

Aplicação de filmes biodegradáveis produzidos a partir de concentrado proteico de soro de leite irradiado¹

Ana Paula Stort Fernandes², Juliana Braga Costa²,
Dayana Silva Batista Soares³, Celso José de Moura², Adriana Régia Marques de Souza²

ABSTRACT

Application of biodegradable films produced from irradiated whey protein concentrate

Biodegradable films from whey proteins have a great potential for application on packaging, due to their excellent mechanical and optical properties. However, some processes, such as the use of gamma radiation, can affect the physical, mechanical and color properties of films produced from these proteins. This study aimed to produce biodegradable films from irradiated whey protein concentrate (50 kGy) and evaluate their efficiency for packaging apple. The use of films prepared with irradiated whey proteins was not a good barrier to moisture loss, when subjected to a temperature of 25 °C and relative humidity of 55 %, but it is a great alternative for color preservation, slowing the browning of apples after cutting.

KEY-WORDS: Packaging; protein; radiation.

RESUMO

Filmes biodegradáveis à base de proteínas de soro de leite apresentam grande potencial para aplicação como embalagens, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e ópticas. Contudo, alguns processos, como a aplicação de radiação gama, podem afetar as propriedades físicas, mecânicas e cor dos filmes produzidos a partir dessas proteínas. Objetivou-se, com este estudo, produzir filmes biodegradáveis a partir de concentrado proteico de soro de leite irradiado (50 kGy) e avaliar a sua eficiência como embalagem para maçã. A aplicação de filmes elaborados com proteínas de soro de leite irradiadas não se apresentou como uma boa barreira à perda de umidade, quando submetidos à temperatura de 25 °C e umidade relativa de 55 %, porém, é uma ótima alternativa para a preservação da cor, retardando o escurecimento da maçã após o corte.

PALAVRAS-CHAVE: Embalagem; proteína; radiação.

INTRODUÇÃO

As indústrias de alimentos e de embalagens têm buscado diminuir o impacto ambiental causado pela deposição de materiais de embalagem no meio ambiente. Existe a necessidade de se reduzir o acúmulo de resíduos sólidos não biodegradáveis, devido aos distúrbios ecológicos e às questões sociais geradas (Colla 2004).

Dessa forma, o desenvolvimento de material biodegradável para embalagem é uma abordagem utilizada na tentativa de reduzir o impacto ambiental provocado pela degradação lenta das embalagens de polímeros sintéticos.

Os materiais biodegradáveis são considerados não tóxicos e têm sido utilizados para preparar filmes biodegradáveis e revestimentos destinados à conservação e proteção de alimentos (Kim et al. 2008, Shi

et al. 2008, Campos et al. 2011, Mattei et al. 2013, Machado et al. 2014, Pachekoski et al. 2014).

Os filmes biodegradáveis podem ser aplicados diretamente à superfície de alimentos ou como filmes, possuindo estrutura própria e independente. Na conservação de alimentos, agem como uma barreira a elementos externos, como sujidades, gases, umidade e compostos aromáticos, controlando a transferência de massa (umidade, oxigênio, dióxido de carbono, lipídio). Esses filmes atuam, também, como veículo para aditivos e, assim, podem enriquecer, proteger e aumentar a vida de prateleira dos alimentos (Hershko & Nussinovitch 1998, Prates 2010).

Para a produção de filmes biodegradáveis são necessários, basicamente, solvente, plastificante e agente formador de filme. Dentre os agentes formadores de filme, as proteínas do soro de leite são utilizadas e, quando obtidas de forma adequada, pro-

1. Trabalho recebido em jul./2014 e aceito para publicação em mai./2015 (<http://dx.doi.org/10.1590/1983-40632015v4530844>).

2. Universidade Federal de Goiás (UFG), Escola de Agronomia, Setor de Tecnologia de Alimentos, Goiânia, Goiás, Brasil.

E-mails: ana.stort@gmail.com, juliana.engalimentos@gmail.com, celsojose@gmail.com, drilavras@yahoo.com.br.

3. Instituto Federal Goiano (IF Goiano), Câmpus Morrinhos, Morrinhos, Goiás, Brasil. *E-mail:* dayana.soares@ifgoiano.edu.br.

duzem filmes flexíveis, transparentes e sem odores (Soares 2012). Suas proteínas possuem propriedades funcionais importantes e de alto valor nutricional, sendo excelente fonte de aminoácidos essenciais (Gennadios et al. 1994, Pagno et al. 2009).

Os filmes biodegradáveis podem ser utilizados como complemento à embalagem sintética, prolongando a vida de prateleira e garantindo maior qualidade ao produto final, além de apresentar potencial econômico, pois sua matéria-prima é de baixo custo (Yoshida & Antunes 2009).

Materiais poliméricos estão sujeitos à ação de diversos agentes que provocam alterações em sua estrutura. Alguns processos, como a aplicação de radiação gama, podem afetar as propriedades físicas, mecânicas e a cor dos filmes produzidos a partir da proteína de soro de leite.

Estudos mostram que o emprego da irradiação é um método efetivo no aperfeiçoamento da coesão e reticulação de filmes proteicos, diminuindo a permeabilidade ao vapor d'água e melhorando suas propriedades mecânicas (Brault et al. 1997, Lacroix et al. 1998, Mezgheni et al. 1998, Soares 2012). Sabato et al. (2001) observaram que o tratamento com irradiação gama aumenta as propriedades mecânicas e diminui a permeabilidade ao vapor d'água de filmes de isolado proteico de soro de leite e de soja.

As principais vantagens do processo de irradiação gama, com a finalidade de melhorar as propriedades dos filmes, quando comparado aos métodos físicos e enzimáticos, são o menor custo e a formação de filmes insolúveis e estéreis.

O presente estudo objetivou produzir filmes biodegradáveis a partir de concentrado proteico de soro de leite irradiado, bem como avaliar a eficiência da aplicação desses filmes como embalagem para maçãs.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nos laboratórios do Setor de Tecnologia de Alimentos da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG), em Goiânia (GO), durante o primeiro semestre de 2013.

O concentrado proteico de soro de leite comercial (Lacprodan 80, com teor de proteínas de 72,22 % e umidade relativa de 3 %) foi doado pela empresa argentina Arla Foods Ingredients S. A.

A irradiação do concentrado proteico foi realizada utilizando-se irradiador Gamacell 220 (Nordion,

Ottawa, Canadá), com fonte de ^{60}Co , no Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares (IPEN), em São Paulo (SP).

Foram produzidos filmes com o concentrado proteico irradiado na dose de 50 kGy e filmes com concentrado proteico que não passou pelo processo de irradiação (0 kGy - controle). Os filmes foram produzidos pelo método de *casting* (Soares 2012). A solução filmogênica foi produzida contendo 5 % de proteínas, 3,75 % de glicerol e 91,25 % de água destilada, havendo a completa solubilização das proteínas na água para posterior adição do glicerol. Em seguida, a solução foi aquecida em banho-maria (Marconi - MA 039, Piracicaba, Brasil) a 90 °C, por 30 minutos, sob agitação moderada, e resfriada em banho de gelo até atingir 25 °C. Aliquotas de 65 g da solução filmogênica foram dispersas em placas de vidro (22 cm x 22 cm) encapadas com plástico adesivo. A solução foi seca em estufa com circulação e renovação de ar (Tecnal - TE 394/3, Piracicaba, Brasil) a 40 °C, por 18 horas.

Os sistemas de embalagem estudados foram potes plásticos de polipropileno de 8,0 cm de diâmetro, contendo um pedaço de maçã, fechados com filmes proteicos de soro de leite com ou sem tratamento de irradiação. Maçãs argentinas com casca foram lavadas e higienizadas, cortadas nos eixos principal e secundário, gerando 4 partes de dimensões de 4,0 cm de diâmetro e 1,5 cm de espessura, aproximadamente. Após o corte, essas maçãs foram branqueadas (100 °C, por 3 minutos) e imediatamente colocadas nos potes plásticos, que foram fechados com os filmes proteicos de soro de leite, utilizando-se cola de silicone (Yoshida & Antunes 2009). As embalagens foram armazenadas à temperatura de 25 °C e 55 % de umidade relativa, em incubadoras BOD (TECNAL, Mod. TE-390), por 9 dias.

Neste estudo, não houve preocupação em se determinarem condições de armazenamento para a vida de prateleira de maçãs em pedaços, sendo que a escolha desse produto foi baseada na sua rápida deterioração, o que permitiu a avaliação dos filmes em relação à cor, barreira à umidade e solubilidade em água, mantendo sua integridade durante o tempo de armazenamento. No experimento, não utilizou-se um controle para as maçãs sem filme, pois o objetivo foi comparar parâmetros relacionados ao modo de atuação de filmes sem irradiação e filmes tratados com irradiação, quando acondicionados como embalagem para maçãs.

As medidas de espessura dos filmes foram efetuadas utilizando-se um micrômetro com sensibilidade de 0,001 mm (Modelo Insize, 3210-25, China), sendo obtidas por meio da média dos valores de seis pontos aleatórios, em diferentes segmentos do filme.

A cor final dos filmes e das maçãs foi medida em colorímetro (ColorquestII, Hunter Associates Laboratory Inc., Virginia, EUA), operando no sistema CIE (L^* , a^* e b^*). Os valores de L^* (luminosidade), a^* (intensidade da cor verde a vermelho), b^* (intensidade da cor amarela a azul) e a opacidade foram obtidos depois da calibração do equipamento (padrão branco e preto), utilizando-se o programa Universal v 3.6 (Hunter Lab, EUA). Também foram calculados o índice croma (C^*), considerado o atributo quantitativo de cor, e hue (h^*), em radianos, considerado o atributo qualitativo de cor.

Tanto a umidade dos filmes quanto a das maçãs foi determinada em estufa (Olidex - EES1B, Ribeirão Preto, Brasil), à temperatura de 110 °C, por 24 horas (AOAC 1997).

A solubilidade em água dos filmes empregados no sistema de embalagem foi determinada por meio de secagem em estufa, a 105 °C, por 24 horas, para determinação da matéria seca inicial. Após a primeira pesagem, foram imersos em 50 mL de água destilada e agitados lentamente por 24 horas (25 °C), em homogeneizador de soluções (Phoenix - AP 32 - 09076, Araraquara, Brasil). As amostras foram removidas e secas em estufa a 105 °C, por 24 horas, para determinar a massa de matéria seca que não se dissolveu em água. O percentual de solubilidade dos filmes foi determinado como porcentagem de matéria seca solubilizada (Gontard et al. 1994).

A análise estatística dos dados foi feita por meio do pacote Statistica 7.0 (Statsoft 2004), para obtenção das médias, desvio padrão, coeficiente de variação e análise de variância (Anova), seguida de teste Tukey ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A espessura média dos filmes irradiado e controle foi de $0,119 \pm 0,027$ mm. Essa variação é decorrente do processo *casting*, em que os filmes são secos em suportes (Monterrey-Quintero 1998, Sobral 2000a, Mali 2002). A cor das maçãs é facilmente afetada por escurecimento enzimático provocado pela ação da enzima polifenoloxidase, que age somente na

presença de oxigênio, oxidando compostos fenólicos. Cano et al. (1995) afirmam que é considerada uma das principais enzimas responsáveis pela deterioração da qualidade em muitos frutos.

O controle da atividade da polifenoloxidase é de grande importância para a tecnologia de alimentos, uma vez que é responsável pelo escurecimento em frutas e vegetais e seus produtos processados (Vamos-Vigyazo 1981, Prabha & Patwardhan 1986, Clemente & Pastore 1998). Os filmes biodegradáveis tendem a impedir a ação dessa enzima, pois agem como uma barreira a elementos externos (umidade, óleos, gases), protegendo o alimento e aumentando sua vida de prateleira.

Os resultados dos parâmetros de cor obtidos para as polpas das maçãs acondicionadas em potes de polipropileno fechadas com o filme gerado a partir de concentrado proteico com e sem tratamento de irradiação, no decorrer de nove dias, são apresentados na Tabela 1. O índice de luminosidade L^* das maçãs diminuiu com o decorrer dos dias de armazenamento, diferindo, de forma significativa ($p < 0,05$), para os filmes com e sem aplicação de radiação, indicando que as frutas tenderam a escurecer nos dois sistemas.

As maçãs acondicionadas em filmes irradiados a 50 kGy apresentaram maiores índices de luminosidade L^* , ou seja, mantiveram-se mais claras, podendo servir como parâmetro de decisão do consumidor. A investigação sobre a cor dos alimentos e suas embalagens, a sua química e os fatores que podem alterá-las tem sido utilizada como ferramenta para determinar alguns atributos de qualidade, como aceitação, cor visual e aparência.

Os valores de croma a^* , b^* e C^* e ângulo h^* aumentaram significativamente ($p < 0,05$), com o decorrer do tempo de armazenamento. O índice de croma a^* representa a mudança da cor de verde para o vermelho, sendo que este parâmetro está relacionado com o escurecimento enzimático que ocorre em maçãs. De acordo com Baldwin et al. (1996), quanto maior o valor de croma a^* , maior o escurecimento das amostras, e essa mudança de cor evidencia a ação da polifenoloxidase, o que resulta não somente na redução da qualidade visual, como, também, em alterações de aroma e perda de nutrientes (McHugh & Senesi 2000). Yoshida & Antunes (2009) obtiveram resultados semelhantes para luminosidade L^* e valores de croma a^* , e concluíram que as embalagens proteicas de soro de leite atuaram como uma barreira moderada ao oxigênio.

Tabela 1. Parâmetros de cor de polpas de maçãs acondicionadas sob filmes sem tratamento (0 kGy) e filmes irradiados (50 kGy), segundo o período de armazenamento (Goiânia, GO, 2013).

Parâmetro	Filme	Tempo			
	Dose	0 dias	3 dias	6 dias	9 dias
L*	0 kGy	87,33 ± 0,03 ^{a**A**}	86,42 ± 0,02 ^{ab}	69,95 ± 0,01 ^{bc}	64,91 ± 0,03 ^{bd}
	50 kGy	87,39 ± 0,01 ^{aA}	84,94 ± 0,04 ^{bB}	77,43 ± 0,04 ^{aC}	72,79 ± 0,03 ^{aD}
a*	0 kGy	0,65 ± 0,01 ^{aD}	1,29 ± 0,02 ^{aC}	7,11 ± 0,03 ^{AB}	8,75 ± 0,06 ^{AA}
	50 kGy	0,63 ± 0,01 ^{bD}	1,27 ± 0,01 ^{aC}	5,04 ± 0,02 ^{bB}	5,93 ± 0,02 ^{bA}
b*	0 kGy	5,16 ± 0,02 ^{aD}	11,36 ± 0,10 ^{aC}	21,53 ± 0,04 ^{bB}	24,54 ± 0,04 ^{aA}
	50 kGy	5,09 ± 0,03 ^{bD}	11,33 ± 0,07 ^{aC}	22,33 ± 0,01 ^{aB}	24,17 ± 0,06 ^{bA}
C*	0 kGy	5,19 ± 0,02 ^{aD}	11,43 ± 0,01 ^{aC}	22,67 ± 0,04 ^{bB}	26,05 ± 0,04 ^{aA}
	50 kGy	5,13 ± 0,03 ^{bD}	11,40 ± 0,04 ^{aC}	22,89 ± 0,01 ^{aB}	24,88 ± 0,05 ^{bA}
h*	0 kGy	82,90 ± 0,04 ^{aB}	83,52 ± 0,09 ^{aA}	71,72 ± 0,04 ^{bc}	70,37 ± 0,13 ^{bd}
	50 kGy	82,78 ± 0,09 ^{aB}	83,59 ± 0,04 ^{aA}	77,28 ± 0,05 ^{aC}	76,21 ± 0,07 ^{aD}

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as doses de radiação, em um mesmo dia. ** Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os dias, para a mesma dose.

O processo de irradiação não proporcionou melhorias para o filme, em relação à barreira ao oxigênio e passagem de luz, e, conseqüentemente, não conseguiu retardar a ação da enzima polifenoxidase.

Os valores de croma b^* das frutas aumentaram significativamente ($p < 0,05$), no decorrer de nove dias, tanto para as maçãs acondicionadas em filmes não irradiados quanto nos filmes irradiados, indicando que elas adquiriram uma coloração mais amarelada, no decorrer dos dias de armazenamento.

O índice croma C^* é a parte da cor em que não há participação da luminosidade, representada no espaço bidimensional. O objeto é considerado transparente quando a luz incidente o atravessa com o mínimo de absorção e reflexão (Ferreira 1991). Com isso, à medida que os índices de luminosidade L^* diminuem, durante o período de estocagem, os valores de croma C^* aumentam (Tabela 1).

Os valores de croma C^* das maçãs aumentaram significativamente ($p < 0,05$), no decorrer dos nove dias de armazenamento, para os dois tipos de filme. Quanto menor o valor do croma C^* , menos clara será a diferenciação entre as tonalidades. Assim, o aumento nos valores de croma C^* indica uma tendência de a coloração se tornar mais homogênea (Bassetto et al. 2005, Muskovics et al. 2006, Hernández et al. 2007).

As propriedades ópticas dos filmes são relevantes para embalagens, pois influenciam, principalmente, na apresentação do produto embalado e estão relacionadas à cor, brilho e transparência desses filmes. Na área de alimentos, muitas vezes, é desejável uma embalagem transparente, que permita

a visualização da qualidade do produto. O aspecto visual (Tabela 2) dos filmes proteicos foi medido por meio da variação de cor e opacidade dos mesmos. Todos os filmes apresentaram elevados valores de luminosidade ($L^* > 85,01$), evidenciando a cor clara dos mesmos, e é possível observar um decréscimo desses valores, com o passar dos dias. Segundo Vicentini (2003), a luminosidade (L^*) representa a terceira dimensão da cor, sendo a qualidade pela qual se distingue uma cor clara de uma escura.

Os valores de a^* próximos de zero (Tabela 2) mostram que os filmes não tendem às cores verde e vermelha. Com o passar dos dias, houve aumento nos valores de b^* e C^* , explicado pelo envelhecimento do filme e pela reação de Maillard, promovida pela irradiação (Oh et al. 2005, Chawla et al. 2009).

No processo de irradiação, ocorre a degradação de açúcares e, durante essa degradação, há formação de compostos que absorvem a energia emitida, gerando compostos de coloração marrom. Esse processo é conhecido como reação de Maillard (Hodge 1953).

Os valores de croma b^* dos filmes biodegradáveis aumentaram significativamente ($p < 0,05$), no decorrer de nove dias, indicando que eles adquiriram uma coloração mais amarelada, com o passar do tempo. Os valores de croma C^* aumentaram significativamente ($p < 0,05$) para os dois tipos de filme, caracterizando que o aumento da intensidade de sua cor está relacionado com o seu tempo de armazenamento, e não com o processo de irradiação.

O filme produzido com a proteína tratada por irradiação (50 kGy) apresentou maior intensidade de cor amarela. Tal resultado é semelhante ao encontrado

Tabela 2. Cor dos filmes sem tratamento (0 kGy) e filmes tratados por irradiação (50 kGy), segundo o tempo de armazenamento (Goiânia, GO, 2013).

Parâmetro	Filme	Tempo			
	Dose	0 dias	3 dias	6 dias	9 dias
L*	0 kGy	88,95 ± 0,05 ^{a*A**}	88,82 ± 0,60 ^{aA}	86,27 ± 0,35 ^{bB}	85,01 ± 0,10 ^{aC}
	50 kGy	88,72 ± 0,10 ^{bA}	88,53 ± 0,12 ^{aAB}	87,76 ± 0,42 ^{aB}	85,41 ± 0,57 ^{aC}
a*	0 kGy	-0,31 ± 0,10 ^{aAB}	-0,11 ± 0,00 ^{bA}	-0,33 ± 0,17 ^{aAB}	-0,39 ± 0,09 ^{aB}
	50 kGy	-0,27 ± 0,01 ^{aA}	-0,12 ± 0,00 ^{aA}	-0,20 ± 0,12 ^{aA}	-0,78 ± 0,06 ^{bB}
b*	0 kGy	10,56 ± 0,39 ^{aC}	10,02 ± 0,04 ^{bC}	14,93 ± 0,84 ^{aB}	19,63 ± 0,14 ^{bA}
	50 kGy	10,62 ± 0,24 ^{aC}	10,65 ± 0,18 ^{aC}	14,95 ± 0,60 ^{aB}	20,79 ± 0,24 ^{aA}
C*	0 kGy	10,56 ± 0,38 ^{aC}	10,02 ± 0,04 ^{bC}	14,93 ± 0,84 ^{aB}	19,64 ± 0,14 ^{bA}
	50 kGy	10,62 ± 0,21 ^{aC}	10,65 ± 0,18 ^{aC}	14,95 ± 0,60 ^{aB}	20,80 ± 0,23 ^{aA}
h*	0 kGy	88,28 ± 0,60 ^{aA}	89,37 ± 0,00 ^{aA}	88,74 ± 0,64 ^{aA}	86,86 ± 0,25 ^{bA}
	50 kGy	88,54 ± 0,08 ^{aB}	89,38 ± 0,01 ^{aA}	88,97 ± 0,44 ^{aA}	87,85 ± 0,17 ^{aC}
Opacidade	0 kGy	18,09 ± 0,23 ^{aA}	18,15 ± 0,39 ^{aA}	18,69 ± 0,06 ^{aB}	19,07 ± 0,42 ^{aB}
	50 kGy	18,16 ± 0,08 ^{aA}	18,30 ± 0,57 ^{aA}	18,54 ± 0,18 ^{aA}	18,35 ± 0,20 ^{bA}

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as doses de radiação, em um mesmo dia. ** Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os dias, para a mesma dose.

por Soares (2012), ao observar que diferentes doses de radiação aplicadas aos filmes influenciavam na cor final dos mesmos, sendo que os atributos de cor se intensificavam com o aumento da dose aplicada.

Mesmo havendo diferença estatística entre os parâmetros de cor avaliados, a diferença é tão pequena que não será detectada pelo consumidor.

A opacidade é uma propriedade de grande importância na aplicação de filmes como embalagem alimentícia (Yoshida 2002). Entretanto, os diferentes tratamentos não indicaram diferenças acentuadas nesses valores (Tabela 2).

Para a elaboração de filmes biodegradáveis que visam a ser utilizados como embalagens, ou ainda como coberturas para alimentos, uma maior transparência tende a ser melhor (Gontard et al. 1994, Yang & Paulson 2000), quando se deseja manter as características originais do produto, como a cor.

Zavareze et al. (2012), em estudo com filmes biodegradáveis produzidos à base de proteínas miofibrilares de pescado, obtiveram valores de opacidade

entre 12,0 e 13,5, em que a porcentagem de proteína utilizada para produzir os filmes afetava diretamente a opacidade. Segundo Sobral (2000b), outro fator que afeta a opacidade dos filmes é a espessura, devido ao aumento superficial da concentração de proteínas.

O tempo de armazenamento evidenciou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre a umidade das maçãs recobertas por filme tratado por irradiação e sem tratamento (Tabela 3).

A umidade dos filmes (Tabela 4) é um fator muito importante na sua aplicação como embalagem, que varia muito e depende, principalmente, da umidade relativa sob a qual esses foram armazenados. Os filmes foram mantidos à umidade relativa de 55 %. O percentual de umidade dos filmes controle (0 kGy) e irradiado (50 kGy), nos primeiros dias, não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$). A partir do sexto dia de armazenamento, o tratamento irradiado absorveu significativamente menos umidade, indicando que os frutos mantiveram um frescor por mais tempo e, conseqüentemente, um período maior de conservação.

Tabela 3. Umidade de polpas de maçãs acondicionadas sob filmes sem irradiação (0 kGy) e filmes irradiados (50 kGy), segundo o tempo de armazenamento (Goiânia, GO, 2013).

Dose	Umidade (%)			
	Tempo			
	0 dias	3 dias	6 dias	9 dias
0 kGy	84,60 ± 0,59 ^{a*A**}	62,31 ± 1,05 ^{aB}	39,35 ± 0,85 ^{bC}	35,60 ± 0,65 ^{bD}
50 kGy	84,94 ± 0,55 ^{aA}	56,46 ± 0,98 ^{bB}	47,83 ± 0,62 ^{aC}	42,87 ± 1,26 ^{aD}

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as doses de radiação, no mesmo dia. ** Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os dias, para a mesma dose.

Tabela 4. Umidade e solubilidade em água dos filmes sem tratamento (0 kGy) e filmes tratados por irradiação (50 kGy), segundo o tempo de armazenamento (Goiânia, GO, 2013).

Dose	Tempo			
	0 dias	3 dias	6 dias	9 dias
<i>Umidade (%)</i>				
0 kGy	30,24 ± 0,60 ^{a**C**}	26,49 ± 0,14 ^{aD}	33,54 ± 0,21 ^{aA}	32,99 ± 0,17 ^{aB}
50 kGy	29,71 ± 0,35 ^{aC}	24,86 ± 0,48 ^{bD}	32,59 ± 0,12 ^{bA}	30,52 ± 0,22 ^{bB}
<i>Solubilidade em água (%)</i>				
0 kGy	29,63 ± 0,26 ^{b**A**}	27,06 ± 0,11 ^{bb}	25,37 ± 0,36 ^{bc}	22,52 ± 0,53 ^{bd}
50 kGy	37,57 ± 0,31 ^{aA}	34,72 ± 0,71 ^{ab}	29,69 ± 0,21 ^{aC}	24,19 ± 0,66 ^{ad}

* Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as doses de radiação, em um mesmo dia. ** Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os dias, para a mesma dose.

Segundo Mali et al. (2010), na presença de água, o glicerol favorece a absorção de água, devido à sua higroscopicidade. No decorrer do tempo de aplicação dos filmes, houve mudança significativa na umidade dos filmes avaliados. Tais variações podem ser explicadas pelo fato de o filme absorver umidade das maçãs e, depois, perdê-la para o ambiente.

A solubilidade em água dos filmes (Tabela 4) foi influenciada de forma significativa ($p < 0,05$) pela dose de radiação aplicada à proteína, assim como pelo tempo de armazenamento. Os filmes tratados por irradiação apresentaram maior solubilidade, a qual diminuiu no decorrer dos dias de armazenamento.

A maioria dos filmes avaliados apresentou-se intacta, inteira e maleável, após o ensaio de solubilidade. A aplicação de radiação gama à proteína levou à formação de uma matriz filmogênica com menor coesividade, dando origem a uma rede proteica mais solúvel em água.

McHugh & Krochta (1994), Fairley et al. (1996) e Galiotta et al. (1998) afirmaram que filmes proteicos à base de proteínas do soro de leite são parcialmente insolúveis em água, devido à presença de ligações dissulfídicas intermoleculares, estando em concordância com o presente trabalho. Outro fator que, possivelmente, tenha afetado a solubilidade dos filmes é a relação do plastificante com a proteína.

Rocha (2009), em estudo com filmes biodegradáveis de proteína de soja, observou que existe interação entre a proteína e o glicerol, a qual dificulta a solubilidade, pois, quanto maior o teor de glicerol, menor é a solubilidade da proteína em água. Como os filmes tratados com irradiação apresentaram maiores valores de solubilidade, esse parâmetro pode servir como indicativo de degradação ambiental mais rápida, após a sua aplicação como embalagem.

CONCLUSÕES

1. As proteínas de soro de leite constituem uma boa alternativa para a produção de filmes biodegradáveis, os quais apresentam-se translúcidos e de coloração amarelada.
2. A aplicação de filmes produzidos com proteína de soro de leite irradiada apresenta-se como uma boa barreira à perda de umidade de maçãs e à solubilidade em água dos filmes biodegradáveis.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (AOAC). *Official methods of analysis: food composition, additives, natural contaminants*. 16. ed. Maryland: AOAC, 1997.
- BALDWIN, E. A. et al. Improving storage life of cut apple and potato with edible coating. *Postharvest Biology and Technology*, Amsterdam, v. 9, n. 2, p. 151-163, 1996.
- BASSETTO, E. et al. Delay of ripening of 'Pedro Sato' guava with 1-methylcyclopropene. *Postharvest Biology and Technology*, Wageningen, v. 35, n. 3, p. 303-308, 2005.
- BRAULT, D.; D'APRANO, G.; LACROIX, M. Formation of free-standing sterilized edible films from irradiated caseinates. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, DC, v. 45, n. 8, p. 2964-2969, 1997.
- CAMPOS, C.; GERSCHENSON, L.; FLORES, S. Development of edible films and coatings with antimicrobial activity. *Food and Bioprocess Technology*, New York, v. 4, n. 6, p. 849- 875, 2011.
- CANO, M. P.; ANCOS, B.; LOBO, G. Peroxidase and polyphenoloxidase activities in papaya during postharvest ripening and after freezing/thawing. *Journal of Food Science*, Chicago, v. 60, n. 4, p. 815-820, 1995.

- CHAWLA, S. P.; CHANDER, R.; SHARMA, A. Antioxidant properties of Maillard reaction products obtained by gamma-irradiation of whey proteins. *Food Chemistry*, Barking, v. 116, n. 1, p. 122-128, 2009.
- CLEMENTE, E.; PASTORE, G. M. Peroxidase and polyphenoloxidase: the importance for food technology. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 32, n. 2, p. 167-171, 1998.
- COLLA R. E. *Biofilmes de farinha de amaranto adicionados de ácido esteárico*: elaboração e aplicação em morangos frescos (*Fragaria ananassa*). 2004. 198 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- FARLEY, P. et al. Mechanical properties and water vapor permeability of edible films from whey protein isolate and N-ethylmaleimide or cysteine. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, DC, v. 44, n. 12, p. 3789-3792, 1996.
- FERREIRA, V. L. P. *Colorimetria em alimentos*. Campinas: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1991.
- GALIETTA, G. et al. Mechanical and thermomechanical properties of film based on whey proteins as affected by plasticizer and crosslinking agents. *Journal of Dairy Science*, Savoy, v. 81, n. 12, p. 3123-3130, 1998.
- GENNADIOS, A. et al. Edible coatings and films based on proteins. In: KROCHTA, J. M.; BALDWIN, E. A.; NISPEROS-CARRIEDO, M. O. (Eds.). *Edible coatings and films to improve food quality*. Lancaster: Technomic Publishing Co., 1994. p. 201-277.
- GONTARD, N. et al. Edible composite films of wheat gluten and lipids water vapor permeability and other physical properties. *International Journal of Food Science and Technology*, Malden, v. 29, n. 1, p. 39-50, 1994.
- HERNÁNDEZ, M. S.; MARTÍNEZ, M. S.; FERNÁNDEZ-TRUJILLO, J. P. Behavior of arazá (*Eugenia stipitata Mc Vaugh*) fruit quality traits during growth, development and ripening. *Scientia Horticulturae*, Amsterdam, v. 111, n. 3, p. 220-227, 2007.
- HERSHKO, V.; NUSSINOVITCH, A. Physical properties of alginate-coated onion (*Allium cepa*) skin. *Food Hydrocolloids*, Londres, v. 12, n. 2, p. 195-202, 1998.
- HODGE, J. E. Dehydrated food: chemistry of browning reaction in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, DC, v. 1, n. 15, p. 928-943, 1953.
- KIM, J. H. et al. Self-assembled glycol chitosan nanoparticles for the sustained and prolonged delivery of antiangiogenic small peptide drugs in cancer therapy. *Biomaterials*, New York, v. 29, n. 12, p. 1920-1930, 2008.
- LACROIX, M. et al. Polymerization of calcium caseinates solutions induced by gamma irradiation. *Radiation Physical Chemistry*, New York, v. 52, n. 1-6, p. 223-227, 1998.
- MACHADO, B. A. S. et al. Obtenção de nanocelulose da fibra de coco verde e incorporação em filmes biodegradáveis de amido plastificados com glicerol. *Química Nova*, São Paulo, v. 37, n. 8, p. 1275-1282, 2014.
- MALI, S. *Produção, caracterização e aplicação de filmes plásticos biodegradáveis à base de amido de cará*. 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Ciência de Alimentos) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2002.
- MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 31, n. 1, p. 137-156, 2010.
- MATTEI, D. et al. Análises das propriedades físicas e antimicrobianas de filmes à base de amido contendo óleo essencial de *Tetradenia riparia* (Hochst.) Codd e *Rosmarinus officinalis* L. - LAMIACEAE. *Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da Unipar*, Umuarama, v. 16, n. 2, p. 129-136, 2013.
- McHUGH, T. H.; KROCHTA, J. M. Dispersed phase particle size effects on water vapor permeability of whey protein-beeswax edible emulsion films. *Journal of Food Processing and Preservation*, Trumbull, v. 18, n. 3, p. 173-188, 1994.
- McHUGH, T. H.; SENESI, E. Apple wraps: a novel method to improve the quality and extend the shelf life of fresh-cut apples. *Journal of Food Science*, Chicago, v. 65, n. 3, p. 480-485, 2000.
- MEZGHENI, E.; D'APRANO, G.; LACROIX, M. Formation of sterilized edible films based on caseinates: effects of calcium and plasticizers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, DC, v. 46, n. 1, p. 318-324, 1998.
- MONTERREY-QUINTERO, E. S. *Caracterização físico-química de proteínas miofibrilares e elaboração de biofilmes*. 1998. 83 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 1998.
- MUSKOVICS, G. et al. Changes in physical properties during fruit ripening of Hungarian sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivars. *Postharvest Biology and Technology*, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 56-63, 2006.
- OH, S. H. et al. The effect of gamma-irradiation on the non-enzymatic browning reaction in the aqueous model solutions. *Food Chemistry*, Barking, v. 92, n. 2, p. 357-363, 2005.

- PACHEKOSKI, W. M.; DALMOLIN, C.; AGNELLI, J. A. M. Blendas poliméricas biodegradáveis de PHB e PLA para fabricação de filmes. *Polímeros*, São Carlos, v. 24, n. 4, p. 501-507, 2014.
- PAGNO, C. H. et al. Obtenção de concentrados proteicos de soro de leite e caracterização de suas propriedades funcionais tecnológicas. *Alimentos e Nutrição*, Araraquara, v. 20, n. 2, p. 231-239, 2009.
- PRABHA, T. N.; PATWARDHAN, M. V. Polyphenoloxidase (PPO) and peroxidase (POD) enzyme activities and their isoenzyme patterns in ripening fruits. *Acta Alimentaria*, Budapest, v. 15, n. 3, p. 199-207, 1986.
- PRATES, M. F. O. *Elaboração e caracterização de filmes biodegradáveis de amido de fruta-de-lobo e sorbitol e aplicação da cobertura em frutos de morango*. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2010.
- ROCHA, G. O. *Obtenção e caracterização de filmes biodegradáveis a partir de misturas de amido de mandioca e extrato proteico de soja*. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.
- SABATO, S. F. et al. Mechanical and barrier properties of cross-linked soy and whey protein based films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, DC, v. 49, n. 3, p. 1397-1403, 2001.
- SHI, P.; LI, Y.; ZHANG, L. Fabrication and property of chitosan film carrying ethyl cellulose microspheres. *Carbohydrate Polymers*, Barking, v. 72, n. 3, p. 490-499, 2008.
- SOARES, D. B. *Influência do pH e da irradiação em filmes biodegradáveis de proteína do soro de leite*. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.
- SOBRAL, P. J. A. Influência da espessura de biofilmes feitos à base de proteínas miofibrilares sobre suas propriedades funcionais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 35, n. 6, p. 1251-1259, 2000a.
- SOBRAL, P. J. A. *Proteínas de origem animal na tecnologia de biofilmes*. 2000. 156 f. Tese (Livre Docência) - Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2000b.
- STATSOFT. *Statistica 7.0 for Windows*: computer program manual. Tulsa: StatSoft, 2004.
- VAMOS-VIGYAZO, L. Polyphenoloxidase and peroxidase in fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Boca Raton, v. 15, n. 1, p. 49-127, 1981.
- VICENTINI, N. M. *Elaboração e caracterização de filmes comestíveis à base de fécula de mandioca para uso em pós-colheita*. 2003. 62 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2003.
- YANG, L.; PAULSON, A. T. Mechanical and water vapor properties of edible gellan films. *Food Research International*, Amsterdam, v. 33, n. 7, p. 563-570, 2000.
- YOSHIDA, C. M. P. *Aplicação de concentrado proteico de soro de leite bovino na elaboração de filmes comestíveis*. 2002. 246 f. Tese (Doutorado em Alimentos e Nutrição) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- YOSHIDA, C. M. P.; ANTUNES, A. J. Aplicação de filmes proteicos à base de soro de leite. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 29, n. 2, p. 420-430, 2009.
- ZAVAREZE, E. R. et al. Filmes biodegradáveis à base de proteínas miofibrilares de pescado. *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 15, n. 1, p. 53-57, 2012.