



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Desarrollo de un producto aglomerado de uchuva (*Physalis peruviana* L.) con características instantáneas y potencial efecto antioxidante**

**Soany Karola Eraso Grisales**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad Ciencias Agrarias  
Departamento Ingeniería Agrícola y Alimentos  
Medellín, Colombia  
2022

# **Desarrollo de un producto aglomerado de uchuva (*Physalis peruviana* L.) con características instantáneas y potencial efecto antioxidante**

**Soany Karola Eraso Grisales**

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de:  
**Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos.**

Director:

Ph.D., Misael Cortés Rodríguez

Codirector:

Ph.D., Andrés Mauricio Hurtado Benavides

Grupos de Investigación:

Alimentos Funcionales (GAF) - UNAL

Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA) - UDENAR

Universidad Nacional de Colombia

Facultad Ciencias Agrarias

Departamento Ingeniería Agrícola y Alimentos

Medellín, Colombia

2022

*Dedicatoria*

*A mi familia, sé que su amor es incondicional.*



## Declaración de obra original

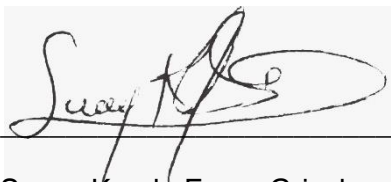
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Soany Karola Eraso Grisales', is written over a horizontal line. The signature is contained within a light gray rectangular box.

Soany Karola Eraso Grisales

Fecha 28/03/2022

## **Agradecimientos**

A Dios por todas sus bendiciones, por toda la sabiduría paciencia y perseverancia durante este camino de estudios de mi maestría.

A mi mamá por ser mi amiga, la persona que más me apoya y cree en mí, a mi papá por sus buenos consejos, a Diego por su paciencia y compañía y a mis familiares. Todos han sido un apoyo constante a lo largo de mi vida, comparten mis alegrías y mis sueños.

A mi profesor Misael Cortés Rodríguez por creer en mí, permitirme trabajar y formarme en GAF. Su inmensa ayuda, dedicación y gran apoyo durante todo este proceso han sido un gran pilar de mi formación, gracias también por sus valiosos aportes y conocimientos transmitidos.

A mi profesor Andrés Hurtado Benavides por su apoyo, su tiempo, por creer en mí y siempre brindarme su confianza.

Al Grupo de Investigación en Alimentos Funcionales GAF, por la colaboración y trabajo en equipo.

A María Eugenia Duque, funcionaria del laboratorio de: Control de Calidad de Alimentos, al laboratorio de Procesos Agrícolas, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

A cada uno de mis compañeros de GAF, todos fueron un gran apoyo y ayuda. Su compañerismo fue incondicional. Gracias Adriana, Lina, Manuela, Hader, Claudia, Catalina, María Camila, Niza, Gisell y Laura.

A la Gobernación de Nariño y al proyecto “Fortalecimiento de capacidades regionales en investigación, desarrollo tecnológico e innovación en el departamento de Nariño”, bajo la administración de la Fundación Ceiba.

## RESUMEN

La uchuva (*Physalis peruviana* L.), es una fruta exótica de la región Andina, la cual presenta una demanda creciente debido a que posee características aromáticas y propiedades nutricionales favoreciendo su uso como alimento funcional. Colombia está entre los principales productores y exportadores de fruta exótica del mundo, principalmente gulupa y uchuva, por consiguiente, es la quinta fruta con mayor mercado después del banano en términos de exportación. La generación de nuevos productos, con sabores innovadores y con mejores características fisicoquímicas ha permitido el desarrollo y la implementación de nuevas metodologías para su obtención. Una alternativa a este contexto es el secado de la pulpa con el fin de obtener un producto en polvo, conservando las propiedades de la fruta. Algunos métodos de secado resultan inapropiados por afectar fuertemente las características sensoriales y las propiedades nutricionales de las frutas. El secado por aspersión, es un método usado en pulpas de frutas que son sensibles al calor, siendo sus principales ventajas el alto rendimiento y la reducción del daño térmico.

El objetivo de la investigación fue desarrollar un producto aglomerado de uchuva (*Physalis peruviana* L.) con características instantáneas y potencial efecto antioxidante, contribuyendo a mejorar la competitividad de la agrocadena. En este contexto, la investigación se planteó en tres etapas:

En la 1ª etapa se realizó la evaluación de la influencia del proceso de hidrólisis enzimática sobre la estabilidad fisicoquímica de un sistema coloidal a base de pulpa, piel y semilla de uchuva (CS<sub>U</sub>), con fines a ser utilizado en secado por aspersión. La pulpa con semilla y piel fue homogenizada inicialmente por cizalla en un sistema rotor-estator a 10000 rpm durante 10 minutos y para la evaluación enzimática, se empleó el complejo multienzimático Viscozyme L y se utilizó un diseño factorial completamente aleatorizado, considerando las variables independientes: concentración de enzima [Enzima] (50, 125 y 200 ppm) y tiempo de hidrólisis (TH) (0, 30, 60, 90 y 120 minutos), y las variables dependientes: viscosidad ( $\mu$ ), potencial zeta ( $\zeta$ ), tamaño de partícula (percentiles D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub> y D<sub>90</sub>), *Span*, índice de absorción espectral (R) y sólidos solubles (SS). La [Enzima] tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la  $\mu$ , SS, D<sub>50</sub>, D<sub>90</sub> y R, el TH sobre la  $\mu$ , SS y D<sub>10</sub>; además, existe un efecto de la interacción [Enzima]-HT sobre el aumento de la  $\mu$  y los SS. La optimización de la formulación presentó una deseabilidad del 74.2%, con una [Enzima] = 78.5 ppm y TH = 120 minutos; siendo las variables dependientes calculadas por un modelo cuadrático:  $\mu = 356.9$  cP, SS = 15.5,  $\zeta = -18.5$  mV, D<sub>10</sub> = 3.2  $\mu$ m, D<sub>50</sub> = 118.2  $\mu$ m; D<sub>90</sub> = 480.8  $\mu$ m; *Span* =

4.1,  $R = 0.605$ . La combinación de procesos de homogenización por cizalla y el tratamiento enzimático aplicado, contribuyeron a la obtención de sistema coloidal estable fisicoquímicamente, sin embargo, se pretendía obtener una mayor reducción de tamaños de partícula, lo cual se logra mediante un proceso de homogenización de alta presión y adición de hidrocoloides que favorecieron la estabilidad de la suspensión.

En la 2ª etapa se planteó la evaluación del proceso de secado por aspersión y la composición de la alimentación sobre los atributos de calidad de las microcápsulas de uchuva. El secado por aspersión operó en condiciones subatmosféricas a 0.37 kPa (1.5" H<sub>2</sub>O) y utilizando el equipo Vibrasec SA, referencia PASLAB1.5, con una capacidad de evaporación de 1.5L/h. El proceso de secado por aspersión se optimizó utilizando la metodología de superficie de respuesta, con un diseño experimental central compuesto cara centrada, teniendo en cuenta las variables independientes: goma arábiga (AG) (1 - 3%), maltodextrina (MD) (9.5 – 13.5%), temperatura de entrada de aire (TEA) (130-160°C), temperatura del aire de salida (TSA) (75-85°C) y velocidad del disco atomizador (VDA) (18000-22000 rpm), las variables dependientes evaluadas fueron: humedad (Xw), solubilidad (S), higroscopicidad (H), humectabilidad (Hu), coordenadas de color L\* y b\*, fenoles totales (FT), capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) y rendimiento (Y). La optimización experimental de múltiples respuestas presentó una deseabilidad del 68.4%, definiendo las variables independientes: [GA] = 2.2%, [MD] = 10.1%, TEA = 160 °C, TSA = 77.8 °C y VDA = 21450 rpm, y las variables dependientes: Xw = 2.7±0.1%, S = 86.2±2.3%, H = 16.2±0.0%, Hu = 4.0±0.13 s, L\* = 43.9±0.1, b\* = 35.7±0.9, TP = 284.2±1.8 mg AGE/100 g bs, DPPH = 99.8±2.5 mg TE/100 g bs, ABTS = 158.5±0.1 mg TE/100 g bs y Y = 56.1±1.6%. El secado por aspersión como proceso de microencapsulación del extracto de uchuva, fue una tecnología efectiva que permitió la obtención microcápsulas de uchuva con excelentes atributos de calidad. En el proceso se dio un mayor aprovechamiento de la estructura de la uchuva (pulpa, semilla y cáscara), que otorgó un alto contenido de sólidos de uchuva al producto obtenido.

En la 3ª etapa se evaluó el sistema de aglomeración por lecho fluidizado, el cual se optimizó utilizando la metodología de superficie de respuesta, con diseño experimental central compuesto cara centrada, teniendo en cuenta las variables independientes: temperatura del aire de fluidización (T) (50 – 70 °C), presión de atomización de la solución ligante (P) (1.0 – 2.0 bar) y tiempo de aglomeración (t) (20 – 40 min), y como variables dependientes: humedad (Xw), solubilidad (S), humectabilidad (Hu), higroscopicidad (H), densidad aparente ( $\rho_a$ ), índice de Carr (IC), relación de Hausner (RH), tamaño de partícula  $D_{[4,3]}$ , fenoles totales (FT), flavonoides totales (FLT), capacidad antioxidante (DPPH y ABTS), vitamina C (Vit.C),  $\beta$ -caroteno ( $\beta$ -car) y el rendimiento (Y). La optimización experimental de múltiples repuestas presentó una deseabilidad del 63.8%, definiendo las variables independientes: T = 68.4 °C, P = 1.1 bar, t = 36.5 min, y las variables dependientes: Xw (4.3±0.1%), S (80.5±0.8%), H (14.4±0.5%), Hu (2.3±0.1 s),  $\rho_a$  (0.588±0.021 g/mL), IC (11.9 ± 2.5%), RH (1.11±0.02),  $D_{[4,3]}$  (136.0 2.2  $\mu$ m), FT (366.7±2.5 mg AGE/100 g bs), FLT (26.5±0.9 mg QE/100 g bs), DPPH (163.5±2.6 mg TE/100 g bs) y ABTS (133.0±1.1 mg TE/100 g bs), Vit.C (42.2±2.5 mg/100 g bs),  $\beta$ -car (72.4±2.1 mg/100



g bs) y  $Y$  ( $62.5 \pm 3.3\%$ ). El proceso de aglomeración por lecho fluidizado del polvo de uchuva, fue efectivo, resultando en la mejora de las propiedades físicas relacionadas con las características funcionales de instantanización y fluidez.

**Palabras clave:** *Physalis peruviana* L., antioxidantes, sistemas coloidales, deshidratación de alimentos, granulación de polvos de frutas.

## **Development of an agglomerated cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) product with instantaneous characteristics and potential antioxidant effect.**

### **Abstract**

The cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) is an exotic fruit from the Andean region, growing demand due to its aromatic characteristics and nutritional properties that favor its use as a functional food. Colombia is among the primary producers and exporters of exotic fruit globally, mainly purple passion fruit and cape gooseberry, and is, therefore, the fifth fruit with the largest market after bananas in terms of exports. The generation of new products with innovative flavors and better physicochemical characteristics has allowed the development and implementation of new methodologies. An alternative to this context is the drying of the pulp to obtain a powdered product, preserving the properties of the fruit. Some drying methods are inappropriate because they strongly affect its sensory characteristics and nutritional properties. Spray drying is a method used for fruit pulps that are sensitive to heat, its main advantages being high yield and reduction of thermal damage.

The objective of the research was to develop an agglomerated cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) product with instantaneous characteristics and potential antioxidant effect, contributing to improving the competitiveness of the agribusiness chain. In this context, the research was carried out in three stages:

In the first stage, the influence of the enzymatic hydrolysis process on the physicochemical stability of a colloidal system based on cape gooseberry pulp, skin, and seed (CSU), is to be used in spray drying, was evaluated. The pulp with seed and skin was initially homogenized by shearing in a rotor-stator system at 10000 rpm for 10 minutes. For the enzymatic evaluation, the multi-enzyme complex Viscozyme L and a completely randomized factorial design were used, considering the independent variables: [Enzyme]

enzyme concentration (50, 125, and 200 ppm) and hydrolysis time (HT) (0, 30, 60, 90 and 120 minutes), and the dependent variables: viscosity ( $\mu$ ), zeta potential ( $\zeta$ ), particle size (percentiles  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$ ), Span, spectral absorption index (R) and soluble solids (SS). Enzyme] had a significant effect ( $p < 0.05$ ) on  $\mu$ , SS,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  and R, HT on  $\mu$ , SS and  $D_{10}$ ; furthermore, there is an effect of [Enzyme]-HT interaction on the increase of  $\mu$  and SS. The formulation optimization presented a desirability of 74.2%, with [Enzyme] = 78.5 ppm and TH = 120 min; being the dependent variables calculated by a quadratic model:  $\mu = 356.9$  cP, SS = 15.5,  $\zeta = -18.5$  mV,  $D_{10} = 3.2$   $\mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 118.2$   $\mu\text{m}$ ;  $D_{90} = 480.8$   $\mu\text{m}$ ; Span = 4.1, R = 0.605. The combination of shear homogenization processes and the enzymatic treatment applied contributed to obtaining a physicochemically stable colloidal system; however, it was intended to reduce particle size, which is achieved through a high-pressure homogenization process and addition of hydrocolloids that favored the stability of the suspension.

In the second stage, the evaluation of the spray drying process and the composition of the feed on the quality attributes of the cape gooseberry microcapsules was proposed. The spray drying process operated under subatmospheric conditions at 0.37 kPa (1.5" H<sub>2</sub>O) and using the Vibrasec SA equipment, reference PASLAB1.5, with an evaporation capacity of 1.5L/h. The spray drying process was optimized using the response surface methodology, with a face-centered central composite experimental design, taking into account the independent variables: gum arabic (GA) (1 - 3%), maltodextrin (MD) (9.5 - 13.5%), air inlet temperature (AIT) (130 - 160°C), air outlet temperature (AOT) (75-85°C) and atomizing disk speed (ADS) (18000-22000 rpm), the dependent variables evaluated were: moisture (Xw), solubility (S), hygroscopicity (H), wettability (We), color coordinates L\* and b\*, total phenols (TP), antioxidant capacity (DPPH and ABTS) and yield (Y). The experimental optimization of multiple responses presented a desirability of 68.4%, defining the independent variables: GA = 2.2%, MD = 10.1%, AIT = 160 °C, AOT = 77.8 °C and ADS = 21450 rpm, and the dependent variables: Xw = 2.7±0.1%, S = 86.2±2.3%, H = 16.2±0.0%, We = 4.0±0.13 s, L\* = 43.9±0.1, b\* = 35.7±0.9, TP = 284.2±1.8 mg GAE/100 g bs, DPPH = 99.8±2.5 mg TE/100 g bs, ABTS = 158.5±0.1 mg TE/100 g bs and Y = 56.1±1.6%. Spray drying is a process of microencapsulation of cape gooseberry extract was an effective technology that allowed obtaining cape gooseberry microcapsules with excellent quality attributes. In the process, greater use was made of the structure of the cape gooseberry (pulp, seed, and peel), which gave a high content of cape gooseberry solids to the product obtained.

In the third stage, the fluidized bed agglomeration system was evaluated, which was optimized using the response surface methodology, with face-centered central composite experimental design, taking into account the independent variables: fluidization air temperature (T) (50 - 70 °C), binder solution atomization pressure (P) (1.0 - 2.0 bar) and agglomeration time (t) (20 - 40 min), and as dependent variables: moisture (Xw), solubility (S), wettability (We), hygroscopicity (H), bulk density ( $\rho_a$ ), Carr's index (CI), Hausner's ratio (RH), particle size  $D_{[4,3]}$ , total phenols (TP), total flavonoids (TFL), antioxidant capacity (DPPH and ABTS), vitamin C (Vit.C),  $\beta$ -carotene ( $\beta$ -car) and yield (Y). The multiple-

response experimental optimization presented a desirability of 63.8%, defining the independent variables:  $T = 68.4$  °C,  $P = 1.1$  bar,  $t = 36.5$  min, and the dependent variables:  $X_w$  ( $4.3 \pm 0.1\%$ ),  $S$  ( $80.5 \pm 0.8\%$ ),  $H$  ( $14.4 \pm 0.5\%$ ),  $We$  ( $2.3 \pm 0.1$  s),  $\rho_a$  ( $0.588 \pm 0.021$  g/mL),  $CI$  ( $11.9 \pm 2.5\%$ ),  $RH$  ( $1.11 \pm 0.02$ ),  $D_{[4,3]}$  ( $136.0 \pm 2.2$   $\mu\text{m}$ ),  $TP$  ( $366.7 \pm 2.5$  mg GAE/100 g db),  $TFL$  ( $26.5 \pm 0.9$  mg QE/100 g db),  $DPPH$  ( $163.5 \pm 2.6$  mg TE/100 g db) and  $ABTS$  ( $133.0 \pm 1.1$  mg TE/100 g db),  $Vit.C$  ( $42.2 \pm 2.5$  mg/100 g db),  $\beta$ -car ( $72.4 \pm 2.1$  mg/100 g db) and  $Y$  ( $62.5 \pm 3.3\%$ ). The fluidized bed agglomeration process of cape gooseberry powder was effective, resulting in improved physical properties related to the functional characteristics of instantaneousness and flowability.

**Keywords:** *Physalis peruviana* L., antioxidants, colloidal systems, food dehydration, granulation of fruit powders.

# Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN VII</b>	
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>19</b>
Interés de la investigación.....	19
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
1.1 Generalidades de la uchuva.....	21
1.2 Contexto económico de la uchuva.....	22
1.3 Deshidratación de alimentos. ....	23
1.4 Secado por aspersion. ....	24
1.5 Proceso de aglomeración.....	28
1.5.1 Aglomeración por deposición o aglomeración húmeda. ....	28
1.5.2 Aglomeración por compresión o aglomeración seca. ....	29
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>31</b>
2.1 Objetivo general .....	31
2.2 Objetivos específicos .....	31
<b>3. AVANCES TECNOLÓGICOS EN EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LA UCHUVA: UNA REVISIÓN.....</b>	<b>32</b>
3.1 Resumen.....	32
3.2 Introducción .....	32
3.3 Compuestos bioactivos presentes en la uchuva y su efecto en la salud....	34
3.4 Procesamiento y tratamientos para aumentar la vida útil de productos a base de uchuva .....	37
3.5 Conclusiones.....	43
3.6 Bibliografía .....	43
<b>4. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE UN SISTEMA COLOIDAL A BASE DE UCHUVA. 48</b>	

4.1 Resumen .....	48
Abstract	49
4.2 Introducción .....	50
4.3 Materiales y métodos .....	52
4.3.1 Materiales .....	52
4.3.2 Métodos de caracterización .....	52
4.3.3 Proceso enzimático .....	53
4.3.4 Análisis estadístico y optimización experimental .....	53
4.5 Resultados y discusión .....	54
4.6 Conclusiones .....	63
4.7 Bibliografía .....	64
<b>5. INFLUENCIA DE LOS ENCAPSULANTES Y DEL PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN SOBRE LA CALIDAD DE MICROCÁPSULAS DE EXTRACTO DE UCHUVA</b>	<b>71</b>
5.1 Resumen .....	71
5.2 Introducción .....	72
5.3 Materiales y métodos .....	74
5.3.1 Materias primas .....	74
5.3.2 Preparación de la alimentación al SA .....	74
5.3.3 Proceso de microencapsulación .....	74
5.3.4 Caracterización de las microcápsulas de uchuva .....	75
5.3.5 Análisis estadístico y optimización experimental .....	75
5.4 Resultados y discusión .....	76
5.5 Conclusiones .....	86
5.6 Bibliografía .....	86
<b>6. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE POLVO DE UCHUVA OBTENIDO POR SECADO POR ASPERSIÓN</b>	<b>92</b>
6.1 Resumen .....	92
6.2 Introducción .....	93
6.3 Metodología .....	95
6.3.1 Materia prima .....	95
6.3.2 Proceso de aglomeración .....	95
6.3.3 Caracterización del PU y MPUA .....	96
6.3.4 Análisis estadístico, modelamiento y optimización experimental .....	97
6.3.5 Microestructura del PU y la MPUA .....	98

---

6.3.6	Temperatura de transición vítrea .....	98
6.3.7	Análisis bromatológico.....	98
6.4	Resultados y discusión .....	98
6.5	Conclusiones .....	114
6.6	Bibliografía.....	114
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>120</b>
7.1	Conclusiones generales .....	120
7.2	Recomendaciones .....	120
<b>8.</b>	<b>Bibliografía introducción .....</b>	<b>122</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>125</b>
<b>10.</b>	<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>128</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1.</b> Representación esquemática del mecanismo de secado por aspersión. (1) Atomización. (2) Conversión de gota a partícula. (3) Recolección de partículas. ....	26
<b>Figura 1-2.</b> Descripción esquemática de los diferentes mecanismos que contribuyen a la aglomeración de polvos por vía húmeda.....	30
<b>Figura 4-1:</b> Gráficos de superficies de respuesta de las variables dependientes en función de las variables independientes del $SC_u$ .....	57
<b>Figura 5-1:</b> Gráficos de superficie de respuesta de $X_w$ de las $ME_U$ .....	76
<b>Figura 5-2:</b> Gráficos de superficie de respuesta y de volumen de S, H y $H_u$ de las $ME_U$ .....	79
<b>Figura 5-3:</b> Gráficos de superficie y de volumen de respuesta de $L^*$ y $b^*$ de las $ME_U$ ....	81
<b>Figura 5-4:</b> Gráficos de volumen de respuesta de FT, DPPH y ABTS de las $ME_U$ .....	82
<b>Figura 5-5:</b> Gráficos de volumen de respuesta de rendimiento de las $ME_U$ .....	84
<b>Figura 6-1:</b> Gráficos de superficie y volumen de repuesta de $X_w$ , S, H y $H_u$ de la $MPUA$ . .....	101
<b>Figura 6-2:</b> Gráficos de volumen de respuesta del $D_{[4,3]}$ de las $MPUA$ .....	103
<b>Figura 6-3:</b> Gráficos de superficie y volumen de respuesta de la $\rho_a$ de las $MPUA$ .....	105
<b>Figura 6-4:</b> Gráficos de volumen de respuesta de IC y RH de las $MPUA$ .....	105
<b>Figura 6-5:</b> Gráficos de volumen de respuesta de FT y FLT de las $MPUA$ .....	106
<b>Figura 6-6:</b> Gráficos de volumen de respuesta de la actividad antioxidante (DPPH y ABTS) de las $MPUA$ .....	107
<b>Figura 6-7:</b> Gráficos de volumen de respuesta de Vit.C y $\beta$ -car de las $MPUA$ .....	109
<b>Figura 6-8:</b> Gráfico de superficie y volumen de respuesta de rendimiento de $MPUA$ ..	110



---

<b>Figura 6-9:</b> Micrografías por SEM del PU (A y C) y de la MPUA (B y D) a la condición óptima de aglomeración. ....	111
<b>Figura 6-10:</b> Temperaturas de transición vítrea del PU y MPUA.....	113

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Nutrientes en 100 g de uchuva. ....	22
<b>Tabla 4-1:</b> Parámetros fisicoquímicos de la pulpa de uchuva homogenizada. ....	54
<b>Tabla 4-2:</b> Resultados de las variables dependientes del $SC_u$ . ....	56
<b>Tabla 4-3:</b> Resultados del ANOVA para el $SC_u$ . ....	56
<b>Tabla 4-4:</b> Coeficientes de regresión del modelo matemático y $R^2$ para las variables dependientes del $SC_u$ . ....	62
<b>Tabla 4-5:</b> Optimización experimental de múltiples respuestas para el $SC_u$ . ....	63
<b>Tabla 5-1:</b> Resultados de las variables dependientes del proceso de SA de $ME_U$ según diseño experimental. ....	77
<b>Tabla 5-2:</b> Valores de $p$ para el modelo de superficie de respuesta de SA de $ME_U$ .....	78
<b>Tabla 5-3:</b> Coeficientes de regresión del modelo matemático y $R^2$ para para las variables dependientes de $ME_U$ . ....	85
<b>Tabla 5-4:</b> Criterios de optimización y optimización experimental multiobjetivo del proceso de SA de $ME_U$ . ....	86
<b>Tabla 6-1:</b> Propiedades de la MPUA obtenidas por lecho fluidizado en función de las variables independientes según diseño experimental. ....	100
<b>Tabla 6-2:</b> Valores de $p$ para el modelo de superficie de respuesta de la MPUA. ....	101
<b>Tabla 6-3:</b> Optimización experimental del proceso de aglomeración de la MPUA. ....	110

# INTRODUCCIÓN

## Interés de la investigación.

Las frutas y verduras representan un tipo de alimento que contribuye a una dieta saludable, que proporcionan fibra, carbohidratos de digestión lenta, vitaminas, minerales, y numerosos fitonutrientes, como polifenoles, vitamina C, Vitamina E,  $\beta$ - caroteno y otros carotenoides, los cuales son reportados como antimutágenos, anticarcinógenos y son referidos como “antioxidantes”, los cuales se han asociado a la protección y prevención de enfermedades cardiovasculares, enfermedades de tipo cancerígeno, estimulación del sistema inmune, mejora en el metabolismo del colesterol, propiedades antivirales y antimicrobianas, entre otros (Amao, 2016).

Colombia al ser un país tropical y gracias a sus condiciones agroecológicas (ubicación geográfica, y condiciones de clima y suelo), lo perfilan como un país líder en la producción de frutas, facilitando su cosecha en lo corrido del año; que le facilita abastecer el mercado interno; sin embargo, no se encuentra dentro de los principales exportadores de frutas en el mundo (FINAGRO, 2014). Por otro lado, la producción y comercialización de frutas frescas se enfrentan a pérdidas poscosechas, estas varían según el producto y su fisiología, variedad, condiciones de transporte, manejo y almacenamiento que se utilicen estas pérdidas pueden representar entre un 5 y un 25% de las cosechas (Decco, 2019). Adicionalmente, los países en vía de desarrollo, por su limitada infraestructura y tecnología en la etapa de poscosecha, presentan mayores números de intermediarios a lo largo de la cadena de suministro, esto afecta e incide en los precios y pérdidas de alimentos (Olivares, 2017).

Dentro de la gran diversidad de frutas que se producen, se destaca la uchuva, siendo Colombia el mayor productor a nivel mundial, la cual presenta altos índices de producción en Antioquia y Nariño. Además es reconocida por sus características nutricionales, propiedades sensoriales y alta cantidad de compuestos que le otorgan propiedades medicinales (Balaguera et al., 2016). El fruto se clasifica como climatérico, por lo cual los procesos de maduración se llevan a cabo de forma acelerada en condiciones naturales, dando paso al estado de senescencia de los tejidos, conllevando a reducción de calidad y vida útil de los frutos (Lanchero et al., 2007).

Sumado a lo anterior, la mayoría de frutas tienen problemas de estacionalidad en las cosechas y alta perecibilidad, por sus contenidos de agua son susceptibles de deterioro por reacciones enzimáticas, químicas o acción microbiana. La producción alcanza volúmenes considerables en períodos de cosecha, bajando los precios internos, haciendo menos competitivo al sector frutícola. Adicionalmente, se generan grandes pérdidas económicas por las dificultades para el transporte hasta los centros de acopio, el inadecuado manejo poscosecha y los problemas fitosanitarios (Arias & Rendón, 2015).

En este sentido, es necesario considerar y desarrollar alternativas de procesamiento, que contribuyan mejorar la eficiencia y rentabilidad de la cadena productiva mediante la transformación de la fruta en productos procesados, dado que las pérdidas en cosecha y poscosecha de uchuva en el país, pueden alcanzar hasta el 45% del total de la producción (Castro et al., 2014).

Por otro lado, la transformación contribuiría a obtener productos más estables (menores actividades de agua, lo que se traduce a mayor vida útil) y que tengan demanda bien sea como materias primas industriales o directamente hacia el consumidor final, de esta manera, lograr beneficio del avance tecnológico de la industria agroalimentaria regional ofreciendo un alimento con mayor valor agregado y de innovación tecnológica, que permita incrementar la productividad y competitividad de la cadena productiva

La uchuva, se encuentra en el mercado principalmente como fruta fresca, pulpa y mermelada, dando la posibilidad de generar brechas en la innovación de su procesamiento, para obtener productos con mayor vida útil y que tengan demanda bien sea como materias primas industriales o directamente hacia el consumidor final; de esta manera, lograr beneficio del avance tecnológico de la industria agroalimentaria regional ofreciendo un alimento con mayor valor agregado y de innovación tecnológica (Olivares, 2017).

En este contexto, se seleccionaron para el procesamiento de uchuva dos tecnologías ampliamente utilizadas en la industria y con grandes ventajas, tales como el secado por aspersión y la aglomeración; el primer proceso presenta ventajas importantes, como rápidos tiempos de procesamiento, bajos costos energéticos y obtención de productos con alta estabilidad y baja actividad de agua (Sagar & Suresh, 2010) el segundo proceso permite una mayor estabilidad en el tiempo y facilidad de reconstitución de los productos en polvo.

# 1.MARCO TEÓRICO

## 1.1 Generalidades de la uchuva.

La uchuva (*Physalis peruviana* L.), pertenece a la familia de las Solanáceas y al género *Physalis*, cuenta con más de ochenta variedades que se encuentran en estado silvestre y que se caracterizan porque sus frutos están encerrados dentro de un cáliz o capacho, que lo protege contra insectos, aves, condiciones ambientales y microorganismos patógenos (Mendoza et al., 2012).

La uchuva crece como planta silvestre y semisilvestre en altitudes entre los 1.500 y 3.000 m.s.n.m.(Patiño et al., 2014). El fruto es una baya jugosa en forma de globo u ovoide con un diámetro entre 1,25 y 2,15 cm, con un peso de 4 a 10 gramos, que contiene unas 100 a 300 semillas; su estructura interna es similar a la de un tomate en miniatura. La baya varía desde verde en sus etapas iniciales y de color amarillo a ocre o amarillo naranja cuando madura, su piel es delgada y lustrosa. Adicionalmente, es un fruto con un comportamiento climatérico que presenta aumento en la síntesis de etileno durante el climaterio, siendo esta hormona la posible responsable de la alta perecibilidad que presenta este fruto (Balaguera et al., 2016). Se consume en forma natural, en ensaladas, mermeladas y jugos (Suescún et al., 2011).

Este fruto es una excelente fuente de vitamina A y C, también presenta cantidades importantes de vitaminas del complejo B, como tiamina, niacina y vitamina B12 (Tabla 1). Los niveles de proteína y fósforo son excepcionalmente altos, mientras que el contenido de calcio es bajo (Olivares et al., 2016). Además de otros minerales, también tienen una gran cantidad de compuestos antioxidantes como tocoferoles y carotenoides y otros compuestos con actividad biológica como los withanólidos que presentan una alta actividad biológica con propiedades interesantes, tales como actividad repelente, actividad inmunomoduladora, antibacteriana, antiinflamatoria, antitumoral y antihepatotóxica (Puente et al., 2011; Ramadan, 2011).

Todas estas características hacen que la uchuva sea ampliamente apetecida a nivel mundial; por sus múltiples propiedades y beneficios para la salud, se ha usado en el mundo como medicina natural para prevenir enfermedades degenerativas (Mokhtar et al., 2018).

Por otra parte, el jugo de la uchuva madura tiene altos contenidos de pectinasa, lo que disminuye los costos en la elaboración de mermeladas y otros preparativos similares (Patiño et al., 2014).

**Tabla 1-1:** Nutrientes en 100 g de uchuva.

Nutriente	Cantidad
Agua(g)	78.9
Proteínas (g)	0.05-0.3
Lípidos (g)	0.15-0.2
Carbohidratos (g)	19.6
Fibra (g)	4.9
Cenizas (g)	1.0
Calcio (mg)	8.0
Fósforo (mg)	55.3
Hierro (mg)	1.2
Carotenos (mg)	1.6
Tiamina (mg)	0.1
Riboflavina (mg)	0.03
Niacina (mg)	1.7
Ácido ascórbico (mg)	43.0

Fuente: (Ramadan , 2011)

## 1.2 Contexto económico de la uchuva.

Su producción y exportación es principalmente de los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Antioquia y Nariño, en el 2020, la producción de las cuatro regiones tuvo un 86.7% (Agronet, 2021). Sin embargo, otros territorios a nivel nacional también poseen las condiciones adecuadas para la producción del fruto, puesto que varias regiones cuentan con características para que este sea cultivado de forma óptima (López, 2017), como es el caso de Santander y Norte de Santander que ocupan el cuarto y quinto lugar en producción, respectivamente.

Por otra parte, la productividad de los cultivos de uchuva se puede analizar considerando la relación existente entre toneladas producidas y cultivos. En el 2020, Boyacá (422 ha), Cundinamarca (377.4 ha), Antioquia (9.5 ha) y Nariño (240.5 ha) fueron los departamentos más productivos, con 17.150 toneladas, lo cual fue 32% mayor frente a lo producido en 2019 (11.617 ton) (Agronet, 2021; Analdex, 2019).

En el departamento de Antioquia los municipios con mayor producción para el 2020 fueron: Sonson (1000.0 ton – 50.0 ha), Rionegro (200.0 ton – 10.0 ha), Urrao (150.0 ton – 6.0 ha) y San Vicente (126 ton – 9.0 ha); por otro lado, en el departamento de Nariño los municipios fueron: Ipiales (476.0 ton – 34.0 ha), San Pablo (464.0 ton – 145.0 ha), Puerres (252.0 ton – 18 ha) y Gualmatan (189.0 ton – 21 ha) (Agronet, 2021).

Colombia es el mayor productor (19.775,69 ton - 2020) (Agronet, 2021), (aproximadamente representa el 90% de la producción mundial) y exportador en el mundo, así pues, para el año 2019 sus exportaciones totales fueron de 8.287 toneladas que significaron 35.6 millones de dólares, con un crecimiento del 10%. (Procolombia, 2020), entre enero – mayo

del 2021, el peso de las exportaciones alcanzó la cifra de 3.424 toneladas, presentando un crecimiento de 1.2% respecto al mismo periodo 2020 (Analdex, 2021). Sudáfrica, le sigue en participación, pero en menor escala. Otros países productores son: Kenia, Inglaterra, Nueva Zelanda, India, Zimbabwe, Australia, Ecuador y Perú (Granados et al., 2019).

Los principales destinos de exportación fueron: Países Bajos, Estados Unidos y Alemania; siendo Países Bajos el principal país de destino de la uchuva con una participación de 70.7% del total exportado en lo corrido del año, seguido de Estados Unidos con 10.9% y Alemania con 6.4% (Analdex, 2021). La uchuva es la quinta fruta fresca que exporta Colombia después de banano, aguacate, plátano y gulupa, y es la segunda fruta exótica más exportada después de la gulupa (Granados et al., 2019).

No se han seleccionado variedades y solamente se conocen ecotipos o plantas procedentes de diferentes regiones o países, que se diferencian por el tamaño, el color y el sabor, la forma del cáliz y el porte de la planta. Actualmente se cultivan tres tipos de uchuva originarias de Colombia, Kenia y Sudáfrica (Mendoza et al., 2012).

Estados Unidos y la Unión Europea presentan oportunidades de mercado que resultan interesantes, llamando la atención por el crecimiento del mercado de frutas exóticas y frescas. Dicha situación, encuentra causa, entre otras, en el aumento de la tendencia de consumo de productos saludables, que se ha presentado en los últimos años y donde gracias a “la globalización y el conocimiento de nuevas culturas se ha impulsado significativamente el consumo de variedades de frutas nuevas y poco convencionales tales como: maracuyá, uchuva, gulupa, granadilla, tamarillo, baby banana, aguacate hass y pitahaya, entre otras” (López, 2017).

### **1.3 Deshidratación de alimentos.**

El alto contenido de humedad en las frutas lleva a tener una alta actividad de agua que conduce a la pérdida de calidad en las frutas al aumentar la actividad enzimática y el crecimiento microbiano. Por lo tanto, la reducción del contenido de humedad y la actividad del agua en los alimentos siempre es deseable para mantener su calidad (Phisut, 2012), con lo que se consigue un almacenamiento seguro durante un largo período, una reducción sustancial en el peso y el volumen que resulta en menores costos de empaque, almacenamiento y transporte (Zhang et al., 2017). De esta manera, el secado o deshidratación es una técnica antigua, aplicada para estabilizar y aumentar la vida útil de los productos agroalimentarios posterior a la cosecha.

Comúnmente se usan tres palabras para expresar la reducción de agua de un producto alimenticio "secado", "deshidración" o "deshidratación". Estas palabras se utilizan para diferenciar el proceso según el nivel de agua extraída. El "secado" del material alimenticio se produce cuando el vapor de agua se elimina de su superficie al espacio circundante, dando como resultado una forma relativamente seca del material. En la "deshidración", el

agua líquida se drena o exprime del material. En la “deshidratación”, la evaporación del agua tiene lugar inicialmente en la superficie del agua (difusión externa) y luego desde la superficie interior del producto (difusión interna) (Pragati & Preeti, 2014).

Son muchas las técnicas de secado que se han desarrollado, como el secado por aspersión, el secado por congelación y el secado de bandejas, que se han implementado para aumentar la productividad y lograr el mejor control de un proceso, lo que contribuye a la calidad del producto (Phisut, 2012).

Dentro de los procesos de deshidratación, la aspersión (spray drying) es una alternativa interesante. Su aplicación se inició con la obtención de leche, café y cacao en polvo extendiéndose actualmente a los zumos de frutas (Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017) y a la encapsulación de compuestos sensibles al calor como los carotenoides y polifenoles (Akhavan et al., 2016; Etbach et al., 2020; García et al., 2018; Rigon & Zapata, 2016).

## 1.4 Secado por aspersión.

La atomización o secado por aspersión se utiliza en una amplia gama de productos en las industrias alimentarias, tales como huevos y sus derivados, bebidas, proteínas vegetales, extractos de frutas y vegetales, matrices con alta cantidad de carbohidratos, como féculas, extractos de té y jugos de frutas, entre otras. Consiste en la obtención de un producto en polvo a partir de un material líquido concentrado que se pulveriza dentro de una cámara, formando una niebla que entra en contacto con una corriente de aire caliente, que actúa como medio calefactor y fluido de transporte, permitiendo la evaporación inmediata del agua. El líquido inicial que alimenta al atomizador puede ser una solución, una emulsión o una suspensión. El agua se evapora por la diferencia del potencial químico de la partícula y el aire de secado, y las partículas secas quedan suspendidas en la corriente de aire, donde son transportadas hasta su separación. Este tipo de deshidratación es una forma rápida de eliminación de agua en un tiempo corto de contacto gota-aire caliente, conservando en mayor grado las características iniciales del producto (Cal & Sollohub, 2010; Muzaffar et al., 2018; Santos et al., 2018; Tontul & Topuz, 2017).

Los alimentos que se secan por aspersión se pueden dividir en dos grupos principales, a saber, no pegajoso y pegajoso. Los materiales alimenticios no pegajosos se pueden secar por aspersión fácilmente con un diseño de secador simple y el polvo final permanece libre. Los ejemplos de materiales no pegajosos incluyen polvos de huevo, polvos lácteos, café y soluciones tales como maltodextrina, gomas y proteínas. En el caso de alimentos pegajosos, se produce un problema en el secado. En condiciones normales de secado por aspersión, los alimentos pegajosos generalmente se pegan en la pared del secador o pueden transformarse en aglomerados no deseados en la cámara del secador y en el sistema de transporte, lo que conduce a problemas de operación y bajo rendimiento de producto. Los ejemplos de alimentos pegajosos incluyen azúcar y alimentos ricos en ácido (Muzaffar et al., 2015; Shishir & Chen, 2017).



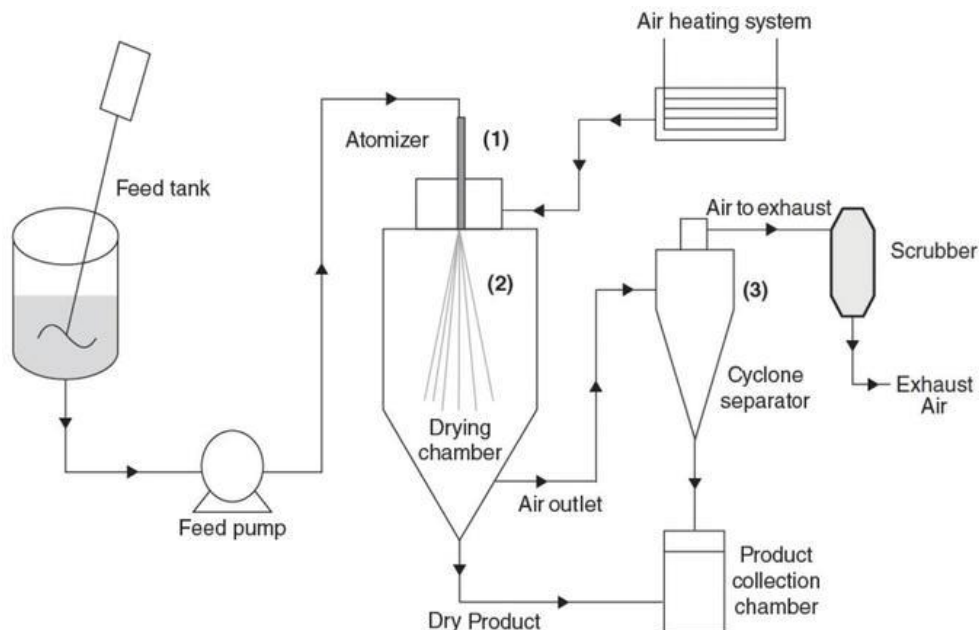
Los jugos de frutas presentan estos inconvenientes, debido al alto contenido en ácidos, como el cítrico y el málico, azúcares de bajo peso molecular como la sacarosa, glucosa y fructuosa en su composición, que hace que el producto obtenido sea altamente higroscópico, mostrando, enseguida, problemas de pegajosidad y apelmazamiento (Verma & Singh, 2015). Una técnica habitual para contrarrestar estos problemas es la incorporación de determinados solutos que eviten la adherencia de las partículas en polvo tanto al equipo como entre sí. Los solutos deben ser solubles y aportar baja viscosidad al jugo para realizar una aspersión correcta del producto durante el atomizado. En general, se trata de solutos de alto peso molecular como polisacáridos y proteínas, tales como maltodextrina, goma arábica, pectinas, silicato de calcio y la carboximetilcelulosa se han utilizado en la producción de jugos en polvo (Sobulska & Zbicinski, 2020).

El proceso de secado por aspersión implica principalmente los siguientes pasos:

- Preparación del producto a secar (generalmente la concentración de jugo y la adición de materiales portadores).
- Atomización de la alimentación.
- Contacto de gotas con aire caliente.
- Secado de gotas atomizadas.
- Separación de partículas secas del aire húmedo.

Como se muestra en la Figura 1-1, se bombea la alimentación a un atomizador, rompiendo la alimentación del líquido en una pulverización de gotas finas. Luego, las gotas se expulsan a una cámara de gas de secado donde se produce la vaporización de humedad, lo que resulta en la formación de partículas secas. Finalmente, usando un dispositivo apropiado, las partículas secas se separan del medio de secado y luego se recogen en un tanque (Santos et al., 2017).

**Preparación del producto a secar.** El alimento se concentra antes del secado por aspersión para lograr una operación de secado rentable. El aumento de la cantidad de sólidos del producto a secar disminuye la cantidad de humedad, por lo tanto, la energía necesaria para evaporar el agua. Además, se agregan algunos materiales de soporte o encapsulantes para aumentar el rendimiento del producto y mejorar las características físicas del producto final. Los materiales portadores comunes utilizados en el secado por aspersión de jugos de frutas son maltodextrina, goma arábica, proteínas de la leche (aislado de proteína de suero, caseinato de sodio) y proteínas vegetales (Tontul & Topuz, 2017).



**Figura 1-1.** Representación esquemática del mecanismo de secado por aspersión. (1) Atomización. (2) Conversión de gota a partícula. (3) Recolección de partículas.

Fuente: Santos et al., 2017.

**Atomización de la alimentación.** El objetivo principal de la atomización es aumentar el área efectiva de secado mediante la conversión de un líquido en una pulverización o neblina. El área de superficie más grande resulta en una transferencia de calor y masa más eficiente. La atomización se realiza a la entrada del secador y se logra mediante atomizadores rotativos, boquillas hidráulicas, boquillas neumáticas y boquillas ultrasónicas (Santos et al., 2018; Shishir & Chen, 2017).

**Contacto de gotas con aire caliente.** El contacto aire-gota se realiza en la cámara de secado justo después de atomización de la alimentación en los siguientes pasos:

- Energía térmica transferida del aire caliente a las gotas, utilizado para la evaporación.
- La temperatura del aire cae instantáneamente debido a la evaporación.
- El aire refrigerado transporta neumáticamente las partículas a lo largo del sistema de secado (Phisut, 2012).

El secado se puede clasificar en tres modelos según la dirección de secado del aire y la alimentación. El modelo en paralelo, que es el modelo de secado más común utilizado en la industria alimentaria, el alimento se rocía en la misma dirección con el aire caliente. En este modelo, se supone que los polvos están expuestos a la temperatura de bulbo húmedo. En el secado a contracorriente, la dirección de atomización es opuesta al flujo de aire de secado. Por lo tanto, las gotas atomizadas se encuentran en primer lugar con el aire más frío que garantiza un aumento gradual de la temperatura de la partícula. Sin embargo, este modelo no es adecuado para alimentos sensibles a la temperatura (Cal & Sollohub, 2010; Santos et al., 2018; Tontul & Topuz, 2017).

**Secado de gotas atomizadas.** El secado de las gotas ocurre bajo los siguientes pasos:

- Justo después del contacto de las gotas con el aire, la temperatura de las gotas aumenta hasta la temperatura del bulbo húmedo.
- La evaporación del agua continúa a temperatura constante y presión parcial de vapor de agua. Este paso lleva hasta la tasa de la difusión es igual a la velocidad de secado.
- En el paso final, después de la formación de corteza seca en la superficie de la gota, la velocidad de secado disminuye y se vuelve dependiente de la velocidad de difusión del agua. El secado se completa cuando la temperatura del aire de secado y la temperatura de las partículas se igualan (Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017).

**Separación de partículas secas.** La separación de las partículas secas del aire húmedo se alcanza utilizando ciclones, filtros de bolsa, depuradores húmedos y precipitadores electrostáticos (Santos et al., 2018; Verma & Singh, 2015).

La calidad de los alimentos secados por aspersión depende de los diferentes factores de los sistemas operativos del secador como los tipos de agente portador y su concentración que afecta las propiedades del polvo de jugo de fruta, la temperatura de entrada, la velocidad de flujo de aire seco, la velocidad de flujo de alimentación y la velocidad del atomizador (Phisut, 2012; Shishir & Chen, 2017).

**Materiales de transporte.** La cantidad cada vez mayor de material portador en la alimentación disminuye el contenido de humedad del producto final. El mayor contenido del material portador reduce la cantidad de agua libre para la evaporación. Por otro lado, se observó una tendencia opuesta para los materiales portadores basados en proteínas como el concentrado de proteína de suero, caseinato de sodio y aislado de proteína de soja. Esto puede atribuirse a la mayor capacidad de retención de agua de las proteínas en su estado amorfo (Phisut, 2012; Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017).

**Velocidad de flujo de alimentación.** En general, la velocidad de flujo de alimentación tiene un efecto negativo en el contenido de humedad del producto final. El caudal más alto aumenta el tamaño de las gotas formadas y acorta el tiempo de contacto entre las gotas y el aire de secado. Por lo tanto, se produce una menor evaporación del agua en las gotas debido a una transferencia de calor menos efectiva (Tontul & Topuz, 2017).

**Atomización.** El aumento de la velocidad o presión de atomización da como resultado una gota más pequeña, por lo tanto, un área de superficie de secado más grande. Un área más grande aumenta la eficiencia de la transferencia de calor y masa y acorta la ruta de difusión del agua en las gotas. Por lo tanto, aumentar la velocidad o presión de atomización disminuye el contenido de humedad de los polvos finales (Santos et al., 2018; Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017).

**Temperatura de entrada y salida.** El uso de una temperatura de entrada más alta ofrece mayor energía al medio de secado y aumenta la transferencia de calor. Sin embargo, el uso de temperaturas muy altas puede causar la formación de costra instantánea en la superficie de la partícula, lo que ocasiona dificultades en la difusión del agua. Por lo tanto,

se debe tener cuidado al elegir la temperatura de secado. Como regla general, el aumento de la temperatura de entrada (por lo tanto, la temperatura de salida) da como resultado un menor contenido de humedad del producto (Phisut, 2012; Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017).

## 1.5 Proceso de aglomeración

La aglomeración es una operación unitaria ampliamente utilizada en la industria alimentaria, donde las partículas primarias se fijan juntas para formar partículas secundarias porosas más grandes, es decir, mejorar las propiedades de los polvos finos que causa cambios en la estructura y el tamaño de las partículas, los cuales a menudo se componen de material amorfo higrosensible, para generar una mejor fluidez, un manejo más sencillo y una apariencia más atractiva (Cuq et al., 2013).

Los polvos son higroscópicos y para alimentos finos son difíciles de usar y de comercializar. Los problemas típicos relacionados con polvos que contienen gránulos por debajo de 100  $\mu\text{m}$  son: polvo, grumos, dificultad para disolverse en agua e inhibición del flujo durante la dosificación. Es por ello, que la aglomeración de tales polvos proporciona una solución a estos problemas (Szulc & Lenart, 2013).

Dentro de estos aglomerados, las partículas primarias individuales todavía son visibles. Los polvos fácilmente dosificables se aglomeran para proporcionar propiedades instantáneas. Deben rehidratarse o disolverse rápidamente sin formar grumos. Además, la fluidez de los polvos se mejora por aglomeración. La buena fluidez es especialmente importante para la dosificación de polvos (Palzer, 2007).

En alimentos, la aglomeración es parcialmente irreversible: rehidratación, calentamiento y tensión. Los mecanismos de aglomeración se basan en la reactividad fisicoquímica del alimento. El proceso de aglomeración se puede subdividir en aglomeración húmeda o seca, dependiendo de si se agrega o no líquido aglutinante (Bhandari et al., 2013).

### 1.5.1 Aglomeración por deposición o aglomeración húmeda.

También denominada aglomeración de crecimiento controlado en húmedo o aglomeración por colisión, en este proceso se adiciona en forma de pulverización agua o un aglomerante líquido sobre un lecho de polvo agitado (Cuq, 2013 Agglomeration/granulation in food powder production).

La aglomeración húmeda es un proceso que involucra una gran cantidad de parámetros físicos y fisicoquímicos. Sea cual sea el tipo de polvo, el proceso de aglomeración húmeda se basa en el acoplamiento de dos operaciones unitarias (Cuq et al., 2013). En primer lugar, la adición de líquido hace que se desarrollen fuerzas de adhesión entre las partículas, el agua se dispersa sobre las partículas mediante el proceso de mezclado y el

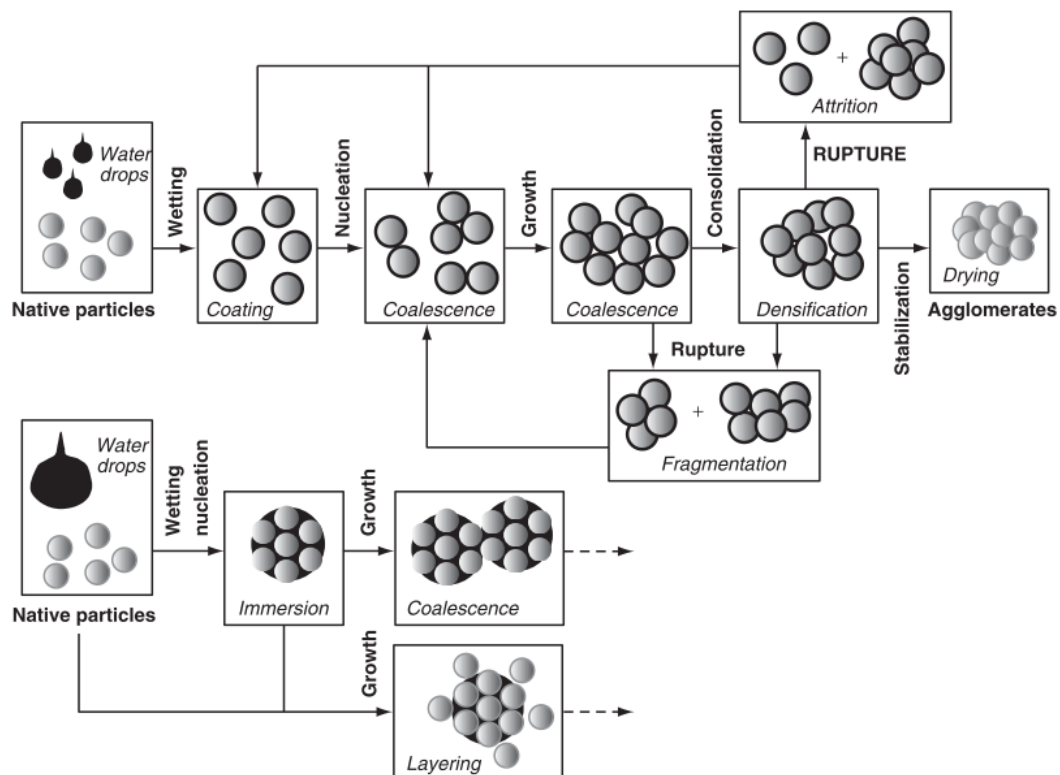
aumento de los movimientos de las partículas promueve el aumento del tamaño de las partículas (Yuksel & Dirim, 2018). En segundo lugar, mezclar el polvo a granel dispersa el líquido sobre las partículas, promoviendo el crecimiento al mejorar varios movimientos (por ejemplo, cizallamiento, compresión, rotación, traslación, etc.) y al controlar la energía cinética de las partículas que chocan y el tiempo de contacto durante la colisión (Cuq et al., 2013).

Adicionalmente, la aglomeración se describe como una combinación de tres procesos a diferentes velocidades: humectación-nucleación, consolidación-crecimiento y desgastrotura (Rondet et al., 2016), como se muestra en la Figura 1-2. El avance del proceso depende de la contribución específica de cada proceso. Los mecanismos de crecimiento dependen de las contribuciones opuestas de los mecanismos de cohesión y ruptura. Las fuerzas de cohesión generan interacciones entre partículas, mientras que las fuerzas de ruptura y los efectos de cizallamiento locales conducen a la rotura. Los mecanismos de desgaste y rotura ayudan a mejorar la homogeneidad y la resistencia de los gránulos al promover la consolidación, además del evidente retraso del crecimiento (Cuq et al., 2013; Rondet et al., 2016).

La tecnología de aglomeración por humectación proporciona propiedades instantáneas más altas, como la dispersabilidad, solubilidad, humectabilidad, y también obtiene un tamaño de partícula alto y una morfología porosa que permite la producción de la alta calidad deseada. Los polvos con propiedades instantáneas mejoradas aumentan la apreciación del consumidor, reducen las pérdidas de polvo durante el procesamiento y facilitan el manejo de estos polvos en la industria (Atalar & Yazici, 2021).

### **1.5.2 Aglomeración por compresión o aglomeración seca.**

En este proceso, el polvo se transforma en un producto compacto por compresión, utilizando un sistema a presión a un volumen de polvo confinado para generar adhesión entre las partículas. Las partículas casi esféricas se someten a un proceso de deformación bajo presión para disminuir la distancia entre sus superficies y generar puntos de contacto (Cuq et al., 2013). Cuando la aglomeración a presión se lleva a cabo sin adición de líquido, las fuerzas de van der Waals son responsables de la adhesión de las partículas. La aglomeración seca es de particular interés porque el producto final no requiere proceso de secado. Se puede incorporar un aglutinante líquido para aumentar las fuerzas de adhesión entre las partículas. Dependiendo de la naturaleza del material, la etapa de compresión puede ir seguida de una etapa de sinterización adicional para estabilizar los puntos de contacto. La aglomeración bajo presión estática se puede operar utilizando diferentes tecnologías: compactación con rodillos, formación de tabletas o extrusión (Bhandari et al., 2013; Palzer, 2007).



**Figura 1-2.** Descripción esquemática de los diferentes mecanismos que contribuyen a la aglomeración de polvos por vía húmeda.

Fuente: Cuq et al. (2013)

## 2.OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Desarrollar un producto aglomerado de uchuva (*Physalis peruviana* L.) con características instantáneas y potencial efecto antioxidante.

### 2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la influencia del tratamiento enzimático y desintegración por cizalla en sistemas coloidales de uchuva con semilla y cáscara.
- Evaluar la influencia de la formulación y las condiciones de operación del secado por aspersión sobre la calidad del polvo de uchuva.
- Evaluar la influencia de la formulación de la solución aglomerante y de las condiciones del proceso de aglomeración, sobre la calidad del polvo aglomerado de uchuva con potencial efecto antioxidante

### 3. AVANCES TECNOLÓGICOS EN EL PROCESO DE TRANSFORMACIÓN DE LA UCHUVA: UNA REVISIÓN.

Soany Eraso-Grisales<sup>a</sup>, Manuela Gallón-Bedoya<sup>a</sup>, Misael Cortés-Rodríguez<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad Ciencias Agrarias, Departamento Ingeniería Agrícola y Alimentos, Cra. 65 No. 59A – 110, Medellín, Colombia.

\* Corresponding author: [skerasog@unal.edu.co](mailto:skerasog@unal.edu.co)

#### 3.1 Resumen

La uchuva catalogada como fruta exótica, altamente apreciada en el mercado exterior por su sabor y color, además por su alta actividad antioxidante y contenido fenólico, lo cual ha sido demostrado por diversas investigaciones. Su versatilidad de uso le otorga aun mayor importancia, pues la industria alimentaria ha utilizado la uchuva en diferentes productos, como bebidas, postres, yogures y mermeladas. Con la creciente popularidad de esta fruta, es importante tener una referencia integral de sus beneficios nutricionales y de transformación. Esta revisión proporciona una visión general de los compuestos nutricionales y bioactivos presentes en la uchuva, al igual que las investigaciones que se han realizado con el fin de extender su vida útil mediante el proceso de deshidratación. La revisión se realizó mediante la consulta de artículos científicos de investigaciones realizadas en Colombia y otros países, indexados en bases de datos como Elsevier, Springerlink, Taylor & Francis, durante los últimos 20 años. Se determinó que la uchuva es una fuente de diversos compuestos que a nivel nutricional y farmacéutico representan grandes beneficios para la salud.

**Palabras claves:** *Physalis peruviana*, compuestos bioactivos, secado, vida útil.

#### 3.2 Introducción

Las frutas brindan importantes beneficios para la salud debido a sus altos contenidos de antioxidantes, vitaminas, minerales y fibra, ayudando a reducir la incidencia de enfermedades degenerativas, como envejecimiento, arteriosclerosis, artritis, disfunción



cerebral, cáncer, enfermedades cardíacas e inflamación (Elong et al., 2015). Dentro de la gran diversidad de frutas y sus benéficos nutricionales se encuentra la uchuva.

La uchuva (*Physalis peruviana* L.), es una fruta ampliamente conocida y consumida en el mundo, es originaria de Perú, aunque actualmente se cultiva en toda la zona de los Andes y Sudáfrica, gracias a que hace 200 años fue introducida en este último país, como tratamiento para el escorbuto y de allí se expandió hacia el resto de África (Kenia, Zimbabue), Asia (India, Malasia y China) y Oceanía (Australia y Nueva Zelanda), resultando en 80 diferentes ecotipos conocidos a nivel mundial (Flórez et al., 2000). Colombia actualmente es el principal exportador de esta fruta, en el país se cuenta con varios ecotipos silvestres y 3 comerciales: Kenia, Sudáfrica y Colombia, este último cuenta con una coloración más intensa y mayor contenido de azúcares, por lo que es el más demandado en los mercados internacionales (Rodríguez & Bueno, 2006).

La planta de la uchuva crece inicialmente como hierba y en el segundo año, forma un arbusto perenne y semileñoso, con hojas acorazonadas simples, alternas y pubescentes y tamaños que van desde los 5-10 cm de largo y 4-10 cm de ancho. El tallo de la planta forma entre 8-12 nudos, con dos ramificaciones discales, las plantas alcanzan entre 1-1,5 m de altura, pero si podan y soportan pueden llegar a medir hasta 2 m de alto. Las flores de esta planta son hermafroditas, de color amarillo y forma de campana, estas son polinizadas con la ayuda de los insectos y el viento, aunque también presentan auto polinización (Gerhard Fischer et al., 2005).

Los frutos, están envueltos en una especie de cubierta llamada cáliz o capacho formado por cinco sépalos y de color verde al inicio, pero amarillo opaco después de 40-45 días de haberse formado, la función de esta cubierta es brindar protección al fruto contra agentes externos que puedan causarle daños como condiciones climáticas severas, aves, insectos, plagas y microorganismos patógenos (Gerhard Fischer et al., 2014).

El fruto de la uchuva, es una baya, climatérica, de forma esférica y diámetros que van desde los 1,25-2,50 cm y pesos entre los 4-10 g por fruto, en su interior contiene de 100 a 300 semillas de forma redonda y plana (López-Gaytán et al., 2006); el exterior del fruto está cubierto por una piel delgada y brillante y alta en pectinas. Al ser un fruto carotenogénico, su color cambia del verde al amarillo naranja durante el proceso de maduración y se debe a la alta presencia de carotenos almacenados en los cromoplastos de la célula vegetal (Duque et al., 2018; Olivares et al., 2016; Reyes-Medina et al., 2017). Durante el proceso de maduración, ocurren gran cantidad de cambios en la fruta, tales como variaciones en su sabor, color, aroma, firmeza y aumento en la cantidad de sólidos solubles y capacidad antioxidante (G. Fischer et al., 2014). Se caracteriza por presentar elevados contenidos de vitaminas A y C, además de hierro y fósforo. A pesar de que la especie *Physalis peruviana* crece como planta silvestre en las zonas tropicales de América, ha sido introducida a África e India, existiendo hoy más de 80 ecotipos a nivel mundial (Gerhard Fischer et al., 2014).

En general, la uchuva es considerada una "Superfruta" debido a sus propiedades, nutricionales, funcionales y medicinales (G. Fischer et al., 2011). Por ejemplo, es una base excelente para productos funcionales y dietéticos debido a su alto nivel de fructosa y su bajo valor energético (Ramadan, 2011a), algunas vitaminas del complejo B (tiamina, niacina y vitamina B<sub>12</sub>). Además, la fruta es rica en proteínas crudas, fósforo, potasio y hierro, aunque el contenido de calcio es bajo. Se destaca su alto contenido de antioxidantes, ácidos grasos poliinsaturados y fitoesteroles (G. Fischer et al., 2014; Puente et al., 2011).

El procesamiento es una alternativa de conservación para productos ricos en elementos nutritivos, como carbohidratos, proteínas, vitaminas, minerales y fibras, así el objetivo de esta revisión fue identificar la literatura reportada sobre los compuestos bioactivos de la uchuva y los procesos utilizados en la industria, que permiten aumentar la vida útil de este alimento.

### **3.3 Compuestos bioactivos presentes en la uchuva y su efecto en la salud**

La planta de uchuva, tiene grandes propiedades nutricionales, tanto sus hojas como frutos han sido estudiados ampliamente con el fin de identificar los compuestos que presentan beneficios para la salud, como propiedades antiinflamatorias, hipoglicémicas, antihepatotóxicas, antioxidantes y purificadoras de la sangre, las cuales se le atribuyen a la alta concentración de polifenoles, carotenos, vitamina C, vitamina E y vitaminas del complejo B (Jurado et al., 2016), entre otros compuestos con actividad biológica, como β-carotenos, catequinas y epicatequinas (Olivares-Tenorio et al., 2017), ácido cafeico, gálico, clorogénico, ferúlico y p-cumárico, flavonoides como quercetinas, rutina, myricetina y kaempferol y alta actividad antioxidante (Olivares et al., 2016).

El fruto de uchuva se ha utilizado como una buena fuente de provitamina A, minerales, vitamina C y complejo de vitamina B. La fruta contiene 15% de sólidos solubles (principalmente azúcares) y su alto nivel de fructosa lo hace valioso para los diabéticos. El nivel de fósforo es alto para una fruta. Su alto contenido de fibra dietética es importante, en donde la pectina de la fruta actúa como un regulador intestinal (Ramadan, 2011a). A su vez Ramadan (2011), expone que el contenido total de azúcar en el jugo es de 4,9 g/100 g y los compuestos con mayor presencia son sacarosa (35 g/100 g de azúcar) y fructosa (29 g/100 g de azúcar), que es comparable al contenido de azúcar en la mayoría de los jugos; por otro lado, el nivel de ácido ascórbico en la uchuva (46 mg/100 g) es mayor que en la mayoría de las frutas, como la pera (4 mg/100 g), la manzana (6 mg/100 g) y el durazno (7 mg/100 g), siendo comparado con la naranja (50 mg/100 g) y la fresa (60 mg/100 g).

Los compuestos fenólicos en las frutas son de gran interés debido a sus propiedades farmacológicas importantes; algunas de las propiedades medicinales de la fruta de *P. peruviana* L. están asociados con la capacidad antioxidante de los polifenoles presentes en la fruta (Puente et al., 2011). En la uchuva, la quercetina es el principal compuesto fenólico, seguido de la miricetina y el kaempferol. El nivel de fenoles totales en el jugo de uchuva se

estima 6,30 mg/100 g de jugo como equivalentes de ácido cafeico (Ramada & Moersel, 2007).

La actividad antioxidante del jugo de uchuva se evaluó mediante la prueba de 1,1-difenil-2-picrylhydrazyl (DPPH); el jugo fresco produce una disminución del 78% frente a la absorbancia de los radicales DPPH de una solución de control y el jugo tratado con enzimas resultó en una disminución del 82% (Ramadan & Moersel, 2007). Los compuestos fenólicos son responsables de la actividad antioxidante de los jugos y vinos. El ácido ascórbico desempeña un papel menor en la actividad antioxidante de los zumos frente a los compuestos fenólicos, ya que la metodología DPPH se ve afectada al reducir al ácido ascórbico; Puente et al. (2011) y Ramadan (2011b), afirman que la presencia de una buena cantidad de fenoles en el jugo de uchuva podría contribuir a su alto nivel antioxidante.

Corazza *et al.* (2018) realizaron un estudio de extracción de antioxidantes de la uchuva mediante la aplicación de presiones de 100 y 200 bar y reportaron la presencia de ácido gálico, ácido elágico, ácido cafeico, quercetina y manguiferina, los cuales presentan actividad atrapadora de radicales libres y metales a nivel celular. Además de tener efecto en la reducción de diferentes enfermedades como asma, cáncer, malaria, hepatitis, dermatitis y reumatismo.

Otros compuestos benéficos reportados en la uchuva son los esterios de sucrosa, los cuales tienen efectos inhibitorios de la absorción de glucosa en el intestino inhibiendo la  $\alpha$ -amilasa, estos compuestos son llamados peruviosas y tienen efecto importante en la reducción de los niveles de glucosa en sangre (Bernal et al., 2018). También se han encontrado en esta fruta una buena cantidad de ácidos grasos, la mayoría de ellos presentes en las semillas (1.8%) y el resto (0.2%) presentes en la pulpa y cáscara; los principales ácidos grasos encontrados fueron el linoleico, oleico, palmítico y esteárico, que representan el 95% del total de ácidos grasos presentes en la uchuva (Puente et al., 2011).

Según Ramadan & Morsel (2003), el fruto de *P. peruviana* L. contiene 2% de aceite, de los cuales el 1.8% se extrae de las semillas y el 0.2% de la pulpa y la piel de la fruta. Los aceites extraídos de los frutos son 15 ácidos grasos, entre los cuales se encuentran el ácido linoleico, oleico, palmítico y esteárico, que constituyen el 95% del total de ácidos grasos. El ácido linoleico es el ácido graso dominante seguido del ácido oleico, donde la proporción de ácido linoleico y oleico en la pulpa y la piel es de 2:1 y 5:1 semilla. Los lípidos en la dieta ricos en ácido linoleico previenen trastornos cardiovasculares como la enfermedad coronaria, la aterosclerosis y la hipertensión. Los derivados del ácido linoleico sirven como componentes estructurales de la membrana plasmática, precursores y reguladores metabólicos de algunos componentes (Puente et al., 2011). A su vez Ramadan & Morsel, (2003), afirman que hay cantidades significativas de ácidos grasos saturados de cadena normal. El ácido palmítico (9%) y el ácido esteárico (~2.5%) son ácidos grasos saturados que se encuentran principalmente en aceites extraídos del fruto de *P. peruviana* L. (Ramadan & Morsel, 2003). El aceite extraído de la piel y la pulpa de la fruta podría contener

triens como el ácido  $\gamma$ -linolénico (GAL), el ácido  $\alpha$ -linolénico y el Dihomo de ácido  $\gamma$ -linolénico (DHGLA), siendo una buena fuente de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA). El ácido linolénico, al ser tan saludable como el ácido linoleico, se considera un ácido graso esencial (AGE), ya que son necesarios para una buena salud. La composición de ácidos grasos y las altas cantidades de ácidos grasos poliinsaturados que se encuentran en los aceites extraídos de *P. peruviana* L. hacen que esta fruta sea ideal para la nutrición (Ramadan & Morsel, 2003).

Hassan, Serag, Qadir, & Ramadan (2017), realizaron un estudio en ratas, con el fin de evaluar el efecto protector de la uchuva sobre el hígado; en esta investigación de 6 grupos de ratas, se separaron dos grupos con cáncer de hígado, a los cuales se les administró 1 ml/kg de jugo de uchuva, el cual demostró tener un efecto hepatoprotector debido a sus propiedades antioxidantes y antimutágenicas. A su vez, Diab et al. (2014) estudiaron el efecto protector hepatorenal de la uchuva en ratas a las que se les había suministrado cadmio y sufrían de daño en riñones e hígado, este efecto se dio gracias a la reducción en la peroxidación lipídica, óxido nítrico y aumento de la actividad enzimática y no enzimática de los glutationes antioxidantes en tejidos hepáticos y renales.

En las hojas y el fruto de la uchuva, se han encontrado y aislado más de 30 compuestos withanólidos, los cuales son lactonas esteroideas de 28 carbonos a las cuales se les ha encontrado actividad antiinflamatoria, antitumoral, citotóxica, anti hepatotóxica y antimicrobiana (Ahmad et al., 1999; Sang-Ngern et al., 2016). Lan et al. (2009), identificaron diecisiete withanolidos en *P. peruviana* L. Siete de los cuales fueron descubiertos recientemente: phyperunolid A, phyperunolid B, phyperunolid C, phyperunolid D, peruvianoxid, phyperunolid E y phyperunolid F y diez corresponden a withanolidos previamente conocidos, los cuales presentan actividad citotóxica contra el cáncer de pulmón, cáncer de mama y cáncer de hígado

Los fitoesteroles son de gran interés debido a su capacidad antioxidante y su impacto en la salud; el aceite extraído de la piel y pulpa de uchuva tiene altos niveles de esteroides vegetales (Ramadan & Morsel, 2003). Como lo expone Puente et al. (2011), al citar a Valenzuela & Ronco (2004), quienes establecen que tanto la literatura científica y médica describe a los fitoesteroides como proveedores de una amplia variedad de efectos fisiológicos. Sin embargo, el efecto mejor caracterizado y probado científicamente es el efecto hipocolesterolémico, tanto del colesterol total como del colesterol LDL. El campesterol es el fitosterol más abundante en los aceites de uchuva, además contiene  $\beta$ -sitosterol y estigmasterol, la presencia de estos esteroides en la fruta podría ser responsables de la capacidad de reducir los niveles de colesterol (Puente et al., 2011; Ramadan, 2011a).

Un ensayo realizado en 28 pacientes con hipercolesterolemia por Reyes et al. (2015), mostro un efecto significativo en la reducción del colesterol total del 9,93% y del LDL del 14,79%, al consumir jugo de uchuva durante ocho semanas.

Los aceites extraídos de los frutos de *P. peruviana* L. contienen altos niveles de vitamina K1, también llamada filoquinona. El cual es adicionado en los procesos de procesamiento e industrialización de la uchuva, aportando un efecto benéfico para la salud del consumidor (Ramadan & Morsel, 2003). De acuerdo con (Ramadan & Morsel (2003), citado por Puente et al. (2011), los niveles de vitamina E en el aceite extraído de la pulpa y la piel del fruto de *P. peruviana* L., son altos en comparación con la cantidad presente en el aceite de semilla. El mismo autor estudió cuatro tocoferoles en aceites extraídos de frutos de *P. peruviana* L. Estos fueron:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$ . Los tocoferoles son antioxidantes naturales que puede eliminar las especies reactivas de oxígeno. Se encuentra dentro de la bicapa de fosfolípidos de las membranas celulares para proteger contra la peroxidación lipídica. El  $\beta$ -tocoferol representa entre el 25 y el 50% de la actividad antioxidante del  $\alpha$ -tocoferol y el  $\gamma$ -tocoferol entre el 10 y el 35% (Puente et al., 2011). Algunos autores han incrementado de forma efectiva el contenido de vitamina E en la uchuva utilizando la técnica de impregnación al vacío (Restrepo et al., 2009). La eficacia de los tocoferoles (vitamina E) y los antioxidantes lipídicos se ha atribuido principalmente a su capacidad para prevenir el daño de la membrana las células por radicales libres, al reducir los niveles de peróxidos lipídicos (Rodríguez & Bueno, 2006).

### **3.4 Procesamiento y tratamientos para aumentar la vida útil de productos a base de uchuva**

Durante la postcosecha de la uchuva, ocurren una gran cantidad de cambios en el fruto y en varias ocasiones estos cambios llevan a la pérdida de esta materia prima en la industria; uno de los principales factores es la alta actividad de agua que tiene el fruto fresco, la cual facilita el crecimiento microbiano y las reacciones de deterioro en el alimento (Mathlouthi, 2001; Sablani et al., 2007). Con el fin de aumentar la vida útil de la fruta, se han planteado varios procesos que implica la reducción en la actividad de agua o el control de los cambios postcosecha.

Lanchero, Velandia, Fischer, Varela, & García (2007) estudiaron el proceso de envasado de uchuva madura ecotipo Colombia en 3 tratamientos de atmósferas modificadas con 5% CO<sub>2</sub> y 5% O<sub>2</sub>; 5% CO<sub>2</sub> y 10% O<sub>2</sub> y una mezcla comercial Mapax-314®; las frutas se almacenaron a 7°C y también se evaluó un tratamiento sin empaque, el cual presentó una mayor pérdida de peso y firmeza; por lo que un buen empaquete permite conservar mejor las características fisicoquímicas del producto fresco. A su vez Reyes-Medina et al. (2017) investigaron sobre el efecto de la aplicación de cloruro de calcio a la fruta entera, resultando en una disminución de la pérdida de masa y la firmeza del fruto, durante 35 días de almacenamiento a 21°C.

Luchese, Gurak, & Marczak, (2015) afirman que el rápido crecimiento de la demanda de producción de *Physalis peruviana* L. está asociado con sus características nutraceuticas y

medicinales; sin embargo, un aspecto que dificulta su comercialización es su baja vida útil. Por lo tanto, propusieron la deshidratación osmótica como proceso para prolongar su vida útil. Para tal fin, evaluaron los efectos de la temperatura (40–70 °C) y la concentración de la solución de sacarosa osmótica (40–70 g/100 g solución). El contenido de humedad y el análisis del contenido de azúcar total se realizaron a lo largo del proceso de deshidratación y se analizó el contenido total de carotenoides para la fruta fresca y después de 10 h de procesamiento. El estudio de la cinética de deshidratación para la determinación del contenido de humedad y sacarosa en equilibrio utilizando el modelo de Rastogi y Raghavarao mostró un rendimiento satisfactorio ( $R^2 > 0.82$ ). Los resultados obtenidos por la solución de la Segunda Ley de Fick para la difusión de la difusividad efectiva del agua, se encontró en el rango  $1.4\text{--}2.9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  y la difusividad efectiva de sacarosa varió de  $1.4$  a  $2.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ . Las condiciones experimentales para el procesamiento más eficiente de *Physalis* por deshidratación osmótica fueron a temperatura de 70 °C y concentración de solución osmótica de 70 g de sacarosa/100 g de solución, durante 10 h con agitación. En estas condiciones, la pérdida de agua fue aproximadamente del 40%. Sin embargo, se observó la mayor pérdida de carotenoides totales (aproximadamente 50%). Bajo esta condición experimental, la matriz de tejido de uchuva sufrió cambios estructurales, como se demostró a través del análisis de microscopía electrónica de barrido. Por otro lado, es importante resaltar que el proceso de deshidratación osmótica de esta fruta en algunas condiciones experimentales puede verse obstaculizado debido a la estructura de la fruta, especialmente debido a su piel cerosa.

El secado de la uchuva es un proceso lento debido a la baja permeabilidad a la humedad de la piel cerosa de la fruta; por lo tanto, Vásquez et al. (2013), evaluaron el efecto de los pretratamientos químicos (aceite de girasol/ $\text{K}_2\text{CO}_3$  o aceite de oliva/ $\text{K}_2\text{CO}_3$  a 28 °C y NaOH/aceite de oliva a 96 °C) y se evaluaron los pretratamientos físicos (escaldado) para descomponer la superficie cerosa y acelerar la difusión de la humedad durante el secado. El secado se realizó a 60 °C y 2 m/s de velocidad del aire durante 10 h. El contenido de humedad más bajo (0.27 kg de agua/kg producto seco), el contenido más alto de vitamina C (0.36 mg/g) y la mayor capacidad de rehidratación (1.89) se obtuvo en frutas pretratadas con aceite de oliva (9.48%) y  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (4.74%). Sin embargo, los mayores cambios en el color ( $\Delta E^* = 15.05$ ) y el croma ( $\Delta C^* = 9.03$ ) también se asociaron a frutas pretratadas con aceite de oliva y  $\text{K}_2\text{CO}_3$ . La difusividad efectiva del agua durante el secado fue de  $7.37 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  en muestras pretratadas en comparación con  $6.61 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$  para muestras no tratadas.

Los autores concluyeron que todos los pretratamientos de inmersión estudiados redujeron significativamente el contenido de humedad de uchuvas secas en relación con las frutas no tratadas. Los pretratamientos con aceite (9.48%) y  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (4.74%) a 28 °C y los pretratamientos con agua destilada o NaOH/aceite a 96 °C exhibieron las mayores pérdidas de humedad. El tipo de aceite y el tiempo de inmersión no tuvo un efecto significativo en la pérdida de humedad, mientras que la concentración de aceite afectó significativamente la pérdida de humedad. Aunque los tratamientos con agua destilada o NaOH/aceite a 96 °C mostraron altas pérdidas de humedad y un bajo cambio de color, la pérdida de vitamina C fue la mayor y la capacidad de rehidratación de la fruta fue relativamente baja. El

pretratamiento con una solución de aceite de oliva (9.48%) y  $K_2CO_3$  (4.74%) fue la mejor opción teniendo en cuenta las variables de respuesta medidas.

Izli et al. (2014), investigaron los efectos de los tratamientos de secado por microondas, convección y convección por microondas sobre la cinética de secado, el color, el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante de uchuva. Los resultados verificaron que el tiempo de secado se redujo significativamente al combinar el tratamiento de microondas con el secado convencional. Un tratamiento combinado con microondas y secado convectivo de 160 W- 100 °C ofreció el tiempo de secado más corto, a un promedio de 2 h, seguido de 160 W - 75 °C, 100 °C, 160 W y 75 °C. De los nueve modelos matemáticos de secado probados, el de Midilli et al. (2002) y el modelo de Wang y Singh fueron más satisfactorios al describir el comportamiento de secado de uchuva en las condiciones experimentales evaluadas. El tratamiento con microondas a 160 W produjo los mejores valores de color del producto que estaban más cerca de los valores  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  de la muestra fresca, al igual que el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante. Los valores de croma (C) y ángulo de matiz ( $\alpha$ ) de uchuva seca se redujeron. En comparación con la muestra fresca, las muestras secas exhibieron una disminución del 64-75% y 65-75% en el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante, respectivamente. La disminución de la capacidad antioxidante como resultado de los tratamientos de secado puede ser causada por la degradación de los compuestos fenólicos. Los resultados presentados del estudio demostraron que el método de secado convectivo por microondas es adecuado para la uchuva, que no solo puede reducir ampliamente el tiempo de secado, sino que también retiene el contenido fenólico bioactivo total y la capacidad antioxidante en comparación con el secado convectivo tradicional.

Ordóñez-Santos, Martínez-Girón, & Arias-Jaramillo (2017) estudiaron el efecto del tratamiento con ultrasonido como alternativa al tratamiento térmico de pasteurización en jugo de uchuva, el cual permitió aumentar la disponibilidad de carotenoides y fenoles totales en el jugo, similarmente a lo que hicieron Eitzbach, Pfeiffer, Schieber, & Weber (2019) que evaluaron el efecto de la pasteurización y el ultrasonido en la actividad peroxidasa, contenido de carotenoides y propiedades fisicoquímicas de un puré de uchuva, mostrando mejores resultados en la conservación de los antioxidantes, el tratamiento de ultrasonido. Por otro lado, Castro Sánchez, Puentes Montañez, & Botía Rodríguez (2017), investigaron sobre el proceso de elaboración de mermeladas, néctares y pulpas con los frutos de uchuva ecotipo Colombia, rajados y blandos, no aptos para la comercialización en fresco, permitiendo dar un valor agregado a un subproducto que de no ser utilizado, sería desperdiciado presentado pérdidas económicas para el sector.

Vega-Gálvez et al. (2016) evaluaron el efecto de las altas presiones hidrostáticas en la pulpa de uchuva inmediatamente después de ser procesada y a los 30 días de almacenamiento a 4 °C, con el fin de determinar los cambios en la fibra dietaria, polifenoles, vitaminas B y E, capacidad antioxidante y características microbiológicas, encontrando que los valores más altos en la capacidad antioxidante se obtuvieron en el procesamiento a 500 MPa por 5 min, en donde también se lograron conservar la mayor cantidad de vitaminas; a

partir del tratamiento a 300 MPa por 1 min la carga microbiana se logró reducir a valores indetectables, lo que hace a este tipo de tratamiento eficaz en la conservación de la pulpa de uchuva y sus propiedades nutricionales.

Se optimizó la transferencia de masa durante la deshidratación osmótica a vacío pulsante (DOVP) de uchuva (*Physalis peruviana* L.) mediante la metodología de superficies de respuesta (Zapata et al., 2016). Se evaluó el efecto de temperatura (25-45 °C), sólidos solubles (50-70 °Brix), velocidad de rotación (60-100 rpm), presión (50-100 mBar) y número de pulsos de vacío (1-3) sobre los parámetros de deshidratación osmótica pérdida porcentual de peso (%PP), pérdida porcentual de humedad (PH) y ganancia porcentual de sólidos (GS). Se utilizó jarabe de sacarosa en relación jarabe/fruta de 5/1 durante 2 horas. Los resultados de optimización fueron de 45 °C, 70 °Brix, 99.99 rpm, 98.92 mbar y 2.87 pulsos de vacío, para una %PP de 47,52%, %PH de 21,12% y %GS de 118,40. A las condiciones óptimas se ajustaron modelos matemáticos para describir la cinética de DOVP de uchuvas.

Se utilizó el modelo empírico de penetración de Azuara, un modelo fenomenológico a partir de la solución de la segunda ley de Fick y el modelo empírico de Peleg. Siendo este último el modelo que mejor ajustó los datos experimentales. Los autores concluyeron que las condiciones de operación afectan significativamente el DOVP de uchuva, principalmente la temperatura y °Brix afectan al porcentaje de reducción de peso y porcentaje de pérdida de agua, porcentaje de ganancia de sólidos, mientras que el pulso de vacío afecta a la ganancia de sólidos. Este proceso puede ser modelado a través de modelos empíricos y fenomenológicos con resultados satisfactorios y de esta manera, establecer parámetros para ampliar el proceso. El secado de uchuva se realizó de manera convencional y en un microondas a presión reducida a 120 W y 480 W. Después del secado, las frutas se sometieron a pruebas de resistencia y reología. También se examinaron la actividad del agua, el contenido de carotenoides y polifenoles y la actividad antioxidante, así como el color. El estudio mostró que la uchuva es un material difícil de secar. Los mejores resultados se obtuvieron utilizando secado por microondas a una potencia de 480 W. La fruta secada al microondas por este método se caracteriza por una mayor resistencia a la compresión que la fruta secada por convección. Los frutos secos obtenidos de esta manera se caracterizaron por un mayor contenido de compuestos bioactivos, mejores propiedades antioxidantes y, al mismo tiempo, la menor actividad del agua.

Junqueira et al. (2017), determinaron el efecto de los pretratamientos físicos (sin pretratamiento, congelación rápida con nitrógeno líquido y congelación lenta seguida de descongelación) y químicos (solución alcalina de oleato de etilo) sobre la cinética y los parámetros de calidad de la uchuva en el secado por convección a 60 °C y velocidad de aire de 2 m/s. Las variables independientes evaluadas fueron: la influencia de los pretratamientos en la cinética de secado, deformación, capacidad de rehidratación, retención de ácido ascórbico, actividad de agua, perfil de textura y color. Se evaluaron cinco ecuaciones de capa delgada para determinar su capacidad de predecir la cinética de secado, de las cuales la ecuación empírica de Wang y Singh se ajustó mejor. Todos los



pretratamientos redujeron el tiempo de secado al reducir la resistencia de la piel cerosa de la uchuva a la transferencia de masa. El pretratamiento químico promovió el menor tiempo de secado y la mayor retención de ácido ascórbico, capacidad de rehidratación, el mejor mantenimiento de la textura, así como la menor deformación y actividad de agua. Se observaron valores más bajos de dureza, adhesividad y goma con pretratamientos de congelación. Las frutas no tratadas presentaron la menor diferencia de color total.

Hincapié & Zapata (2019), estudiaron la cinética de secado de la uchuva en un secador de lecho fluidizado, evaluando el efecto de la temperatura de secado entre los niveles de 60, 70 y 80 °C y la velocidad de aire de 9.5 m/s sobre las características fisicoquímicas del producto tales como pH, sólidos solubles (°Bx), acidez, humedad y color. Se estableció la cinética de pérdida de humedad, velocidad de secado y se obtuvo el coeficiente de difusión efectivo para cada temperatura de trabajo. Se ajustó una ecuación tipo Arrhenius para establecer la relación entre el coeficiente de difusión y la temperatura. Los resultados obtenidos indicaron que el color de la uchuva se vio afectado principalmente por el tratamiento a 80 °C. Además, los tiempos de secado para alcanzar un equilibrio fueron de 8, 5.5 y 5 horas para 60, 70 y 80 °C respectivamente, con pérdidas de humedad de 92, 85 y 94%. Los autores afirman que las temperaturas del secado en lecho fluidizado de la uchuva, afectan parámetros como la velocidad mínima de fluidización, la velocidad de secado y la  $Deff$ , además de las características fisicoquímicas y apariencia del producto seco; el comportamiento cinético del proceso de secado puede ser descrito por medio de un modelo fenomenológico como el derivado de la solución de la segunda ley de Fick y el efecto de la temperatura sobre la  $Deff$ , se ajusta a una ecuación tipo Arrhenius. Entre las temperaturas evaluadas, la más favorable para el secado de uchuva en lecho fluidizado es 60 °C, dado que genera el menor efecto sobre la afectación de las características del producto y obtiene humedades de equilibrio por debajo de las del secado a 70 °C.

Cabrera O, Estrada M, & Cortés R (2017) realizaron un estudio sobre la influencia del secado en la calidad de uchuva impregnada al vacío con calcio y vitaminas B<sub>9</sub>, C, D<sub>3</sub> y E; obteniendo como resultado que a condiciones de procesamiento de secado de 60 °C y velocidad del aire de 2 m/s, se disminuyeran las pérdidas en vitaminas. Por otro lado, Junqueira, Corrêa, de Oliveira, Ivo Soares Avelar, & Salles Pio (2017), realizaron un estudio de la influencia de los pretratamientos de secado., el cual se realizó a 60°C y una velocidad del aire de 2 m/s, sobre las condiciones de calidad de la uchuva, en este estudio se evaluaron pretratamientos físicos como el congelamiento rápido con nitrógeno y el congelamiento lento y un tratamiento químico con solución alcalina de etil-oleato, resultando esta última la mejor opción como pretratamiento de secado, al disminuir el tiempo de proceso, evitar la pérdida de gran cantidad de vitamina C y mejor capacidad de rehidratación de la fruta.

En cuanto a la obtención de uchuva en polvo se ha estudiado el proceso de secado en liofilización y en secado por aspersion. Cortés et al. (2017), optimizaron el proceso de secado por aspersion para la obtención de uchuva (*Physalis peruviana L.*) en polvo adicionado con componentes activos. Vitamina C, hierro, ácido fólico, proteína de soya texturizada y fibra, las cuales se adicionaron a las suspensiones que fueron sometidas a

secado por aspersión para la obtención de un producto en polvo fortificado. El proceso de secado fue optimizado de acuerdo con las características de formulación de la suspensión y condiciones de operación del secador considerando un diseño central compuesto, que presentó como factores el: porcentaje de maltodextrina, temperatura del aire de entrada, velocidad del disco atomizador y temperatura del aire de salida. Se logro una mayor retención de vitamina C, ácido fólico y hierro con la formulación de la suspensión que contenía 24.4% de maltodextrina y condiciones de operación del proceso de secado definidas por una velocidad de disco atomizador de 19848 rpm y temperatura del aire a la entrada y salida de 194.2 °C y 87.7 °C, respectivamente. Lo que permitió establecer que el proceso de secado por aspersión es una tecnología efectiva que proporciona valor agregado al fruto de uchuva.

Dag, Kilercioglu, & Oztop (2017), obtuvieron un encapsulado de uchuva usando maltodextrina mezclada con goma arábica, alginato y pectina y liofilizando por 48 horas, con el fin de obtener unas microcápsulas de uchuva con compuestos fenólicos y mejorar su estabilidad en fluidos de digestión simulada al pasar por el tracto gastrointestinal. Las microcápsulas preparadas con maltodextrina y pectina presentaron un diámetro medio volumétrico mayor (43.1 mm) en comparación con las que contenían goma arábica y alginato. Se demostró que las microcápsulas de jugo de uchuva, obtenidas mediante liofilización, retienen más del 75 % de los compuestos fenólicos para todos los tipos de goma. Los estudios de digestión in vitro mostraron que la liberación de compuestos fenólicos de las microcápsulas fue mayor en el fluido intestinal simulado que en el medio gástrico.

Cortés R, Estrada M, & Hernández (2017) optimizaron el proceso de secado por aspersión para obtener un polvo de uchuva con adición de vitamina C, hierro, ácido fólico, proteína de soya y fibra. Las condiciones de secado que permitieron obtener un polvo con las mejores características de calidad y mayor retención de compuestos bioactivos fueron: velocidad del disco atomizador de 19848 rpm, temperatura del aire a la entrada al secador de 194.2 °C y a la salida de 87.7 °C, para lo cual se obtuvo retención de vitamina C (69.7±0.7%), ácido fólico (90.9±1.8%) e hierro (90.8±1.0%). Los autores concluyeron que el proceso de secado por aspersión es una tecnología efectiva que proporciona valor agregado al fruto de uchuva, permitiendo la incorporación y conservación de componentes activos como hierro, ácido fólico y ácido ascórbico.

Por otro lado, Eitzbach et al. (2020), evaluaron el uso de diferentes agentes encapsulantes (maltodextrina, almidón modificado, inulina, alginato, goma arábica y combinaciones de los mismos) y se comparó con la celobiosa como encapsulante alternativo para el secado por aspersión de jugo de uchuva. Se caracterizó las partículas y se evaluó su estabilidad durante el almacenamiento. Dentro de los resultados se obtuvo alta concentración inicial de carotenoides después del secado por aspersión, alta eficiencia de encapsulación (77.2%) y lenta cinética de degradación de carotenoides. Con celobiosa como encapsulante se favoreció un alto contenido de carotenoides del polvo al final del almacenamiento. De este modo, la celobiosa demostró ser un encapsulante eficaz para el secado por aspersión del jugo de uchuva, puesto que presentó resultados similares o incluso mejores que los otros

encapsulantes, con respecto al contenido de humedad, higroscopicidad, solubilidad en agua fría y eficiencia de encapsulación de carotenoides, al igual que mostró la mayor retención de carotenoides durante el almacenamiento debido a su empaque hermético y su alta eficiencia de encapsulación. Por otro lado, los autores afirman que la combinación de celobiosa y maltodextrina podría mejorar el rendimiento del polvo y, además, impedir la aglomeración de partículas. La celobiosa podría actuar como un material de sellado en la red de maltodextrina, lo que da como resultado un empaque apretado de las partículas y una alta retención de carotenoides.

De la uchuva, también se han aprovechado los desperdicios generados en las industrias después del proceso de despulpado (cáscara, semillas y pequeñas partes del fruto), tal como lo hicieron Mokhtar, Swailam, & Embaby (2018) en su estudio, en el cual recogieron este desperdicio y lo secaron en estufa convectiva a 45 °C, a una velocidad de 0.6 m/s y un tiempo de 24 horas, posteriormente lo molieron y lo analizaron, encontrando una gran cantidad de minerales, como el potasio, sodio y fósforo, además de una buena relación de aminoácidos cisteína/metionina, histidina y tirosina/fenilalanina, así como ácidos grasos en especial ácido linoleico, oleico, palmítico y esteárico.

### 3.5 Conclusiones

La uchuva es fruto promisorio, con alta cantidad de vitaminas, fitoesteroles, ácidos grasos y compuestos antioxidantes de los cuales se han probado sus efectos benéficos para la salud. A pesar de que es una fruta muy perecedera, lo que hace más difícil su consumo en fresco, es especial para productos exportados, se han investigado y aplicado muchas tecnologías y métodos de procesamiento que permiten alargar la vida útil del fruto y conservar en la mayor medida sus propiedades funcionales.

### 3.6 Bibliografía

- Ahmad, S., Malik, A., Yasmin, R., Ullah, N., Gul, W., Muhammad, P., Nawaz, R., & Afza, N. (1999). Withanolides from *Physalis peruviana*. *Phytochemistry*, *50*, 647–651.
- Bernal, C. A., Castellanos, L., Aragón, D. M., Martínez-Matamoros, D., Jiménez, C., Baena, Y., & Ramos, F. A. (2018). Peruvioses A to F, sucrose esters from the exudate of *Physalis peruviana* fruit as  $\alpha$ -amylase inhibitors. *Carbohydrate Research*, *461*, 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2018.03.003>
- Cabrera O, Y. A., Estrada M, E. M., & Cortés R, M. (2017). The influence of drying on the physiological quality of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits added with active components. *Acta Agronomica*, *66*(4), 512–518. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n4.59507>
- Castro Sánchez, A. M., Puentes Montañez, G. A., & Botía Rodríguez, Y. (2017). Alternativas de procesamiento de uchuva (*Physalis peruviana* L) para el aprovechamiento de frutos no aptos para la comercialización en fresco. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, *5*(1), 121. <https://doi.org/10.22490/21456453.939>

- Corazza, G. O., Bilibio, D., Zanella, O., Nunes, A. L., Bender, J. P., Carniel, N., dos Santos, P. P., & Priamo, W. L. (2018). Pressurized liquid extraction of polyphenols from Goldenberry: Influence on antioxidant activity and chemical composition. *Food and Bioprocess Processing*, 112, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.09.001>
- Cortés, M., Hernández, G., & Estrada, E. (2017). Optimization of the spray drying process for obtaining cape gooseberry powder: an innovative and promising functional food. *VITAE*, 24(1), 59–67.
- Cortés R, M., Estrada M, E. M., & Hernández, G. (2017). Optimization of the Spray Drying Process for Obtaining Cape Gooseberry Powder: an Innovative and Promising Functional Food. *Revista Vitae*, 24(1), 59–67. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n1a07>
- Dag, D., Kilercioglu, M., & Oztop, M. H. (2017). Physical and chemical characteristics of encapsulated goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice powder. *LWT - Food Science and Technology*, 83, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.007>
- Diab, M. M. S., Aref, A. M., Othman, M. S., Al-Quraishy, S., Abdel Moneim, A. E., & Dkhil, M. A. (2014). The potential protective role of *Physalis peruviana* L. fruit in cadmium-induced hepatotoxicity and nephrotoxicity. *Food and Chemical Toxicology*, 74, 98–106. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2014.09.013>
- Duque, A., Giraldo, G., & Quintero, V. (2018). Caracterización de la fruta, pulpa y concentrado de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Temas Agrarios*, 16(1), 75. <https://doi.org/10.21897/rta.v16i1.686>
- Ellong, E. N., Billard, C., Adenet, S., & Rochefort, K. (2015). Polyphenols, Carotenoids, Vitamin C Content in Tropical Fruits and Vegetables and Impact of Processing Methods. *Food and Nutrition Sciences*, 06(03), 299–313. <https://doi.org/10.4236/fns.2015.63030>
- Etzbach, L., Meinert, M., Faber, T., Klein, C., Schieber, A., & Weber, F. (2020). Effects of carrier agents on powder properties, stability of carotenoids, and encapsulation efficiency of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) powder produced by co-current spray drying. *Current Research in Food Science*, 3(November 2019), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.03.002>
- Etzbach, L., Pfeiffer, A., Schieber, A., & Weber, F. (2019). Effects of thermal pasteurization and ultrasound treatment on the peroxidase activity, carotenoid composition, and physicochemical properties of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) puree. *LWT - Food Science and Technology*, 100, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.032>
- Fischer, G., Almanza-Merchán, P., & Miranda, D. (2014). Importancia y cultivo de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36(1), 40. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13>
- Fischer, G., Herrera, A., & Almanza, P. (2011). Cape gooseberry ( *Physalis peruviana* L.). In Elsevier (Ed.), *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 374-397e). Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857092762.374>
- Fischer, Gerhard, Almanza-merchán, P. J., & Miranda, D. (2014). Importancia y cultivo de la Uchuva ( *Physalis peruviana* L. ). *SciELO*, 36(1), 1–15. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13>
- Fischer, Gerhard, Miranda, D., Piedrahita, W., & Romero, J. (2005). *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Unibiblos.
- Flórez, V., Fischer, G., & Sora, Á. (2000). *Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.)*. Universidad Nacional de Colombia, Unibiblos.
- Hassan, H. A., Serag, H. M., Qadir, M. S., & Ramadan, M. F. (2017). Cape gooseberry (*Physalis peruviana*) juice as a modulator agent for hepatocellular carcinoma-linked

- apoptosis and cell cycle arrest. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 94(2017), 1129–1137. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2017.08.014>
- Hincapié, M. A., & Zapata, J. E. (2019). Study of the dehydration kinetics of uchuva (physalis peruviana L.) in a fluidized bed dryer. *Informacion Tecnológica*, 30(2), 115–124. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000200115>
- Izli, N., Yildiz, G., Ünal, H., Işık, E., & Uylaşer, V. (2014). Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of Goldenberry (Physalis peruviana L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 9–17. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12266>
- Junqueira, J. R. de J., Corrêa, J. L. G., de Oliveira, H. M., Ivo Soares Avelar, R., & Salles Pio, L. A. (2017). Convective drying of cape gooseberry fruits: Effect of pretreatments on kinetics and quality parameters. *LWT - Food Science and Technology*, 82, 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.072>
- Jurado, T. B., Aparcana Aaturima, I., Villarreal Inca, L., Ramos Llica, E., Calixto Cotos, M., Hurtado Manrique, P., & Acosta Alfaro, K. (2016). Evaluación del contenido de polifenoles totales y la capacidad antioxidante de los extractos etanólicos de los frutos de aguaymanto (Physalis peruviana L.) de diferentes lugares del Perú. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 82(3), 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.jadohealth.2005.06.010>
- Lan, Y., Chang, F., Pan, M., Wu, C., Wu, S., Chen, S., Wang, S., Wu, M., & Wu, Y. (2009). New cytotoxic withanolides from Physalis peruviana. *Food Chemistry*, 116(2), 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.02.061>
- Lanchero, O., Velandia, G., Fischer, G., Varela, N., & García, H. (2007). Comportamiento de la uchuva (Physalis peruviana L.) en poscosecha bajo condiciones de atmósfera modificada activa. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 61–68.
- López-Gaytán, E., Ayala-Hernández, J. J., Ponce-Aguirre, D., Mora-Aguilar, R., & Peña-Lomelí, A. (2006). Agrofenología de Physalis peruviana L. en invernadero y fertirriego. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(1), 57–63. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2005.10.011>
- Luchese, C. L., Gurak, P. D., & Marczyk, L. D. F. (2015). Osmotic dehydration of physalis (Physalis peruviana L.): Evaluation of water loss and sucrose incorporation and the quantification of carotenoids. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1128–1136. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.04.060>
- Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of foodstuffs. *Food Control*, 12(7), 409–417. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(01\)00032-9](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(01)00032-9)
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513. <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Mokhtar, S. M., Swailam, H. M., & Embaby, H. E. S. (2018). Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (Physalis peruviana) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. *Food Chemistry*, 248, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.117>
- Olivares-Tenorio, M.-L., Verkerk, R., van Boekel, M. A. J. S., & Dekker, M. (2017). Thermal stability of phytochemicals, HMF and antioxidant activity in cape gooseberry (Physalis peruviana L.). *Journal of Functional Foods*, 32, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.02.021>
- Olivares, M., Dekker, M., Verkerk, R., & van Boekel, M. (2016). Health-promoting compounds in cape gooseberry (Physalis peruviana L.): Review from a supply chain

- perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 57(Part A), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.009>
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., & Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, 233, 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.114>
- Puente, L., Pinto, C., Castro, E., & Cortés, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International*, 44(7), 1733–1740. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Ramada, M., & Moersel, J. (2007). Effect of phytate and storage conditions on the development of the 'hard-to-cook'. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1243(November 2005), 1237–1243. <https://doi.org/10.1002/jsfa>
- Ramadan, M. (2011a). *Physalis peruviana*: A rich source of bioactive phytochemicals for functional foods and pharmaceuticals. *Food Reviews International*, 27(3), 259–273. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563391>
- Ramadan, M. (2011b). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Research International*, 44(7), 1830–1836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042>
- Ramadan, M., & Moersel, J. (2007). Impact of enzymatic treatment on chemical composition, physicochemical properties and radical scavenging activity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(3), 452–460. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2728>
- Ramadan, M., & Morsel, J. (2003). Oil goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(4), 969–974. <https://doi.org/10.1021/jf020778z>
- Restrepo, A., Cortés, M., & Márquez, C. (2009). Uchuvas (*Physalis peruviana* L.) mínimamente procesadas fortificadas con vitamina E. *VITAE*, 16(1), 19–30. <http://www.scielo.org.co/pdf/vitae/v16n1/v16n1a03>
- Reyes-Medina, A. J., Pinzón, E. H., & Álvarez-Herrera, J. G. (2017). Effect of calcium chloride and refrigeration on the quality and organoleptic characteristics of cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Acta Agronomica*, 66(1), 15–20.
- Reyes, M. E. D., Guanilo, C. K., Ibáñez, M. W., García, C. E., Idrogo, J. J., & Huamán, J. J. (2015). Efecto del consumo de *Physalis peruviana* L. (aguaymanto) sobre el perfil lipídico de pacientes con hiperemia. *Acta Médica Peruana*, 32(4), 195–201.
- Rodríguez, N., & Bueno, M. (2006). Study of the cytogenetic diversity of *physalis peruviana* L. (Solanaceae). *Acta Biológica Colombiana*, 11(2), 75–85.
- Rodríguez, N., & Bueno, M. L. (2006). Estudio de la diversidad citogenética de *Physalis peruviana* L. (Solanaceae). *Acta Biológica Colombiana*, 11(2), 75–85.
- Sablani, S. S., Kasapis, S., & Rahman, M. S. (2007). Evaluating water activity and glass transition concepts for food stability. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.025>
- Sang-Ngern, M., Youn, U. J., Park, E. J., Kondratyuk, T. P., Simmons, C. J., Wall, M. M., Ruf, M., Lorch, S. E., Leong, E., Pezzuto, J. M., & Chang, L. C. (2016). Withanolides derived from *Physalis peruviana* (Poha) with potential anti-inflammatory activity. *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 26(12), 2755–2759. <https://doi.org/10.1016/j.bmcl.2016.04.077>
- Valenzuela, A., & Ronco, A. (2004). Fitoesteroles y fitoesteranos: aliados naturales para la protección de la salud cardiovascular. *Revista Chilena de Nutrición*, 21(1), 161–169. [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-75182004031100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182004031100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Vásquez, J., Ochoa, C., & Bustos, M. (2013). Effect of chemical and physical pretreatments on the convective drying of cape gooseberry fruits (*Physalis peruviana*). *Journal of*

- 
- Food Engineering*, 119(3), 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.06.037>
- Vega-Gálvez, A., Díaz, R., López, J., Galotto, M. J., Reyes, J. E., Perez-Won, M., Puente-Díaz, L., & Di Scala, K. (2016). Assessment of quality parameters and microbial characteristics of Cape gooseberry pulp (*Physalis peruviana* L.) subjected to high hydrostatic pressure treatment. *Food and Bioprocess Processing*, 97, 30–40. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.09.008>
- Zapata, J., Ciro, G., & Marulanda, P. (2016). Optimization of pulsed vacuum osmotic dehydration of the cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) using the response surface methodology. *Agronomía Colombiana*, 34(2), 228–238. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v34n2.54920>

## 4. HIDRÓLISIS ENZIMÁTICA DE UN SISTEMA COLOIDAL A BASE DE UCHUVA.

Soany Eraso-Grisales<sup>a</sup>, Misael Cortés-Rodríguez<sup>a\*</sup>, Andrés Hurtado-Benavides<sup>b</sup>, Hader Castaño-Peláez<sup>c</sup>.

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Cra. 65 No. 59A – 110, Medellín, Colombia

<sup>b</sup> Universidad de Nariño, Facultad de Ingeniería Agroindustrial, Ciudad universitaria Torobajo Calle 18 Cra. 50. Pasto, Colombia

<sup>c</sup> Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Facultad de Ciencias Básicas, Sociales y Humanas, Carrera 48 No. 7 – 151, Medellín, Colombia

\* Autor para correspondencia: [skerasoq@unal.edu.co](mailto:skerasoq@unal.edu.co)

### 4.1 Resumen

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una fruta exótica andina de importancia en los mercados nacionales e internacionales, debido a sus propiedades nutricionales y sensoriales. Usualmente en su procesamiento la piel y las semillas se convierten en residuos agroindustriales; sin embargo, estos poseen compuestos bioactivos que favorecen la salud y la nutrición. El objetivo de la investigación fue evaluar la influencia del proceso enzimático sobre la estabilidad fisicoquímica de un Sistema Coloidal a base de pulpa, piel y semilla de Uchuva (SC<sub>u</sub>), con fines a ser utilizado en secado por aspersion. La pulpa con semilla y piel fue homogenizada inicialmente por cizalla en un sistema rotor-estator a 10000 rpm durante 10 minutos y para la evaluación enzimática, se utilizó un diseño factorial completamente aleatorizado, considerando las variables independientes: concentración de enzima [Enzima] (50, 125 y 200 ppm) y tiempo de hidrólisis (TH) (0, 30, 60, 90 y 120 minutos), y las variables dependientes: viscosidad ( $\mu$ ), sólidos solubles (SS), tamaño de partícula (percentiles D<sub>10</sub>, D<sub>50</sub> y D<sub>90</sub>), *Span*, potencial zeta ( $\zeta$ ) e índice de absorción espectral (R). La [Enzima] tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la  $\mu$ , SS, D<sub>50</sub>, D<sub>90</sub> y R, el TH sobre la  $\mu$ , SS y D<sub>10</sub>; además, existe un efecto de la interacción [Enzima]- TH sobre el aumento de la  $\mu$  y los SS. La optimización de la formulación presentó una deseabilidad del 74,2%, con una [Enzima] = 78.5 ppm y TH = 120 minutos; siendo las variables dependientes:  $\mu = 371.3 \pm 24.4$  cP, SS = 15.2  $\pm$  0.3, D<sub>10</sub> = 3.5  $\pm$  0.3, D<sub>50</sub> = 135  $\pm$  3.6  $\mu$ m; D<sub>90</sub> = 565.7  $\pm$  25.5  $\mu$ m; *Span* = 4.2  $\pm$  0.1,  $\zeta = -21.8 \pm 0.3$  mV, R = 0.655  $\pm$  0.007. La integración de los procesos de homogenización por cizalla y el tratamiento enzimático aplicado, contribuyeron



a la obtención de sistema coloidal a base de pulpa, semilla y piel de uchuva estable fisicoquímicamente, sin embargo, se pretendía obtener una mayor reducción de tamaños de partícula, lo cual se logra mediante un proceso de homogenización de alta presión y adición de hidrocoloides que favorecieron la estabilidad de la suspensión.

**Palabras clave:** *Physalis peruviana* L., cinética enzimática, optimización, residuos agroindustriales, homogenización.

## Abstract

Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) is an exotic Andean fruit of importance in national and international markets due to its nutritional and sensory properties. Usually, in its processing, the skin and seeds become agroindustrial waste; however, these possess bioactive compounds that favor health and nutrition. The research objective was to evaluate the influence of the enzymatic process on the physicochemical stability of a colloidal system based on cape gooseberry (CS<sub>CG</sub>) pulp, skin, and seed, to be used in spray drying. The pulp with seed and skin was initially homogenized by shearing in a rotor-stator system at 10000 rpm for 10 minutes, and for the enzymatic evaluation, a completely randomized factorial design was used, considering the independent variables: [Enzyme] enzyme concentration (50, 125 and 200 ppm) and hydrolysis time (HT) (0, 30, 60, 60, 90 and 120 minutes), and the dependent variables: viscosity ( $\mu$ ), soluble solids (SS), particle size ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$  percentiles), Span, zeta potential ( $\zeta$ ) and spectral absorption index (R). [Enzyme] had a significant effect ( $p < 0.05$ ) on  $\mu$ , SS,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$  and R, TH on  $\mu$ , SS and  $D_{10}$ ; furthermore, there is an effect of [Enzyme]- TH interaction on the increase of  $\mu$  and SS. The formulation optimization presented a desirability of 74.2%, with [Enzyme] = 78.5 ppm and TH = 120 minutes; the dependent variables being:  $\mu = 371.3 \pm 24.4$  cP, SS =  $15.2 \pm 0.3$ ,  $D_{10} = 3.5 \pm 0.3$ ,  $D_{50} = 135 \pm 3.6$   $\mu\text{m}$ ;  $D_{90} = 565.7 \pm 25.5$   $\mu\text{m}$ ; Span =  $4.2 \pm 0.1$ ,  $\zeta = -21.8 \pm 0.3$  mV, R =  $0.655 \pm 0.007$ . The integration of the shear homogenization processes and the enzymatic treatment applied contributed to obtaining a colloidal system based on physicochemically stable cape gooseberry pulp, seed, and skin, and with several advantages for its application in sustainable food processes and with higher yield; however, it was intended to obtain a greater reduction of particle sizes, which is achieved through a high-pressure homogenization process and addition of hydrocolloids that favored the stability of the suspension.

**Keywords:** *Physalis peruviana* L., enzyme kinetics, optimization, agro-industrial wastes, homogenization.

## Abreviaciones

Nombre de variable	Abreviación
Actividad de agua	$a_w$
Error relativo medio	ERM
Humedad	$X_w$
Índice de absorción espectral	R
Percentil 10, 50 y 90%	D <sub>10</sub> , D <sub>50</sub> y D <sub>90</sub>
Potencial zeta	$\zeta$
Sistema Coloidal de Uchuva (pulpa, cascara y semilla)	SC <sub>u</sub>
Sólidos solubles	SS
Sólidos totales	TS
Tiempo de hidrólisis	TH
Viscosidad	$\mu$

## 4.2 Introducción

La uchuva es una baya jugosa de la planta *Physalis peruviana* L., su forma es esférica u ovalada que contiene semillas en su interior, y su piel es fina y cerosa. La pulpa de uchuva representa aproximadamente el 73.6% del peso total del fruto; mientras que la piel y las semillas constituyen el 27.4 % (Ramadan & Morsel, 2003), esta última es poco utilizada en los sistemas de producción (Ramadan et al., 2008)., siendo estas últimas poco aprovechadas en los sistemas productivos. La fruta se consume naturalmente en ensaladas, mermeladas y jugos y es una excelente fuente de vitamina A y C. También tiene cantidades significativas de vitaminas del complejo B (tiamina, niacina y vitamina B12) y altos niveles de proteína y fósforo (Olivares et al., 2016). Por otro lado, contiene compuestos antioxidantes como tocoferoles y carotenoides. También posee otros compuestos como los withanólidos que tienen actividad repelente, inmunomoduladora, antibacteriana, antiinflamatoria, antitumoral y antihepatotóxica (Puente et al., 2011; Ramadan, 2011a). Las semillas son una fuente esencial de ácidos grasos esenciales que contienen antioxidantes naturales y altos niveles de fitoesteroles, que tienen efectos reductores del colesterol. En particular, el campesterol, el  $\beta$ -sitosterol y el estigmasterol pueden ser responsables de la disminución de los niveles de colesterol en sangre y de las concentraciones de colesterol LDL en plasma al inhibir la absorción de colesterol en el intestino en un proceso competitivo. similitud estructural entre los esteroides vegetales y el colesterol (Nocetti et al., 2020).

Además, la piel y la pulpa contienen pectinas importantes, como la fibra dietética principal (4.9 g/100 g) (Ramadan, 2011b). En general, estas características hacen que la uchuva sea apetecida mundialmente, aportando múltiples beneficios para la salud; además se ha utilizado como medicina natural para prevenir enfermedades degenerativas, ya que tiene propiedades anticancerígenas (Mokhtar et al., 2018; Puente et al., 2011; Ramadan, 2011a). Previene alteraciones metabólicas asociadas a la obesidad en el hígado y músculo esquelético (Fuente et al., 2020); además ejerce efectos citoprotectores y antioxidantes sobre las células cerebrales expuestas a estímulos neurotóxicos (Areiza et al., 2018).

Los jugos de frutas son sistemas coloidales con partículas insolubles complejas y heterogéneas dispersas en un medio continuo rico en compuestos solubles, que incluyen azúcares, ácidos orgánicos, pectinas solubles, compuestos fenólicos y sales. El material disperso está formado principalmente por fragmentos de tejidos celulares derivados de su composición (Dahdouh et al., 2016). Los sistemas coloidales son termodinámicamente inestables, gobernados por el movimiento browniano; dependen de varios componentes fisicoquímicos: interacciones superficiales, electrostáticas, de adsorción, moleculares e interpartículas, así como de las propiedades hidrocoloides (Wan et al., 2019). Entre las fuerzas responsables de la estabilidad fisicoquímica del sistema coloidal se destacan las fuerzas de atracción o de Van der Waals y las fuerzas de repulsión o electrostáticas; además, existen otras como las fuerzas estéricas, de hidratación, hidrofóbicas y de separación de fases (Hennart et al., 2010). El uso de cizalla u otros procesos de homogeneización y la modificación de la reología de la fase continua contribuyen a la estabilidad del sistema coloidal al disminuir las fuerzas de atracción (< tamaño de partícula) y la movilidad de las partículas (Chen et al., 2014; Hua et al., 2017; Ozyurt & Ötles, 2016).

Dahdouh et al. (2016), informaron que las interacciones fisicoquímicas entre las partículas están estrechamente relacionadas con la composición bioquímica del jugo de frutas, particularmente por la presencia de polisacáridos, como pectinas, celulosa y hemicelulosa. En este sentido, las partículas insolubles presentes (pectina, celulosa, hemicelulosa, lignina, entre otras) son las responsables de la turbidez y separación de fases (sedimentación). El desarrollo de esta turbidez resulta de la formación previa de complejos poliméricos entre polisacáridos, solutos de bajo peso molecular (azúcares e iones metálicos) y proteínas (Uzuner & Cekmecelioglu, 2018). En este sentido, se han utilizado diversos parámetros y métodos para evaluar la estabilidad de los sistemas coloidales: índice de absorción espectral (R), potencial zeta ( $\zeta$ ), viscosidad ( $\mu$ ), distribución y tamaño de partículas, sólidos totales (TS), entre otros (Matusiak & Grządka, 2017).

Enzimas hidrolíticas y complejos enzimáticos (amilasas, pectinasas, celulasas y hemicelulosas) se han utilizado en la industria de bebidas para la mejora de las propiedades finales de sistemas coloidales: rendimiento, clarificación y reducción de sedimentos, extracción de componentes bioactivos de frutas (Álvarez García, 2018; Ramadan, 2018; Sadh et al., 2018; Uzuner & Cekmecelioglu, 2018). En este contexto, la enzima pectinasa ha sido utilizada en concentrado de jugo de litchi (100 - 500 ppm, 40 °C y 2 h), a 500 ppm facilitó la reducción de sólidos insolubles y produjo jugo de lichi con menor viscosidad (Vijayanand et al., 2010). Pectinex SP-L® (pectinasas, hemicelulasas y beta-glucanasas) y Rapidase TF® (pectinasa, celulosa y hemicelulosa) (100 - 300 ppm, 35 - 55 °C, 2 h) se han utilizado en pulpa de umbu, donde 100 ppm de Rapidase - 35 °C - 40 min, permitió la reducción de la viscosidad y mayor conservación de la vitamina C (Gouvêa et al., 2017). Pectinex SP-L® con  $\alpha$ -amilasa y Pectinex SP-L® con celulosa (1,5 - 0,5% v/w, 50 °C - 2 h) se ha utilizado en puré de guanábana, donde Pectinex SP-L® con celulosa redujo la viscosidad de hasta 50%, y el puré producido tenía un pH más bajo y más contenido de azúcar total y ácido orgánico (Chang et al., 2018). En pulpa de uchuva, (Ramadan et al.,

2008) Ramadan y Moersel (2007), evaluaron la influencia de complejos enzimáticos (pectinasa, proteasa y hemicelulasa, poligalacturonasa y celulasa) a 250 ppm, 50 °C durante 2 h. Los autores reportan que los tratamientos incrementaron el rendimiento de jugo y los contenidos de macro y micro componentes. Además, se producen jugos con mayor contenido de pulpa, mayor acidez y mayor cantidad de sólidos solubles totales (SS).

En este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia del proceso enzimático en la estabilidad fisicoquímica de un sistema coloidal a base de pulpa, piel y semilla de Uchuva (SCu); permitiendo un total aprovechamiento de la matriz de uchuva.

## 4.3 Materiales y métodos

### 4.3.1 Materiales

Se utilizaron uchuvas ecotipo Colombia provenientes de los municipios del oriente de Antioquia, Colombia, seleccionados con grados de madurez 3 y 4 según la Norma Técnica Colombiana NTC 4580 (ICONTEC, 1999). Los frutos inicialmente se desinfectaron por inmersión en una solución de 1400 ppm de Citrosan® (0,25% v/v) (Diken International, México) durante 10 minutos; luego se homogenizó la mezcla de pulpa, semilla y piel en un equipo tipo rotor y estator (Silverson Machines Ltd, Inglaterra, modelo L5M) durante 10 minutos a 10000 rpm hasta obtener el SC<sub>u</sub>. Por otro lado, se utilizó Viscozyme L, (Novozymes, Denmark), un complejo multienzimático proveniente de una cepa del hongo *Aspergillus aculeatus*, que contiene una amplia gama de carbohidrasas (arabanasa, celulasa, β-glucanasa, hemicelulasa y xilanasas) con una actividad de ≥100 unidades de β-glucanasa fúngica/g (Vong & Liu, 2019).

### 4.3.2 Métodos de caracterización

La humedad ( $X_w$ ) (%) se determinó según la norma AOAC 934.06 /2012 y los ST como la diferencia  $100 - X_w$  (%). La actividad de agua ( $a_w$ ) se determinó de acuerdo con la norma AOAC 978.18/2012, utilizando un medidor Aqualab Series 3 TE. El pH se determinó de acuerdo a la norma AOAC 981.12/2012 en un potenciómetro Hanna, USA, modelo pH 211, previa calibración del equipo con soluciones buffer de pH = 4 y pH = 7 a 25 °C. Las variables dependientes evaluadas fueron: La viscosidad ( $\mu$ ), los sólidos solubles (SS), tamaño de partícula ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ , y Span), potencial zeta ( $\zeta$ ), y el índice de absorción espectral (R). Los SS se determinaron en un refractómetro digital (Hanna Instruments, USA), modelo HI 96801, de acuerdo al método AOAC 932.12/2012 (AOAC, 2012). La  $\mu$  se determinó en un reómetro (Brookfield DV-III Ultra, Brookfield Engineering Laboratories, Inc., USA) acoplado a un baño termostático (25 °C) (Brookfield, modelo TC-502, USA), husillo RV3, y la prueba se realizó con velocidades de deformación desde 0,01 hasta 100 rpm y el valor se reportó a 100 rpm (Wardy et al., 2014). Los tamaños de partícula (percentiles  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$ ) se determinaron mediante difracción de luz láser en un Mastersizer 3000 (Malvern Instrument Ltd., Worcestershire, UK), sistema Hydro LV, según la metodología de Dahdouh et al.

(2018), fijando el índice de refracción de la  $SC_u$  en 1.368, el índice de refracción del agua en 1.33, el índice de absorción de la partícula (0.45) y el nivel de obscuración del láser en 15. La polidispersidad del tamaño de las partículas se determinó a partir de la relación denominada  $Span = (D_{90} - D_{10})/D_{50}$  (Dahdouh et al., 2018; Huang et al., 2020). El potencial zeta ( $\zeta$ ) se determinó según las metodologías descrita por Wellala et al (2020) y Tamnak et al. (2016), con algunas modificaciones. Para ello se utilizó un equipo Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Instruments Ltd., Worcester, UK), la suspensión se diluyó en agua desionizada (1:100) y se inyectó en una celda de electroforesis capilar de 1 mL. El R se determinó en un espectrofotómetro UV-Visible (Thermo Scientific Evolution 60, USA), según metodología descrita por Mirhosseini et al. (2008), y definida como la relación de absorbancia a 800 nm sobre 400 nm ( $A_{800}/A_{400}$ ), para lo cual la muestra se diluyó en agua desionizada (1:100) y para el blanco se utilizó agua desionizada.

### 4.3.3 Proceso enzimático

Lotes de 4000 g de  $SC_u$  homogenizada fueron procesados por hidrólisis enzimática, empleando Viscozyme L, y que actúa sobre sustancias similares a la pectina ramificada que se encuentran en las paredes celulares de las plantas (Novozymes, 2001). Inicialmente, la pulpa homogenizada se sometió a un proceso de sonicación (Branson 3510 Ultrasonic Cleaner, USA) durante 15 minutos, 40 Hz y temperatura controlada ( $\approx 30$  °C); posteriormente, se adicionó la enzima y la mezcla se incubó en un baño termostatóado (Memmert WNB, Alemania) ( $30 \pm 0,5$  °C) bajo agitación lenta (Sammic TR-350) durante los TH. Adicionalmente, se preparó una muestra de control sin uso de enzimas (Ramadan & Moersel, 2007).

El proceso enzimático aplicado al  $SC_u$ , se evaluó a través de un diseño factorial completo aleatorizado (15 combinaciones), considerando las variables independientes: concentración de enzima [Enzima] (50, 125 y 200 ppm) y tiempo de hidrólisis (TH) (0, 30, 60, 90 y 120 min). Se evaluó la cinética enzimática, tomando cada 30 minutos una alícuota de 200 mL y la inactivación enzimática se realizó al finalizar cada tratamiento, calentando los  $SC_u$  a 90 °C durante 5 minutos.

### 4.3.4 Análisis estadístico y optimización experimental

Los resultados fueron analizados con el software Statgraphics Centurion XVII.II, se manejó un diseño factorial completo, mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5% ( $p < 0.05$ ), los datos se ajustaron a una superficie de respuesta. La optimización experimental del proceso se realizó según criterios definidos y deseables en el  $SC_u$ ; mientras que, impactos y pesos se definieron según base en los resultados del ANOVA. Los resultados de las variables dependientes se ajustaron a un modelo polinomial de orden 2 (Ecuación 4-1), donde Y es la variable dependiente,  $\beta_0$  es constante,  $\beta_1A$  y  $\beta_2B$  son los coeficientes lineales;  $\beta_4A^2$  y  $\beta_5B^2$  son los coeficientes cuadráticos; y  $\beta_3AB$  es el

coeficiente de la interacción lineal de los factores. El ajuste de los modelos se realizó utilizando el método de falta de ajuste y el coeficiente de regresión ( $R^2$ ). Los datos experimentales para todas las variables dependientes se reportaron como el promedio y desviación estándar de 3 lecturas para cada  $SC_u$ , y los valores experimentales a la condición óptima se obtuvieron a partir de 3 réplicas. Se determinó el error medio relativo (ERM) para evaluar la precisión del modelo matemático.

$$Y = \beta_0 + \beta_1A + \beta_2B + \beta_3AB + \beta_4A^2 + \beta_5B^2 \quad \text{Ecuación 4-1}$$

## 4.5 Resultados y discusión

La tabla 4-1 presenta los valores medios y la desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos de la pulpa homogenizada de uchuva ecotipo Colombia. Los valores medios de la  $X_w$  y  $a_w$  fluctuaron entre 82.9 – 81.2% y 0.984 – 0.990 respectivamente, correspondientes a un contenido de TS entre 17.1 – 18.8%. Por otro lado, los valores medios de los SS fluctuaron entre 13.0 – 13.4%, los cuales correspondieron a los valores establecidos por la NTC 4580 (ICONTEC, 1999) para los estados de madurez 3 y 4, los cuales son menores al rango reportados por Marín et al. (2010), (13.5 - 15.1%) y son aportados principalmente por los contenidos de azúcares presentes (Sacarosa, glucosa y fructosa) (Elahi Jan & Kawabata, 2011; Puente et al., 2011).

Los resultados obtenidos de  $X_w$  y  $a_w$  son frecuentes en las frutas, y similares a los reportados por Yildiz et al. (2015) ( $X_w$ : 79.5 - 82.3%), por Marín et al., (2010) ( $X_w$ : 76.7 – 82.3%) ( $a_w$ : 0.986 – 0.990), y por Cortés et al. (2016) ( $a_w$ : 0.983 – 0.987). Estos valores de  $X_w$  y  $a_w$  identifican la matriz como un sustrato favorable a crecimiento microbiano y susceptible a procesos de deterioro en tiempos cortos (Ríos et al., 2007). Por otro lado, los TS fueron menores a los reportados por Cortés et al. (2016), (18.4 – 20.5%).

**Tabla 4-1:** Parámetros fisicoquímicos de la pulpa de uchuva homogenizada.

Lote	Parámetro				
	$X_w$ (%)	$a_w$	TS (%)	SS (%)	pH
1	82.9 ± 0.9	0.986 ± 0.002	17.1 ± 0.9	14.0 ± 0.1	3.67 ± 0.02
2	81.2 ± 0.4	0.985 ± 0.001	18.8 ± 0.4	14.3 ± 0.1	3.68 ± 0.00
3	82.0 ± 1.3	0.987 ± 0.003	18.0 ± 1.3	14.4 ± 0.1	3.58 ± 0.07

Los valores medios del pH estuvieron dentro del rango (3.6 – 3.7), valores superiores a los reportados en la misma variedad por Cortés et al. (2016) (3.3 – 3.5) y por Marín et al. (2010), ( $\approx$  3.5), y dentro de los rangos establecidos para la *Physalis peruviana* L. por El Sheikha et al., (2010). Estos valores, se encuentran dentro del intervalo de pH óptimo de la actividad del complejo enzimático Viscozyme L. (3.3 – 5.5) (Kitrytė et al., 2017).

La tabla 4-2 y 4-3 presentan los valores medios  $\pm$  desviación estándar y los resultados del ANOVA en función del valor p de las variables dependientes del  $SC_u$  tratados por hidrolisis

enzimática, respectivamente. Por otro lado, la Figura 4-1 presenta el comportamiento de los gráficos de superficies de respuesta.

[Enzima], TH, la interacción lineal [Enzima]- TH y la interacción cuadrática de [Enzima] ejercieron efecto estadístico significativo ( $p < 0.05$ ) sobre  $\mu$ , esto se puede atribuir a las fluctuaciones de sus valores medios (620.0 - 240.5 cP). La  $\mu$  del  $SC_u$  es una función de las fuerzas intermoleculares y de las interacciones agua-soluto, estas fuerzas dependen de los espacios intermoleculares y de las fuerzas del enlace de  $H_2$  (López-Esparza et al., 2015). Se observa que la  $\mu$  del  $SC_u$  al inicio de los procesos enzimáticos presentó los menores valores, confiriendo su actividad enzimática una modificación de esta en el TH, y siendo mayor principalmente a altas [Enzima]. Esta situación podría atribuirse a que el complejo enzimático multiactivo Viscozyme-L hidroliza eficazmente los polisacáridos en las células vegetales, rompe los enlaces dentro de la matriz de polisacáridos y facilita la liberación de más componentes intercelulares, como proteínas, ácidos grasos (linoleico, oleico, palmítico y esteárico), fitoesteroles, entre otros (Agarwal & Bosco, 2014; Puente et al., 2011; Ramadan & Morsel, 2003). Esta acción se potencia por la homogenización previa por cizalla que desfragmenta la estructura incrementando la acción de la enzima debido al incremento del área superficial de las partículas, principalmente semillas y piel; que, sumado a los componentes hidrosolubles lixiviados de las partículas y los originales de la fase acuosa, resulta en un aumento de los TS y la  $\mu$  del  $SC_u$ .

Por otro lado, la hidrólisis de la celulosa presente en la piel y la cascara de la semilla actúa sobre la parte cristalina, es decir, rompe la cristalinidad de la fracción de celulosa debido a la acción de la endo- $\beta$  glucanasa presente en el complejo enzimático, generando polímeros amorfos (celuoligosacaridos) con mayor interacción con las moléculas de agua a través de los puentes de  $H_2$ , ya que hay un número mayor de grupos OH expuestos, restringiendo su movilidad y por lo tanto, contribuyendo al incremento de la  $\mu$  del  $SC_u$  (Khazraji & Robert, 2013). Algunos autores han reportado un comportamiento contrario en la  $\mu$  del jugo de uchuva filtrado y tratado por hidrólisis enzimática con Pectinex a diferentes contenidos de TS y [Enzima] (Ramadan & Moersel, 2007), lo cual se ha atribuido a las pectinasas presentes, que descomponen los grupos pecticos o sustratos de polisacáridos contenidos en las paredes celulares del sistema vegetal.

El gráfico de superficie de respuesta 4-1A muestra que el principal efecto de la [Enzima] y el TH sobre el incremento de la  $\mu$  del  $SC_u$  ocurre cuando estos se encuentran en niveles superiores a 150 ppm y 60 minutos respectivamente, lo cual se potencia con la interacción positiva TH-[Enzima], es decir a 200 ppm y 120 minutos, donde la  $\mu$  tiende a maximizarse (620 cP). Al aumentar la [Enzima] hay más moléculas de enzimas disponibles para escindir la matriz de polisacáridos de la pared celular, liberando más compuestos presentes al interior de las células (de Figueiredo et al., 2018).

Tabla 4-2: Resultados de las variables dependientes del SC<sub>u</sub>.

Tratamiento	[Enzima] (ppm)	TH (min)	$\mu$ (cP)	SS (%)	$\zeta$ (mV)	Tamaño de partícula (percentil)			Span	R
						D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)		
1	50	0	357.0 ± 1.0	13.4 ± 0.1	-17.0 ± 0.9	11.1 ± 0.4	136.3 ± 7.4	477.3 ± 53.8	3.44 ± 0.55	0.635 ± 0.004
2	125	0	269.0 ± 2.0	14.4 ± 0.1	-17.7 ± 0.5	11.2 ± 0.1	129.0 ± 7.0	515.0 ± 46.9	3.90 ± 0.16	0.669 ± 0.005
3	200	0	356.5 ± 8.5	13.2 ± 0.1	-17.6 ± 0.8	12.7 ± 0.6	156.0 ± 3.6	600.3 ± 21.1	3.77 ± 0.07	0.702 ± 0.002
4	50	30	373.0 ± 20.0	14.5 ± 0.1	-18.2 ± 0.4	6.5 ± 0.2	109.0 ± 5.6	454.3 ± 36.7	4.11 ± 0.20	0.631 ± 0.003
5	125	30	240.5 ± 6.5	15.1 ± 0.1	-20.8 ± 0.5	4.3 ± 0.5	129.1 ± 22.8	590.9 ± 87.0	4.56 ± 0.20	0.540 ± 0.007
6	200	30	518.5 ± 7.5	13.3 ± 0.1	-17.5 ± 0.3	5.5 ± 0.2	137.7 ± 5.5	559.7 ± 10.5	4.03 ± 0.09	0.743 ± 0.010
7	50	60	383.0 ± 23.0	15.0 ± 0.1	-18.9 ± 0.9	5.4 ± 0.2	104.1 ± 4.1	459.0 ± 10.0	4.36 ± 0.21	0.636 ± 0.003
8	125	60	308.0 ± 8.0	15.1 ± 0.1	-20.1 ± 0.9	3.1 ± 0.1	116.5 ± 15.5	511.3 ± 41.0	4.38 ± 0.25	0.585 ± 0.018
9	200	60	521.0 ± 10.0	13.1 ± 0.1	-17.4 ± 0.3	4.0 ± 0.3	142.3 ± 11.6	649.3 ± 31.8	4.54 ± 0.17	0.773 ± 0.005
10	50	90	414.5 ± 7.5	15.2 ± 0.1	-17.3 ± 0.9	4.0 ± 0.1	107.6 ± 6.7	465.7 ± 31.0	4.29 ± 0.04	0.671 ± 0.002
11	125	90	308.5 ± 8.5	15.2 ± 0.0	-17.3 ± 0.9	2.4 ± 0.2	105.0 ± 15.2	449.3 ± 48.8	4.35 ± 1.02	0.559 ± 0.027
12	200	90	582.0 ± 13.0	13.4 ± 0.1	-16.2 ± 0.6	3.5 ± 0.1	135.0 ± 10.6	586.0 ± 31.3	4.34 ± 0.54	0.784 ± 0.012
13	50	120	416.0 ± 8.0	15.2 ± 0.0	-17.0 ± 0.4	3.2 ± 0.1	115.7 ± 7.1	495.0 ± 22.9	4.25 ± 0.08	0.668 ± 0.004
14	125	120	374.0 ± 24.0	15.2 ± 0.0	-20.8 ± 0.7	2.4 ± 0.1	130.3 ± 17.6	502.0 ± 26.5	3.86 ± 0.33	0.574 ± 0.007
15	200	120	620.0 ± 8.0	13.2 ± 0.1	-16.3 ± 0.7	3.3 ± 0.1	161.0 ± 20.2	629.0 ± 38.0	3.91 ± 0.28	0.764 ± 0.002

Tabla 4-3: Resultados del ANOVA para el SC<sub>u</sub>.

	$\mu$ (cP)	SS (%)	$\zeta$ (mV)	D <sub>10</sub> (μm)	D <sub>50</sub> (μm)	D <sub>90</sub> (μm)	Span	R
<b>A: [Enzima]</b>	0.0001*	0.0000*	0.4350	0.6927	0.0000*	0.0007*	0.8084	0.0027*
<b>B: TH</b>	0.0002*	0.0002*	0.7899	0.0000*	0.1642	0.8754	0.0557	0.6633
<b>AA</b>	0.0000*	0.0000*	0.0180*	0.0586	0.0503	0.3282	0.2958	0.0006*
<b>AB</b>	0.0129*	0.0007*	0.6048	0.5384	0.1369	0.8487	0.1586	0.7524
<b>BB</b>	0.7153	0.0106*	0.3964	0.0005*	0.0012*	0.7436	0.0006*	0.6908

\*Significativo ( $p < 0.05$ )



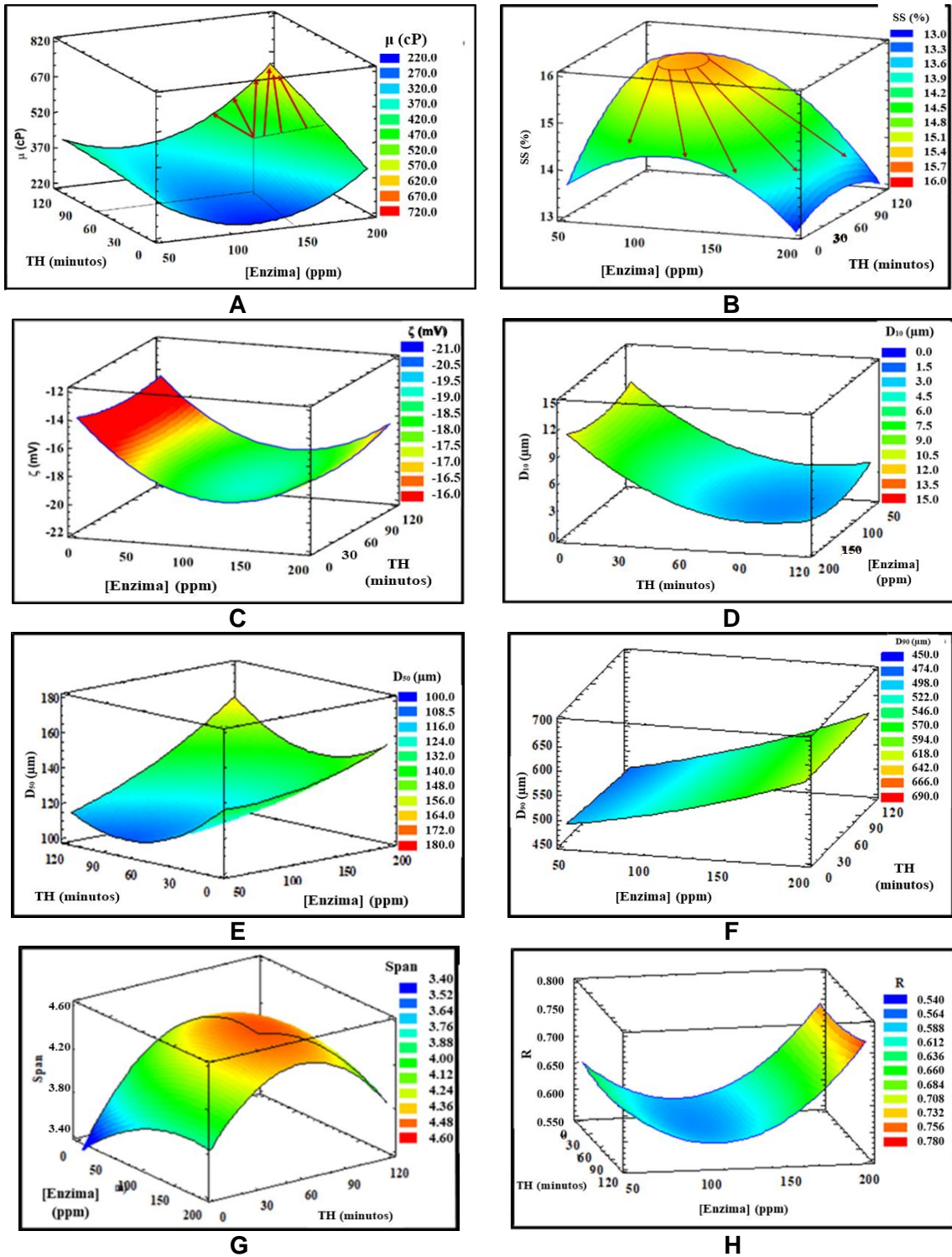


Figura 4-1: Gráficos de superficies de respuesta de las variables dependientes en función de las variables independientes del  $SC_u$ .

Los SS estuvieron afectados significativamente ( $p < 0.05$ ) por las variables [Enzima], TH y a las interacciones lineales y cuadráticas; fluctuando los valores medios entre 13.2 – 15.2%. El gráfico de superficie de respuesta 4-1B muestra que los SS presentaron los niveles superiores en condiciones de [Enzima] (75 – 125 ppm) y TH (90 – 120 minutos) (zona anaranjada), lo cual se atribuye a la acción de la enzima sobre la liberación de componentes hidrosolubles de las paredes celulares, mencionado anteriormente. Se observa que la acción de la enzima a bajos TH (0-30 minutos) no es efectiva, así como tampoco a altas [Enzima] (150 - 200 ppm), lo cual podría atribuirse a que la enzima Viscozyme® L tiene la  $\beta$ -endoglucanasa como actividad principal declarada, y estaría requiriendo de un tiempo mínimo para que la pared celular primaria sea hidrolizada por esta enzima de forma efectiva, y además de las celulasas (de Figueiredo et al., 2018). De esta manera, durante el tratamiento enzimático, una cantidad significativa de fibra insoluble podría hidrolizarse a oligómeros, liberando más componentes que contribuyen al incremento de los SS (Cheng et al., 2018; Sun et al., 2007), o la acción de la  $\beta$ -glucanasa, podría estar liberando monómeros de glucosa y celuoligosacaridos (2, 3, 4 moléculas de glucosa: celobiosa, celotriolosa, celotetrulosa, respectivamente) (Jeoh et al., 2017).

Por otro lado, la respuesta final de los SS en el  $SC_u$  que ha sido tratado enzimáticamente y homogenizado, donde la hidrólisis enzimática contribuye a la ruptura de los polisacáridos solubles, y los nuevos componentes (glucosa, fructosa y oligosacaridos) presentan índices de refracción diferentes a la sacarosa y como consecuencia varían los SS en la fracción líquida del  $SC_u$  (Mettler Toledo, 2014).

Por otro lado, altas [Enzima] podrían generar competencia por los sitios de unión entre las enzimas individuales y la saturación de cada sitio, generando probablemente la inhibición o impedimento a la acción de estos, en la cual los compuestos hidrolizados pueden actuar como inhibidores, reduciendo así la actividad enzimática (de Figueiredo et al., 2018). Esta situación tiene coherencia con los mayores tamaños de partícula ( $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$ ) observados a altas [Enzima]. Es posible que esta situación se haga más evidente, debido a los gradientes de velocidad en el proceso de mezclado durante el TH; así como también, el incremento de la potencia/volumen de lote en el TH, dado que cada 30 minutos se retiraron 200 mL.

Un incremento de los SS por la acción enzimática ha sido reportado en diversas investigaciones; (Chang et al., 2018), reportaron en guanábana un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) (18.2  $\rightarrow$  32.0%) con mezclas de pectinasa (Ultra SP-L®) y celulasa (Celluclast®), lo cual se atribuyó principalmente a la acción de la celulasa en la descomposición de la pared celular, liberando contenido celular de azúcares solubles (glucosa y fructosa); además, reportan un efecto sinérgico con las pectinasas, que aumenta la conversión de compuestos insolubles a solubles. Koley et al. (2011), evaluaron el efecto de las concentraciones de las enzimas pectinasa de *Aspergillus niger* y Viscozyme de *Aspergillus* sp. en jugo de *Zizyphus mauritiana* L., reportando una aceleración de la licuefacción del macerado pulposo, lo que resultó en un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) de los SS y principalmente con la enzima Viscozyme donde se alcanzó un mayor grado de

descomposición del tejido y contenidos de SS del 25%. Por otro lado, Sun et al. (2007), evaluaron en el tiempo el efecto de una solución de Viscozyme (1% v/w) sobre el jugo de espárragos, reportando doble cantidad de los SS a las 2 horas de proceso con respecto al jugo control sin enzima.

El  $SC_u$  es un sistema complejo multicomponente y multifásico que presenta turbiedad por la presencia del material insoluble al pH de la pulpa homogenizada (3.5 - 3.7), y que está compuesto principalmente de carbohidratos (sacarosa, glucosa, fructosa y pectinas), fibras (celulosa, hemicelulosa, lignina), proteínas (Ramadan, 2011a) y por una pequeña fracción no polar (grasa saturada, poliinsaturada y monoinsaturada) proveniente principalmente de la semilla (Puente et al., 2011). En el  $SC_u$ , el valor del  $\zeta$  es un parámetro de gran importancia que está relacionado con su estabilidad fisicoquímica y al mismo tiempo con su composición, y principalmente es un indicador de la magnitud de las fuerzas repulsivas o electrostáticas entre las partículas coloidales adyacentes (Yu et al., 2016). La interacción cuadrática de la [Enzima], presentó efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre el  $\zeta$ , fluctuando sus valores medio entre -16.2 y - 20.8 mV, lo cual identifica una capa de coiones (capa de Stern) cargada negativamente y adsorbida en la interfase de partículas, constituidas principalmente por el material insoluble y por el componente graso (Puente et al., 2011). Por otro lado, la carga negativa de la capa de Stern está representada principalmente por aniones disociados en la fase acuosa del  $SC_u$  y por un recubrimiento de pectina no hidrolizada que conserva su carga negativa (Cano-Sarmiento et al., 2018); mientras que, la segunda capa eléctrica o capa difusa cargada positivamente y densamente poblada por los cationes disociados (Ca, P, Fe) de la fase acuosa, conforman la doble capa eléctrica que permite estabilizar las partículas adyacentes debido a la repulsión electrostática entre estas (Fustier et al., 2010). Sin embargo, la estabilidad global del  $SC_u$  está gobernada principalmente por el balance de las fuerzas repulsivas y las fuerzas atractivas (fuerzas de Van der Waals), donde estas últimas están relacionadas directamente con las interacciones dipolo permanentes o inducidos y las interacciones de moléculas no polares, que se potencian con el mayor tamaño de las partículas (Genovese & Lozano, 2006). Otros tipos de fuerzas podrían estar participando, pero en menor proporción: estéricas, de hidratación, hidrofóbicas y de separación de fases (Yu et al., 2016; Zhu et al., 2020).

El comportamiento del  $\zeta$  en el gráfico de superficie de respuesta 4-1C muestra una tendencia curvilínea, característica de la interacción cuadrática, donde el mayor potencial eléctrico negativo ( $\zeta$  más negativo) en la proximidad de la capa de Stern se alcanza en el mínimo del lado convexo de la gráfica de superficie de respuesta (Figura 4-1C), cuando el  $SC_u$  es tratado enzimáticamente a [Enzima] entre 100 – 150 ppm. El comportamiento presentado, puede deberse a que las partículas insolubles (fibras) al ser sometidas tanto al hidrólisis enzimático como al esfuerzo de cizalla, tienden a disminuir su tamaño, incrementando el área superficial y la densidad óptica (Zhou et al., 2017); por consiguiente, el efecto enzimático hace que varíe la composición química (polímeros hidrolizados de menor peso molecular) y se incremente las interacciones de los puentes de  $H_2$  debido a la mayor exposición de los grupos OH de la glucosa, lo que produce mayor solubilidad y

estabilidad; si el tamaño es menor también se reduce los efectos gravitacionales de peso y potencia el movimiento browniano del  $SC_u$ , reduciendo la posible precipitación de las partículas. Esta fenomenología, se evidencia con el incremento del  $|\zeta|$ , infiriendo que las interacciones de tipo repulsivo electrostáticamente se incrementan al incrementarse el número de especies resultantes de la hidrólisis enzimática (Yu et al., 2016).

Los resultados de  $\zeta$ , son comparables con los datos reportados por Zhu et al. (2020), en jugo de manzana a diferentes tamaños de partícula, (-12 a -16 mV), en donde los valores más bajos (> carga negativa) se obtienen a menores tamaños de partículas. Por otro lado, Zhou et al. (2017), reportaron para jugo de mango obtenido a altas presiones valores medios entre -15,9 y -17,0 mV; Wan et al. (2018), reportaron en jugo de zanahoria fermentado por probióticos valores medios entre -19,0 y - 20,5 mV. Algunos autores recomiendan que el límite de  $\zeta$  en sistemas coloidales debería ser del orden de  $|30|$  mV (Cano-Sarmiento et al., 2018); sin embargo, otros investigadores han reportado sistemas coloidales a base de uchuva, fresa y mora estables fisicoquímicamente, debido al efecto sinérgico entre la  $\mu$  y  $\zeta$  (Gallón et al., 2020).

TH y [Enzima], ejercieron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre los percentiles  $D_{10}$  y  $D_{50}$  respectivamente, al igual que y las interacciones cuadráticas de TH; mientras que, el percentil  $D_{90}$  esto afectado significativamente ( $p < 0.05$ ) solo con respecto a la [Enzima]. Los valores medios de  $D_{10}$ ,  $D_{50}$  y  $D_{90}$  fluctuaron entre (2.4 – 12.7  $\mu\text{m}$ ), (104.1 – 161.2  $\mu\text{m}$ ) y (449.3 – 649.3  $\mu\text{m}$ ) respectivamente, lo cual denota un efecto menor de los tratamientos enzimáticos sobre el  $D_{10}$  (< grado de variabilidad), seguido de  $D_{50}$  y  $D_{90}$ , siendo este último el más representativo o crítico. En consecuencia, se considera que, los tamaños de partícula menores correspondiente al acumulado del 10% consisten en células individuales y/o fragmentos de células; mientras que, valores correspondientes a  $D_{50} > 100 \mu\text{m}$  pueden ser pequeños grupos de células o fragmentos de tejido que crecen debido a las fuerzas atractivas de estas partículas y terminan representando a los valores encontrados en  $D_{90}$ , tal como ha sido reportado por Moelants et al. (2013), (valores > 250  $\mu\text{m}$ ).

El comportamiento según los gráficos de superficie de respuesta muestra que el  $D_{10}$  (Figura 4-1D) disminuye con el incremento del TH; sin embargo, estos cambios no se consideraron críticos, ya que estas partículas se acoplan dentro del movimiento browniano de las partículas en el  $SC_u$ . Por otro lado, el percentil  $D_{50}$  (Figura 4-1E) presentó una tendencia a disminuir con niveles bajos de [Enzima], presentando los menores valores en condiciones de TH (45 - 75 minutos) y [Enzima] (50 - 75 ppm); además, se observa el efecto de la interacción cuadrática de TH que caracteriza un comportamiento curvilíneo, que hace que los mínimos de la curvatura incrementen con el incremento de la [Enzima]. Para el caso del  $D_{90}$  (Figura 4-1F), se observa una relación directamente proporcional entre esta y la [Enzima], que favorece los menores valores de  $D_{90}$  cuando la [Enzima] fue < 125 ppm. En general,  $D_{50}$  y  $D_{90}$  comportaron de una forma similar, lo cual podría atribuir a la resultante del acoplamiento de los principales fenómenos observados: 1) debilitamiento de la estructura insoluble causado durante el proceso de hidrólisis enzimática (Álvarez García, 2018), que confiere una disminución de los tamaños de partículas, 2) saturación de las

enzimas en las superficies de las partículas cuando la formulación contiene altas [enzima], que inhibe su acción sin llegar a reducir de forma eficaz los tamaños de partículas y favoreciendo las fuerzas atractivas, que podría conferir agregados y/o separaciones de fase en el  $SC_u$  (Lucas et al., 2018).

Dahdouh et al. (2018), afirman que los zumos pueden considerarse suspensiones polidispersas, que presentan una apariencia en función del tamaño de partícula predominante; es así como, estos sistemas coloidales pueden encajar en aquellos de tamaños de partículas  $< 1 \mu\text{m}$ , los supracoloidales entre  $1 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$  y aquellos cuyas partículas son mucho mayores ( $> 100 \mu\text{m}$ ), donde los efectos gravitacionales llegan a ser más evidentes y la inestabilidad fisicoquímica es más frecuente. Por lo general, la mayoría de las investigaciones evalúan el efecto de las altas presiones de homogenización por cizalla sobre el tamaño de partículas de zumos o suspensiones de estructuras vegetales como anacardo (Leite et al., 2015), piña (Silva et al., 2010), remolacha azucarera (Huang et al., 2020), tomate (Augusto et al., 2012), entre otras, concluyendo que a mayores presiones o tiempos de homogenización, mayor es la reducción de tamaño de partícula. Son diversas las investigaciones que evalúan el efecto de la hidrólisis enzimática en zumos o suspensiones de frutas; sin embargo, los objetivos están orientados principalmente a evaluar la influencia sobre la turbidez, reología, disposición y extracción de compuestos bioactivos, clarificación y rendimiento (Borchani et al., 2019; Cerreti et al., 2016; Chang et al., 2018; Gouvêa et al., 2017; Handique et al., 2019; Machado et al., 2016; Maktouf et al., 2014; Phuong & Tuan, 2016). Se considera que la integración de procesos de homogenización por cizalla con tratamientos enzimáticos, genera una mayor sinergia en la reducción de tamaño; sin embargo, la bibliografía no reporta estudios en este sentido.

El intervalo de distribución (*Span*), presentó valores medios que fluctuaron 3,4 y 4,6, similares a los reportados en zumo de naranja comercial (3,9) (Dahdouh et al., 2018) y de 4,2 en zumo de remolacha azucarera tratada a 5 MPa de presión de homogenización (Huang et al., 2020). Los resultados obtenidos indican que el  $SC_u$  se caracteriza por una alta polidispersidad de los tamaños de partícula; a mayores valores del *Span*, una mayor turbidez es observada y al mismo tiempo podría comportar con una menor estabilidad fisicoquímica durante el almacenamiento (Iguar et al., 2014). El gráfico de superficie de respuesta (Figura 4-1G) muestra un comportamiento curvilíneo denotado por la influencia estadística de la interacción cuadrática de TH que maximiza el valor del *Span* a TH entre 30 y 90 minutos. Esto podría atribuirse, por un lado, al retraso de la acción enzimática sobre la pared celular primaria del material insoluble, que actúa durante este periodo principalmente sobre los fragmentos de menor tamaño (mayor área superficial), disminuyendo principalmente la frecuencia acumulada del 10% en condiciones de  $\mu$  baja en que se encuentra el  $SC_u$ , que hace que el  $\Delta(D_{90} - D_{10})$  sea mayor e incrementa la polidispersabilidad ( $> \text{Span}$ ). Esta situación es coherente con lo observado en los comportamientos del percentil  $D_{90}$  a cualquier TH ( $\approx$  constante o mínimos cambios), y en el percentil  $D_{10}$  hasta tiempo de 90 minutos (pendiente decreciente).

El R, es un indicador indirecto de la estabilidad de las partículas en el SC<sub>U</sub>, el cual relaciona la distribución del tamaño de las partículas con la dispersión de luz a diferentes longitudes de onda; además, la dispersión de la luz de un sistema coloidal aumenta con una disminución en el tamaño de la partícula y entre más corta es la longitud de onda de la luz, mayor es la dispersión de la luz (Kaufman & Garti, 1981). La relación de absorbancias a 400 y 800 nm ( $R = A_{800}/A_{400}$ ) ha sido asociada al nivel de absorción de luz en los sistemas coloidales y que está relacionada con la estabilidad de estos, siendo más estable cuando R es menor, debido al mayor número de partículas más pequeñas, que absorben en mayor cantidad de luz (Horie et al., 1976).

La [Enzima] y a la interacción cuadrática de la misma, ejercieron efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre R, lo cual se reflejó en las altas fluctuaciones observadas en sus valores medios (0.540 – 0.784), que permite conferir un efecto principal de los mayores tamaños y mayores variaciones de D<sub>50</sub> (104.1 – 142.3  $\mu\text{m}$ ) y D<sub>90</sub> (449.3 – 649.3  $\mu\text{m}$ ), que hace que ellos absorban menos la luz incidente (Mirhosseini et al., 2008). Lo anterior se corrobora según el gráfico de superficie de respuesta (Figura 4-1H), que muestra comportamientos más similares de R con el D<sub>50</sub> y D<sub>90</sub>. Se remarca una tendencia de mayores valores de R cuando el SC<sub>U</sub> opera a mayores [Enzima] (150 – 200 ppm), lo cual está relacionado con el mayor tamaño del material disperso en el SC<sub>U</sub> (piel y semilla de la uchuva que no logra una efectiva hidrólisis por el complejo enzimático); sin embargo, la interacción cuadrática realiza unos mínimos de R a [Enzima] entre 100 y 125 ppm. En todos los casos no se observa una influencia del TH y se resalta que este es el primer estudio que evalúa el efecto enzimático sobre el R.

### Modelamiento matemático y optimización experimental de múltiples respuestas.

La tabla 4-4 presenta los coeficientes de regresión estimados del modelo polinomial de 2°orden para el SC<sub>U</sub> y sus respectivos R<sup>2</sup>. Los valores de R<sup>2</sup> para las variables dependientes  $\mu$ , SS, D<sub>10</sub> y D<sub>50</sub> mostraron un buen ajuste del modelo matemático; mientras que, el resto de variables su ajuste se considera aceptables, dado que las condiciones impuestas durante el mezclado en el TH pudieron haber afectado estas variables, que hace que error con respecto al valor predicho por el modelo sea mayor.

**Tabla 4-4:** Coeficientes de regresión del modelo matemático y R<sup>2</sup> para las variables dependientes del SC<sub>U</sub>.

Coeficientes	$\mu$ (cP)	SS (%)	$\zeta$ (mV)	D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Span	R
$\beta_0$	618.7920	11.9388	-13.6028	13.5181	141.0200	480.8440	3.2579	0.8265
$\beta_{1A}$	-6.5531	0.0429	-0.0886	-0.0536	-0.2315	0.2122	0.0066	-0.0045
$\beta_{2B}$	0.1863	0.0316	-0.0295	-0.1725	-0.8607	-0.4365	0.0248	-0.0004
$\beta_{3AB}$	0.0096	0.0001	0.0001	0.0001	0.0012	0.0008	0.00003	0.000001
$\beta_{4A^2}$	0.0274	0.0002	0.0004	0.0002	0.0002	0.0042	0.00002	0.00002
$\beta_{5B^2}$	-0.0020	0.0001	0.0002	0.0010	0.0055	0.0024	0.0002	0.000002
R <sup>2</sup>	<b>95.0</b>	<b>97.2</b>	<b>53.0</b>	<b>93.8</b>	<b>90.5</b>	<b>74.9</b>	<b>79.9</b>	<b>83.1</b>

En todas las variables se observó una distribución aleatoria de los residuos, que permite asegurar que los datos pueden ser parametrizados según una distribución normal; por lo que, los modelos son adecuados para describir el comportamiento de los resultados encontrados.

La tabla 4-5 presenta los criterios, pesos e impactos de las variables dependientes que se tuvieron en cuenta para la validación de la optimización experimental de múltiples respuestas del SC<sub>u</sub>; además, presenta los resultados teóricos obtenidos de los modelos polinómico de 2º orden y los resultados experimentales obtenidos a la condición óptima determinada. Los resultados obtenidos de la optimización presentaron una deseabilidad del 74.2%, siendo las variables independientes óptimas las siguientes: [Enzima] = 78.5 ppm y TH = 120 min. Los valores del error medio relativo fueron menores al 20% en todos los casos; por lo que se considera que el modelo de optimización de respuesta múltiple presenta un nivel aceptable de predicción de datos experimentales. Por su parte Handique et al., (2019), optimizaron en función de la deseabilidad jugo de banano, obteniendo un valor de 74.25%, similar a este estudio.

**Tabla 4-5:** Optimización experimental de múltiples respuestas para el SC<sub>u</sub>.

Variable dependiente	Criterio	Impacto	Peso	Óptimo teórico	Valor experimental	Diferencia	EMR (%)
$\mu$ (cP)	Maximizar	0.8	4.0	356.9	371.3 $\pm$ 24.4	-14.43	4.0
SS (%)	Maximizar	0.8	4.0	15.5	15.2 $\pm$ 0.3	0.3	1.9
$\zeta$ (mV)	Minimizar	0.8	4.0	-18.5	-21.8 $\pm$ 0.3	3.33	18.0
D <sub>10</sub> ( $\mu$ m)	Minimizar	0.5	3.0	3.2	3.5 $\pm$ 0.3	-0.30	9.4
D <sub>50</sub> ( $\mu$ m)	Minimizar	0.8	4.0	118.3	135 $\pm$ 3.6	-16.7	14.2
D <sub>90</sub> ( $\mu$ m)	Minimizar	1.0	5.0	480.8	565.7 $\pm$ 25.5	-84.87	17.6
Span	Minimizar	0.8	4.0	4.1	4.2 $\pm$ 0.1	-0.06	1.5
R	Minimizar	0.8	4.0	0.605	0.655 $\pm$ 0.007	-0.05	8.2

## 4.6 Conclusiones

La investigación permitió desarrollar un proceso sostenible que integró la homogenización por cizalla con tratamientos enzimáticos, y permitió utilizar la pulpa, piel y semilla de uchuva para la obtención de un SC<sub>u</sub> que representa la base para su uso en diversos procesos alimentarios, que se beneficiarían al ser estable fisicoquímicamente y poseer un mayor contenido de TS. En el proceso de hidrólisis enzimática, la variable independiente [Enzima] influyó principalmente sobre las variables dependientes  $\mu$ , SS, D<sub>50</sub>, D<sub>90</sub> y R; mientras que, el TH influyó sobre la  $\mu$ , SS y D<sub>10</sub>; además, existe un efecto de la interacción [Enzima]- TH sobre el aumento de la  $\mu$  y los SS. Los resultados mostraron que el proceso de hidrólisis enzimática confirió disminución de los tamaños de partícula, permitiendo mejorar la estabilidad fisicoquímica del SC<sub>u</sub>. Sin embargo, dado los bajos valores de  $\mu$  (371.3  $\pm$  24.4

cP) y  $\zeta$  ( $-21.8 \pm 0.3$ ), y altos valores de tamaño de partícula ( $D_{10}$ :  $3.5 \pm 0.3 \mu\text{m}$ ,  $D_{50}$ :  $135 \pm 3 \mu\text{m}$  y  $D_{90}$ :  $565.7 \pm 25.5 \mu\text{m}$ ), *Span* ( $4.2 \pm 0.1$ ) y *R* ( $0.655 \pm 0.007$ ) no se garantiza que el  $\text{SC}_u$  tengan un buen tiempo de vida útil; por lo que, se recomienda, 1) la adición de iones monovalentes (p.e.  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ ) para incrementar la fuerza iónica y el acho de la doble capa eléctrica para incrementar las fuerzas repulsivas del sistema coloidal; 2) la adición de un hidrocoloide que incremente la viscosidad de la fase continua y disminuya la movilidad de las partículas; y 3) una mayor desintegración de las partículas, utilizando sistemas de homogenización de alta presión, lo cual reduciría las fuerzas atractivas o fuerzas de Van der Waals.

## 4.7 Bibliografía

- Agarwal, R., & Bosco, S. (2014). Optimization of Viscozyme-L assisted extraction of coconut milk and virgin coconut oil. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 33(4), 276–284. <https://doi.org/10.5958/0976-0563.2014.00617.4>
- Álvarez García, C. (2018). Application of Enzymes for Fruit Juice Processing. In G. Rajauria & B. Tiwari (Eds.), *Fruit Juices: Extraction, Composition, Quality and Analysis* (pp. 201–216). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00011-4>
- AOAC, A. of O. A. C. (2012). *Official Methods of Analysis* (K. Helrich (ed.); 19th ed.).
- Areiza, N., Robles, J., Zamudio, J., Giraldez, L., Echeverría, V., Barrera, B., Aliev, G., Sahebkar, A., Ashraf, G., & Barreto, G. (2018). Extracts of *Physalis peruviana* protect astrocytic cells under oxidative stress with rotenone. *Frontiers in Chemistry*, 6(276), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00276>
- Augusto, P. E. D., Ibarz, A., & Cristianini, M. (2012). Effect of high pressure homogenization (HPH) on the rheological properties of tomato juice: Time-dependent and steady-state shear. *Journal of Food Engineering*, 111(4), 570–579. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.03.015>
- Borchani, M., Masmoudi, M., Ben Amira, A., Abbès, F., Yaich, H., Besbes, S., Blecker, C., Garvin, A., Ibarz, A., & Attia, H. (2019). Effect of enzymatic treatment and concentration method on chemical, rheological, microstructure and thermal properties of prickly pear syrup. *LWT*, 113, 108314. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108314>
- Cano-Sarmiento, C., Téllez-Medina, D., Viveros-Contreras, R., Cornejo-Mazón, M., Figueroa-Hernández, C., García-Armenta, E., Alamilla-Beltrán, L., García, H., & Gutiérrez-López, G. (2018). Zeta Potential of Food Matrices. *Food Engineering Reviews*, 10(3), 113–138. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9176-z>
- Cerreti, M., Liburdi, K., Benucci, I., & Esti, M. (2016). The effect of pectinase and protease treatment on turbidity and on haze active molecules in pomegranate juice. *LWT - Food Science and Technology*, 73, 326–333. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.06.030>
- Chang, L., Karim, R., Sabo, A., & Mohd, H. (2018). Characterization of enzyme-liquefied soursop (*Annona muricata* L.) puree. *LWT - Food Science and Technology*, 94, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.04.027>
- Chen, Q., Bi, J., Zhou, Y., Liu, X., Wu, X., & Chen, R. (2014). Multi-objective Optimization of Spray Drying of Jujube (*Zizyphus jujuba* Miller) Powder Using Response Surface Methodology. *Food and Bioprocess Technology*, 7(6), 1807–1818.



- <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1171-z>
- Cheng, Y., Lan, H., Zhao, L., Wang, K., & Hu, Z. (2018). Characterization and Prebiotic Potential of Longan Juice Obtained by Enzymatic Conversion of Constituent Sucrose into Fructo-Oligosaccharides. *Molecules*, 23(10), 2596. <https://doi.org/10.3390/molecules23102596>
- Cortés, M., Herrera, E. A., & Gil, J. (2016). Impregnación de uchuva Impregnación de uchuva (*Physalis peruviana* L.) de forma semiesférica con una emulsión fortificante. *Bioteología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 27–36.
- Dahdouh, L., Delalonde, M., Ricci, J., Ruiz, E., & Wisniewski, C. (2018). Influence of high shear rate on particles size, rheological behavior and fouling propensity of fruit juices during crossflow microfiltration: Case of orange juice. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 48(March), 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.006>
- Dahdouh, L., Wisniewski, C., Ricci, J., Vachoud, L., Dornier, M., & Delalonde, M. (2016). Rheological study of orange juices for a better knowledge of their suspended solids interactions at low and high concentration. *Journal of Food Engineering*, 174, 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.008>
- de Figueiredo, V., Yamashita, F., Vanzela, A., Ida, E., & Kurozawa, L. (2018). Action of multi-enzyme complex on protein extraction to obtain a protein concentrate from okara. *Journal of Food Science and Technology*, 55(4), 1508–1517. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3067-4>
- El Sheikha, A. F., Mohammed S, Z., Bakr, A. A., El Habashy, M. M., & Montet, D. (2010). Biochemical and sensory quality of physalis (*physalis pubescens* L.) juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 34(3), 541–555. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2009.00382.x>
- Elahi Jan, N., & Kawabata, S. (2011). Relationship between fruit soluble solid content and the sucrose concentration of the phloem sap at different leaf to fruit ratios in tomato. *J. Japan. Soc. Hort. Sci*, 80(3), 314–321. [www.jstage.jst.go.jp/browse/jjshs1JSHS](http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jjshs1JSHS)
- Fuente, F., Nocetti, D., Sacristán, C., Ruiz, P., Guerrero, J., Jorquera, G., Uribe, E., Bucarey, J. L., Espinosa, A., & Puente, L. (2020). *Physalis peruviana* L. Pulp prevents liver inflammation and insulin resistance in skeletal muscles of diet-induced obese mice. *Nutrients*, 12(3), 700. <https://doi.org/10.3390/nu12030700>
- Fustier, P., Taherian, A. R., & Ramaswamy, H. S. (2010). Emulsion delivery systems for functional foods. In J. Smith & E. Charter (Eds.), *Functional Food Product Development* (pp. 79–97). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781444323351.ch4>
- Gallón, M., Cortés, M., & Gil, J. (2020). Physicochemical stability of colloidal systems using the cape gooseberry, strawberry, and blackberry for spray drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(9), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14705>
- Genovese, D., & Lozano, J. (2006). Contribution of colloidal forces to the viscosity and stability of cloudy apple juice. *Food Hydrocolloids* 20, 20, 767–773. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.07.003>
- Gouvêa, R. F., Ribeiro, L. O., Souza, É. F., Penha, E. M., Matta, V. M., & Freitas, S. P. (2017). Effect of enzymatic treatment on the rheological behavior and vitamin C content

- of Spondias tuberosa (umbu) pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 54(7), 2176–2180. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2630-8>
- Handique, J., Bora, S., & Sit, N. (2019). Optimization of banana juice extraction using combination of enzymes. *Journal of Food Science and Technology*, 56(8), 3732–3743. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03845-z>
- Hennart, S., Wildeboer, W., van Hee, P., & Meesters, G. (2010). Stability of particle suspensions after fine grinding. *Powder Technology*, 199(3), 226–231. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.01.010>
- Horie, K., Tanaka, S., & Akabori, T. (1976). Determination of Emulsion Stability by Spectral Absorption; Part 1. *Journal of Society of Cosmetic Chemists of Japan*, 10(1–2), 28–33. <https://doi.org/10.5107/sccj1976.10.28>
- Hua, X., Xu, S., Wang, M., Chen, Y., Yang, H., & Yang, R. (2017). Effects of high-speed homogenization and high-pressure homogenization on structure of tomato residue fibers. *Food Chemistry*, 232, 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.003>
- Huang, X., Liu, Q., Yang, Y., & He, W. Q. (2020). Effect of high pressure homogenization on sugar beet pulp: Rheological and microstructural properties. *LWT*, 125, 109245. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109245>
- ICONTEC. (1999). Fresh fruits. Cape gooseberry. Specifications. In *Norma técnica colombiana* (p. 17). [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1271/81660\\_58968.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1271/81660_58968.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Igual, M., Contreras, C., Camacho, M. M., & Martínez-Navarrete, N. (2014). Effect of Thermal Treatment and Storage Conditions on the Physical and Sensory Properties of Grapefruit Juice. *Food and Bioprocess Technology*, 7(1), 191–203. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1088-6>
- Jeoh, T., Cardona, M. J., Karuna, N., Mudinoor, A. R., & Nill, J. (2017). Mechanistic kinetic models of enzymatic cellulose hydrolysis-A review. *Biotechnology and Bioengineering*, 114(7), 1369–1385. <https://doi.org/10.1002/bit.26277>
- Kaufman, V., & Garti, N. (1981). Spectral absorption measurements for determination of ease of formation and stability of oil in water emulsions. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 2(4), 475–490. <https://doi.org/10.1080/01932698108943925>
- Khazraji, A. C., & Robert, S. (2013). Interaction Effects between Cellulose and Water in Nanocrystalline and Amorphous Regions: A Novel Approach Using Molecular Modeling. *Journal of Nanomaterials*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/409676>
- Kitrytė, V., Kraujalienė, V., Šulniūtė, V., Pukalskas, A., & Venskutonis, P. R. (2017). Chokeberry pomace valorization into food ingredients by enzyme-assisted extraction: Process optimization and product characterization. *Food and Bioprocess Technology*, 105, 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.06.001>
- Koley, T. K., Walia, S., Nath, P., Awasthi, O. P., & Kaur, C. (2011). Nutraceutical composition of *Zizyphus mauritiana* Lamk (Indian ber ): effect of enzyme-assisted processing. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(3), 276–279. <https://doi.org/10.3109/09637486.2010.526930>
- Leite, T., Augusto, P., & Cristianini, M. (2015). Using High Pressure Homogenization (HPH) to Change the Physical Properties of Cashew Apple Juice. *Food Biophysics*, 10(2),

- 169–180. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9385-9>
- López-Esparza, R., Balderas, M., Pérez, E., & Goicochea, A. G. (2015). Importance of Molecular Interactions in Colloidal Dispersions. *Advances in Condensed Matter Physics*, 2015, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2015/683716>
- Lucas, J. C., Tobon, C., & Cortes, M. (2018). Influence of the Composition of Coconut-Based Emulsions on the Stability of the Colloidal System. *Advance Journal of Food Science and Technology*, 14(3), 77–92. <https://doi.org/10.19026/ajfst.14.5841>
- Machado, B., Costa, A., Oliveira, R., Barreto, G., Silva, R., & Umsza-Guez, M. (2016). Effect of applying pectinolytic enzymes in *Spondias tuberosa* Arr. Cam. Pulp. *Revista Virtual de Quimica*, 8(4), 1067–1078. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20160076>
- Maktouf, S., Neifar, M., Drira, S. J., Baklouti, S., Fendri, M., & Châabouni, S. E. (2014). Lemon juice clarification using fungal pectinolytic enzymes coupled to membrane ultrafiltration. *Food and Bioproducts Processing*, 92(1), 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.07.003>
- Marín, Z., Cortés, M., & Montoya, O. (2010). Capegooseberry (*Physalis peruviana* L.) Colombian ecotype, minimally processed inoculated with native strain *Lactobacillus plantarum* Ipbm10 by means of vacuum impregnation technique. *Revista Chilena de Nutrición*, 37(4), 461–472. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182010000400007>
- Matusiak, J., & Grządka, E. (2017). Stability of colloidal systems - a review of the stability measurements methods. *Annales Universitatis Mariae Curie-Skłodowska, Sectio AA – Chemia*, 72(1), 33. <https://doi.org/10.17951/aa.2017.72.1.33>
- Mendoza, H., Rodriguez, A., & Millán, P. (2012). Caracterización físico química de la uchuva (*Physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 10(2), 188–196.
- Mettler Toledo. (2014). Brix - Sugar determination by density and refractometry. In *Density and Refractometry*. [https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en\\_US/documents/programs/scientific/technical-documents/technical-bulletins/mettler-toledo-brix-sugar-determination-technical-bulletin.pdf](https://beta-static.fishersci.com/content/dam/fishersci/en_US/documents/programs/scientific/technical-documents/technical-bulletins/mettler-toledo-brix-sugar-determination-technical-bulletin.pdf)
- Mirhosseini, H., Tan, C. P., Hamid, N. S. A., & Yusof, S. (2008). Effect of Arabic gum, xanthan gum and orange oil contents on  $\zeta$ -potential, conductivity, stability, size index and pH of orange beverage emulsion. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 315(1–3), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2007.07.007>
- Moelants, K., Cardinaels, R., Jolie, R., Verrijssen, T., Van Buggenhout, S., Zumalacarregui, L., Van Loey, A., Moldenaers, P., & Hendrickx, M. (2013). Relation Between Particle Properties and Rheological Characteristics of Carrot-derived Suspensions. *Food and Bioprocess Technology*, 6(5), 1127–1143. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0718-0>
- Mokhtar, S. M., Swailam, H. M., & Embaby, H. E. S. (2018). Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. *Food Chemistry*, 248, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.117>
- Nocetti, D., Núñez, H., Puente, L., Espinosa, A., & Romero, F. (2020). Composition and biological effects of goldenberry byproducts: an overview. *Journal of the Science of*

- Food and Agriculture*, 100(12), 4335–4346. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10386>
- Novozymes. (2001). *Product Sheet Viscozyme® L Description*. [www.novozymes.com](http://www.novozymes.com)
- Olivares, M., Dekker, M., Verkerk, R., & van Boekel, M. (2016). Health-promoting compounds in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.): Review from a supply chain perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 57(Part A), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.009>
- Ozyurt, V. H., & Ötles, S. (2016). Effect of food processing on the physicochemical properties of dietary fibre. *Acta Scientiarum Polonorum, Technologia Alimentaria*, 15(3), 233–245. <https://doi.org/10.17306/J.AFS.2016.3.23>
- Phuong, N., & Tuan, Q. (2016). Application of hydrolytic enzymes for improvement of red dragon fruit juice processing. *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture Food and Energy (APJSAFE)*, 4(1), 1–4.
- Puente, L., Pinto, C., Castro, E., & Cortés, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International*, 44(7), 1733–1740. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Ramadan, M. (2011a). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Research International*, 44(7), 1830–1836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042>
- Ramadan, M. (2011b). *Physalis peruviana*: A rich source of bioactive phytochemicals for functional foods and pharmaceuticals. *Food Reviews International*, 27(3), 259–273. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563391>
- Ramadan, M. (2018). Enzymes in fruit juice processing. In M. Kuddus (Ed.), *Enzymes in Food Biotechnology: Production, Applications, and Future Prospects* (pp. 45–59). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00004-9>
- Ramadan, M., & Moersel, J. (2007). Impact of enzymatic treatment on chemical composition, physicochemical properties and radical scavenging activity of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(3), 452–460. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2728>
- Ramadan, M., & Morsel, J. (2003). Oil goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(4), 969–974. <https://doi.org/10.1021/jf020778z>
- Ramadan, M., Sitohy, M., & Moersel, J. (2008). Solvent and enzyme-aided aqueous extraction of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) pomace oil: Impact of processing on composition and quality of oil and meal. *European Food Research and Technology*, 226(6), 1445–1458. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0676-y>
- Ríos, E. V., Giraldo G, G. A., & Lucia Duque, A. C. (2007). Predicción de la Actividad de Agua en Frutas Tropicales. In *Revista de Investigaciones* (Issue 17).
- Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: a review. In *Bioresources and Bioprocessing* (Vol. 5, Issue 1, p. 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z>
- Silva, V. M., Sato, A. C. K., Barbosa, G., Dacanal, G., Ciro-Velásquez, H. J., & Cunha, R. L. (2010). The effect of homogenisation on the stability of pineapple pulp. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(10), 2127–2133. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02386.x>
- Sun, T., Powers, J. R., & Tang, J. (2007). Effect of Enzymatic Macerate Treatment on Rutin

- Content, Antioxidant Activity, Yield, and Physical Properties of Asparagus Juice. *Journal of Food Science*, 72(4), S267–S271. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00345.x>
- Tamnak, S., Mirhosseini, H., Tan, C. P., Ghazali, H. M., & Muhammad, K. (2016). Physicochemical properties, rheological behavior and morphology of pectin-pea protein isolate mixtures and conjugates in aqueous system and oil in water emulsion. *Food Hydrocolloids*, 56, 405–416. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.12.033>
- Uzuner, S., & Cekmecelioglu, D. (2018). Enzymes in the beverage industry. In M. Kuddus (Ed.), *Enzymes in Food Biotechnology: Production, Applications, and Future Prospects* (pp. 29–43). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813280-7.00003-7>
- Vijayanand, P., Kulkarni, S. G., & Prathibha, G. V. (2010). Effect of pectinase treatment and concentration of litchi juice on quality characteristics of litchi juice. *Journal of Food Science and Technology*, 47(2), 235–239. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0023-3>
- Vong, W. C., & Liu, S. Q. (2019). The effects of carbohydrase, probiotic *Lactobacillus paracasei* and yeast *Lindnera saturnus* on the composition of a novel okara (soybean residue) functional beverage. *LWT*, 100, 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.10.059>
- Wan, Y.-J., Xu, M.-M., Gilbert, R. G., Yin, J.-Y., Huang, X.-J., Xiong, T., & Xie, M.-Y. (2018). *Colloid chemistry approach to understand the storage stability of fermented carrot juice*. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.017>
- Wan, Y., Xu, M., Gilbert, R., Yin, J., Huang, X., Xiong, T., & Xie, M. (2019). Colloid chemistry approach to understand the storage stability of fermented carrot juice. *Food Hydrocolloids*, 89, 623–630. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.017>
- Wardy, W., Pujols, K., Xu, Z., No, H., & Prinyawiwatkul, W. (2014). Viscosity changes of chitosan solution affect physico-functional properties and consumer perception of coated eggs during storage. *LWT - Food Science and Technology*, 55(1), 67–73. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.07.013>
- Wellala, C. K. D., Bi, J., Liu, X., Liu, J., Lyu, J., Zhou, M., Marszałek, K., & Trych, U. (2020). Effect of high pressure homogenization combined with juice ratio on water-soluble pectin characteristics, functional properties and bioactive compounds in mixed juices. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 60, 102279. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102279>
- Yıldız, G., İzli, N., Ünal, H., & Uylaşer, V. (2015). Physical and chemical characteristics of goldenberry fruit (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 52(4), 2320–2327. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1280-3>
- Yu, Z., Jiang, S., Cao, X., Jiang, S., & Pan, L. (2016). Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical properties of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) pulp. *Journal of Food Engineering*, 177, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.042>
- Zhou, L., Guan, Y., Bi, J., Liu, X., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., & Zhou, M. (2017). Change of the rheological properties of mango juice by high pressure homogenization. *LWT - Food Science and Technology*, 82, 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.04.038>
- Zhu, D., Shen, Y., Wei, L., Xu, L., Cao, X., Liu, H., & Li, J. (2020). Effect of particle size on the stability and flavor of cloudy apple juice. *Food Chemistry*, 126967.

---

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126967>

## 5. INFLUENCIA DE LOS ENCAPSULANTES Y DEL PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN SOBRE LA CALIDAD DE MICROCÁPSULAS DE EXTRACTO DE UCHUVA

### 5.1 Resumen

La uchuva es una fruta con atributos nutricionales y sensoriales que imparten gran interés en el consumidor moderno, y cuyos patrones de consumo deben ser acordes a la diversificación de productos de uchuva con valor agregado que tiene que ofrecerse a los nuevos mercados. El objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de agentes encapsulantes y del proceso de secado por aspersión (SA) sobre la calidad de microcápsulas de extracto de uchuva (pulpa, semilla y cáscara) (ME<sub>U</sub>). Se utilizó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño experimental central compuesto cara centrada ( $\alpha=1$ ) (26 experimentos), teniendo en cuenta las variables dependientes: goma arábica [GA] (1 - 3 % p/p), maltodextrina [MD] (9.5 - 13.5 % p/p), temperatura de aire de entrada (TEA) (130 - 160°C), temperatura de aire de salida (TSA) (75 - 85°C) y velocidad del disco atomizador (VDA) (18000 - 22000 rpm), y las variables dependientes: humedad (X<sub>w</sub>), solubilidad (S), higroscopicidad (H), humectabilidad (Hu), coordenadas de color L\* y b\*, fenoles totales (TP), capacidad antioxidante (DPPH y ABTS) y rendimiento (Y). La optimización experimental de múltiples respuestas presentó una deseabilidad del 68.4%, definiendo las variables independientes: [GA] = 2.2%, [MD] = 10.1%, TEA = 160 °C, TSA = 77.8 °C y VDA = 21450 rpm, y las variables dependientes: X<sub>w</sub> = 2.7±0.1%, S = 86.2±2.3%, H = 16.2±0.0%, Hu = 4.0±0.13 s, L\* = 43.9±0.1, b\* = 35.7±0.9, TP = 284.2±1.8 mg AGE/100 g bs, DPPH = 99.8±2.5 mg TE/100 g bs, ABTS = 158.5±0.1 mg TE/100 g bs y Y = 56.1±1.6%. El uso integral de la matriz de uchuva, contribuye con los compromisos mundiales de economía circular; además, permite un mayor aprovechamiento del fruto y mayor viabilidad económica en su proceso de microencapsulación.

**Palabras claves:** *Physalis peruviana* L., microencapsulación, alimentos funcionales, antioxidantes y fenoles totales.

## Abstract

Cape gooseberry is a fruit with nutritional and sensory attributes that impart great interest to the modern consumer. Its consumption patterns must be consistent with the diversification of cape gooseberry products with added value, it has to offer to new markets. The objective of the research was to evaluate the influence of the encapsulating agents and the spray dry process (SA) on the quality of microcapsules of cape gooseberry extract (pulp, seed, and peel) (ME<sub>U</sub>). The response volume methodology was used, with a central composite face-centered experimental design (a=1) (26 experiments), taking into account the independent variables: gum arabic [GA] (1 - 3 % p/p), maltodextrin [MD] (9.5 – 13.5 % p/p), air inlet temperature (AIT) (130 - 160°C), air outlet temperature (AOT) (75 - 85°C) and atomizer disc speed (ADS) (18000 - 22000 rpm), and the dependent: moisture (X<sub>w</sub>), water activity (a<sub>w</sub>), solubility (S), hygroscopicity (H), wettability (We), color coordinates L\* and b\*, total phenols (TP), antioxidant capacity (DPPH y ABTS) and yield (Y). The experimental optimization responses presented a desirability of 68.0%, defining the independent variables: [GA] = 2.2%, [MD] = 10.1%, TEA = 160 °C, TSA = 77.8 °C y VDA = 21450 rpm, and the dependents variables: X<sub>w</sub> = 2.7±0.1%, S = 86.2±2.3%, H = 16.2±0.0%, We = 4.0±0.13 s, L\* = 43.9±0.1, b\* = 35.7±0.9, TP = 284.2±1.8 mg GAE/100 g db, DPPH = 99.8±2.5 mg TE/100 g db, ABTS = 158.5±0.1 mg TE/100 g db y Y = 56.1±1.6%. The integral use of the cape gooseberry matrix contributes to the global circular economy commitments; in addition, it allows better use of the fruit and greater economic viability in its microencapsulation process.

**Keywords:** *Physalis peruviana* L., microencapsulation, functional foods, antioxidants, and total phenols.

## Abreviaciones

Nombre	Abreviación	Nombre	Abreviación
Ácido Gálico Equivalente	AGE	Rendimiento	Y
Base seca	bs	Secado por aspersión	SA
Cromaticidad amarillo-azul	b*	Sistema coloidal a base de uchuva	SC <sub>U</sub>
Capacidad Antioxidante ABTS	ABTS	Sólidos totales uchuva	ST <sub>U</sub>
Capacidad Antioxidante DPPH	DPPH	Solubilidad	S
Fenoles Totales	FT	Temperatura de entrada del aire	TEA
Goma Arábiga	GA	Temperatura de salida del aire	TSA
Higroscopicidad	H	Temperatura de transición vítrea	Tg
Humectabilidad	Hu	Trolox equivalente	TE
Humedad	X <sub>w</sub>	Uchuva	U
Luminosidad	L*	Uchuva homogenizada	UH
Maltodextrina	MD	Velocidad del disco atomizador	VDA
Microcápsulas de extracto de uchuva	ME <sub>U</sub>		

## 5.2 Introducción

*Physalis peruviana* L., conocida como uchuva (U), es una fruta exótica fuente de gran variedad de compuestos activos con beneficios potenciales para la salud: provitamina A,



ácido ascórbico, vitaminas del complejo B (tiamina, niacina y vitamina B<sub>12</sub>), proteínas crudas, minerales (fósforo, sodio, potasio, hierro, entre otros) (Mokhtar et al., 2018; Puente et al., 2011); además, altamente valorada por su actividad antioxidante, contenido de fenoles y por sus propiedades sensoriales (sabor, olor y color) (Dag et al., 2017; Torres-Ossandón et al., 2018). En general, los procesos de transformación del fruto generan un 27,4% de residuos (semilla y cáscara principalmente) (Ramadan, 2011a), que contienen igualmente compuestos activos y macronutrientes que pueden contribuir con su valor nutricional y con la mejora de su rendimiento, favoreciendo el desarrollo de procesos sostenibles (Mokhtar et al., 2018). Diversas investigaciones han reportado el efecto de estos componentes activos sobre la salud (Fuente et al., 2020; Izli et al., 2014; Nocetti et al., 2020; Ramadan, 2011b).

Los procesos de microencapsulación han permitido la protección y conservación de los componentes activos frente a factores externos, siendo el secado por aspersión (SA) la tecnología más utilizada (Janiszewska, 2017; Samborska et al., 2021). Diversos autores han reportado la influencia de los encapsulantes en la alimentación (Araujo et al., 2020; Ferrari et al., 2012; Poonam Mishra et al., 2014) y de las condiciones del proceso: flujo y temperatura de alimentación, temperatura del aire de entrada (TEA), temperatura de aire de salida (TSA), flujo de aire de circulación/presión de la cámara de secado/tiempo de residencia, tipo de atomizador (boquilla o disco principalmente), velocidad del disco atomizador (VDA)/presión de boquilla, entre otros (Muzaffar & Kumar, 2015; Phisut, 2012; Ramakrishnan et al., 2018; Santhalakshmy et al., 2015; Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017)(Muzaffar & Kumar, 2015; Phisut, 2012; Shishir & Chen, 2017; Tontul & Topuz, 2017) , sobre la calidad de las microcápsulas obtenidas.

La aplicación del SA en la microencapsulación de compuestos activos en extractos de frutas y vegetales han sido reportados por diversos autores: vitamina C, fenoles totales (FT) y flavonoides totales en microcápsulas de lulo (Igual et al., 2014); FT y antocianinas en microcápsulas de mora (Rigon & Zapata, 2016); betalaina en microcápsulas de remolacha (Bazaria & Kumar, 2018); carotenoides en microcápsulas de uchuva (Etzbach et al., 2020); FT, flavonoide totales y ácidos orgánicos en microcápsulas de zapote (Araujo et al., 2020). Adicionalmente, otras investigaciones reportan la microencapsulación directa de los compuestos activos: ácidos grasos de aceites de semillas de mora (Figueroa et al., 2016); carotenoides de cáscaras de mango, banano y tomate de árbol (García et al., 2018); FT de cáscara de piña (Lourenço et al., 2020), entre otros.

Por otro lado, la calidad de las microcápsulas de extractos secos de frutas poseen importantes contenidos de azúcares y ácidos de bajo peso molecular (fructosa, glucosa, sacarosa, ácido cítrico, málico y tartárico), los cuales tienen bajas temperaturas de transición vítrea ( $T_g$ ), lo que promueve alta movilidad molecular de las partículas, generando estados amorfos gomosos, que favorece su cohesividad o pegajosidad (Fazaeli et al., 2012; Sobulska & Zbicinski, 2020; Verma & Singh, 2015). El uso de aditivos de secado o microencapsulantes de alto peso molecular: maltodextrina (MD), goma arábica (GA), almidones, ciclodextrinas, gomas (xantana, guar), aislados de proteínas, entre otros (Ozkan

et al., 2019), contribuye a mejorar la calidad general de las microcápsulas obtenidas (Muzaffar et al., 2015). La MD y la GA han sido ampliamente utilizados debido a su alta solubilidad (S), baja viscosidad ( $\mu$ ), alta  $T_g$  y buenas propiedades de formación de película. (Sobulska & Zbicinski, 2020; Tontul & Topuz, 2017). Bajo este contexto, el objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de los encapsulantes MD y GA, y del proceso de secado por aspersión (SA) sobre la calidad de microcápsulas de extracto de uchuva (ME<sub>U</sub>).

## 5.3 Materiales y métodos

### 5.3.1 Materias primas

Los frutos de uchuva ecotipo Colombia fueron cosechados en el Oriente del departamento de Antioquia, con un estado de madurez de 4 (naranja claro), 5 (naranja) y 6 (naranja intenso), según la NTC 4580 (ICONTEC, 1999). Por otro lado, se utilizaron goma arábica (GA) (767 Master Gum FT powder, TIC) y maltodextrina (MD) equivalente de dextrosa entre 18 - 20. (Ingredion MOR-REX 1720), como agentes encapsulantes.

### 5.3.2 Preparación de la alimentación al SA

Los frutos de uchuva sin capacho (pulpa, semillas y piel) fueron desinfectados por inmersión en una solución de 1400 ppm de Citrosan® (0.25% v/v) (Diken International, México) durante 10 minutos, luego se desintegraron en un homogenizador manual Sammic TR-350. Posteriormente 60 kg la pulpa de uchuva se homogenizaron (U<sub>H</sub>) en un molino coloidal JMF 80A (Wenzhou Qiangzhong Machinery Technology Co, Ltd.) a 2900 rpm durante 3 minutos. Esta se almacenó en bolsa de polietileno (2 kg), almacenadas a - 18 °C, y se utilizaron para la preparación de cada una de las suspensiones de alimentación al SA, según el diseño experimental planteado. La alimentación al SA (2 kg) fue un sistema coloidal a base de uchuva (SC<sub>U</sub>) que se preparó en un homogeneizador Silverson L5M-A a 10,000 rpm durante 10 minutos, adicionando inicialmente la U<sub>H</sub> y luego la mezcla de GA y MD en forma lenta, para evitar formación de grumos.

### 5.3.3 Proceso de microencapsulación

Se utilizó un SA piloto automatizado, modelo PASALAB 1.5 (Vibrasec S.A.), de disco atomizador con flujo de aire en modo co-corriente, operando a una presión de vacío de 1.5" agua. Se utilizó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño experimental central compuesto cara centrada ( $\alpha = 1$ ) (26 experimentos), considerando las variables independientes: GA (1 - 3 % p/p), MD (9.5 - 13.5% p/p), TEA (130 - 160°C), TSA (75 - 85 °C) y VDA (18000 - 22000 rpm), y las variables dependientes: humedad (X<sub>w</sub>), Solubilidad (S), higroscopicidad (H), humectabilidad (H<sub>u</sub>), color: luminosidad (L\*) y cromaticidad amarillo-azul (b\*), FT, capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS) y rendimiento del proceso (Y). Los niveles de GA y MD en las formulaciones del diseño experimental fueron

definidos teniendo en cuenta que, la relación entre los sólidos totales (ST) aportados por la U y los aportados por la mezcla MD+GA ( $ST_U/ST_{GA+MD} > 1$ ).

### 5.3.4 Caracterización de las microcápsulas de uchuva

La Xw se determinó por el método 934.06 (AOAC. 2012). La S se determinó según la metodología de Estrada et al., (2017) modificado, dispersando 0.5 g de polvo en 50 mL de agua destilada. La H (g H<sub>2</sub>O/100 g muestra) se determinó por el método gravimétrico de isotermas de sorción, considerando un ambiente controlado a 25°C y humedad relativa del 68.9% (solución sobresaturada de KI) (Estrada et al., 2017; Santhalakshmy et al., 2015). La Hu se determinó como el tiempo requerido para que 1 g de muestra penetre totalmente la superficie de un volumen de 100 mL de agua a 25 °C (Santhalakshmy et al., 2015). El color se determinó a partir de las coordenadas CIE-L\*a\*b\*, utilizando un colorímetro CR-400 (Konica Minolta, USA), iluminante D65, componente especular incluido, observador 2°, software SpectraMagic NX. Para la determinación de los FT y la actividad antioxidante, inicialmente se realizó una extracción metanólica sobre 1 g de ME<sub>U</sub>, de acuerdo a la metodología descrita por Gallón Bedoya et al. (2020); posteriormente, la cuantificación de los FT se realizó por el método colorimétrico Folin-Ciocalteu (de los Rios et al., 2021) y la actividad antioxidante (métodos DPPH y ABTS) según la metodología descrita por Gallón Bedoya et al. (2020). Para los FT, se construyó una curva de calibración con ácido gálico equivalente (AGE) entre 0 a 300 µg AGE/mL ( $R^2 = 0.989$ ), expresándose como mg AGE /100 g ME<sub>U</sub> bs. Las curvas de calibración del Trolox equivalente (TE) para DPPH y ABTS se construyeron entre 0.02 – 0.12 mg/mL ( $R^2= 0.997$ ) para el DPPH y entre 50 a 250 µM ( $R^2= 0.998$ ) para el ABTS, expresándose sus valores como mg TE/100 g ME<sub>U</sub> bs. Finalmente, el Y del proceso se determinó como la relación entre los ST del ME<sub>U</sub> y los ST del SC<sub>U</sub> (Muzaffar & Kumar, 2015).

### 5.3.5 Análisis estadístico y optimización experimental

La significancia de los factores fue determinada mediante análisis de varianza ANOVA ( $p < 0.05$ ), utilizando el software Statgraphics Centurion XVII®. Las variables dependientes fueron modelizadas utilizando un modelo polinómico de 2° orden (Ecuación 5-1), donde: Y es la variable dependiente, B<sub>0</sub>, B<sub>i</sub>, B<sub>ii</sub>, B<sub>ij</sub> son los coeficientes de regresión, x<sub>i</sub> y x<sub>j</sub> indican el efecto lineal, x<sub>i</sub><sup>2</sup> el efecto cuadrático, y x<sub>ij</sub> se refiere al efecto interactivo entre dos variables independientes. El ajuste de los modelos matemáticos se determinó utilizando el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>).

$$Y = B_0 + \sum_{i=1}^n B_i x_i + \sum_{i=1}^n B_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n B_{ij} x_{ij} \quad (\text{Ecuación 5-1})$$

Por otro lado, se realizó una optimización experimental de múltiples respuestas, teniendo en cuenta los resultados del ANOVA y fijando criterios, pesos e impactos en las variables dependientes que favorezcan la calidad del ME<sub>U</sub>. La validación de los modelos se realizó a partir del error medio relativo (EMR) (Ecuación 5-2), comparando los valores de la variable dependiente predicha y la experimental a la condición óptima.

$$EMR = \left| \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right| \times 100 \quad (\text{Ecuación 5-2})$$

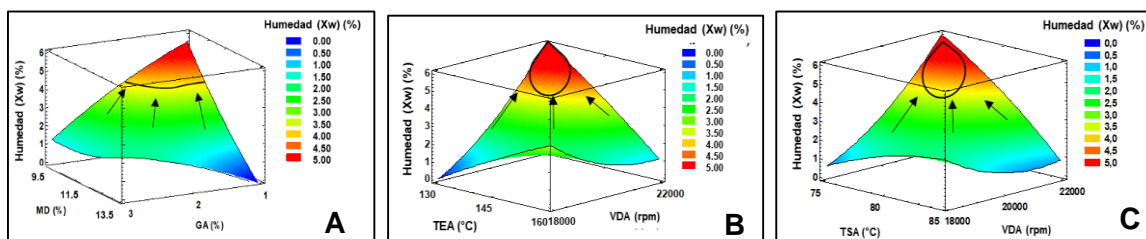
## 5.4 Resultados y discusión

La tabla 5-1 presenta los valores medios y desviaciones estándar de las variables dependientes en el proceso de microencapsulación del extracto seco de U. La Figura 5-1, 5-2, 5-3, 5-4 y 5-5 presenta los gráficos de volúmenes de respuesta de las variables dependientes de ME<sub>U</sub>. Los valores p correspondientes al análisis de varianza (ANOVA), se presenta en la tabla 2.

**Humedad.** Los valores medios de la X<sub>w</sub> fluctuaron entre 1.1 - 4.0%, condición que identifica las ME<sub>U</sub> como un producto seco de baja actividad de agua, estable microbiológicamente, lo cual favorece su vida útil (Zhang et al., 2020; Tontul & Topuz, 2017; Vidović et al., 2014). Por otro lado, se presenta una estabilidad frente a algunas reacciones de deterioro debido a la baja movilidad molecular del agua; sin embargo, podrían presentarse reacciones oxidativas (de Souza et al. 2020).

Las variables independientes MD, VDA, y las interacciones GA-MD, TEA - VDA, TSA - VDA y VDA - VDA, tuvieron efecto significativo sobre la X<sub>w</sub> (p < 0.05); por lo que, las condiciones puntuales impuestas en el proceso y formulación generan cambios en su respuesta. La figura 5-1 presenta el comportamiento de la X<sub>w</sub> en función de las variables independientes.

**Figura 5-1:** Gráficos de superficie de respuesta de X<sub>w</sub> de las ME<sub>U</sub>.



**Tabla 5-1:** Resultados de las variables dependientes del proceso de SA de ME<sub>U</sub> según diseño experimental.

Experimento	Variables independientes					Variables dependientes									
	GA (%)	MD (%)	TEA (°C)	TSA (°C)	VDA (rpm)	Xw (%)	S (%)	H (%)	Hu (s/g)	L*	b*	FT (mg AGE /100 g bs)	DPPH (mg TE/100 g bs)	ABTS (mg TE/100 g bs)	Y (%)
1	2	11.5	145	80	18000	2.0±0.1	86.1±2.5	16.9±0.0	2.6±0.1	48.3±1.7	33.2±1	285.1±1.8	42.0±1.0	105.8±5.2	52.5
2	1	13.5	160	75	22000	2.2±0.1	87.1±0.2	16.9±0.1	1.7±0.0	42.5±1.9	30.9±0.4	265.5±4.0	33.7±1.0	82.7±1.3	67.5
3	3	9.5	130	85	22000	2.5±0.1	85.7±3.4	16.2±0.1	2.1±0.1	51.7±0.3	33±0.2	215.7±3.5	28.5±0.9	79.9±1.0	37.3
4	2	11.5	145	85	20000	1.3±0.1	87.6±3.0	17.5±0.7	2.5±0.1	46.7±1	32.8±0.9	283.2±3.0	57.4±0.7	121.0±4.0	50.7
5	2	11.5	145	80	22000	4.0±0.1	89.1±1.0	15.5±0.5	2.1±0.1	51.8±1.4	37±0.4	276.3±2.2	97.2±3.3	103.2±6.1	29.3
6	2	11.5	130	80	20000	2.7±0.1	93.0±2.5	20.9±0.4	2.8±0.0	53.6±1.5	30.4±0.5	285.5±3.0	84.7±3.6	111.0±4.4	39.5
7	2	11.5	145	80	20000	1.6±0.0	95.0±0.7	16.8±0.2	1.8±0.1	49.7±2	36.3±0.9	322.1±1.2	47.1±1.9	162.0±6.5	70.2
8	1	13.5	130	85	22000	1.2±0.0	80.7±2.0	16.4±0.2	1.9±0.1	55±1.3	38.1±0.7	277.3±3.0	15.1±0.7	136.2±4.7	55.4
9	1	13.5	160	85	18000	1.8±0.1	89.5±0.5	15.8±0.1	3.7±0.1	56.1±1.6	40.9±0.8	247.1±3.5	34.8±1.2	97.3±3.2	51.0
10	2	11.5	145	80	20000	1.1±0.0	87.1±0.6	16.9±0.2	3.2±0.1	54.5±1.7	37.3±0.5	273.7±8.0	31.5±1.0	164.2±4.8	68.0
11	2	9.5	145	80	20000	4.0±0.1	63.6±2.9	14.7±0.0	2.8±0.1	53.2±1.1	38.5±0.8	270.9±4.5	70.5±3.6	159.5±7.8	50.6
12	3	9.5	160	85	18000	2.2±0.1	89.8±1.0	16.5±0.1	2.2±0.1	54.3±1.7	37.6±1.5	279.6±5.0	64.0±1.2	160.2±8.1	51.2
13	3	9.5	160	75	22000	1.8±0.0	87.6±2.5	16.8±0.8	7.9±0.4	41.4±0.3	38.5±0.8	270.8±2.5	110.5±2.5	164.6±2.7	73.5
14	3	13.5	130	85	18000	1.8±0.1	89.0±3.0	16.5±0.3	3.4±0.1	37.7±0.8	30.2±0	283.8±1.0	99.8±2.5	148.8±3.7	43.7
15	2	13.5	145	80	20000	1.5±0.0	85.8±1.5	16.0±0.6	6.8±0.3	46.8±0.8	29.8±0.8	247.3±2.5	67.7±3.3	101.0±4.0	61.5
16	3	11.5	145	80	20000	1.6±0.0	85.7±2.2	16.0±0.0	3.5±0.2	47.5±1.4	33.1±1.1	246.1±1.0	56.3±2.7	92.6±3.0	58.0
17	2	11.5	160	80	20000	1.8±0.1	80.0±3.8	15.8±0.0	1.7±0.1	43.7±1.1	31.3±0.5	290.3±5.3	71.8±2.5	122.7±5.5	70.4
18	2	11.5	145	75	20000	2.7±0.1	88.7±0.8	15.4±0.1	1.9±0.1	48.5±0.6	32.1±0.3	238.5±2.0	58.7±1.7	99.8±4.8	62.7
19	2	11.5	145	80	20000	2.0±0.0	86.1±4.2	16.7±0.1	2.5±0.1	47.9±0.7	32.6±0.4	263.2±2.4	68.4±0.4	106.2±0.8	68.7
20	3	13.5	130	75	22000	2.2±0.0	88.3±0.6	15.7±0.2	2.2±0.1	51.6±1.2	33.3±0.4	231±3.0	56.3±2.3	93.0±2.6	68.3
21	1	11.5	145	80	20000	2.5±0.1	88.8±1.4	16.1±0.1	1.4±0.0	48.6±1.3	33.6±0.6	251.1±0.6	60.4±1.8	91.2±3.2	75.4
22	3	13.5	160	75	18000	2.8±0.0	92.6±0.6	14.7±0.2	4.1±0.2	50.0±0.4	32.8±0.8	215.8±2.0	50.0±2.0	54.4±2.1	55.6
23	2	11.5	145	80	20000	2.3±0.1	89.5±2.8	16.7±0.1	1.5±0.1	50.1±0.8	34.5±0.2	242.9±4.6	53.4±2.2	97.7±2.7	65.8
24	1	9.5	160	85	22000	1.7±0.1	85.1±0.5	17.5±0.2	7.0±0.3	52.4±1.5	37.9±0.5	301.7±2.1	50.6±1.4	60.4±2.7	49.5
25	1	9.5	130	75	18000	1.5±0.0	84.6±2.6	17.2±0.8	3.8±0.1	54.4±0.9	38.5±0.7	353.4±1.7	86.2±0.0	115.7±5.9	44.1
26	2	11.5	145	80	20000	1.9±0.0	86.9±2.2	16.5±0.0	1.2±0.1	47.9±0.7	33.4±0.1	209.4±4.0	60.1±2.0	101.7±3.8	73.1

**Tabla 5-2:** Valores de p para el modelo de superficie de respuesta de SA de ME<sub>U</sub>

Fuente	Xw	S	H	Hu	L*	b*	TF	DPPH	ABTS	Y
GA	0.3258	0.7266	0.8134	0.1146	0.7519	0.8421	0.9165	0.8890	0.9745	0.5836
MD	0.0308*	0.0206*	0.0050*	0.0138*	0.1315	0.0263*	0.6219	0.9250	0.2354	0.7276
TEA	0.3506	0.1066	0.0000*	0.3690	0.0438*	0.7548	0.9181	0.6612	0.7980	0.3444
TSA	0.0973	0.9615	0.0006*	0.6886	0.7705	0.5883	0.3348	0.7934	0.5556	0.6910
VDA	0.0428*	0.5664	0.0046*	0.8650	0.2417	0.1354	0.6341	0.1309	0.9513	0.1323
GA-GA	0.4511	0.3923	0.0053*	0.8424	0.8699	0.6224	0.4173	0.4344	0.2977	0.4467
MD-MD	0.3842	0.0200*	0.0002*	0.0058*	0.3375	0.2869	0.7263	0.9954	0.4666	0.9764
TEA - TEA	0.7374	0.5939	0.0000*	0.5811	0.8424	0.1686	0.3460	0.4959	0.9181	0.9630
TSA - TSA	0.2601	0.3110	0.1769	0.4905	0.6580	0.8187	0.7863	0.4244	0.8332	0.9380
VDA - VDA	0.1006	0.3968	0.0058	0.3100	0.3568	0.1074	0.9908	0.5953	0.5093	0.2566
GA-MD	0.0252*	0.2358	0.0000*	0.0202*	0.5182	0.4236	0.7920	0.4871	0.9799	0.6434
GA- TEA	0.7431	0.0529	0.0003*	0.0096*	0.2920	0.1832	0.6585	0.6952	0.3783	0.7989
GA - TSA	0.9094	0.3318	0.0014*	0.5384	0.0648	0.2022	0.6238	0.1779	0.7466	0.9489
GA - VDA	0.5011	0.6966	0.0061*	0.1311	0.1911	0.6086	0.7239	0.7682	0.5131	0.5995
MD- TEA	0.5709	0.5501	0.0021*	0.0906	0.0928	0.6962	0.6568	0.5942	0.3177	0.4608
MD - TSA	0.5158	0.0433*	0.0001*	0.1360	0.6955	0.0418*	0.2844	0.4533	0.1840	0.5353
MD - VDA	0.8793	0.0786	0.0013*	0.0115*	0.5699	0.1571	0.4464	0.6895	0.2923	0.8242
TEA - TSA	0.5660	0.0524	0.0001*	0.0083*	0.0750	0.4745	0.4481	0.3045	0.5583	0.2629
TEA - VDA	0.0224*	0.2572	0.0000*	0.0084*	0.1555	0.2979	0.3403	0.9195	0.9045	0.8012
TSA - VDA	0.0118*	0.5495	0.2448	0.0653	0.1337	0.1608	0.8663	0.1662	0.4776	0.3750

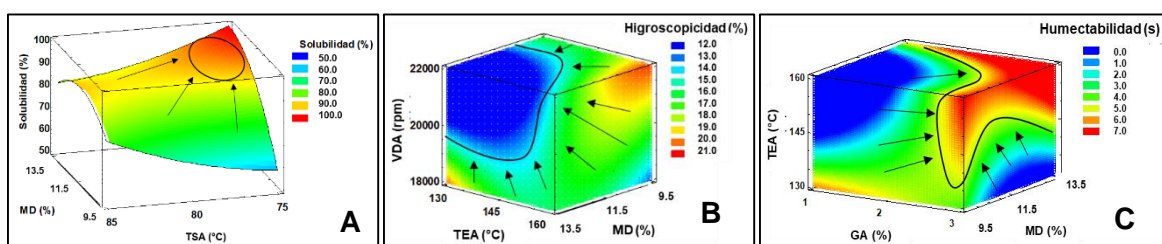
\*Significancia estadística ( $p < 0.05$ )

Se observa una tendencia de incremento de la Xw por la disminución de la MD (a bajos niveles de GA) (Figura 5-1A) y por el incremento de la VDA (a bajas TEA y TSA) (Figura 5-1B y 1C, respectivamente); además, este incremento de la Xw se potencia debido a las interacciones GA-MD, TEA - VDA, TSA - VDA (zonas rojas). Esta situación, podría estar relacionada desde la formulación debido al menor contenido de ST en la alimentación (< MD y < GA) (Braga et al., 2020); por otro lado, a pesar que el incremento de la VDA produce menores tamaños de gota, las bajas TEA y TSA contribuyen a una menor fuerza motriz a la evaporación del agua (Moghaddam et al., 2017; Muzaffar & Kumar, 2015), y por ello se observa un aumento de la Xw. Valores similares han sido reportados en polvos microencapsulados de guayaba (2.15-3.87%) (Patil et al., 2014) y en tamarindo (2.46-3,61%) (Muzaffar & Kumar, 2015).

**Solubilidad.** La S representa un criterio general para determinar la calidad de reconstitución en agua de los polvos (Jafari et al., 2017). Los valores medios de S fluctuaron entre 63.6 - 93.0%, los cuales fueron similares a los reportados en guayaba (85.9 - 95.4%) (Patil et al., 2014) y en espinillo amarillo o espinillo falso (75.1 - 92.8%) (Selvamuthukumaran & Khanum, 2014). En U, se han reportado mayores valores (96.7 - 98.06%), debido al uso de mayores contenidos de MD (10 - 40%) en la alimentación al SA; además de previa filtración en malla 500  $\mu\text{m}$  (Cortés, Hernández, & Estrada, 2017). Sin embargo, se resalta que, en la presente investigación, los aportes de insolubles proveniente de la semilla y piel fueron del 100% y esto contribuyó a disminuir la S de las ME<sub>U</sub>.

El ANOVA reflejó diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) de S con respecto a MD y a las interacciones MD- TSA y MD<sup>2</sup>. El gráfico de volumen de respuesta de S (Figura 5-2A), muestra que esta incrementa con el aumento de la MD (11.5 - 13.5%), potenciándose con la disminución de la TSA (77 - 75°C) (zona roja). El efecto de la MD se atribuye a su naturaleza amorfa, no cristalina y a su carácter hidrofílico (polar), que favorece la afinidad de las ME<sub>U</sub> con las moléculas de agua durante la agitación (Etzbach et al., 2020; Moghaddam et al., 2017; Santhalakshmy et al., 2015). Se resalta que, los ST aportados por la MD en las ME<sub>U</sub> se encuentra entre 31 y 44%, lo que favorece la S y además proporciona una protección frente a procesos oxidativos (Cortés, Hernández, & Estrada, 2017). Algunos autores reportan situaciones similares en: morera negra (Fazaeli et al., 2012), uchuva (Etzbach et al., 2020) y cereza ácida (Garofulic et al., 2016).

**Figura 5-2:** Gráficos de superficie de respuesta y de volumen de S, H y Hu de las ME<sub>U</sub>.



**Higroscopicidad.** La H es la capacidad de las microcápsulas para absorber agua del aire circundante e influye sobre otras propiedades como la cohesividad, apelmazamiento, pegajosidad y en general sobre la fluidez del producto (Daza et al., 2016); además, disminuye su Tg afectando la estabilidad de otras propiedades durante el almacenamiento (Bhusari et al., 2014; Garofulic et al., 2016; Nishad et al., 2017). Los valores medios de H se encontraron entre 14.7 - 20.9 %, identificando a las ME<sub>U</sub> como ligeramente y moderadamente higroscópicas (Juarez et al., 2017), lo que condiciona al producto a ser empacado con un material de baja permeabilidad al vapor de agua (Estrada et al., 2017). Algunos autores han reportado para polvo de uchuva valores similares: 12.8 - 18.2% (Cortés et al., 2017) y 14.1 - 17.2% (Etzbach et al., 2020); y de igual forma, en otros polvos de frutas microencapsuladas: caña de azúcar (6.2 - 17.2 %) (Largo et al., 2015), umbu (13.6 - 22.9%) (de Souza et al., 2020), cagaita (13.8 - 19.4%) (Daza et al., 2016).

La H está afectada estadísticamente ( $p < 0.05$ ) por la mayoría de factores evaluados (MD, TEA, TSA, VDA) y por sus interacciones, excepto por GA y TSA - VDA. El gráfico de volumen de respuesta (Figura 5-2B), ilustra la región de menor H (zona azul) cuando el sistema opera a bajas TEA (130 - 145 °C), donde las ME<sub>U</sub> presentan mayor X<sub>w</sub> (> a<sub>w</sub>) y menor fuerza motriz a la adsorción de agua en el aire controlado para la determinación de H (a<sub>w</sub> = 0.689). Una elevada TEA genera mayor tasa de evaporación del agua, lo que produce una rápida formación de partículas, debido a una mayor fuerza impulsora, esto forma una estructura vítrea más poroso y con mayor área superficial, lo que favorece una mayor adsorción de agua. Este comportamiento ha sido reportado en polvo de cereza agria

(Moghaddam et al., 2017), polvo de tamarindo (Muzaffar & Kumar, 2015) y polvo de remolacha (Bazaria & Kumar, 2018).

Por otro lado, el incremento de la MD generó unas ME<sub>U</sub> menos higroscópicas, similar a lo reportado en polvo de cereza agria (Moghaddam et al., 2017). Sin embargo, este comportamiento fue contrario a lo esperado, debido a que un mayor contenido de MD (> ST en la alimentación) favorece unas ME<sub>U</sub> con menor X<sub>w</sub> y mayor fuerza motriz a la adsorción de agua; además, este fenómeno se potencia debido a que la MD y otros componentes nativos (GA, azúcares y ácidos) poseen grupos hidrófilos (Etzbach et al., 2020; Ferrari et al., 2013). Un efecto similar a la MD ocurrió con la influencia de las altas VDA (20000 – 22000 rpm), donde la mayor área superficial no reflejó una mayor adsorción de agua en las ME<sub>U</sub>. Bajo este contexto, las ME<sub>U</sub> podrían estar presentando en la superficie una película estructural compleja entre MD y GA que inhibe la adsorción de agua a través de los puentes de H<sub>2</sub> y los grupos polares.

**Humectabilidad.** Los valores medios de Hu de las ME<sub>U</sub> fluctuaron entre 1.2 - 7.9 s, lo cual infiere una buena difusión del agua hacia el interior de la estructura y por lo tanto, una buena interacción molecular de los segmentos poliméricos de la interfase de las ME<sub>U</sub> (grupos funcionales de carácter polar) con el agua (Neikov, 2019); además, a la presencia de material insoluble proveniente de la semilla, que favorece una mayor absorción. La Hu no se consideró una variable crítica, además presentó poca variabilidad; por lo que ME<sub>U</sub>, tiene excelentes propiedades de reconstitución dado los bajos tiempo de incorporación del agua al interior de la estructura por acción de las fuerzas capilares (Santhalakshmy et al., 2015; Schuck, 2011). Sin embargo, el ANOVA mostró una alta sensibilidad al proceso y a la formulación, presentando diferencias estadísticas ( $p < 0.05$ ) con respecto a MD y a las interacciones MD-MD, GA-MD, GA- TEA, MD- VDA, TEA - TSA y TEA - VDA. Esta situación compromete a la Hu a las condiciones puntuales impuestas en el proceso y a la formulación. Una optimización individual que minimice Hu reportó las siguientes condiciones: MD = 10.1%, GA = 2.0%, TEA = 149.5°C, TSA = 81.1°C y VDA = 19815 rpm.

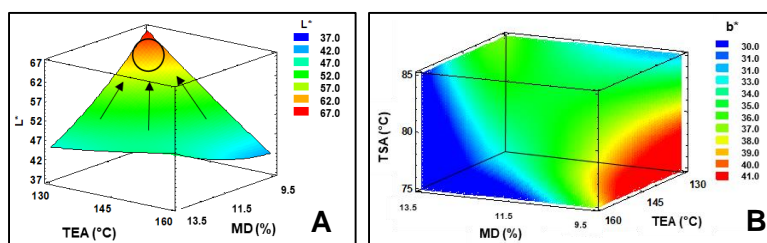
En polvo de jussara se reportan valores medios de 41 a 91 s, atribuido al tipo de encapsulante utilizado, siendo menor su valor con la mezcla MD-AG (50:50) (Quirino et al., 2016). Valores superiores se han reportado en polvo de naranja (277.3 – 305.0 s) (Sathyashree et al., 2018), atribuyendo esta situación al incremento de MD y al efecto de mayores TEA, lo que genera reducción del contenido de humedad residual del producto y también a la formación de una capa de superficie dura sobre la partícula de polvo a altas TEA, que podría evitar que las moléculas de agua se difundan a través de la partícula. En este estudio se presentó un comportamiento similar, que se evidencia en el gráfico de volumen de respuesta (Figura 5-2C). Por otro lado, Braga et al. (2020), reportaron valores en el intervalo 4.35 - 13.56 min para polvo de piña y menta, atribuyendo menores valores a menores concentraciones de MD.

**Color.** Los parámetros de mayor relevancia para las ME<sub>U</sub> fueron la luminosidad (L\*) (claro/oscura) y la cromaticidad b\* (amarillo/azul), cuyos valores medios fluctuaron entre



(37.7 - 56.1) y (29.8 - 40.9) respectivamente; mientras que, la variabilidad de la cromaticidad  $a^*$  (rojo/verde) fue  $< 5$ , lo cual no lo hace perceptible al ojo humano (Wu & Sun, 2013). La TEA ejerció efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre  $L^*$ ; mientras que, la MD y la interacción lineal MD - TSA, afectó la cromaticidad  $b^*$ . La Figura 5-3 ilustra los gráficos de superficie de respuesta para  $L^*$  y  $b^*$  en función de las variables independientes. Se observan los mayores valores de  $L^*$  ( $>$  claridad) con la disminución de la TEA (130 - 140 °C), TSA (75 - 77°C) y específicamente cuando el nivel de protección de la MD es bajo (9.5 - 10.5%) (zona de color rojo) (Figura 5-3A). Por otro lado, la cromaticidad  $b^*$  fue más favorable ( $>$   $b^*$ ) a bajos niveles de MD (9.5%) y con la interacción positiva MD-TSA (cuando ambas disminuyen) (Figura 5-3B). Los bajos valores de  $b^*$ , están representados principalmente por la degradación de los carotenoides presentes, responsables del color amarillo de la U, y susceptibles a la oxidación por efecto térmico de su estructura altamente insaturada (Puente et al., 2020; Puente et al., 2011).

**Figura 5-3:** Gráficos de superficie y de volumen de respuesta de  $L^*$  y  $b^*$  de las ME<sub>U</sub>.

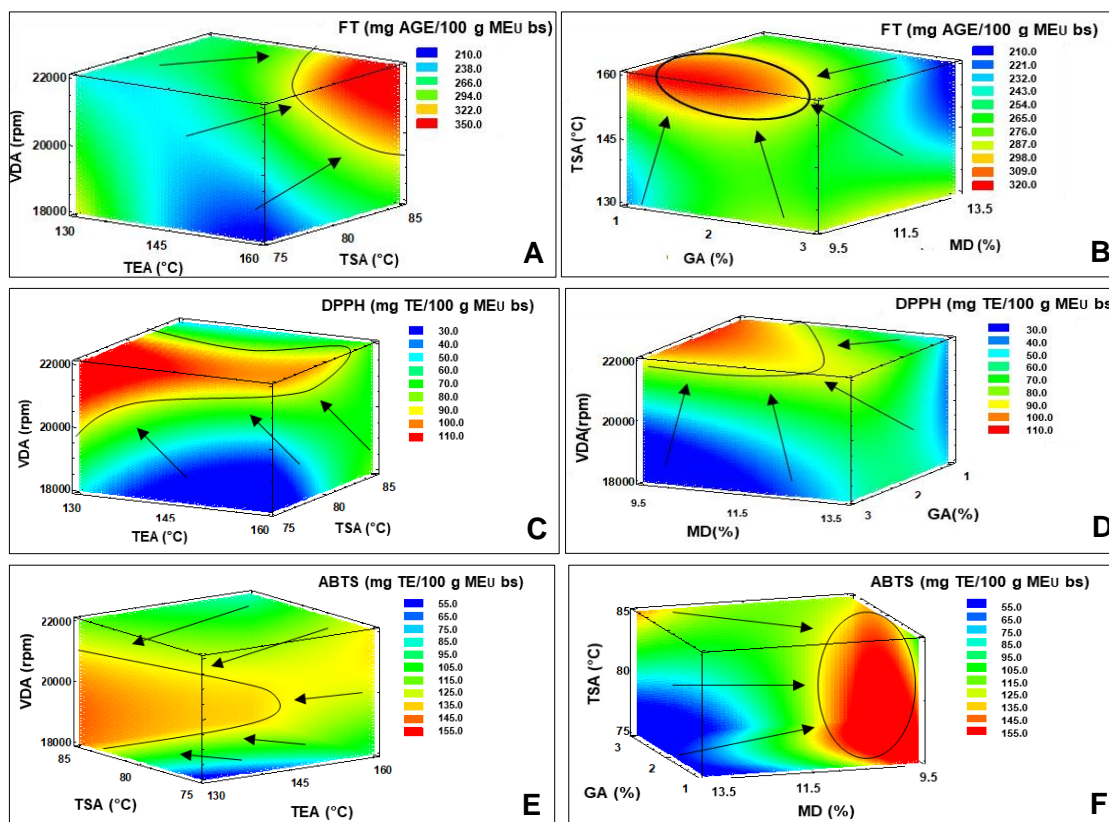


Se considera que, en el SA del ME<sub>U</sub> se presentan reacciones químicas de pardeamiento no enzimático a las altas temperaturas de proceso (TEA y TSA) (Bhusari et al., 2014; Krishnaiah et al., 2014; Zotarelli et al., 2017), como consecuencia de la presencia de azúcares reductores (glucosa y fructosa) y aminoácidos (leucina, lisina, isoleucina, entre otros) presentes (Puente et al., 2011). Por otro lado, podría estar presentándose igualmente reacciones de pardeamiento enzimático, debido a la presencia de componentes fenólicos y la enzima polifenoloxidasas presentes en las vacuolas y en la pared celular, las cuales son liberadas durante la homogenización del SC<sub>U</sub> (Bravo & Osorio, 2016; Ordóñez-Santos et al., 2017). Estas reacciones se potencian con el incremento de las temperaturas de proceso, disminuyendo los valores de  $L^*$  en ME<sub>U</sub>; sin embargo, en la medida que los niveles de MD fueron mayores, se destaca el efecto protector de esta sobre las reacciones de pardeamiento y una menor saturación del tono amarillo. Puente et al. (2020), afirman que, cuanto mayor es el grado de pardeamiento, menor es el valor de la coordenada  $L^*$  y  $b^*$ . Comportamiento similar se presentó para polvo de sandía, donde el incremento de TEA disminuyó  $L^*$  y además se presentaron reducciones en el contenido de licopeno y carotenoides, probablemente debido a la degradación térmica y la oxidación (Quek et al., 2007).

**Fenoles totales y capacidad antioxidante (DPPH y ABTS).** Los valores medios de FT, DPPH y ABTS fluctuaron entre (205.2 - 348.0 mg AGE/100 g bs), (14.97 - 108.5 mg TE/100 g bs) y (52.9 - 161.5 mg TE/100 g bs) respectivamente; sin embargo, el ANOVA no mostró

diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) de estas con respecto a las variables independientes evaluadas, ni con sus interacciones lineales y cuadráticas. Esta situación podría estar relacionada con el estrés térmico impuesto durante los tres procesos de homogenización y en el SA, los cuales pueden generar un efecto degradativo acumulado en alguno de estos (Loan et al., 2016). La figura 5-4 ilustra los gráficos de volumen de respuesta de las variables FT, DPPH y ABTS de las ME<sub>U</sub>, en función de las variables independientes.

**Figura 5-4:** Gráficos de volumen de respuesta de FT, DPPH y ABTS de las ME<sub>U</sub>.



Los FT presentaron los mayores contenidos cuando el sistema operó a VDA (22000-21000 rpm), TSA (85 – 83°C) y TEA (150 – 160 °C) (zona roja, Figura 5-4A), lo cual se complementa cuando el efecto protector de los encapsulantes presenta una composición entre 9.5 – 11.5% para la MD y entre 1.0 – 2.6% para la GA (zona roja, Figura 5-4B). Estos resultados llegan a ser coherentes cuando se presenta una alta relación  $ST_U/ST_{MD+GA}$ , lo cual se da cuando los  $ST_U$  son altos o cuando los  $ST_{MD+GA}$  son bajos, describiendo una microcápsula más rica en componentes activos, tal como se observa en la figura 5-4 A y B para los FT, y en la figura 5-4 D y F para ABTS y DPPH respectivamente. Por otro lado, el efecto de las altas temperaturas de proceso, sugiere que la microestructura de las microcápsulas podría estar presentando una superficie más irregular e inclusive fracturada (> área superficial), que favorece una mayor y mejor extracción de los componentes activos, reflejando mayores contenidos de estos. Se considera que el efecto de temperaturas de proceso sobre los FT no confiere un cambio importante del contenido de FT, dado que estos

generalmente son termoestables (Ramírez et al., 2015). Esta situación igualmente sugiere un efecto sinérgico entre la MD y GA, protegiendo la estructura a concentraciones bajas e intermedias, debido a la unión de las estructuras heteropoliméricas altamente ramificada provenientes de la MD, del ácido glucurónico y una pequeña cantidad de proteína de la GA que podría unirse a la cadena de carbohidratos de la MD y formar una película que permite una encapsulación efectiva (Dag et al., 2017).

Por otro lado, cuando el sistema opera a altas VDA (22000 – 21000 rpm), se producen mayores velocidades tangenciales a la salida del disco y, por consiguiente, gotas de menor tamaño; sin embargo, cuando son altas las temperaturas y existe una alta relación  $ST_U/ST_{MD+GA}$ , corrobora los altos niveles de FT encontrados tal como se comentó anteriormente.

La bibliografía no reporta resultados de FT en polvo de uchuva o derivados obtenidos por SA; sin embargo, Izli et al., (2014) reporta en uchuva deshidratada por microondas (160 W) y convección a 100°C valores de 236.8 y 239.7 mg AGE/100 g bs respectivamente, los cuales se encuentran en el rango obtenido en la presente investigación. Dag et al., (2017), reporta valores inferiores en uchuva liofilizada encapsulada con MD, MD+GA, MD-Alginato y MD-pectina, valores entre 59.6 - 95.9 mg AGE/ 100 g bs. En otras matrices alimentarias, Araujo et al., (2020) reportaron mayores contenidos de FT en polvo de zapote cuando utilizaron una mezcla 1/1 de MD/GA (30%) frente a los encapsulantes individuales. Mishra et al., (2014) reportó en polvo de Amlat menores niveles de FT cuando la composición de MD fue incrementada (P. Mishra et al., 2014).

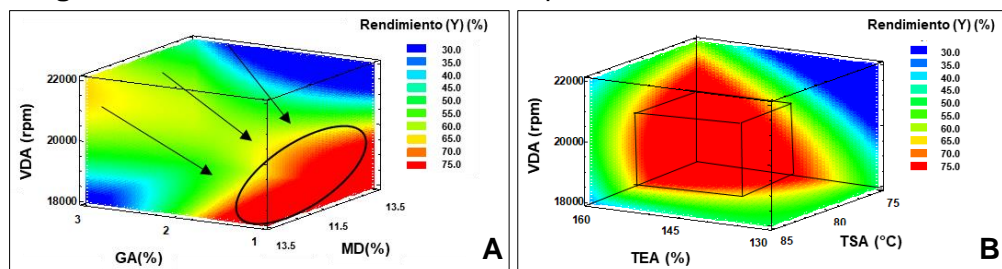
Los mayores valores de DPPH se alcanzaron cuando el sistema operó a VDA (20000 - 22000 rpm), TSA (75 – 83°C), TEA (en todo el rango potenciándose en 130 – 140 °C), MD (9.5 – 11.0%) y GA (1.0 – 2.2%) (Figura 5-4C y 5-4D). Por otro lado, los mayores valores de ABTS correspondieron a VDA (18000-21000 rpm), TSA (85°C), TEA (130 – 145 °C) MD (9.5 – 11.0%) y GA (en todo el rango) (Figura 5-4E y 5-4F). Se observa que, el efecto de la MD es similar a lo informado para FT, resaltando nuevamente lo positivo de trabajar con una relación  $ST_U/ST_{MD+GA}$  alta. Para ambas variables, un efecto positivo se presenta principalmente a menores TEA, dada la sensibilidad de los compuestos que exhiben actividad antioxidante con el stress térmico (P. Mishra et al., 2014). Dag et al. (2017), reportaron valores de DPPH para polvos de uchuva obtenidos por liofilizada en un rango de 2.4 – 8.0 mg de DPPH/100 g bs.

Algunos autores han reportado en uchuva deshidratada por aire convectivo a 60 °C, valores de DPPH y ABTS en un intervalo de 375.4 - 500.6 mg TE/100g bs y 2.502,9 a 5506.4 mg TE/100 g bs, respectivamente (Narváez et al., 2014). Por otro lado, De La Vega et al. (2019) reportaron valores de DPPH para uchuvas deshidratadas en estufa y en secador de bandejas a 60°C de  $2.8 \pm 0.1$  y  $4.6 \pm 0.3$  mg TE/100 g respectivamente. Izli et al., (2014), afirman que la reducción de la capacidad antioxidante como resultado del proceso de secado podría deberse a la degradación de compuestos fenólicos o la pérdida de constituyentes antioxidantes en la U; bien sea, por el tratamiento térmico realizado o por las reacciones enzimáticas generadas durante el proceso (De la Vega et al., 2019).

**Rendimiento.** El Y es una variable de importancia en el proceso de microencapsulación por SA, el cual está estrechamente relacionado con el costo de producción (Tontul & Topuz, 2017). El Y del proceso de SA de frutas está afectado por una diversidad de factores: contenido de sólidos de la alimentación al SA, remanente o material adherido en el tanque de preparación de la alimentación, remanente en tuberías de proceso, y por la adhesión de material en las paredes internas de la cámara de secado debido a la presencia principalmente de azúcares en la alimentación y por el efecto de las condiciones de operación del proceso de SA (Bazaria & Kumar, 2018; Shishir & Chen, 2017; Shofinita et al., 2015). El rendimiento de las ME<sub>U</sub> presentó una fluctuación entre 29.3 - 75.4%; por lo que, el ANOVA mostró diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) solamente con respecto a la VDA. Resultados similares se presentaron en polvo de piña y menta, con rendimientos entre 35.4 – 62.9% (Braga et al., 2020).

Los gráficos de volumen de respuesta (Figura 5-5) ilustran que bajos valores de la VDA (18000 – 20000 rpm) favorecen el incremento del rendimiento, lo cual se atribuye a una menor velocidad tangencial en el borde del disco atomizador, que reduce la energía de impulso de la gota y al mismo tiempo evita el choque contra las paredes internas de la cámara de secado (Shishir & Chen, 2017). Se considera que la SC<sub>U</sub> es un material adhesivo, debido a su contenido de azúcares provenientes de la U (Puente et al., 2011). En general, las condiciones operativas que favorecen el mayor rendimiento en el proceso de SA (zona roja) fueron: VDA (18000 – 21500 rpm), TEA (145 – 160°C), TSAT (75 – 80°C), GA (1.0 – 1.8) y MD (en todo el rango) (Figura 5A y 5B). El efecto de la MD no fue muy apreciable en la formulación; sin embargo, se sugiere que existe un efecto sinérgico con la GA, encapsulando principalmente los ácidos orgánicos y los azúcares presentes; adicionalmente, contribuye a mejorar la fluidez en la cámara de secado, evitando la adherencia del producto a las paredes internas de la cámara de secado (Fazaeli et al., 2012; Liu et al., 2017). Por otro lado, las mayores TEA generan mayores rendimientos, relacionado con la mejor eficiencia de la transferencia de calor y masa, una eliminación más rápida del agua y una disminución de la X<sub>w</sub> y de la T<sub>g</sub> de las ME<sub>U</sub>, disminuyendo la adherencia de las partículas en las paredes del secador (Santhalakshmy et al., 2015; Sarabandi et al., 2019).

**Figura 5-5:** Gráficos de volumen de respuesta de rendimiento de las ME<sub>U</sub>.



## Modelamiento matemático y optimización experimental de múltiples respuestas del proceso de SA.

Los coeficientes estimados del modelo polinomial cuadrático y los coeficientes de regresión  $R^2$  del diseño experimental para cada una de las variables dependientes se presentan en la tabla 5-2. En general, los modelos matemáticos obtenidos explican entre un 79.4 y 99.4% la variabilidad de las respuestas estudiadas. Se resalta que, la mayoría fueron superiores al 86%, lo que indica que los modelos de regresión cuadráticos utilizados, fueron adecuados para expresar la relación entre las variables dependientes e independientes. Por otro lado, las variables dependientes presentaron una distribución aleatoria de los residuales, situación que asegura que los datos se pueden parametrizar según una distribución normal. Para el proceso de optimización experimental de múltiples respuestas se definieron diversos criterios que favorecen los atributos de calidad de las ME<sub>U</sub>: 1) maximizar las variables Y, S, L\*, b\*, FT, DPPH y ABTS, 2) minimizar las variables H, Hu y 3) se fijó Xw en 2.6% (valor medio). Adicionalmente a cada variable dependiente se otorgó un peso e impacto según los resultados del ANOVA.

**Tabla 5-3:** Coeficientes de regresión del modelo matemático y  $R^2$  para para las variables dependientes de ME<sub>U</sub>.

Coeficiente	Xw	S	H	Hu	L*	b*	FT	DPPH	ABTS	Y
B <sub>0</sub>	-489.36	1402.7 2	384.12	589.51	-142.51	107.56	11651.60	-1557.27	-3557.66	-3328.54
GA	1.57	-171.84	26.26	1.02	88.68	45.82	-77.98	-627.04	21.22	-163.37
MD	-8.63	211.28	27.59	11.94	-30.82	-64.73	-300.83	30.89	-455.38	149.82
TEA	1.70	-20.70	-7.63	-6.09	-5.85	3.88	-62.39	-27.81	40.33	32.06
TSA	5.85	-25.13	1.08	-3.82	5.80	0.74	-44.55	61.18	55.19	24.60
VDA	0.02	0.01	0.00	-0.01	0.05	0.00	-0.35	0.16	0.11	-0.05
AG-AG	-0.31	2.82	-0.60	-0.10	-0.27	0.61	-18.04	-10.69	-22.85	8.41
AG-MD	0.86	-2.91	-1.52	-1.17	0.79	0.73	-4.07	6.75	-0.37	-3.64
AG-TEA	-0.02	1.12	0.17	0.29	0.28	-0.27	-1.41	0.77	-2.79	-0.78
AG-TSA	-0.01	0.78	-0.20	-0.08	-0.94	-0.42	2.56	4.74	1.61	0.49
AG-VDA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01
MD-MD	0.09	-2.53	-0.31	0.56	0.42	0.35	-1.89	0.02	3.87192	-0.56
MD-TEA	0.02	0.14	0.05	0.07	0.25	-0.03	-0.71	-0.53	-1.60	-0.91
MD-TSA	0.03	-0.97	-0.18	-0.10	-0.08	0.41	2.94	1.23	3.64	-0.72
MD-VDA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
TEA-TEA	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.09	0.04	0.01	-0.00
TEA-TSA	0.00	0.12	0.02	0.03	0.06	0.01	0.27	0.23	-0.20	-0.22
TEA-VDA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TSA-TSA	-0.01	0.14	-0.01	-0.01	-0.03	-0.01	-0.24	-0.44	-0.17	-0.06
TSA-VDA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VDA-VDA	0.00	0.00	0.00	-1.25	0.00	0.00	-5.64	0.00	0.00	0.00
<b>R<sup>2</sup></b>	86.5	86.5	99.4	96.2	92.6	88.0	79.4	85.2	80.9	86.8

Bajo este contexto, la tabla 5-3 ilustra los resultados de la optimización experimental, la cual presentó una deseabilidad del 68.4%, definiendo las variables independientes así: GA = 2.2%, MD = 10.1%, TEA= 160 °C, TSA = 77.8°C y VDA = 21450 rpm. Adicionalmente, se realizó una validación experimental a partir de 3 réplicas a las condiciones óptimas, cuyos resultados fueron confrontados con los valores teóricos reportados por los modelos matemáticos y se determinó para cada variable dependiente el EMR. En general, la validación de los modelos matemáticos de las variables dependientes se considera aceptable, donde los EMR de todas las variables dependientes fueron menores del 20%. La aplicación del proceso de optimización experimental de múltiples respuestas utilizando

la función de deseabilidad ha sido utilizado en forma efectiva en diversos procesos de SA de frutas: Moghaddam et al. (2017) reporta una deseabilidad del 87.5% con EMR < 15% en polvo de cereza agria; Liu et al. (2017) reportaron una deseabilidad del 68.8% en polvo de arándano con EMR < 5%; y Bazaria & Kumar, (2018) obtuvieron una deseabilidad del 78.5% en polvo de remolacha con EMR < 11%.

**Tabla 5-4:** Criterios de optimización y optimización experimental multiobjetivo del proceso de SA de ME<sub>U</sub>.

Variable dependiente	Criterio	Peso	Impacto	Óptimo teórico	Valor experimental	EMR* (%)
Xw (%)	2.6	1.0	4.0	2.6	2.7 ± 0.1	3.8
S (%)	Maximizar	1.8	5.0	78.9	86.2 ± 2.3	9.2
H (%)	Minimizar	1.6	4.5	15.5	16.2 ± 0.0	14.4
Hu (s)	Minimizar	0.8	3.5	3.4	4.0 ± 0.1	17.6
L*	Maximizar	0.5	3.0	41.4	43.9 ± 0.1	6.0
b*	Maximizar	0.5	3.0	35.5	35.7 ± 0.9	0.6
FT (mg AGE/100 g bs)	Maximizar	1.5	5.0	310.1	284.2 ± 1.8	8.3
DPPH (mg TE/100 g bs)	Maximizar	1.5	5.0	107.6	99.8 ± 2.5	7.2
ABTS (mg TE/100 g bs)	Maximizar	1.5	5.0	164.6	158.5 ± 0.1	3.7
Y	Maximizar	1.8	5.0	69.7	56.1 ± 1.6	19.5

## 5.5 Conclusiones

Se resalta que la investigación desarrolló un producto microencapsulado con una relación  $ST_U/ST_{MD+GA} = 1.366$  correspondiente a un 57.7% de  $ST_U$ , lo cual brinda al consumidor un producto microencapsulado con mayor contenido en U, contrario a los desarrollos convencionales donde el aporte de aditivos de secado representa más del 50%. El proceso de SA es una alternativa tecnológica eficaz para obtener microcápsulas de U, aportando valor agregado a su cadena agroindustrial y convirtiéndolo en un producto innovador y de calidad para las industrias alimentaria y farmacéutica, principalmente. Los resultados obtenidos mostraron un mayor aprovechamiento de la estructura de la U (pulpa, semilla y cáscara), permitiendo la obtención de un producto con características instantáneas y funcionales; lo cual se evidencia en la solubilidad, humectabilidad, los contenidos de compuestos de interés biológico; contenido de FT y capacidad antioxidante. Mediante la metodología de superficie de respuesta y la optimización experimental del proceso de SA, se analizó y modeló el comportamiento de las variables dependientes en función de las variables independientes, permitiendo obtener las condiciones operativas más adecuadas del proceso, que confiere los mejores atributos de calidad de las ME<sub>U</sub>: Xw = 2.7%, S = 86.2 %, H = 16.2 %, Hu = 4.0 s, L\* = 43.9, a\* = 3.2, b\* = 35.7, FT = 284.2 mg AGE/100 g bs, DPPH = 99.8 mg TE/100 g bs, ABTS = 158.5 mg TE/100 g bs, y Y = 56.1%.

## 5.6 Bibliografía

Araujo, H. C. S., Jesus, M. S., Leite Neta, M. T. S., Gualberto, N. C., Matos, C. M. S., Rajan, M., Rajkumar, G., Nogueira, J. P., & Narain, N. (2020). Effect of maltodextrin and gum

- arabic on antioxidant activity and phytochemical profiles of spray-dried powders of sapota (*Manilkara zapota*) fruit juice. *Drying Technology*, 39(3), 392–404. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1839487>
- Bazaria, B., & Kumar, P. (2018). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17(4), 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.007>
- Bhusari, S. N., Muzaffar, K., & Kumar, P. (2014). Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*, 266, 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.038>
- Braga, V., Guidi, L. R., de Santana, R. C., & Zotarelli, M. F. (2020). Production and characterization of pineapple-mint juice by spray drying. *Powder Technology*, 375, 409–419. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.012>
- Bravo, K., & Osorio, E. (2016). Characterization of polyphenol oxidase from Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruit. *Food Chemistry*, 197, 185–190. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.126>
- Cortés, M., Hernández, G., & Estrada, E. (2017). Optimization of the spray drying process for obtaining cape gooseberry powder: an innovative and promising functional food. *Vitae*, 24(1), 59–67. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n1a07>
- Dag, D., Kilercioglu, M., & Oztop, M. H. (2017). Physical and chemical characteristics of encapsulated goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice powder. *LWT - Food Science and Technology*, 83, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.05.007>
- Daza, L. D., Fujita, A., Fávoro-Trindade, C. S., Rodrigues-Ract, J. N., Granato, D., & Genovese, M. I. (2016). Effect of spray drying conditions on the physical properties of Cagaita (*Eugenia dysenterica* DC.) fruit extracts. *Food and Bioproducts Processing*, 97, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.10.001>
- De la Vega, J., Cañarejo, M., Cabascango, O., & Lara, M. (2019). Dehydrated *Physalis peruviana* L. In Two Ripening States and its Effect on Total Phenolic Compounds, Antioxidant Capacity, Carotenes, Color and Ascorbic acid. *Informacion Tecnologica*, 30(5), 91–100. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500091>
- de los Rios, C., Cortés, M., & Arango, J. (2021). Physicochemical quality and antioxidant activity of blackberry suspensions: Compositional and process effects. *Journal of Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15498>
- de Souza, M. M. B., Santos, A. M. P., Converti, A., & Maciel, M. I. S. (2020). Optimisation of umbu juice spray drying, and physicochemical, microbiological and sensory evaluation of atomised powder. *Journal of Microencapsulation*, 37(3), 230–241. <https://doi.org/10.1080/02652048.2020.1720031>
- Estrada, M., Cortés, M., & Gil, J. (2017). Guacamole powder: Standardization of the spray drying process. *Vitae*, 24(2), 102–112. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n2a03>
- Etzbach, L., Meinert, M., Faber, T., Klein, C., Schieber, A., & Weber, F. (2020). Effects of carrier agents on powder properties, stability of carotenoids, and encapsulation efficiency of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) powder produced by co-current spray drying. *Current Research in Food Science*, 3(November 2019), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.crf.2020.03.002>
- Fazaeli, M., Emam-Djomeh, Z., Kalbasi Ashtari, A., & Omid, M. (2012). Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 90(4), 667–675. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.04.006>
- Ferrari, C., Marconi, S., Alvim, I., & de Aguirre, J. (2013). Storage Stability of Spray-Dried Blackberry Powder Produced with Maltodextrin or Gum Arabic. *Drying Technology*, 31(4), 470–478. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.742103>

- Ferrari, C., Marconi, S., Alvim, I., Vissotto, F., & de Aguirre, J. (2012). Influence of carrier agents on the physicochemical properties of blackberry powder produced by spray drying. *International Journal of Food Science and Technology*, 47(6), 1237–1245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02964.x>
- Figueroa, P. M., Ceballos, M. A., & Hurtado, A. M. (2016). Microencapsulación por secagem por atomização de óleo de amora (*Rubus glaucus*) extraído com CO2 supercrítico. *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 39–47. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n2.57481>
- Fuente, F., Nocetti, D., Sacristán, C., Ruiz, P., Guerrero, J., Jorquera, G., Uribe, E., Bucarey, J. L., Espinosa, A., & Puente, L. (2020). *Physalis peruviana* L. Pulp prevents liver inflammation and insulin resistance in skeletal muscles of diet-induced obese mice. *Nutrients*, 12(3), 700. <https://doi.org/10.3390/nu12030700>
- Gallón, M., Cortés, M., & Gil, J. (2020). Physicochemical stability of colloidal systems using the cape gooseberry, strawberry, and blackberry for spray drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(9), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14705>
- García, J., Giuffrida, D., Dugo, P., Mondello, L., & Osorio, C. (2018). Development and characterisation of carotenoid-rich microencapsulates from tropical fruit by-products and yellow tamarillo (*Solanum betaceum* Cav.). *Powder Technology*, 339, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.061>
- Garofulic, I. E., Zoric, Z., Pedisic, S., & Dragovic-Uzelac, V. (2016). Optimization of sour cherry juice spray drying as affected by carrier material and temperature. *Food Technology and Biotechnology*, 54(4), 441–449. <https://doi.org/10.17113/ftb.54.04.16.4601>
- ICONTEC. (1999). Fresh fruits. Cape gooseberry. Specifications. In *Norma técnica colombiana* (p. 17). [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1271/81660\\_58968.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/1271/81660_58968.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Igual, M., Ramires, S., Mosquera, L. H., & Martínez, N. (2014). Optimization of spray drying conditions for lulo (*Solanum quitoense* L.) pulp. *Powder Technology*, 256, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.02.003>
- Izli, N., Yildiz, G., Ünal, H., Işık, E., & Uylaşer, V. (2014). Effect of different drying methods on drying characteristics, colour, total phenolic content and antioxidant capacity of Goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 49(1), 9–17. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12266>
- Jafari, S. M., Ghalegi Ghalenoei, M., & Dehnad, D. (2017). Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder Technology*, 311, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.070>
- Janiszewska, E. (2017). Carotenoids microencapsulation by spray drying method and supercritical micronization. *Food Research International*, 99, 891–901. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.02.001>
- Juarez, E., Olivas, G., Zamudio, P., Ortega, E., Perez, S., & Sepulveda, D. (2017). Effect of water content on the flowability of hygroscopic powders. *Journal of Food Engineering*, 205, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.024>
- Largo, E., Cortés, M., & Ciro, H. (2015). Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7509–7520. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47839>
- Liu, Y., Chen, F., & Guo, H. (2017). Optimization of bayberry juice spray drying process using response surface methodology. *Food Science and Biotechnology*, 26(5), 1235–1244. <https://doi.org/10.1007/s10068-017-0169-0>



- Loan, N. T. ., Hoa, N. D. ., & Ha, N. V. . (2016). Effects of Spray-Drying Conditions on Antioxidant Properties of Mango. *Journal of Biotechnology*, 14(1A), 427–438.
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2020). Microencapsulation of pineapple peel extract by spray drying using maltodextrin, inulin, and Arabic gum as wall matrices. *Foods*, 9(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/FOODS9060718>
- Mishra, P., Mishra, S., & Mahanta, C. (2014). Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 92(3), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.003>
- Mishra, Poonam, Mishra, S., & Mahanta, C. L. (2014). Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 92(3), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.003>
- Moghaddam, A. D., Pero, M., & Askari, G. R. (2017). Optimizing spray drying conditions of sour cherry juice based on physicochemical properties, using response surface methodology (RSM). *Journal of Food Science and Technology*, 54(1), 174–184. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2449-8>
- Mokhtar, S. M., Swailam, H. M., & Embaby, H. E. S. (2018). Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. *Food Chemistry*, 248, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.117>
- Muzaffar, K., & Kumar, P. (2015). Parameter optimization for spray drying of tamarind pulp using response surface methodology. *Powder Technology*, 279, 179–184. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.010>
- Muzaffar, K., Nayik, G. A., & Kumar, P. (2015). *Stickiness Problem Associated with Spray Drying of Sugar and Acid Rich Foods: A Mini Review*. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000S12003>
- Narváez, C., Mateus, Á., & Restrepo, L. (2014). Antioxidant capacity and total phenolic content of air-dried cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) at different ripeness stages. In *Agronomía Colombiana* (Vol. 32, Issue 2).
- Neikov, O. (2019). Safety Engineering in the Production of Powders. In O. Neikov, S. Naboychenko, & N. Yefimov (Eds.), *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (2nd ed., pp. 865–928). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-100543-9.00027-0>
- Nishad, J., Selvan, C. J., Mir, S. A., & Bosco, S. J. D. (2017). Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 54(3), 687–697. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2507-x>
- Nocetti, D., Núñez, H., Puente, L., Espinosa, A., & Romero, F. (2020). Composition and biological effects of goldenberry byproducts: an overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(12), 4335–4346. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10386>
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., & Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, 233, 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.114>
- Ozkan, G., Franco, P., De Marco, I., Xiao, J., & Capanoglu, E. (2019). A review of microencapsulation methods for food antioxidants: Principles, advantages, drawbacks and applications. *Food Chemistry*, 272(August 2018), 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.07.205>
- Patil, V., Chauhan, A. K., & Singh, R. P. (2014). Optimization of the spray-drying process for developing guava powder using response surface methodology. *Powder*

- Technology*, 253, 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.11.033>
- Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. In *International Food Research Journal* (Vol. 19, Issue 4).
- Puente, L., Pinto, C., Castro, E., & Cortés, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International*, 44(7), 1733–1740. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Puente, L., Spolmann, O., Nocetti, D., Zura, L., & Lemus, R. (2020). Effects of infrared-assisted refractance window™ drying on the drying kinetics, microstructure, and color of *Physalis* fruit purée. *Foods*, 9(343). <https://doi.org/10.3390/foods9030343>
- Quek, S., Chok, N., & Swedlund, P. (2007). The physicochemical properties of spray-dried watermelon powders. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(5), 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.06.020>
- Quirino, E., De Araújo, V., Monteiro, M., Finotelli, V., Guedes, A., & Perrone, D. (2016). Starch, inulin and maltodextrin as encapsulating agents affect the quality and stability of jussara pulp microparticles. *Carbohydrate Polymers*, 151, 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.093>
- Ramadan, M. (2011a). *Physalis peruviana*: A rich source of bioactive phytochemicals for functional foods and pharmaceuticals. *Food Reviews International*, 27(3), 259–273. <https://doi.org/10.1080/87559129.2011.563391>
- Ramadan, M. (2011b). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Research International*, 44(7), 1830–1836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042>
- Ramakrishnan, Y., Adzahan, N. M., Yusof, Y. A., & Muhammad, K. (2018). Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technology*, 328, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.018>
- Ramírez, M., Giraldo, G., & Orrego, C. (2015). Modeling and stability of polyphenol in spray-dried and freeze-dried fruit encapsulates. *Powder Technology*, 277, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.060>
- Rigon, R., & Zapata, C. (2016). Microencapsulation by spray-drying of bioactive compounds extracted from blackberry (*rubus fruticosus*). *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1515–1524. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2111-x>
- Samborska, K., Boostani, S., Geranpour, M., Hosseini, H., Dima, C., Khoshnoudi-Nia, S., Rostamabadi, H., Falsafi, S. R., Shaddel, R., Akbari-Alavijeh, S., & Jafari, S. M. (2021). Green biopolymers from by-products as wall materials for spray drying microencapsulation of phytochemicals. *Trends in Food Science and Technology*, 108(January), 297–325. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.008>
- Santhalakshmy, S., Don Bosco, S. J., Francis, S., & Sabeena, M. (2015). Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. *Powder Technology*, 274, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.01.016>
- Sarabandi, K., Jafari, S., Mahoonak, A., & Mohammadi, A. (2019). Application of gum Arabic and maltodextrin for encapsulation of egg plant peel extract as a natural antioxidant and color source. *International Journal of Biological Macromolecules*, 140, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.133>
- Sathyashree, H., Ramachandra, C., Udaykumar, N., Mathad, P., & Nagaraj, N. (2018). Rehydration properties of spray dried sweet orange juice. ~ 120 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(3), 120–124.
- Schuck, P. (2011). Dehydrated Dairy Products: Milk Powder: Physical and Functional Properties of Milk Powders. *Encyclopedia of Dairy Sciences: Second Edition*, 117–124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00122-9>

- Selvamuthukumar, M., & Khanum, F. (2014). Optimization of spray drying process for developing seabuckthorn fruit juice powder using response surface methodology. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3731–3739. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0901-y>
- Shishir, M., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science and Technology*, 65, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- Shofinita, D., Feng, S., & Langrish, T. A. G. (2015). Comparing yields from the extraction of different citrus peels and spray drying of the extracts. *Advanced Powder Technology*, 26(6), 1633–1638. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2015.09.007>
- Sobulska, M., & Zbicinski, I. (2020). Advances in spray drying of sugar-rich products. *Drying Technology*, 0(0), 1–26. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1832513>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science and Technology*, 63, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Torres-Ossandón, M. J., Vega-Gálvez, A., López, J., Stucken, K., Romero, J., & Di Scala, K. (2018). Effects of high hydrostatic pressure processing and supercritical fluid extraction on bioactive compounds and antioxidant capacity of Cape gooseberry pulp (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Supercritical Fluids*, 138(March), 215–220. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.05.005>
- Verma, A., & Singh, S. V. (2015). Spray Drying of Fruit and Vegetable Juices—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 701–719. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.672939>
- Vidović, S. S., Vladić, J. Z., Vaštag, Ž. G., Zeković, Z. P., & Popović, L. M. (2014). Maltodextrin as a carrier of health benefit compounds in Satureja montana dry powder extract obtained by spray drying technique. *Powder Technology*, 258, 209–215. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.03.038>
- Wu, D., & Sun, D. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control e A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29, 5–20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.004>
- Zhang, J., Zhang, C., Chen, X., & Quek, S. Y. (2020). Effect of spray drying on phenolic compounds of cranberry juice and their stability during storage. *Journal of Food Engineering*, 269(October 2019), 109744. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109744>
- Zotarelli, M. F., da Silva, V. M., Durigon, A., Hubinger, M. D., & Laurindo, J. B. (2017). Production of mango powder by spray drying and cast-tape drying. *Powder Technology*, 305, 447–454. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.027>

## 6. EVALUACIÓN DEL PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE POLVO DE UCHUVA OBTENIDO POR SECADO POR ASPERSIÓN

### 6.1 Resumen

La uchuva es una fruta con un alto contenido de compuestos activos, como vitaminas, minerales y antioxidantes. El objetivo de esta investigación fue evaluar el proceso de aglomeración, en el polvo de uchuva que se obtuvo mediante secado por aspersión. El proceso se evaluó a partir de un diseño central compuesto (15 experimentos) y se analizó por la metodología de superficie de respuesta. Se consideraron las variables independientes: temperatura del aire de fluidización (T) (50 – 70 °C), presión de atomización de la solución ligante (P) (1.0 – 2.0 bar) y tiempo de aglomeración (t) (20 – 40 minutos), y como variables dependientes: humedad (Xw), solubilidad (S), humectabilidad (Hu), higroscopicidad (H), densidad aparente ( $\rho_a$ ), índice de Carr (IC), relación de Hausner (RH), tamaño de partícula  $D_{[4,3]}$ , fenoles totales (FT), flavonoides totales (FLT), capacidad antioxidante (DPPH y ABTS), vitamina C (Vit.C),  $\beta$ -caroteno ( $\beta$ -car) y el rendimiento (Y). La optimización experimental de múltiples repuestas presentó una deseabilidad del 63.8%, definiendo las variables independientes: T = 68.4 °C, P = 1.1 bar, t = 36.5 min, y las variables dependientes: Xw (4.3±0.1%), S (80.5±0.8%), H (14.4±0.5%), Hu (2.3±0.1 s),  $\rho_a$  (0.588±0.021 g/mL), IC (11.9 ± 2.5%), RH (1.11±0.02),  $D_{[4,3]}$  (136.0 2.2  $\mu$ m), FT (366.7±2.5 mg AGE/100 g base seca (bs)), FLT (26.5±0.9 mg QE/100 g bs), DPPH (163.5±2.6 mg TE/100 g bs) y ABTS (133.0±1.1 mg TE/100 g bs), Vit.C (42.2±2.5 mg/100 g bs),  $\beta$ -car (72.4±2.1 mg/100 g bs) y Y (62.5±3.3%). El proceso de aglomeración por lecho fluidizado del polvo de uchuva, fue efectivo, resultando en la mejora de las propiedades físicas relacionadas con las características funcionales de instantanización y fluidez.

**Palabras claves:** Granulación de polvos de frutas, compuestos bioactivos, instantanización y solubilización.

## Abstract

The cape gooseberry is a fruit with a high content of active compounds, such as vitamins, minerals, and antioxidants. This research aimed to evaluate the agglomeration process in the cape gooseberry powder obtained by spray drying. The process was evaluated using a central composite design (15 experiments) and was analyzed by the response surface methodology. The independent variables considered were: fluidization air temperature (T) (50 - 70 °C), binder solution atomization pressure (P) (1.0 - 2.0 bar) and agglomeration time (t) (20 - 40 min), and as dependent variables: moisture (Xw), solubility (S), wettability (We), hygroscopicity (H), bulk density ( $\rho_a$ ), Carr's index (CI), Hausner's ratio (RH), particle size  $D_{[4,3]}$ , total phenols (TP), total flavonoids (TFL), antioxidant capacity (DPPH and ABTS), vitamin C (Vit.C),  $\beta$ -carotene ( $\beta$ -car) and yield (Y). The multiple-response experimental optimization presented a desirability of 63.8%, defining the independent variables: T = 68.4 °C, P = 1.1 bar, t = 36.5 min, and the dependent variables: Xw (4.3±0.1%), S (80.5±0.8%), H (14.4±0.5%), We (2.3±0.1 s),  $\rho_a$  (0.588±0.021 g/mL), CI (11.9±2.5%), RH (1.11±0.02),  $D_{[4,3]}$  (136.0±2.2  $\mu$ m), TP (366.7±2.5 mg GAE/100 g dry base (db)), TFL (26.5±0.9 mg QE/100 g db), DPPH (163.5±2.6 mg TE/100 g db) and ABTS (133.0±1.1 mg TE/100 g db), Vit.C (42.2±2.5 mg/100 g db),  $\beta$ -car (72.4±2.1 mg/100 g db) and Y (62.5±3.3%). The fluidized bed agglomeration process of cape gooseberry powder was effective, resulting in improved physical properties related to the functional characteristics of instantaneousness and flowability.

**Keywords:** Granulation of fruit powders, bioactive compounds, instantanization and solubilization

## Abreviaciones

Nombre	Abreviatura	Nombre	Abreviatura
Ácido gálico equivalente	AGE	Mezcla polvo de uchuva	MPU
Base seca	bs	Mezcla polvo de uchuva aglomerada	MPUA
$\beta$ -Caroteno	$\beta$ -car	Presión de atomización	P
Densidad aparente	$\rho_a$	Relación de Hausner	RH
Densidad compactada	$\rho_c$	Rendimiento	Y
Diámetro medio de volumen equivalente	$D_{[4,3]}$	Secado por aspersión	SA
Fenoles totales	FT	Solubilidad	S
Flavonoides totales	FLT	Temperatura del aire de fluidización	T
Higroscopicidad	H	Tiempo de aglomeración	t
Humectabilidad	Hu	Trolox equivalente	TE
Humedad	Xw	Uchuva	U
Índice de Carr	IC		

## 6.2 Introducción

*Physalis peruviana* L. es una baya de gran aceptación por el consumidor moderno, debido a sus propiedades nutricionales, sensoriales y compuestos bioactivos presentes (Olivares et al., 2016; Ramadan, 2011). El fruto posee alto contenido de vitamina C (Vit.C) (20 – 60,4 mg/100 g) (Olivares et al., 2016; Bravo et al., 2015); carotenoides (1.5 – 20,5 mg/100 g) (Etzbach et al., 2018; Bravo et al., 2015; Puente et al., 2011); vitaminas del complejo B (B<sub>1</sub>:

0.1- 0.2 mg, B<sub>2</sub>: 0.03 – 0.2 mg, B<sub>3</sub>: 0.8 – 1.7 mg/100 g) (Puente et al., 2011; Ramadan, 2011); minerales (K: 55.3 – 501.9 mg, P: 34.0 – 54.9 mg, Ca: 7.0 – 37.7 mg /100 g) (Olivares et al., 2016; Ramadan, 2011) y actividad antioxidante (59.4 – 65.3 mg TE/100 g) (De la Vega et al., 2019). Adicionalmente, se han reportado propiedades medicinales, entre las que destacan su actividad antidiabética, antiespasmódica, antiparasitaria, diurética, antiséptica, sedante, analgésico (Puente et al., 2011).

El secado por aspersión (SA) es una alternativa tecnológica para la conservación de los alimentos, debido al aumento significativo de la vida útil (Eun et al., 2020; Shishir & Chen, 2017), además, se resalta la disminución de su volumen, reducción de costos de transporte y almacenamiento, facilita su dosificación y uso (Janiszewska, 2017). El SA ha sido utilizado en forma efectiva durante las últimas décadas en la microencapsulación de compuestos activos puros o aquellos que se encuentran en matrices alimentarias, permitiendo su protección contra factores externos (pH, calor, luz, O<sub>2</sub>, agentes oxidantes, entre otros), lo que confiere una mayor estabilidad (Samborska et al., 2021).

Diversidad de polvos obtenidos por diferentes tecnologías, morfológicamente son partículas finas con deficientes propiedades de fluidez e instantaneidad, dificultando su manipulación y reconstitución a nivel culinario o industrial (Rodrigues et al., 2020). Por otro lado, los polvos finos a menudo presentan formación de flujo no libre y dispersión obstaculizada, debido a las altas fuerzas de cohesión entre las partículas, lo que conduce a obstrucciones en las tuberías de transporte, difícil manipulación del producto, apelmazamiento durante el almacenamiento y formación de grumos al reconstituirse (Atalar et al., 2021; Rodrigues et al., 2020). El proceso de aglomeración es una tecnología que contribuye a mejorar las propiedades que generan estas dificultades (Dhanalakshmi et al., 2011), permite la unión de partículas finas para formar complejos aglomerados de mayor tamaño y con una estructura porosa (Yuksel & Dirim, 2021; Yuksel & Dirim, 2018; Machado et al., 2014).

La aglomeración por vía seca se realiza mediante etapas consecutivas de trituración, cribado y la compactación final del polvo; mientras que, la aglomeración húmeda, mayormente utilizada en la industria alimentaria, maneja una solución aglutinante pulverizada que actúa sobre un sistema de lecho fluidizado, donde las partículas humectadas chocan y se forman puentes líquido entre estas; al recibir suficiente calor del aire de fluidización, el líquido se evapora y las partículas quedan unidas, lo que genera la formación de un gránulo poroso y de mayor tamaño (Yuksel & Dirim, 2021; Machado et al., 2014; Ziyani & Fatah, 2014; Dhanalakshmi et al., 2011). La calidad del producto aglomerado depende de las condiciones de proceso: flujo de aire de fluidización, temperatura del aire de entrada, presión de pulverización y flujo de aglutinante) (Vengateson & Mohan, 2016).

Procesos de aglomeración por lecho fluidizado en polvos de frutas y hortalizas han sido reportados por diversos autores: polvo de jugo de espinaca (Yuksel & Dirim, 2021), polvo de champiñón común (Atalar et al., 2021), polvo de banano verde (Rayo et al., 2015); además, en otras matrices en polvo: aislado de proteína de soya (Machado et al., 2014), pectina (Hirata et al., 2013), leche en polvo descremada y entera (Barkouti et al., 2013), sémola de trigo duro (Saad et al., 2011), almidón de maíz (Ghosal et al., 2010), entre otros.

Bajo este contexto, el objetivo de la investigación fue evaluar la influencia de las condiciones del proceso de aglomeración por lecho fluidizado sobre el polvo de uchuva obtenido mediante SA.

## 6.3 Metodología

### 6.3.1 Materia prima.

La materia prima fue un polvo de uchuva (PU) (pulpa, semillas y cáscaras, variedad ecotipo Colombia) suministrado por la empresa Proexcar SAS y obtenido en un SA (Lemar, China) operando con las siguientes condiciones: temperatura de entrada de aire: 160°C, temperatura de salida de aire: 80°C, velocidad del disco atomizador: 15000 rpm. El PU contenía como encapsulantes Maltodextrina (MD) con dextrosa equivalente (DE) 19-20 (Ingredion, Colombia) y goma arábica (GA) (767 Master Gum FT powder, TIC). Las propiedades del PU fueron las siguientes: humedad ( $X_w$ : 2.3±0.0%), solubilidad (S: 88.5±0.5%), higroscopicidad (H: 15.3±0.1%), humectabilidad (Hu: 2.8±0.2 s), densidad aparente ( $\rho_a$ : 0.522±0.028 g/mL), densidad compactada ( $\rho_c$ : 0.869±0.007 g/mL), índice de Carr (IC: 39.9±3.1), relación de Hausner (RH: 1.7±0.1), diámetro medio de volumen equivalente ( $D_{[4,3]}$ ) (70.3±1.5  $\mu\text{m}$ ), fenoles totales (FT: 353.8±0.6 mg ácido gálico equivalente (AGE)/100 g base seca (bs)), flavonoides totales (FLT) (35.0±0.8 mg quercetina equivalente (QE)/100 g bs), DPPH (137.3±1.5 mg trolox equivalente (TE)/100 g bs), ABTS (158.5±0.1 mg TE/100 g bs), Vit.C (29.3±1.9 mg/100 g bs),  $\beta$ -caroteno ( $\beta$ -car) (129.4±2.3 mg/100 g bs). El PU se mezcló con SiO<sub>2</sub> (1% p/p) teniendo en cuenta la norma CXS 192 (FAO, 1995), con el objetivo de mejorar la fluidización en el proceso de aglomeración, siendo identificada esta mezcla como la carga del aglomerador o la mezcla en polvo de uchuva sin aglomerar (MPU).

### 6.3.2 Proceso de aglomeración.

Se utilizó un aglomerador-encapsulador por lecho fluidizado piloto (Changzhou Zhiyang Machinery Equipment CO., LTD., China), referencia DLP1.5 con capacidad entre 350 - 1500 g. El flujo de aire se incrementó durante el proceso (50 → 80 m<sup>3</sup>/h) con el objetivo de mantener la fluidización adecuada de la MPU (400 g), la cual experimenta un crecimiento continuo de partículas (Haas et al., 2020). Se llevaron a cabo 15 experimentos utilizando la metodología de superficie de respuesta a través de un diseño central compuesto cara centrada ( $\alpha = 1$ ), considerando las variables independientes: temperatura del aire de fluidización (T) (50 – 70 °C), presión de atomización (P) (1.0 – 2.0 bar) y tiempo de aglomeración (t) (20 – 40 min), y como variables dependientes de la mezcla en polvo de uchuva aglomerada (MPUA):  $X_w$ , S, Hu, H,  $\rho_a$ ,  $\rho_c$ , IC, RH,  $D_{[4,3]}$ , FT, FLT, DPPH, ABTS, Vit.C y  $\beta$ -car. La solución ligante se preparó con agua y ácido ascórbico (concentración: 4,154 mg/mL) con el objetivo de alcanzar un 30% del valor diario de referencia de nutrientes – necesidades (VRN-N)/porción de 30 g MPUA, según la normatividad colombiana

(Resolución 810 de 2021): Vit.C (100% VRN-N = 83 mg) y Vitamina A (100% VRN-N = 800 µg equivalentes de retinol = 12 µg β-car) (MinSalud, 2021).

### 6.3.3 Caracterización del PU y MPUA.

El PU y la MPUA se caracterizaron en función de las siguientes propiedades: La  $X_w$  según el método 934.06 (AOAC. 2012). La  $S$  se determinó según la metodología descrita por Estrada et al., (2017) modificada en la relación de dilución (50 mL agua destilada /0.5 g MPUA). La  $H$  se determinó por el método gravimétrico de isotermas de sorción de agua (Muzaffar & Kumar, 2016; Santhalakshmy et al., 2015), utilizando una atmósfera de humedad relativa constante (68,9%), obtenida con una solución sobresaturada de KI a 25 °C en un matraz hermético, se expresó en g H<sub>2</sub>O/100 g. La  $H_u$  se determinó según la metodología de Machado et al. (2014), definido como el tiempo de humectación para que 1 g MPUA se humedezca totalmente y desaparezca de la superficie de un volumen de 100 mL de agua a 25°C. La  $\rho_a$  se determinó midiendo el volumen de 5.0±0.5 g de la muestra en una probeta graduada de 10 mL (Islam et al., 2016). La  $\rho_c$  se determinó según la metodología descrita por Haas et al., (2020). Como indicador fluidez y de cohesión de la MPUA, se determinó el IC ( $100 (1 - (\rho_a/\rho_c))$ ) y la RH ( $\rho_c/\rho_a$ ), teniendo en cuenta la clasificación definida por Carr (1965) y Hausner (1967) (Atalar et al., 2021; Jinapong et al., 2008; Yuksel & Dirim, 2021). El tamaño de partícula se determinó en el analizador de partículas por difracción de luz láser, Mastersizer 3000 (Malvern Instruments), donde se evaluó previamente los índices de refracción y absorbancia de la uchuva (1.368 y 0.475 respectivamente) y se expresó como el diámetro medio de volumen equivalente ( $D_{[4.3]}$ ) (Zotarelli et al., 2017).

La determinación de FT, FLT y la capacidad antioxidante (métodos DPPH y ABTS), se realizaron a partir de un extracto metanólico, obtenido según la metodología de Gallón Bedoya et al. (2020) modificado mediante la mezcla de 1 g de la MPU y 25 mL de metanol/agua (70/30). Los FT se determinaron por el método colorimétrico Folin-Ciocalteu siguiendo la metodología descrita por de los Rios et al. (2021) y a partir de una curva de calibración estándar con ácido gálico construida entre 0- 300 µg AGE/mL ( $R^2 = 0,989$ ), absorbancia a 760 nm (Evolution 60S UV-vis/spectrophotometer; Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA USA), los resultados se expresaron como mg AGE/100 g bs. Los FLT se determinaron por método colorimétrico descrito por Pérez et al. (2020) modificado (500 µL del extracto metanólico se mezclaron con 150 µL de NaNO<sub>2</sub> (5% p/v), 150 µL de AlCl<sub>3</sub> (10% p/v) y 700 µL de NaOH 1M) y a partir de una curva de calibración estándar con quercitina construida entre 10-300 µg/mL, absorbancia a 510 nm, los resultados se expresaron como mg QE/100 g bs. La capacidad antioxidante se determinó por ABTS y DPPH, según la metodología descrita por Gallón Bedoya et al. (2020), y a partir de una curva de calibración con Trolox construida entre 50-250 µM para ABTS y entre 0.02 - 0.12 mg/mL para DPPH, los resultados se expresaron como mg TE/100g bs.

La extracción, identificación de Vit.C se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Lee et al. (2016) modificado. 1 g de muestra se mezcló con 20 mL de una solución de



$\text{KH}_2\text{PO}_4$  (0.02 M, pH: 3.06 ajustado con Ácido Orto-Fosfórico al 85%), agitación con vórtex a temperatura ambiente durante 1 min). Posteriormente, la mezcla se centrifugó durante 15 min a 7084g y el sobrenadante se filtró usando un filtro de jeringa de PVDF de 0,45  $\mu\text{m}$ . La identificación y cuantificación se realizó por HPLC (Prominence UFLC 20A, Shimadzu, Kyoto, Japón), acoplado a un detector de diodos Prominence SPD-M20A, columna Luna® C18 (2) 100 Å (250 mm\* 4.6 mm ID\* 5.0  $\mu\text{m}$ ), fase móvil la misma solución de extracción. Las condiciones de análisis fueron: flujo de fase móvil 1.0 mL/min, temperatura de 35 °C, volumen de inyección 20  $\mu\text{L}$ , longitud de onda de absorción a 244 nm y modo isocrático. Mediante el método de patrón externo se determinó la concentración de Vit.C en la muestra, utilizando una curva estándar de ácido ascórbico (Sigma Aldrich 47863) (0.1 – 50  $\mu\text{g/mL}$ ),  $R^2= 0.999$ , donde el tiempo de retención fue de 4.37 min.

La extracción, identificación del  $\beta$ -car se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Eitzbach et al.(2020) modificado. 1 g de muestra se diluyó en 10 mL de agua, luego se mezclaron con 10 mL de solución hexano-acetona (60:40), la mezcla se centrifugó a 8965g, 5 °C, durante 5 min, el sobrenadante se filtró usando un filtro de jeringa de PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$ . La identificación y cuantificación se realizó por HPLC (Prominence UFLC 20A, Shimadzu, Kyoto, Japón), acoplado a un detector de diodos Prominence SPD-M20A, columna Luna® C18 (2) 100 Å (250 mm\* 4,6 mm ID\* 5.0  $\mu\text{m}$ ), fase móvil Acetonitrilo:Metanol:Acetona (60:30:10). Las condiciones de análisis fueron: flujo de fase móvil 1.2 mL/min, temperatura 45 °C, volumen de inyección 20  $\mu\text{L}$ , longitud de onda de absorción a 450 nm, la separación se realizó en modo isocrático. Mediante el método de patrón externo se determinó la concentración de  $\beta$ -car en la muestra, utilizando una curva estándar de  $\beta$ -car (Sigma Aldrich C4582) (1 – 30  $\mu\text{g/mL}$ ),  $R^2= 0.999$  y tiempo de retención 19.52 min. Los resultados de los componentes activos se expresaron como mg Vit.C /100 g bs y mg  $\beta$ -car /100 g bs; adicionalmente, se expresaron en función del porcentaje del VRN-N en un tamaño de porción de 30 g de MPUA.

El rendimiento del proceso (Y) se determinó a partir de la relación másica de sólidos MPUA/sólidos MPU (Machado et al., 2014).

### **6.3.4 Análisis estadístico, modelamiento y optimización experimental.**

El diseño experimental y el análisis de datos se llevaron a cabo utilizando la metodología de superficie de respuesta, con un nivel de confianza del 95% y se utilizó el software Statgraphics Centurion XVII.II®. Las variables dependientes de la MPUA se reportaron como el valor medio de mediciones por triplicado y se ajustaron a un modelo polinomial de orden 2 (Shrivastava et al., 2021). La optimización experimental de múltiples respuestas se realizó fijando criterios, peso e impacto deseables en el producto final. La validación de los modelos matemáticos se realizó a partir del cálculo del error medio relativo (EMR) (Ecuación 6-1) entre el valor de la variable predicha por el modelo y la respuesta experimental a la condición óptima (3 réplicas).

$$EMR = \left| \frac{\text{Valor modelo} - \text{Valor Experimental}}{\text{Valor modelo}} \times 100 \right| \quad \text{Ecuación 6-1}$$

### 6.3.5 Microestructura del PU y la MPUA.

Las morfologías de las partículas de la MPUA obtenidas a la condición óptima del proceso de aglomeración y el PU utilizado como materia prima, fueron observadas en un microscopio electrónico de barrido (SEM) (JSM-5910, JEOL), siendo recubiertas con oro al vacío previamente. El análisis de las micrografías se realizó en alto vacío, voltaje de aceleración de 10 kV y con aumentos de 300X y 600X (Bhusari et al., 2014; Rayo et al., 2015).

### 6.3.6 Temperatura de transición vítrea.

La temperatura de transición vítrea (Tg) se determinó al PU y a la MPUA obtenida a la condición óptima, siguiendo la metodología descrita por Muzaffar et al. (2016) modificado. Se utilizó un calorímetro diferencial de barrido, modelo DSC Q20 (TA Instruments, EEUU) en modo modulado, con una velocidad de enfriamiento de 10°C/min desde 25°C → -90°C, isoterma a -90 °C durante 1 min y velocidad de calentamiento a 10°C/min desde -90°C → 100°C. Los termogramas así obtenidos, se analizaron para los puntos de inicio, medio y final de la transición vítrea.

### 6.3.7 Análisis bromatológico

El análisis bromatológico se determinó a la MPUA obtenida a la condición óptima, los análisis fueron: contenido de proteína cruda, método de análisis volumétrico (Kjeldahl), factor de conversión: 6.25, método 920.152 (AOAC, 2012), contenido de grasa, método 983.23 (AOAC, 2012), cenizas, método 923.03 (AOAC, 2012) y fibra dietaria total no enzimático según método 993.21 (AOAC, 2012). El contenido de carbohidratos disponibles se determinó por diferencia, se calculó con la siguiente expresión:  $100 - [\text{Peso}_{(\text{proteína} + \text{grasa} + \text{agua} + \text{ceniza} + \text{fibra})}]$  (FAO, 2003). Resultados expresados en bs.

## 6.4 Resultados y discusión

Los valores medios y los valores-p correspondientes al análisis de varianza (ANOVA) de las variables dependientes de la MPUA se muestran en la tabla 6-1 y 6-2 respectivamente. En general, el ANOVA mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para la mayoría de variables dependientes, a excepción de IC, RH, DPPH y Vit.C, lo que muestra una afectación importante de las variables independientes sobre las variables dependientes de la MPUA.

**Humedad.** La Xw de los productos aglomerados son generalmente inferiores al 10%. La Xw es un parámetro importante durante el almacenamiento, asociado al deterioro físico,

químico y biológico de los alimentos (Yuksel & Dirim, 2021). Los valores medios y desviaciones estándar de la  $X_w$  de la MPUA fluctuaron entre  $3.5 \pm 0.0$  y  $6.0 \pm 0.1\%$ . Estos valores de  $X_w$  fueron superiores al PU ( $2.3 \pm 0.0\%$ ) y a PU reportado por Eitzbach et al., (2020) utilizando diferentes microencapsulantes ( $X_w < 5.3\%$ ). La figura 1 presenta los gráficos de superficie y volumen de repuesta de  $X_w$ , S, H y  $H_u$  de MPUA

El ANOVA mostró que la  $X_w$  presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) principalmente por efecto de la T, donde el gráfico de superficie de respuesta (Figura 6-1A) presentó una tendencia de menores valores de  $X_w$  cuando el sistema opera principalmente a altas T ( $60 - 70\text{ °C}$ ), bajas P (1 bar) y en todo el rango de t (zona azul). En el proceso de aglomeración, el aire de fluidización actúa como un portador de calor (Yuksel & Dirim, 2018), confiriendo a las partículas de las MPUA la energía requerida para la evaporación del agente ligante en su superficie. De esta manera, si la T es mayor, favorece una mayor transferencia de calor y masa, lo que reduce los contenidos de  $X_w$  en las partículas (Palzer, 2007). Esta situación es muy evidente observando los experimentos 6, 11 y 12, donde la  $X_w$  fue mayor en la MPUA, debido a que se evaluaron a la T más baja del diseño ( $50\text{ °C}$ ). Atalar et al. (2021), reportaron un comportamiento similar de la T en polvo aglomerado de champiñón común, pero sus valores medios fueron mayores a los de la presente investigación ( $6.8 - 9.9\%$ ).

**Solubilidad.** La S es una propiedad de calidad muy apreciada por el consumidor y en procesos industriales durante la preparación de sistemas alimentarios líquidos (Jafari et al., 2017). Los valores medios de la S de la MPUA fluctuaron entre  $78.8 \pm 1.3$  y  $86.9 \pm 1.3\%$ , siendo en la mayoría de las condiciones evaluadas inferiores a los valores encontrados para el PU ( $88.5 \pm 0.5\%$ ) y similares cuando el sistema operó a altas T ( $70\text{ °C}$ ) y t (40 min). Esta menor S podría atribuirse principalmente a la presencia de las partículas insolubles de la uchuva (semillas y cascara) de mayor tamaño, que en el aglomerado superponen a los sólidos solubles de la MPUA, reduciendo su S. Sin embargo, se considera que los resultados obtenidos son aceptables, ya que la MPUA requiere de un mínimo de energía para su reconstitución como ingrediente alimentario (Akhavan et al., 2016).

**Tabla 6-1:** Propiedades de la MPUA obtenidas por lecho fluidizado en función de las variables independientes según diseño experimental.

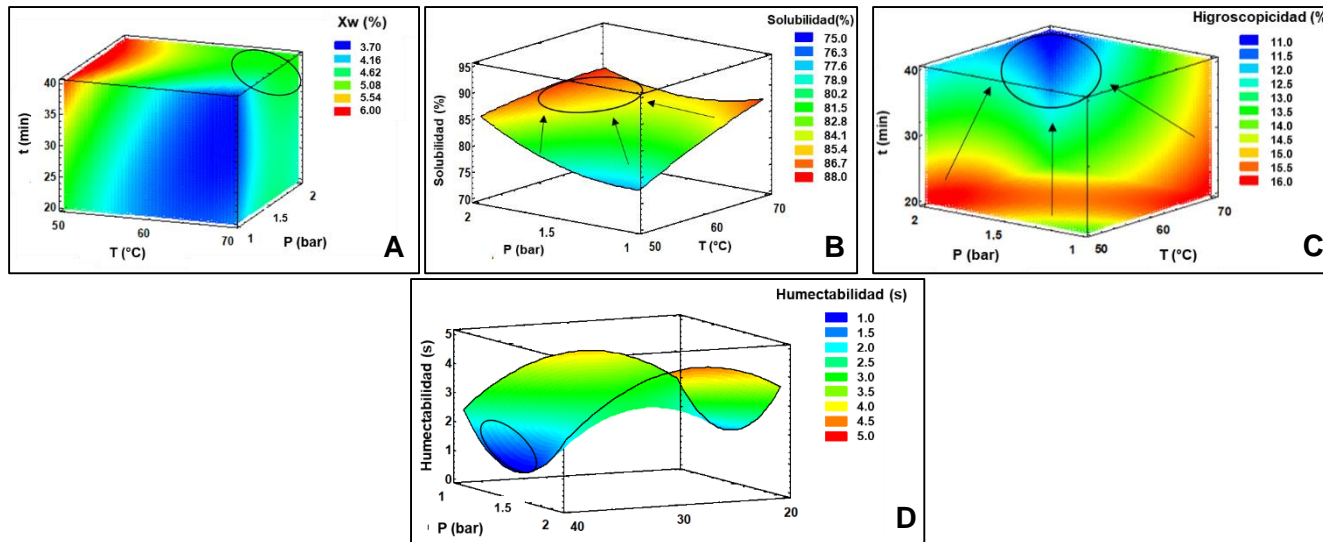
Run	Variables independientes			Variables independientes							
	T (°C)	P (bar)	t (min)	Xw (%)	S (%)	H (%)	Hu (s)	$\rho_a$ (g/mL)	$\rho_c$ (g/mL)	IC	RH
1	70	2.0	20	4.4 ± 0.2	84.3 ± 1.0	13.4 ± 0.8	2.2 ± 0.1	0.582±0.023	0.658±0.029	11.5±0.4	1.13±0.00
2	60	2.0	30	4.0 ± 0.1	77.0 ± 1.3	13.8 ± 0.4	5.0 ± 0.1	0.567±0.007	0.636±0.005	10.8±0.6	1.12±0.01
3	70	1.5	30	4.2 ± 0.2	84.9 ± 0.1	13.9 ± 0.2	2.1 ± 0.1	0.475±0.008	0.620±0.002	25.8±1.2	1.35±0.02
4	70	1.0	40	3.5 ± 0.0	86.9 ± 1.8	14.9 ± 0.1	1.2 ± 0.1	0.474±0.011	0.594±0.005	20.2±0.0	1.25±0.03
5	60	1.5	30	4.2 ± 0.3	85.5 ± 0.5	13.7 ± 0.3	2.4 ± 0.2	0.559±0.006	0.674±0.006	17.1±0.6	1.21±0.01
6	50	2.0	40	6.0 ± 0.1	78.8 ± 0.3	11.9 ± 0.2	1.0 ± 0.0	0.533±0.009	0.587±0.000	9.2±1.5	1.10±0.02
7	60	1.5	30	4.3 ± 0.1	81.8 ± 0.4	13.0 ± 0.0	2.9 ± 0.1	0.597±0.001	0.647±0.001	7.7±0.2	1.08±0.00
8	60	1.5	30	4.7 ± 0.1	83.6 ± 0.4	12.9 ± 0.1	1.7 ± 0.3	0.542±0.009	0.649±0.003	16.5±1.7	1.19±0.02
9	60	1.5	30	4.5 ± 0.1	81.1 ± 0.4	14.1 ± 0.0	2.1 ± 0.0	0.542±0.012	0.655±0.002	17.1±0.6	1.20±0.03
10	60	1.5	40	4.8 ± 0.0	78.8 ± 1.4	13.1 ± 0.1	1.3 ± 0.2	0.487±0.004	0.570±0.004	14.6±0.6	1.17±0.01
11	50	1.0	20	4.7 ± 0.2	80.0 ± 0.4	13.4 ± 0.1	1.5 ± 0.3	0.568±0.011	0.629±0.005	9.7±0.7	1.11±0.02
12	50	1.5	30	5.2 ± 0.0	78.8 ± 0.8	13.3 ± 0.4	2.0 ± 0.1	0.580±0.013	0.663±0.004	12.5±2.1	1.14±0.02
13	60	1.5	20	4.0 ± 0.1	82.2 ± 1.8	15.8 ± 0.2	2.2 ± 0.0	0.551±0.009	0.628±0.007	12.3±0.2	1.14±0.01
14	60	1.0	30	3.7 ± 0.0	82.7 ± 0.8	14.7 ± 0.1	4.7 ± 0.1	0.601±0.011	0.714±0.004	15.8±1.1	1.18±0.01
15	60	1.5	30	4.5 ± 0.1	81.6 ± 1.9	14.0 ± 0.1	2.1 ± 0.0	0.558±0.002	0.610±0.009	8.5±0.7	1.09±0.02
Run	T (°C)	P (bar)	t (min)	$D_{[4.3]}$ (µm)	FT mg AGE/100 g bs	FLT mg QE/100 g bs	DPPH mg TE/100 g bs	ABTS mg TE/100 g bs	Vit. C (mg/100 g bs)	$\beta$ -car (mg /100 g bs)	Y (%)
1	70	2.0	20	67.8 ± 5.1	327.6 ± 6.4	34.2 ± 1.2	158.1 ± 3.1	131.7 ± 5.6	31.5 ± 1.1	77.5 ± 0.8	42.9
2	60	2.0	30	60.4 ± 2.0	322.5 ± 15.7	30.5 ± 1.3	173.2 ± 1.4	143.8 ± 2.4	40.7 ± 6.7	74.9 ± 1.1	32.9
3	70	1.5	30	44.3 ± 1.3	335.5 ± 12.0	31.2 ± 3.6	157.1 ± 20.4	133.7 ± 16.0	44.1 ± 10.4	86.4 ± 3.5	58.0
4	70	1.0	40	51.8 ± 1.8	384.8 ± 14.4	23.3 ± 1.4	183.1 ± 12.5	141.6 ± 5.8	41.4 ± 2.1	88.5 ± 0.6	60.3
5	60	1.5	30	39.3 ± 0.8	325.3 ± 7.7	27.5 ± 1.2	164.8 ± 5.9	130.5 ± 7.7	39.3 ± 2.0	93.6 ± 1.7	56.3
6	50	2.0	40	145.0 ± 2.0	332.9 ± 10.7	29.2 ± 1.6	173.9 ± 2.3	136.2 ± 0.8	34.75±1.05	76.8 ± 2.7	31.4
7	60	1.5	30	50.9 ± 1.8	318.1 ± 6.1	30.2 ± 1.4	169.6 ± 6.4	127.1 ± 4.8	31.9 ± 0.3	80.3 ± 0.6	48.0
8	60	1.5	30	23.1 ± 3.1	331.7 ± 6.1	28.9 ± 0.4	148.8 ± 2.9	127.2 ± 0.9	29.1 ± 3.5	80.9 ± 0.3	54.3
9	60	1.5	30	20.6 ± 0.8	329.6 ± 5.1	25.4 ± 1.2	173.6 ± 3.1	129.5 ± 5.4	47.8 ± 2.1	85.7 ± 3.3	46.3
10	60	1.5	40	25.1 ± 1.4	338.4 ± 3.8	24.5 ± 0.3	176.4 ± 0.7	150.5 ± 4.0	59.6 ± 1.0	120.9 ± 4.5	31.5
11	50	1.0	20	193.4 ± 5.6	357.9 ± 6.9	27.7 ± 0.4	158.1 ± 0.7	140.9 ± 0.5	48.3 ± 0.1	104.9 ± 1.8	38.8
12	50	1.5	30	196.7 ± 5.8	320.5 ± 2.8	29.3 ± 1.2	147.3 ± 1.1	138.9 ± 0.2	40.8 ± 1.2	83.9 ± 3.5	44.8
13	60	1.5	20	186.7 ± 5.8	375.4 ± 6.8	25.5 ± 1.2	147.1 ± 2.4	122.3 ± 1.3	55.3 ± 1.2	57.6 ± 1.9	56.5
14	60	1.0	30	97.0 ± 2.0	356.3 ± 6.6	29.9 ± 1.2	139.1 ± 3.6	128.3 ± 1.4	47.3 ± 3.8	51.2 ± 1.4	63.1
15	60	1.5	30	92.7 ± 2.9	319.0 ± 0.2	28.9 ± 0.6	139.2 ± 0.7	131.0 ± 3.0	63.6 ± 4.1	71.3 ± 1.4	68.6

**Tabla 6-2:** Valores de  $p$  para el modelo de superficie de respuesta de la MPUA.

Interacción	Fuente	Xw	S	H	Hu	$\rho_a$	$\rho_c$	IC	RH	$D_{[4,3]}$	FT	FLT	DPPH	ABTS	Vit.C	$\beta$ -Car	Y
<b>Efectos principales</b>	T	0.0351*	0.0465*	0.5716	0.9623	0.0180*	0.2046	0.1009	0.0672	0.0376*	0.2768	0.4586	0.6394	0.3992	0.8719	0.8355	0.3105
	P	0.3788	0.1190	0.4305	0.8196	0.3134	0.0457*	0.4580	0.4836	0.5300	0.0398*	0.7861	0.1432	0.0400*	0.7481	0.0986	0.0495*
	t	0.0651	0.2046	0.0432*	0.4580	0.0887	0.1064	0.7418	0.7405	0.0308*	0.0293*	0.6562	0.1949	0.0041*	0.8366	0.0029	0.0866
<b>Efectos cuadráticos</b>	T - T	0.0370*	0.5729	0.2428	0.0858	0.1537	0.6061	0.2815	0.2085	0.1539	0.3752	0.1159	0.8991	0.3324	0.4453	0.1887	0.9972
	P - P	0.0721	0.0609	0.8765	0.0267*	0.0495*	0.0958	0.4566	0.4023	0.9375	0.3029	0.1243	0.7583	0.3835	0.5475	0.0385	0.5379
	t - t	0.3613	0.1083	0.6025	0.0412*	0.0680	0.0121*	0.4702	0.4048	0.3366	0.0069*	0.0215*	0.3724	0.3154	0.3916	0.0678	0.2095
<b>Efectos de interacción</b>	T - P	0.2402	0.2103	0.0826	0.8850	0.8480	0.8953	0.8348	0.8077	0.1097	0.0165*	0.2582	0.7255	0.0139*	0.8103	0.0040	0.0910
	T - t	0.1537	0.0785	0.6208	0.9564	0.1163	0.0569	0.9623	0.9862	0.7669	0.6470	0.1084	0.1683	0.0211*	0.8345	0.0294	0.2684
	P - t	0.4020	0.9583	0.4829	0.8197	0.0771	0.1520	0.4366	0.3265	0.5500	0.7901	0.6043	0.8384	0.6570	0.7381	0.5000	0.8310

\*Significancia estadística ( $p < 0.05$ )

**Figura 6-1:** Gráficos de superficie y volumen de respuesta de Xw, S, H y Hu de la MPUA.



El ANOVA presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) de la S solamente con la T, donde el gráfico de volumen de respuesta (Figura 6-1B) ilustra una tendencia a incrementar la S (zona roja - anaranjada) cuando el sistema opera principalmente a altas T altas ( $70^{\circ}\text{C}$ ) y en todo el rango de P y t. Dado que la tasa de evaporación aumenta con el aumento de la T, los puntos de unión se vuelven más secos y porosos, lo cual favorece la velocidad de disolución del agua (Lee et al., 2017).

En general, la bibliografía reporta poca información sobre propiedades de calidad de productos aglomerados. Atalar et al. (2021), obtuvieron valores de S inferiores a la presente investigación en polvo aglomerado de champiñón común (20.8 – 26.8%). Valores de S son reportados principalmente en polvos obtenidos por SA; Cortés et al. (2017) reportaron valores superiores (96.7–98.1%) en PU, atribuyendo principalmente este comportamiento al aditivo de secado utilizado: MD (10 – 40%). Por otro lado, Lee et al., (2017) reportaron igualmente valores superiores (88.4 - 92.4%) en polvo de mandarina, atribuyendo un efecto positivo sobre la velocidad de disolución en la medida que las partículas son más secas.

**Higroscopicidad.** La H es un atributo de calidad importante en polvos aglomerados, la cual describe el fenómeno de adsorción de agua desde el ambiente, generando cambios en el estado de la materia y sobre otras propiedades durante el almacenamiento (Roos & Drusch, 2015). Los valores medios de H en la MPUA fluctuaron entre  $11.9 \pm 0.2$  -  $15.8 \pm 0.2\%$ , lo cual clasifica al producto como ligera - moderadamente higroscópico (Juarez et al., 2017). Se resalta que el PU utilizado presentó valores de H de  $15.3 \pm 0.1\%$ , los cuales fueron superiores a los reportados en PU con obtenidos por SA con MD (DE 19-20) ( $13.0 \pm 0.1\%$ ) (Cortés et al., 2017) y similares a los reportados en PU con MD (DE 12) ( $15.1 \pm 1.5\%$ ) (Etzbach et al., 2020). Por otro lado, en productos aglomerados, la bibliografía reporta valores de H en polvo aglomerado de espinaca (11.9 – 20.0%) (Yuksel & Dirim, 2021).

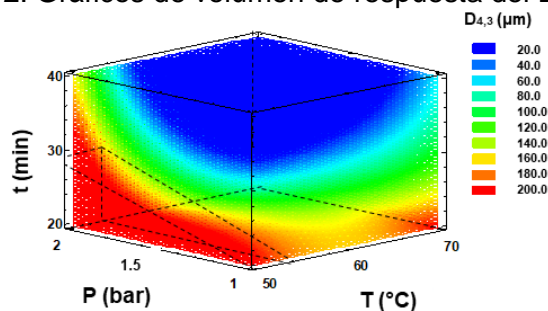
El ANOVA identificó que el t presentó un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre H, donde el gráfico de superficie de respuesta (Figura 6-1C) ilustra los mínimos valores H de las MPUA a altos valores de t, T y P (zona azul). Bajo estas condiciones, los niveles de Xw fueron valores intermedios entre 4.6 y 5.1% (zona verde, figura 6-1A), lo cual garantiza una fuerza motriz intermedia a la transferencia de masa (adsorción de agua) en el entorno de humedad relativa de 68% (Yuksel & Dirim, 2021). Por otro lado, el análisis del comportamiento de H con respecto al tamaño de partícula indicó que, a altos t, T y P se presentaron menores tamaños de MPUA ( $D_{[4,3]} = 20.6 \mu\text{m}$ ) (figura 6-2), donde la adsorción de agua en los puntos activos de la superficie se presenta en los canales por donde se difunde el aire controlado a humedad relativa del 68%. Yuksel & Dirim, (2021) reportaron que aglomerados de mayor tamaño presentaron valores de H más bajos, debido a la menor superficie de contacto con el aire de humedad relativa controlas (81%).

**Humectabilidad.** Los valores medios de Hu de la MPUA fluctuaron entre  $1.0 \pm 0.0$  -  $5.0 \pm 0.1$  s, condición que le confieren excelentes propiedades de humectación e instantaneidad (Fitzpatrick et al., 2017; Quirino et al., 2016). La rápida difusión del agua hacia el interior de la MPUA es la sumatoria de diversos mecanismos de transferencia de masa, inicialmente

debido a las fuerzas capilares y posteriormente debido a la diferencia de potencial químico entre el agua y las MPUA (Bhandari et al., 2013). Se resalta que el PU utilizado como materia prima presenta valores similares a la MPUA ( $2.8 \pm 0.3$  s). El ANOVA presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ) de la Hu con respecto a las interacciones cuadráticas de P y t, denotando en el gráfico de superficie de respuesta (Figura 6-1D) un comportamiento curvilíneo con puntos de inflexión que ilustran mínimos y máximos en la Hu respectivamente. Los puntos de inflexión que denotan los mínimos de Hu se presentan en el gráfico de superficie de respuesta P-t cuando el sistema opera con una P en el rango de 1.3 y 1.7 bar. Valores de Hu inferiores a 1 min, han sido reportados en polvo aglomerado de champiñón común (3.8 – 18.6 s) (Atalar et al., 2021) y en productos obtenidos por SA: polvo de jussara (41 – 91 s) (Quirino et al., 2016) y bebida en polvo de cocoa (7.4 – 21.7 s) (Shittu & Lawal, 2007). Por otro lado, como consecuencia del incremento del tamaño de las partículas, se ve mejorada la Hu, puesto que el agua puede entrar en los poros del polvo aglomerado, por tanto, las partículas aglomeradas pueden humedecerse (Ermiş, 2015), esto se evidencia en los ensayos 6, 11, 12 y 13.

**Tamaño de partícula.** Uno de los principales propósitos del proceso de aglomeración es obtener un aumento del tamaño de las partículas, lo cual contribuye a mejorar ciertas propiedades físicas de los alimentos en polvo, como la  $\rho_a$ ,  $\rho_c$ , Hu, S, fluidez, entre otras; además de, otras características de dispersión, lo cual finalmente contribuye a disminuir el apelmazamiento durante su almacenamiento (Atalar et al., 2021; Yuksel & Dirim, 2021; Ghosal et al., 2010). Esta situación se contrasta fácilmente con los resultados obtenidos en el  $D_{[4,3]}$  de las MPUA ( $20.6 \pm 0.8$  –  $196.7 \pm 5.8$   $\mu\text{m}$ ) bajo un comportamiento bimodal, frente a los valores obtenidos del PU ( $70.3 \pm 1.5$   $\mu\text{m}$ ) utilizada como materia de prima. Algunas investigaciones han reportados una situación similar, encontrando valores superiores de  $D_{[4,3]}$  en aglomerados de polvo de zanahoria, obtenidos de emulsiones y suspensiones (188.8 y 219.1  $\mu\text{m}$  respectivamente) (Haas et al., 2020). El ANOVA presentó diferencias significativas en el  $D_{[4,3]}$  ( $p < 0.05$ ) con respecto a las variables independientes T y t, describiendo el gráfico de volumen de respuesta (Figura 6-2) valores mayores de  $D_{[4,3]}$  (zona roja) cuando el sistema opera aproximadamente a menores T (50 – 56  $^{\circ}\text{C}$ ), P (en todo el rango) y t (20 - 26 min).

**Figura 6-2:** Gráficos de volumen de respuesta del  $D_{[4,3]}$  de las MPUA.



Esta situación corrobora que, el secado en el lecho fluidizado a bajas T produce aglomerados con mayor nivel de Xw, lo que contribuye a la formación de los aglomerados

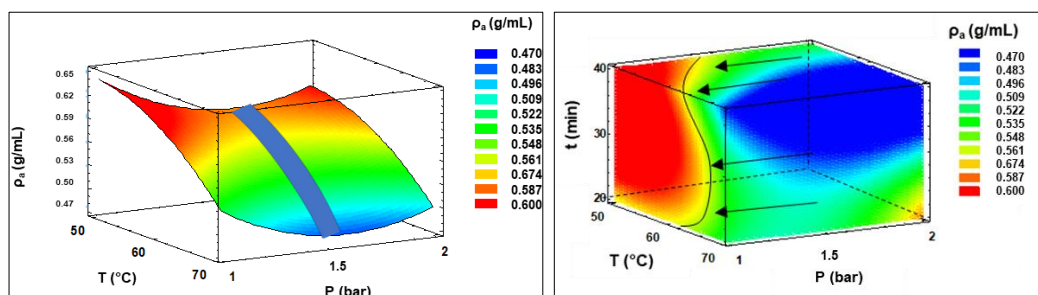
de mayor tamaño (Atalar & Yazici, 2018); por otro lado, esto es revalidado durante la modelación matemática del secado por lecho fluidizado, que permite estimar el mecanismo de aumento de tamaño dominante para los procesos de estratificación, reportando una disminución de la fracción húmeda superficial con el incremento de la T (Rieck et al. 2020). Bajo este contexto, a bajas T, esta mayor fracción superficial húmeda promueve la formación de los aglomerados y se potencia con el t de procesamiento. Por otro lado, el aumento de T conduce a una mayor tasa de evaporación de las gotas pulverizadas, minimizando la agregación de partículas y produciendo aglomerados más pequeños (Strenzke et al., 2020). A pesar de que P no presentó efecto significativo ( $p > 0.05$ ) sobre  $D_{[4.3]}$ , es importante resaltar que se observa una tendencia creciente con el aumento de la P, donde se obtienen un mayor número de gotículas de solución ligante pulverizadas de menor tamaño, que se absorben en forma más homogénea en una mayor área superficial de la partícula, y que finalmente promueve un crecimiento inicial y la formación del aglomerado más rápido (Tan et al., 2006).

**Densidad aparente.** La  $\rho_a$  de matrices secas alimentarias es un parámetro de gran importancia para el diseño de empaques y el cálculo del volumen de transporte (Khenpet et al., 2016). Cuando esta variable es muy baja, aumenta la posibilidad de oxidación del producto, debido al aire interno dentro de su microestructura, lo que reduce su estabilidad durante el almacenamiento (Lourenço et al., 2020). Los valores medios de  $\rho_a$  de las MPUA fluctuaron entre  $0.474 \pm 0.011$  -  $0.601 \pm 0.011$  (g/mL); observándose que, en la mayoría de los experimentos la  $\rho_a$  de las MPUA fueron mayores que la materia prima ( $0.522 \pm 0.028$  g/mL). Esta situación sugiere un efecto combinado; por un lado, el proceso de aglomeración confiere la unión de partículas por la solución ligante y una mayor porosidad a la estructura que hace que disminuya la  $\rho_a$  (Atalar et al., 2021); sin embargo, el incremento del contenido de Xw, mencionado anteriormente, tienen el efecto de incrementar la  $\rho_a$ .

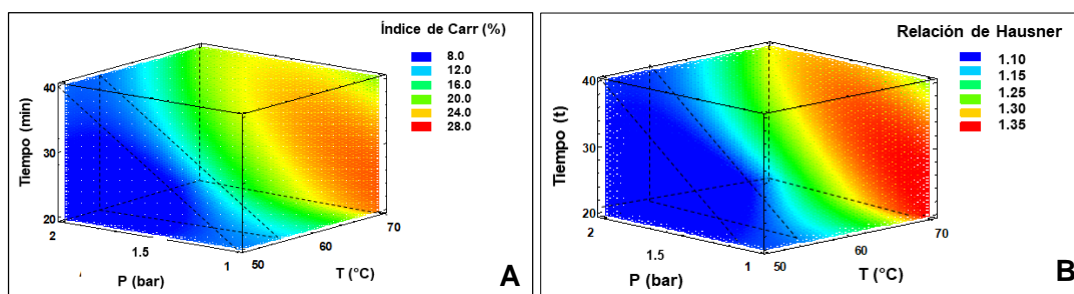
El ANOVA presentó diferencias significativas de la  $\rho_a$  ( $p < 0.05$ ) con respecto a la T y la interacción cuadrática de la P. La figura 6-3 presenta los gráficos de superficie y volumen de respuesta de  $\rho_a$  de las MPUA, observándose un incremento de la  $\rho_a$  con la disminución de T, lo cual se atribuye a que cuando el sistema opera a T bajas conduce a una menor tasa de evaporación y un mayor contenido de Xw en las MPUA, que finalmente ayuda a disminuir la  $\rho_a$  (Khenpet et al., 2016). Por otro lado, la interacción cuadrática de la P sobre la  $\rho_a$  proporciona un comportamiento curvilíneo que minimiza su valor ( $>$  porosidad) cuando el sistema opera a una P entre 1.5 – 1.7 bar, situación que sugiere que las gotículas pulverizadas de la solución ligante interactúan con un mayor número de partículas, confiriendo un mayor número de puentes líquidos, que finalmente generan aglomerados de mayor diámetro y menor  $\rho_a$  (Cuq et al., 2013).

Por otro lado, las propiedades  $\rho_a$  y S son inversamente proporcionales (Lee et al., 2017), lo cual fue evidenciado en la presente investigación, cuando el sistema operó a mayor T, menor fue la  $\rho_a$  y mayor la S. Las condiciones de operación que favorecen una mayor  $\rho_a$  se ilustran en la zona roja del gráfico de volumen de respuesta: T = 50 - 54°C, P = 1.0 – 1.4 bar y t = en todo el rango.



**Figura 6-3:** Gráficos de superficie y volumen de respuesta de la  $\rho_a$  de las MPUA.

**Índice de Carr y relación de Hausner.** El IC y la RH en las MPUA presentaron cambios apreciables con respecto a la materia prima PU (IC:  $39.9 \pm 3.1 \rightarrow (8.5 \pm 0.7 - 25.8 \pm 1.2)$ ) y (RH:  $1.7 \pm 0.1 \rightarrow (1.08 \pm 0.00 - 1.35 \pm 0.02)$ ); por lo que, el proceso de aglomeración, confirió una buena fluidez y la disminución de la cohesividad de la MPUA (cohesividad baja e intermedia) (Jinapong et al., 2008). Por otro lado, el ANOVA no presentó diferencias estadísticas significativas ( $p > 0.05$ ) en estas dos variables; sin embargo, los gráficos de volumen de respuesta (Figura 6-4 A y B), ilustran comportamientos similares, siendo las mejores condiciones de proceso para el IC a: T (50 - 56°C), P (1.4 - 2.0 bar) y t (20 - 33 min) (Figura 6-4 A); mientras que, para la RH a: T (50 - 58°C), P y t (en todo el rango) (Figura 6-4 B). En general, se observa que las condiciones más favorables son coherentes con el comportamiento que presentó el  $D_{[4,3]}$ , incrementado por la unión de partículas en los puentes líquidos formados en su interfase y posteriormente, se fortalece la unión como puentes sólidos durante el secado del lecho (Dhanalakshmi et al., 2011). Este aumento de tamaño de partícula, mejora las características de flujo de los polvos (Atalar et al., 2021), debido a la disminución de las fuerzas cohesivas entre las partículas (Yuksel & Dirim, 2021).

**Figura 6-4:** Gráficos de volumen de respuesta de IC y RH de las MPUA.

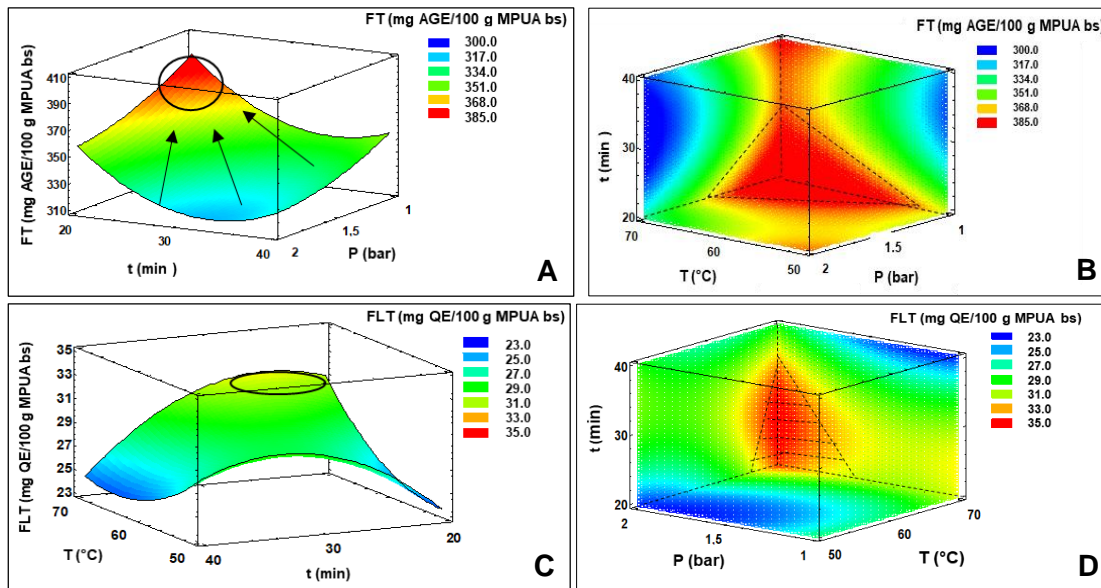
**Fenoles y flavonoides totales.** Los valores medios de los contenidos de FT y FLT de las MPUA variaron entre (318.1 - 384.7 mg AGE/100 g bs) y (23.3 - 34.2 mg QE/100 g bs) respectivamente; siendo valores relativamente similares a los encontrados para el PU ( $353.8 \pm 1.0$  mg AGE/100 g bs y  $26.5 \pm 0.9$  mg QE/100 g bs respectivamente). En general, se observa que las condiciones del proceso de aglomeración afectan los contenidos de FT y FLT en las MPUA, siendo importantes y comparables con lo reportado en otros polvos alimentarios: polvo de melón (FT: 288.5– 279.45 mg AGE/100 g y FLT: 156.34 mg QE/ 100

g) (Li et al., 2021); polvo de papaya (FT 17.2 mg AGE/100 g) (Gomes et al., 2018). En general, son muy pocos los trabajos de investigación en polvos aglomerados; por lo que, no existe información sobre contenidos de componentes activos.

El ANOVA presentó diferencias estadísticas significativas en el contenido de FT ( $p < 0.05$ ) con respecto a las variables independientes P y t; además con, las interacciones P-t y t-t; mientras que, el contenido de FLT estuvo afectado significativamente ( $p < 0.05$ ) solamente por la interacción t-t. La figura 6-5 presenta los gráficos de volumen de respuesta de los FT y FLT en función de las variables independientes, observándose un incremento en el contenido de FT con la disminución de P y t, contribuyendo la interacción P-t a maximizar su contenido (zona roja) cuando el sistema opera principalmente a: P bajas (1.0 – 1.3 bar) y t bajos e intermedios (20 - 24 min), cuando T es alta (58 – 70 °C).

Este comportamiento podría estar relacionado a dos fenomenologías, una donde el mayor t confiere mayor degradación de estos componentes activos (Araujo et al., 2020; Lee et al., 2016) y la otra, cuando el sistema opera a P bajas, la pulverización genera menor número de gotículas de solución aglomerante pero de mayor diámetro (39.5 – 28.5  $\mu\text{m}$ ), las cuales se absorben en un menor número de partículas, pero con mayor cantidad de solución ligante, que promueve una mayor aglomeración y mayor tamaño del aglomerado (mayor protección en el interior (Abberger et al., 2002; Tan et al., 2006). Finalmente, el calor suministrado es utilizado para evaporar el agua de los puentes ligantes, afectando mínimamente el contenido de FT.

**Figura 6-5:** Gráficos de volumen de respuesta de FT y FLT de las MPUA.

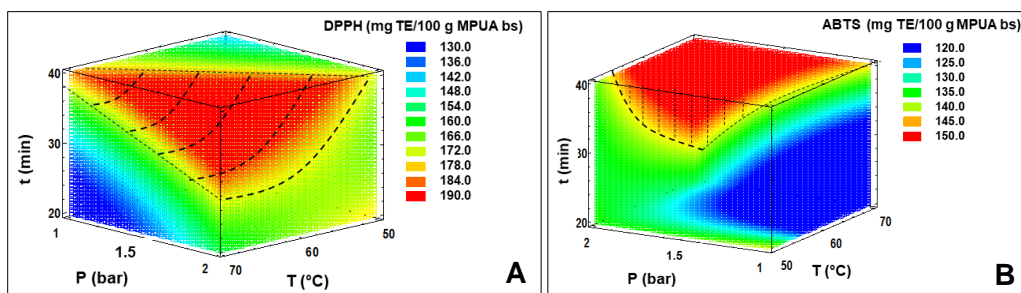


Para el contenido de FLT, el gráfico de superficie (Figura 6-5) de respuesta ilustra un comportamiento curvilíneo denotando puntos o valores máximos en el lado convexo. Por otro lado, el gráfico de volumen de respuesta precisa la región de mayor contenido de FLT (zona roja): P (1.8 – 2.0 bar), t (20 - 28 min) y T (66 – 70°C). Bajo este contexto, los

resultados encontrados no fueron los esperados, dado que, diversas investigaciones han reportado degradación de FLT principalmente por el stress térmico conferido a altas T (Mishra et al., 2014). Esto ha sido revalidado por Viegas & Taranto, (2018) antocianinas (grupo de flavonoides) del polvo aglomerado de mora y colágeno. Esta mayor conservación de los FLT en el MPUA a mayores temperaturas, podría estar soportado principalmente por los tiempos cortos de proceso, lo cual ha sido reportado en algunas investigaciones (Gomes et al., 2018).

**Actividad antioxidante (ABTS y DPPH).** Los valores medios de DPPH y ABTS de las MPUA variaron entre (139.1±3.6 - 183.1±12.5 mg TE/100 g bs) y (122.3±1.3-150.5±4.0 mg TE/100 g bs) respectivamente; siendo los valores de DPPH superiores a los encontrados para el PU (137.3±1.5 mg TE/100 g bs) e inferiores para el ABTS (158.5±0.1 mg TE/100 g bs). En general, se observa que el proceso de aglomeración confiere incremento en el DPPH, proporcionado principalmente por la adición de la Vit.C en la solución ligante; causado por su actividad atrapadora de radicales libres. Algunos autores han establecido que la Vit.C reacciona inmediatamente con el radical DPPH en un ambiente semipolar y no con otros radicales libres presentes en la muestra (Liu et al., 2008). Adicionalmente, el proceso confiere una disminución del ABTS, lo cual puede atribuirse a efectos en la matriz por las condiciones operativas, impuestas durante la aglomeración, que disminuyen la extracción de los compuestos fenólicos y los FLT de naturaleza polar y no polar, los cuales podrían reaccionar principalmente con el radical ABTS. También es conocido que los mecanismos que gobiernan los antioxidantes, HAT (transferencia de átomos de hidrógeno) y SET (transferencia de un solo electrón), coexisten y su equilibrio se caracteriza por la estructura del antioxidante y del pH (Gülçin, 2012); además, la mayoría de antioxidantes en las frutas se encuentran como mezclas complejas de compuestos que pueden reaccionar de forma diferente con los radicales individuales o influirse entre sí de forma sinérgica o antagónica (Mareček et al., 2017; Sonam & Guleria, 2017). Se resalta que, ambos métodos tienen el principio de estabilización de radicales mediante HAT; por lo que, las diferencias de valores en DPPH y ABTS pueden igualmente deberse a las diferencias de selectividad de la reacción de los radicales y los diferentes compuestos en el polvo aglomerado, capaces de reaccionar y eliminar diferentes radicales (Rigon & Zapata, 2016).

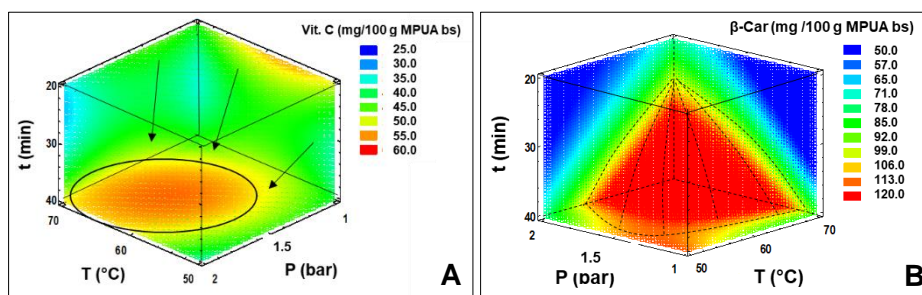
**Figura 6-6:** Gráficos de volumen de respuesta de la actividad antioxidante (DPPH y ABTS) de las MPUA.



El ANOVA no presentó diferencias estadísticas significativas del DPPH ( $p > 0.05$ ) con respecto a ninguna variable independientes, ni con sus interacciones lineales ni cuadráticas. Se observa en el gráfico de volumen de respuesta (Figura 6-6A), que el DPPH presenta los mejores niveles en la zona roja, la cual se presenta bajo diferentes combinaciones T, P y t: (70°C, 1 bar y 40 min)  $\rightarrow$  (T: 70 – 54°C, P: 2 bar y t: 32 – 40 min). Por otro lado, el ABTS estuvo afectado estadísticamente por la P, t, y las interacciones lineales T – P y T – t ( $p < 0.05$ ), observándose en el gráfico de volumen de respuesta (Figura 6-6B), que este se favorece igualmente a diferentes combinaciones T, P y t: (70°C; 2.0-1.2 bar y 40-26 min)  $\rightarrow$  (T: 52°C, P: 1.4 – 2.0 bar y t: 28 - 40 min). En general, los niveles obtenidos en las MPUA son importantes y comparables con lo reportado en otros polvos alimentarios: polvo de papaya (DPPH: 51.0 mg/100 g y ABTS: 45.0 mg/100 g) (Gomes et al., 2018).

**Vitamina C y  $\beta$  caroteno.** En el proceso de aglomeración, los valores medios de la Vit.C y el  $\beta$ -car en las MPUA fluctuaron entre 29.1 - 63.6 mg/100 g bs y 51.2 - 120.9 mg /100 g bs respectivamente, lo cual corresponde a (10.0 – 22.0 %VRN-N Vit.C/30 g) y (154.1 – 359.7%VRN-N  $\beta$ -car/30 g). El ANOVA no mostró diferencias estadísticas en la Vit.C ( $p > 0.05$ ) con ninguna de las variables independientes ni con sus interacciones; mientras que, el  $\beta$ -car estuvo afectado estadísticamente ( $p < 0.05$ ) con el t, y con las interacciones T-P, T-t, T-T y P-P. Frente a los valores de Vit.C y  $\beta$ -car que presentó el PU utilizado (29.3 $\pm$ 1.9 mg /100 g bs y 129.4 $\pm$ 2.3 mg/100 g bs respectivamente), se observa que el proceso de aglomeración confiere en las MPUA cambios composicionales de estos componentes activos, alcanzando ganancias en la Vit.C entre (7.5 -117.1%) y pérdidas del  $\beta$ -car entre (6.6 - 60.4%).

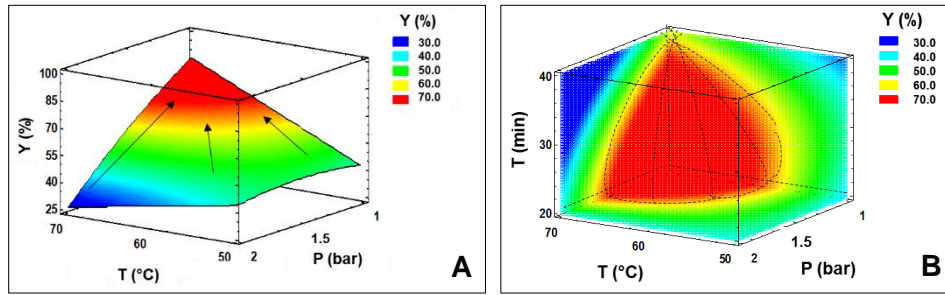
La figura 6-7A ilustra los gráficos de volumen de respuesta de la Vit.C y el  $\beta$ -car en función de las variables independientes. La Vit.C no muestra una tendencia bien definida del efecto de las variables independientes, este comportamiento podría ser debido a la resultante de dos fenomenologías, una que resalta la sensibilidad que presenta al calor y a la oxidación, y la otra, debido al efecto protector de los encapsulantes (maltodextrina y goma arábica) del PU utilizado (Islam et al., 2017). Sin embargo, al ser la Vit.C un componente termolábil, su contenido está afectado por diversos factores de proceso y ambientales (temperatura, tiempo, humedad relativa, O<sub>2</sub>, luz, entre otros) (Fennema & Tannenbaum, 2010). Se ha reportado que estos cambios son consecuencia del desencadenamiento de reacciones bioquímicas que involucran su oxidación de forma reversible a ácido deshidroascórbico (DHAA) (Dewhirst & Fry, 2018), la cual también exhibe cierta actividad de Vit.C; posteriormente, puede ocurrir la hidrólisis de forma irreversible para generar ácido dicetogulónico (pérdida total de su actividad biológica) (Estevinho et al., 2016); así como también, la degradación por descarboxilación y la generación por polimerización de productos inactivos nutricionalmente (Dewhirst & Fry, 2018).

**Figura 6-7:** Gráficos de volumen de respuesta de Vit.C y  $\beta$ -car de las MPUA.

Para el  $\beta$ -car, el gráfico de volumen de respuesta (Figura 6-7B) ilustra claramente que las condiciones de proceso más favorables se presentan cuando el sistema opera a T (58 – 70 °C), P (1.2 – 2.0 bar) y t: 30-40 min. Se observa un incremento de  $\beta$ -car en las MPUA cuando el t incrementa y esto se potencia con el incremento de la T (interacción T-t positiva) y con el incremento de la P (interacción T-P positiva). Este comportamiento fue similar a lo reportado por Etzbach et al. (2020), quienes afirman que las diferencias en la retención de carotenoides durante el proceso, pueden ser atribuidas a las diferentes morfologías de partículas, aquellos aglomerados que presentan mayor área superficial (menor tamaño de partícula), muestran contenidos de carotenoides más altos.

**Rendimiento.** El Y del proceso de aglomeración fluctuó entre 31.4 - 68.6%; en la mayoría de los experimentos su valor fue superior al 50 %, lo cual es satisfactorio en la aglomeración de polvos finos, debido a las bajas cargas de PU y a las características adhesivas del material fino, que tiende a pegarse en las paredes de la cámara de fluidización y en los filtros metálicos del equipo (Rodrigues et al., 2020). Machado et al. (2014), reportan mejores valores del Y (55.4 - 90.5%) en aglomeración de proteína de soya; mientras que, Yüksel et al., (2019) reportan valores similares (41.7 - 67.1%) en la aglomeración de leche en polvo mezclado con la adición de algarroba, canela y jengibre en polvo.

El ANOVA presentó diferencias estadísticas significativas del Y ( $p < 0.05$ ) solamente con respecto a la P, mostrando el gráfico de superficie de respuesta (Figura 6-8A) la tendencia de incrementar el Y cuando la P disminuye y principalmente a T altas (70°C). Por otro lado, el gráfico de volumen de respuesta (Figura 6-8B), muestra claramente la región (zona roja) donde el Y es más favorable: T (60 – 70°C), P (1.0 – 1.5 bar) y t (20 – 36 min). Esta situación podría relacionarse a que cuando el sistema opera a mayores T, existe una fuerza motriz mayor a la transferencia de calor, que produce una mayor y rápida velocidad de evaporación del agua de la solución ligante, generando aglomerados más secos y menos adhesivos (Mehr et al., 2012).

**Figura 6-8:** Gráfico de superficie y volumen de respuesta de rendimiento de MPUA.

**Optimización experimental.** La tabla 6-3 presenta la optimización experimental de múltiples respuestas del proceso de aglomeración de MPUA, la cual describe los criterios, considerados: minimizar ( $X_w$ ,  $H$ ,  $H_u$ ), maximizar ( $S$ ,  $\rho_a$ ,  $D_{[4,3]}$ ,  $FT$ ,  $FLT$ ,  $DPPH$ ,  $ABTS$ ,  $Vit.C$  y  $\beta$ -car) y se fijaron el  $IC$  y  $RH$  en 15 y 1.15 respectivamente.

**Tabla 6-3:** Optimización experimental del proceso de aglomeración de la MPUA.

Respuesta	Criterio	Impacto	Peso	Valor teórico	Valor experimental	EMR (%)
$X_w$ (%)	Minimizar	4.0	0.5	3.5	$4.3 \pm 0.1$	22.8
$S$ (%)	Maximizar	4.0	1.0	86.5	$80.5 \pm 0.8$	6.9
$H$ (%)	Minimizar	4.0	0.5	15-0	$14.4 \pm 0.5$	4.0
$H_u$ (s)	Minimizar	4.0	1.0	2.7	$2.3 \pm 0.1$	14.8
$\rho_a$ (g/mL)	Maximizar	4.0	0.5	0.518	$0,588 \pm 0,021$	13,5
$IC$	15,0	4,0	0,5	20.7	$11.9 \pm 2.5$	42.5
$RH$	1.15	4,0	0,5	1.26	$1.11 \pm 0.02$	11.9
$D_{[4,3]}$ ( $\mu m$ )	Maximizar	4.0	0.5	61.8	$136.0 \pm 2.2$	120.1
$FT$ (mg AGE/100 g MPUA bs)	Maximizar	4.0	0.5	374.9	$366.7 \pm 2.5$	2.2
$FLT$ (mg QE/100 g MPUA bs)	Maximizar	4.0	0.5	26.6	$26.5 \pm 0.9$	0.4
$DPPH$ (mg TE/100 g MPUA bs)	Maximizar	4.0	0.5	163.8	$163.5 \pm 2.6$	0.2
$ABTS$ (mg TE/100 g MPUA bs)	Maximizar	4.0	0.5	132.2	$133.0 \pm 1.1$	0.6
<u>Vit. C</u>						
(mg/100 g MPUA bs)	Maximizar	4.0	0.5	40.6	$42.2 \pm 2.5$	3.9
(%VRN-N/30 g MPUA)*	-----	-----	-----	----	$14.6 \pm 0.9\%$	----
<u><math>\beta</math>-car</u>						
(mg /100 g MPUA bs)	Maximizar	4.0	0.5	64.3	$72.4 \pm 2.1$	12,6
(%VRN-N/30 g MPUA)*					$216.5\% \pm 6.3\%$	
$Y$ (%)	Maximizar	5.0	3.0	68.1	$62.5 \pm 3.3$	8.2

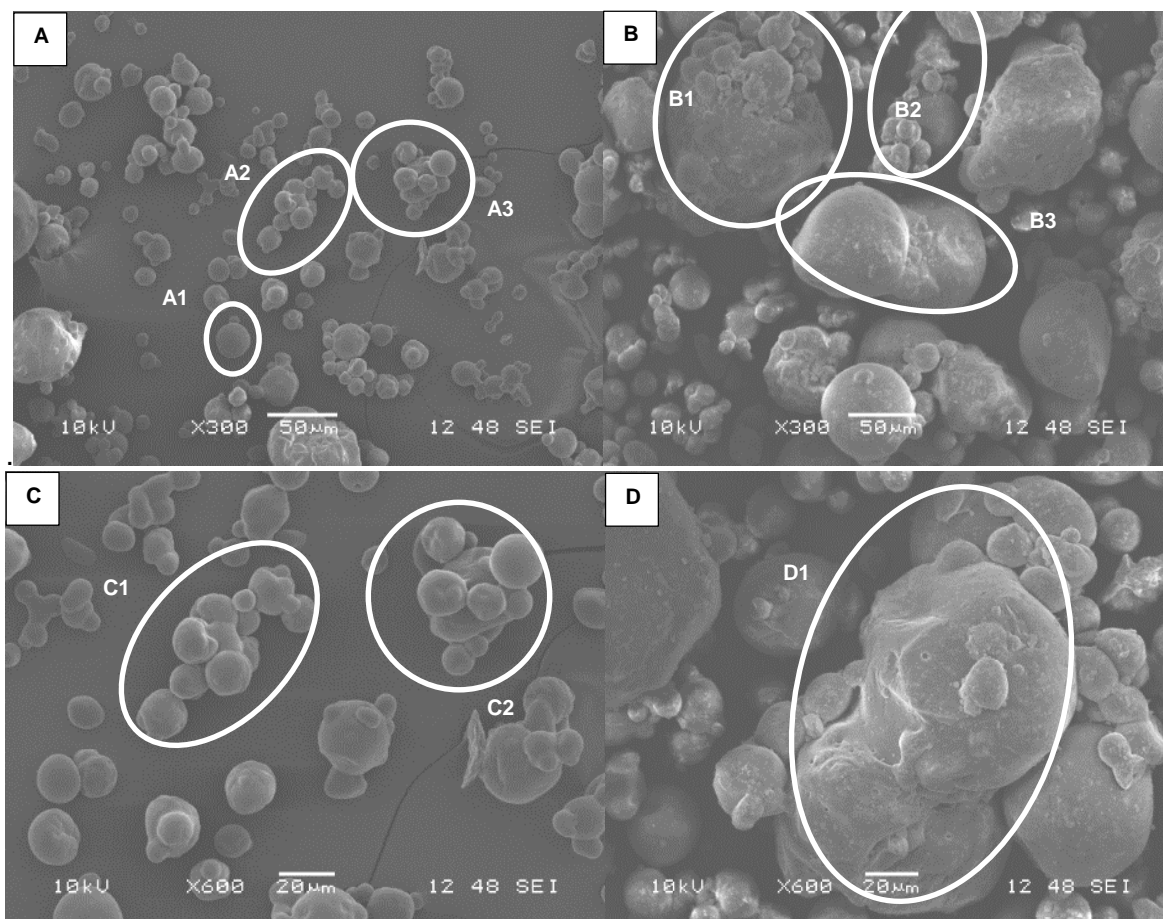
Adicionalmente, se establecieron para cada variable su peso e impacto teniendo en cuenta los resultados del ANOVA. La optimización de múltiples respuestas alcanzó una deseabilidad de 63.8% y definió las variables independientes así:  $T = 68.4$  °C,  $P = 1.1$  bar,  $t = 36.5$  min. En general, la validación de los modelos a partir del ERM fue aceptable, donde el 80% de las variables dependientes presentó valores de EMR < 20% a excepción de  $X_w$ ,  $IC$  y  $D_{[4,3]}$ .

**Microestructura de las MPUA.** La figura 6-9A y 6-9C presentan las micrografías obtenidas por SEM de PU utilizada como materia prima, con aumentos 300X y 600X. Se observa que las partículas de PU son más pequeñas que las MPUA, presentando algunas partículas

formas esférica e individuales y con superficie lisa (A1); igualmente, se observan algunas partículas finas aglomeradas (A2, A3, C1 y C2), como consecuencia de las altas fuerzas de cohesión entre los componentes superficiales de las partículas obtenidas en el proceso de secado por aspersión (Atalar & Yazici, 2019; Dacanal & Menegalli, 2010; Jafari et al., 2017).

Por otro lado, las figuras 6-9B y 6-9D presentan las MPUA obtenidas a la condición óptima definida, con aumentos 300X y 600X, donde se observan partículas aglomeradas con superficie rugosa y porosa, superficialmente algo colapsadas y con mayor tamaño de partícula, las cuales fueron inducidas durante el proceso de aglomeración debido a la formación de puentes líquidos de la solución ligante y posterior solidificación, (B1, B2 y B3) (Juárez et al., 2017); adicionalmente, este incremento del tamaño se potencia con el espesor del recubrimiento formado sinérgicamente por los encapsulantes MD y GA (Ramakrishnan et al., 2018).

**Figura 6-9:** Micrografías por SEM del PU (A y C) y de la MPUA (B y D) a la condición óptima de aglomeración.



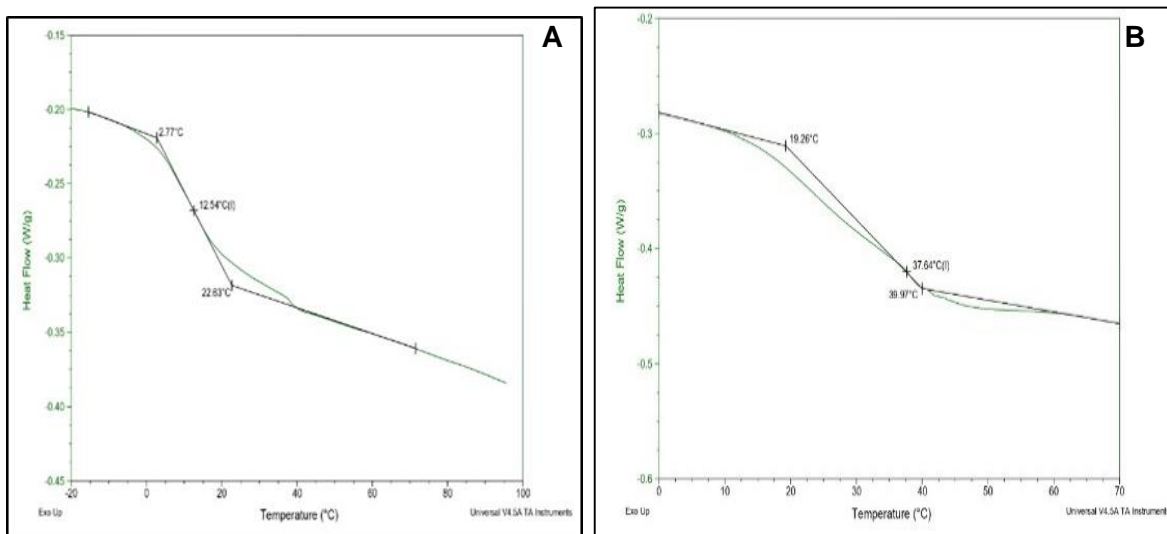
Estos resultados concuerdan con la investigación de Machado et al. (2014), en la aglomeración de aislado de proteína de soya, donde las partículas secadas por aspersión fueron más pequeñas y esféricas, y las aglomeradas de mayor tamaño y con superficie

arrugada y porosa. Por otro lado, Cuq et al. (2013), establecen que en el proceso de aglomeración se dan dos mecanismos que contribuyen al crecimiento de las partículas: 1) por formación de capas (adhesión de partículas o pequeños aglomerados en la superficie de un aglomerado de mayor tamaño), el cual podría corresponder a los puntos B1 y B2, 2) por coalescencia (contacto entre dos aglomerados del mismo tamaño), correspondientes a los puntos B3 y D1). Las MPUA al presentar menor esfericidad, superficies irregulares y rugosas, presentaron mejores propiedades instantáneas, debido a que la superficie irregular permite incrementar la absorción de líquidos (Favaro et al., 2020).

**Temperatura de transición vítrea.** La Tg representa un parámetro clave que influye sobre la estructura y composición de polvos alimentarios; además, identifica materiales en estado amorfo (estado no termodinámico, estado metaestable), muy importante en la estabilidad del producto durante el almacenamiento. Estas sustancias amorfas cuando son almacenamiento por debajo de la Tg se encuentran en un estado amorfo vítreo, con una baja movilidad molecular del agua presente; mientras que, por encima de la Tg la materia alcanza un estado amorfo gomoso, donde la movilidad molecular del agua se incrementa drásticamente, acelerándose los fenómenos de deterioro (Bhandari et al., 2013). Un valor de Tg elevado es deseable para los alimentos en polvo, ya que mejora su estabilidad fisicoquímica, evitando fenómenos de cohesividad y apelmazamiento y mejorando su vida útil (Ramakrishnan et al., 2018).

Las figuras 6-10 A y B presentan las Tg del PU (12.5 °C) y MPUA (37.6 °C) respectivamente, indicando una mejor estabilidad fisicoquímica de las MPUA que las del PU, y causado principalmente por la adición del anticompactante (dióxido de silicio) en las MPUA, el cual tiene un Tg del orden de 1237.8 °C (Ojovan, 2004). Existe una relación entre la H y la Tg (Ramakrishnan et al., 2018), donde estructuras con mayor absorción de agua, confieren una mayor plasticidad del material y una disminución de la Tg. Para garantizar el estado amorfo vítreo y una alta vida útil, algunas investigaciones sugieren que el producto sea almacenado máximo a una temperatura correspondiente a Tg - 20°C (Palzer, 2007); sin embargo, para el PU se sugiere una temperatura de almacenamiento bajo refrigeración (4 °C); mientras que, para las MPUA de 15-18 °C.



**Figura 6-10:** Temperaturas de transición vítrea del PU y MPUA.

**Análisis bromatológico.** Se resalta que, el contenido de proteína cruda de la MPUA (4.2 g/100 g bs) fue mayor a lo reportado por Alcantara et al. (2018), en polvo de limón a diferentes concentraciones de maltodextrina (1.90 – 2.12 g/100 g bs), por otro lado, el contenido de grasa de MPUA fue de <0.48 g/100 g bs (aporte proveniente de los aceites presentes en la semilla en la MPUA). En uchuva se ha reportado 1.9 g de aceite/100 g bs (Ramadan & Morsel, 2003), lo cual representa un valor superior a la MPUA. El contenido de cenizas de MPUA fue de 3.37 g/100 g bs, encontrándose en el rango de polvo aglomerado de leche de soya (3.1 – 5.0 g/100 bs) (Jinapong et al., 2008), mayor al polvo aglomerado de champiñón común (2 g/100 g bs) (Atalar et al., 2021), menor al polvo de limón (14.6 - 16.1 g/100 g bs) (Alcantara et al., 2018) y al polvo de subproductos de residuos de naranja para ser utilizado como material de pared en SA ( $4.3 \pm 0.1$  g/100 g) (Kaderides & Goula, 2017). La fibra dietaria de MPUA fue de 32.0 g/100 g bs, la cual proviene principalmente de la cascarilla de la semilla de uchuva, siendo este valor inferior al reportado por de Moraes Crizel et al. (2013), en fibra de naranja (mezcla de cáscara, pulpa y semillas y cáscaras) ( $46.2 \pm 2.3$  g/100 g bs). Los carbohidratos disponibles de MPUA fueron de 51.6 g/100 g bs, valores similares al polvo aglomerado de champiñón común (56.3 g/100 g bs) (Atalar et al., 2021). Puente et al. (2011), reporta en 100 g de fruta fresca un promedio de 0.3 – 1.9 g de proteína, 0.0 – 0.5 g de grasa, 0.7 – 1.0 g de cenizas, 0.4 – 4.9 g de fibra y 11.0 – 19.6 g de carbohidratos totales. Por otro lado, en polvo de residuos de uchuva Mokhtar et al. (2018), se reportan valores superiores al MPUA: proteína:  $15.89 \pm 0.01$  g/100 g bs, grasa:  $13.72 \pm 0.11$  g/100 g bs, cenizas:  $3.52 \pm 0.16$  g/100 g bs, carbohidratos:  $61.00 \pm 0.18$  g/100 g bs, a excepción de la fibra dietaria:  $16.74 \pm 0.24$  g/100 g

La resolución 810 (MinSalud, 2021), establece en sus valores diarios de referencia de nutrientes – necesidades (VRN-N), 50 g de proteína, 66 g de grasa total, 28 g de fibra dietaria y 300 g carbohidratos totales. Se considera que una porción de 30 g de la MPUA

aportará al VRN-N el 2.64% de proteína, 0.23% de grasa, 35.8% de fibra dietaria y 8.7% de carbohidratos totales (carbohidratos disponibles y fibra dietaria), por tanto, se considera que la MPUA es un producto rico en fibra dietaria.

## 6.5 Conclusiones

El uso de la metodología de superficie de respuesta como herramienta estadística, permitió la definición de las condiciones óptimas del proceso de aglomeración del PU, bajo una deseabilidad de aproximadamente 64%, la cual se consideró aceptable, dado que se evaluaron 15 variables dependientes. En general, los atributos de calidad de las MPUA obtenidas a la condición óptima de proceso, identifican al producto con un mayor contenido de Xw que el PU utilizado como materia prima; sin embargo, el nivel alcanzado garantiza la seguridad microbiológica de las MPUA; además, se evidenció el incremento del tamaño de partícula experimentalmente y por micrografías, lo cual favoreció las propiedades de instantaneidad y de flujo, reflejados en los valores encontrados de S, Hu, IC y RH.

El proceso de aglomeración por lecho fluidizado del PU utilizando una solución ligante de agua + Vit.C contribuye a incrementar el valor nutricional de las MPUA, alcanzando un aporte del  $14.6 \pm 0.9$  %VRN-N Vit. C en 30 g de porción, con la cual se prepararía 250 g de una bebida con aproximadamente 11 °Brix, la cual ajusta dentro de la normativa colombiana a un néctar. Adicionalmente, se resalta que las MPUA en este mismo tamaño de porción aportan un  $216.6 \pm 6.3$  %VRN-N  $\beta$ -car, establecida en la normatividad colombiana. Estos resultados obtenidos reflejan importantes contenidos de componentes activos y un potencial efecto antioxidante.

Bajo este contexto, la MPUA se proyecta para la preparación de una bebida funcional por reconstitución directa; otorgada esta propiedad por sus compuestos bioactivos y sus composición bromatológica; además, puede ser usada como materia prima de uso en diversos sectores de la industria alimentaria (bebidas, postres, panadería, pastelería, geles, entre otras), cosmética y farmacéutica; sin embargo, para garantizar una buena estabilidad de la MPUA durante el almacenamiento, se sugieren que esta se realice a temperaturas inferiores a 20 °C.

## 6.6 Bibliografía

- Abberger, T., Seo, A., & Schæfer, T. (2002). *The effect of droplet size and powder particle size on the mechanisms of nucleation and growth in fluid bed melt agglomeration*. 249, 185–197.
- Akhavan, S., Mahdi, S., Assadpoor, E., & Dehnad, D. (2016). Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin, gum Arabic and gelatin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 85, 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.011>
- Alcantara, Y., Alcantara, Y., Tejada, A., & Ros, G. (2018). Effect of different concentrations of pulverized mesocarp of *Citrus paradisi* Macf. on the bromatological characteristics of spray-dried lemon juice powder. *Food Science and Nutrition*, 6(5), 1261–1268. <https://doi.org/10.1002/fsn3.679>

- AOAC, A. of O. A. C. (2012). *Official Methods of Analysis* (K. Helrich (ed.); 19th ed.).
- Araujo, H. C. S., Jesus, M. S., Leite Neta, M. T. S., Gualberto, N. C., Matos, C. M. S., Rajan, M., Rajkumar, G., Nogueira, J. P., & Narain, N. (2020). Effect of maltodextrin and gum arabic on antioxidant activity and phytochemical profiles of spray-dried powders of sapota (*Manilkara zapota*) fruit juice. *Drying Technology*, 39(3), 392–404. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1839487>
- Atalar, I., Kurt, A., Saricaoğlu, F., Gül, O., & Gençcelep, H. (2021). Agglomerated mushroom (*Agaricus bisporus*) powder: Optimization of top spray fluidized bed agglomeration conditions. *Journal of Food Process Engineering*, 44(6), 1–12. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13687>
- Atalar, I., & Yazici, F. (2018). Influence of top spray fluidized bed agglomeration conditions on the reconstitution property and structure modification of skim yoghurt powder. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13414>
- Atalar, I., & Yazici, F. (2019). Effect of different binders on reconstitution behaviors and physical, structural, and morphological properties of fluidized bed agglomerated yoghurt powder. *Drying Technology*, 37(13), 1656–1664. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1529038>
- Barkouti, A., Turchiuli, C., Carcel, J. A., & Dumoulin, E. (2013). Milk powder agglomerate growth and properties in fluidized bed agglomeration. *Dairy Science and Technology*, 93(4–5), 523–535. <https://doi.org/10.1007/s13594-013-0132-7>
- Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (2013). *Handbook of Food Powders* (B. Bhandari, N. Bansal, M. Zhang, & P. Schuck (eds.)). Woodhead Publishing Limited.
- Bhusari, S. N., Muzaffar, K., & Kumar, P. (2014). Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. *Powder Technology*, 266, 354–364. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.038>
- Bravo, K., Sepulveda-Ortega, S., Lara-Guzman, O., Navas-Arboleda, A. A., & Osorio, E. (2015). Influence of cultivar and ripening time on bioactive compounds and antioxidant properties in Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(7), 1562–1569. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6866>
- Cortés, M., Hernández, G., & Estrada, E. (2017). Optimization of the spray drying process for obtaining cape gooseberry powder: an innovative and promising functional food. *Vitae*, 24(1), 59–67. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n1a07>
- Cuq, B., Mandato, S., Jeantet, R., Saleh, K., & Ruiz, T. (2013). Agglomeration/granulation in food powder production. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.150>
- Dacanal, G. C., & Menegalli, F. C. (2010). Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed fluid bed agglomeration. *Powder Technology*, 203(3), 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.06.023>
- De la Vega, J., Cañarejo, M., Cabascango, O., & Lara, M. (2019). Dehydrated *Physalis peruviana* L. In Two Ripening States and its Effect on Total Phenolic Compounds, Antioxidant Capacity, Carotenes, Color and Ascorbic acid. *Informacion Tecnologica*, 30(5), 91–100. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500091>
- de los Rios, C., Cortés, M., & Arango, J. (2021). Physicochemical quality and antioxidant activity of blackberry suspensions: Compositional and process effects. *Journal of Food Processing and Preservation*. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15498>
- de Moraes Crizel, T., Jablonski, A., de Oliveira Rios, A., Rech, R., & Flôres, S. (2013). Dietary fiber from orange byproducts as a potential fat replacer. *LWT - Food Science and Technology*, 53(1), 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.02.002>
- Dewhirst, R. A., & Fry, S. C. (2018). *The oxidation of dehydroascorbic acid and 2 , 3-*

- diketogulonate by distinct reactive oxygen species*. *O*, 3451–3470.
- Dhanalakshmi, K., Ghosal, S., & Bhattacharya, S. (2011). Agglomeration of food powder and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(5), 432–441. <https://doi.org/10.1080/10408391003646270>
- Ermış, E. (2015). Food Powders: Properties and Characterization. In E. Ermış (Ed.), *Food Engineering Series*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-48908-3>
- Etzbach, L., Meinert, M., Faber, T., Klein, C., Schieber, A., & Weber, F. (2020). Effects of carrier agents on powder properties, stability of carotenoids, and encapsulation efficiency of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) powder produced by co-current spray drying. *Current Research in Food Science*, 3(November 2019), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.03.002>
- Etzbach, L., Pfeiffer, A., Weber, F., & Schieber, A. (2018). Characterization of carotenoid profiles in goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruits at various ripening stages and in different plant tissues by HPLC-DAD-APCI-MSn. *Food Chemistry*, 245(August 2017), 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.120>
- Eun, J. B., Maruf, A., Das, P. R., & Nam, S. H. (2020). A review of encapsulation of carotenoids using spray drying and freeze drying. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(21), 3547–3572. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1698511>
- FAO. (1995). Codex Alimentarius: Food Additives. In *General standard for food additives* (p. 480). <https://sis.binus.ac.id/2016/12/15/pasar-monopoli/>
- FAO, F. and A. O. of the U. N. (2003). Food energy – methods of analysis and conversion factors. In *FOOD AND NUTRITION PAPER 77*.
- Favaro, R., Gomes, J., Andreola, K., & Pereira, O. (2020). Wettability improvement of pea protein isolate agglomerated in pulsed fluid bed. *Particulate Science and Technology*, 38(4), 511–521. <https://doi.org/10.1080/02726351.2019.1574940>
- Fennema, O., & Tannenbaum, S. (2010). Introducción a la química de los alimentos. *Química de Los Alimentos*, 3–27.
- Fitzpatrick, J., Salmon, J., Ji, J., & Miao, S. (2017). Characterisation of the wetting behaviour of poor wetting food powders and the influence of temperature and film formation. *KONA Powder and Particle Journal*, 34(34), 282–289. <https://doi.org/10.14356/kona.2017019>
- Gallón, M., Cortés, M., & Gil, J. (2020). Physicochemical stability of colloidal systems using the cape gooseberry, strawberry, and blackberry for spray drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(9), 1–10. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14705>
- Ghosal, S., Indira, T. N., & Bhattacharya, S. (2010). Agglomeration of a model food powder: Effect of maltodextrin and gum Arabic dispersions on flow behavior and compacted mass. *Journal of Food Engineering*, 96(2), 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.07.016>
- Gomes, W. F., França, F. R. M., Denadai, M., Andrade, J. K. S., da Silva Oliveira, E. M., de Brito, E. S., Rodrigues, S., & Narain, N. (2018). Effect of freeze- and spray-drying on physico-chemical characteristics, phenolic compounds and antioxidant activity of papaya pulp. *Journal of Food Science and Technology*, 55(6), 2095–2102. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3124-z>
- Gülçin, I. (2012). Antioxidant activity of food constituents: An overview. *Archives of Toxicology*, 86(3), 345–391. <https://doi.org/10.1007/s00204-011-0774-2>
- Haas, K., Dohnal, T., Andreu, P., Zehetner, E., Kiesslich, A., Volkert, M., Fryer, P., & Jaeger, H. (2020). Particle engineering for improved stability and handling properties of carrot concentrate powders using fluidized bed granulation and agglomeration. *Powder Technology*, 370, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.065>
- Hirata, T. A. M., Dacanal, G. C., & Menegalli, F. C. (2013). Effect of operational conditions on the properties of pectin powder agglomerated in pulsed fluid bed. *Powder*

- Technology*, 245, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.04.047>
- Islam, M. Z., Kitamura, Y., Kokawa, M., Monalisa, K., Tsai, F. H., & Miyamura, S. (2017). Effects of micro wet milling and vacuum spray drying on the physicochemical and antioxidant properties of orange (*Citrus unshiu*) juice with pulp powder. *Food and Bioprocess Technology*, 101(2012), 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.11.002>
- Jafari, S. M., Ghalegi Ghalenoei, M., & Dehnad, D. (2017). Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. *Powder Technology*, 311, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.070>
- Janiszewska, E. (2017). Carotenoids microencapsulation by spray drying method and supercritical micronization. *Food Research International*, 99, 891–901. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.02.001>
- Jinapong, N., Suphantharika, M., & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering*, 84(2), 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032>
- Juarez, E., Olivas, G., Zamudio, P., Ortega, E., Perez, S., & Sepulveda, D. (2017). Effect of water content on the flowability of hygroscopic powders. *Journal of Food Engineering*, 205, 12–17. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.024>
- Kaderides, K., & Goula, A. M. (2017). Development and characterization of a new encapsulating agent from orange juice by-products. *Food Research International*, 100(July), 612–622. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.057>
- Khenpet, u K., Charoenjarasrerk, N., Jaijit, S., Arayapoonpong, S., & Jittanit, W. (2016). Investigation of suitable spray drying conditions for sugarcane juice powder production with an energy consumption study. *Agriculture and Natural Resources*, 50(2), 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.anres.2015.08.003>
- Lee, K., Eun, J., & Hwang, J. (2016). Physicochemical properties and sensory evaluation of mandarin (*Citrus unshiu*) beverage powder spray-dried at different inlet air temperatures with different amounts of a mixture of maltodextrin and corn syrup. *Food Science and Biotechnology*, 25(5), 1345–1351. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0211-7>
- Lee, K., Yoon, S., Li, F., & Eun, J. (2017). Effects of inlet air temperature and concentration of carrier agents on physicochemical properties , sensory evaluation of spray-dried mandarin ( *Citrus unshiu* ) beverage powder. *Applied Biological Chemistry*, 60(33–40). <https://doi.org/10.1007/s13765-016-0246-8>
- Lourenço, S. C., Moldão-Martins, M., & Alves, V. D. (2020). Microencapsulation of pineapple peel extract by spray drying using maltodextrin, inulin, and Arabic gum as wall matrices. *Foods*, 9(6), 1–17. <https://doi.org/10.3390/FOODS9060718>
- Machado, V. G., Hirata, T. A. M., & Menegalli, F. C. (2014). Agglomeration of soy protein isolate in a pulsed fluidized bed: Experimental study and process optimization. *Powder Technology*, 254, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.01.040>
- Mareček, V., Mikyška, A., Hampel, D., Čejka, P., Neuwirthová, J., Malachová, A., & Cerkal, R. (2017). ABTS and DPPH methods as a tool for studying antioxidant capacity of spring barley and malt. *Journal of Cereal Science*, 73, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.11.004>
- Mehr, H. M., Elahi, M., & Razavi, S. M. A. (2012). Experimental Study on Optimization of the Agglomeration Process for Producing Instant Sugar by Conical Fluidized Bed Agglomerator. *Drying Technology*, 30(5), 505–515. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.647995>
- MinSalud, M. de salud y protección social. (2021). *Resolución No. 810 de 2021* (p. 50).

- Mishra, P., Mishra, S., & Mahanta, C. (2014). Effect of maltodextrin concentration and inlet temperature during spray drying on physicochemical and antioxidant properties of amla (*Embllica officinalis*) juice powder. *Food and Bioproducts Processing*, 92(3), 252–258. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.08.003>
- Mokhtar, S. M., Swailam, H. M., & Embaby, H. E. S. (2018). Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. *Food Chemistry*, 248, 1–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.117>
- Muzaffar, K., Wani, S. A., Dinkarrao, B. V., & Kumar, P. (2016). Determination of production efficiency, color, glass transition, and sticky point temperature of spray-dried pomegranate juice powder. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1144444>
- Ojovan, M. I. (2004). Glass formation in amorphous SiO<sub>2</sub> as a percolation phase transition in a system of network defects. *JETP Letters*, 79(12), 632–634. <https://doi.org/10.1134/1.1790021>
- Olivares, M., Dekker, M., Verkerk, R., & van Boekel, M. (2016). Health-promoting compounds in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.): Review from a supply chain perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 57(Part A), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.009>
- Palzer, S. (2007). *Drying of wet agglomerates in a continuous fluid bed: Influence of residence time, air temperature and air-flow rate on the drying kinetics and the amount of oversize particles*. 62, 463–470. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.09.032>
- Pérez, A., Martínez, G., León, F., & Sánchez, M. (2020). The effect of the presence of seeds on the nutraceutical, sensory and rheological properties of *Physalis* spp. Fruits jam: A comparative analysis. *Food Chemistry*, 302(July 2019), 125141. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125141>
- Puente, L., Pinto, C., Castro, E., & Cortés, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International*, 44(7), 1733–1740. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Quirino, E., De Araújo, V., Monteiro, M., Finotelli, V., Guedes, A., & Perrone, D. (2016). Starch, inulin and maltodextrin as encapsulating agents affect the quality and stability of jussara pulp microparticles. *Carbohydrate Polymers*, 151, 500–510. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.093>
- Ramadan, M. (2011). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Research International*, 44(7), 1830–1836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042>
- Ramadan, M., & Morsel, J. (2003). Oil goldenberry (*Physalis peruviana* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(4), 969–974. <https://doi.org/10.1021/jf020778z>
- Ramakrishnan, Y., Adzahan, N. M., Yusof, Y. A., & Muhammad, K. (2018). Effect of wall materials on the spray drying efficiency, powder properties and stability of bioactive compounds in tamarillo juice microencapsulation. *Powder Technology*, 328, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.018>
- Rayo, L., Chaguri, L., Sardá, F., Dacanal, G., Menezes, E., & Tadini, C. (2015). Production of instant green banana flour (*Musa cavendishii*, var. Nanicão) by a pulsed- fluidized bed agglomeration. *LWT - Food Science and Technology*, 63, 461–469. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.03.059>
- Rieck, C., Bück, A., & Tsotsas, E. (2020). Estimation of the dominant size enlargement mechanism in spray fluidized bed processes. *AIChE Journal*, 66(January), 1–18. <https://doi.org/10.1002/aic.16920>
- Rigon, R., & Zapata, C. (2016). Microencapsulation by spray-drying of bioactive compounds extracted from blackberry (*rubus fruticosus*). *Journal of Food Science and Technology*,

- 53(3), 1515–1524. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2111-x>
- Rodrigues, G., Gomes, L., Nitz, M., & Andreola, K. (2020). A protein powder agglomeration process using açai pulp as the binder: An analysis of the process parameters. *Advanced Powder Technology*, 31(8), 3551–3561. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.07.001>
- Roos, Y., & Drusch, S. (2015). *Phase Transitions in Foods* (Academic Press (ed.); Second Edi). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-06577-5>
- Saad, M. M., Barkouti, A., Rondet, E., Ruiz, T., & Cuq, B. (2011). Study of agglomeration mechanisms of food powders: Application to durum wheat semolina. *Powder Technology*, 208(2), 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.08.035>
- Samborska, K., Boostani, S., Geranpour, M., Hosseini, H., Dima, C., Khoshnoudi-Nia, S., Rostamabadi, H., Falsafi, S. R., Shaddel, R., Akbari-Alavijeh, S., & Jafari, S. M. (2021). Green biopolymers from by-products as wall materials for spray drying microencapsulation of phytochemicals. *Trends in Food Science and Technology*, 108(January), 297–325. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.008>
- Shishir, M., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science and Technology*, 65, 49–67. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- Shittu, T. A., & Lawal, M. O. (2007). Factors affecting instant properties of powdered cocoa beverages. *Food Chemistry*, 100(1), 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.09.013>
- Shrivastava, A., Tripathi, A. D., Paul, V., & Chandra Rai, D. (2021). Optimization of spray drying parameters for custard apple (*Annona squamosa* L.) pulp powder development using response surface methodology (RSM) with improved physicochemical attributes and phytonutrients. *Lwt*, 151(May), 112091. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112091>
- Sonam, K. S., & Guleria, S. (2017). Synergistic antioxidant activity of natural products. *Annals of Pharmacology and Pharmaceutics*, 2(8), 1–6.
- Strenzke, G., Dürr, R., Bück, A., & Tsotsas, E. (2020). Influence of operating parameters on process behavior and product quality in continuous spray fluidized bed agglomeration. *Powder Technology*, 375, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.083>
- Tan, H. S., Salman, A. D., & Hounslow, M. J. (2006). Kinetics of fluidised bed melt granulation I: The effect of process variables. *Chemical Engineering Science*, 61, 1585–1601. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.09.012>
- Vengateson, U., & Mohan, R. (2016). Experimental and modeling study of fluidized bed granulation: Effect of binder flow rate and fluidizing air velocity. *Resource-Efficient Technologies*, 2, S124–S135. <https://doi.org/10.1016/j.refit.2016.10.003>
- Yüksel, H., Çalışkan Koç, G., & Dirim, S. N. (2019). Physical characterization of spray-dried milk powders and their agglomerates with the addition of carob, cinnamon, and ginger powders. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(7), 824–833. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.56798>
- Yuksel, H., & Dirim, N. (2018). Agglomeration process in the fluidized bed, the effecting parameters and some applications. *Hrvatski Časopis Za Prehrambenu Tehnologiju, Biotehnologiju i Nutricionizam*, 13(3–4), 159–163. <https://doi.org/10.31895/hcptbn.13.3-4.10>
- Yuksel, H., & Dirim, S. N. (2021). Application of the agglomeration process on spinach juice powders obtained using spray drying method. *Drying Technology*, 39(1), 19–34. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1832515>
- Ziyani, L., & Fatah, N. (2014). Use of experimental designs to optimize fluidized bed granulation of maltodextrin. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1069–1075. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.02.013>

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 Conclusiones generales

- El aprovechamiento de la estructura completa del fruto de uchuva (pulpa, piel y semilla) en la investigación, permitió desarrollar un proceso sostenible en el marco de la economía circular, ya que se reduce la generación de residuos. Además, la aplicación de las tecnologías secado por aspersión junto con la aglomeración y la integración de procesos representan alternativas tecnológicas eficaces que aportan valor agregado a la cadena agroindustrial de la uchuva y se convierte en un producto innovador y de calidad que contribuye a diversificar sus derivados.
- Se obtuvo una mezcla en polvo de uchuva aglomerado con importantes contenidos de compuestos biológicos (compuestos fenólicos, capacidad antioxidante, vitamina A y vitamina C), fibra dietaria; alta estabilidad fisicoquímica y microbiológica; buenas propiedades de flujo e instantaneidad y composicionalmente con mayor contenido de sólidos ST aportados por la fruta (57.7%), presentándose como un producto con potencial para aplicaciones en la industria alimentaria y farmacéutica.
- La optimización de los procesos de secado y aglomeración, utilizando la metodología de superficie de respuesta y su validación experimental, fueron efectivas para la definición de las condiciones operativas de cada proceso, mostrando en la mayoría de los modelos matemáticos de las variables dependientes buenos ajustes de regresión.

### 7.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio de almacenamiento que permita determinar la estabilidad del polvo de uchuva aglomerado, evaluando las reacciones de deterioro que este pueda experimentar.
- Se sugiere evaluar las propiedades sensoriales del polvo de uchuva aglomerado en tiempo cero y durante su almacenamiento.



- Estudiar la influencia de la simulación digestión gastrointestinal *in vitro* sobre los compuestos biológicos (compuestos fenólicos, capacidad antioxidante, vitamina A y vitamina C), fibra dietaria presentes en el polvo de uchuva aglomerado, su bioaccesibilidad y biodisponibilidad.
- Una vez obtenida la base científica para obtener el polvo de uchuva aglomerado, se sugiere llevar a escala semi e industrial el proceso de aglomeración del polvo de uchuva, estandarizar el proceso y así poder determinar costos de producción.

## 8. Bibliografía introducción

- Agronet. (2021). *Estadísticas* home. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Akhavan, S., Mahdi, S., Assadpoor, E., & Dehnad, D. (2016). Microencapsulation optimization of natural anthocyanins with maltodextrin , gum Arabic and gelatin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 85, 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.011>
- Amao, I. (2016). Health Benefits of Fruits and Vegetables: Review from Sub-Saharan Africa. In M. Asaduzzaman & T. Asao (Eds.), *Vegetables. Importance of Quality Vegetables to Human Health: Vol. i* (1st ed., p. 13). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74472> Abstract
- Analdex, A. N. de C. E. (2019). *Comportamiento de la uchuva*. 2018–2020.
- Analdex, A. N. de C. E. (2021). Informe de las exportaciones de uchuva. In *Analdex.org* (Issue 13).
- Arias, F., & Rendón, S. (2015). Inteligencia de mercados para la cadena del lulo (*Solanum quitoense*). *Journal of Agricultural and Animal Science*, 3(2), 38–47.
- Atalar, I., & Yazici, F. (2021). Top-Spray Agglomeration Process Applications in Food Powders : A Review of Recent Research Applications in Food Products. *European Food Science and Engineering*, 2(1), 18–25.
- Balaguera, H., Martínez, C., & Herrera, A. (2016). Comportamiento poscosecha de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.): Efecto de diferentes dosis y tiempos de exposición al 1-metilciclopropeno. *Bioagro*, 28(1), 21–28.
- Bhandari, B., Bansal, N., Zhang, M., & Schuck, P. (2013). Handbook of Food Powders: Processes and Properties. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. <https://doi.org/10.1533/9780857098672>
- Cal, K., & Sollohub, K. (2010). Spray Drying Technique . I: Hardware and Process Parameters. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 99(2), 575–586. <https://doi.org/10.1002/jps>
- Castro, A., Puentes, G., & Botía, Y. (2014). Alternativas de procesamiento de uchuva (*Physalis peruviana* L) para el aprovechamiento de frutos no aptos para la comercialización en fresco. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 121–130. <https://doi.org/10.22490/21456453.939>
- Cuq, B., Mandato, S., Jeantet, R., Saleh, K., & Ruiz, T. (2013). Agglomeration/granulation in food powder production. In *Handbook of Food Powders: Processes and Properties*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9780857098672.1.150>
- Decco, N. P. (2019). *Claves para reducir las pérdidas poscosecha*. Claves Para Reducir Las Pérdidas Poscosecha. <https://www.deccoiberica.es/claves-para-reducir-las-perdidas-poscosecha/>
- Etzbach, L., Meinert, M., Faber, T., Klein, C., Schieber, A., & Weber, F. (2020). Effects of carrier agents on powder properties, stability of carotenoids, and encapsulation

- efficiency of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) powder produced by co-current spray drying. *Current Research in Food Science*, 3(November 2019), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2020.03.002>
- FINAGRO. (2014). Perspectiva del sector agropecuario Colombiano. *Fondo Para El Financiamiento Del Sector Agropecuario*, 28. [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/2014\\_09\\_09\\_perspectivas\\_agropecuarias.pdf](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/2014_09_09_perspectivas_agropecuarias.pdf)
- García, J., Giuffrida, D., Dugo, P., Mondello, L., & Osorio, C. (2018). Development and characterisation of carotenoid-rich microencapsulates from tropical fruit by-products and yellow tamarillo (*Solanum betaceum* Cav.). *Powder Technology*, 339, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.061>
- Granados, W., Muñoz, C., & Aguillón, D. (2019). Cadena de la uchuva. In *Ministerio de agricultura*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2019-06-30/Cifras Sectoriales UCHUVA.pdf>
- Lanchero, O., Velandia, G., Fischer, G., Varela, N., & García, H. (2007). Comportamiento de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en poscosecha bajo condiciones de atmósfera modificada activa. *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 61–68.
- López, V. (2017). Vista de La uchuva en el contexto de la producción agrícola colombiana y los TLC's. *Ensayos*, 10(10), 131–144. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/ensayos/article/view/72501/66251>
- Mendoza, H., Rodríguez, A., & Millán, P. (2012). Caracterización físico química de la uchuva (*physalis peruviana*) en la región de Silvia Cauca. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial: BSAA*, 10(2), 188–196.
- Mokhtar, S. M., Swailam, H. M., & Embaby, H. E. S. (2018). Physicochemical properties, nutritional value and techno-functional properties of goldenberry (*Physalis peruviana*) waste powder concise title: Composition of goldenberry juice waste. *Food Chemistry*, 248, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.117>
- Muzaffar, K., Nayik, A., & Kumar, P. (2018). Production of Fruit Juice Powders by Spray Drying Technology. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 7(3), 59–67.
- Muzaffar, K., Nayik, G. A., & Kumar, P. (2015). *Stickiness Problem Associated with Spray Drying of Sugar and Acid Rich Foods: A Mini Review*. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000S12003>
- Olivares, M. (2017). *Exploring The Potential of An Andean fruit: An Interdisciplinary Study On The Cape Gooseberry (Physalis peruviana L.) Value Chain* [Wageningen University by]. <https://doi.org/10.18174/393622>
- Olivares, M., Dekker, M., Verkerk, R., & van Boekel, M. (2016). Health-promoting compounds in cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.): Review from a supply chain perspective. *Trends in Food Science and Technology*, 57(Part A), 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.09.009>
- Palzer, S. (2007). Chapter 13 Agglomeration of dehydrated consumer foods. *Handbook of Powder Technology*, 11, 591–671. [https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)80048-0](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)80048-0)
- Patiño, D., García, E., Barrera, E., Quejada, O., Rodríguez, H., & Arroyave, I. (2014). Manual del Cultivo de Técnico Uchuva Buenas Prácticas. In *Fransiscovelez* (Vol. 0, Issue colombia). file:///C:/Users/USUARIO/Documents/cultivo de zona de origen/CULTIVO DE UCHUVA/cartilla de uchuva.pdf
- Phisut, N. (2012). Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. In *International Food Research Journal* (Vol. 19, Issue 4).
- Pragati, S., & Preeti, B. (2014). Technological Revolution in Drying of Fruit and Vegetables.

- International Journal of Science and Research*, 3(10), 705–711.
- Procolombia. (2020). Uchuva. *Procolombia*, 2.
- Puente, L., Pinto, C., Castro, E., & Cortés, M. (2011). *Physalis peruviana* Linnaeus, the multiple properties of a highly functional fruit: A review. *Food Research International*, 44(7), 1733–1740. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.09.034>
- Ramadan, M. (2011). Bioactive phytochemicals, nutritional value, and functional properties of cape gooseberry (*Physalis peruviana*): An overview. *Food Research International*, 44(7), 1830–1836. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.042>
- Rigon, R., & Zapata, C. (2016). Microencapsulation by spray-drying of bioactive compounds extracted from blackberry (*rubus fruticosus*). *Journal of Food Science and Technology*, 53(3), 1515–1524. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-2111-x>
- Rondet, E., Cuq, B., Cassan, D., & Ruiz, T. (2016). Agglomeration of wheat powders by a novel reverse wet agglomeration process. *Journal of Food Engineering*, 173, 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.046>
- Sagar, V. R., & Suresh, P. (2010). Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 47(1), 15–26. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0010-8>
- Santos, D., Maurício, A., Sencadas, V., Santos, J., Fernandes, M., & Gomes, P. (2018). Spray Drying: An Overview. In *Biomaterials - Physics and Chemistry - New Edition*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72247>
- Shishir, M., & Chen, W. (2017). Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science and Technology*, 65, 49–67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.006>
- Sobulska, M., & Zbicinski, I. (2020). Advances in spray drying of sugar-rich products. *Drying Technology*, 0(0), 1–26. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1832513>
- Suescún, L., Erika, P., Betancourt, S., Gómez, M., Franczy, M., García, L., Víctor, A., & Zarantes, M. N. (2011). *Physalis peruviana*. [www.kimpres.com.co](http://www.kimpres.com.co)
- Szulc, K., & Lenart, A. (2013). Surface modification of dairy powders : Effects of fluid-bed agglomeration and coating. *International Dairy Journal*, 33(1), 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2013.05.021>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science and Technology*, 63, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Verma, A., & Singh, S. V. (2015). Spray Drying of Fruit and Vegetable Juices—A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 55(5), 701–719. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.672939>
- Yuksel, H., & Dirim, N. (2018). Agglomeration process in the fluidized bed, the effecting parameters and some applications. *Hrvatski Časopis Za Prehrambenu Tehnologiju, Biotehnologiju i Nutricionizam*, 13(3–4), 159–163. <https://doi.org/10.31895/hcptbn.13.3-4.10>
- Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1239–1255. <https://doi.org/10.1080/10408398.2014.979280>

## 9. ANEXO 1

**Revista Facultad Ciencias Básica**  
**INSTRUCCIONES PARA AUTORES**  
**ISSN: 1900-4699 | e-ISSN: 2500-5316**

### **Directrices para autores/as - Instrucciones para autores**

Todos los artículos deben enviarse con una carta de presentación, en la que se señale la contribución de cada autor, y un formato de declaración de originalidad y cesión de derechos.

La revista publica artículos inéditos en español, inglés o portugués, relacionados con la siguiente tipología:

**Investigación.** Artículo que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura del artículo debe contener: introducción, metodología o hipótesis, resultados o hallazgos, discusión, conclusiones y referencias bibliográficas (se incluyen solamente las citadas en el texto).

**Revisión.** Artículo resultado de una investigación terminada en el que se analizan, sistematizan e integran resultados de investigaciones publicadas o no publicadas sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Contiene mínimo cincuenta referencias bibliográficas.

La revista puede recibir artículos de otras tipologías o enfoques (artículos de reflexión, reportes de caso, traducciones, etc.), si el editor o el comité lo considera pertinente, o según los propósitos de una edición especial. Los autores pueden remitir sus consultas al respecto, si no tienen certeza sobre el interés de la revista en un posible artículo.

### **Partes del artículo**

1. La *portadilla* debe incluir estos elementos: título conciso, resumen y palabras clave, así como nombre, afiliación institucional, correo electrónico (preferiblemente, el institucional) y código Orcid del autor (o autores).
2. El *resumen* expone los siguientes aspectos del artículo: propósito, metodología (si es necesario), desarrollo lógico de los temas o resultados, contribución o punto de vista

principal del autor, y conclusiones. El resumen debe tener máximo 250 palabras; además, no puede incluir citas.

3. Las *palabras clave* presentan los temas o conceptos principales del artículo (entre cuatro y seis), normalizados de acuerdo al tesoro SPINES (CAICYT/CONICET) y tesoro Plos que pueden consultarse en los siguientes enlaces: < <https://www.vocabularyserver.com/spines/>> y <http://vocabularios.caicyt.gov.ar/plosar/>
4. En caso de que el artículo sea producto de un proyecto de investigación, deben ser incluidos el nombre y número de la investigación o proyecto, y el nombre de la entidad que financió.
5. El *cuerpo del texto* debe considerar lo siguiente:
6. *Escritura y estructura*. Se sugiere a los autores cuidar la calidad de la escritura y la organización de los contenidos del artículo, con el propósito de que los lectores reciban con nitidez el mensaje.
7. *La extensión*. El artículo no puede superar las diez mil palabras, sin incluir la lista de referencias. El texto debe presentarse en formato Word, sin restricciones (completamente editable).
8. *Tablas y figuras*. Con respecto a los artículos que tienen figuras (fotografías, diagramas, gráficos, ilustraciones, mapas, etc.) y tablas, estas deben mencionarse en el cuerpo del texto y ubicarse en un pasaje próximo a su mención; además, deben tener numeración arábica, según el orden de aparición (figura 1, figura 2, figura 3; tabla 1, tabla 2, tabla 3, etc.). Las figuras se rotulan en un pie de foto, por ejemplo: *Figura 1. Mapa político de Colombia*, con la cita de la fuente. Por su parte, las tablas tienen título, por ejemplo: *Tabla 1. Extensión de los parques naturales de Colombia*, también con la referencia de su fuente en el pie de tabla. Por último, cabe mencionar que, para efectos de la edición, las figuras deben tener una resolución de 600 dpi en archivos JPEG y presentarse en su versión editable; las tablas, a su vez, también se presentan en su versión editable.
9. *Ecuaciones*. Las ecuaciones se deben escribir con el editor de ecuaciones, justificar en el centro del renglón y numerar consecutivamente entre paréntesis. El número entre paréntesis correspondiente a una ecuación se ubica a la derecha de esta. Al insertar símbolos o ecuaciones en el texto, se escriben en letra cursiva. Es necesario definir los símbolos usados en la ecuación antes o inmediatamente después de anotarla en el texto. Al llamar la ecuación en el texto, se usa "(1)" o "ecuación (1)" si está comenzando una frase.
10. *Medidas*. Usar el Sistema Métrico Decimal, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Los valores de salinidad no llevarán unidades ni símbolos, conforme a la recomendación de la Unesco.
11. *Nombres científicos*. Los nombres de géneros y especies deben escribirse de acuerdo con el Código Internacional de Nomenclatura Zoológica, o con el Código Internacional de Nomenclatura Bótanica.
12. *Notas al pie*. Se justifican para explicar, comentar o complementar el texto del artículo; no obstante, en lo posible deben evitarse, procurando que la información que aparece en el cuerpo del texto sea la necesaria y suficiente para transmitir un mensaje claro al lector. No se deben usar para incluir referencias, en ningún caso.
13. *Los agradecimientos*. Se incluyen para mencionar a quienes contribuyeron en la investigación o la escritura del artículo (máximo 100 palabras).
14. *La lista de referencias*. Para construir la lista de obras citadas, así como su correspondiente referenciación parentética en el cuerpo del texto, se sugiere a los autores consultar las normas IEEE, sexta edición.

## Envíos

El registro y el inicio de sesión son necesarios para enviar elementos en línea y para comprobar el estado de los envíos recientes. Ir a Iniciar sesión a una cuenta existente o Registrar una nueva cuenta.

## Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envío, los autores/as están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores/as aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

- El envío no ha sido publicado previamente ni se ha sometido a consideración por ninguna otra revista (o se ha proporcionado una explicación al respecto en los Comentarios al editor/a).
- El archivo de envío está en formato Microsoft Word y cumple con las directrices para autores de la Revista.
- En el envío se ha adjuntado la carta de remisión con la información de cada uno de los autores.
- Certifico que quedan agregados todos los autores del presente artículo en el OJS y soy consciente que después no puedo agregar más.

## SOPORTE DE PUBLICACIÓN

Revista Facultad **2020**  
de Ciencias Básicas **Vol. 16(1)**

enero-junio

■ ISSN: 1900-4699 · ISSN-e: 2500-5316 ■ pp. 7-18



DOI: <https://doi.org/10.18359/rfcb.5019>



# Avances tecnológicos en el proceso de transformación de la uchuva: una revisión\*

Manuela Gallón Bedoya<sup>a</sup> ■ Soany Karola Eraso Grisales<sup>b</sup> ■ Misael Cortés Rodríguez<sup>c</sup>

M. Gallón Bedoya, S. K. Eraso Grisales, y M. Cortés Rodríguez, «Avances tecnológicos en el proceso de transformación de la uchuva: una revisión», Rev. Fac. Cienc. Básicas, vol. 16, n. ° 1. <https://doi.org/10.18359/rfcb.5019>

## 10. ANEXO 2

**Food Science and Technology P**  
**Publicación de: Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**  
**Área: Ciencias Agrícolas**  
**Versión impresa del ISSN: 0101-2061**  
**Versión en línea del ISSN: 1678-457X**

Food Science and Technology (CTA) publica artículos científicos en el campo de la ciencia de los alimentos. Los trabajos deben estar escritos en inglés y seguir los estándares editoriales que se indican a continuación.

### **Contenido**

**Investigación original.** El manuscrito debe presentar resultados claros y concisos de una investigación basada en métodos científicos.

**Artículos de revisión.** El manuscrito debe presentar una descripción general pertinente al tema de la revista con un enfoque en la literatura publicada en los últimos cinco años.

**Investigación con seres humanos.** Al presentar los resultados de una investigación con seres humanos, se debe proporcionar el número de proceso de aprobación otorgado por el Comité de Ética en Investigación (resolución # 196/96, 10 de octubre de 1996, Consejo Nacional de Salud de Brasil).

### **Estructura del artículo**

La revisión de la estructura del manuscrito y la información proporcionada es responsabilidad de los autores. Los manuscritos originales no deben exceder las 16 páginas (excluidas las referencias). El texto debe presentarse a doble espacio entre líneas en formato de una columna. Todas las líneas deben estar alineadas con el margen izquierdo de la columna dejando un margen de 2,5 cm a derecha e izquierda. Las líneas de texto deben estar numeradas secuencialmente a lo largo del texto. Todas las páginas deben estar numeradas secuencialmente.

### **Carta de presentación**



La carta de presentación del manuscrito debe incluir lo siguiente:

- Declaración de relevancia e importancia del trabajo: un texto breve de no más de 100 palabras que describa la relevancia del trabajo de manera concisa;
- Títulos:
- Título en inglés;
- Encabezado de página (no más de 6 palabras).

#### **Página del título**

La portada del manuscrito debe incluir lo siguiente:

- Nombres completos y dirección de correo electrónico de los autores;
- Nombres abreviados de los autores para la cita (Ej .: nombre completo: José Antonio da Silva; nombre abreviado: Silva, JA);
- Afiliaciones de los autores: nombre de la institución a la que pertenece cada autor (nombre completo y siglas, dirección postal completa, código postal, ciudad, estado y país). Por favor, correlacione a cada autor con su institución correspondiente;
- Información postal de los autores (nombre completo, dirección postal completa, números de teléfono y fax y dirección de correo electrónico del autor correspondiente).

#### **Resumen, aplicación práctica y página de palabras clave**

**Abstract.** El resumen debe:

- Estar solo en inglés;
- Ser un solo párrafo que contenga menos de 200 palabras.
- Indique claramente el objetivo principal y la razón de ser del artículo;
- Enuncie brevemente las principales conclusiones;
- Si corresponde, describa los métodos y resultados de los materiales;
- Resuma las conclusiones;
- Sea parco con las abreviaturas y los acrónimos.

El resumen no debe incluir:

- Notas al pie;
- Datos significativos y valores estadísticos;
- Referencias.

**Aplicación práctica.** Texto breve con un máximo de 85 caracteres, indicando novedades y características importantes del estudio.

**Palabras clave.** El manuscrito debe tener al menos tres (3) y un máximo de seis (6) palabras clave. Las palabras clave deben estar solo en inglés. Evite el uso de términos incluidos en el texto principal del manuscrito en las Palabras clave.

#### **Páginas de texto**

El manuscrito debe organizarse de la siguiente manera:

- Introducción;
- Materiales y métodos; debe incluir diseño experimental, datos y análisis estadísticos.
- Resultados y discusión (también pueden estar separados);
- Conclusiones;
- Referencias;
- Agradecimientos (opcional).

En el texto principal:

- Las abreviaturas, acrónimos y símbolos deben definirse claramente en el primer uso;
- No se permiten notas a pie de página;

- Se recomienda el uso de títulos y subtítulos cuando sea necesario, pero utilícelos sin comprometer la claridad del texto. Deben estar numerados en el orden en que aparecen en el texto;
- Las ecuaciones deben ser generadas por computadora y numeradas secuencialmente con números arábigos entre paréntesis en el orden en que se mencionan en el texto. Las ecuaciones deben estar referenciadas dentro del texto y en el lugar indicado por el autor. No envíe imágenes de ecuaciones. No se aceptarán ecuaciones suministradas por separado; solo se aceptarán los insertados en el texto.

### **Tablas, figuras y gráficos**

Proporcione un máximo de siete (7) tablas, figuras y gráficos. Deben estar numerados con números arábigos en el orden en el que aparecen en el texto. En el *Manuscrito.pdf*- versión para evaluación del revisor y en el *Manuscrito.doc* - versión para producción, se deben incluir tablas, ecuaciones, figuras, cuadros y sus respectivas leyendas dentro del texto principal en los lugares indicados por los autores. Consulte a continuación las instrucciones de la versión para producción.

### **Figuras y gráficos (versión para producción)**

Las figuras y cuadros deben ser provistos en el texto principal y numerados consecutivamente utilizando números arábigos y sus respectivas leyendas deben incluirse dentro del texto principal en el lugar indicado por los autores. Cuando suministre figuras que contengan fotografías o micrografías, asegúrese de que estén escaneadas a alta resolución para que cada foto tenga al menos 1000 píxeles de ancho. Todas las fotografías deben contener el nombre del autor. Los gráficos deben usarse para presentar archivos, esquemas y diagramas de flujo.

### **Tablas (versión para producción)**

Las tablas deben incluirse en el texto principal y deben estar numeradas con números arábigos. Deben estar incrustados en el texto en el lugar indicado por el autor. Las tablas deben prepararse con Microsoft Word® 2007 o posterior; no deben importarse de Excel® o Powerpoint®, y deben:

- Tener una leyenda y un título;
- Sea autoexplicable;
- Tener los dígitos significativos definidos según criterio estadístico considerando los dígitos significativos en la desviación estándar;
- Se utilizará con moderación para garantizar la coherencia visual y que el texto sea fácil de leer;
- Muestre datos que no se muestran en los gráficos;
- Tenga el formato más simple posible; no se permite el uso de sombras, color o filas verticales y diagonales;
- Tenga solo letras minúsculas en superíndice que indiquen notas al pie (abreviaturas, unidades, etc.). Primero se deben indicar las columnas, luego las filas, y se debe seguir este mismo orden para las notas a pie de página.

### **Nombres patentados**

Se deben especificar las materias primas, el equipo de propósito especial y el software de computadora utilizados en la investigación (marca comercial-fabricante, modelo, ciudad y país de origen).

### Unidades de medida

- Utilice unidades SI (Sistema Internacional de Unidades);
- Las temperaturas deben expresarse en grados Celsius ( $^{\circ}$  C).

### Lista de referencia

La Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos (CTA) adopta el estilo de citas y referencias bibliográficas de la *Asociación Americana de Psicología* - APA.

La lista de referencias debe prepararse primero alfabéticamente y, si es necesario, cronológicamente. Las referencias múltiples del mismo autor en el mismo año deben identificarse con letras 'a', 'b', 'c', etc. colocadas después del año de publicación.

Los artículos en preparación o enviados para revisión no deben incluirse en las referencias. Los nombres de todos los autores deben aparecer en las referencias; por lo tanto, el uso de la expresión 'et al.' No se permite. De acuerdo con la determinación de la sbCTA, los artículos aceptados cuyas referencias bibliográficas no cumplan con los estándares de la Revista NO SERÁN PUBLICADOS hasta que se cumplan las normas.

## SOPORTE DE PUBLICACIÓN


Original Article  
Food Science and Technology

ISSN 0101-2061 (Print)  
ISSN 1678-457X (Online)

DOI: <https://doi.org/10.1590/fst.67820>



### Enzymatic hydrolysis of a colloidal system based on cape gooseberry

Soany ERASO-GRISALES<sup>1\*</sup> , Misael CORTES-RODRÍGUEZ<sup>1</sup>, Hader Iván CASTAÑO-PELÁEZ<sup>2</sup>,  
Andrés HURTADO-BENAVIDES<sup>3</sup>

#### Abstract

The objective of this research was to evaluate the influence of the enzymatic process on the physicochemical stability of a colloidal system based on cape gooseberry pulp, skin, and seeds ( $CS_{CG}$ ). The pulp, seed, and skin mixture were homogenized by shearing in a rotor-stator system at 10,000 rpm. A completely randomized factorial design was used, considering the independent variables: Viscozyme<sup>®</sup> L enzyme concentration [Enzyme] (50, 125, and 200 ppm) and hydrolysis time (HT) (0, 30, 60, 90, and 120 minutes), and the dependent variables: viscosity ( $\mu$ ), zeta potential ( $\zeta$ ), particle size (percentiles  $D_{10}$ ,  $D_{50}$ , and  $D_{90}$ ), spectral absorption index (R). Both independent variables had a significant impact on the process. [Enzyme] affected mainly  $\mu$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{90}$ , and R and HT affected  $\mu$  and  $D_{10}$ . The optimization of the formulation was performed under the criterion of obtaining a  $CS_{CG}$  with higher physicochemical stability. The optimization showed desirability of 74.2% with [Enzyme] at 78.5 ppm and HT of 120 minutes. The dependent variables obtained experimentally were:  $\mu = 371.3 \pm 24.2$  cP,  $\zeta = -21.8 \pm 0.3$  mV,  $D_{10} = 3.5 \pm 0.3$   $\mu$ m,  $D_{50} = 135 \pm 3.6$   $\mu$ m,  $D_{90} = 565.7 \pm 25.5$   $\mu$ m, and  $R = 0.655 \pm 0.007$ . The integration of homogenization processes and enzymatic treatments contributed to obtaining a physicochemical stable colloidal system based on cape gooseberry pulp, skin, and seeds.

**Keywords:** *Physalis peruviana* L.; colloidal stability; enzymatic treatments; agro-industrial wastes; homogenization.

**Practical application:** *Enzymatic hydrolysis and physicochemical stability of a colloidal cape gooseberry*

ERASO-GRISALES, S., CORTES-RODRÍGUEZ, M., CASTAÑO-PELÁEZ, H. I., & HURTADO-BENAVIDES, A. (2021). Enzymatic hydrolysis of a colloidal system based on cape gooseberry. *Food Science and Technology*, 42. <https://doi.org/10.1590/FST.67820>