossanitário no interesse do agronegócio no país considerado como celeiro do mundo, a demanda por produtos alimentícios irradiados poderá aumentar, surgindo a necessidade de implementação de instalações com irradiadores para essa finalidade [5]. Além da questão comercial, mais pesquisas devem ser realizadas, voltadas para os efeitos nos aspectos nutricionais e sensoriais dos alimentos, visando à determinação de limites de doses de radiação que garantam a qualidade e segurança nutricional para diferentes grupos de alimentos, a fim de tornar essa tecnologia cada vez mais eficiente, popular e segura para os consumidores.

Referências

- [1] FAO. *Food wastage footprint-Impacts on natural resources: summary report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013.
- [2] WHO. *World Bank (2011) World report on disability*. Malta: World Health Organization; 2012.
- [3] Thow, A.M., and Priyadarshi, S. Aid for Trade: an opportunity to increase fruit and vegetable supply. *Bulletin of the World Health Organization* 91(1) (2013), 57-63.
- [4] Bustos-Griffin, E., Hallman, G.J., and Griffin, R.L. Phytosanitary irradiation in ports of entry: a practical solution for developing countries. *International Journal of Food Science and Technology* 50 (2015), 249–255.
- [5] Perozzi, M. Irradiação: tecnologia boa para aumentar exportações de frutas. *Inovação Uniemp* 3(5) (2007), 42-44.[6] Hallman, G.J., and Loaharanu, P. Phytosanitary irradiation—Development and application. *Radiation Physics and Chemistry* 129 (2016), 39-45.
- [6] Modanez, L. *Aceitação de alimentos irradiados: Uma questão de educação*. Tese de Doutorado – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 105 p.; 2012.
- [7] Sommers, C.H., and Fan, X. *Food Irradiation, Research and Technology*. Blackwell Publishing Ltd, Ames, Iowa, 2006.
- [8] Calucci, L., Pinzono, C., Zandomenighi, M., Capocchi, A., Ghiringhelli, S., Saviozzi, F., Tozzi, S., and Galleschi, L. Effects of gama irradiation on the free radical and antioxidant contents in nine aromatic herbs and spices. *J Agric Food Chem* 51(4) (2003), 927-934.
- [9] Del Mastro, N.L. Development of Food Irradiation in Brazil. *Progress in Nuclear Energy* 35(3-4)(1999), 229-248.
- [10] Wiendl, F.M. Gamma radiation effects on *Zabrotes subfasciatus* (Bob.,1830). Nota Prévia. *Revista de Agricultura* 43(2) (1968), 68.

- [11] CE. Comunidade Européia. Directiva N° 1999/2/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de Fevereiro, relativa à aproximação das legislações dos Estados-Membros, respeitante aos alimentos e ingredientes alimentares tratados por radiação ionizante, 1999a.
- [12] CE. Comunidade Européia. Directiva N° 1999/3/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 22 de Fevereiro, relativa ao estabelecimento de uma lista comunitária de alimentos e ingredientes alimentares tratados por radiação ionizante, 1999b.
- [13] FDA. *Irradiation in the production, processing and handling of food*. Code of Federal Regulations, Section. (1991) 179: 26.
- [14] WHO. *Wholesomeness of Irradiated Food: (TRS 659)*. World Health Organization, Geneva, Switzerland, 1981.
- [15] WHO. *Inocuidade e idoneidade nutricional de alimentos irradiados*. Genebra, 172p, 1995.
- [16] CODEX ALIMENTARIUS. *General standard for irradiated foods*. Codex Stan 106-1983, Rev. 1-2003. Rome: Codex Alimentarius Commission, 2003a.
- [17] CODEX ALIMENTARIUS. *Recommended international code of practice for radiation processing of food*. CAC/RCP 19-1979, Rev. 1-2003. Rome: Codex Alimentarius Commission; 2003b.
- [18] United Fresh Fruit – Vegetable Association. *Food irradiation for the produce industry*. Alexandria, 11p, 1986.
- [19] BRASIL. Decreto n° 72.718, de 29 de agosto de 1973. *Normas gerais sobre irradiação de alimentos*. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 1973.
- [20] BRASIL. Portaria n° 9 de 08 de Março de 1985. *Regulamentação de procedimentos e doses de irradiação para produtos destinados à alimentação humana*. Brasília, DF: DINAL; 1985.
- [21] BRASIL. ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução n° 21, de 26 janeiro 2001. *Regulamento técnico para a irradiação de alimentos [do Ministério da Saúde]*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 29 jan. 2001 Seção 1, 35p, 2001.
- [22] BRASIL. MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Resolução n° 9, de 24 de fevereiro de 2011. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br>. Acesso em 13 de Julho de 2016.
- [23] Vicente, J., and Saldanha, T. Emprego da Técnica de Radiação Ionizante em Alimentos Industrializados. *Acta Tecnológica* 7(2) (2013), 49-54.
- [24] Hall, EJ. *Radiobiology for the Radiologist*. 4th Edition. Philadelphia, PA: JB Lippincott; 1994.
- [25] Tauhata, L., Salati, I., Di Prinzi, R., and Di Prinzi, A.R. *Radioproteção e dosimetria* (2003), 127.
- [26] Pino, E.S., and Giovedi, C. Radiação ionizante e suas aplicações na indústria. *Unilus Ensino e Pesquisa* 2(2) (2013), 47-52.

- [27] IAEA. *Facts about food irradiation*. Vienna, 38p, 1991.
- [28] Okuno, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia. *Estudos avançados* 27(77) (2013).
- [29] IAEA. *Radiation safety of gamma, electron and X ray irradiation facilities*. Specific Safety Guide n°8, IAEA, Vienna, 2010.
- [30] Venugopal, V. *Seafood processing: adding value through quick freezing, retortable packaging, cook-chilling, and other methods*. Boca Raton, FL: *CRC Press, Taylor & Francis group* (2005), 281.
- [31] Morrisson, R.M., and Roberts T. Cost variables for food irradiators in developing countries: food irradiation for developing countries in Africa. IAEA – TECDOC (1990), 576.
- [32] GCIIA. Grupo Consultivo Internacional sobre Irradiação de Alimentos. *A irradiação de alimentos: ficção ou realidade*. GCIIA/FAO/AIEA, 38p, 1991.
- [33] Araújo, M.J. *Fundamentos de agronegócios*. T ed. São Paulo: Atlas; 2005.
- [34] Vieites, R.L. *Conservação pós-colheita do tomate através do uso da radiação gama, cera e saco de polietileno, armazenados em condições de refrigeração e ambiente*. Tese de Livre Docência. Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 131p, 1998.
- [35] Crawford, L.M., and Ruff, E.H. A review of the safety of cold pasteurization through irradiation. *Food Control* 7 (1996), 87-97.
- [36] Farkas, J. Irradiation for better foods. *Trends in Food Sci & Technol* 17(4) (2006), 218-152.
- [37] Arthur, V. Controle de insetos pragas por radiações ionizantes. *Biol* 59(1) (1997), 77-79.
- [38] Fields, P.G., and White, N.D.G. Alternatives to methyl bromide treatments for stored-product and quarantine insects. *Annual Review of Entomology* 47 (2002), 331-359.
- [39] IFT. Institute of Food Technologists. Radiation preservation of foods. *Food Technology* 37(2) (1983), 55- 60.
- [40] Hawthorn, J. The wholesomeness of irradiated foods. *International Atomic Energy Agency* (1989), 29-46.
- [41] IAEA. *Standardized methods to verify absorbed dose in irradiated food for insect control*. Proceedings of a final research co-ordination meeting. Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, 2001.
- [42] Couey, H.M., and Chew, V. Confidence limits and sample size in quarantine research. *J Econ Entomol* 79 (1986), 887-890.
- [43] Hallman, G.J. Control stored product pests by ionizing radiation. *Journal Stored Products Research* 52 (2013), 36-41.

- [44] Eskin, M., and Robinson, D.S. Food shelf life stability: chemical, biochemical, and microbiological changes. CRC Press, 2000.
- [45] Diehl, J.F. Food irradiation: is it an alternative to chemical preservatives? *Food Additives and Contaminants* 9(5) (1992), 409-416.
- [46] Santin, M. *La irradiación de los alimentos*. Zaragoza: Acríbia, 2000.
- [47] Prado G. *Influência da irradiação gama (Co 60) na microbiota fúngica e na aflatoxina B1 em amendoim (Arachis hypogaea L.)*. Tese de Doutorado em Ciência dos Alimentos. Universidade Federal de Lavras, Lavras 180p, 2005.
- [48] Ordóñez Pereda, J.A., and Cambero Rodríguez, M.I. Tecnologia de alimentos. Porto Alegre: *Artmed* (2005), 125-144.
- [49] Chung, M.S., Ko, Y.T., and Kim, W.S. Survival of *Pseudomonas fluorescens* after Electrom Beam and Gamma Irradiation of Refrigerated Beef. *J Food Prot* 63(2) (2000), 162-166.
- [50] Bhide, M.R., Paturkar, A.M., Sherikar, A.T., and Waskar, V.S. Presensitization of microorganisms by acid treatments to low dose gamma irradiation with special reference to *Bacillus cereus*. *Meat Sci* 58(3) (2002), 253-258.
- [51] Chirinos, R.R.O., Vizeu, D.M., Destro, M.T., Franco, B.D.G.M., and Landgraf, M. Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 in hamburger by gamma irradiation. *Braz J Microbiol* 33 (2002), 53-56.
- [52] Farag, R.S., Rashed, M.M., Hussein, A.A., and Abo-Hagar, A. Effect of gamma radiation on the infected yellow corn and peanuts by *Aspergillus flavus*. *Chemie, Mikrobiologie, Technologie der Lebensmittel* 17(3) (1995), 93-98.
- [53] Diehl, JF. Preservation of food. *Radiation Physics and Chemistry* 9(1) (1977), 193-206.
- [54] Kwon, J.H., Byrun, M.W., and Cho, H.O. Effects of gamma irradiation dose and timing of treatment after harvest on the storability of garlic bulbs. *Journal of Food Science* 50 (1985), 379-381.
- [55] Matin, M.A., Bhuiya, A.D., Amin, M.R., Malek, M.A et al. *Irradiation of onions, pulses and dried fish: process control, storage, test marketing and economic analysis of the process*. IAEA 3/4 Tec Doc 871, Vienna, Áustria (1996), 19-49.
- [56] Matsuyama, A., and Umeda, K. Sprout inhibition in tubers and bulbs. *Preservation of food by ionizing radiation* 3 (1983), 159-213.
- [57] Ventura, D., Rufino, J., Nunes, C., and Mendes, N. *Utilização da irradiação no tratamento de alimentos*. Escola Superior Agrária de Coimbra, 31p, 2010.
- [58] Moy, J.H. *Low dose irradiation of food prospects and problems*. In: Maguer M. le.; Jelen P., ed. Food engineering and process applications. Vol.1. transport phenomena. Essex: Elsevier Applied Science Publishers, 623-633p, 1986.
- [59] Singh, S.P., and Pal, R.K. Ionizing radiation treatment to improve postharvest life and maintain quality of fresh guava fruit. *Radiation Physics and Chemistry* 78(2) (2009), 135-140.

- [60] Chervin, C., and Boisseau, P. Quality Maintenance of “Ready to eat” Shredded Carrots by Gamma Irradiation. *Journal of Food Science* 59(2) (1994), 359-361.
- [61] Ungar, M.L., Germano, M.I.S., and Germano, P.M.L. Riscos e consequências de manipulação de alimentos para a saúde pública. *Hig Alim* 6 (1992), 14-17.
- [62] Farkas, J. Irradiation as a method for decontamination food. A review. *Intl J Food Microbiol* 44 (1998), 189-204.
- [63] Silva, A.L.F., and Roza, C.R. Uso da irradiação de alimentos: revisão. *Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos* 28(1) (2010), 49-56.
- [64] Chmielewski, A.G., and Migdal, W. Radiation decontamination of herbs and spices. *Nukleonika* 50 (2005), 179-184.
- [65] Evangelista, J. *Tecnologia de alimentos*. São Paulo: Atheneu, 2008.
- [66] Polovka, M., and Suhaj, M. Classification and prediction of gamma-irradiation of ten commercial herbs and spices by multivariate evaluation of properties of their extracts. *Journal of Food and Nutrition Research* 52(1) (2013), 45–60.
- [67] Kirkin, C., Mitrevski, B., Gunes, G., and Marriott, P.J. Combined effects of gamma-irradiation and modified atmosphere packaging on quality of some spices. *Food Chemistry* 154 (2014), 255-261.
- [68] Pinela, J., and Ferreira, I.C.F.R. Nonthermal physical technologies to decontaminate and extend the shelf-life of fruits and vegetables: Trends aiming at quality and safety. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 57 (2017), 2095-2111.
- [69] Song, W.J., Sung, H.J., Kim, S.Y., Kim, K.P., Ryu, S., and Kang, D.H. Inactivation of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella typhimurium in black pepper and red pepper by gamma irradiation. *International Journal of Food Microbiology* 172 (2014), 125-129.
- [70] Lima, I.S.M. *Aspectos microbiológicos pré e pós-irradiação de amostras de colorau e cominho comercializadas nas feiras livres do Recife*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em tecnologias energéticas e nucleares da Universidade Federal de Pernambuco, 67p; 2013.
- [71] Rico, W.C., Kim, G.R., Ahn, J.J., Kim, H.K., Furuta, M., and Kwon, J.H. The comparative effect of steaming and irradiation on the physicochemical and microbiological properties of dried red pepper (*Capsicum annum L.*). *Food Chemistry* 119 (2010), 1012-1016.
- [72] Froehlich, A., Villavicencio, A.L.C., Azeredo, R.M., and Vanetti, M.C.D. Efeitos da radiação gama sobre esporos de *Bacillus cereus* inoculados em pimenta-do-reino. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maria_Vanetti/publication/267840739_EFEITOS_DA_RADIO_GAMA_SOBRE_ESPOROS_DE_Bacillus.cereus_INOCULADOS_EM_DO-REINO/links/5601c37208aeb0ce881af39.pdf. Acesso em: 20 de setembro de 2016; 2014.

- [73] Aranha, J.B., Negri, T.C., Martin, J.G.P., and Spoto, M.H.F. Efeito da radiação gama nos parâmetros microbiológicos, físico-químicos e compostos fenólicos de farinha de resíduos de frutas durante armazenamento. *Braz. J. Food Technol* 20 (2017), e2016123.
- [74] Mancini-Filho, J. *Efeito das radiações gama sobre algumas características físico-químicas e nutricionais de feijões (Phaseolus vulgaris L.) armazenados*. Tese de Livre Docência. Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, SP, 100p, 1990.
- [75] Fellows PJ. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática. *Porto Alegre: Artmed* (2006), 602.
- [76] Bosch, A.V. La irradiación de los alimentos. *Segur Nucl* 35 (2005), 2-12.
- [77] Nawar, W.W. *Comparison of chemical consequences of heat and irradiation treatments of lipids*. In: Elias, P.S., and Cohen, A., ed. Recent advances in food irradiation. (1983), 115-128.
- [78] Adam, S. *Recent development in radiation chemistry of carbohydrates*. In: Elias, P.S., and Cohen, A., ed. Recent advances in food irradiation. 1983; 149-170.
- [79] Delincée, H. *Recent advances in radiation chemistry of proteins*. In: Elias, P.S., and Cohen, A., ed. Recent advances in food irradiation. 1983; 129-148.
- [80] Mitchell, G.E., McLauchlan, R.L., Isaacs, A.R., Williams, D.J., and Nottingham, S.M. Effect of low dose irradiation on composition of tropical fruits and vegetables. *J Food Compos Anal* 5 (1992), 291–311.
- [81] Diehl, J.F. *Safety of irradiated foods*. New York, N.Y: Marcel Dekker (1990), 95–199.
- [82] Song, B.S., Choi, S.J., Jin, Y.B., Park, J.H., Kim, J.K., Byun, E.B., et al. A critical review on toxicological safety of 2- alkylcyclobutanones. *Radiat Phys Chem* 103 (2014), 188-193.
- [83] Delincée, H., and Pool-Zobel, B.L. Genotoxic properties of 2 dodecylcyclobutanone, a compound formed on irradiation of food containing fat. *Radiat Phys Chem* 52 (1998), 39-42.
- [84] Calado, T., Fernández-Cruz, M.L., Verde, S.C., Venâncio, A., and Abrunhosa, L. Gamma irradiation effects on ochratoxin A: Degradation, cytotoxicity and application in food. *Food Chemistry* 240 (2018) 463-471.
- [85] Piggott, J.R., and Othman Z. Effect of irradiation on volatile oils of black pepper. *Food Chemistry* 46(2) (1993), 115-119.
- [86] Suhaj, M., Ráková, J., Polovka, M., Brezová, V. Effect of γ -irradiation on antioxidant activity of black pepper (*Piper nigrum L.*) *Food Chemistry* 97(4). (2006), 696–704.
- [87] Perez, M.B., Calderon, N.L., and Croci, C.A. Radiation-induced enhancement of antioxidant activity in extracts of rosemary (*Rosmarinus officinalis L.*). *Food Chemistry* 104(2) (2007), 585–592.

- [88] Kim, J.H., Shin, M.H., Hwang, Y.J., Srinivasan, P., Kim, J.K., Park, H.J et al. Role of gamma irradiation on the natural antioxidants in cumin seeds. *Radiation Physics and Chemistry* 78(2) (2009), 153–157.
- [89] Gumus, T., Albayrak, S., Sagdic, O., and Arici, M. Effect of gamma irradiation on total phenolic contents and antioxidant activities of *Satureja hortensis*, *Thymus vulgaris*, and *Thymbra spicata* from Turkey. *International Journal of Food Properties* 14(4) (2011), 830–839.
- [90] Duarte, R.C. *Estudo dos compostos bioativos em especiarias (Syzygium aromaticum L, Cinnamomum zeylanicum Blume e Myristica fragans Houtt) processadas por radiação ionizante*. Tese de Doutorado do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares da Universidade de Paulo, São Paulo, 145p, 2014.
- [91] Güler, S.K., Bostan, S.Z., and Çon, A.H. Effects of gamma irradiation on chemical and sensory characteristics of natural hazelnut kernels. *Postharvest Biology and Technology* 123 (2017), 12-21.
- [92] Fernandes, Â., Barreira, J.C., Günaydi, T., Alkan, H., Antonio, A.L., Oliveira, M.B.P., Martins A., and Ferreira, I.C. Effect of gamma irradiation and extended storage on selected chemical constituents and antioxidant activities of sliced mushroom. *Food Control* 72 (2017), 328-337.
- [93] Leonardi, J.G., Azevedo, B.M. Métodos de conservação de alimentos. *Revista Saúde em Foco* 10(1) (2018), 51-61.
- [94] Kader, A.A. Potential applications of ionizing radiation in postharvest handling of fresh fruits and vegetables. *Food Technol* 40(6) (1986), 117-121.
- [95] Behrens, J.H., Barcellos, M.N., Frewer, L.J., Nunes, T.P., and Landgraf, M. Brazilian consumer views on food irradiation. *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 10(3) (2009), 383-389.
- [96] Levy, D.S., Sordi, G.M.A.A., and Villavicencio, A.L.C.H. Construindo pontes entre ciência e sociedade: divulgação científica sobre irradiação de alimentos. *Brazilian Journal of Radiation Sciences* 6(1) (2018), 1-13.
- [97] da Silva Soares, C.M., Carvalho, L.M.C., dos Santos Oliveira, M.O., da Silva Roque, S.A. L., Zuninga, A.D.G., and Lopes, R.B.S. Perfil e conhecimento dos consumidores de Palmas-TO frente à alimentos irradiados. *Desafios* 5(2) (2018), 3-7.
- [98] Hallman, G.J. Process control in phytosanitary irradiation of fresh fruits and vegetables as a model for other phytosanitary treatment processes. *Food Control* 72 (2017), 372-377.
- [99] Ihsanullah, I., and Rashid, A. Current activities in food irradiation as a sanitary and phytosanitary treatment in the Asia and the Pacific Region and a comparison with advanced countries. *Food Control* 72 (2017), 345-359.
- [100] Chen, T., Chen, G., Yang, S., Zhao, Y., Ha, Y., and Ye, Z. Recent developments in the application of nuclear technology in agro-food quality and safety control in China. *Food Control* 72 (2017), 306-312.

LORO, A. C. et al.

- [101] Zanardi, E., Caligiani, A., and Novelli, E. New Insights to Detect Irradiated Food: an Overview. *Food Analytical Methods* 11(1) (2018), 224-235.