

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CIÊNCIAS DA SAÚDE DE PORTO ALEGRE**

**CURSO TECNOLOGIA EM ALIMENTOS**

**Michelle de Mesquita Wasum**

**POTENCIALIDADES DO ENCAPSULAMENTO DE BETALAÍNAS PARA  
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

**Porto Alegre**

**2022**

**Michelle de Mesquita Wasum**

**POTENCIALIDADES DO ENCAPSULAMENTO DE BETALAÍNAS PARA  
APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação  
apresentado na Fundação Universidade  
Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre,  
como requisito parcial para a obtenção do  
grau de Tecnólogo em Tecnologia em  
Alimentos.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Poliana Deyse Gurak

**Porto Alegre**

**2022**

### **Catlogação na Publicação**

de Mesquita Wasum, Michelle

POTENCIALIDADES DO ENCAPSULAMENTO DE BETALAÍNAS PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA / Michelle de Mesquita Wasum. 2022.

78 p.

Monografia (trabalho de conclusão de curso).  
Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre,  
Curso de Tecnologia em Alimentos, 2022.

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Poliana Deyse Gurak

1. Encapsulamento. 2. Betalainas. 3. Corante Natural.  
4. Indústria Alimentícia.

## AGRADECIMENTOS

Ao universo por ter me dado persistência e resiliência para a realização desta monografia mesmo em momentos de intensa conturbação na minha vida pessoal.

À minha orientadora Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Poliana Deyse Gurak, que me acompanhou na área de pesquisa teórico-prática científica das betalainas por mais de 3 anos ao decorrer da minha graduação, me orientando sempre com excelência. Gratidão pela confiança, pelo incentivo, pela oportunidade e pelo constante auxílio e compreensão nos meus momentos mais conturbados. À ela sou extremamente grata e transbordo admiração como profissional e como pessoa.

À minha mãe Janaína por sempre acreditar no meu potencial, por me apoiar e por sempre estar ao meu lado me incentivando. Aos meus familiares de sangue e de coração que se fizeram presentes, se importaram e me acolheram quando eu mais precisei nesta etapa da minha vida. A torcida de vocês foi de extrema relevância e sou extremamente grata.

Aos meus amigos que me apoiaram, me acompanharam e me auxiliaram das diversas maneiras possíveis. Gratidão eterna pela presença destes na minha mostra de TCC e por toda torcida envolvida, desde os auxílio à acordar cedo de madrugada para a realização da escrita até o tempo que reservaram para ler e/ou assistir aos meus ensaios.

A um amigo em especial que me emprestou o seu computador para a escrita deste trabalho, tornando possível o desenrolar da minha monografia. Sem a sua ajuda, teria sido quase que impossível finalizar a tempo esta monografia.

Às técnicas de laboratórios da UFCSPA por colaborarem todos estes anos de pesquisa percorridos, a ajuda de vocês foi essencial para a construção do meu conhecimento.

À universidade pela possibilidade de realização de pesquisas laboratoriais por meio da disponibilização de laboratórios, tornando possível o desenvolvimento de várias análises relacionados às betalainas, desde a caracterização de farinha de beterraba ao

desenvolvimento de um sistema piloto de batom vegano aplicando as betalaínas como corante natural deste cosmético.

Ao CNPq e ao PIBITI pelo auxílio financeiro em todas as minhas pesquisas científicas realizadas ao decorrer da graduação.

E por último, mas não menos importante, obrigada à banca pelo aceite à avaliação do meu trabalho de conclusão de curso, pelas considerações realizadas e pelo estímulo à aprimoração da minha monografia.

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Michelle de Mesquita Wasum**

**Trabalho de Conclusão de Curso de Tecnologia em Alimentos**

**Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre**

## **POTENCIALIDADES DO ENCAPSULAMENTO DE BETALAÍNAS PARA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Poliana Deyse Gurak**

**Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre**

**Departamento de Nutrição**

**Orientadora**

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Manuela Poletto Klein**

**Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre**

**Departamento de Nutrição**

**Examinadora**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vivian Caetano Bochi  
Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre  
Departamento de Nutrição  
Examinadora

Data de aprovação: 26 de janeiro de 2022

Porto Alegre

2022

## **RESUMO**

A aplicação de corantes alimentícios é uma prática usual na indústria de alimentos e a aplicação de corantes naturais tem sido cada vez mais incentivada. Dentre os corantes naturais, encontram-se as betalaínas, as quais são hidrossolúveis, atóxicas, biodegradáveis, apresentam propriedades antioxidantes e antimicrobianas, mas são instáveis a diversos fatores externos. Para que seja favorecida a sua estabilidade frente a variações de temperatura e à exposição à luz e ao oxigênio, pode-se submetê-las a tecnologia de encapsulamento. Porém, há fatores determinantes, como a matriz encapsulante e a técnica de encapsulamento, que impactam na eficiência e na estabilidade do encapsulado. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a potencialidade do encapsulamento de betalaínas para aplicação industrial com base em estudos publicados em revistas científicas nos últimos 12 anos. Assim, uma revisão de literatura integrativa de abordagem qualitativa de artigos publicados sobre encapsulamento de betalaínas extraídos de várias fontes naturais para fins de aplicação na indústria de alimentos foi realizada. Os resultados demonstraram que as betalaínas podem ser obtidas por diversas fontes e frações de uma planta. O microencapsulamento possui maior predominância que o nanoencapsulamento nesta tecnologia. A atomização e a emulsão foram as técnicas de encapsulamento predominantemente analisadas nos estudos. Detectou-se ampla variedade de opções de matriz encapsulante para aplicação, possibilitando uso isolado ou combinado, a depender das condições de encapsulamento e de armazenamento aplicados principalmente em produtos lácteos, cárneos e de confeitaria. Conclui-se que, até o momento, a atomização é a técnica de maior relevância para a aplicabilidade industrial. Com esta revisão, tornou-se possível a análise e a comparação de técnicas, de matrizes e de estabilidade, assim como, a afirmação da potencialidade de aplicação de encapsulados de betalaínas na indústria alimentícia.

**Palavras-chave:** encapsulamento; betalaínas; corante natural; indústria alimentícia.

## **ABSTRACT**

The application of food dyes is a common practice in the food industry and the application of natural dyes has been increasingly encouraged. Among the natural dyes are betalains, which are water-soluble, non-toxic, biodegradable, with antioxidant and antimicrobial properties, but are unstable to various external factors. To favor the stability of betalains against the exposure of temperature, light, and oxygen, it's suggested to submit them to encapsulation technology. Although, there are determining factors, such as the encapsulating matrix and the encapsulation technique, which impact efficiency and the stability of encapsulation. Thus, the objective of this work is to evaluate the potential of betalains encapsulation for industrial application based on studies published in scientific journals in the last 12 years. An integrative literature review was carried out with a qualitative approach of published articles on the encapsulation of betalains extracted from several natural sources for industrial application purposes. The results showed that betalains can be obtained from different sources and fractions of a plant. Microencapsulation has a greater predominance than nanoencapsulation in this technology. Atomization and emulsion were the encapsulation techniques predominantly analyzed in the studies. A wide variety of options for encapsulating matrix application were detected, allowing isolated or combined use, depending on encapsulation and storage conditions, applied mainly in dairy, meat, and confectionery products. It is concluded that, so far, atomization is the most preferred technique for industrial applicability. With this review, it became possible to analyze and compare techniques, matrices, and stability, as well as affirm the potential application of betalain encapsulates in the food industry.

**Keywords:** encapsulation; betalains; natural dye; food industry.

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2.OBJETIVOS</b> .....	12
<b>3.REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	13
3.1.BETALAÍNAS.....	13
3.2.TECNOLOGIA DE ENCAPSULAMENTO.....	16
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	18
4.1.ELABORAÇÃO DA PERGUNTA NORTEADORA.....	18
4.2.BUSCA E SELEÇÃO DE ARTIGOS DE PESQUISA NA BASE DE DADOS.....	18
4.3.QUALIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE PESQUISA PARA REVISÃO.....	18
4.4.COLETA DE DADOS, TRIAGEM E AVALIAÇÃO.....	19
4.5.DISSCUSSÃO DE RESULTADOS.....	19
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	20
5.1. FONTES NATURAIS DE BETALAÍNAS.....	23
5.2. TÉCNICAS DE ENCAPSULAMENTO.....	30
5.2.1. Técnica de Atomização.....	37
5.2.2. Técnica de Emulsão.....	40
5.2.3. Técnica de Gelificação Iônica.....	45
5.2.4. Técnica de Liofilização.....	47
5.2.5. Técnica de Coacervação Simples.....	48
5.2.6. Técnicas de Co-cristalização.....	50
5.3.MATRIZES ENCAPSULANTES.....	51
5.4.FATORES INFLUENCIADORES NA ESTABILIDADE DAS BETALAÍNAS ENCAPSULADAS.....	59
5.5.APLICAÇÃO DE ENCAPSULADOS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA.....	63
5.6.1.Aplicação de encapsulados de betalaínas em gomas de mascar.....	63
5.6.2. Aplicação de encapsulados de betalaínas em iogurte.....	66
<b>6. CONCLUSÃO</b> .....	68
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	70

## 1. INTRODUÇÃO

A aplicação de corantes alimentícios é uma prática usual na indústria. Tal prática possui como finalidade proporcionar ou realçar a coloração de determinado produto alimentício, tornando-o o mais atraente possível para o seu consumidor final. Perante a perspectiva tecnológica, a aplicação de corantes se justifica devido à perda de coloração que tende a ocorrer em determinados alimentos ao decorrer da sua cadeia produtiva, exigindo tal ato para compensar suas possíveis alterações de coloração (RIBEIRO; VELOSO, 2020).

Visto à maior estabilidade e à maior padronização de resultado, os corantes artificiais tendem a ser amplamente utilizados em escala industrial. Não obstante, devido à mudança de percepção do consumidor, o qual anseia por um rótulo mais limpo (*clean label*) com a aderência a ingredientes mais naturais, a aplicação de corantes naturais tem sido cada vez mais incentivada na indústria alimentícia (DE MEJIA *et al.*, 2020).

Dentre os corantes naturais de relevância para área industrial estão as betalaínas. E, ao contrário dos corantes artificiais, as betalaínas transcendem a função de proporcionar cor, constituindo-se de potenciais antioxidantes, antimicrobianos e hepatoprotetores (BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2017; RIBEIRO; VELOSO, 2020, KANNER; HAREL; GRANIT, 2001; GEORGIEV *et al.*, 2010; GENGATHARAN *et al.*, 2015, RAHIMI *et al.*, 2018).

Entretanto, no que condiz à estabilidade, as betalaínas são consideradas instáveis a diversos fatores externos, tais como a exposição ao oxigênio e à luz; a presença de enzimas como  $\beta$ -glicosidases, peroxidases e polifenoloxidase; a exposição a elevadas temperaturas; e a alta atividade de água (HERBACH; STINTZING; CARLE, 2006).

É perceptível, portanto, a necessidade de submeter este corante natural a tecnologias que favoreçam a sua estabilidade. Dentre as tecnologias existentes, ressalta-se o encapsulamento. É relevante, portanto, avaliar a potencialidade da aplicação da tecnologia de encapsulamento, avaliando se ela tende a ser uma boa alternativa para a inclusão de corantes de intensa instabilidade, como as betalaínas, em produtos da indústria alimentícia. Ocasionalmente, assim, um estímulo à indústria a utilizá-las.

## **2. OBJETIVOS**

Esta revisão possui como objetivo geral avaliar a potencialidade do encapsulamento de betalaínas para aplicação na indústria de alimentos com base em estudos de pesquisa publicados em revistas científicas nos últimos 12 anos. Os objetivos específicos foram: verificar as fontes naturais de betalaínas usualmente extraídas nos estudos; comparar e analisar as técnicas de encapsulamento e as matrizes encapsulantes aplicadas, avaliar os parâmetros como estabilidade de cor, eficiência e morfologia; e analisar a aplicabilidade de encapsulados de betalaínas em produtos alimentícios de escala industrial.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1. BETALAÍNAS

As betalaínas são compostos bioativos presentes nos vacúolos de algumas plantas, por exemplo, na beterraba (*Beta vulgaris*), no amaranto (*Amaranthus*), na pitaya vermelha ou fruta do dragão (*Hylocereus polyrhizus*) e na figueira da Índia (*Opuntia ficus-indica*) (GANDÍA-HERRERO *et al.*, 2013; BAZARIA; KUMAR, 2018; GENGATHARAN; DYKES; CHOO, 2015).

Quimicamente, as betalaínas são metabólitos secundários, nitrogenados N-heterocíclicos, hidrossolúveis, atóxicos e biodegradáveis (RAHIMI *et al.*, 2018). O ácido betalâmico (Figura 1) é considerado como a estrutura base das betalaínas, além de ser o seu grupo reativo principal (SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021). Em razão de ser o cromóforo da estrutura, devido à presença de ligações duplas conjugadas, é capaz de absorver luz ultravioleta e proporcionar coloração.

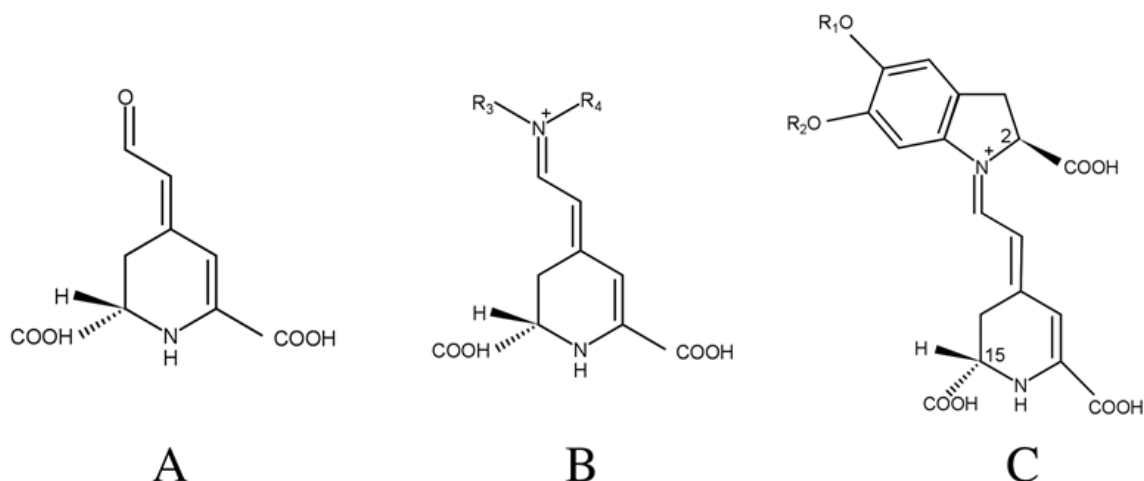
Deste modo, dependendo da natureza do resíduo do ácido betalâmico, as betalaínas podem ser classificadas em betaxantinas ou em betacianinas (Figura 1). Entretanto, pode haver subclassificações a depender da estrutura química. Por exemplo, a indicaxantina e miraxantina V são subclassificações das betaxantinas; enquanto as betaninas e betanidinas correspondem às betacianinas (HERBACH; STINTZING; CARLE, 2007; BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2017; SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021).

Geralmente, R<sub>1</sub> e R<sub>2</sub> condizem ao hidrogênio ou a grupos glicosilados, ao passo que R<sub>3</sub> se refere a amins ou a aminoácidos e R<sub>4</sub>, majoritariamente, ao hidrogênio. As betaxantinas são obtidas pela condensação de ácido betalâmico a compostos amino, proporcionando uma coloração amarelo-alaranjada. Enquanto as betacianinas são resultado da condensação de ácido betalâmico e da estrutura aromática ciclo-DOPA [ciclo-3-(3,4-dihidroxifenilalanina)] (HERBACH; STINTZING; CARLE, 2007; IMEN; TAHA; MANEF, 2017; SADOWSKA-BARTOSZ; BARTOSZ, 2021).

Essa condensação de ácido betalâmico e da estrutura aromática ciclo-DOPA proporciona um deslocamento de efeito batocrômico, ou seja, para uma coloração mais avermelhada (de 480 nm para 540 nm). Com isso, as betacianinas passam a proporcionar uma coloração de tonalidade violeta-avermelhada (KHAN; GIRIDHAR, 2015; AZEREDO, 2009;

HERBACH; STINTZING; CARLE, 2007; BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2017).

**Figura 1.** Estrutura do ácido betalâmico (A), betaxantinas (B) e betacianinas (C).



**Fonte:** Adaptado de Imen; Taha; Manef (2017) e de Sadowska-bartosz; Bartosz (2021)

No que condiz às propriedades antimicrobianas, Hayek e Ibrahim (2012) obtiveram a inibição do crescimento de *Escherichia coli* O157:H7 a partir da aplicação de extratos constituídos de betalainas de *Opuntia matudae*. Similarmente, Tenore *et al.* (2012) constataram atividade antimicrobiana a partir de extratos de betalainas de pitaya vermelha (*Hylocereus polyrhizus*) perante bactérias gram-negativas (*E. coli*, *P. mirabilis*, *P. vulgaris*, *P. aeruginosa*, *S. typhi*, *Y. enterocolitica*, *K. pneumoniae*, *E. cloacae*, *E. aerogenes*) com concentração inibitória mínima de 15,6-62,5 µg/mL a depender do microrganismo; bactérias gram-positivas (*B. cereus*, *S. aureus*, *E. faecalis*, *L.monocytogenes*) com concentração inibitória mínima de 7,8 µg/mL; leveduras (*C. albicans*, *R. solani*) com concentração inibitória mínima de 125-250 µg/mL; e bolores (*F. oxysporum*, *C. herbarum*, *B. cinerea*, *A. flavus*) concentração inibitória mínima de 500 µg/mL (HAYEK; IBRAHIM, 2012; TENORE *et al.*, 2012).

Em relação ao efeito hepatoprotetor das betalainas, observou-se a relação da presença de betalainas providas da casca da fruta do dragão (*Hylocereus polyrhizus*) com o alívio do acúmulo de lipídios hepáticos; a atenuação da formação de esteatose; e a diminuição do fator FGF21, um fator de crescimento regulador do metabolismo de glicose e de energia, que em

alto nível sérico é correlacionado com obesidade, tolerância à glicose diminuída, resistência à insulina, hipertrigliceridemia ou lesão hepática (ZHANG *et al.*, 2008; LE, 2021).

Conforme Belhadj Slimen, Najar e Abderrabba (2017), as betalaínas são consideradas compostos bioativos de alto poder antioxidante, sendo o ácido betalâmico capaz de doar elétrons para um agente oxidante, quelando-o, em razão de seu potencial de redução estar entre 0,4V e 0,6 V. Ademais, a presença de ciclos aromáticos em ressonância com o sistema de ressonância eletrônica principal, o ácido betalâmico, induz o aumento na atividade anti-radical (GANDÍA-HERRERO; ESCRIBANO; GARCÍA-CARMONA, 2009).

O ácido betalâmico exibe um  $pK_a$  de 6,8 e, conseqüentemente, sua ação antioxidante depende do pH do meio em que está inserido e dos radicais constituintes. Por exemplo, no grupo das betacianinas há divergências entre os compostos, enquanto que a betanina apresenta alta atividade antioxidante em pH maior que 4, a betanidina, a forma deglicolisada da betanina, em forma catiônica possui maior atividade em valores de pH entre 2 e 4 (GANDÍA-HERRERO; ESCRIBANO; GARCÍA-CARMONA, 2009; BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2017).

Nesta mesma perspectiva, a indicaxantina apresenta menor atividade antioxidante, tal fato decorre da atividade antioxidante das betaxantinas estarem em função do número de resíduos de hidroxí e imino. No caso das betacianinas, a acilação aumenta o potencial antioxidante, enquanto a glicosilação diminui. Betacianinas 6-O-glicosiladas exibem maior atividade de eliminação de radicais livres do que as contrapartes 5-O-glicosiladas (BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2017).

No que diz respeito à estabilidade das betalaínas frente a outras condições do meio, como quando expostas ao oxigênio, as betalaínas se apresentam mais estáveis ao nitrogênio do que ao oxigênio (HERBACH, STINTZING, CARLE, 2006). Deste modo, é oportuno que, quando aplicadas em produtos alimentícios, haja a aplicação de vácuo ou alteração atmosférica do meio. Ademais, de acordo com a literatura, a betanina demonstra ser mais estável entre pH 5,5 e 5,8 sob condições aeróbicas, enquanto sob condições anaeróbicas há estabilidade em pHs mais baixos, com valores próximos a 4,0 a 5,0 (BELHADJ SLIMEN; NAJAR; ABDERRABBA, 2017).

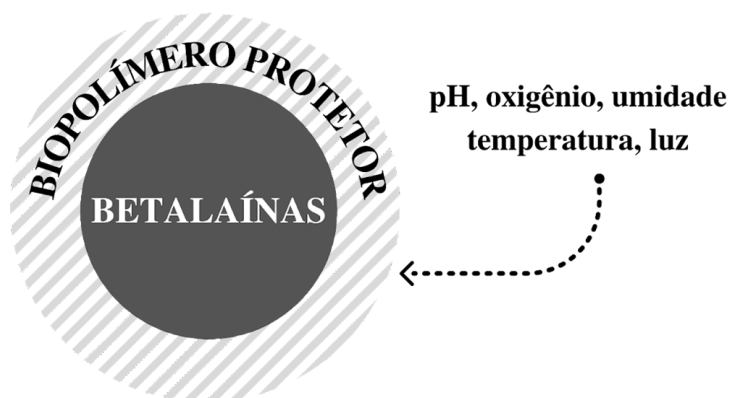
### 3.2. TECNOLOGIA DE ENCAPSULAMENTO

O encapsulamento é uma tecnologia na qual o composto bioativo é revestido por um biopolímero protetor, incluindo polissacarídeos (amidos, maltodextrinas, xaropes de milho, gomas), lipídios (ácido esteárico, mono e diglicerídeos), fibras (inulina), proteínas (gelatina, caseína, soro de leite, soja), entre outros (GIBBS *et al.*, 1999; RAVICHANDRAN *et al.*, 2014; SAÉNZ *et al.*, 2009).

Essa tecnologia altera o estado do composto em questão de líquido para sólido ou semissólido - a depender da técnica de encapsulamento a ser aplicada -, tornando-o mais fácil de manusear, evitando a formação de grumos, aprimorando a capacidade de fluxo e as propriedades de compressão e mistura, reduzindo a pulverulência das partículas do núcleo, alterando a densidade das partículas e prolongando o *shelf life* do composto bioativo (RAVICHANDRAN *et al.*, 2014).

Deste modo, a cápsula consiste em um núcleo, o respectivo material encapsulado, envolto por uma matriz encapsulante, a qual varia conforme a técnica de encapsulamento a ser aplicada (Figura 2). O sistema de encapsulamento pode ser classificado como do tipo reservatório, no qual o núcleo está nitidamente no centro da cápsula sendo envolvido por uma matriz contínua e definida; ou do tipo matricial, no qual o núcleo está completamente disperso na matriz, havendo uma pequena fração do material encapsulado permanecendo exposta na superfície (RÉ, 1998).

**Figura 2.** Esquema de encapsulamento do tipo reservatório apresentando barreira contra interação das condições do meio (pH, oxigênio, umidade, temperatura, luminosidade) com a betalaína, a qual se encontra no núcleo da cápsula, por meio de um biopolímero protetor.



**Fonte:** Autora (2022)

No entanto, o encapsulamento abrange uma diversidade de fatores que limitam a interação do corante com as condições adversas do meio, apresentando-se como uma barreira contra o oxigênio, com a umidade, com a luz e com as altas temperaturas, fatores que aceleram a degradação das betalaínas. De mesmo modo, esses fatores promovem a liberação controlada do composto bioativo encapsulado, tornando-se possível que o composto se mantenha estável por um maior período de tempo (GIBBS *et al.*, 1999; KHAN, 2016; RIBEIRO; VELOSO, 2020; SHISHIR *et al.*, 2018).

Tais fatores determinantes, como a matriz encapsulante e a técnica de encapsulamento, irão impactar diretamente na eficiência, e por consequência, na estabilidade desse composto bioativo, tendendo a proporcionar distintas características morfológicas e estabilidades das betalaínas.

## 4. METODOLOGIA

Realizou-se uma revisão de literatura integrativa de abordagem qualitativa de artigos publicados sobre encapsulamento de betalaínas extraídas de fontes naturais para fins de aplicação na indústria, principalmente, a alimentícia. A partir desta, tornou-se possível a sintetização dos variados estudos já publicados e o desenvolvimento de novas perspectivas e de uma maior compreensão específica sobre o encapsulamento de betalaínas.

Esta revisão de literatura foi dividida em seis principais etapas: a de elaboração da pergunta norteadora; a de busca e seleção de artigos de pesquisa na base de dados; a de qualificação dos artigos de pesquisa para revisão; a de coleta de dados, triagem e avaliação para a síntese; a de discussão dos resultados; a de apresentação dos dados neste documento.

### 2.1. ELABORAÇÃO DA PERGUNTA NORTEADORA

Alinhada à finalidade, delimitou-se fundamentar essa revisão integrativa em estudos que analisaram a aplicação da técnica de encapsulamento em betalaínas extraídas de diversas fontes naturais. Espera-se que seja possível a comparação e a discussão das distintas metodologias de encapsulamento e das suas respectivas características, avaliando a sua eficiência e aplicabilidade.

### 2.2. BUSCA E SELEÇÃO DE ARTIGOS DE PESQUISA NA BASE DE DADOS

A revisão abrangeu as bases de dados ScienceDirect, Springer e Scopus. Os respectivos termos de busca foram "*betalains encapsulation*"; "*betalains microencapsulation*" e "*betalains nanoencapsulation*". Este estudo se limitou a artigos em inglês desde o ano de 2009 até o ano de 2021.

### 2.3. QUALIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE PESQUISA PARA REVISÃO

Ao que se refere aos critérios de inclusão e exclusão, os estudos foram considerados elegíveis se satisfizessem os seguintes critérios: (i) ser publicado entre 2009 e 2021; (ii) ser publicado em revista científica com fator de impacto equivalente ou superior a 2,7; (iii) constituir de avaliação de, no mínimo, um dos seguinte parâmetros: eficiência de encapsulação, análise de cor, análise de teor e de estabilidade de betalaínas; (iv) ser publicado

na língua inglesa; (v) ser um artigo de pesquisa. Ao passo que, excluiu-se os estudos que utilizassem modelo *in vivo* no estudo, a fim de se limitar à avaliação da potencialidade de encapsulados de betalaínas para uso industrial.

#### 2.4. COLETA DE DADOS, TRIAGEM E AVALIAÇÃO

Primordialmente, os artigos pesquisados foram triados de acordo com o título, o resumo e as palavras-chave. Em seguida, os dados contidos nos artigos foram avaliados integralmente. Os dados de relevância dentre eles foram: a fonte para extração de betalaínas; a extração do corante; a matriz encapsulante; a técnica de encapsulamento e suas condições de processamento; a eficiência do encapsulamento; as análises aplicadas e seus resultados obtidos após o encapsulamento.

#### 2.5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Optou-se pelo desenvolvimento de infográficos e de quadros a partir dos dados de relevância avaliados e obtidos a partir desta revisão de literatura integrativa. Isto leva a uma análise comparativa mais eficiente, e conseqüentemente, a uma melhor compreensão e discussão sobre a área abordada neste trabalho.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No processo de busca, previamente à seleção de artigos para esta revisão, compreendeu-se que não há apenas um modelo de encapsulamento. A tecnologia de encapsulamento pode ser classificada em microencapsulamento (1 a 1000  $\mu\text{m}$ ) e em nanoencapsulamento (1 a várias centenas de nanômetros). E, por mais que o tamanho seja um fator determinante dessa classificação, os objetivos do microencapsulamento podem diferir dos objetivos referentes ao nanoencapsulamento, sendo este último o mais complexo (SHISHIR *et al.*, 2018).

O microencapsulamento é aplicado sobre o composto de interesse visando protegê-lo; controlar o seu perfil de liberação para assim estabilizar a coloração e suas propriedades físico-químicas - como o potencial antioxidante - no produto alimentício por um maior período de tempo; mascarar os seus sabores indesejáveis; e aumentar a sua vida útil. Ao passo que com o nanoencapsulamento, além das finalidades de uma microcápsula, a nanocápsula visa aumentar a área de superfície; aprimorar a biodisponibilidade, a estabilidade física e a barreira de reatividade entre bioativos e outros ambientes ou meios inseridos; assim como melhorar a absorção intracelular (SHISHIR *et al.*, 2018).

Neste mesmo viés, o custo operacional que abrange o nanoencapsulamento é superior do que quando comparado ao microencapsulamento, fator que impacta diretamente na opção da indústria para aplicação em produtos alimentícios. Esse maior custo é devido ao uso A seleção de uma matriz encapsulante de baixo custo para a tecnologia de nanoencapsulamento se destaca como um parâmetro de importância para aplicação industrial.

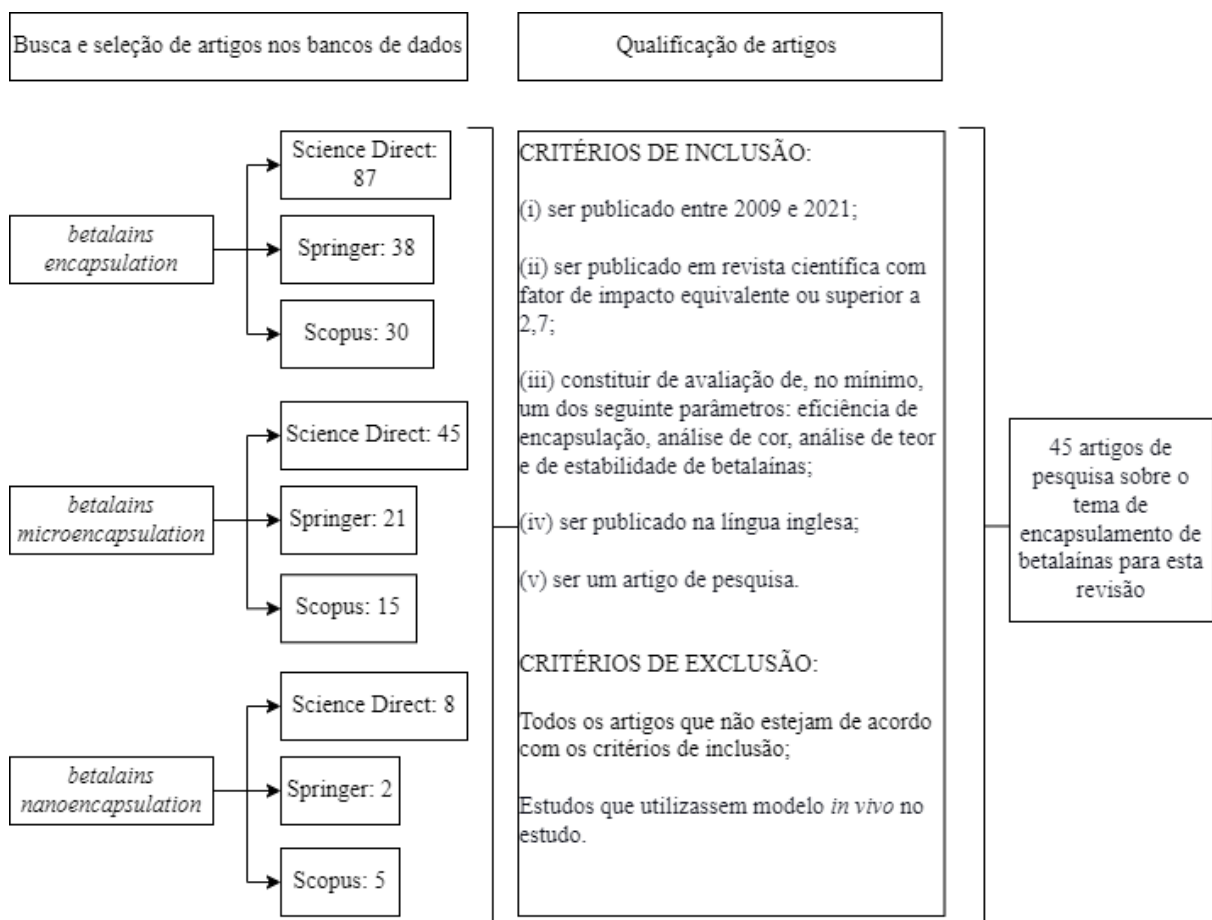
No caso do nanoencapsulamento, optar por lipossomas - preparados a partir de uma grande variedade de fosfolípidios - se apresenta como uma alternativa de alto custo operacional por mais que seja uma matriz de baixo custo (BHAI *et al.*, 2012). À medida que a aplicação de uma matriz polimérica, tal como poli(metacrilato de metila) (PMMA), demonstra ser uma opção de maior custo benefício, apesar de não ser indicada para uso alimentício devido à sua toxicidade (PAIVA, 2015)

Em uma estimativa financeira realizada por Paiva (2015), utilizando como base de dados os preços apresentados no sítio eletrônico da empresa Sigma Aldrich, o custo para o

preparo de um sistema de encapsulamento utilizando lipossomas é de R\$ 8,78/mL, à contrapartida que para o preparo de nanopartículas poliméricas é de R\$ 0,08/g. Destaca-se, portanto, que para uso na indústria alimentícia é necessário que haja uma avaliação prévia de toxicidade destas matrizes poliméricas para garantir que o consumidor não seja exposto à substâncias tóxicas ao consumir o produto alimentício no qual está inserido a nanocápsula.

Deste modo, como há distinções entre estas tecnologias e, de mesmo modo, estas compõem a tecnologia de encapsulamento em si, optou-se utilizar o microencapsulamento e o nanoencapsulamento como os termos de busca para esta revisão. A quantidade de resultados obtidos com a busca, seleção e qualificação de artigos nos bancos de dados podem ser conferidos no fluxograma a seguir.

**Figura 3.** Fluxograma dos resultados obtidos com a busca, seleção e qualificação de artigos nos bancos de dados para esta revisão de literatura integrativa.

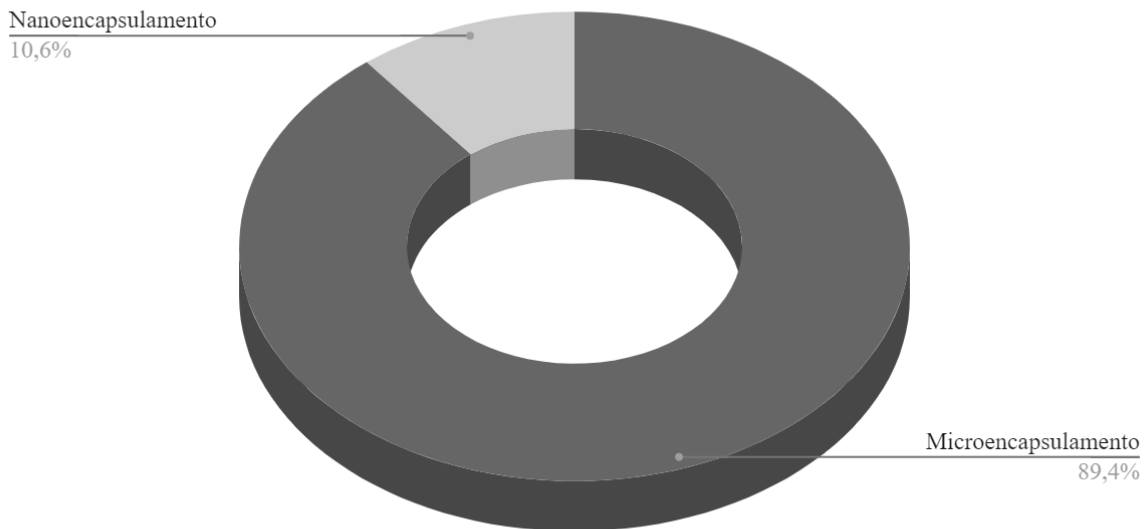


Fonte: Autora (2022)

A partir da busca e seleção de artigos nos bancos de dados, obteve-se um total de 87, 38 e 30 artigos científicos, respectivamente, no ScienceDirect, no Springer e no Scopus com a busca do termo "*betalains encapsulation*". Para o termo "*betalains microencapsulation*", foram encontrados 45, 21 e 15 artigos científicos respectivamente, no ScienceDirect, no Springer e no Scopus. Assim como, obteve-se um total de 8, 2 e 5 artigos científicos no ScienceDirect, no Springer e no Scopus com a busca do termo "*betalains nanoencapsulation*". Nesta perspectiva, é perceptível ainda no processo de busca e seleção que há uma escassez de estudos referentes ao nanoencapsulamento em comparação ao microencapsulamento.

Com a qualificação dos artigos, aplicando os critérios de inclusão e exclusão, obteve-se um total de 45 artigos de pesquisa sobre o tema de encapsulamento de betalaínas para esta revisão. E, a partir desses artigos qualificados, afirmou-se a escassez de estudos que aplicaram o nanoencapsulamento (10,6%) perante a quantidade de estudos incluídos para esta revisão que aplicaram o microencapsulamento (89,4%), como pode ser observado com o gráfico abaixo (Figura 4). A escassez do nanoencapsulamento pode ser devido a uma maior dificuldade operacional comparado ao microencapsulamento por ser uma tecnologia mais requintada. Exigindo, por exemplo, um maior controle para padronização de tamanho dos encapsulados resultantes.

**Figura 4.** Classificação dos artigos de acordo com a tecnologia de encapsulamento abordada.



**Fonte:** Autora (2022).

Deste modo, é visto como necessidade científica-experimental a realização de estudos de pesquisa que apliquem a técnica de nanoencapsulamento, avaliando quais as mais eficientes condições de encapsulamento e quais matrizes se apresentam como promissoras neste meio para condicionar de maneira eficaz as betalaínas, e conseqüentemente, torná-las viáveis para aplicação industrial.

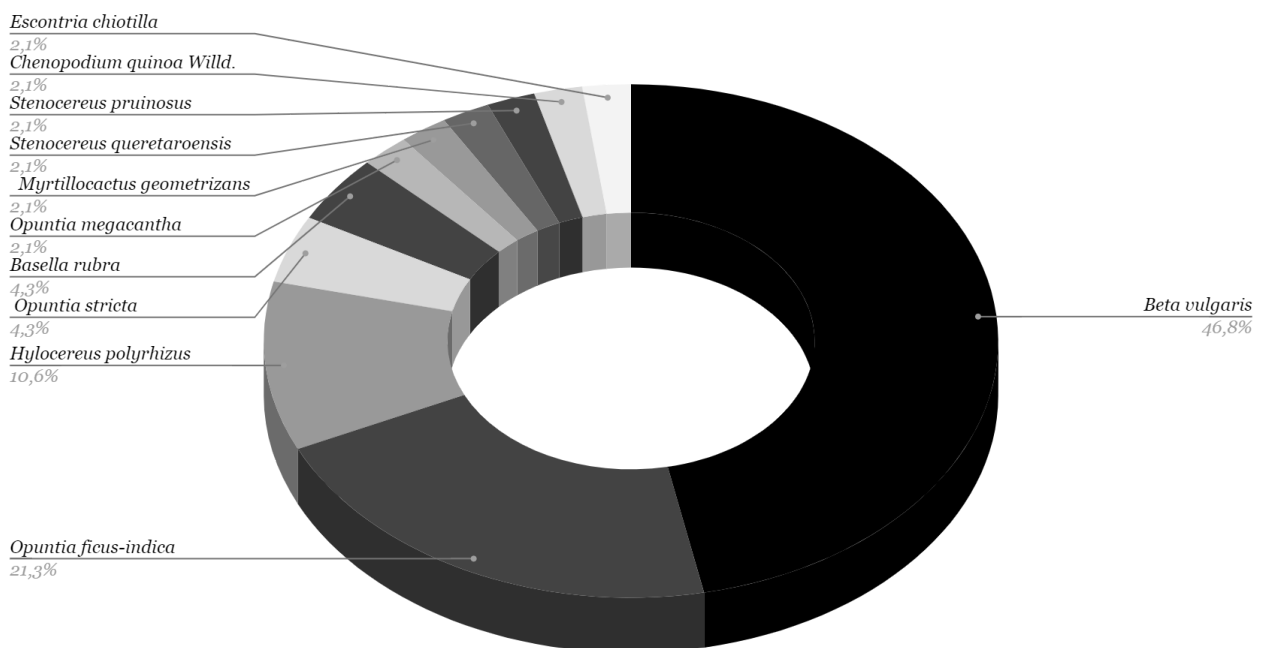
Com os tópicos a seguir serão apresentadas as fontes naturais de betalaínas que os artigos de pesquisa abordaram para extrair o composto bioativo em questão; as técnicas de encapsulamento existentes e as suas respectivas características; as matrizes encapsulantes envolvidas e as suas respectivas características de aplicação; os consequentes resultados obtidos com a tecnologia de encapsulamento; os fatores extrínsecos e intrínsecos que influenciam na estabilidade das betalaínas encapsuladas; e os produtos alimentícios em que os encapsulados de betalaínas possuem potencial para aplicação.

### 5.1. FONTES NATURAIS DE BETALAÍNAS

Observou-se que os estudos utilizaram betalaínas extraídas de distintas espécies vegetais (Figura 5) desde hortaliças, como a *Beta vulgaris* (46,8%) a frutos de cactáceos, tais como a do gênero *Opuntia* (27,7%). Conforme Castro-Muñoz *et al.* (2015) e Saénz *et al.*

(2009), por mais que os frutos do gênero *Opuntia*, uma cactácea, sejam amplamente consumidos *in natura* e fracamente aplicados industrialmente, esses possuem potencial para serem alternativas de corantes de coloração similar a sintética quando microencapsulados. Isso se deve à menor degradação ocasionada pela redução de suscetibilidade à contaminação microbiológica, consequência da diminuição da atividade de água pelo processo de encapsulamento (CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015).

**Figura 5.** Fontes naturais das betalainas abordadas nos artigos de pesquisa qualificados. Dentre elas, a *Beta vulgaris* (beterraba), a *Opuntia ficus indica* (cacto, figueira da Índia), a *Hylocereus polyrhizus* (pitaya vermelha ou fruta do dragão), a *Opuntia stricta* (orelha de elefante), a *Basella rubra* (bertalha ou espinafre-indiano), a *Opuntia megacantha* (palma-forrageira), a *Myrtillocactus geometrizans* (cacto de mirtilo), a *Stenocereus queretaroensis* (pitaya de querétaro), a *Stenocereus pruinosus* (tubo de órgão fantasma cinza), a *Chenopodium quinoa Willd.* (quinoa) e a *Escontria chiotilla* (jiotilla).



**Fonte:** Autora (2022).

Ademais, observou-se que os estudos de pesquisa avaliados e coletados possuem distinções geográficas, ou seja, esta revisão integrativa não se limita a um território nacional específico (Quadro 1). É necessário se atentar, de mesmo modo, que o conteúdo de betalaina

de determinada fonte natural é influenciado por fatores edafoclimáticos como cultivar ou sua respectiva variedade, fase de maturidade e clima ou local geográfico de produção (SAÉNZ *et al.*, 2009).

É perceptível que algumas pesquisas optaram por determinadas fontes vegetais constituídas de betalaínas em razão, provavelmente, do mais fácil acesso, do menor custo local e das condições edafoclimáticas locais. Citam-se a beterraba vermelha (*Beta vulgaris*) em estudos brasileiros, a bertalha (*Basella rubra*) em estudos da Índia e a pitaya vermelha (*Hylocereus polyrhizus*) predominantemente em estudos de território asiático (conforme Quadro 1).

**Quadro 1.** Fontes naturais de betalaínas e as suas respectivas origens de obtenção.

FONTES NATURAIS DE BETALAÍNAS	ORIGEM DE OBTENÇÃO	REFERÊNCIAS
Beterraba <i>(Beta vulgaris)</i>	México	PITALUA <i>et al.</i> (2010)
	Espanha	GANDÍA-HERRERO <i>et al.</i> (2013)
	Polônia	JANISZEWSKA <i>et al.</i> (2014)
	Alemanha	RAVICHANDRAN <i>et al.</i> (2014)
	Finlândia	KAIMAINEN <i>et al.</i> (2015)
	Grécia	CHRANIOTI <i>et al.</i> (2015)
	Sérvia	TUMBAS ŠAPONJAC <i>et al.</i> (2016)
	Lituânia	EISINAITE <i>et al.</i> (2016)
	Índia	SINGH <i>et al.</i> (2017)
	México	HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ <i>et al.</i> (2017)
	Sérvia	HIDALGO <i>et al.</i> (2018)
	Argentina	CALVO <i>et al.</i> (2018)
	Estados Unidos	AMJADI <i>et al.</i> (2018)

**Fonte:** Autora (2022).

**Continuação do Quadro 1.** Fontes naturais de betalaínas e as suas respectivas origens de obtenção.

Beterraba <i>(Beta vulgaris)</i>	Brasil	DO CARMO <i>et al.</i> (2018)
	Rússia	GORBUNOVA <i>et al.</i> (2018)
	Argentina	CALVO <i>et al.</i> (2018)
	Estados Unidos	AMJADI <i>et al.</i> (2018)
	Brasil	DO CARMO <i>et al.</i> (2018)
	Rússia	GORBUNOVA <i>et al.</i> (2018)
	Brasil	PAGANO <i>et al.</i> (2018)
	Brasil	ZUANON <i>et al.</i> (2019)
	Argentina	CALVO <i>et al.</i> (2019)
	Brasil	ANTIGO <i>et al.</i> (2020)
	México	FLORES-MANCHA <i>et al.</i> (2020)
Portugal	DIAS <i>et al.</i> (2020)	
Índia	MOHAMMED <i>et al.</i> (2021)	
Figueira da Índia ( <i>Opuntia ficus-indica</i> )	Chile	SAÉNZ <i>et al.</i> (2009)
	Chile	VERGARA <i>et al.</i> (2014)
	Argentina	OTÁLORA <i>et al.</i> (2015)
	Chile	ROBERT <i>et al.</i> (2015)
	Argentina	OTÁLORA <i>et al.</i> (2016)
	Espanha	FERNÁNDEZ-LÓPEZ <i>et al.</i> (2018)
	México	TOLEDO-MADRID <i>et al.</i> (2018)
	Argentina	OTÁLORA <i>et al.</i> (2019)
	Chile	ROBERT <i>et al.</i> (2020)
	Chile	CARMONA <i>et al.</i> (2020)

**Fonte:** Autora (2022).

**Continuação do Quadro 1.** Fontes naturais de betalaínas e as suas respectivas origens de obtenção.

Pitaya vermelha ou fruta do dragão ( <i>Hylocereus polyrhizus</i> )	Filipinas	RODRIGUEZ <i>et al.</i> (2016)
	Malásia	SHAARUDDIN <i>et al.</i> (2017)
	Indonésia	RAHAYUNINGSIH <i>et al.</i> (2020)
	Malásia	FATHORDOOBADY <i>et al.</i> (2020)
	Brasil	UTPOTT <i>et al.</i> (2020)
Orelha de elefante ( <i>Opuntia stricta</i> )	México	CASTRO-MUÑOZ <i>et al.</i> (2015)
	Portugal	DIAS <i>et al.</i> (2020)
Bertalha ou espinafre-indiano ( <i>Basella rubra</i> )	Índia	KARANGUTKAR <i>et al.</i> (2020)
	Índia	KUMAR <i>et al.</i> (2020)
Palma-forrageira ( <i>Opuntia megacantha</i> )	Argentina	OTÁLORA <i>et al.</i> (2018)
Cacto de mirtilo ( <i>Myrtillocactus geometrizans</i> )	México	HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ <i>et al.</i> (2017)
Tubo de órgão fantasma cinza ( <i>Stenocereus pruinosus</i> )	México	VARGAS-CAMPOS <i>et al.</i> (2018)
Quinoa ( <i>Chenopodium quinoa</i> Willd.)	Região do Altiplano Peruano	AGUILAR-TUESTA <i>et al.</i> (2018)
Jiotilla ( <i>Escontria chiotilla</i> ) e Pitaya de Querétaro ( <i>Stenocereus queretaroensis</i> )	México	DELIA <i>et al.</i> (2019)

**Fonte:** Autora (2022).

As betalaínas podem estar presentes nas distintas frações de uma planta, desde a fração mais carnosa dos frutos a frações de baixo valor comercial agregado, como as flores, os caules, as raízes, as sementes e as cascas. Citam-se como exemplos a casca da jiotilla (*Escontria chiotilla*), da pitaya de querétaro (*Stenocereus queretaroensis*) e da pitaya vermelha

ou fruta do dragão (*Hylocereus polyrhizus*) (DELIA *et al.*, 2018; RAHAYUNINGSIH *et al.*, 2020, FATHORDOOBADY *et al.*, 2020).

Conforme Delia *et al.* (2018), após microencapsular as betalaínas extraídas da casca da pitaya de querétaro (*Stenocereus queretaroensi*) e as comparar com as microcápsulas contendo as betalaínas extraídas de sua respectiva polpa, não foram perceptíveis diferenças significativas de tonalidades de cores entre ambas as partes da planta, conforme a análise estatística realizada (ANOVA;  $p \leq 0,05$ ). A concentração de betalaína provinda da casca pode representar até 96% das betalaínas contidas na polpa desta planta, tornando a casca uma fonte alternativa de betalaínas e incitando o aproveitamento desse resíduo. Quanto mais maduro for o fruto, maior será a concentração de betalaínas (DELIA *et al.*, 2018).

O teor de betalaínas na casca de pitaya também foi estudado por Fathordoobady *et al.* (2020) comparando o extrato da casca da pitaya microencapsulado com alginato através da gelificação iônica, de tamanho de  $106.32 \pm 6.77 \mu\text{m}$ , frente a betanina comercial com 99% de pureza e ao extrato não encapsulado. Neste estudo, após um período 60 dias de armazenamento à 4°C e na ausência de luminosidade, o conteúdo de betacianinas extraído da casca da pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) não encapsulado diminuiu 34,6%; a betanina comercial, 37,6%; e o conteúdo de betacianinas extraído da pitaya (*Hylocereus polyrhizus* L.) microencapsulado, reduziu apenas 17% (FATHORDOOBADY *et al.*, 2020).

No caso da pitaya vermelha, a casca corresponde 33% da fruta integral, sendo considerada uma alternativa em potencial para a beterraba vermelha na finalidade de extração de betalaínas para fins colorantes (FATHORDOOBADY *et al.*, 2020). Não obstante, ressalta-se que, em determinadas plantas, até mesmo as frações mais carnosas dos frutos, por ausência de processamento industrial e devido à abundância de frutos produzidos, são descartadas devido à sua alta perecibilidade produzindo resíduos que poderiam ser explorados pelo seu valor funcional (TOLEDO-MADRID; GALLARDO-VELÁZQUEZ; OSORIO-REVILLA; 2018).

Assim, a aplicação da tecnologia de encapsulamento para uso industrial na área de corantes se apresenta como uma alternativa benéfica para o aproveitamento da casca e das demais partes em potencial das fontes naturais de betalaínas, reduzindo os desperdícios

ocasionados no meio agrícola. E, ocasionando, portanto, o ampliamiento da cadeia produtiva industrial de fontes naturais.

Ressalta-se que determinadas fontes podem não constituir de um subgrupo de betalaínas de maior interesse, visto haver alteração de aspectos colorimétricos entre os subgrupos deste composto bioativo. As fontes naturais de betalaína não constituem um padrão de composição fixo. Determinadas fontes são constituídas em maior predominância por um determinado subgrupo de betalaínas. Co-encapsular esses distintos subgrupos em distintas proporções pode ser uma alternativa para que se obtenha encapsulados com características únicas e de potencial para aplicação em produtos alimentícios (GANDÍA-HERRERO *et al.*, 2013).

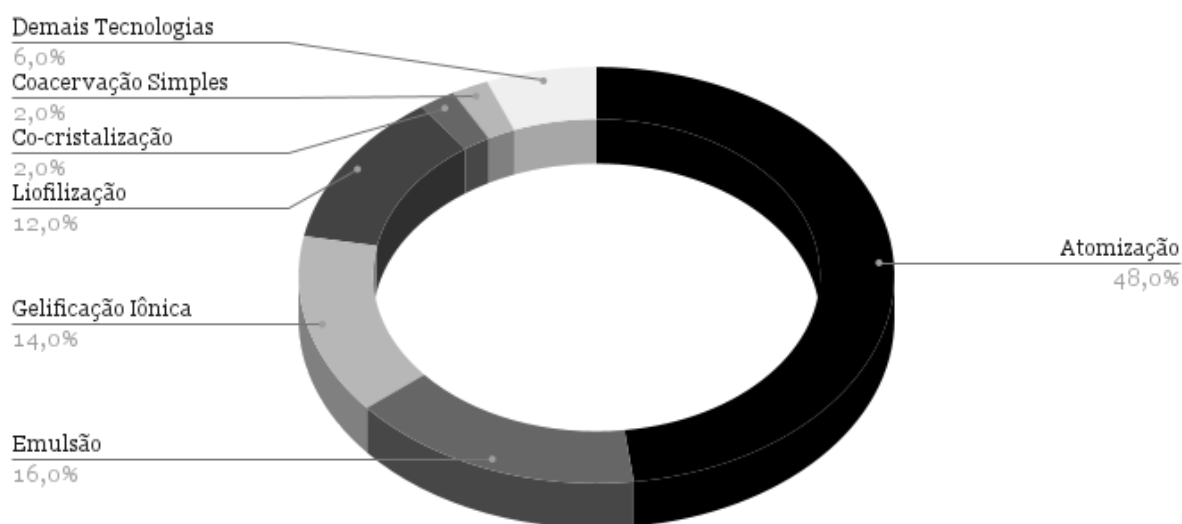
Gandía-Herrero *et al.* (2013) observaram que à medida que há o aumento da proporção de betanidina - subgrupo da betacianina - em relação à miraxantina V - subgrupo da betaxantina - se obtém uma tonalidade avermelhada e violácea. Enquanto à medida que a proporção de betaxantina é reduzida neste co-encapsulamento, o valor do parâmetro  $b^*$  diminui e do parâmetro  $a^*$ , aumenta. O parâmetro  $L^*$ , de mesmo modo, sofre alterações, reduzindo-se quando a betanidina se encontra em maior proporção, indicando uma redução na clareza dos pós. Com isso, o co-encapsulamento das betalaínas de uma determinada fonte ou de mais de uma pode ser uma alternativa para atingir resultados específicos de coloração e ampliar a cadeia produtiva das mais variadas fontes disponíveis.

E, anteriormente a qualquer aplicação de técnica de encapsulamento, é visto como necessário que haja uma preparação de tais fontes para que as betalaínas sejam extraídas. Esta preparação poderá ser executada de variadas formas, como por esmagamento e maceração (ÓTALORA *et al.*, 2016) com solvente (SÁENZ *et al.*, 2009) ou não; esmagamento seguido de filtração e liofilização (ÓTALORA *et al.*, 2015; ÓTALORA *et al.*, 2018); redução de tamanho e centrifugação (RAVICHANDRAN *et al.*, 2012; SHAARUDDIN *et al.*, 2017); ultrafiltração (VERGARA *et al.*, 2014); ou até mesmo a combinação destes métodos de preparos para que se atinja uma eficiente extração com resultado esperado. O ideal é que esta preparação seja realizada em condições brandas para conservar o composto bioativo para posterior encapsulamento, independentemente da técnica a ser utilizada.

## 5.2. TÉCNICAS DE ENCAPSULAMENTO

Do mesmo modo que há relevância em realizar uma preparação nas fontes naturais para que se obtenha um extrato de betalaínas de resultado esperado, é relevante que haja uma pré-avaliação para determinar as características esperadas para o encapsulado. Por exemplo, pré-determinar a morfologia final, como a esfericidade e o diâmetro, visto serem dependentes da matriz e das condições de encapsulação relacionadas ao encolhimento, inchamento e tamanho de partícula, e não do composto bioativo em si (GANDÍA-HERRERO *et al.*, 2013). Assim, torna-se possível alinhar a técnica a ser aplicada a este resultado esperado. A tecnologia de encapsulamento pode ser realizada através das técnicas de atomização (48%), emulsão (16%), gelificação iônica (14%), liofilização (12%), co-cristalização (2%) e coacervação simples (2%) (Figura 6).

**Figura 6.** Técnicas de encapsulamento abordadas nos artigos de pesquisa qualificados, dentre tais, encontram-se a atomização, a emulsão, a gelificação iônica, a liofilização, a co-cristalização, a coacervação simples e as demais técnicas possíveis - tal como a ultrassonificação.



**Fonte:** Autora (2022).

Por mais que a atomização seja a mais aplicada, Otálora e seus colaboradores em seus distintos estudos relatam as vantagens referentes a gelificação iônica perante a atomização. Conforme Otálora *et al.* (2018), a gelificação iônica é uma técnica por gotejamento e extrusão

simples, rápida, eficiente, ecológica, de baixo custo e que não necessita de um equipamento especializado, de alta temperatura ou de solventes orgânicos, enquanto a atomização é percebida como uma técnica mais complexa.

Tal complexidade decorre do fato de a atomização ser dependente de distintas condições operacionais. Por exemplo, na atomização, a qualidade do produto e a eficiência do pó são fatores que dependem diretamente das condições de operação, tais como a temperatura de entrada e saída do ar, a vazão de alimentação, a velocidade ou pressão de atomização, relação alimentação/portador, a viscosidade do agente encapsulante, entre outras (OTÁLORA *et al.*, 2015; DELIA *et al.*, 2018).

Não obstante, como pôde ser observado na literatura, a aplicação da técnica de atomização possui como vantagem perante a técnica de gelificação iônica a sua maior adequação à produção em larga escala de modo contínuo. Com isso, a atomização se apresenta favorável em meio industrial (OTÁLORA *et al.*, 2015; OTÁLORA *et al.*, 2018)

Nesta mesma lógica comparativa, Ravichandran *et al.* (2012) compararam experimentalmente a liofilização com a atomização. A partir deste estudo, observou-se que quando há aplicação de maltodextrina em conjunto com a goma xantana como matrizes encapsulantes, a técnica de liofilização ocasiona uma maior retenção de betalaínas (65%) do que a microcápsula obtida por atomização (21%).

Essa maior estabilidade a partir da técnica de liofilização, provavelmente, deve-se à baixa exposição a altas temperaturas e à viscosidade da matriz goma xantana. A viscosidade é uma condição operacional que quanto mais elevada, mais prejudicial para a eficiência e rendimento do encapsulamento por atomização, devido à aderência que proporciona à parede interna da câmara de secagem. Enquanto para a técnica de liofilização, essa condição não ocasiona interferências no resultado obtido (SINGH *et al.*, 2017; RAVICHANDRAN *et al.*, 2012).

E, assim como percebido na técnica de gelificação iônica, quando há aplicação da técnica de encapsulamento em escala industrial contínua, a atomização se torna mais viável do que a liofilização. A atomização se destaca por ser de menor custo à liofilização - capaz de atingir até 50 vezes menos custos envolvidos para o processamento; de boa eficiência; de

coloração menos escura; e de boa estabilidade do produto acabado (RAVICHANDRAN *et al.*, 2012; FERNÁNDEZ-LÓPEZ, 2018).

Cada técnica de encapsulamento possui suas respectivas características que impactam diretamente e de maneira variável no processo de encapsulamento das betalaínas, desde a sua viabilidade na área industrial à eficiência de encapsulamento, produzindo deste modo encapsulados distintos a depender da técnica optada. Por isso, realizou-se uma comparação entre as técnicas aplicadas nos artigos de pesquisa qualificados para esta revisão e as suas respectivas características de processamento (Quadro 2).

**Quadro 2.** Técnicas de encapsulamento e as suas respectivas características abordadas nos artigos de pesquisa qualificados.

TÉCNICAS DE ENCAPSULAMENTO	CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIAS
ATOMIZAÇÃO	Técnica econômica de custo baixo a intermediário	PITALUA <i>et al.</i> (2010)
	Adequada à produção em larga escala de modo contínuo	RAVICHANDRAN <i>et al.</i> (2014)
	Eficiência de encapsulamento variável às condições operacionais, podendo atingir até 100% de eficiência	FERNÁNDEZ-LÓPEZ <i>et al.</i> (2018)
	Encapsulado de coloração clara	ROBERT <i>et al.</i> (2015)
	Encapsulado resultante com aspecto sólido (pó)	OTÁLORA <i>et al.</i> (2015)
	Técnica complexa e dependente das mais variadas condições operacionais e características da matriz encapsulante (exemplo: viscosidade)	OTÁLORA <i>et al.</i> (2018)
	Curto tempo de processamento	CASTRO-MUÑOZ <i>et al.</i> (2015)
EMULSÃO	Redução da tensão superficial	VERGARA <i>et al.</i> (2014)
	Alta estabilidade térmica do encapsulado obtido, cor vermelha de tonalidade intensa e estabilidade química durante o armazenamento a baixas temperaturas	RAHAYUNINGSIH <i>et al.</i> (2020)
	Comportamento de liberação controlada	UTPOTT <i>et al.</i> (2020)

**Fonte:** Autora (2022).

**Continuação do Quadro 2.** Técnicas de encapsulamento e as suas respectivas características abordadas nos artigos de pesquisa qualificados.

EMULSÃO	Encapsulado resultante com aspecto semi sólido a líquido	EISINAITE <i>et al.</i> (2016) PAGANO <i>et al.</i> (2018)
	Estabilidade dependente das características do extrato	MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA (2021)
GELIFICAÇÃO IÔNICA	Técnica simples, de custo relativamente baixo e que envolve condições brandas	CALVO; SANTAGAPITA; PERULLINI (2019)
	Eficiência de encapsulamento próxima a 80%	OTÁLORA <i>et al.</i> (2018)
	Encapsulado resultante com aspecto semissólido a sólido	FATHORDOOBADY <i>et al.</i> , 2020
LIOFILIZAÇÃO	Técnica de custo elevado	RAVICHANDRAN <i>et al.</i> (2014)
	Encapsulados escuros	CHRANIOTI <i>et al.</i> (2015)
	Encapsulado resultante com aspecto sólido (pó)	TUMBAS ŠAPONJAC <i>et al.</i> (2016)
	Alta versatilidade de matrizes encapsulantes, não havendo interferência por causa da viscosidade da matriz	HIDALGO <i>et al.</i> (2018)
	Alta eficiência de encapsulamento, estabilidade e recuperação de betalaínas	FLORES-MANCHA <i>et al.</i> (2020)
	Longo tempo de processamento	
COACERVAÇÃO SIMPLES	Técnica econômica e simples	RAHAYUNINGSIH <i>et al.</i> (2020)
	Eficiência de encapsulamento de próxima a 90%	

**Fonte:** Autora (2022).

**Continuação do Quadro 2.** Técnicas de encapsulamento e as suas respectivas características abordadas nos artigos de pesquisa qualificados.

COACERVAÇÃO SIMPLES	Proporciona alta integridade do envoltório da cápsula	
	Encapsulado resultante com aspecto líquido	
CO-CRISTALIZAÇÃO	Técnica econômica e simples	KARANGUTKAR; ANANTHANARAYAN (2019)
	Eficiência de encapsulamento próxima a 65%	
	Encapsulado resultante com aspecto sólido	
	Aprimora a solubilidade, a dispersibilidade e a estabilidade	

**Fonte:** Autora (2022).

A partir do quadro acima, torna-se perceptível que as técnicas de encapsulamento são fatores que influenciam diretamente na eficiência do encapsulamento, assim como, na retenção, na recuperação e no rendimento dos encapsulados. A retenção compara o teor de sólidos antes e após o encapsulamento (Equação 1). A recuperação de um encapsulado é determinada pela eficiência (Equação 2) considerando as perdas do produto. O rendimento (Equação 3) está correlacionado com a afinidade do material da parede, os compostos encapsulados, assim como, a técnica envolvida (VERGARA *et al.*, 2014; UTPOTT *et al.*, 2020; FLORES-MANCHA *et al.*, 2020).

**Equação 1.** Equação para obtenção da retenção do encapsulamento (%), onde  $Bc_i$  é a concentração de betalínas do extrato líquido e  $Bc_f$  é a concentração de betalínas das microcápsulas.

$$RB (\%) = \frac{B_{cf}}{B_{ci}} \times 100$$

**Fonte:** Adaptado de Utpott *et al.* (2020)

**Equação 2.** Equação para obtenção da eficiência do encapsulamento (%).

$$EE (\%) = \frac{\text{betalaína experimental total} - \text{betalaínas superficiais}}{\text{betalaína experimental total}} \times 100$$

**Fonte:** Adaptado de Vergara *et al.* (2014)

**Equação 3.** Equação para obtenção do rendimento do encapsulamento (%), onde  $W_2$  é o peso do produto obtido (g) e  $W_1$  peso de massa na alimentação (g).

$$RE (\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100$$

**Fonte:** Adaptado de Flores-Mancha *et al.* (2020)

A eficiência baseia-se na quantificação de betalaínas superficiais e internas da cápsula. Ou seja, depende da capacidade da matriz encapsulante em reter no núcleo o material encapsulado. Avaliando, portanto, a capacidade de interação entre a matriz e o composto bioativo. Parâmetros como diluição do extrato e tempo de mistura influenciam na eficiência de encapsulação do composto bioativo (VERGARA *et al.*, 2014; FLORES-MANCHA *et al.*, 2020; TUMBAS ŠAPONJAC *et al.*, 2016).

Conforme Vergara *et al.* (2014), a recuperação de betacianinas e betaxantinas microencapsuladas pela técnica de atomização foi alta, com 70,9% a 72,4% e 88,5% a 96,8%, respectivamente, para o sistema utilizando a polpa de *Opuntia ficus-indica* e o sistema ultrafiltrado obtido, respectivamente. Resultado congruente com o obtido por Pitalua *et al.* (2010), no qual a recuperação das betalaínas de beterraba foi de 88,2%. Altos índices de recuperação podem ser atribuídos a curtos períodos de tempo de exposição a altas temperaturas ou à rápida formação de uma crosta seca (VERGARA *et al.*, 2014; PITALUA *et al.*, 2010).

O rendimento, não obstante, pode atingir índices inferiores quando comparados com a eficiência de encapsulamento e de recuperação de betalaínas, como o visto por Vergara *et al.*

(2014), em que o rendimento variou de 62,6% a 65,3%. Quando se comparam as técnicas de atomização com a de liofilização, a maior recuperação e menor degradação de betalaínas durante a liofilização - devido à não exposição a altas temperaturas - em comparação com a atomização demonstra que a liofilização resulta num maior rendimento (VERGARA *et al.*, 2014; FLORES-MANCHA *et al.*, 2020).

Saenz *et al.* (2009), aplicando maltodextrina ou inulina como matrizes encapsulantes em encapsulados de suco clarificado de cacto roxo (*Opuntia stricta*) submetidos à atomização, obtiveram rendimentos entre 23 g/100 g e 81 g/100 g. Enquanto Flores-Mancha *et al.* (2020) utilizando as mesmas matrizes em técnica de liofilização obtiveram rendimentos na faixa de 36 g/100 g a 65 g/100 g.

No que diz respeito à eficiência, conforme o estudo realizado por Tumbas Šaponjac *et al.* (2016) com encapsulado utilizando proteína isolada de soja, maltodextrina e inulina e suas misturas, condições como uma baixa interação núcleo-parede (50,50 g/L) - protegendo, portanto, com maior eficiência o composto bioativo frente a fatores externos do meio -, baixa diluição do extrato (0,22) e tempo de mistura médio (14,1 min) se apresentam como ideais para a garantia da máxima eficiência de encapsulamento (86,16%).

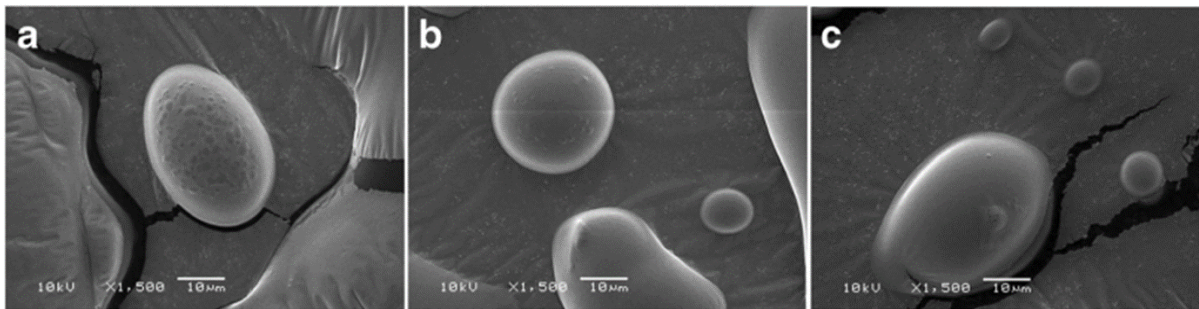
Embora as técnicas e as suas respectivas matrizes influenciam a eficiência do encapsulamento, o modo como as cápsulas são armazenadas impactam diretamente na estabilidade das betalaínas encapsuladas, em médio a longo prazo (dias a meses); fator de relevância para aplicações industriais, como a área alimentícia. As condições ideais de estocagem e a correlação entre os fatores intrínsecos e extrínsecos aos alimentos - como, por exemplo, a exposição e umidade relativa do ar não controladas e a matriz encapsulante do encapsulado - para a estabilidade das betalaínas serão relatadas nesta revisão de literatura integrativa no tópico “Fatores influenciadores na estabilidade das betalaínas encapsuladas” (Tópico 5.4)

### 5.2.1. Técnica de Atomização

A atomização é considerada como uma técnica econômica que preserva compostos bioativos (PITALUA *et al.*, 2010). Os encapsulados obtidos por atomização são caracterizados por serem mais esféricos e uniformes (Figura 7) do que os encapsulados

obtidos pelas demais técnicas. Tal característica se apresenta como oportuna visto a natureza esférica das partículas possibilitarem que o pó flua melhor e sejam mais facilmente solubilizadas em um solvente adequado, em comparação com partículas maiores, devido à sua maior área de superfície (OTÁLORA *et al.*, 2018). Entretanto, demais características, como o diâmetro, a rugosidade e a presença ou ausência de aglomeração são características dependentes das condições aplicadas com esta técnica.

**Figura 7.** Microscopia eletrônica de varredura das microcápsulas de betalaínas em ampliações de 1500 × mostrando seu formato e integridade. a MC. b MU. c MG. MC: microcápsula com 10% de maltodextrina; MU: microcápsula com 10% de maltodextrina e 1% de mucilagem; MG: microcápsula com 10% de maltodextrina e 1% de gelatina.



**Fonte:** Utpott *et al.* (2020)

O princípio da técnica de atomização consiste em dispersar o material do núcleo - as betalaínas - em uma matriz encapsulante, seguido pela atomização (inserção do fluxo de ar quente sob determinadas condições operacionais dentro de uma câmara (RAVICHANDRAN *et al.*, 2012). A técnica de atomização possui diversas condições operacionais que influenciam na eficiência de encapsulação da cápsula obtida, dentre elas, cita-se a sua ampla variação de temperaturas de entrada e de saída de ar, assim como, entre os fluxos (PITALUA *et al.*, 2010).

A entrada de ar se apresenta com temperatura superior à saída. Por exemplo, na atomização realizada por Pitalua *et al.* (2010) as temperaturas de entrada e saída de ar foram, respectivamente, de  $180\pm 5^{\circ}\text{C}$  e  $85\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Entretanto, essa entrada de ar pode variar de  $90^{\circ}\text{C}$  a  $220^{\circ}\text{C}$ , ocasionando alterações morfológicas no encapsulado resultante a depender desta

condição (SAÉNZ *et al.*, 2009; PITALUA *et al.*, 2010 VERGARA *et al.*, 2014; CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015).

Experimentalmente foi perceptível que as baixas temperaturas de entrada de ar reduzem a retenção do composto bioativo e a difusão de água, com isso, as partículas possuem mais tempo para encolhimento; ao passo que altas temperaturas influenciam nas características sensoriais do produto final e aceleram o processo de evaporação, ocasionando uma alta pressão dentro das partículas provocando encolhimento do encapsulado, além de aumentar a higroscopicidade da cápsula (SAÉNZ *et al.*, 2009; PITALUA *et al.*, 2010 VERGARA *et al.*, 2014; CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015).

O fluxo de ar - de secagem e de atomização -, a taxa de fluxo de alimentação e a pressão de atomização também são outras condições que influenciam no processo de atomização e conseqüentemente no rendimento e na eficiência do encapsulamento. Entretanto, as condições ótimas da técnica de atomização a serem aplicadas são características de cada sistema estudado (VERGARA *et al.*, 2014).

Para Vergara *et al.* (2014) a aplicação de 133°C de temperatura de ar de entrada; 600 L/h de fluxo de ar; 3 mL/min (5%) de taxa de fluxo de alimentação e 5 bar de pressão de atomização resultou em uma eficiência de encapsulamento betalaínas entre 98,6 e 99,3% para os encapsulados secos por atomização utilizando amido de milho modificado. Embora tenha sido aplicado apenas uma matriz encapsulante no estudo realizado por Vergara *et al.* (2014), os autores constataram que a depender do tipo extração das betalaínas das fontes naturais será necessário um reajuste na proporção de matriz encapsulante.

Essa distinção é vista quando é aplicada uma menor incorporação da matriz encapsulante nos sistemas com apenas a polpa prensada de *Opuntia ficus-indica* (3:1) do que nos sistemas ultrafiltrados (2,5:1). Isso se deve ao fato, conforme os autores, de que a mucilagem e os açúcares contidos na polpa podem atuar, mesmo que indiretamente, como matrizes encapsulantes, interferindo na eficiência e estabilidade das betalaínas encapsuladas (VERGARA *et al.*, 2014).

Para Castro-Muñoz *et al.* (2015), a aplicação de uma taxa de fluxo de ar de 32900 L/h; de pressão de 39,2 bar; de 1 mL/min de taxa de fluxo de alimentação; e de uma

temperatura de ar de entrada variando de 110°C a 140°C resultou em encapsulados com distintas eficiências que dependeram, de mesmo modo, da proporção de matriz encapsulante - gelatina (G) e/ou maltodextrina (M).

Nesse estudo, as eficiências de encapsulamento das betalaínas foram de 18,1% a 57,3%. A mínima eficiência (18,1%) foi resultante da aplicação de uma temperatura de ar de 117,5°C com proporção de 1:0 de M:G de matriz encapsulante. Ao passo que a máxima eficiência (57,3%) resultou de uma temperatura de ar de entrada de 125°C com proporção de 5:5 de M:G de matriz encapsulante (CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015).

A taxa de fluxo de alimentação condicionada na câmara de atomização impacta diretamente na eficiência do encapsulamento. Enquanto Janiszewska *et al.* (2014), em uma taxa de alimentação baixa - inferior a 0,3 mL/min - obtiveram um encapsulado mais viscoso, de difícil manuseio, Singh *et al.* (2017) observaram que à medida que a taxa de fluxo de alimentação aumenta, o teor de umidade aumenta. Conforme Singh *et al.* (2017), essa relação é atribuída ao menor tempo de contato em uma maior taxa de alimentação, tornando a transferência de calor menos eficiente e reduzindo a taxa de evaporação da água.

Desta forma, a técnica de atomização é influenciada pelas condições operacionais envolvidas; pelas características das fontes naturais de betalaínas, como a solubilidade, a viscosidade e a pureza dos extratos; pelas propriedades da matriz encapsulante a ser aplicada no processo ou pela combinação de variadas matrizes; e pela proporção entre a(s) matriz(es) e o composto bioativo. Com isso, é compreensível que a escolha errônea de tais parâmetros resultará em um encapsulado não tão promissor com provável baixa eficiência, retenção, recuperação e/ou rendimento de encapsulados de betalaínas.

### 5.2.2. Técnica de Emulsão

A partir desta revisão integrativa da literatura observou-se que o processo de emulsão pode ter duas finalidades. O processo de emulsão pode ser tanto considerado uma técnica preliminar à secagem - no processamento utilizando a técnica de liofilização - na qual há mistura do extrato contendo composto bioativo em sua respectiva matriz encapsulante sob

processo de agitação até completa homogeneização e estabilização, quanto uma técnica independente de encapsulamento.

Emulsões duplas ou múltiplas são descritas como sendo emulsões dentro de emulsões, as quais podem ser estabilizadas por meio da aplicação de emulsificantes, como a proteína de soro de leite, o poliricineoleato de poliglicerol e a lecitina de soja. Nesta técnica de encapsulamento uma fase é dispersa em outra a partir de pequenas gotículas, e no caso de emulsões múltiplas, a resultante desta emulsão dupla é dispersa em uma fase consecutiva (KAIMAINEN *et al.*, 2015; MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021; TOLEDO-MADRID; GALLARDO-VELÁZQUEZ; OSORIO-REVILLA; 2018).

Há emulsões nas quais gotículas de água (a) dispersas em gotículas de óleo (o) são dispersas em uma fase aquosa contínua (a), formando uma emulsão caracterizada em a/o/a. De mesmo modo que há emulsões nas quais as gotículas de óleo (o) dispersas em gotículas de água (a) são dispersas em uma fase de óleo contínua (o), constituindo uma emulsão o/a/o (KAIMAINEN *et al.*, 2015). No caso de encapsulamento das betalaínas através da técnica de emulsão, o método mais recomendado é quando gotículas de água dispersas em gotículas de óleo são dispersas em uma fase aquosa contínua (a/o/a), de modo que as betalaínas se encontram nas gotículas de água visto serem compostos hidrossolúveis.

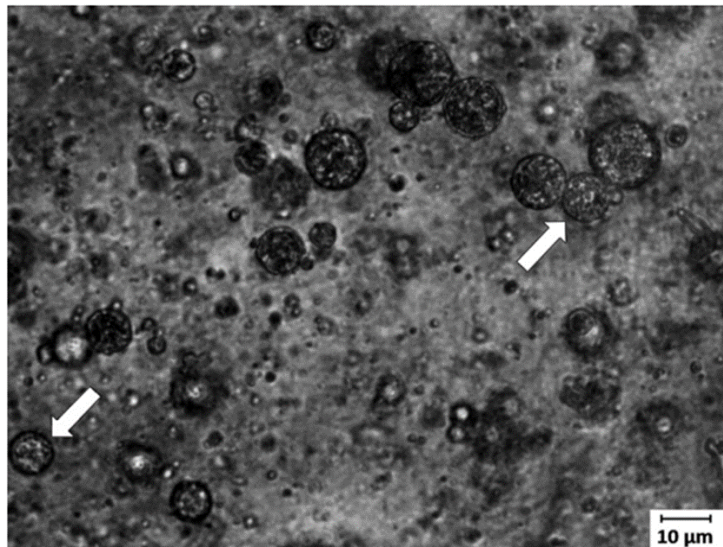
A liberação das betalaínas é controlada pelos mecanismos de desestabilização das estruturas da emulsão dupla, tais como a formação de creme, a sedimentação, a floculação e a coalescência (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021; KAIMAINEN *et al.*, 2015). Kaimainen *et al.* (2015) e Pagano *et al.* (2018) obtiveram emulsões polidispersas e instáveis de tamanho de gota maior que se separou por fase após o armazenamento à temperatura ambiente, enquanto Mohammed, Ishwarya e Nisha (2021) obtiveram microemulsões estáveis e com distribuição de tamanho de gota monodispersa.

Variações no tamanho da gota podem ser justificadas por meio das diferenças na composição da emulsão e das condições de homogeneização do rotor. E, no caso de emulsificação de baixa energia, como homogeneização de alta velocidade, a alta concentração de emulsificante facilita a formação espontânea de pequenas gotas ocasionando

tensão interfacial ultrabaixa. E quanto menor for a tensão, maior será a estabilidade da emulsão (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021).

As emulsões são diretamente dependentes de determinadas condições de processamento, dentre tais, o tamanho das gotículas de emulsão, a diferença de densidade e a viscosidade da fase contínua. Como observado por Kaimainen *et al.* (2015), é possível que o tamanho da gotícula seja influenciado pela quantidade de emulsões nas quais as betalaínas são submetidas. Conforme estes autores, é possível que as gotículas menores (313 nm) correspondam às gotículas da emulsão a/o primária, enquanto as maiores (6,6  $\mu\text{m}$ ), de maior predominância, correspondam às gotículas da emulsão a/o secundária (Figura 8).

**Figura 8.** Resultado da análise de microscopia eletrônica de varredura das microcápsulas de betalaínas da emulsão dupla. Pequenas gotículas de a<sub>1</sub>/o de fase aquosa interna podem ser vistas dentro das gotículas de óleo maiores, confirmando a estrutura de uma emulsão dupla. Setas brancas apontam exemplos de gotas a<sub>1</sub>/o/a<sub>2</sub>



**Fonte:** Kaimainen *et al.* (2015).

Em uma emulsão os mecanismos de desestabilização podem tanto aumentar quanto reduzir o tamanho do encapsulado. Enquanto a instabilidade oxidativa proporciona a redução de tamanho devido à ocorrência de hidrólise dos lipídeos e, conseqüentemente, formação de

compostos hidrossolúveis, assim como, a diminuição da viscosidade da fase dispersa provoca redução de tamanho (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021; PAGANO *et al.*, 2018).

O aumento no diâmetro médio das gotículas com o aumento na temperatura de armazenamento é atribuído à agregação, sendo a possível razão para a coalescência das gotas, em temperaturas de armazenamento mais elevadas, a perda de água, que propicia conexões entre os grupos adjacentes de constituintes da emulsão e a desidratação dos tensoativos hidrofílicos incorporados na formulação da emulsão (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021).

Neste viés, em baixas temperaturas de armazenamento, alterações moleculares são retardadas, não havendo aumento no diâmetro de gota das emulsões. Assim como, obtém-se uma maior uniformidade e homogeneidade. Portanto, é indicado o armazenamento em baixas temperaturas (inferior ou igual a 4°C) dos encapsulados obtidos por emulsão, principalmente, no caso de nanoencapsulados, garantindo o diâmetro esperado (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021).

Em contrapartida, caso haja um estresse relevante no encapsulado, obtido por emulsão, provocado pelo choque frente a altas temperaturas no processo de secagem, a tendência é que haja uma redução de tamanho, sendo pouco estável e altamente suscetível à quebra quando expostas a certas tensões. Essa tendência foi percebida nas microcápsulas estudadas por Toledo-Madrid; Gallardo-Velázquez; Osorio-Revilla (2018). Por mais que tenha tido redução de tamanho, houve estabilização na estrutura e integridade do encapsulado (TOLEDO-MADRID; GALLARDO-VELÁZQUEZ; OSORIO-REVILLA, 2018).

Mohammed, Ishwarya e Nisha (2021) relataram que a nanoemulsão apresenta ser um sistema mais apropriado para o encapsulamento do extrato de beterraba para obter maior estabilidade e funcionalidade. Esta conclusão é devido às seguintes propriedades: (i) dimensões de gotículas em nanoescala; (ii) redução da tensão superficial; (iii) alta viscosidade; (iv) comportamento reológico não newtoniano independente do tempo satisfeito pelo modelo de Herschel Bulkley; (v) alta estabilidade térmica, cor vermelha de tonalidade intensa e estabilidade química durante o armazenamento; e (vi) comportamento de liberação controlada (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021).

Detalha-se que um aprimorado comportamento de liberação controlada é atribuído a um menor tamanho de encapsulado e uma maior viscosidade, características percebidas em nanoemulsões. Em 4 h sob aquecimento, liberou-se 95% da betalaína encapsulada da microemulsão. Enquanto em nanoemulsão, a taxa se apresentou mais lenta, com menos de 55% liberado em 4 h (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021). A liberação controlada apresenta ser um parâmetro de valor agregado à tecnologia de encapsulamento, visto induzir uma padronização na estabilidade de cor no encapsulado ao decorrer do período de estocagem (MOHAMMED; ISHWARYA; NISHA, 2021).

Adicionalmente, pode-se incluir nas propriedades, uma eficiência superior na nanoemulsão quando comparada a uma microemulsão. A eficiência é um fator dependente pelo tipo de emulsão escolhido, pelas condições de processamento e pela natureza da emulsão. Mohammed, Ishwarya e Nisha (2021) obtiveram uma eficiência de 64% para microemulsão e 72% para a nanoemulsão, enquanto Kaimainen *et al.* (2015) uma eficiência de 89% para extratos aquosos de betalaína em dupla emulsão, e Eisinaite *et al.* (2016), de 98% a 100%.

A eficiência, similarmente à técnica de atomização, é impactada com as características do extrato. Como analisado por Pagano *et al.* (2018) e Eisinaite *et al.* (2016), no suco de beterraba em pó e concentrado, a presença de altas concentrações de sal e de outras biomoléculas, como carboidratos, afetaram a tensão interfacial e aumentaram a diferença de pressão osmótica, desestabilizando a emulsão, resultando, portanto, em emulsões polidispersas com cápsulas de maior tamanho.

O aumento significativo da viscosidade de encapsulados obtidos por emulsões duplas a/o/a está relacionado ao efeito de intumescimento causado por diferenças de pressão osmótica nas fases da água. Ao ser ajustada a pressão osmótica da fase aquosa interna e externa, a emulsão torna-se menos viscosa e, portanto, mais estável (EISINAITE *et al.*, 2016).

Entretanto, caso não haja esse ajuste, a oscilação de viscosidade de uma emulsão pode acarretar uma separação de fases (EISINAITE *et al.*, 2016). Em relação à estabilidade, é perceptível a necessidade de mais estudos que avaliem a estabilidade de micro e

nanoemulsões de betalaínas, conferindo qual destas opções se torna a mais viável e de maior aplicabilidade em escala industrial para produto de alta *shelf life*.

### 5.2.3. Técnica de Gelificação Iônica

A gelificação iônica é uma técnica na qual há aplicação de hidrocolóides gelificantes, tal como o alginato de sódio ou de cálcio, como matrizes encapsulantes. O alginato de sódio é um heteropolissacarídeo extraído de distintas espécies de algas. É considerada uma matriz natural, atóxica, biodegradável, capaz de formar redes por meio de cátions, como  $\text{Ca}^{2+}$ . O alginato pode ser aplicado industrialmente como espessante, aprimorando a textura de xaropes, de molhos e de iogurtes; assim como, estabilizante, para se obter sorvetes de textura mais lisa, por exemplo. Sendo assim considerada uma matriz de alta aplicabilidade na indústria alimentícia (FATHORDOOBADY *et al.*, 2020).

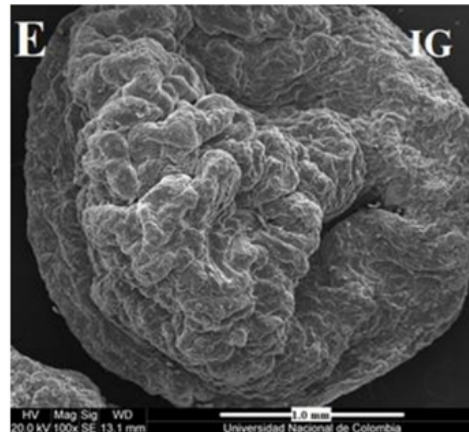
A gelificação iônica se trata de uma técnica simples, de baixo custo e de condições brandas que não agredem o material a ser encapsulado. Esta técnica consiste na incorporação das betalaínas em uma solução constituída de material encapsulante. Essa solução é homogeneizada e, posteriormente, submetida à extrusão gota a gota, através de uma pipeta de calibre reduzido ou de uma seringa, para uma solução, geralmente cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) (CALVO; SANTAGAPITA; PERULLINI, 2019; FATHORDOOBADY *et al.*, 2020).

Resultados divergentes em relação às demais técnicas podem ser obtidos. De acordo com estudo realizado por Otálora *et al.* (2018), o encapsulado obtido pela técnica de gelificação iônica, utilizando alginato de sódio, proporcionou uma estabilização no parâmetro  $L^*$  em relação à polpa liofilizada. Entretanto, quando comparado ao encapsulado obtido pela técnica de atomização, na qual utilizou a associação de mucilagem com maltodextrina, esse se apresenta 6,5 vezes menor. Em contrapartida, o encapsulado de gelificação iônica apresentou, para o parâmetro  $a^*$ , um valor 9 vezes maior que o encapsulado de atomização (OTÁLORA *et al.*, 2018)

No que diz respeito à morfologia (Figura 9), a técnica de gelificação iônica pode resultar em partículas irregulares de rugosidade abundante e fissuras na superfície, provavelmente devido às tensões promovidas pelo encolhimento ao decorrer do encapsulamento (OTÁLORA *et al.*, 2018). Entretanto, essa morfologia pode ser alterada

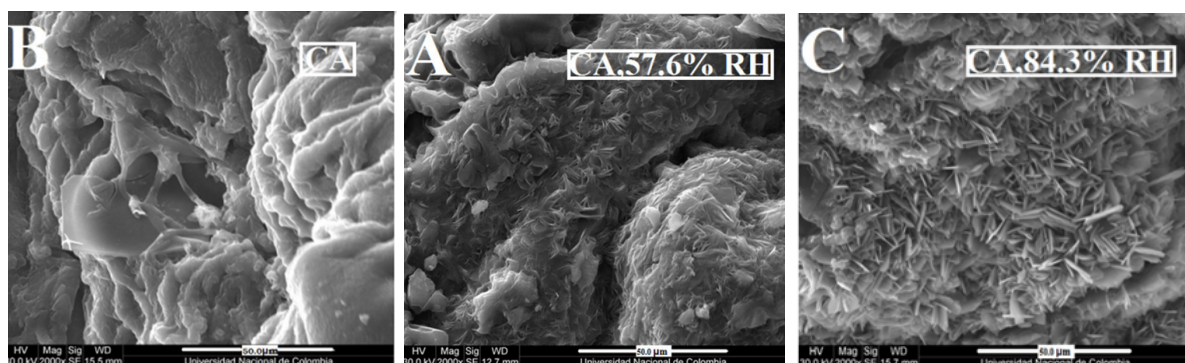
conforme a umidade relativa do ar no período de armazenamento, a matriz encapsulante envolvida e a quantidade de  $\text{CaCl}_2$  (Figura 10) (OTÁLORA *et al.*, 2016; FATHORDOOBADY *et al.*, 2020).

**Figura 9.** Resultado da análise de microscopia eletrônica de varredura da amostra obtida por gelificação iônica em  $100\times$ .



**Fonte:** Otálora *et al.* (2018).

**Figura 10.** Resultados da análise de micrografia eletrônica de varredura em  $2000\times$  de grânulos de hidrogel de alginato de cálcio no tempo inicial (B); após 25 dias de armazenamento a  $25^\circ\text{C}$  com 57,6% de umidade relativa do ar (A) e com 84,3% de umidade relativa do ar (C).



**Fonte:** Otálora *et al.* (2016).

No estudo realizado por Fathordoobady *et al.* (2020), constataram-se determinadas correlações neste estudo: a eficiência de encapsulamento (%) e o tamanho médio de partícula

( $\mu\text{m}$ ) das microesferas se apresentaram mais dependentes da proporção aplicada de alginato (%), enquanto  $\text{CaCl}_2$  (mM) e a uniformidade da matriz de alginato, da concentração de extrato de betacianinas (%).

No que diz respeito ao estudo do comportamento de liberação, aprimorou-se em até 2 vezes mais em comparação com o extrato de betacianina não encapsulado e a solução controle comercial de betanina. Assim como, obteve-se uma melhoria na retenção (83%) e no tempo de meia-vida ( $t_{1/2}$ ). Deste modo, há potencialidade para aplicação em produtos alimentícios de baixa acidez que são submetidos a processos com temperaturas até  $100^\circ\text{C}$  e que correspondem a uma maior vida de prateleira (FATHORDOOBADY *et al.*, 2020).

#### 5.2.4. Técnica de Liofilização

A liofilização é uma técnica que promove a sublimação da água livre, desidratando a cápsula. Devido à baixa temperatura, a ação microbiológica e reações físico-químicas degradativas são interrompidas, obtendo um produto de melhor qualidade. Com isso, a aplicação desta técnica é recomendada para compostos termossensíveis, como as betalainas, até pelo fato de proporcionar altas recuperações deste composto após o processo de encapsulamento (RAVICHANDRAN *et al.*, 2012).

No que diz respeito ao rendimento, altos valores - 61,7% utilizando agave inulina e 65,3% aplicando maltodextrina como matrizes encapsulantes - podem ser devido à afinidade do material da parede, os compostos encapsulados e a maior recuperação e menor degradação de betalainas durante a liofilização (FLORES-MANCHA *et al.*, 2020).

Do mesmo modo que na técnica de encapsulamento por liofilização é possível uma maior versatilidade de matrizes encapsulantes, visto não se limitar às propriedades, como o relatado na técnica de atomização, na qual se encaixa a viscosidade. Nesta técnica, é possível a aplicação de goma xantana e goma guar em maiores concentrações quando comparado à atomização (RAVICHANDRAN *et al.*, 2012). Conforme Ravichandran *et al.* (2012), o encapsulamento por liofilização utilizando goma xantana proporcionou uma maior recuperação de betalainas em até 1,3 vezes do que o por atomização.

Entretanto, a liofilização é uma técnica que abrange um longo período de processamento. Por exemplo, para o encapsulamento de betalaínas por liofilização, Tumbas Šaponjac *et al.* (2016) homogeneizou as misturas e as congelou a 18°C por 3 h para, em seguida, liofilizar a 40°C por 48 h para que haja a secagem completa. Deste modo, é compreensível os altos custos exigidos para a realização desta técnica de encapsulamento (TUMBAS ŠAPONJAC *et al.*, 2016).

No que diz respeito à coloração, em estudo comparativo da liofilização com a técnica de atomização, Ravichandran *et al.* (2012) constataram que os encapsulados liofilizados são mais escuros do que os encapsulados atomizados. Porém, constatou-se uma maior estabilidade quando as betalaínas são submetidas à técnica de liofilização utilizando a goma xantana do que quando submetidas à técnica de atomização utilizando a maltodextrina como matriz encapsulante (RAVICHANDRAN *et al.*, 2012).

De acordo com Chranioti, *et al* (2015), quando se comparam as matrizes encapsulantes maltodextrina (MD); amido modificado (MS) - resultante da incorporação de um componente lipofílico que proporciona interação betalaína-polímero ocasionado por interações similares às demais matrizes encapsulantes já citadas (VERGARA *et al.*, 2014); goma arábica (GA) e quitosana (CH) - isoladamente ou associadas umas às outras - obtém-se a seguinte ordem de proteção: maltodextrina > goma arábica > goma arábica amido modificado > amido modificado-quitosana > amido modificado-maltodextrina-quitosana. Havendo similaridade entre a maltodextrina e a goma arábica em seu efeito térmico protetor. De modo que a aplicação de maltodextrina na técnica de atomização, além de se apresentar possível, se torne desejável.

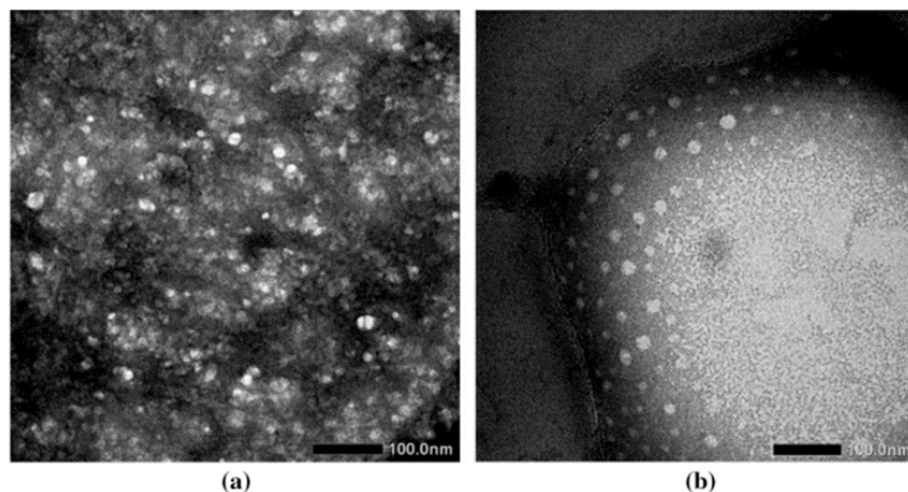
#### 5.2.5. Técnica de Coacervação Simples

A coacervação é uma técnica simples e econômica que promove alta eficiência e alta integridade do envoltório da cápsula, além de ser possível ser mantida mantida na fase líquida ao invés da fase sólida. Essa técnica consiste no revestimento contínuo do composto bioativo por meio da adsorção de água até a formação de um gel através da aplicação de uma matriz gelificante como a pectina e as gomas. O encapsulado é obtido através da agitação das

betalaínas com a matriz encapsulante em sistema rotacional que pode variar de 400 rpm a 800 rpm (RAHAYUNINGSIH *et al.*, 2020).

Rahayuningsih *et al.* (2020) demonstraram que esta técnica proporciona uma alta eficiência ( $93,2 \pm 3,1\%$ ) quando aplicada pectina de alto teor de metoxilação com ácido acético como agente gelificante. A pectina como matriz encapsulante foi proposta para microencapsular a betacianina por adsorção da água formada durante a coacervação para formação de um gel. Entretanto, devido a pectina corresponder a uma grande molécula, o encapsulado utilizando esta matriz geralmente constitui de um maior tamanho (RAHAYUNINGSIH *et al.*, 2020). Deste modo, para uma microcápsula a pectina se apresenta como uma alternativa de matriz.

**Figura 11.** Resultados da análise de microscopia eletrônica de varredura de betacianina (a) antes do processo de coacervação simples e (b) após o processo de coacervação simples.



**Fonte:** Rahayuningsih *et al.* (2020)

De acordo com os autores, a relação núcleo/parede mais alta ocasiona uma menor retenção, devido aos teores menores de matriz encapsulante de coacervação fornecidos na solução para estabilizar a betacianina. À contrapartida, a razão núcleo/parede baixa fornece uma maior quantia de matriz encapsulante para a solução e, por sua vez, uma área de superfície maior para encapsulamento (RAHAYUNINGSIH *et al.*, 2020).

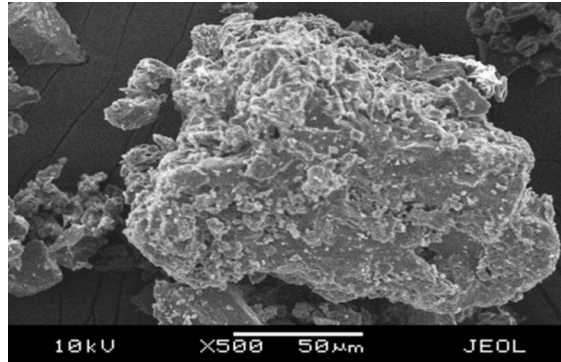
A partir da aplicação desta técnica, houve uma estabilidade de betacianinas de até 78% em condições desfavoráveis de temperatura (entre 80°C e 100°C) para as betalainas *in natura*, ou seja, não encapsuladas (RAHAYUNINGSIH *et al.*, 2020). Entretanto, por mais que haja uma maior estabilidade a partir da aplicação da técnica de coacervação, é necessário que sejam realizados estudos de pesquisa mais aprofundados sobre este aspecto. Essa necessidade é devido à técnica de coacervação não ser usualmente aplicada em compostos hidrossolúveis por não proporcionar condições adequadas para adsorção polimérica, promovendo uma liberação não controlada (SCHMITT *et al.*, 1998).

#### 5.2.6. Técnica de Co-cristalização

A co-cristalização é uma técnica que consiste na incorporação do composto bioativo em uma solução supersaturada de sacarose resultando em uma cristalização simultânea de ambos os componentes. Nesta técnica a estrutura cristalina sólida, densa e lisa da sacarose se altera para cristais aglomerados, irregulares, de área superficial aumentada e porosa, sendo possível assim a incorporação do composto bioativo em questão. A co-cristalização aprimora a solubilidade, a dispersibilidade e a estabilidade do composto bioativo (KARANGUTKAR; ANANTHANARAYAN, 2019).

Conforme Karangutkar e Ananthanarayan (2019), os co-cristais produzidos apresentaram alta eficiência de encapsulamento ( $64.93 \pm 1.94\%$ ) das betalainas extraídas da *Basella rubra*. As matrizes encapsulantes aplicadas foram a sacarose e a goma acácia, sendo essa última implementada para aprimorar a estabilidade e a retenção máxima da betacianina, proporcionando uma meia-vida ( $t_{1/2}$ ) de  $223,75 \pm 7,22$  dias. Ademais, os co-cristais apresentaram um baixo teor de umidade, uma baixa higroscopicidade e uma baixa atividade de água.

**Figura 12.** Resultado da análise de microscopia eletrônica de varredura do extrato de *Basella rubra* co-cristalizado com sacarose e goma acácia.



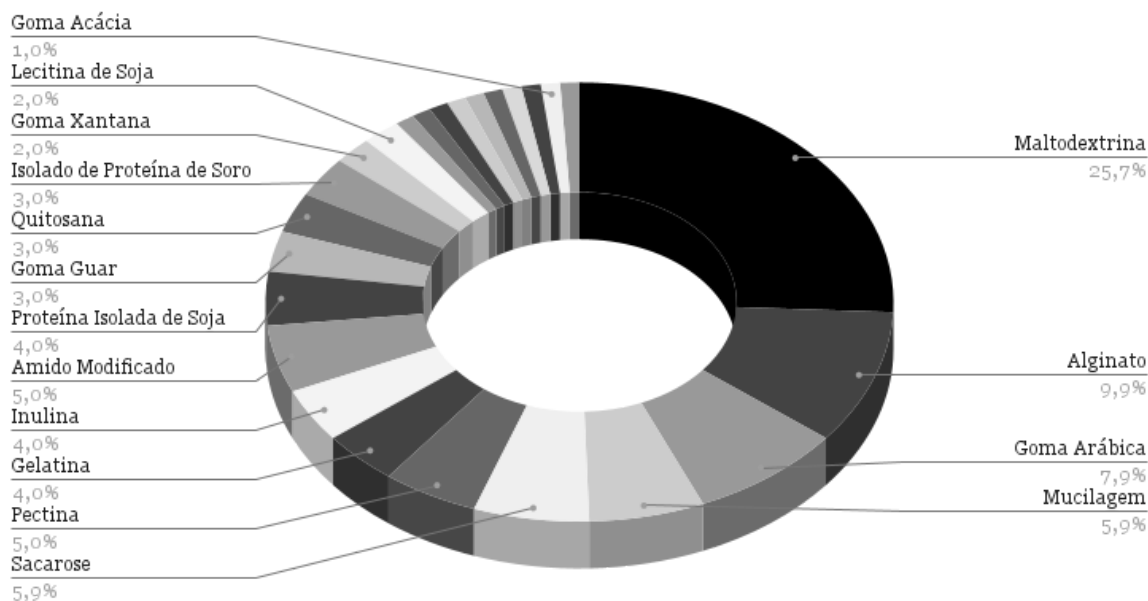
**Fonte:** Karangutkar e Ananthanarayan (2019).

Nesta perspectiva, a aplicação da técnica de co-cristalização para o encapsulamento de betalainas se apresenta como uma alternativa industrial para produtos alimentícios de extenso *shelf life*, nos quais há finalidade ou necessidade de colorir naturalmente e adoçar.

### 5.3. MATRIZES ENCAPSULANTES

A escolha da matriz encapsulante é uma etapa relevante para que haja um processo eficiente e que depende da aplicação final do composto bioativo encapsulado (CHRANIOTI, *et al.* 2015). A partir da análise realizada referente às técnicas de encapsulamento aplicadas nos artigos de pesquisa qualificados para esta revisão, tornou-se perceptível a existência de uma variedade de matrizes encapsulantes (Figura 13).

**Figura 13.** Matrizes encapsulantes utilizadas para o encapsulamento de betalainas nos artigos de pesquisa qualificados para esta revisão. Dentre tais matrizes, encontram-se maltodextrina; alginato – de cálcio ou de sódio; goma arábica, xantana ou acácia; mucilagem; sacarose; pectina; gelatina; inulina; amido modificado; proteína isolada de soja; goma guar; quitosana; isolado ou concentrado de proteína de soro de leite; lecitina de soja; transglutaminose; lipossomas; albumina de soro bovino; óleo de girassol, de soja, de canola etc.; glicerol; e glicose.



**Fonte:** Autora (2022).

Destaca-se a maltodextrina para atomização; o alginato para a gelificação iônica; e as gomas para a liofilização. Como já relatado, é possível, e em certas ocasiões sugerível como o relatado nos estudos de Ravichandran *et al.* (2012), de Castro-Muñoz *et al.* (2015) e de Antigo *et al.* (2020), que haja combinações entre as matrizes encapsulantes.

No entanto, a combinação equivocada de técnica de encapsulamento com a matriz encapsulante poderá resultar em uma menor eficiência de encapsulamento. Com isso, o quadro abaixo (Quadro 3) apresenta as técnicas de encapsulamento com as suas possíveis matrizes encapsulantes a partir desta revisão de literatura integrativa.

**Quadro 3.** Técnicas de encapsulamento com as suas possíveis matrizes encapsulantes.

TÉCNICA DE ENCAPSULAMENTO	MATRIZ MAIS INDICADA
ATOMIZAÇÃO	Maltodextrina
	Combinação de maltodextrina com mucilagem, polissacarídeo, gelatina ou goma
EMULSÃO	Óleo de soja, de canola ou de girassol combinado à um emulsificante
GELIFICAÇÃO IÔNICA	Combinação de alginato de cálcio ou de sódio com cloreto de cálcio (agente gelificante)
LIOFILIZAÇÃO	Gomas
CO-CRISTALIZAÇÃO	Gomas e açúcar
COACERVAÇÃO SIMPLES	Pectina com presença de ácido acético como agente gelificante

**Fonte:** Autora (2022).

Entretanto, determinadas matrizes se destacam ora devido à técnica de encapsulamento optada, ora devido às suas características físico-químicas. Neste viés, esta revisão de literatura integrativa enfatizou uma maior compreensão da maltodextrina, das gomas, da mucilagem, da inulina, da gelatina, dos lipossomas e de suas possíveis associações umas às outras como matrizes encapsulantes.

A maltodextrina é resultante da hidrólise parcial do amido. Essa matriz é conhecida por induzir o aumento do diâmetro da partícula, devido à expansão de ar possibilitada pela formação rápida de uma superfície vítrea, como constatado por Otálora *et al.* (2015), assim como, ocasionar uma maior solubilidade - acima de 90%; uma baixa viscosidade; e um sabor suave às cápsulas em que é aplicada, podendo ser aplicada em formulações em pó de bebidas instantâneas ou sucos na indústria alimentícia (CARMONA *et al.*, 2020; SAÉNZ *et al.*, 2009).

A maltodextrina está disponível em diferentes pesos moleculares de baixos a médios (OTÁLORA *et al.*, 2015; RAVICHANDRAN *et al.*, 2012), e conforme Gandía-Herrero *et al.* (2010) e Singh *et al.* (2017), aprimora a estabilidade das betalaínas durante o armazenamento, através do aumento da temperatura de transição vítrea, assim como, estabiliza as propriedades antioxidantes.

A aplicação desta matriz de maneira isolada é predominantemente utilizada no processo de atomização e pode ser aplicada através de suas distintas equivalentes de dextrose. A depender do grau de hidrólise da maltodextrina há alterações moleculares como rupturas nas agregações poliméricas, impactando no tamanho e no formato, provocando uma leve, porém geralmente significativa, variação nas temperaturas de transição vítrea (SAÉNZ *et al.*, 2009; JANISZEWSKA *et al.*, 2014; ANTIGO *et al.*, 2020; OTÁLORA *et al.*, 2015).

Entretanto, é possível realizar a associação entre a maltodextrina e demais matrizes encapsulantes, dentre elas, pode-se citar a mucilagem, um carboidrato complexo solúvel em água. A hidrólise completa da mucilagem resulta em polissacarídeos  $\beta$ -D-xilose,  $\alpha$ -D-glucose e ácido 4-O-metil- $\alpha$ -D-glucurônico. A mucilagem pode ser obtida dos cladódios dos frutos da palma forrageira ou da chia, podendo assim ser considerada uma matriz econômica e de fácil acesso (LIN; DANIEL; WHISTLES; 1994; CARMONA *et al.*, 2020; DELIA *et al.*, 2018)

Ambas as matrizes são polissacarídeos de propriedades emulsificantes, porém de distintas estruturas físico-químicas entre si, capazes de formar interações como dipolo-dipolo e ligações de hidrogênio com moléculas como betalaína e água (DELIA *et al.*, 2018; OTÁLORA *et al.*, 2015).

A aplicação de mucilagem associada a maltodextrina proporciona o aumento de eficiência das microestruturas, reduzindo o teor de umidade desta e adquirindo uniformidade das partículas, além de promover uma morfologia esférica (OTÁLORA *et al.*, 2015). Utpott *et al.* (2020), no processo de microencapsulação por atomização, constataram que a combinação de duas matrizes carreadoras, como a mucilagem e a maltodextrina, aumentou a retenção das betalaínas em 7% em relação ao extrato líquido.

Ademais, a aplicação da mucilagem ocasionou um aumento na estabilidade nas condições de armazenamento estudadas, havendo uma retenção superior a 80% do composto bioativo em 50 dias e uma eficiência de encapsulação acima de 90%, além de um baixo teor de atividade de água e de umidade (UTPOTT *et al.*, 2020). Deste modo, correlacionam-se os resultados obtidos por Utpott *et al.* (2020) e Otálora *et al.* (2015) no que se diz respeito à diminuição da umidade e à alta eficiência de encapsulamento.

Outra vantagem da aplicação da mucilagem, de acordo Delia *et al.* (2018) é a sua capacidade de retenção (90%) num período consideravelmente extenso, correspondente a 90 dias. Ademais, essa é uma matriz de alta disponibilidade, de menor custo e que proporciona vantagens à saúde, tais como, o aumento dos teores de fibras alimentares insolúveis (OTÁLORA *et al.*, 2015; DELIA *et al.*, 2018). Desta maneira, a mucilagem se apresenta como sendo uma matriz em potencial, adequada e bem-sucedida para atuar como agente encapsulante.

A associação da mucilagem com a maltodextrina proporciona características peculiares na morfologia que apresentam ser oportunas, como uma maior esfericidade e superfícies lisas e pouco aglomeradas, devido ao alto peso molecular da mucilagem, evitando a contração da superfície e formando uma barreira contínua (OTÁLORA *et al.*, 2015). Neste mesmo viés, Otálora *et al.* (2015) observaram que o encapsulado no qual houve a aplicação apenas da maltodextrina como matriz - a qual proporciona açúcares de baixo peso molecular - apresentou uma superfície rugosa, de maior aglomeração de partículas.

Por outro lado, caso a mucilagem não seja cuidadosamente dosada, é possível que não haja uma barreira contínua desejável na cápsula resultante e haja um encapsulado esférico, porém de superfície rugosa, ocasionado pela perda intensa de umidade e/ou do resfriamento repentino durante processo de atomização (DELIA *et al.*, 2018). Portanto, para aplicação da mucilagem como matriz encapsulante é necessário se atentar com a concentração a ser aplicada no processo de encapsulamento. Por exemplo, em concentrações acima de 4%, a mucilagem exibe uma tendência nítida de formar redes macromoleculares e agregados dificultando a interação entre a indicaxantina da polpa e a matriz (CARMONA *et al.*, 2020).

Antigo *et al.* (2020) relatou que em concentrações superiores a 0,5%, a mucilagem confere alta viscosidade à solução, dificultando a atomização. É por isso que se torna inviável a aplicação isolada de mucilagem como matriz encapsulante, principalmente na técnica de atomização, necessitando que haja a associação com a maltodextrina para se obter um resultado promissor. A dificuldade pertinente para aplicação da mucilagem em termos de concentração ideal para a combinação devido à viscosidade da matriz ocorre do mesmo modo para as gomas, como a goma xantana, a goma guar e a goma arábica. Tal fato ocorre com as gomas pela mesma tendência físico-química da mucilagem.

De acordo com Antigo *et al.* (2020) a mucilagem de chia liofilizada associada a maltodextrina submetida ao processo de atomização resultou em um maior teor de betacianina - de 207 a 212 mg de betacianina/100 g de pó - em correlação aos encapsulados que utilizaram a combinação de maltodextrina com goma arábica - obtendo de 149 mg de betacianina/100 g - ou apenas a maltodextrina isolada - de 142 mg de betacianina/100 g de pó.

Essa dificuldade é mais perceptível na técnica de encapsulamento por atomização, visto a viscosidade ser uma condição operacional limitante para a escolha de uma matriz encapsulante no processo de encapsulamento por atomização. A goma guar, goma xantana e a goma arábica, por exemplo, são matrizes que se apresentam inviáveis para aplicação isolada - no caso da goma guar inviável mesmo que em combinação com a maltodextrina - devido à alta viscosidade característica de tais matrizes encapsulantes (OTÁLORA *et al.*, 2015; RAVICHANDRAN *et al.*, 2012; ANTIGO *et al.*, 2020).

Entretanto, a aplicação de gomas se apresenta oportuna em diversas facetas, dentre elas na colorimetria resultante do encapsulado. No estudo realizado por Janiszewska *et al.* (2014), o aumento da concentração de goma arábica na mistura das matrizes ocasionou uma redução no valor do parâmetro  $+b^*$ , o que é vantajoso, visto que este parâmetro representa a coloração amarela. Em contraste, para os encapsulados de betalaínas extraídos de beterraba e envoltos com maltodextrina a coloração percebida foi mais próxima do amarelo, ao passo que a associação de goma arábica na matriz ocasionou uma mudança de cor mais próxima ao azul ( $-b^*$ ), sendo assim, uma alteração desejável à permanência do aspecto violeta característico

do corante (JANISZEWSKA *et al.*, 2014). É relevante para análise colorimétrica, no entanto, que, independentemente do encapsulado, haja alto valor do parâmetro  $a^*$ , que corresponde ao teor de betacianina contido (CHRANIOTI, *et al.* 2015).

Ademais, quando Ravichandran *et al.* (2012) comparam as associações realizadas entre a maltodextrina e a goma guar, a goma arábica, a pectina e a goma xantana, torna-se perceptível que diferentes proporções destas matrizes aprimoram o rendimento do processo de atomização, sendo a goma arábica a mais eficaz.

No caso da alteração da matriz de maltodextrina para quitosana na técnica de atomização, há uma redução perceptível no diâmetro dos encapsulados, assim como em uma maior alteração de parâmetros de cor e intensidade, proporcionando uma tonalidade rosa. Essa alteração colorimétrica devido à presença de quitosana ocorre em razão da redução do parâmetro  $a^*$  ao decorrer do período de armazenamento, não proporcionando um efeito protetor tão eficiente para as betacianinas (CHRANIOTI, *et al.* 2015).

Embora a quitosana seja uma matriz de apelo ambiental e químico, devido à sua biodegradabilidade e à sua biocompatibilidade, essa matriz possui propriedades viscosas, de difícil manuseio, ademais de constituir de uma baixa solubilidade (GANDÍA-HERRERO *et al.*, 2013). Esta baixa similaridade às propriedades de água líquida pôde ser constatada por Chranioti, *et al* (2015) que avaliaram o parâmetro K das respectivas cápsulas.

O parâmetro K corresponde à medida da interação das moléculas nas multicamadas com o adsorvente e tende a estar entre o valor de energia das moléculas na monocamada e o da água líquida. Quando K corresponde a 1, as multicamadas possuem as propriedades da água líquida. Entre os agentes encapsulantes estudados, a associação amido modificado com quitosana (MS – CH) apresentou os menores valores de K (0,38) (CHRANIOTI, *et al.* 2015).

A mudança total de maltodextrina para quitosana não se apresenta como uma medida oportuna em encapsulados submetidos à técnica de atomização, sendo mais oportuna a aplicação da quitosana associada à maltodextrina. Assim como é visto no caso de gomas e mucilagens, matrizes caracterizadas como viscosas, similarmente à quitosana, portanto. Uma alternativa seria a aplicação de outra técnica que não seja a atomização, como a liofilização, a qual não é influenciada pela viscosidade da matriz.

Outras possíveis matrizes encapsulantes em potencial são a inulina e a gelatina. A inulina é um frutooligossacarídeo (FOS) de grau de polimerização médio e com propriedades prebióticas e nutritivas por atuar como fibra alimentar e não aumentar o índice glicêmico, sendo uma matriz a ser aplicada para produtos alimentícios focados ao público de diabéticos através da técnica de encapsulamento por atomização (SAÉNZ *et al.*, 2009). As vantagens de aplicar maltodextrina associada à inulina como matriz encapsulante na técnica de liofilização, por exemplo, são a alta solubilidade, o sabor suave e a baixa higroscopicidade dos pós resultantes (FLORES-MANCHA *et al.*, 2020)

No que diz respeito à gelatina, essa é uma matriz proteica que possui atividade superficial que varia positiva ou negativamente a depender do pH, ademais de ser atóxica e biocompatível. Quanto maior for a concentração de gelatina no encapsulado, maior será a presença de uma distribuição aglomerada (SAÉNZ *et al.*, 2009; CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015). É oportuno, portanto, que haja associações da gelatina com outra matriz, como a maltodextrina, visto a associação das matrizes gelatina-maltodextrina resultar em estruturas mais rígidas e sem rupturas nas microcápsulas. Ao passo que o uso de apenas gelatina possui maior probabilidade de resultar em estruturas fracas e parcialmente fraturadas (CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015).

A rigidez que uma matriz encapsulante proporciona é benéfico visto promover uma maior estabilidade e proteção ao composto bioativo, assim como, um maior ponto de fusão, evitando que haja facilmente distúrbios moleculares. A análise que pode ser realizada para avaliação desta rigidez é a análise de calorimetria de varredura diferencial, a qual avalia a variação de calor associada à desnaturação térmica do encapsulado quando submetido à uma taxa constante de aquecimento (CASTRO-MUÑOZ *et al.*, 2015).

No que diz respeito aos lipossomas, estes são predominantemente aplicados à tecnologia de nanoencapsulamento. Estes correspondem a vesículas esféricas formadas espontaneamente quando lipídios entram em contato com a fase aquosa, ocasionando pequenas e grandes vesículas unilamelares (uma bicamada lipídica concêntrica) e multilamelares (várias bicamadas concêntricas) (BHAI *et al.*, 2012).

Para obtenção de lipossomas, na qual possível a aplicação de lecitina de soja, há dois métodos usualmente utilizados: o método de hidratação do filme lipídico (AMJADI *et al.*, 2018) e o método de injeção de solvente (etanol ou éter) - os quais podem ser associados ao decorrer do processo de encapsulamento para aumentar a eficiência, a depender da hidrofobicidade e hidrofiliabilidade do extrato (DIAS *et al.*, 2020)

De modo geral, para aplicação de lipossomas na tecnologia de encapsulamento é necessário que haja a dissolução dos lipídios em um solvente orgânico, seguido pela evaporação em um rota-evaporador, formando um filme fino. Em seguida, deve ser feita a hidratação deste filme com água ou solução tampão, sob agitação vigorosa, ocasionando o inchamento e desprendimento em camadas. Entretanto, certas limitações são percebidas com a aplicação de lipossomas, dentre tais, citam-se a falta de reprodutibilidade, a baixa eficiência de encapsulamento e o alto custo do processo (BHAI *et al.*, 2012).

Deste modo, sugere-se a realização de experimentos que envolvam a aplicação de matrizes poliméricas atóxicas e seguras na perspectiva alimentar devido ao baixo custo envolvido. A partir de tais estudos será possível avaliar a viabilidade para o encapsulamento de betalaínas e aplicação em escala industrial na área alimentícia.

#### 5.4. FATORES INFLUENCIADORES NA ESTABILIDADE DAS BETALAÍNAS ENCAPSULADAS

Na tecnologia de encapsulamento, é necessário que se levar em consideração os fatores intrínsecos, dentre tais, a natureza e a concentração do material encapsulado e suas propriedades físico-químicas; a matriz optada e as suas propriedades físico-químicas; e a proporção entre o material encapsulado e a matriz encapsulante. De mesmo modo que é necessário que haja uma avaliação da estabilidade do encapsulado frente a fatores extrínsecos.

Estes fatores extrínsecos abrangem a temperatura, a pressão, o tempo, o fluxo, entre outros fatores envolvidos ao decorrer da técnica de encapsulamento em questão; assim como, a umidade, a luminosidade, o tempo e a temperatura no período de armazenamento de tais microcápsulas.

No estudo realizado por Hernández-Martínez e colaboradores (2017), os extratos obtidos do cacto de mirtilo (*M. geometrizans*) e da beterraba (*Beta vulgaris* L.), ambos submetidos à microencapsulação por atomização com ortossilicato de tetraetila (TEOS) como matriz encapsulante, foram comparados com o corante sintético azoico, vermelho 40 (vermelho Allura AC). Foi observado que ambos os corantes naturais, extraídos do cacto de mirtilo e da beterraba, quando microencapsulados apresentaram uma maior estabilidade à radiação UV, respectivamente, 98,3% e 99,1%, em relação ao vermelho Allura AC (78,9%) (HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

Já no que condiz à exposição a temperaturas extremas - cinco repetições de choques térmicos constituídos de 60°C por 5 min, seguido de 0°C por 5 min - os microencapsulados não apresentaram estabilidades similares ou superiores ao corante sintético vermelho Allura AC, havendo um decréscimo de teor de betacianinas de 40,9% para a beterraba e de 43,6% para o cacto de mirtilo, enquanto para o corante sintético, apenas 12,5% (HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2017).

Ao contrário do reportado por Hernández-Martínez e colaboradores (2017), no que condiz à estabilidade de betalaínas microencapsuladas em temperaturas altas, cita-se o estudo realizado por Hidalgo e colaboradores (2018). Nesse estudo, um microencapsulado de betalaínas - extraídas da beterraba (*Beta vulgaris* L.) e submetido à técnica de encapsulamento por liofilização utilizando proteína isolado de soja - aplicado em um produto de panificação (biscoito de água) submetido à temperatura de 205°C por 11,5 min apresentou uma maior estabilidade de coloração do que os extratos não encapsulados, de acordo com os testes estatísticos ( $p \leq 0.05$ ) (HIDALGO *et al.*, 2018).

Hidalgo *et al.* (2018) observaram que os extratos de concentração respectiva 11,5 g de matéria seca/100 g e 26,3 g de matéria seca/100 g apresentaram um teor de betanina respectivo a 457 mg/kg de matéria seca e 789 mg/kg de matéria seca. Ao passo que o extrato microencapsulado, em uma concentração de 6,87 g de matéria seca/100 g, apresentou um teor de betanina de 1377 mg/kg de matéria seca.

No que condiz à estabilidade de betalaínas microencapsuladas em temperaturas inferiores à temperatura ambiente, cita-se o estudo realizado por Fernández-López *et al.*

(2018). Conforme os autores, é possível retardar a degradação das betaxantinas - extraídas dos frutos da figueira da índia (*Opuntia ficus-indica*) - através de microencapsulação por atomização utilizando como matriz encapsulante a maltodextrina, havendo uma excelente estabilidade na ausência de luz por período de 180 dias a 4°C e a -20°C e uma redução de teor de betaxantinas de, respectivamente, 8,4% e 3,4% (FERNÁNDEZ-LÓPEZ *et al.*, 2018).

Porém, a maltodextrina é uma matriz suscetível à alta degradação, e consequentemente, degradação do composto bioativo que ela abrange, em temperatura do ar de entrada superior a 140°C (SAÉNZ *et al.*, 2009). Nesta perspectiva, é necessária a aplicação de outros meios para estabilizar essa matriz, como a combinação de matrizes, a qual já foi relatada nesta revisão anteriormente.

Ademais, enquanto à temperatura ambiente Fernández-López *et al.* (2018) obtiveram uma degradação de aproximadamente 60% no teor de betaxantinas do extrato não microencapsulado no período de 30 dias de armazenamento a 20°C na ausência de luz. Em condições idênticas de armazenamento, houve apenas uma redução de cerca de 6% no teor de betaxantinas do extrato microencapsulado com eficiência de 71% (FERNÁNDEZ-LÓPEZ *et al.*, 2018)

A estabilidade de encapsulados de betalaínas à estocagem prolongada em temperaturas superiores à ambiente - por exemplo, 60°C - varia conforme o composto bioativo. Saénz *et al.* (2009) observaram que a indicaxantina apresentou uma lenta degradação ao decorrer do armazenamento a 60°C, caracterizando um encapsulado de coloração mais amarelada. A indicaxantina, deste modo, constitui de maior estabilidade do que a betacianina. A temperatura no período de armazenamento, portanto, apresenta-se como um fator influenciador nas características colorimétricas da cápsula.

No estudo realizado por Chranioti *et al.* (2015), a temperatura de armazenamento, a qual variou de 25°C a 40°C, afetou significativamente ( $p \leq 0.05$ ) o parâmetro  $L^*$  de maneira negativa, reduzindo a luminosidade característica do material encapsulado. Já no que diz respeito à umidade relativa do ar, determinadas matrizes não se apresentaram capazes de proteger e estabilizar o composto bioativo frente a um alto teor de umidade do meio (CHRANIOTI *et al.*, 2015)

Otálora *et al.*, (2015) constataram que a retenção do material encapsulado envolto por maltodextrina associado à mucilagem em baixo valor de umidade (57% UR), após o período de 25 dias de armazenamento foi de 75%, constituindo de uma meia vida próxima a 103 dias. Em alta umidade relativa do ar (90% UR), a retenção reduziu para até 26% em relação à concentração inicial do betanina, constituindo de uma meia vida próxima a 14 dias (OTÁLORA *et al.*, 2015).

Essa baixa estabilidade frente à umidade decorre da alta higroscopicidade obtida por falha de proteção e pelo baixo teor de umidade que é ocasionado pela presença de mucilagem junto a maltodextrina. O aumento da higroscopicidade ocasiona uma maior capacidade de absorção da umidade do meio, aumentando o gradiente de concentração de água na cápsula, difundindo as betalaínas por meio das matrizes para a área superficial, permitindo a entrada de oxigênio na cápsula e a dissolução de barreira protetora (OTÁLORA *et al.*, 2015; PITALUA *et al.*, 2010).

A elevada higroscopicidade não se limita à escolha pela matriz encapsulante. A condição operacional da técnica de encapsulamento pode ser um possível influenciador deste parâmetro. Citam-se as altas temperaturas de entrada de ar, as quais resultam em menores teores de umidade, e, conseqüentemente, em uma maior higroscopicidade (ANTIGO *et al.*, 2020), embora seja possível a presença de condições satisfatórias dos encapsulados em atividades de água acima de 0,44 por curtos períodos de armazenamento, visto haver integridade estrutural do encapsulado em atividades de água de até 0,66 e 0,82 para as matrizes maltodextrina e maltodextrina com goma arábica, respectivamente.

Não se recomenda a aplicação deste cenário, ou seja, produtos de longo *shelf life* e alta atividade de água, para os encapsulados de betalaínas (CHRANIOTI *et al.*, 2015; JANISZEWSKA *et al.*, 2014). Essa recomendação se justifica ao ser perceptível o impacto negativo de altas atividades de água em parâmetros colorimétricos do encapsulado obtido, influenciando na estabilidade e qualidade do produto resultante.

Pitalua *et al.* (2010) observaram que o parâmetro colorimétrico  $a^*$  (indicador da coloração vermelha ao verde) apresentou uma redução próxima a 65% nos encapsulados de atividade de água correspondente a 0,748, e conseqüentemente, na tonalidade vermelha

característica do composto bioativo extraído da beterraba, havendo instabilidade do composto após 12 dias de armazenamento.

Porém o que se correlaciona à atividade antioxidante, destaca-se ser curioso como a elevada atividade de água pode favorecer atividade antioxidante (PITALUA *et al.*, 2010). Deste modo será necessário balancear qual o foco do encapsulamento, se a aplicação desta técnica visa aumentar a atividade antioxidante, porém com alta degradação de cor ou estabilizar a coloração não estimulando progressivamente a formação de compostos redox.

## 5.5. APLICAÇÃO DE ENCAPSULADOS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Na indústria alimentícia, os encapsulados de betalaínas podem ser aplicados como corantes em variados produtos alimentícios, desde os de confeitaria, como as gomas de mascar; os produtos lácteos, como o iogurte; ou produtos cárneos. Por exemplo, emulsões de alta eficiência de encapsulamento e com comportamento de diluição por cisalhamento são opções adequadas para aplicação em um produto cárneo, como salsichas (EISINAITE *et al.*, 2016). Assim como, microencapsulados de betalaínas obtidos por liofilização podem ser aplicados em biscoitos de água (HIDALGO *et al.*, 2018).

Para uma maior compreensão da potencialidade da aplicação de encapsulados de betalaínas na indústria alimentícia, encontram-se os tópicos (Tópico 5.5.1 e Tópico 5.5.2) a seguir, constituídos de dois exemplos em potencial de produtos alimentícios - gomas de mascar e iogurte -, em que se foi estudada e avaliada a aplicação de encapsulados de betalaínas, obtidos dos artigos de pesquisa qualificados para esta revisão de literatura integrativa.

### 5.6.1. Aplicação de encapsulados de betalaínas em gomas de mascar

Devido aos encapsulados de betalaínas se adequarem a modelos alimentícios de baixa atividade de água e com um controle de umidade relativa do meio ao decorrer do período de armazenamento, um modelo alimentício sugerido por Chranioti *et al.* (2015) são as balas de goma de mascar, visto proporcionarem esse meio adequado.

Gomas de mascar são produtos de confeitaria que atingem um amplo público, das mais variadas faixas etárias. Fortificá-las com compostos bioativos que constituem de características benéficas à saúde, apresenta-se como um meio eficiente de ofertar ingredientes ativos à saúde a um maior número de indivíduos (AMJADI *et al.*, 2018).

A aplicação de nanoencapsulados de betalaínas em gomas de mascar possui potencialidade como avaliado pelos estudos de Kumar, Chauhan e Giridhar (2020) e de Amjadi *et al.* (2018), ambos aplicando betalaínas encapsulados de lipossomas provindos de lecitina de soja. Os estudos diferem, entretanto, na fonte de extração, sendo um nanoencapsulado adquirido da *Beta vulgaris* L. (AMJADI *et al.*, 2018) e outro da *Basella rubra* L. (KUMAR; CHAUHAN; GIRIDHAR, 2020), e na técnica de encapsulamento, sendo um nanoencapsulado por atomização (AMJADI *et al.*, 2018) e outro por ultrassom (KUMAR; CHAUHAN; GIRIDHAR, 2020).

Assim como, diferem na constituição das gomas de mascar, como a presença de gelatina (AMJADI *et al.*, 2018) ou pectina (KUMAR; CHAUHAN; GIRIDHAR, 2020). Materiais gelificantes distintos exibem diferentes propriedades físico-químicas que influenciam o comportamento do produto (OTÁLORA *et al.*, 2019).

Conforme Kumar, Chauhan e Giridhar (2020), a goma de mascar vegana preparada com pectina e nanoencapsulados de betalaínas da *Basella rubra* L apresentou boas propriedades morfológicas e de gelificação. No que diz respeito às características sensoriais, houve maior aceitabilidade destas gomas em relação à aparência, textura, sensação na boca e aceitabilidade geral do que das gomas utilizando o composto não encapsulado. Não houve registro de sabor desagradável.

Referente à morfologia, Kumar, Chauhan e Giridhar (2020) observaram que quando comparavam com a goma constituída de betalaína não encapsulada, a goma com o nanoencapsulado de betalaína apresentou uma morfologia mais homogênea, com distribuição uniforme, e uma menor formação de bolhas de ar proporcionando uma estrutura mais compacta. Essa maior rigidez foi constatada, do mesmo modo, por Amjadi *et al.* (2018), que observaram um aumento de 1,5 vezes da dureza, da gomosidade e da mastigabilidade da textura dos balas de goma após a adição de nanoencapsulados de betalaínas.

Aos parâmetros de colorimetria, Kumar, Chauhan e Giridhar (2020) obtiveram valores 53% mais elevados do parâmetro  $a^*$  (cor vermelha), com boa retenção de croma por um período de 28 dias de armazenamento a 5°C. Assim como, Amjadi *et al.* (2018) obtiveram valores superiores de  $L^*$  quando houve adição dos nanoencapsulados. Porém, não houveram diferenças significativas nos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$  no estudo realizado por Amjadi *et al.* (2018).

No que diz respeito aos microencapsulados, o estudo, avaliando a aplicação de microencapsulados de betacianinas de beterraba constituídos de distintas matrizes encapsulantes - maltodextrina; goma arábica; goma arábica com amido modificado; amido modificado com quitosana; amido modificado com maltodextrina e quitosana, em gomas de mascar, realizado por Chranioti *et al.* (2015), obteve uma maior perspectiva no que condiz à estabilidade de coloração obtida neste produto ao decorrer do armazenamento.

O aumento na temperatura de armazenamento resultou em uma diminuição em valores  $L^*$ . O parâmetro  $a^*$  foi reduzido ao decorrer do período de armazenamento, havendo uma maior degradação após duas semanas de armazenamento a 40°C. Assim como o parâmetro  $b^*$  reduziu ao decorrer do período de armazenamento, porém sem possuir correlação com a temperatura de armazenamento em que foi submetido. Similarmente, os parâmetros colorimétricos em geral dependem do tipo de matriz encapsulante e das condições de armazenamento - tempo e temperatura. Encapsulados de goma arábica com maltodextrina proporcionaram uma maior estabilidade de cor nas gomas de mascar (CHRANIOTI *et al.*, 2015).

Otálora *et al.* (2019) concluíram, de mesmo modo, que a aplicação de microencapsulados de betalainas com alginato de sódio em gomas de mascar são oportunas. Isso se deve ao aumento de valores correspondentes ao parâmetro  $a^*$  ao passo que foi adicionado o encapsulado no produto e à constância de valores dos parâmetros  $L^*$  e  $b^*$  em função do tempo de armazenamento.

É perceptível que há aprimoramento de gomas de mascar ao serem aplicados encapsulados de betalainas, entretanto, variações podem existir a depender das condições submetidas ao processamento do encapsulado e posteriormente do produto alimentício

obtido, atentando-se às condições em que este produto será submetido ao decorrer do armazenamento para que haja uma eficiente estabilização do estado de conservação das gomas.

Conclui-se, de mesmo modo, ser relevante a realização de mais estudos que avaliem a estabilidade deste composto bioativo inserido em gomas de mascar por um período mais longo de armazenamento, visto ser um produto de longa *shelf life*, geralmente, superior a 6 meses.

#### 5.6.2. Aplicação de encapsulados de betalaínas em iogurte

Comparando a estabilidade das betacianinas do corante vermelho 40 versus das microcápsulas de *B. vulgaris* L. e *Myrtillocactus geometrizans*, obtidas por atomização, Hernández-Martínez *et al.* (2017) observaram que microcápsulas de *B. vulgaris* L. apresentaram variação nos parâmetros de cromaticidade e luminosidade, enquanto o corante vermelho 40 e a microcápsula de *Myrtillocactus geometrizans* se apresentaram estáveis.

Embora as microcápsulas não constituam da mesma tonalidade ofertada pelo corante vermelho 40, ambas obtiveram valores de parâmetros colorimétricos similares a um iogurte de morango comercial. Ademais, a partir do microencapsulamento houve baixa degradação das betalaínas e uma boa retenção deste composto bioativo pelo período de armazenamento de 25 dias (HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ *et al.*, 2017)

E, correlacionando, a estabilidade das betacianinas do extrato líquido *versus* das microcápsulas obtidas por atomização, Utpott *et al.* (2020) observaram que, conforme o esperado, a maior degradação correspondeu ao iogurte em que se aplicou o extrato líquido, havendo menos de 60% de retenção em 28 dias. Microcápsulas com 10% de maltodextrina e com 10% de maltodextrina e 1% de mucilagem obtiveram maior retenção, superior a 80% (UTPOTT *et al.*, 2020).

Ressalta-se, no entanto, que não necessariamente o produto alimentício deve ser de coloração avermelhada. As betalaínas possuem capacidade de proporcionar coloração amarelada - quando há presença de betaxantinas - a um produto alimentício, neste caso, ao iogurte. Carmona *et al.* (2020) avaliou a aplicabilidade de um microencapsulado de *Opuntia*

*ficus-indica*, fonte de indicaxantina - uma betaxantina - atomizado com maltodextrina e/ou mucilagem adicionados em um iogurte natural armazenado a 4°C por 28 dias.

De acordo com os autores, houve retenção de 82,0 a 83,4% de indicaxantina, a depender da matriz encapsulante utilizada; baixa alteração nos parâmetros colorimétricos; solubilidade superior a 90%, dissolvendo-se no produto assim que adicionadas e homogeneizadas; liberação controlada do composto bioativo devido às interações da indicaxantina com as respectivas matrizes encapsulantes, conferindo alta estabilidade de cor ao produto obtido (CARMONA *et al.*, 2020).

É perceptível, portanto, a possibilidade de aplicação de encapsulados atomizados em produtos lácteos, como o iogurte, reduzindo, assim, a aplicação de corantes artificiais e agregando valor por meio das propriedades funcionais das betalaínas. Porém, é relevante que haja mais estudos que avaliem microcápsulas obtidas pelas demais técnicas, ampliando as opções disponíveis para a indústria.

## 6. CONCLUSÃO

A partir desta revisão de literatura integrativa, tornou-se perceptível que distintas matrizes encapsulantes isoladas ou combinadas, tecnologias e técnicas de encapsulamento, assim como, as variadas fontes naturais de extração de betalaínas promovem encapsulados diferenciados. Cada encapsulado produzido constitui características específicas que impactam diretamente na eficiência e na estabilidade, tornando-o ou não viável para aplicação industrial.

Com esta revisão tornou-se possível uma avaliação aprofundada referente ao encapsulamento de betalaínas. Ressalta-se que é necessário que sejam realizados mais estudos relacionados à aplicabilidade e eficiência de técnicas de encapsulamento de baixa predominância nos estudos de pesquisas qualificados - como a coacervação simples e a co-cristalização - para que assim haja uma análise e comprovação científica da sua viabilidade em escala industrial.

Conclui-se que o encapsulamento de betalaínas utilizando a técnica de atomização se apresenta como a mais oportuna e viável para aplicação em escala industrial. Tal conclusão baseia-se que, por mais que as demais técnicas existentes sejam apropriadas, como a liofilização e a co-cristalização, o alto custo e a baixa quantidade de estudos realizados, respectivamente, se apresentam como limitações para uma aplicação em larga escala industrial.

A técnica de atomização, como visto a partir desta revisão, abrange baixos custos de processo; uma ampla variedade de matrizes encapsulantes e suas respectivas associações; uma boa eficiência de encapsulamento; um aspecto final de fácil manuseio (pó); e boa estabilidade, tornando-a apta para aplicação em larga escala em modo contínuo na indústria alimentícia.

Em caso industrial na qual a aplicação de betalaínas como corante alimentício, neste viés, é sugerido, portanto, que haja a submissão deste composto bioativo à técnica de atomização aplicando a maltodextrina associada a uma outra matriz, como a mucilagem, a qual possui alta acessibilidade econômica, visto a associação promover características promissoras ao encapsulado, como visto nesta revisão. Não obstante, será necessária a

realização de análises experimentais que avaliem a qualidade do encapsulado obtido, tais como a análise colorimétrica por sistema CIELAB, a análise microscópica, a análise de espectrofotometria UV/Vis, a análise de transição vítrea, a análise de eficiência, a análise de retenção, análise de rendimento e análise estatística.

No que diz respeito à tecnologia a ser aplicada nas betalaínas neste caso industrial, o nanoencapsulamento, por constituir de uma maior área superficial e biodisponibilidade, apresenta-se como a opção mais requisitada. Neste viés, estimula-se a realização de estudos de caráter científico-experimental relacionados ao nanoencapsulamento de betalaínas, em razão de ter sido uma tecnologia pouco explorada quando comparada ao microencapsulamento.

## 7. REFERÊNCIAS

1. AGUILAR-TUESTA, S. *et al.* Microencapsulated betacyanin from colored organic quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): optimization, physicochemical characterization and accelerated storage stability. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 98, n. 15, p. 5873-5883, 2018. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9152>.
2. AMJADI, S. *et al.* Improvement in the stability of betanin by liposomal nanocarriers: Its application in gummy candy as a food model. **Food chemistry**, v. 256, p. 156-162, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.114>.
3. ANTIGO, J.L.D. *et al.* Chia seed mucilage as a potential encapsulating agent of a natural food dye. **Journal of Food Engineering**, p. 110101, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110101>.
4. AZEREDO, H.M.C. Betalains: properties, sources, applications, and stability—a review. **International journal of food science & technology**, v. 44, n. 12, p. 2365-2376, 2009.
5. BAZARIA, B.; KUMAR, P. Effect of dextrose equivalency of maltodextrin together with Arabic gum on properties of encapsulated beetroot juice. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 11, n. 1, p. 156-163, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9382-4>.
6. BHAI, S.A., YADAV, V., MAMATHA, Y., PRASANTH, V.V., 2012, “Liposomes: An Overview”, *Journal of Pharmaceutical and Scientific Innovation*, v. 1, pp. 13-21.
7. BELHADJ SLIMEN, I., NAJAR, T. e ABDERRABBA, M. Chemical and Antioxidant Properties of Betalains. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 65 (4), 675-689, 2017. DOI: 10.1021 / acs.jafc.6b04208.
8. CALVO, T.R.A; PERULLINI, M.; SANTAGAPITA, P.R. Encapsulation of betacyanins and polyphenols extracted from leaves and stems of beetroot in Ca

- (II)-alginate beads: A structural study. **Journal of food engineering**, v. 235, p. 32-40, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.015>.
9. CALVO, T.R.A; SANTAGAPITA, P.R.; PERULLINI, M. Functional and structural effects of hydrocolloids on Ca (II)-alginate beads containing bioactive compounds extracted from beetroot. **LWT**, v. 111, p. 520-526, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.047>.
  10. CARMONA, J.C. *et al.* Microparticles of yellow-orange cactus pear pulp (*Opuntia ficus-indica*) with cladode mucilage and maltodextrin as a food coloring in yogurt. **LWT**, v. 138, p. 110672, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110672>.
  11. CASTRO-MUÑOZ, R.; BARRAGÁN-HUERTA, B.; YÁÑEZ-FERNÁNDEZ, J. Uso do compósito gelatina-maltodextrina como suporte de encapsulação para suco clarificado de cacto roxo (*Opuntia stricta*). **LWT-Food Science and Technology**, v. 62, n. 1, pág. 242-248, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.042>.
  12. CHRANIOTI, C.; NIKOLOUDAKI, A.; TZIA, C. Saffron and beetroot extracts encapsulated in maltodextrin, gum Arabic, modified starch and chitosan: Incorporation in a chewing gum system. **Carbohydrate Polymers**, v. 127, p. 252-263, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.03.049>.
  13. DELIA, S.C. *et al.* Spray drying microencapsulation of betalain rich extracts from *Escontria chiotilla* and *Stenocereus queretaroensis* fruits using cactus mucilage. **Food chemistry**, v. 272, p. 715-722, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.069>.
  14. DE MEJIA, E.G. *et al.* The colors of health: Chemistry, bioactivity, and market demand for colorful foods and natural food sources of colorants. **Annual review of food science and technology**, v. 11, p. 145-182, 2020.
  15. DIAS, S. *et al.* Natural pigments of anthocyanin and betalain for coloring soy-based yogurt alternative. **Foods**, v. 9, n. 6, p. 771, 2020.
  16. DO CARMO, C.S. *et al.* A way to prepare a liposoluble natural pink colourant. **Green Chemistry**, v. 17, n. 3, p. 1510-1518, 2015.

17. EISINAITE, V., JURAITE, D., SCHROËN, K., LESKAUSKAITE, D. Preparation of stable food-grade double emulsions with a hybrid premix membrane emulsification system. **Food Chemistry**, 206, 59–66. 2016. doi:10.1016/j.foodchem.2016.03
18. FATHORDOOBADY, F. *et al.* Encapsulation of betacyanins from the peel of red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus* L.) in alginate microbeads. **Food Hydrocolloids**, p. 106535, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106535>.
19. FERNÁNDEZ-LÓPEZ, J.A. *et al.* Betaxanthin-rich extract from cactus pear fruits as yellow water-soluble colorant with potential application in foods. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 73, n. 2, p. 146-153, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0664-3>.
20. FLORES-MANCHA, M.A. *et al.* Characterization of Beet Root Extract (*Beta vulgaris*) Encapsulated with Maltodextrin and Inulin. **Molecules**, v. 25, n. 23, p. 5498, 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25235498>.
21. GANDÍA-HERRERO, F.; ESCRIBANO, J.; GARCÍA-CARMONA, F. The role of phenolic hydroxy groups in the free radical scavenging activity of betalains. **J. Nat. Prod.** 72, 1142–1146. 2009.
22. GANDÍA-HERRERO, F. *et al.* Encapsulation of the most potent antioxidant betalains in edible matrixes as powders of different colors. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 61, n. 18, p. 4294-4302, 2013. <https://doi.org/10.1021/jf400337g>
23. GEORGIEV, V.G. *et al.* Antioxidant activity and phenolic content of betalain extracts from intact plants and hairy root cultures of the red beetroot *Beta vulgaris* cv. Detroit dark red. **Plant foods for human nutrition**, v. 65, n. 2, p. 105-111, 2010.
24. GENGATHARAN, A.; DYKES, G.A.; CHOO, W.S. Betalains: Natural plant pigments with potential application in functional foods. **LWT-Food Science and Technology**, v. 64, n. 2, p. 645-649, 2015.
25. GIBBS, S. Encapsulation in the food industry: a review. **International Journal of Food Sciences and Nutrition**, 50(3), 213-224. 1999.

26. GORBUNOVA, N. *et al.* Alginate-based encapsulation of extracts from beta Vulgaris cv. beet greens: Stability and controlled release under simulated gastrointestinal conditions. **LWT**, v. 93, p. 442-449, 2018.
27. HAYEK, S.A.; IBRAHIM, S.A. Antimicrobial activity of xoconostle pears (*Opuntia matudae*) against *Escherichia coli* O157: H7 in laboratory medium. **International Journal of Microbiology**, v. 2012, 2012.
28. HERBACH, K.M.; STINTZING, F.C.; CARLE, R. Betalain stability and degradation-structural and chromatic aspects. **Journal of food science**, v. 71, n. 4, p. R41-R50, 2006.
29. HERBACH, K.M. *et al.* Effects of processing and storage on juice colour and betacyanin stability of purple pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) juice. **European Food Research and Technology**, v. 224, n. 5, p. 649-658, 2007.
30. HERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, A.R. *et al.* Stability comparison between microencapsulated red-glycosidic pigments and commercial FD&C Red 40 dye for food coloring. **Journal of Materials Science**, v. 52, n. 9, p. 5014-5026, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0739-1>.
31. HIDALGO A., BRANDOLINI A., ČANADANOVIĆ-BRUNET J., ČETKOVIĆ G., ŠAPONJAC V.T. Microencapsulates and extracts from red beetroot pomace modify antioxidant capacity, heat damage and colour of pseudocereals-enriched einkorn water biscuits. **Food Chem.** 2018;268:40–48. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.06.062.
32. JANISZEWSKA, E. Microencapsulated beetroot juice as a potential source of betalain. **Powder Technology**, v. 264, p. 190-196, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.032>.
33. KAIMAINEN, M. *et al.* Encapsulation of betalain into w/o/w double emulsion and release during in vitro intestinal lipid digestion. **LWT-Food Science and Technology**, v. 60, n. 2, p. 899-904, 2015.

34. KANNER, J.; HAREL, S.; GRANIT, R. Betalains: a new class of dietary cationized antioxidants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 11, pág. 5178-5185, 2001.
35. KARANGUTKAR, A.V.; ANANTHANARAYAN, L. Co-crystallization of Basella rubra extract with sucrose: Characterization of co-crystals and evaluating the storage stability of betacyanin pigments. **Journal of Food Engineering**, v. 271, p. 109776, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109776>.
36. KHAN, M.I.; GIRIDHAR, P. Plant betalains: Chemistry and biochemistry. **Phytochemistry**, v. 117, p. 267-295, 2015.
37. KUHN, F.; DE AZEVEDO, E.S.; NOREÑA, C.P.Z. Behavior of inulin, polydextrose, and egg albumin as carriers of Bougainvillea glabra bracts extract: Rheological performance and powder characterization. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 10, p. e14834, 2020. DOI: 10.1111/jfpp.14834.
38. KUMAR, S.S.; CHAUHAN, A.S.; GIRIDHAR, P. Nanoliposomal encapsulation mediated enhancement of betalain stability: Characterisation, storage stability and antioxidant activity of Basella rubra L. fruits for its applications in vegan gummy candies. **Food Chemistry**, v. 333, p. 127442, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127442>.
39. LE, N. L. Functional compounds in dragon fruit peels and their potential health benefits: a review. **International Journal of Food Science & Technology**. 2021. doi:10.1111/ijfs.15111.
40. LIN, K.-Y.; DANIEL, J.R.; WHISTLES, R. L. Structure of chia seed polysaccharide exudate. *Carbohydrate Polymers*. Department of Foods and Nutrition, Purdue University, v. 23, p. 13-18. Estados Unidos da América, 1994.
41. MOHAMMED, A.N.; ISHWARYA, S.P.; NISHA, P. Nanoemulsion Versus Microemulsion Systems for the Encapsulation of Beetroot Extract: Comparison of

- Physicochemical Characteristics and Betalain Stability. **Food Bioprocess Technol**, 14, 133–150 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02562-2>
42. OTÁLORA, M.C. *et al.* Encapsulated betalains (Opuntia ficus-indica) as natural colorants. Case study: Gummy candies. **LWT**, v. 103, p. 222-227, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.074>.
43. OTÁLORA, M.C. *et al.* Encapsulating betalains from Opuntia ficus-indica fruits by ionic gelation: Pigment chemical stability during storage of beads. **Food chemistry**, v. 202, p. 373-382, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.01.115>.
44. OTÁLORA, M.C. *et al.* Encapsulation of cactus (Opuntia megacantha) betaxanthins by ionic gelation and spray drying: A comparative study. **Food Research International**, v. 111, p. 423-430, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.058>.
45. OTÁLORA, M.C. *et al.* Microencapsulation of betalains obtained from cactus fruit (Opuntia ficus-indica) by spray drying using cactus cladode mucilage and maltodextrin as encapsulating agents. **Food chemistry**, v. 187, p. 174-181, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.04.090>.
46. PAGANO, A.P.E. *et al.* Microencapsulation of betanin in monodisperse W/O/W emulsions. **Food Research International**, v. 109, p. 489-496, 2018.
47. PITALUA, E. *et al.* Antioxidative activity of microcapsules with beetroot juice using gum Arabic as wall material. **Food and Bioprocess Processing**, v. 88, n. 2-3, p. 253-258, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.01.002>.
48. RAHAYUNINGSIH, E. *et al.* Microencapsulation of betacyanin from red dragon fruit (Hylocereus polyrhizus) peels using pectin by simple coacervation to enhance stability. **Journal of Food Science and Technology**, p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04910-8>.

49. RAHIMI, P.; ABEDIMANESH, S.; MESBAH NAMIN, S. A.; OSTADRAHIMI, A. Betalains, the nature-inspired pigments, in health and diseases. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 00–00. doi:10.1080/10408398.2018.1479830. 2018.
50. RAVICHANDRAN, K.; PALANIRAJ, R. Thaw Saw NMM, Ahmed MM Gabr AMM, Ahmed AR, Dietrich Knorr D *et al.* Effects of different encapsulation agents and drying process on stability of betalains extract. **J Food Sci and Technol**, v. 51, n. 9, p. 2216-2221, 2014.
51. RÉ, M. Microencapsulation by spray drying. **Drying Technology**, 16(6), 195-236. 1998.
52. RIBEIRO, J.S.; VELOSO, C.M. Microencapsulation of natural dyes with biopolymers for application in food: A review. **Food Hydrocolloids**, p. 106374, 2020.
53. ROBERT, P. *et al.* Influence of gelation on the retention of purple cactus pear extract in microencapsulated double emulsions. **PloS one**, v. 15, n. 1, p. e0227866, 2020. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227866>
54. ROBERT, P *et al.* The encapsulation of purple cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) pulp by using polysaccharide-proteins as encapsulating agents. **LWT-Food Science and Technology**, v. 60, n. 2, p. 1039-1045, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.10.038>
55. RODRIGUEZ, E.B. *et al.* Health-promoting bioactivities of betalains from red dragon fruit (*Hylocereus polyrhizus* (Weber) Britton and Rose) peels as affected by carbohydrate encapsulation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 96, n. 14, p. 4679-4689, 2016.
56. SADOWSKA-BARTOSZ, I.; BARTOSZ, G. Biological Properties and Applications of Betalains. **Molecules**, v. 26, n. 9, p. 2520, 2021.
57. SAÉNZ, C. *et al.* Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). **Food chemistry**, v. 114, n. 2, p. 616-622, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.095>.

58. SCHMITT, C.; SANCHEZ, C.; DESOBRY-BANON, S.; HARDY, J. Structure and Technofunctional Properties of Protein-polysaccharide complexes: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 38, p. 689 – 753, 1998.
59. SHAARUDDIN, Safura et al. Stability of betanin in pitaya powder and confection as affected by resistant maltodextrin. *LWT*, v. 84, p. 129-134, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.031>
60. SHISHIR, M.R.I. *et al.* Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. **Trends in Food Science & Technology**, v. 78, p. 34-60, 2018.
61. SINGH, B.; HATHAN, B.S. Process optimization of spray drying of beetroot Juice. *Journal of food science and technology*, v. 54, n. 8, p. 2241-2250, 2017. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2659-8>
62. TENORE, G.C.; NOVELLINO, E.; BASILE, A. Nutraceutical potential and antioxidant benefits of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) extracts. **Journal of functional foods**, v. 4, n. 1, p. 129-136, 2012.
63. TOLEDO-MADRID, K.; GALLARDO-VELÁZQUEZ, T.; OSORIO-REVILLA, G. Microencapsulation of purple cactus pear fruit (*Opuntia ficus indica*) extract by the combined method W/O/W double emulsion-spray drying and conventional spray drying: a comparative study. **Processes**, v. 6, n. 10, p. 189, 2018.
64. TUMBAS SAPONJAC, V. T. *et al.* Optimisation of beetroot juice encapsulation by freeze-drying. **Polish Journal of Food and Nutrition Sciences**, v. 70, n. 1, 2020.
65. UTPOTT, M. *et al.* Avaliação do Uso de Resíduos Industriais no Encapsulamento de Betalaínas Extraídas da Polpa de Pitaya Vermelha (*Hylocereus polyrhizus*) por Spray Drying: Estabilidade e Aplicação do Pó. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, n. 11, pág. 1940-1953, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02529-3>.

66. VALENCIA, Z. *et al.* Compostos bioativos e atividade antioxidante de sementes de quinoa peruana (*Chenopodium quinoa* W.). *Jornal da Sociedade Química Peruana*, v. 83, n. 1 pág. 16-29, 2017.
67. VARGAS-CAMPOS, L. *et al.* Encapsulation and pigmentation potential of betalains of pitaya (*Stenocereus pruinosus*) fruit. **Journal of food science and technology**, v. 55, n. 7, p. 2436-2445, 2018.. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3161-7>
68. VERGARA, C. *et al.* Microencapsulation of pulp and ultrafiltered cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) extracts and betanin stability during storage. **Food chemistry**, v. 157, p. 246-251, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.037>.
69. ZHANG, X., YEUNG, D.C., KARPISEK, M. *et al.* Serum FGF21 levels are increased in obesity and are independently associated with the metabolic syndrome in humans. **Diabetes**, 57, 1246 –1253. 2008.
70. ZUANON, Larissa A.C *et al.* Production and storage properties of spray-dried red beet extract using polysaccharide-based carrier systems. **International Journal of Food Engineering**, v. 15, n. 7, 2019. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0371>.