

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Microencapsulation and release controlled by the diffusion of food ingredients produced by spray drying: a review

Keyla Carvalho Pereira^{1*}, Danielle Cristine Mota Ferreira¹, Gabriela Fontes Alvarenga¹,
Matheus Santana Salvador Pereira¹, Mayara Caroline Souto Barcelos¹, Joyce Maria Gomes da Costa¹

¹ Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência e Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Diamantina/MG - Brasil

*Corresponding Author

Keyla Carvalho Pereira, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), Instituto de Ciência e Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campus JK, Rodovia MGT 367, km 583, 5000, Alto da Jacuba, CEP: 39100-000, Diamantina/MG - Brasil, e-mail: keyla.carvalho@ict.ufvjm.edu.br

Cite as: Microencapsulation and release controlled by the diffusion of food ingredients produced by spray drying: a review. *Braz. J. Food Technol.*, v. 21, e2017083, 2018.

Received: Jan. 20, 2017; Accepted: Jan. 08, 2018

Resumo

A utilização de ingredientes microencapsulados na indústria alimentícia apresenta crescente expansão. A microencapsulação é utilizada para proteger o material ativo de condições adversas e apresenta ainda mais vantagens quando utilizada juntamente com a liberação controlada. O uso da atomização para microencapsulação é uma das técnicas mais utilizadas devido ao seu baixo custo e facilidade de aplicação. Esta revisão descreve a produção de micropartículas contendo ingredientes alimentícios através da secagem por atomização e discute a liberação controlada do material ativo das micropartículas pelo mecanismo de difusão e modelos cinéticos.

Palavras-chave: *Micropartículas; Secagem por atomização; Alimentos; Materiais de parede; Difusão; Cinética de liberação.*

Abstract

The use of microencapsulated ingredients in the food industry is growing. Microencapsulation is used to protect the active material from adverse conditions and has additional advantages when used together with controlled release. The use of spray drying for microencapsulation is one of the most widely used techniques due to its low cost and easy application. This review describes the production of microparticles containing food ingredients by spray drying, and discusses the controlled release of the active material from the microparticles by the diffusion mechanism and the kinetic models.

Keywords: *Microparticles; Spray drying; Foods; Wall materials; Diffusion; Release kinetics.*

1 Introdução

A tecnologia de alimentos é uma área em crescente expansão buscando constantemente desenvolver métodos que permitam a produção de alimentos e/ou ingredientes diferenciados, capazes de nutrir e ao mesmo tempo fornecer bem-estar e saúde (BARRETO et al., 2015; SILVA et al., 2014). Nesse quesito a microencapsulação possui aplicabilidade em diferentes áreas, como farmacêutica, cosmética e agrotóxica, sendo também aplicada na área alimentícia (NESTERENKO et al., 2013; PHISUT, 2012; REBELLO, 2009),

permitindo o desenvolvimento de produtos de grande interesse mercadológico e viabilidade econômica (AZEREDO, 2005; NEDOVIC et al., 2011).

Segundo Jyothi et al. (2012), no processo de microencapsulação, pequenas partículas, denominadas núcleo ou princípio ativo, são rodeadas por um revestimento, ou encapsulante, formando pequenas cápsulas, cuja estrutura é relativamente simples, consistindo em uma pequena esfera com uma parede uniforme em torno dela.



Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

Diferentes métodos podem ser empregados na encapsulação, como métodos físicos, químicos e físico-químicos (NUNES et al., 2015; REBELLO, 2009; SOUZA et al., 2015; ZHANG et al., 2015), porém o mais utilizado na indústria alimentícia é a secagem por atomização, devido seu baixo custo e altas taxas de produção (CARMO et al., 2015; ONWULATA, 2012; POSHADRI; KUNA, 2010; RAY et al., 2016).

Uma das grandes vantagens da tecnologia de microencapsulação é a liberação controlada, cuja técnica permite ampliar a gama de aplicações de ingredientes em alimentos, sendo considerada não apenas um adicional, mas também uma fonte de novos ingredientes com propriedades incomparáveis (GOUIN, 2004).

O objetivo do presente trabalho é revisar a metodologia de microencapsulação e liberação controlada, pelo mecanismo de difusão, de micropartículas de ingredientes alimentícios produzidas através do método de secagem por atomização.

2 Microencapsulação

A microencapsulação é uma técnica de grande aceitação na área de alimentos, cuja utilização visa aumentar a efetividade de muitos compostos, por promover uma barreira física entre o componente do núcleo e os outros componentes do produto (ESTEVINHO et al., 2013; ZHANG et al., 2015).

A finalidade da técnica de microencapsulação consiste em “empacotar” o material ativo na forma sólida, líquida ou gasosa, com o auxílio de uma ampla gama de material de parede, cuja escolha correta influencia a eficiência da microencapsulação e a estabilidade da micropartícula (GUEVARA; JIMÉNEZ, 2008; RAY et al., 2016; SILVA et al., 2014). Entre suas vantagens incluem estabilizar o material encapsulado, controlar reações oxidativas, liberar o material ativo de forma controlada, mascarar sabores, cores ou odores indesejáveis, reduzir a toxicidade do material ativo, prolongar a vida útil e proteger

compostos de valor nutricional (FAVARO-TRINDADE et al., 2008; MENEZES et al., 2013).

A micropartícula produzida é classificada em relação ao tamanho e morfologia, de acordo com o encapsulante e o método de microencapsulação empregado (BAKRY et al., 2015; ESTEVINHO et al., 2013). Conforme Silva et al. (2014), as partículas podem ser classificadas de acordo com seu tamanho em macropartículas ($\geq 5.000 \mu\text{m}$), micropartículas ($0,2$ a $5.000 \mu\text{m}$) e nanopartículas ($\leq 0,2 \mu\text{m}$).

Em relação a morfologia, muitos autores utilizam o termo microcápsula em referência a micropartícula. No entanto a micropartícula envolve dois grupos: microcápsula, que compreende um sistema do tipo reservatório e microesfera, que é um sistema monolítico (Figura 1) (MATTÉ; ROSA, 2013; NUNES et al., 2015).

No sistema reservatório, microcápsula, o material ativo é bem definido e totalmente rodeado pelo encapsulante. No sistema monolítico, microesfera, a estrutura é do tipo matricial e o material ativo se encontra disperso em uma matriz contínua. Neste caso o material ativo pode estar disperso no encapsulante ou ser encontrado na sua superfície (AZEREDO, 2005; MATTÉ; ROSA, 2013; NAZZARO et al., 2012; NESTERENKO et al., 2013; PASIN et al., 2012; RAY et al., 2016).

Na secagem por atomização as micropartículas produzidas apresentam o formato matricial com o material ativo distribuído na matriz seca do encapsulante (ONWULATA, 2012; RAY et al., 2016).

3 Secagem por atomização

A secagem por atomização é uma tecnologia em que um produto líquido é atomizado em ar quente obtendo-se um pó, o qual deve apresentar como características boa qualidade, baixa atividade de água, facilidade de armazenamento e estocagem, além de proteger o material ativo contra reações indesejáveis (CARNEIRO et al., 2013; ESTEVINHO et al., 2013).

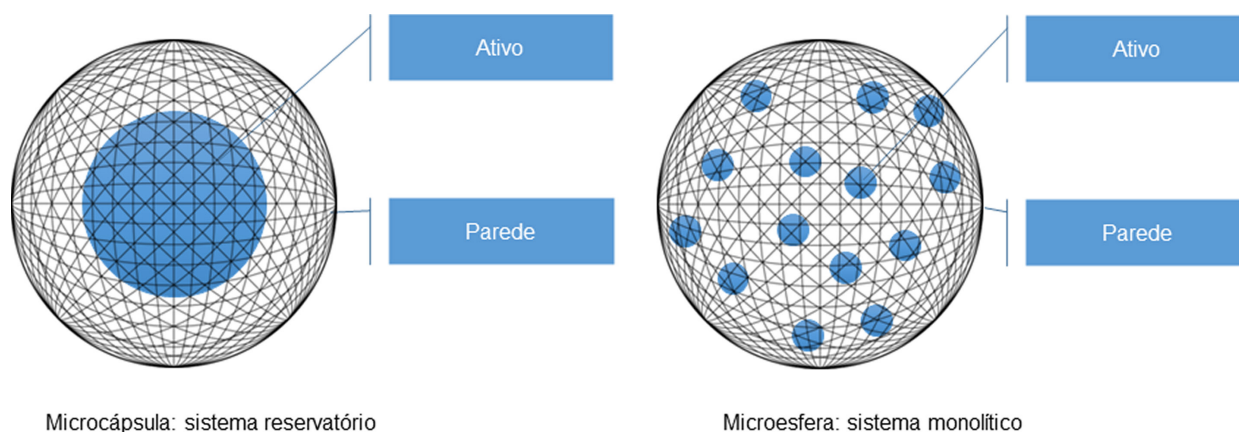


Figura 1. Morfologia da microcápsula e microesfera.

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

As variáveis deste processo de secagem envolvem a temperatura de entrada e saída de ar do sistema, o fluxo de ar ou fluido de arraste, a distribuição da temperatura e da umidade, o tempo de permanência e a temperatura da câmara. Estes parâmetros junto com o encapsulante e as características do material ativo são responsáveis pela eficiência do processo (NUNES et al., 2015).

O método de secagem por atomização pode ser empregado na encapsulação de diversas substâncias, tais como acidulantes, agentes aromatizantes, adoçantes, corantes, óleos, vitaminas, minerais, enzimas e microrganismos (NEDOVIC et al., 2011; POSHADRI; KUNA, 2010; RAY et al., 2016).

De acordo com Bakry et al. (2015) o processo envolve quatro etapas: (i) preparo da dispersão; (ii) homogeneização da dispersão; (iii) atomização da dispersão; e (iv) desidratação das partículas atomizadas.

A secagem por atomização é uma técnica comumente usada em escala industrial, e que apresenta como vantagens atrativas a produção de micropartículas em uma operação relativamente simples, contínua e de baixo custo, se comparada a outras técnicas, além da facilidade de operação, alta taxa de produção e a habilidade de manusear produtos lábeis devido a curta exposição do produto a altas temperaturas (BAKRY et al., 2015; BANSODE et al., 2010; AKHAVAN MAHDAVI et al., 2016; NUNES et al., 2015; VOS et al., 2010).

Por outro lado, as razões que restringem a microencapsulação por secagem por atomização podem ser o limitado número de materiais de parede disponíveis para a indústria de alimentos, devido a aplicação em vários processos que necessitam de meios aquosos e implicam na utilização de materiais de parede solúveis em água em nível aceitável; outro motivo é o fato de produzir finas micropartículas em pó, que precisam de rápido processamento para evitar a aglomeração. Além disso pode ocorrer uma baixa estabilidade oxidativa, devido à alta temperatura empregada durante o processo de atomização (BAKRY et al., 2015; DESAI; PARK, 2005).

4 Material de parede

A seleção do material de parede é um requisito importante na microencapsulação. Segundo Costa et al. (2015) e Gharsallaoui et al. (2007), este material tem impacto direto na eficiência da microencapsulação, na estabilidade e na adequação da micropartícula. Para que possa ter aplicação nos alimentos, o material de parede deve ser de grau alimentar, biodegradável e capaz de formar uma barreira entre o agente ativo e o meio (ZHANG et al., 2015).

De acordo com Shahidi e Han (1993) o material de parede ideal deve apresentar como características: baixa viscosidade em concentrações elevadas e fácil manipulação durante o processo; ter baixa higroscopicidade, para facilitar a manipulação e evitar aglomeração; não reagir com o agente ativo; possuir habilidade de selar e segurar

o agente ativo dentro da estrutura da cápsula; liberar completamente o solvente ou outros materiais utilizados durante o processo de encapsulação; proporcionar máxima proteção ao agente ativo contra condições adversas como luz, pH, oxigênio e ingredientes reativos; ter solubilidade em solventes comumente utilizados; possuir propriedades desejadas de liberação do agente ativo; não apresentar sabor desagradável quando sua aplicação for de uso oral e ser econômico.

Na escolha do material de parede alguns fatores devem ser levados em consideração, tais como fatores associados às propriedades físicas e químicas do agente ativo (solubilidade, entre outros), do material de parede (viscosidade, estabilidade, propriedades mecânicas, transição vítrea, habilidade de formar filmes etc.), além da compatibilidade entre o agente ativo e o material de parede, os mecanismos de controle e fatores econômicos (COSTA et al., 2015; REBELLO, 2009).

Em relação a composição, há uma ampla variedade de materiais de parede comestíveis (Tabela 1) que podem ser utilizados sozinhos ou combinados, porém a combinação ideal irá depender da técnica de microencapsulação aplicada (FERNANDES et al., 2012; OLIVEIRA; PETROVICK, 2010). Dentre os materiais a goma arábica, maltodextrinas e amidos modificados são os mais usados devido ao alto peso molecular e a alta temperatura de transição vítrea (COSTA et al., 2015; CANO-CHAUCA et al., 2011).

Vale ressaltar que as características físico-químicas de tais materiais se diferenciam, fato que explica a utilização na maioria das vezes de uma combinação de materiais, a fim de se obter melhores resultados de eficiência e rendimento na microencapsulação.

4.1 Goma arábica

A goma arábica é composta principalmente de glicoproteínas, polissacarídeos e sais de cálcio, magnésio e potássio. Sua cadeia polissacarídica é composta de ligações de D-galactose com ramificações de L-ramnose, L-arabinose e ácido L-glicurônico (SUKHOTU et al., 2016). Além disso, contem cerca de 2% de um componente proteico ligado covalentemente a esse arranjo molecular,

Tabela 1. Materiais de parede usados na microencapsulação de ingredientes alimentícios.

Categoria	Principais materiais
Carboidratos	Amido, maltodextrina, quitosana, dextrina, ciclodextrina, amido modificado
Celulose	Carboximetilcelulose, metilcelulose
Gomas	Goma arábica, goma guar, ágar, carragena, alginato de sódio
Lipídios	Cera, parafina, cera de abelha, diacilglicerol, óleos, gorduras,
Proteínas	Glúten, gelatina, albumina, caseína, peptídeos

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

que exerce papel fundamental na determinação das propriedades emulsificantes da goma (AZEREDO, 2005).

Sua ampla utilização na microencapsulação ocorre devido a sua alta solubilidade, baixa viscosidade, boas propriedades emulsificantes, sabor suave e elevada estabilidade oxidativa (COSTA et al., 2015). A goma arábica também evita a aderência de gotículas na câmara de secagem, produzindo pós livres (FERRARI et al., 2012). A limitação na utilização deste material ocorre devido a seu custo elevado (GHARSALLAOUI et al., 2007) e ao fato de ser proveniente de regiões de variações climáticas e conflitos políticos (VASILE et al., 2016).

4.2 Amidos

O amido é um homopolissacarídeo composto por cadeias de amilose e amilopectina (DENARDIN; SILVA, 2009). Ele e seus derivados (amido modificado e maltodextrinas) possuem propriedades desejáveis como baixa viscosidade, alto teor de sólidos e boa solubilidade, além de serem empregados com a finalidade de reter e proteger compostos voláteis. Agem ainda como transportadores na encapsulação de aromas, substitutos

de gordura e estabilizantes de emulsão (MADENE et al., 2006). Entre suas desvantagens estão o gosto indesejável e o fato de não ofertar uma boa proteção contra a oxidação de aromatizantes (KRISHNAN et al., 2005).

4.3 Maltodextrinas

A maltodextrina é um polímero sacarídeo nutritivo, que consiste de unidades D-glicose ligadas por cadeia α 1-4 (BARRETO et al., 2015). É formada através da hidrólise parcial do amido de milho, por ação ácida ou enzimática, apresentando diferentes dextroses equivalentes (DE), que indicam o número de hidrólise do amido equivalente. Sua aplicação na microencapsulação ocorre por sua baixa higroscopicidade, alta solubilidade e baixo custo. Em alguns casos mostra efeito antioxidante e boa retenção de substâncias voláteis (COSTA et al., 2015), apresentam também baixa viscosidade (AKHAVAN MAHDAVI et al., 2016).

A Tabela 2 expõe alguns estudos de microencapsulação que utilizaram materiais de parede sozinhos ou combinados, seu rendimento e sua eficiência.

Tabela 2. Estudos de microencapsulação: materiais de parede, rendimento e eficiência.

Artigos de Microencapsulação	Materiais de Parede	Rendimento (%)	Eficiência (%)	Autores / Ano de publicação
Flavonoid microparticles by spray-drying: Influence of enhancers of the dissolution rate on properties and stability	Propionato, acetato de celulose	76-94	43-67	Sansone et al. (2011)
Microencapsulation of linseed oil by spray drying for functional food application	Goma arábica, maltodextrina, <i>whey protein</i> isolado,	< 80	> 90	Gallardo et al. (2013)
Optimization of Microencapsulation of Fish Oil with Gum Arabic/Casein/Beta-Cyclodextrin Mixtures by Spray Drying	Goma arábica, caseína, betaciclodextrina	55,6	79,6	Li et al. (2015)
Retention of saffron bioactive components by spray drying encapsulation using maltodextrin, gum Arabic and gelatin as wall materials	Goma arábica, maltodextrina e gelatina	60-87	54-90	Rajabi et al. (2015)
Spray-drying microencapsulation of synergistic antioxidant mushroom extracts and their use as functional food ingredients	Maltodextrina	50	43-62	Ribeiro et al. (2015)
Spray drying-microencapsulation of cinnamon infusions (<i>Cinnamomum zeylanicum</i>) with maltodextrin	Maltodextrina	49,6	> 70	Santiago-Adame et al. (2015)
Influence of different combinations of wall materials on the microencapsulation of jussara pulp (<i>Euterpe edulis</i>) by spray drying	Goma arábica, amido modificado, concentrado de <i>whey protein</i>	33-76	80-99	Santana et al. (2016)
	Goma arábica, amido modificado, isolado de proteína de soja	34-72	80-99	
Sulfur aroma compounds in gum Arabic/ maltodextrin microparticles	Goma arábica, maltodextrina	34	67	Uekane et al. (2016)

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

5 Liberação controlada

A microencapsulação apresenta como uma das suas principais vantagens o mecanismo de liberação controlada. Através deste mecanismo o agente ativo pode ser liberado em momento e local apropriado, sendo considerada, uma propriedade extremamente importante nos processos de encapsulação (SILVA et al., 2014).

Na indústria de alimentos, a microencapsulação e a liberação controlada são aplicadas com o objetivo de assegurar a manutenção das características nutritivas e sensoriais dos alimentos e prolongar seu período de armazenamento (DIMA et al., 2016).

A partir das micropartículas uma série de mecanismos de liberação têm sido propostos, com destaque aos mecanismos de dissolução, fratura, biodegradação e difusão (SHAHIDI; HAN, 1993). Estes mecanismos geralmente dependem da geometria da partícula e do tipo de material de parede utilizado, e podem ser influenciados pelo solvente, difusão, degradação, fratura da partícula e pela ação de temperatura, pH e solubilidade do meio (WHORTON, 1995).

5.1 Difusão

Na área alimentícia o mecanismo de difusão tem apresentado ampla aplicação, sendo considerado, portanto, um dos mais relevantes (AZEREDO, 2005). A difusão consiste no deslocamento do agente ativo através da matriz, passando de uma região mais concentrada para uma de menor concentração (RODRÍGUEZ et al., 2016). Ocorre especialmente quando a micropartícula está intacta (SILVA et al., 2014), sendo controlada pelas limitações da transferência de massa na camada entre a matriz polimérica e o meio (Figura 2).

De acordo com a aplicação das micropartículas pode ser desejável que a difusão do agente ativo através do material de parede ocorra de forma lenta, ou seja, que não se solubilize instantaneamente, como apresentado no estudo de Zandi et al. (2015). Assim, o transporte do agente ativo na difusão depende da sua capacidade em atravessar a membrana do material de parede que é porosa (RODRÍGUEZ et al., 2016), isto é, da sua solubilidade no sistema matricial (MATALANIS et al., 2011). A difusividade

depende não somente do agente ativo como também do tamanho, da forma e da disposição do material de parede (SOBRINHO; FARIAS, 2012). Geralmente as moléculas maiores apresentam uma difusividade inferior às menores (RODRÍGUEZ et al., 2016). Segundo Aghbashlo et al. (2012) este fato está associado ao peso das moléculas, pois quanto maior o peso molecular menor será a difusividade, o que reduz também a solubilidade no meio.

A difusão também é influenciada pelo estado físico do material de parede. Geralmente materiais de parede no estado vítreo são mais impermeáveis comparados ao estado não vítreo ou gomoso. Assim, a liberação do agente ativo normalmente ocorre durante a transição do estado vítreo para o estado gomoso, ou seja, no estado de maior mobilidade das moléculas (AZEREDO, 2005).

O mecanismo de liberação das micropartículas pode ser descrito através da cinética de liberação, expresso na forma de diversos modelos matemáticos (CAMPELO-FÉLIX et al., 2017; ANSARIFAR et al., 2017; ZANDI et al., 2015).

Os principais modelos aplicados na difusão se baseiam nas Leis de Fick e são os modelos de Ordem Zero (Equação 1), Primeira Ordem (Equação 2), Higuchi (Equação 3) e Rigter-Peppas (Equação 4) (MEHRNIA et al., 2017; FATHI et al., 2013), cujos modelos são apresentados abaixo:

$$C = K.t \quad (1)$$

$$C = [1 - \exp(-Kt)] \times 100 \quad (2)$$

$$C = Kt^{0.5} \quad (3)$$

$$C = Kt^n \quad (4)$$

onde, C é a concentração em porcentagem, t é o tempo, K é a constante cinética e n é a constante de liberação usada para caracterizar diferentes mecanismos de liberação, no qual $0,43 < n$ é controlado pelo mecanismo de difusão Fickiano, $n > 0,85$ é comandado pela dissolução e $0,43 < n < 0,85$ é comandado pelos dois mecanismos (ANSARIFAR et al., 2017). A Tabela 3 apresenta alguns estudos de liberação controlada em alimentos que aplicaram o mecanismo de difusão e/ou cinética de liberação.

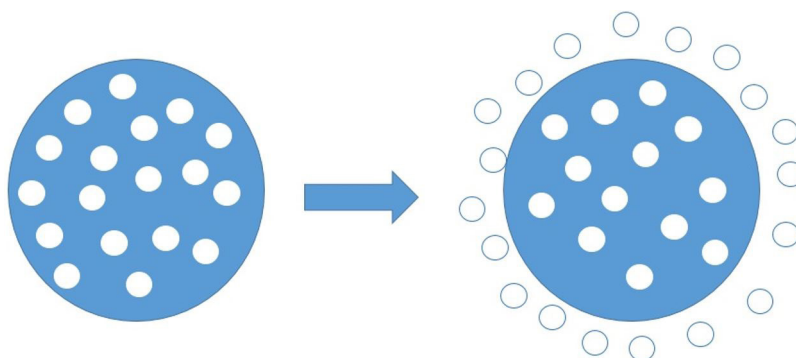


Figura 2. Liberação do agente ativo pelo sistema de difusão. Adaptado de Prata et al. (2008).

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

Tabela 3. Estudos de liberação controlada por difusão envolvendo ingredientes alimentícios.

Estudos de liberação por difusão	Autores / Ano de Publicação
Release Kinetic in Yogurt from Gallic Acid Microparticles with Chemically Modified Inulin	Garcia et al. (2015)
The kinetics of the swelling process and the release mechanisms of Coriandrum sativum L. essential oil from chitosan/alginate/inulin microcapsules	Dima et al. (2016)
Novel multilayer microcapsules based on soy protein isolate fibrils and high methoxyl pectin: Production, characterization and release modeling	Ansarifar et al. (2017)
Thyme essential oil loaded in nanochleates: Encapsulation efficiency, in vitro release study and antioxidant activity	Asprea et al. (2017)
Prebiotic Carbohydrates: Effect on Reconstitution, Storage, Release, and Antioxidant Properties of Lime Essential Oil Microparticles	Campelo-Félix et al. (2017)
Identification of cardamon encapsulated alginate-whey protein concentrates microcapsile release kinetics and mechanism during storage, stew process and oral consumption	Zandi et al. (2015)

6 Conclusão

- A tecnologia de microencapsulação por atomização oferece vantagens potenciais sobre os sistemas de liberação de ingredientes alimentícios. As microesferas e microcápsulas podem ser definidas como sistemas veiculares originais e alternativos para muitos produtos alimentícios e podem ser adaptadas para agregar valor a um produto com a liberação alvo;
- A secagem por atomização é o método utilizado para microencapsulação de ingredientes alimentícios por ser uma tecnologia relativamente de baixo custo e possuir alta produtividade;
- A liberação controlada de micropartículas apresenta a difusão como um dos principais mecanismos de liberação, pois propicia a liberação do material ativo através da matriz, e pode ser avaliada por meio da cinética de liberação através de modelos cinéticos.

Referências

AGHBASHLO, M.; MOBLI, H.; MADADLOU, A.; RAFIEE, S. The correlation of wall material composition with flow characteristics and encapsulation behavior of fish oil emulsion. **Food Research International**, v. 49, n. 1, p. 379-388, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2012.07.031>.

AKHAVAN MAHDAVI, S.; JAFARI, S. M.; ASSADPOOR, E.; DEHNAD, D. Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum Arabic and gelatin. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 85, p. 379-385, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.011>. PMID:26772915.

ANSARIFAR, E.; MOHEBBI, M.; SHAHIDI, F.; KOOCHEKI, A.; RAMEZANIAN, N. Novel multilayer microcapsules based on soy protein isolate fibrils and high methoxyl pectin: production, characterization and release modeling. **International Journal**

of Biological Macromolecules, v. 97, p. 761-769, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.01.056>. PMID:28104373.

ASPREA, M.; LETO, I.; BERGONZI, M. A.; BILIA, A. R. Thyme essential oil loaded in nanochleates: encapsulation efficiency, in vitro release study and antioxidant activity. **Food Science and Technology**, v. 77, p. 497-502, 2017.

AZEREDO, H. M. C. Encapsulação: aplicação à tecnologia de alimentos. **Alimentos e Nutrição**, v. 16, p. 89-97, 2005.

BAKRY, A. M.; ABBAS, S.; ALI, B.; MAJEED, H.; ABOUELWafa, M. Y.; MOUSA, A.; LIANG, L. Microencapsulation of oils: a comprehensive review of benefits, techniques, and applications. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 15, n. 1, p. 143-182, 2015. <http://dx.doi.org/10.1111/1541-4337.12179>.

BANSODE, S. S.; BANARJEE, S. K.; GAIKWARD, D. D.; JADHAV, S. L.; THORAT, R. M. Microencapsulation: a review. **International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research**, v. 1, p. 38-43, 2010.

BARRETO, A. R.; RAMÍREZ-MÉRIDA, L. G.; ETCHEPARE, M. A.; JACOB-LOPES, E.; MENEZES, C. R. Materiais de revestimento utilizados na microencapsulação de probióticos. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 164-174, 2015. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X19747>.

CAMPELO-FÉLIX, P. H.; SOUZA, H. J. B.; FIGUEIREDO, J. A.; FERNANDES, R. V. B.; BOTREL, D. A.; OLIVEIRA, C. R.; YOSHIDA, M. I.; BORGES, S. V. Prebiotic carbohydrates: effect on reconstitution, storage, release, and antioxidant properties of lime essential oil microparticles. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, n. 2, p. 445-453, 2017. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jafc.6b04643>. PMID:28004578.

CANO-CHAUCA, M. N.; STRINGHETA, P. C.; BARBOSA, S. J.; FONSECA, K. S.; SILVA, F. V. Influence of microstructure on the hygroscopic behaviour of mango powdered obtained by spray drying. **African Journal of Food Science**, v. 5, p. 148-155, 2011.

CARMO, E. L.; FERNANDES, R. V. B.; BORGES, S. V. Microencapsulação por spray drying, novos biopolímeros e aplicações na tecnologia de alimentos. **Journal of Chemical**

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

- Engineering and Chemistry**, v. 1, n. 2, p. 30-44, 2015. <http://dx.doi.org/10.18540/2446941601022015030>.
- CARNEIRO, H. C. F.; TONON, R. V.; GROSSO, C. R. F.; HUBINGER, M. D. Encapsulation efficiency and oxidative stability of flaxseed oil microencapsulated by spray drying using different combinations of wall materials. **Journal of Food Engineering**, v. 115, n. 4, p. 443-451, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.033>.
- COSTA, S. S.; MACHADO, B. A. S.; MARTINS, A. R.; BAGNARA, F.; RAGADALLI, S. A.; ALVES, A. R. C. Drying by spray drying in the food industry: micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. **African Journal of Food Science**, v. 9, n. 9, p. 462-470, 2015. <http://dx.doi.org/10.5897/AJFS2015.1279>.
- DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, v. 39, n. 3, p. 945-954, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009005000003>.
- DESAI, K. G. H.; PARK, H. J. Recent developments in microencapsulation of food ingredients. **Drying Technology**, v. 93, n. 7, p. 1361-1394, 2005. <http://dx.doi.org/10.1081/DRT-200063478>.
- DIMA, C.; PATRASCU, L.; CANTARAGIU, A.; ALEXE, P.; DIMA, S. The kinetics of the swelling process and the release mechanisms of *Coriandrum sativum* L. essential oil from chitosan/alginate/inulin microcapsules. **Food Chemistry**, v. 195, p. 39-48, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.044>. PMID:26575710.
- ESTEVINHO, B. N.; ROCHA, F.; SANTOS, L.; ALVES, A. Microencapsulation with chitosan by spray drying for industry applications: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 31, n. 2, p. 138-155, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2013.04.001>.
- FATHI, M.; VARSHOSAZ, J.; MOHEBBI, M.; SHAHIDI, F. Hesperetin-loaded solid lipid nanoparticles and nanostructure lipid carriers for food fortification: preparation, characterization, and modeling. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 6, p. 1464-1475, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s11947-012-0845-2>.
- FAVARO-TRINDADE, C. S.; PINHO, S. C.; ROCHA, G. A. Revisão: microencapsulação de ingredientes alimentícios. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 11, p. 103-112, 2008.
- FERNANDES, L. P.; CANDIDO, R. C.; OLIVEIRA, W. P. Spray drying microencapsulation of *Lippia sidoides* extracts in carbohydrate blends. **Food and Bioprocess Technology**, v. 90, n. 3, p. 425-432, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2011.12.001>.
- FERRARI, C. C.; GERMER, S. P. M.; ALVIM, I. D.; VISSOTTO, S. Z.; DE AGUIRRE, J. M. Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 47, n. 6, p. 1237-1245, 2012. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02964.x>.
- GALLARDO, G.; GUIDA, L.; MARTINEZ, V.; LÓPEZ, M. C.; BERNHARDT, D.; BLASCO, R.; PEDROZA-ISLAS, R.; HERMIDA, L. G. Microencapsulation of linseed oil by spray drying for functional food application. **Food Research International**, v. 52, n. 2, p. 473-482, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.020>.
- GARCÍA, P.; VERGARA, C.; ROBERT, P. Release kinetic in yogurt from gallic acid microparticles with chemically modified inulin. **Journal of Food Science**, v. 80, n. 10, p. 2147-2152, 2015. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.13001>. PMID:26305430.
- GOUIN, S. Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. **Trends in Food Science & Technology**, v. 15, n. 7-8, p. 330-347, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2003.10.005>.
- GHARSALLAOUI, A.; ROUDAUT, G.; CHAMBIN, O.; VOILLEY, A.; SAUREL, R. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: an overview. **Food Research International**, v. 40, n. 9, p. 1107-1121, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004>.
- GUEVARA, N. A.; JIMÉNEZ, M. T. Materiles utilizados en la encapsulation. **Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos**, v. 2, p. 22-27, 2008.
- JYOTHI, S. S.; SEETHADEVI, A.; PRABHA, K. S.; MUTHPRASANNA, P.; PAVITRA, P. Microencapsulation: a review. **International Journal of Pharma and Bio Sciences**, v. 3, p. 509-531, 2012.
- KRISHNAN, S.; BHOSALE, R.; SINGHAL, R. S. Microencapsulation of cardamom oleoresin: Evaluation of blends of gum arabic, maltodextrin and a modified starch as wall materials. **Carbohydrate Polymers**, v. 61, n. 1, p. 95-102, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.02.020>.
- LI, J.; XIONG, S.; WANG, F.; REGENSTEIN, J. M.; LIU, R. Optimization of microencapsulation of fish oil with gum arabic, casein, beta-cyclodextrin mixtures by spray drying. **Journal of Food Science**, v. 80, n. 7, p. 1445-1452, 2015. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.12928>. PMID:26087831.
- MADENE, A.; JACQUOT, M.; SCHER, J.; DESOBRY, S. Flavour encapsulation and controlled release: a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 41, n. 1, p. 1-21, 2006. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00980.x>.
- MATALANIS, A.; JONES, O.; MCCLEMENTS, D. J. Structured biopolymer-based delivery systems for encapsulation, protection, and release of lipophilic compounds. **Food Hydrocolloids**, v. 25, n. 8, p. 1865-1880, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.014>.
- MATTÉ, G. M.; ROSA, S. A tecnologia da microencapsulação através das microesferas de quitosana. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, v. 14, p. 206-218, 2013.
- MEHRNIA, M. A.; JAFARI, S. M.; MAKHMAL-ZADEH, B. S.; MAGHSOUDLOU, Y. Rheological and release properties of double nano-emulsions containing crocin prepared with Angum gum, Arabic gum and whey protein. **Food Hydrocolloids**, v. 66, p. 259-267, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.11.033>.

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

- MENEZES, C. R.; BARIN, J. S.; CHICOSKI, A. J.; ZEPKA, L. Q.; JACOB-LOPES, E.; FRIES, L. L. M.; TERRA, N. N. Microencapsulação de probióticos: avanços e perspectivas. **Ciência Rural**, v. 43, n. 7, p. 1309-1316, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013005000084>.
- NAZZARO, F.; ORLANDO, P.; FRATIANNI, F.; COPPOLA, R. Microencapsulation in food science and biotechnology. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, n. 2, p. 182-186, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2011.10.001>. PMID:22024623.
- NEDOVIC, V.; KALUSEVIC, A.; MANOJLOVIC, V.; LEVIC, S.; BUGARSKI, B. An overview of encapsulation technologies for food applications. **Procedia Food Science**, v. 1, p. 1806-1815, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>.
- NESTERENKO, A.; ALRIC, I.; SILVESTRE, F.; DURRIEU, V. Vegetable proteins in microencapsulation: a review of recent interventions and their effectiveness. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 469-479, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.035>.
- NUNES, G. L.; SILVA, T. M.; HOLKEM, A. T.; SCHLEY, V.; MENEZES, C. R. Microencapsulação de culturas probióticas: princípios do método de spray drying. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 132-141, 2015. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X19742>.
- OLIVEIRA, O. W.; PETROVICK, P. R. Secagem por aspersão (*spray drying*) de extratos vegetais: bases e aplicações. **Brazilian Journal Pharmacogn**, v. 20, n. 4, p. 641-650, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-695X2010000400026>.
- ONWULATA, C. I. Encapsulation of new active ingredients. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 183-202, 2012. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101140>. PMID:22149076.
- PASIN, B. L.; AZÓN, C. G.; GARRIGA, A. M. Microencapsulación con alginato en alimentos: técnicas y aplicaciones. **Revista Venezolana de Ciencia y Tecnología de Alimentos**, v. 3, p. 130-151, 2012.
- PHISUT, N. Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. **International Food Research Journal**, v. 19, p. 1297-1306, 2012.
- POSHADRI, A.; KUNA, A. Microencapsulation technology: a review. **Journal of Research**, v. 38, p. 86-102, 2010.
- PRATA, A. S.; ZANIN, M. H. A.; RÉ, M. I.; GROSSO, C. R. F. Release properties of chemical and enzymatic crosslinked gelatin-gum Arabic microparticles containing a fluorescent probe plus vetiver essential oil. **Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces**, v. 67, n. 2, p. 171-178, 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.colsurfb.2008.08.014>. PMID:18835139.
- RAJABI, H.; GHORBANI, M.; JAFARI, S. M.; SADEGHI MAHOONAK, A.; RAJABZADEH, G. Retention of saffron bioactive components by spray drying encapsulation using maltodextrin, gum Arabic and gelatin as wall materials. **Food Hydrocolloids**, v. 51, p. 327-337, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.05.033>.
- RAY, S.; RAYCHAUDHURI, U.; CHAKRABORTY, R. An overview of encapsulation of active compounds used in food products by drying technology. **Food Bioscience**, v. 13, p. 76-83, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbio.2015.12.009>.
- REBELLO, F. F. P. Microencapsulação de ingredientes alimentícios. **Revista Agrogeoambiental**, v. 1, n. 3, p. 134-144, 2009. <http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v1n32009223>.
- RIBEIRO, A.; RUPHUY, G.; LOPES, J. C.; DIAS, M. M.; BARROS, L.; BARREIRO, F.; FERREIRA, I. C. F. R. Spray-drying microencapsulation of synergistic antioxidant mushroom extracts and their use as functional food ingredients. **Food Chemistry**, v. 188, p. 612-618, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.061>. PMID:26041238.
- RODRÍGUEZ, J.; MARTÍN, M. J.; RUIZ, M. A.; CLARES, B. Current encapsulation strategies for bioactive oils: from alimentary to pharmaceutical perspectives. **Food Research International**, v. 83, p. 41-59, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.032>.
- SANSONE, F.; PICERNO, P.; MENCHERINI, T.; VILLECCO, F.; D'URSI, A. M.; AQUINO, R. P.; LAURO, M. R. Flavonoid microparticles by spray-drying: influences of enhancers of the dissolution rate on properties and stability. **Journal of Food Engineering**, v. 103, n. 2, p. 188-196, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.10.015>.
- SANTANA, A. A.; CANO-HIGUITA, D. M.; OLIVEIRA, R. A.; TELIS, V. R. N. Influence of different combinations of wall materials on the microencapsulation of jussara pulps (*Euterpe edulis*) by spray drying. **Food Chemistry**, v. 212, p. 1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.148>. PMID:27374499.
- SANTIAGO-ADAME, R.; MEDINA-TORRES, L.; GALLEGOS-INFANTE, J. A.; CALDERAS, F.; GONZÁLES-LAREDO, R. F.; ROCHA-GUZMÁN, N. E.; OCHOA-MARTÍNEZ, L. A.; BERNAD-BERNAD, M. J. Spray drying microencapsulation of cinnamon infusions (*Cinnamomum zeylanicum*) with maltodextrin. **Food Science and Technology**, v. 64, p. 571-577, 2015.
- SHAHIDI, F.; HAN, X. Encapsulation of food ingredients. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 33, n. 6, p. 501-547, 1993. <http://dx.doi.org/10.1080/10408399309527645>. PMID:8216812.
- SILVA, P. T.; FRIES, L. L. M.; MENEZES, C. R.; HOLKEM, A. T.; SCHWAN, C. L.; WIGMANN, E. F.; BASTOS, J. O.; SILVA, C. B. Microencapsulation: concepts, mechanisms, methods and some applications in food technology. **Ciência Rural**, v. 44, n. 7, p. 1304-1311, 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20130971>.
- SOBRINHO, E. C. S.; FARIAS, M. C. A microencapsulação na indústria alimentícia. **Infarna**, v. 24, p. 84-93, 2012.
- SOUZA, A. L. R.; RODRIGUES, F. M.; SILVA, G. V.; SANTOS, R. R. Microencapsulação de sucos e polpas de frutas por spray drying: uma revisão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 17, n. 3, p. 327-338, 2015. <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v17n3p327-338>.

Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão

Pereira, K. C. et al.

SUKHOTU, R.; GUO, S.; XING, J.; HU, Q.; WANG, R.; SHI, X.; NISHINARI, K.; FANG, Y.; GUO, S. Changes in physiochemical properties and stability of peanut oil body emulsions by applying gum arabic. **Food Science and Technology**, v. 68, p. 432-438, 2016.

UEKANE, T. M.; COSTA, A. C. P.; PIERUCCI, A. P. T. R.; ROCHA-LEÃO, M. H. M.; REZENDE, C. M. Sulfur aroma compounds in gum Arabic/maltodextrin microparticles. **Lebensmittel-Wissenschaft + Technologie**, v. 70, p. 342-348, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2016.03.003>.

VASILE, F. E.; MARTINEZ, M. J.; PIZONES RUIZ-HENESTROSA, V. M.; JUDIS, M. A.; MAZZOBRE, M. F. Physicochemical, interfacial and emulsifying properties of a nonconventional exudate gum (*Prosopis alba*) in comparison with gum arabic. **Food Hydrocolloids**, v. 56, p. 245-253, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.016>.

VOS, P.; FAAS, M. M.; SPASOJEVIC, M.; SIKKEMA, J. Encapsulation for preservation of functionality and targeted

delivery of bioactive food components. **International Dairy Journal**, v. 20, n. 4, p. 292-302, 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.idairyj.2009.11.008>.

WHORTON, C. Factors influencing volatile release from encapsulation matrices. In: RISCH, S. J.; REINECCIUS, G. A. (Ed.). **Encapsulation and controlled release of food ingredients**. Washington: American Chemical Society, 1995. p. 134-142. <http://dx.doi.org/10.1021/bk-1995-0590.ch012>.

ZANDI, M.; DARDMEH, N.; PIRSA, S.; ALMASI, H. Identification of cardamom encapsulated alginate-whey protein concentrates microcapsule release kinetics and mechanism during storage, stew process and oral consumption. **Journal of Food Processing Engineering**, v. 40, p. 1-11, 2015.

ZHANG, C.; LI, X.; LIU, Y. N.; ZHANG, F. Utilization of microcapsule technology in foods. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 15, n. 12, p. 9330-9340, 2015. <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2015.9226>. PMID:26682354.