

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROENCAPSULACIÓN DE PULPA DE
LULO MEDIANTE SECADO POR ASPERSIÓN

DANNY ALBERTO AREVALO BURBANO

DANIELA PACHAJOA RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PASTO
2020

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE MICROENCAPSULACIÓN DE PULPA DE
LULO MEDIANTE SECADO POR ASPERSIÓN

DANNY ALBERTO AREVALO BURBANO

DANIELA PACHAJOA RODRÍGUEZ

Trabajo de grado, modalidad investigación, presentado como requisito parcial para
obtener el título de ingeniero agroindustrial

Director: Oscar Arango Bedoya PhD.

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PASTO
2020

Nota de aceptación

Andrés Hurtado PhD.
Jurado

David López MSc.
Jurado

OSCAR ARANGO BEDOYA PhD
Director

Pasto, 17 de Febrero del 2020

Dedicatoria

Este trabajo de investigación está dedicado principalmente a Dios, por darnos la vida y posibilidad de llevar a cabo este compromiso. A nuestros padres por el apoyo brindado a lo largo de nuestra vida y en esta carrera profesional y por último dedicamos este trabajo de investigación a nuestros hermanos y amigos, por el gran apoyo moral y estar siempre disponibles para nosotros en esta etapa tan importante de nuestras vidas.

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por la vida y sus bondades, a nuestros padres por el esfuerzo para darnos la mejor educación, además, queremos agradecer a todas las personas que de una manera u otra, hicieron esto posible. Agradecemos a nuestros amigos, familiares, colegas, maestros, asesor de tesis por el apoyo incondicional para conseguir este logro, al grupo de investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria por abrirnos sus puertas y a nuestra alma mater la Universidad de Nariño por el financiamiento del proyecto de investigación.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 CULTIVO DE LULO	20
3.1.1 Características fisicoquímicas del lulo.	20
3.2 DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	21
3.3 ALIMENTOS DESHIDRATADOS EN POLVO	22
3.4 MICROENCAPSULACIÓN DE ALIMENTOS	23
3.5 SECADO POR ASPERSIÓN	24
3.6 AGENTES ENCAPSULANTES.....	25
3.7 MALTODEXTRINA	26
4. ANTECEDENTES.....	27
5. OBJETIVOS.....	31
5.1 OBJETIVO GENERAL	31
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	31
6. METODOLOGÍA.....	32
6.1 MATERIA PRIMA.....	32
6.2 EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR.....	33
6.2.1 Calculo de la proporción de encapsulante.	34
6.2.2 Preparación de la dispersión.....	34
6.2.3 Evaluación de variables de respuesta.	34
6.2.3.1 Rendimiento de encapsulación	34
6.2.3.2 Viscosidad.....	35

6.2.3.3 Estabilidad de la dispersión.	35
6.3 OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SECADO.....	35
6.3.1 Evaluación de variables de respuesta.	37
6.3.1.1 Contenido de humedad y solidos totales.	37
6.3.1.2 Rendimiento de encapsulación.....	37
6.3.1.3 Humectabilidad.	37
6.3.1.4 Solubilidad.....	37
6.3.1.5 Densidad aparente.....	38
6.3.1.6 Contenido de vitamina C.....	38
6.4 EVALUACIÓN DE PERDIDA DE VITAMINA C.....	39
6.4.1 Balance General	40
6.4.2 Cálculos de variables.....	40
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
7.1 ESTABILIDAD DE LA DISPERSIÓN DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR	41
7.1.1 Rendimiento de encapsulación.....	42
7.1.2 Separación de fases.	45
7.1.3 Viscosidad.....	47
7.1.4 Optimización multirespuesta de las condiciones de preparación de la dispersión.	49
7.2 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN.....	53
7.2.1 Contenido de humedad de las microcápsulas.	54
7.2.2 Rendimiento.....	58
7.2.3 Densidad aparente.....	61
7.2.4 Humectabilidad.	64
7.2.5 Solubilidad.	66
7.2.6 Contenido de vitamina C.....	70
7.2.7 Optimización multirespuesta del proceso de secado.	73
7.3 PERDIDA DE VITAMINA C.....	75
8. CONCLUSIONES.....	78
RECOMENDACIONES.....	79
9. REFERENCIAS	80
ANEXOS.....	90

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Matriz experimental para evaluación de estabilidad de alimentación al proceso de secado.....	33
Tabla 2. Matriz experimental para la optimización de los parámetros de secado .	36
Tabla 3. Resultados DCCR para determinar la estabilidad de la dispersión.....	41
Tabla 4. Análisis de varianza para rendimiento de encapsulación.....	42
Tabla 5. Análisis de varianza para separación de fases de la dispersión de alimentación al secador.	45
Tabla 6. Análisis de varianza para la viscosidad de la dispersión.....	47
Tabla 7. Optimización de la estabilidad de la dispersión	51
Tabla 9. Resultados del DCCR para el proceso de secado por aspersion de jugo de lulo.	53
Tabla 10. Análisis de varianza para la humedad de los microencapsulados	54
Tabla 11 Análisis de varianza para el rendimiento del proceso de secado.....	58
Tabla 12 Análisis de varianza para densidad aparente	61
Tabla 13 Análisis de varianza para humectabilidad	64
Tabla 14 Análisis de varianza para solubilidad	66
Tabla 15 Análisis de varianza para contenido de vitamina C.....	70
Tabla 16 Niveles óptimos para factores del proceso de secado por aspersion	73
Tabla 17 Valores estimados a obtener en las variables de respuesta al trabajar en las condiciones optimas.....	75
Tabla 18. Porcentaje de pérdida de vitamina C en cada uno de los ensayos.....	76

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Balance de materia para la perdida vitamina C	39
Figura 2. Efectos principales para rendimiento	42
Figura 3. Interacción velocidad agitación y % encapsulante en el rendimiento ...	43
Figura 4. Efectos principales para separación de fases.....	46
Figura 5. Efectos principales para viscosidad	49
Figura 6. Superficie de respuesta concentración encapsulante constante	49
Figura 7. Superficie de respuesta a tiempo de agitación constante	50
Figura 8. Superficie de respuesta a velocidad de agitación constante	50
Figura 9. Efectos principales para humedad.....	55
Figura 10. Interacciones en el contenido de humedad.	55
Figura 11. Efectos principales para rendimiento	59
Figura 12. Efectos principales para densidad aparente	61
Figura 13. Efectos principales para humectabilidad.....	65
Figura 14. Efectos principales para solubilidad.....	67
Figura 15. Interacciones en el porcentaje de solubilidad	67
Figura 16. Efectos principales para contenido de vitamina C.	71
Figura 17. Superficie de respuesta para deseabilidad con caudal de alimentación constante.	73
Figura 18. Superficie de respuesta para deseabilidad con velocidad aire de secado constante	74
Figura 19. Superficie de respuesta para deseabilidad con temperatura entrada del aire constante.	74

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Curva de calibración para vitamina C en polvos	90
Anexo B. Curva de calibración para vitamina C en pulpa	91

GLOSARIO

COMPUESTO BIOACTIVO: tipo de sustancia química que se encuentra en pequeñas cantidades en las plantas y ciertos alimentos como frutas. .Estos cumplen funciones en el cuerpo que pueden promover la buena salud.

HIGROSCOPICIDAD: propiedad de algunos cuerpos inorgánicos, y de todos los orgánicos, de absorber la humedad.

HUMECTABILIDAD: una condición de una superficie que determina cuán rápidamente un líquido mojará y se derramará sobre la superficie, o si será repelido y no se derramará sobre la superficie.

INTERACCIÓN: se refiere a que el efecto de un factor depende del nivel de otro factor en la metodología de superficie de respuesta

LULO: conocido como naranjilla en Ecuador y Panamá, como lulo ([ˈlulo], del quechua) en Colombia y como chinchilegua en México, es una planta perenne subtropical del noroeste de América del Sur. Su nombre quitoense significa "de Quito"

MALTODEXTRINA: es una mezcla de polímeros de glucosa y comercialmente se presenta como un polvo blanco. Tiene buena solubilidad y bajo poder edulcorante. Se obtiene por hidrólisis parcial del almidón de maíz, aunque también puede ser de papa o trigo.

MICROENCAPSULACIÓN: es un método mediante el cual pequeñas partículas, gotas de líquido o gases se envuelven con un material de cobertura para dar lugar a microcápsulas o micropartículas agregadas

SECADO POR ASPERSIÓN: o spray drying es una operación básica que consiste en la transformación de una suspensión o disolución en un material seco particulado, mediante el rociado del primero en un medio caliente y seco

SORCIÓN: interacción (absorción, adsorción, quimisorción y fisorción) de un átomo, molécula o partícula con la superficie sólida de una interfaz sólido-líquido o una interfaz sólido-gas.

TRANSICIÓN VÍTREA: es la transición gradual y reversible en materiales amorfos o en regiones amorfas dentro de materiales semicristalinos, desde un estado "vítreo" duro y relativamente quebradizo a un estado viscoso o gomoso a medida que aumenta la temperatura

RESUMEN

El lulo (*Solanum quitoense* Lam), es un fruto exótico que presenta una demanda creciente debido a sus especiales características aromáticas y propiedades nutricionales. Sin embargo se trata de un producto muy frágil y perecedero, lo que origina altas pérdidas en postcosecha y dificulta su comercialización, especialmente hacia mercados de exportación. Una alternativa a ello es el secado de la pulpa con el fin de obtener un producto en polvo. Las frutas deshidratadas en polvo están ganando importancia como saborizantes naturales para la formulación de diversos productos alimenticios, sin embargo algunos métodos de secado resultan inapropiados por afectar fuertemente las características sensoriales y las propiedades nutricionales de las frutas. El secado por aspersion (*spray drying*) ha sido el método más usado para productos líquidos que son sensibles al calor, siendo sus principales ventajas el alto rendimiento y la reducción del daño térmico. El objetivo de este trabajo fue evaluar un proceso de microencapsulación de pulpa de lulo mediante la técnica de secado por aspersion para obtener un producto con adecuadas características de funcionalidad, tratando de conservar sus propiedades nutricionales. En primer lugar se evaluó la estabilidad de la dispersión de alimentación al secador donde se utilizó un diseño compuesto central rotatable de la metodología de superficie de respuesta, considerando como factores la velocidad y el tiempo de agitación y la concentración de encapsulante. Para la optimización del secado por aspersion se implementó un diseño compuesto central rotatable de la metodología de superficie de respuesta en el cual se evaluaron la temperatura de entrada del aire (TA) (150 °C - 230 °C), la velocidad del aire de secado (VA) (6 m/s - 9,5 m/s) y el flujo o caudal de la alimentación (CA) (5,3 mL/min - 15 mL/min). Los niveles óptimos fueron: 144,2 °C, 7,3 m/s y 2 mL/min respectivamente, condiciones bajo las cuales el modelo matemático predice productos con: humedad 4,3 %, rendimiento 14,5 %, densidad aparente 0,89 g/mL, humectabilidad 107 s, solubilidad 93,8 % y 32,8 mg/100 g de contenido de vitamina C. Los resultados mostraron la viabilidad de obtener microencapsulados de lulo, pero se requiere determinar condiciones de proceso que eleven el rendimiento y reduzcan el deterioro de vitamina C.

ABSTRACT

Lulo (*Solanum quitoense* Lam) is an exotic product that has a growing demand due to its aromatic characteristics and nutritional properties. However, it is a very fragile and perishable product, which causes high postharvest losses and difficulties in loading, especially towards export markets. An alternative to this is the drying of the pulp in order to obtain a powder product. Dehydrated powdered fruits are gaining importance as natural flavorings for the formulation of various food products, however, some drying methods affected inadequately affect strongly the sensory characteristics and nutritional properties of fruits. Spray drying has been the most widely used method for liquid products that are sensitive to heat, with its main advantages being high performance and thermal damage reduction. The objective of this work was to evaluate a process of microencapsulation of lulo pulp by means of the spray drying technique to obtain a product with specific characteristics of functionality, conservation treatment of its nutritional properties. First, the stability of the dispersion of feed to the dryer is evaluated, where a rotatable central composite design of the response surface methodology, certain factors such as speed and stirring time and encapsulant concentration are established. For the optimization of spray drying a rotatable central composite design of the response surface methodology is implemented in which the air inlet temperature (TA) (150 °C - 230 °C), drying air flow rate (VA) (6 m/s – 9,5 m/s) and the feed flow rate (AC) (5,3 mL/min - 15 mL/min). The optimal levels were: 144,2 °C, 7,3 m/s and 2 mL/min respectively, conditions under which the mathematical model predicts products with: humidity 4,3 %, yield 14,5 %, bulk density 0,89 g/mL, wettability 107 s, solubility 93,8 % and 32,8 mg/100 g of vitamin C content. The results may affect the viability of obtaining microencapsules of lulo, but it is required to determine process conditions that elevate performance and reduces vitamin C disorder.

INTRODUCCIÓN

El lulo (*Solanum quitoense* Lam), también conocido como naranjilla, según Arias y Rendón¹ es catalogado como un fruto exótico, por su aroma intenso, valor nutricional y sabor, es de gran interés en el sector industrial para elaboración de bebidas lácteas, zumos o jugos y como saborizante para alimentos procesados. En Nariño, según Muñoz, Rodríguez y Bermudez² se destacan tres municipios como los principales productores de lulo: Colón, Cartago y San Lorenzo, los cuales representan el 29.9 % del total del área sembrada en el departamento, observándose una tendencia al aumento debido al buen comportamiento del mercado para este producto

Como lo establece Arias y Rendón³ el lulo es fruto climatérico altamente perecedero, al alcanzar la madurez el fruto se torna muy delicado y susceptible a daños mecánicos, físicos o microbiológicos, además las deficiencias en el manejo poscosecha ocasiona altas pérdidas a lo largo de la cadena de producción y comercialización, por otro lado los precios de la fruta se ven afectados por las pérdidas en campo y principalmente por el número elevado de intermediarios que intervienen en la comercialización de lulo. Para disminuir las pérdidas y elevar la vida útil de la fruta, es posible usar métodos modernos que conservan las características nutricionales y sensoriales de la fruta, como lo es el proceso de secado por aspersión.

En los estudios de Marqués, Prado y Freire⁴ y el de Maskan⁵ se afirma que el secado es uno de los métodos más eficientes de preservar los alimentos, por reducir la actividad de agua y así lograr prolongar su vida útil, lo que inhibe el crecimiento de los microorganismos y reduce las reacciones de deterioro, resultando en una alta estabilidad; además, con el secado se consigue una reducción substancial de peso y volumen, lo que facilita transporte y su almacenamiento.

¹ ARIAS, Francisco y RENDÓN, Sebastián. Inteligencia de mercados para la cadena del lulo (*Solanum quitoense*). En: Journal of Agriculture and Animal Sciences. Diciembre, 2014. vol. 3. no. 2. p. 40.

² MUÑOZ, Johanna; RODRIGUEZ, Luis y BERMUDEZ, Lilia. Análisis de competitividad del sistema de producción de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en tres municipios de Nariño. En: Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas. Diciembre, 2013. vol. 7. no. 2. p. 181.

³ ARIAS, Francisco y RENDÓN, Sebastián. Op. cit., p. 45

⁴ MARQUÉS, L; PRADO, M y FREIRE, J. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. LWT. En: Food Science and Technology. 2009. vol. 42. no. 7. p. 1232.

⁵ MASKAN, Medeni. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. En: Journal of Food Engineering. Mayo, 2001. vol. 48. p. 169.

El proceso de secado por aspersión consiste en esparcir la solución finamente atomizada dentro de una cámara, donde el aire caliente evapora el agua de las pequeñas gotas de solución obteniéndose partículas de sólido seco en forma de polvo, que pueden almacenarse a temperatura ambiente por periodos prolongados de tiempo. Para Jayasundera, *et al.*⁶ El proceso de encapsulación consiste en realizar un secado por aspersión, usando como material de entrada la matriz a encapsular, adicionada de un material encapsulante que recubra el material de interés para obtener una barrera de protección de la matriz.

⁶ JAYASUNDERA, Mithila, *et al.* The effects of proteins and low molecular weight surfactants on spray drying of model sugar-rich foods: powder production and characterisation, En: Journal of Food Engineering. Mayo, 2011. vol. 104. p. 259.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existe un creciente interés por incluir en la dieta alimentos que contengan componentes bioactivos, que presentan efectos beneficios en la salud, Yağci y Göğus⁷ consideran que las frutas y hortalizas son una fuente rica en este tipo de componentes. En Colombia y más específicamente en el departamento de Nariño se produce una gran variedad de frutas que por sus características exóticas de aroma y sabor y sus contenidos de compuestos nutricionales y bioactivos tienen gran potencial de comercialización en mercados internacionales.

La mayoría de estas frutas tienen problemas de estacionalidad en las cosechas y alta perecibilidad. Ceballos⁸ dice que los frutos frescos, por sus contenidos de agua son susceptibles de deterioro por reacciones enzimáticas, químicas o acción microbiana. Las dificultades para el transporte hasta los centros de acopio, inadecuado manejo postcosecha y problemas fitosanitarios se generan grandes pérdidas económicas. Shishir y Chen⁹ afirman que la exportación hacia mercados internacionales de las frutas frescas, tiene altos costos de transporte, el cual debe ser en la mayoría de los casos refrigerado, además de los costos por ocupación de grandes volúmenes y por el peso debido a los altos contenidos de agua, sumado a factores sanitarios y legales.

Entre los frutos exóticos con mayor potencial de producción en el departamento de Nariño se encuentra el lulo (*Solanum quitoense* Lam.). Se evidencia en los reportes de Forero, *et al.*¹⁰ Que en años recientes se ha aumentado el potencial exportador de este fruto, debido a que, además de su valor nutricional, se ha demostrado que contienen compuestos bioactivos como compuestos fenólicos, flavonoides y ácido ascórbico, con efectos benéficos para la salud de los consumidores. Debido al nivel de concientización de los consumidores acerca de los posibles efectos relacionados con los aditivos químicos, actualmente la industria de alimentos se ve en la necesidad de buscar saborizantes de origen natural que le den el valor agregado a sus productos, siendo algunas frutas una excelente opción para producir alimentos a base de ingredientes naturales, con propiedades funcionales y además que

⁷ YAĞCI, Sibel y GÖĞUS, Fahrettin. Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-byproducts. En: Journal of Food Engineering. Mayo, 2008. vol. 86. p. 122.

⁸ CEBALLOS, Adela. Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta. Tesis de grado para la obtención del título de Magister en ingeniería química. Universidad nacional de Colombia, Manizales. 2008. p. 12.

⁹ SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. En: Trends in Food Science & Technology. Mayo, 2017. vol. 65. p. 49.

¹⁰ FORERO, Diana, *et al.* Chemical and sensory comparison of fresh and dried lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit aroma. En: Food Chemistry. Febrero, 2015. vol. 169. p. 85.

permitan expandir el mercado a los productores regionales de dicho fruto. Sin embargo durante el procesamiento de las frutas se afecta el contenido natural de compuestos bioactivos, por lo que es de importancia evaluar el efecto de procesos de conservación para su industrialización y desarrollo de nuevos productos.

Un proceso mediante el cual se puede lograr la conservación de estos componentes, es el empleo de tecnologías novedosas como la encapsulación, que puede ser utilizada para conservar la bioactividad de compuestos de interés. Una de las tecnologías más usadas para el encapsulamiento de sustancias es el secado por aspersión, la cual resulta conveniente por la relación de costos con la calidad del producto y, adicionalmente, por la versatilidad en el empleo de agentes coadyuvantes que posean su propio valor funcional proporcionando valor agregado a los polvos obtenidos, como es el uso fibras solubles como agentes acarreadores.

Una opción que contribuye a mejorar la eficiencia y rentabilidad de las cadenas productivas es la agregación de valor mediante la transformación de las frutas en productos procesados más estables (con mayor vida útil) y que tengan demanda bien sea como materias primas industriales o directamente hacia el consumidor final. Tal como afirma Zotarelli¹¹, las frutas deshidratadas en polvo están ganando importancia por ser ingredientes convenientes y seguros para ser usados como colorantes, saborizantes e ingredientes naturales (con propiedades nutricionales y funcionales) en la formulación de diversos productos como jugos, helados, bebidas lácteas, postres, sorbetes, barras de cereal y fuentes de complejos vitamínicos para deportistas, entre otros, sin embargo, deben ser deshidratadas por procesos que mantengan buena parte de sus características nutricionales y sensoriales.

En la literatura científica es posible encontrar investigaciones en las cuales se ha usado la técnica de secado por aspersión en varios tipos de frutas como la de Serra, *et al.*¹² Sin embargo, no se tiene conocimiento de varios estudios de proceso de secado por aspersión sobre frutas andinas como lulo, en los cuales se aborden aspectos relacionados con la estabilidad de las soluciones de alimentación al secador y la optimización de las condiciones de secado en función de la calidad del producto. Teniendo en cuenta los aspectos mencionados antes, se planteó la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuáles son las condiciones del proceso de secado por aspersión que permiten obtener microencapsulados de lulo con características de calidad óptimas?

¹¹ ZOTARELLI, M. Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem. Tese De Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. 2014. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. p. 25.

¹² SERRA, Samantha, *et al.* Drying by spray drying in the food industry: micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. En: African Journal of Food Science. Septiembre, 2015. vol. 9. no. 9. p. 466.

2. JUSTIFICACIÓN

El departamento de Nariño cuenta con un gran potencial para la producción de frutas exóticas como es el lulo (*Solanum quitoense* Lam.) debido a que posee las condiciones agroclimáticas apropiadas para su cultivo. No obstante, el sector hortofrutícola en Nariño se ha caracterizado por un bajo grado de transformación, por lo que la mayoría de la producción frutícola se comercializa en fresco y un porcentaje reducido se aprovecha en una transformación de nivel primario como jugos o pulpas. Adicionalmente, la baja inversión en programas de desarrollo tecnológico e innovación en procesos y productos, no contribuyen a un mejoramiento del sector.

El consumo de alimentos elaborados a base de ingredientes naturales y que contengan componentes bioactivos, tales como vitaminas, polifenoles y flavonoides en alimentos industrializados se ha incrementado en los últimos años por el interés de la sociedad de consumir alimentos que contribuyan a prevenir algunas enfermedades y en general a mejorar la salud. El lulo es un fruto con gran contenido de compuestos bioactivos, pero altamente perecedero, lo que deriva en pérdidas postcosecha del 25 hasta el 70 %. Este fruto tiene un alto valor nutricional y promueven efectos benéficos al consumidor, además representan una fuente potencial de saborizantes y aromatizantes para la industria alimentaria.

Por lo tanto, es importante la búsqueda de nuevas tecnologías y aplicaciones para el aprovechamiento del potencial agroindustrial del lulo y adelantar estudios para su transformación en nuevos productos con alto valor agregado que cumplan con las necesidades actuales de los consumidores y generen alternativas atractivas para la industria de alimentos. Sin embargo, debido a la termosensibilidad de sus componentes, los procesos para su conservación y uso mediante tratamientos térmicos deben ser evaluados ya que pueden provocar cambios estructurales y degradación de componentes de interés lo que lleva a la pérdida de la funcionalidad de los productos obtenidos.

La máxima actividad biológica y el efecto benéfico dependen de la máxima estabilidad de los compuestos bioactivos o mínima degradación de estos durante el procesamiento, por lo que es deseable estudiar los cambios tanto físicos como químicos para predecir el comportamiento de componentes de interés y que puedan ser utilizados en la industrialización de nuevos productos que amplíen el uso y la demanda de este fruto. Nuevas tecnologías como la microencapsulación mediante secado por aspersión permiten obtener jugos de frutas en polvo, conservando en alta medida sus componentes bioactivos y facilitando su almacenamiento y transporte. De esta forma también se contribuye a la expansión del campo de aplicación de los productos procesados de lulo como una fruta promisoriosa para el departamento de Nariño.

El secado por aspersión es un proceso simple, rentable, capaz de producir amplia gama de microcápsulas con un buen rendimiento. Según Martins, *et al.*¹³ El secado por aspersión es una de las tecnologías que ha presentado un mayor número de patente (41185) y artículos científicos (768) en los últimos años, lo que indica un creciente interés en la implementación de dicha tecnología.

Los microencapsulados a partir de jugos de frutas se usan comercialmente para impartir aroma, sabor, y en algunos casos color a alimentos y productos farmacéuticos. La capacidad que tengan los sistemas de secado y microencapsulación de retener estas características propias de las frutas, justifican las altas inversiones en tecnología para la obtención de dichos polvos, los cuales tienen altos valores comerciales y han logrado penetrar los mercados de la industria alimenticia y farmacéutica a pesar de que existe una gran competencia de productos sintéticos que imitan las características de las frutas y que son comercialmente muy baratos.

Sin embargo, la microencapsulación de materiales ricos en compuestos azucarados y volátiles, particularmente mediante el secado por aspersión, continúa siendo un desafío por la dificultad que representa la eliminación de agua sin la pérdida de componentes de olor, sabor y sustancias nutricionales, como se ha mostrado en estudios como el de Igual, *et al.*¹⁴ con pulpa de lulo donde tuvieron como variables de respuesta la actividad antioxidante, concentración de vitamina C, contenido de fenoles y flavonoides, que se pueden tener buenas retenciones de estos compuestos en el proceso de secado por aspersión. De tal forma que resulta de esencial importancia determinar las mejores condiciones de proceso de encapsulación a través de encontrar la influencia que tienen las diferentes variables sobre el producto final.

¹³ MARTINS, Isabel, *et al.* Microencapsulation of essential oils with biodegradable polymeric carriers for cosmetic applications. En: Chemical Engineering Journal. Junio, 2014. vol. 245. p. 193.

¹⁴ IGUAL, Marta, *et al.* Optimization of spray drying conditions for lulo (*Solanum quitoense* L.) pulp. En: Powder Technology. Febrero, 2014. vol. 256. p. 237.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 CULTIVO DE LULO

El lulo o naranjilla (*Solanum quitoense* Lam.), es conocido como una fruta tropical andina desde hace más de 80 años. El lulo es un arbusto originario de la Cordillera de los Andes y la amplitud de cultivo se extiende desde México hasta Chile, siendo los principales productores Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica y Honduras. Según el SIPSA¹⁵ esta especie produce una fruta con alta demanda en los mercados nacionales e internacionales por sus características sensoriales y propiedades. El lulo se cultiva entre 1500 a 3000 msnm dependiendo de la variedad, sin embargo su desarrollo óptimo se da entre los 2000 y 2200 msnm Según la Encuesta Nacional Agropecuaria¹⁶, el cultivo del lulo fue el que tuvo mayor crecimiento dentro de los cultivos de frutales, pasando de 30590 Ton en el año 2014 a 47983 Ton en 2015 con una variación positiva de 56,9 %. Los departamentos más destacados para la producción de lulo son Antioquia, Huila, Cundinamarca y Santander.

De acuerdo con las últimas cifras reportadas por AGRONET¹⁷, en el departamento de Nariño el área sembrada en 2014 fue de 463 ha, lo que representó el 4,2 % del total del país; para ese mismo año la producción fue de 1789 Ton, con un rendimiento de 4,7 Ton/ha. En el departamento de Nariño el cultivo de lulo está cobrando cada vez mayor importancia, contando con zonas que poseen climas y suelos muy aptos para el desarrollo de este cultivo.

3.1.1 Características fisicoquímicas del lulo. Para Gabas, *et al.*¹⁸ El lulo tiene una variación de peso entre 18 y 191 g, diámetro ecuatorial entre 32 y 78 mm y de diámetro polar entre 29 y 72 mm. El contenido de pulpa representa entre el 68 y 72 %, la cual posee un contenido de azúcares solubles entre 7 y 10 °Brix, dependiendo de su grado de madurez, la acidez titulable expresada como porcentaje de ácido cítrico es del 3 %, el pH varía entre 3,1 a 3,3, el fruto tiene un porcentaje de fibra

¹⁵ SIPSA. El cultivo del lulo (*Solanum Quitoense*), una fruta agradable y de gran valor nutritivo. [en línea]. Dane.gov.co. 2014. [Consultado el 3 de Agosto de 2019]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_may_2014.pdf.

¹⁶ DANE. Encuesta Nacional Agropecuaria. [en línea]. Dane.gov.co. 2018 [Consultado el 4 de agosto de 2018]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2015/boletin_ena_2015.pdf

¹⁷ AGRONET. Op. cit.

¹⁸ GABAS, Ana, *et al.* Propiedades termodinámicas de sorción de agua de pupa de lulo en polvo con encapsulantes. En: Ciencia y Tecnología de los Alimentos. 2009. vol. 29. no. 4. p. 911.

entre 0,3 y 1,54 % y una humedad entre 90,6 y 92,5 %, además se caracteriza por su olor y sabor agridulce.

El lulo es un fruto climatérico que se recolecta cuando ha alcanzado su completo desarrollo y presenta un 75 % de madurez, manifestado por un color amarillo característico con ligeros puntos verdes. Sin embargo este parámetro no es suficiente para definir el momento óptimo de cosecha, debido a irregularidades en los frutos, razón por la cual Mejía, *et al.*¹⁹ Determinaron experimentalmente la composición fisicoquímica y el color de esta fruta en seis estado de madurez, encontrando que los sólidos solubles totales variaron entre 4,2 y 10,3 °Bx, el pH en un rango de 3,67 a 3,90 y el porcentaje de acidez de 2,63 a 3,00 expresado como ácido cítrico. Mediante la medición de los parámetros de color se definieron 3 estados de maduración: verdes (0, 1 y 2), pintones (3 y 4) y maduros (5).

3.2 DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS

Los estudios de Bennett, *et al.*²⁰ Muestran que uno de los métodos más aplicados para la estabilización y aumento de la vida útil de los productos agroalimentarios es la deshidratación de los alimentos. Como comentan Fazaeli, *et al.*²¹ Esta técnica es aplicada ampliamente en frutas, con lo que se consigue, además, reducir su volumen y peso, facilitando su transporte y manipulación. Dentro de los procesos de deshidratación, la atomización (*spray drying*) es una alternativa interesante. Su aplicación se inició como lo comentan Frascareli, *et al.*²² Zhongxiang y Bhesh²³ con la obtención de leche, café y cacao en polvo extendiéndose actualmente a los zumos de frutas y a la encapsulación de compuestos sensibles al calor como los carotenoides y polifenoles.

¹⁹ MEJÍA, Clara, *et al.* Physicochemical characterization of the lulo (*Solanum quitoense* Lam.) castilla variety in six ripening stages. En: Vitae. Julio, 2012. vol. 19. p. 157.

²⁰ BENNETT, L, *et al.* Total polyphenolics and anti-oxidant properties of selected dried fruits and relationships to drying conditions. En: Journal of functional foods. 2011. vol. 3. no. 2. p. 116.

²¹ FAZAELI, Mahboubeh, *et al.* Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. En: Food and Bioproducts Processing. Octubre, 2012. vol. 90. no. 4: p. 667.

²² FRASCARELI, E, *et al.* Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. En: Food and Bioproducts Processing. Julio, 2012. vol. 90. no. 3. p. 413.

²³ ZHONGXIANG, Fang y BHESH, Bhandari. Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice. En: Food Research International. Octubre, 2012. vol. 48. no. 2. p. 478.

3.3 ALIMENTOS DESHIDRATADOS EN POLVO

A nivel mundial, las pérdidas posteriores a la cosecha, desde el campo hasta el mercado de consumo, representan grandes pérdidas económicas, esto sumado a los cambios en los estilos de vida, que exigen disponer de productos de fácil preparación, motivan el desarrollo de procesos para la producción de frutas y vegetales en polvo. Estos productos deben tener características deseables para el consumidor, como una buena capacidad de rehidratación, color y aroma atractivo y ser nutricionalmente lo más cerca posible de los productos naturales.

En general, el objetivo de la producción de alimentos en polvo es su dilución en un líquido para el consumo como bebida, alimento o mezclado con otros ingredientes para formar suspensiones para uso doméstico o industrial. Por lo tanto, una de las propiedades más importantes del polvo alimenticio deshidratado es su comportamiento cuando se reconstituye con agua o soluciones acuosas para su posterior uso o consumo.

Una conducta que percibieron, Chen y Özkan²⁴ y Forny, Marabi y Palzer²⁵ es que los consumidores buscan la reconstitución de alimentos en polvo rápida y completa. La estabilidad de los alimentos en polvo es muy susceptible a los cambios ambientales y puede causar fenómenos indeseables, tales como la pegajosidad y apelmazamiento, durante la producción y almacenamiento.

Para Gabas, *et al.*²⁶ y Kelebek²⁷ la obtención de producto en polvo a partir de fruta no es un proceso fácil debido al alto contenido en ácidos, como el cítrico y el málico, y 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. Gabas, *et al.*²⁸; Zhongxiang y Bhesh²⁹ afirman que una técnica habitual para contrarrestar estos problemas es la incorporación de determinados solutos que eviten la

²⁴ CHEN, Xiao y ÖZKAN, Necati. Stickiness, Functionality, and Microstructure of Food Powders. En: Drying Technology. Junio, 2007. vol. 25. p. 975.

²⁵ FORNY, Laurent; MARABI, Alejandro y PALZER, Stefan. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. En: Powder Technology. Enero, 2011. vol. 206. p. 72.

²⁶ GABAS, *et al.* Op. cit., p. 911

²⁷ KELEBEK, Hasim. Sugars, organic acids, phenolic compositions and antioxidant activity of Grapefruit (*Citrus paradisi*) cultivars grown in Turkey. En: Industrial Crops and Products. Noviembre, 2010. vol. 32. no. 3. p. 269.

²⁸ GABAS, *et al.* Op. cit., p. 912

²⁹ ZHONGXIANG, Fang y BHESH, Bhandari. Op. cit., p. 479

adherencia de las partículas en polvo tanto al equipo como entre sí. Fazaeli, *et al.*³⁰ Refuerzan esto y aconsejan que los solutos deben ser solubles y aportar baja viscosidad al jugo para realizar una pulverización correcta del producto durante el atomizado. En general, se trata de solutos de alto peso molecular como polisacáridos y proteínas.

3.4 MICROENCAPSULACIÓN DE ALIMENTOS

La encapsulación se define según Araneda y Valenzuela³¹ como una técnica por la cual gotas líquidas, partículas sólidas o gaseosas, son cubiertas con una película polimérica porosa conteniendo al final del proceso una sustancia activa. También Fuchs, *et al.*³² Dicen que esta membrana, barrera o película que recubre la sustancia activa está generalmente hecha de componentes con cadenas para crear una red con propiedades hidrofóbicas y/o hidrofílicas.

Se utiliza de igual manera el término de microencapsulación en la industria alimentaria, cuando se encapsulan sustancias alimenticias de bajo peso molecular o en pequeñas cantidades, aunque los dos términos, encapsulación y microencapsulación, se emplean indistintamente. Las aplicaciones de esta técnica en el sector de los alimentos se han ido incrementando cada vez más debido a la protección de los materiales encapsulados en este proceso frente a factores adversos como el calor y la humedad en el ambiente, permitiendo mantener su estabilidad y viabilidad.

López³³ reporta que los polímeros son los materiales encapsulantes más utilizados por su gran versatilidad, entre ellos se encuentran el alginato, la goma arábiga, el quitosano y las maltodextrinas con diferentes equivalentes de dextrosa. En el estudio de Yañez, *et al.*³⁴ Se afirma que las microcápsulas ayudan a que los materiales alimenticios empleados resistan las condiciones de procesamiento y empaquetado mejorando sabor, aroma, estabilidad, valor nutritivo y apariencia de sus

³⁰ FAZAELI, Mahboubeh, *et al.* Op. cit., p 668.

³¹ ARANEDA, C y VALENZUELA., F. Microencapsulación de extractantes: una metodología alternativa de extracción de metales. En: Revista Ciencia Ahora. 2009. vol. 22. no. 11. p. 9.

³² FUCHS, M, *et al.* Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidized bed agglomeration. En: Journal of Food Engineering. 2006. vol. 75. no. 1. p. 27.

³³ LÓPEZ, Darío. Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión. En: Revista Cubana de Farmacia. 2010. vol. 44. no. 3. p. 383.

³⁴ YAÑEZ, J, *et al.* Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. En: Revista Avance Y Perspectiva. Septiembre-Octubre, 2002. vol. 21. p. 319.

productos hacia el consumidor, hay variedad de materiales utilizados para realizar el proceso de microencapsulación y van aumentando a medida en que surgen nuevos biomateriales y se perfilan nuevas aplicaciones del proceso de microencapsulación de alimentos.

3.5 SECADO POR ASPERSIÓN

Gharsallaoui, *et al.*³⁵ Horszwald, Julien y Andlauer³⁶ comentan que el método de secado por aspersión o atomización consiste en la pulverización de un producto líquido, de manera que las gotas entran en contacto con una corriente de aire o gas inerte caliente que permite la evaporación inmediata del agua de las mismas.

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. La técnica permite, por lo tanto, obtener un polvo atomizado de alta calidad ya que la transferencia de calor entre el aire caliente y la gota es absorbida en su mayoría por el agua para su evaporación.

Gharsallaoui, *et al.*³⁷ Afirman que la temperatura del aire caliente tiene efecto en la formación de la costra o corteza superficial de la gota que permitirá una mayor o menor difusión del agua a la superficie para su correcto secado. Las características del producto a secar y el caudal de alimentación influyen sobre el secado del producto permitiendo obtener un polvo muy fino o partículas de mayor tamaño. En los estudios de Alamilla, *et al.*³⁸ Tonon, Brabet y Hubinger³⁹ y Fazaeli, *et al.*⁴⁰ Se observó que según los parámetros de aspersión seleccionados se obtendrán polvos más o menos higroscópicos, con un contenido mayor o menor de agua y unas características finales distintas.

³⁵ GHARSALLAOUI, A, *et al.* Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. En: Food Research International. 2007. vol. 40. no. 9. p. 1109.

³⁶ HORSZWALD, Anna; JULIEN, Heritier y ANDLAUER, Wilfried. Characterisation of Aronia powders obtained by different drying Processes. En: Food Chemistry. Mayo, 2013. vol. 141. no. 3. p. 2859.

³⁷ GHARSALLAOUI, A, *et al.* Op. cit., p. 1109.

³⁸ ALAMILLA, L, *et al.* Description of morphological changes of particles along spray drying. En: Journal of Food Engineering. Marzo, 2005. vol. 67. p. 180.

³⁹ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Miriam. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. En: Journal of Food Engineering. Octubre, 2008. vol. 88. no. 3. p. 411.

⁴⁰ FAZAELI, Mahboubeh, *et al.* Op. cit., p 668.

3.6 AGENTES ENCAPSULANTES

El encapsulante se constituye en una barrera entre el componente en la partícula y el medio ambiente, la cual lo protege del oxígeno, agua, luz y contacto con otros ingredientes, además de controlar la difusión. La eficiencia de la protección depende de la composición, estabilidad de la estructura y condiciones de operación durante la producción y uso de las partículas (temperatura, pH, presión, humedad). La barrera la conforman compuestos de cadena que crean una red con propiedades hidrofílicas o hidrofóbicas dependiendo del producto. Según Fuchs, *et al.*⁴¹ El polvo final tiene una composición específica del componente activo, pero además tiene buenas propiedades para su manejo, capacidad de mezclarse con agua o con otros polvos (tamaño, densidad y forma). Las propiedades de un polvo también dependen de las propiedades del material de la pared como por ejemplo de la cantidad relativa de lípidos que permanecen sin encapsularse en la superficie de la partícula.

Para Igual, *et al.*⁴² Los agentes portadores o encapsulante aumentan la temperatura de transición vítrea (Tg), el porcentaje de rendimiento y reducen la pegajosidad e higroscopicidad del producto en polvo. Los encapsulantes más comunes son goma arábiga, maltodextrinas, gelatina, almidones, pectina, metilcelulosa, alginatos, fosfatotricálcico y sus combinaciones.

La selección del agente encapsulante depende de los objetivos del proceso y del comportamiento fisicoquímico del material a procesar. Los agentes portadores o también llamados agentes encapsulantes, deben estar certificados como materiales "generalmente reconocido como seguro" (GRAS) para la aplicación de alimentos como documenta Barlow⁴³ también deben ser biodegradables, altamente solubles en el solvente de a procesar, tener suficiente capacidad deformación de película y producir una solución de baja viscosidad, incluso a altas concentraciones, tener un alto peso molecular y alta temperatura de transición vítrea para evitar la pegajosidad en el producto final.

De acuerdo con Miller y Gil⁴⁴, los almidones y sus derivados tienen buenas propiedades para el secado por aspersion, por ejemplo, un alto peso molecular y una alta temperatura de transición vítrea, son altamente soluble en agua fría con

⁴¹ FUCHS, M, *et al.* Op. cit., p. 27.

⁴² IGUAL, Marta, *et al.* Op. cit., p. 233.

⁴³ BARLOW, Susan. European legislative framework controlling the use of food additives. In M. Saltmarsh, M. Saltmarsh, & S. Barlow (Eds.), *Essential guide to food additives*. En: Cambridge: RSC Publishing. Mayo, 2013. p. 44.

⁴⁴ MILLER, Dave y GIL, Marco. *Spray-Drying Technology. Formulating Poorly Water Soluble Drugs*. 2012. p. 438.

baja viscosidad, poseen capacidad antiadherente y son capaces de producir polvos relativamente densos. Sin embargo, tienen baja capacidad de formación de película, lo cual es muy importante para eficiencia de secado y particularmente para la preservación de compuestos que son sometidos a un tratamiento de deshidratación.

A diferencia del almidón las gomas tienen fuerte capacidad de deformación de película, pero la temperatura de transición vítrea es relativamente baja. Del mismo modo, la celulosa y sus derivados tienen buenas características de deformación de película, pero no son digeribles Dordevic, *et al.*⁴⁵ Bayram, Bayram y Tekin⁴⁶ afirman que los efectos combinados de los derivados del almidón y las gomas proporcionan propiedades mejoradas para el secado por aspersión, pero el contenido de goma debe ser menor que el de los derivados del almidón.

3.7 MALTODEXTRINA

La maltodextrina es un hidrato de carbono muy utilizado en el proceso de encapsulación por sus grandes ventajas, entre estas están como afirma Diaz, *et al.*⁴⁷ Su fácil adquisición, precio económico comparado con otros materiales usados en los procesos de secado, es fácil de disolver y en concentraciones altas forma soluciones incoloras de baja viscosidad que permite una buena atomización en el proceso, forma una barrera protectora que reduce el contacto de la matriz con el oxígeno, conserva compuestos funcionales.

⁴⁵ DORDEVIC, V, *et al.* Encapsulation Technologies for Food Industry. Emerging and Traditional Technologies for Safe, Healthy and Quality Food. 2016. p. 330.

⁴⁶ BAYRAM, Özgür; BAYRAM, Mustafa y TEKIN, Ali. Spray drying of sumac flavour using sodium chloride, sucrose, glucose and starch as carriers. En: Journal of Food Engineering. Julio, 2005. vol. 69. no. 2. p. 254.

⁴⁷ DIAZ, Yessica, *et al.* Efecto de la encapsulación en el secado por atomización de biocomponentes de pitahaya amarilla con interés funcional. En: Información Tecnológica. Diciembre, 2017. vol. 28. no. 6. p. 24.

4. ANTECEDENTES

Muchos estudios se han llevado a cabo para evaluar la técnica de secado por aspersión en diferentes frutas. García *et al.*⁴⁸ Caracterizaron la composición de flavonoides, carotenoides y su capacidad antioxidante en la curuba (*Passiflora mollissima* Kunth) y evaluaron el efecto del proceso de secado por aspersión sobre su composición fitoquímica y capacidad antioxidante. Se observó que el secado por aspersión es una buena tecnología que garantiza la estabilidad de los compuestos bioactivos del fruto y sus propiedades funcionales. Los resultados mostraron que la curuba microencapsulada podría ser usada como un ingrediente alimentario que contiene compuestos bioactivos.

García, Ciro y Largo⁴⁹ evaluaron el efecto de la maltodextrina, proteína de soja, goma arábica y surfactante (polisorbato 80) sobre la estabilidad de una emulsión de un saborizante de mandarina para un proceso de encapsulación posterior a un proceso de secado spray. Se consideró la influencia de la estabilidad de la emulsión y las condiciones operativas de secado, tales como la temperatura del aire de entrada, la temperatura del aire de salida y la velocidad de atomización, sobre las características del producto encapsulado y el rendimiento del secado. Los mejores resultados se lograron con temperaturas de entrada y salida de aire de 213 °C y 90 °C, respectivamente, junto con una velocidad de disco de atomizador de 35000 rpm. Los autores concluyeron que los aromas en polvo de mandarina pueden encapsularse por secado por pulverización y las microcápsulas pueden contener el ingrediente activo con máxima funcionalidad y estabilidad.

Varios factores afectan los jugos de frutas secados por aspersión, en el estudio de Fazaeli *et al.*⁵⁰ Se afecta, la higroscopicidad, morfología de partícula, contenido de humedad, densidad aparente, solubilidad y rendimiento de secado, son algunas de las propiedades del polvo que están influenciadas por estos factores desecado por aspersión. La temperatura de entrada de la muestra es un factor importante, ya que altera su viscosidad y contribuye a una atomización uniforme de las partículas. Esta temperatura no debe ser demasiado alta para evitar la degradación de compuestos termolábiles, como las vitaminas que se encuentran en los jugos de frutas

⁴⁸ GARCÍA, A, *et al.* Banana Passion Fruit (*Passiflora mollissima* (Kunth) L.H. Bailey): Microencapsulation, Phytochemical Composition and Antioxidant Capacity. En: Molecules. Enero, 2017. vol. 22. no. 1. p. 1.

⁴⁹ GARCÍA, Jaime; CIRO, Héctor; LARGO, Esteban. Encapsulation of mandarin citrus flavor using spray drying technology and different wall materials. En: U.D.CA. Actualidad y Divulgación científica. Enero, 2015. vol. 18. no.1. p. 251.

⁵⁰ FAZAELI, Mahboubeh, *et al.* Op. cit., p 667.

Gharsallaoui *et al.*⁵¹ En un estudio que utilizó el secado por pulverización para encapsular d-limoneno, se encontró que las altas temperaturas de alimentación daban como resultado la formación de una capa más gruesa de material de pared, que actuaba como una barrera para la liberación de sabor.

Chegini y Ghobadian⁵² dicen que la velocidad de alimentación está relacionada con el contenido de humedad de los polvos, ya que si el atomizador se alimenta demasiado rápido, las gotas rociadas tendrán un tiempo de contacto más corto con el aire caliente, por lo que la evaporación de las gotas de agua será menor, así como el rendimiento de secado debido al depósito en las paredes de la cámara. También Tonon, Brabet y Hubinger⁵³ confirman que un aumento del caudal de alimentación de 5 g/min a 25 g/min da como resultado un alto contenido de humedad, menor rendimiento de secado y una menor higroscopicidad de los polvos de açai secados por pulverización.

Como se mencionó antes, los encapsulantes o adyuvantes de secado juegan un papel muy importante en el secado de jugos de frutas por atomización. La concentración del adyuvante de secado utilizado influye en las propiedades de los polvos. Fazaeli *et al.*⁵⁴ Encontraron un aumento significativo en el rendimiento de secado del jugo de mora negra después de aumentar la concentración de maltodextrina. Varios investigadores encontraron una relación inversa entre la concentración de maltodextrina y la densidad aparente como en el caso de Fazaeli *et al.*⁵⁵ Relación inversa de maltodextrina e higroscopicidad para Moreira *et al.*⁵⁶ y maltodextrina y el contenido de humedad de los polvos Kha, Nguyen y Roach⁵⁷.

La temperatura del aire de entrada es la temperatura del aire de secado, lo que provoca la evaporación de las partículas. Diferentes temperaturas del aire de entrada se han estudiado en secado por aspersión de varios jugos de frutas a lo largo de los años y este parámetro de secado afectó a todas las propiedades de los

⁵¹ GHARSALLAOUI, A, *et al.* Op. cit., p. 1109.

⁵² CHEGINI, G. y GHOBADIAN, B. Spray dryer parameters for fruit juice drying. En: World Journal of Agricultural Sciences. 2007. vol. 3. p. 230.

⁵³ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Míriam. Op. cit., p. 411.

⁵⁴ FAZAELI, Mahboubeh, *et al.* Op. cit., p 667.

⁵⁵ *Ibid.*, p. 667.

⁵⁶ MOREIRA, Germano, *et al.* Physical properties of spray dried acerola pomace extract as affected by temperature and drying aids. En: Food Science and Technology, 2009. vol. 42. no. 2. p. 641.

⁵⁷ KHA, Tuyen; NGUYEN, Minh y ROACH, Paul. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. En: Journal of Food Engineering. Junio, 2010. vol. 98. no. 3. p. 385.

polvos obtenidos. En los estudios de Kha, Nguyen, y Roach⁵⁸; Tonon, Brabet y Hubinger⁵⁹ a temperaturas más altas del aire de entrada se produce una evaporación excesiva, lo que da como resultado un menor contenido de humedad de los polvos. Según Kha, Nguyen, y Roach⁶⁰ un aumento de la temperatura del aire de entrada también puede causar una rápida formación de una capa seca impermeable en la superficie de las gotas, que conduce a la formación de partículas porosas, lo que resulta en bajas densidades, en otro estudio realizado por los autores Tonon, Brabet y Hubinger⁶¹ este efecto también causa partículas más grandes y con diferencias morfológicas; en el estudio de Santhalakshmy, *et al.*⁶² da alta higroscopicidad.

Son escasos los artículos de investigación publicados con relación a la obtención de microencapsulados usando frutas como lulo, uchuva y mora, a continuación se describen aquellos que se pudieron encontrar tras una exhaustiva búsqueda en diferentes bases de datos.

Dag, Kilercioglu y Oztop⁶³ encapsularon jugo de uchuva usando maltodextrina mezclada con goma arábica, alginato y pectina para mejorar su estabilidad frente a fluidos digestivos (simulados). Las micropartículas se obtuvieron mezclando jugo clarificado con los diferentes estabilizantes, luego las soluciones fueron homogeneizadas a 75000 rpm por 6 min y secadas mediante liofilización. Las micropartículas de jugo de uchuva retuvieron más del 75 % de compuestos fenólicos y mostraron buena estabilidad en condiciones simuladas de fluidos intestinales.

Cortéz, Hernández y Estrada⁶⁴ estudiaron las condiciones del proceso de secado por aspersión de suspensiones de uchuva adicionadas con nutrientes para la obtención de un producto con altos niveles de compuestos fisiológicamente activos.

⁵⁸ Ibid., p. 385.

⁵⁹ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Míriam. Op. cit., p. 411.

⁶⁰ KHA, Tuyen; NGUYEN, Minh y ROACH, Paul

⁶¹ TONON, Renata; FREITAS, Samuel y HUBINGER, Míriam. Spray drying of açai (*euterpe oleraceae* mart.) juice: effect of inlet air temperature and type of carrier. En: Journal of food processing and preservation. Abril, 2011. vol. 35. no. 5. p. 691.

⁶² SANTHALAKSHMY, Swaminathan; *et al.* Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. En: Powder Technology. 2015. vol. 274. p. 37.

⁶³ DAG, Dalma; KILERCIOGLU, Mete y OZTOP, Mecit. Physical and chemical characteristics of encapsulated goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice powder. LWT En: Food Science and Technology. 2017. vol. 83. p. 86–94.

⁶⁴ CORTÉS, Misael.; HERNÁNDEZ, Gustavo y ESTRADA, Eliana. Optimization of the spray drying process for obtaining Cape gooseberry powder: an innovative and promising functional food. En: Vitae. Marzo, 2017. vol. 24. no. 1. p. 59.

Los resultados mostraron una mayor retención de vitamina C ($69,7 \pm 0,7$ %) y ácido fólico ($90,9 \pm 1,8$ %) con la formulación de la suspensión que contiene un 24,4 % de maltodextrina y temperatura del aire a la entrada y salida de $194,2$ °C y $87,7$ °C, respectivamente. 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.

Villacrez, Carriazo y Osorio⁶⁵ usaron secado por aspersión para producir sólidos encapsulados de mora (*Rubus glaucus* Benth) que preservaran sus características sensoriales (color, olor y sabor). Evaluaron la influencia del agente encapsulante (maltodextrina, goma arábica almidón de maíz, almidón de yuca, Capsul®, Hi-Cap 100 así como mezclas de ellos) y el diámetro de la boquilla (1,0 y 2,0 mm) sobre las características de los sólidos, el contenido de antocianinas, la humedad y la actividad de agua. Los sólidos obtenidos tuvieron actividad de agua entre 0,199 y 0,422 y tamaños de partícula entre 3 a 15 μm . Los microencapsulados obtenidos con Hi-Cap 100 y maltodextrina tuvieron las mejores propiedades sensoriales. El contenido de antocianinas no cambió durante 180 días a 18 °C y humedad relativa menor de 60 %, sin embargo la vida útil de estos productos es altamente dependiente de la humedad durante el almacenamiento, ya que humedades altas causan un daño significativo a la estructura de las micropartículas y la pérdida del material encapsulado.

Alcantara *et al.*⁶⁶ Jugo de limón (*Citrus latifolia*) se secó mediante secado por aspersión usando diferentes concentraciones de mesocarpo pulverizado de *Citrus paradisi* como ayudante de secado. El mayor rendimiento (46,8 %) se obtuvo al añadir 1,2 % de encapsulante y se observó que el contenido de compuestos bioactivos aumento con la concentración de encapsulante.

Zareifard *et al.*⁶⁷ Estudiaron la factibilidad de secar jugo de lima concentrado (20 % sólidos solubles) mediante secado por aspersión usando maltodextrina (40, 50 y 60 %). La temperatura del aire de secado y la velocidad de flujo fueron 140, 155 y 170 °C y 47.1, 53.5 y 57.8 m^3/h respectivamente. La recuperación de producto con la concentración de maltodextrina y la velocidad de flujo del aire, pero la temperatura de entrada del aire no tuvo efecto significativo.

⁶⁵ VILLACREZ, José.; CARRIAZO, José y OSORIO, Coralía. Microencapsulation of andes berry (*Rubus glaucus* Benth.) aqueous extract by spray drying. En: Food and Bioprocess Technology. Mayo, 2013. vol. 7. no. 5. p. 1445.

⁶⁶ ALCANTARA, Yanilka *et al.* Effect of different concentrations of pulverized mesocarp of *Citrus paradisi* Macf. on the bromatological characteristics of spray-dried lemon juice powder. En: Food Science and Nutrition. Julio, 2018. vol. 6. no. 5. p. 1261.

⁶⁷ ZAREIFARD, Mohammad. *et al.* A Feasibility Study on the Drying of Lime Juice: The Relationship between the Key Operating Parameters of a Small Laboratory Spray Dryer and Product Quality. En: Food and Bioprocess Technology. 2011. vol. 5. no. 5. p. 1896.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar un proceso de microencapsulación de pulpa de lulo mediante secado por aspersión.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las condiciones de preparación de la dispersión jugo encapsulante que garanticen su estabilidad para el proceso de secado por aspersión.
- Optimizar los parámetros de secado para la obtención de un microencapsulado con atributos fisicoquímicos apropiados.
- Determinar la pérdida de vitamina C durante el proceso de encapsulación.

6. METODOLOGÍA

6.1 MATERIA PRIMA

Las frutas utilizadas en este estudio fueron lulos de la variedad castilla, procedentes siempre de un mismo lote cultivado en el municipio de La Unión (Nariño) y suministrados por la Asociación de Productos Agroindustriales de Nariño (APANA). Se adquirió en una bodega de APANA ubicada en la ciudad de Pasto 10 kg de fruta fresca suficiente para realizar los ensayos programados durante la semana.

Las frutas usadas fueron de calidad primera (1a) según la Norma Técnica Colombiana NTC 1265⁶⁸ y se seleccionaron por su estado y grado de madurez (estado de madurez 4), determinado mediante inspección visual, según la NTC 5093⁶⁹ y el estudio de Mejía, *et al.*⁷⁰ Sobre la caracterización fisicoquímica del lulo variedad castilla en 6 estados de madurez. Los frutos fueron trasladados hasta el laboratorio del Grupo de Investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA) de la Universidad de Nariño.

La fruta se lavó y desinfectó, se cortó en mitades, se cortó la pulpa en trozos que se introdujeron en bolsas plásticas resellables y se sometieron a un tratamiento térmico de escaldado a una temperatura de 70°C por un periodo aproximado de 10 min, el tratamiento térmico se realizó con el fin de inactivar enzimas evitando así el pardeamiento de la pulpa y una mejor conservación de la misma.

Después del tratamiento térmico se realizó un enfriamiento de la pulpa con agua potable hasta temperatura ambiente. A continuación la pulpa fue introducida en un extractor de jugos (Oster, USA), donde se obtuvo un jugo clarificado y sin semilla el cual fue mezclado con maltodextrina en porcentajes de 25% de maltodextrina y 75% jugo clarificado (porcentajes previamente escogidos). Finalmente la mezcla se empacó en bolsas resellables de un promedio de 900 g cada una y se almacenó en congelación a -23 °C para su posterior uso, la preparación de dicha mezcla se explicara más adelante.

⁶⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Lulo. NTC 1265. Bogotá D.C: El Instituto. 1979. p. 5.

⁶⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Frutas frescas: Lulo de castilla. Especificaciones. NTC 5093. Bogotá D.C: El Instituto. 2002. p. 19.

⁷⁰ MEJÍA, Clara, *et al.* Op. cit., p. 160.

6.2 EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR

Para determinar las mejores condiciones de alimentación al secador, se realizó un diseño compuesto central rotatorio (DCCR) 2³ con 6 puntos factoriales, 6 puntos axiales y 4 puntos centrales para un total de 16 ensayos, como se muestra en la tabla 1, los factores estudiados fueron: la velocidad de agitación (9000 a 22000 rpm), tiempo de agitación (5 a 10 min) y la concentración de encapsulante (10 al 30 % en p/p). Estos factores se eligieron según la revisión de literatura de: Weerachet, Siriwan y Onuma⁷¹ Du *et al.*⁷² Tonon, Brabet y Hubinger⁷³. El tiempo se midió directamente con un cronómetro desde el momento de inicio de la adición de la maltodextrina a la pulpa; la agitación se realizó con un agitador tipo Ultra Turrax y el encapsulante se pesó en una balanza analítica.

Tabla 1. Matriz experimental para evaluación de estabilidad de alimentación al proceso de secado

Prueba n°	Velocidad de Agitación Rpm	Tiempo de Agitación min	Cantidad de Encapsulante %
1	15500	7,5	20
2	15500	3,30	20
3	15500	7,5	3,18
4	9000	5	30
5	22000	10	30
6	4568,35	7,5	20
7	22000	10	10
8	15500	7,5	36,82
9	15500	7,5	20
10	26431,70	7,5	20
11	15500	11,70	20
12	9000	10	30
13	9000	10	10
14	22000	5	30
15	22000	5	10
16	9000	5	10

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.

⁷¹ WEERACHET, Jittanit.; SIRIWAN, Niti-Att y ONUMA Techanuntachaikul. Study of spray drying of pineapple juice using maltodextrin as an adjunct. *En: Chiang Mai J. Sci.* 2010. vol. 37. no.3. p. 499.

⁷² DU, Jing, *et al.* Comparison of the Efficiency of Five Different Drying Carriers on the Spray Drying of Persimmon Pulp Powders. *En: Drying Technology.* Junio, 2014. vol. 32. p. 1159.

⁷³ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Míriam. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Op. cit.*, p. 413.

6.2.1 Cálculo de la proporción de encapsulante. Los cálculos realizados para obtener las mezclas correspondientes a los diferentes porcentajes de maltodextrina se realizaron con la siguiente fórmula

$$\% \frac{p}{p} = \frac{\text{masa del soluto}}{\text{masa de solución}} \times 100$$

$$\% \frac{p}{p} = \frac{\text{gramos de maltodextrina}}{\text{gramos pulpa} + \text{gramos maltodextrina}} \times 100$$

Según el porcentaje de encapsulante y el peso de la pulpa de lulo, se despejó la cantidad de maltodextrina a adicionar.

6.2.2 Preparación de la dispersión. La dispersión fue preparada una vez calculado el porcentaje de maltodextrina con la ayuda de un agitador tipo Ultra turrax. Se adicionó la maltodextrina lentamente en pequeñas cantidades y constantemente mientras se agitaba, con el fin de evitar la formación de grumos.

Una vez preparadas las soluciones de pulpa con encapsulante, se procedió a realizar el secado por aspersión bajo unas condiciones de proceso constantes. Las variables de respuesta que se evaluaron en esta parte del estudio fueron: rendimiento de encapsulación, viscosidad y porcentaje de separación de fases, con el fin de evaluar las variables de respuesta del proceso se realizó un proceso de secado. El secado por aspersión se realizó con una muestra de 200 g de material de entrada y los parámetros usados en el equipo fueron constantes así: Temperatura de entrada: 250 °C, Velocidad entrada de alimentación (bomba peristáltica): 5 rpm = 3,1 mL/min, Velocidad del soplador (Blower): 40 Hz = 8 m/s, Tiempo de pulso (D-block): 15 s.

6.2.3 Evaluación de variables de respuesta. A continuación se describen los métodos para la determinación de las variables de respuesta que se evaluaron para determinar la estabilidad de la alimentación al secador.

6.2.3.1 Rendimiento de encapsulación. Se calculó el rendimiento según Sánchez⁷⁴ como la relación entre el peso del polvo obtenido sobre el peso de la mezcla de alimentación en base seca.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{P_{me}}{P_{mz}} * 100 \left(\frac{p}{p} \right)$$

⁷⁴ SÁNCHEZ, Zain. Evolución de propiedades fisicoquímicas, morfológicas y sensoriales de micro encapsulados de cacao obtenido por spray drying. Tesis de investigación para optar por el título Magister en ciencia y tecnología de alimentos. Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. 2016. p. 25.

Donde P_{me} , es el peso del producto final y P_{mz} , el peso total de la alimentación en base seca.

6.2.3.2 Viscosidad. La viscosidad de la dispersión se midió con un reómetro modelo DV-III (Brookfield, Canadá), con sonda de cilindros concéntricos y aguja RV-02 (2), con una velocidad de rotación de 50 rpm a temperatura ambiente, en cada ensayo se estableció un tiempo de prueba de 40 segundos con resultado de punto único promedio.

6.2.3.3 Estabilidad de la dispersión. Se evaluó a través de la observación de la separación entre las fases, acuosa y de sólidos. Cada muestra se depositó en una probeta de vidrio de 10 mL, donde al cabo de 2 horas, se observó el nivel de separación de las fases, la cual se midió directamente sobre la escala de la probeta. La fase líquida se separó hacia la parte superior de la probeta y la fase de sólidos, menor que la anterior, hacia la parte inferior. El porcentaje de separación se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ de separación} = \frac{\text{Volumen de fase inferior}}{\text{Volumen de liquido total}} * 100$$

6.3 OPTIMIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SECADO

El proceso de secado se llevó a cabo, en el equipo de secado spray a escala de laboratorio modelo 6000Y (Bilon, China) disponible en el laboratorio del grupo de investigación, Tecnologías Emergentes en Agroindustria (TEA) del programa de Ingeniería Agroindustrial de la universidad de Nariño.

El equipo consiste en una estructura de atomización de aerosol de doble corriente con una boquilla de 0,75 mm de diámetro. La cámara de secado, el separador ciclónico y el tanque de recepción están hechos de vidrio transparente a prueba de calor, con filtro a la entrada para prevenir la contaminación de la muestra. La alimentación se ajusta por medio de una bomba peristáltica. La temperatura de secado, el flujo de alimentación y la velocidad del aire de secado son programados y controlados por un Controlador Lógico Programable (PLC).

Con el fin de determinar las condiciones que optimizan las variables de respuesta, se utilizó un DCCR utilizando la metodología de superficie de respuesta, en el cual los factores a evaluar fueron la temperatura de entrada, velocidad del aire de secado y el flujo o caudal de la alimentación. Se tomó como base el estudio de Figueroa,

Ceballos y Hurtado⁷⁵ para determinar los niveles inferior y superior de los factores a evaluar, estos se establecieron en: temperatura de secado 150 y 230 °C, velocidad del aire de secado 6 y 9,5 m/s y caudal de alimentación 5,3 y 15 mL/min.

El diseño tuvo 8 puntos factoriales, 6 puntos axiales y 6 repeticiones en el punto central para un total de 20 ensayos tal como se indica en la tabla 2. El porcentaje de maltodextrina usado fue de 25 % determinado anteriormente con el análisis y los resultados de las pruebas realizadas en el ítem de estabilidad de la dispersión. Las variables de respuesta evaluadas fueron: contenido de humedad, rendimiento del proceso de encapsulación, humectabilidad, solubilidad, densidad aparente y el contenido de vitamina C.

Tabla 2. Matriz experimental para la optimización de los parámetros de secado

Prueba n°	Temperatura de Entrada °C	Velocidad de Aire de secado m/s	Caudal de Alimentación mL/min
1	190	7,53	10,15
2	150	5,55	15
3	190	10,85	10,15
4	190	7,53	10,15
5	190	4,2	10,15
6	230	5,55	5,3
7	150	9,5	5,3
8	230	5,55	15
9	230	9,5	15
10	122,73	7,53	10,15
11	150	9,5	15
12	190	7,53	1,99
13	190	7,53	18,31
14	257,27	7,53	10,15
15	190	7,53	10,15
16	190	7,53	10,15
17	230	9,5	5,3
18	150	5,55	5,3
19	190	7,53	10,15
20	190	7,53	10,15

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI.

⁷⁵ FIGUEROA, Paola; CEBALLOS, Miguel y HURTADO, Andrés. Microencapsulación mediante secado por aspersión de aceite de mora (*Rubus glaucus*) extraído con CO2 supercrítico. En: Revista Colombiana de Química. Agosto, 2016. vol. 45. no. 2. p. 42.

6.3.1 Evaluación de variables de respuesta. Las variables de respuesta que se evaluaron para la optimización del proceso de secado fueron:

6.3.1.1 Contenido de humedad y sólidos totales. El contenido de humedad se determinó usando un analizador de humedad Precisa XM 60 (Sartorius, Alemania) donde se secaron las muestras con calentamiento infrarrojo a 110°C. Los sólidos totales se obtuvieron por diferencia respecto al contenido de humedad Jaya y Das⁷⁶.

6.3.1.2 Rendimiento de encapsulación. Se calculó como la relación entre el peso del polvo obtenido sobre el peso de la mezcla de alimentación en base seca Sánchez⁷⁷.

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{P_{me}}{P_{mz}} * 100 \text{ (p/p)}$$

Donde P_{me} , es el peso del producto final y P_{mz} , el peso total de la alimentación en base seca.

6.3.1.3 Humectabilidad. Se determinó el tiempo de humectación según Ochoa, *et al.*⁷⁸. Se tomaron 10 g de producto en polvo que se depositó de forma uniforme sobre la superficie de un vaso de precipitado con 100 mL de agua destilada a 25°C, determinando con un cronometro el tiempo que tardaba la muestra de polvo en humedecerse totalmente.

6.3.1.4 Solubilidad. Se siguió el método de Cortés, Hernández y Estrada⁷⁹, se depositó 1 g de muestra en 10 mL de agua destilada, luego se agitó durante 30 s en un vortex, posteriormente se pasó a una centrifuga a 3000 rpm por 15 min a 20°C. Se tomó el sobrenadante y fue puesto en una caja Petri previamente pesada, se pesó junto con el líquido y se llevó a una temperatura de 105 °C, durante un periodo de 5 horas, por último como lo establece el estudio de Ceballos⁸⁰ se pesaron los sólidos recuperados y se calculó el porcentaje de solubilidad por diferencia de peso.

⁷⁶ JAYA, S y DAS, H. A vacuum drying model for mango pulp. En: Drying Technology. 2004. vol. 21. no. 7. p. 1217.

⁷⁷ SÁNCHEZ, Zain. Op. cit., p. 25

⁷⁸ OCHOA, Luz, *et al.* Propiedades de rehidratación y funcionales de un producto en polvo a base de jugo de granada y manzana. En: Ciencia U. A. Q. 2011. vol. 4. no. 2. p. 21.

⁷⁹ CORTÉS, Misael; HERNÁNDEZ, Gustavo y ESTRADA, Eliana. Op. cit., p. 61.

⁸⁰ CEBALLOS, Adela. Op. cit., p. 45.

6.3.1.5 Densidad aparente. Para esta prueba se siguió el procedimiento de Bhusari, Muzaffar y Kumar⁸¹. Se tomaron 2 g de muestra, pesados en una balanza analítica y se introdujeron en una probeta de vidrio de 10 mL, la cual se dejó caer desde una altura aproximadamente de 15 cm sobre una superficie suave, para no romper el recipiente, se dejó caer 10 veces para obtener el menor volumen ocupado del recipiente. La relación entre la masa del polvo y el volumen ocupado determinó la densidad aparente.

6.3.1.6 Contenido de vitamina C. Se determinó el contenido de ácido ascórbico mediante el método de espectrofotometría. Previamente al desarrollo de la curva se realizó el pesaje de manera cuidadosa para cada reactivo en la balanza analítica. Se pesó 0,5 g de ácido oxálico dihidratado al 99,7 % el cual se disolvió en un balón aforado de 250 mL donde se preparó una concentración al 0,15 % p/v. Enseguida se pesó 0,04 g de nitrito de sodio al 0,08 % p/v y se disolvió en un balón aforado de 50 mL y al finalizar se pesó 0,01 g de ácido ascórbico que se disolvieron en un balón aforado de 50 mL con el fin preparar al instante una solución al 0,02 % p/v.

Después se procedió a realizar la curva de calibración, se agregó en 9 tubos de ensayo limpios 0,1 mL de o-nitroanilina al 0,16 % en ácido acético-HCl y 0,1 mL de nitrito de sodio en cada tubo, una vez adicionados estos reactivos se mezclaron bien y se esperó a que la solución se decolorara. Luego se adicionó 3,8 mL de etanol al 96 %. En cada tubo numerados de 1 a 9 se adicionó 0; 0,1; 0,2; 0,3 0,4; 0,5 0,6; 0,7; 0,8 mL de patrón de ácido ascórbico respectivamente.

El patrón se preparó en el momento con 0,02 % de ácido ascórbico diluido en ácido oxálico al 0,15 %. Después de adicionar el patrón de ácido ascórbico, se agregó en cada tubo ácido oxálico 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2 mL respectivamente, se mezcló el contenido y se dejó en reposo durante 5 min. Al finalizar a cada tubo se adiciono 1,2 mL de hidróxido de sodio al 10 % y 3,8 mL de agua destilada, para un volumen final en cada tubo de ensayo de 10 mL, el tubo al que no se le adicionó patrón de ácido ascórbico fue considerado como blanco. Para determinar el contenido de vitamina C en las muestras, nuevamente se realizaron los pesajes previos de los anteriores reactivos ya descritos reemplazando el patrón de ácido ascórbico por los extractos de cada muestra. Para realizar cada extracto se tomó un tubo de ensayo, se pesó 1 g de muestra de cada uno de los polvos obtenidos y 1 mL de pulpa fresca, se disolvieron los polvos con 5 mL de ácido oxálico al 0,15 % en cada tubo. Para retirar sólidos y decolorar el extracto se usó 0,5 g de carbón activado por muestra, se realizó una filtración al vacío y se tomó 1 mL del extracto final.

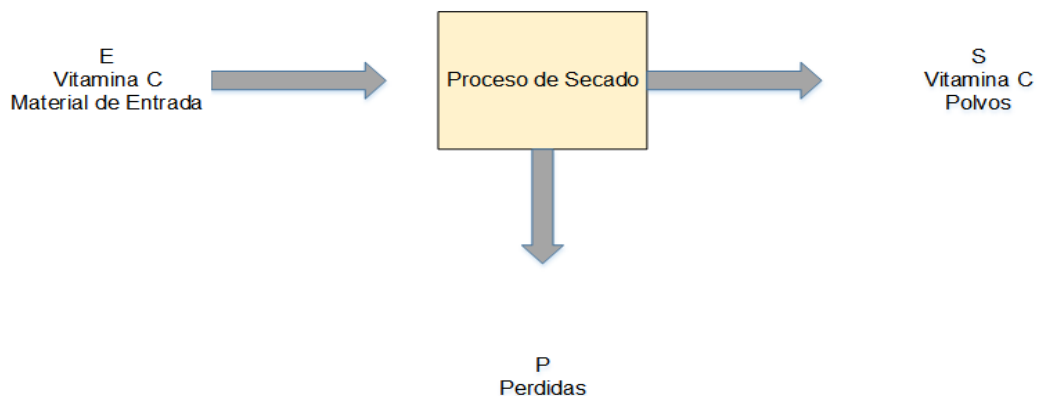
⁸¹ BHUSARI, Nitin; MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. En: Powder Technology. Junio, 2014. vol. 266. p. 357.

En tubos de ensayo diferentes se agregó 0,1 mL de o-nitroanilina y 0,1 mL de nitrito de sodio al 0,08 % en cada uno, posteriormente se adicionó 3,8 mL de etanol al 96 % y se agregó 1 mL de la filtración al vacío de cada una de los extractos de polvo y pulpa fresca, se mezcló el contenido y se dejó en reposo durante 5 min. Para concluir a cada tubo se adiciono 1,2 mL de hidróxido de sodio al 10 % y 3,8 mL de agua destilada, donde se obtuvo un volumen final en cada tubo de ensayo de 10 mL. Por último se tomó 1 mL de cada tubo de ensayo y se pasó a la celda para leer la lectura de absorbancia a 540 nm en el espectrofotómetro. El equipo usado fue un modelo Genesys 10s UV-Vis (Thermo Fisher Scientific, US).

6.4 EVALUACIÓN DE PERDIDA DE VITAMINA C.

Para determinar la cantidad de vitamina C que se degradó en el proceso de encapsulación se realizó un balance de materia. La concentración total de vitamina C que entró en el proceso fue medida en la solución de entrada al secador y dicho valor se multiplicó por el peso de la muestra que se procesó en cada ensayo con el fin de obtener el total de vitamina C inicial que entró en el proceso de secado. Luego se reconstituyeron los microencapsulados hasta una concentración de sólidos equivalente a la inicial en el jugo y se midió la concentración de vitamina C, que se multiplicó por el peso de microencapsulados obtenidos, para determinar el total de vitamina C en la salida. Realizando el balance de materia, se calculó la cantidad de vitamina C que se pierde, degrada o no se alcanza a recuperar en los polvos en el proceso de secado. La relación entre el total de vitamina C que no se recupera en los polvos finales, y la vitamina C que entra en el proceso, se consideró como el porcentaje de pérdida de vitamina C. En la figura 1 se muestra el diagrama de balance de materia para el proceso.

Figura 1. Balance de materia para la perdida vitamina C



Fuente: Esta investigación

6.4.1 Balance General. La ecuación de balance general se presenta a continuación

$$E = P + S$$

Ecuación 1

E = miligramos de vitamina C en material de entrada (pulpa con encapsulante)

S = miligramos de vitamina C en los polvos obtenidos

P = miligramos de vitamina C en material no encapsulado, que se ha degradado o perdido y que no se recupera en los polvos finales.

6.4.2 Cálculos de variables. Los datos conocidos del balance son los de material de entrada y los polvos de salida (E, S), se determinó la concentración de vitamina C mediante el método de espectrofotometría y el peso de la alimentación y del material de salida se midieron en una balanza analítica.

En el balance se desconocía los miligramos de vitamina C en las pérdidas (P). Para conocer este dato, se usaron las ecuaciones del balance de materia. De la ecuación 1 se despejó la cantidad de pérdidas (P).

$$P = E - S$$

Ecuación 2

Con el valor de miligramos de vitamina C en las pérdidas se realizó la relación para determinar el porcentaje de pérdidas.

$$\% \text{ Perdidas} = \frac{\text{mg vitaina C en perdidas (P)}}{\text{mg vitamina C totales (E)}} * 100$$

Ecuación 3

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 ESTABILIDAD DE LA DISPERSIÓN DE ALIMENTACIÓN AL SECADOR

Los resultados del DCCR para determinar la estabilidad de la dispersión de alimentación al secador se presentan en la tabla 3. La matriz experimental tuvo un total 16 ensayos, las variables de respuesta se realizaron por triplicado.

Tabla 3. Resultados DCCR para determinar la estabilidad de la dispersión.

Nº	Velocidad agitación Rpm	Tiempo agitación minutos	Encapsulante %	Rendimiento %	Viscosidad cP	Separación %
1	15500	7,5	20	6,32 ± 0,15	51,11 ± 0,02	15,00 ± 0,71
2	15500	3,3	20	5,33 ± 0,08	50,66 ± 0,03	25,00 ± 0,48
3	15500	7,5	3,18	1,82 ± 0,07	40,38 ± 0,06	37,50 ± 0,09
4	9000	5	30	11,72 ± 0,24	65,13 ± 0,05	10,00 ± 0,64
5	22000	10	30	9,35 ± 0,55	65,02 ± 0,03	13,75 ± 0,66
6	4568,35	7,5	20	6,23 ± 0,15	50,85 ± 0,04	17,50 ± 0,04
7	22000	10	10	3,90 ± 0,17	42,48 ± 0,03	31,25 ± 0,12
8	15500	7,5	36,82	8,49 ± 0,05	72,07 ± 0,03	6,25 ± 0,13
9	15500	7,5	20	6,52 ± 0,15	51,72 ± 0,03	16,25 ± 0,64
10	26431,7	7,5	20	7,14 ± 0,37	52,02 ± 0,02	17,50 ± 0,33
11	15500	11,7	20	7,64 ± 0,04	54,02 ± 0,03	16,25 ± 0,98
12	9000	10	30	11,57 ± 0,24	64,64 ± 0,03	11,25 ± 0,03
13	9000	10	10	2,41 ± 0,07	42,72 ± 0,04	35,00 ± 0,07
14	22000	5	30	10,87 ± 0,07	64,95 ± 0,03	12,50 ± 0,54
15	22000	5	10	3,20 ± 0,11	44,54 ± 0,04	32,50 ± 0,31
16	9000	5	10	2,30 ± 0,17	43,71 ± 0,04	33,75 ± 0,36

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

7.1.1 Rendimiento de encapsulación. En la tabla 4 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable rendimiento de encapsulación.

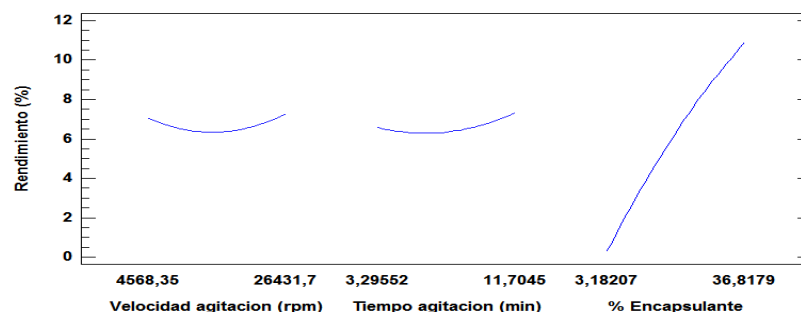
Tabla 4. Análisis de varianza para rendimiento de encapsulación

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad de agitación	0,0518485	1	0,0518485	2,55	0,356
B:Tiempo de agitación	0,666101	1	0,666101	32,81	0,11
C:Encapsulante	134,855	1	134,855	6642,73	0,0078
AA	0,755485	1	0,755485	37,21	0,1034
AB	0,0802402	1	0,0802402	3,95	0,2967
AC	3,73464	1	3,73464	183,96	0,0469
BB	0,42248	1	0,42248	20,81	0,1374
BC	0,774764	1	0,774764	38,16	0,1022
CC	0,60496	1	0,60496	29,8	0,1153
Falta de ajuste	18,1792	5	3,63585	179,1	0,0559
Error puro	0,0203011	1	0,0203011		
Total (corr.)	161,225	15			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El estadístico R^2 indica que el DCCR para la estabilidad de la dispersión, así ajustado, explica 88,71 % de la variable de respuesta rendimiento. El análisis de varianza indica que la concentración de encapsulante tuvo un efecto estadísticamente significativo y positivo sobre rendimiento de encapsulación. También la interacción velocidad de agitación–encapsulante mostró que estuvo en el límite de significancia, como se aprecia en la figura 2 efectos principales para rendimiento. La prueba de Durbin-Watson arrojó un valor-P mayor a 0,05, lo que indica que los ensayos se realizaron de forma aleatoria y los efectos ambientales y de tiempo afectaron por igual a todos los ensayos.

Figura 2. Efectos principales para rendimiento

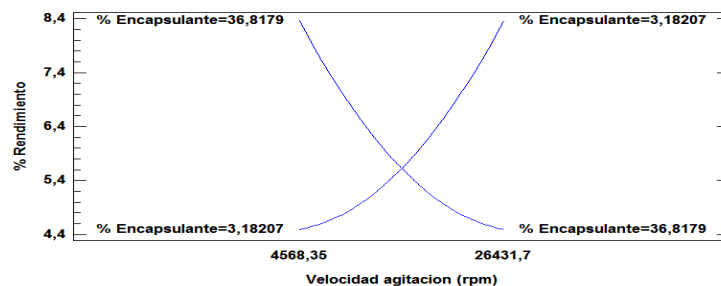


Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Los rendimientos de encapsulación obtenidos en todos los ensayos fueron bajos, siendo el mayor de 11,72 %, lo que indica que respecto a rendimiento las condiciones del proceso evaluadas no fueron las más adecuadas y probablemente debieron usarse niveles más altos de concentración de encapsulante, ya que éste tuvo un efecto positivo sobre el rendimiento de encapsulación.

En el rendimiento tienen efecto significativo la cantidad de maltodextrina usada y la interacción de la velocidad de agitación y el porcentaje de maltodextrina. Como se muestra en la figura 3 el encapsulante tiene una interacción de disminución del rendimiento cuando se usa una alta concentración maltodextrina y aumenta la velocidad de agitación, si la concentración de encapsulante es menor el rendimiento aumenta si la velocidad de agitación aumenta.

Figura 3. Interacción velocidad agitación y % encapsulante en el rendimiento



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Según Mosquera⁸², la maltodextrina es el agente encapsulante más usado en procesos de secado por aspersión de jugos de frutas debido entre otros factores a su alta temperatura de transición vítrea como consecuencia de su alto peso molecular.

La temperatura de transición vítrea es una temperatura en la cual, el estado del producto cambia de vítreo (amorfo) a gomoso (pegajoso) por proceso de sorción térmica o plastificante. Es una propiedad muy importante para los productos en polvo, ya que indica la calidad del producto. La baja temperatura de transición vítrea puede causar cambios físicos durante el secado por aspersión, es decir, adherencia, apelmazamiento y formación de grumos, durante los cuales pueden producirse cambios de color y aroma y otros cambios químicos y el rendimiento del proceso puede verse reducido⁸³.

⁸² MOSQUERA, Luz. Influencia de la humedad y de la adición de solutos (maltodextrina o goma arábica) en las propiedades fisicoquímicas de borjón y fresa en polvo. Tesis doctoral. España. Universidad Politécnica De Valencia. 2010. p. 16.

⁸³ SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Op. cit., p. 51.

Para Serra, *et al.*⁸⁴ La maltodextrina también ofrece beneficios tales como el bajo costo relativo (aproximadamente un tercio del almidón modificado), olor y sabor neutros, además de una baja higroscopicidad, evitando la aglomeración de partículas, alta solubilidad en agua fría, en algunos casos muestra un efecto antioxidante y una buena capacidad de retención de sustancias volátiles. También la maltodextrina está reconocida por la FDA como sustancia GRAS (generally recognized as safe). Mosquera⁸⁵ afirma que este agente encapsulante presenta una alta solubilidad que le permite incorporarse a la solución de alimentación del secador requiriendo una menor eliminación de agua, debido a lo anterior se utiliza la maltodextrina para matrices complejas como pulpa de frutas ya que contribuyen a reducir problemas de adherencia y aglomeración durante el almacenamiento mejorando la estabilidad del producto.

En su estudio Shishir y Chen⁸⁶ comentan que en general la adición de un agente encapsulante a la alimentación líquida mejora el secado de productos pegajosos reduciendo el contenido de humedad y aumentando el rendimiento de secado. También Tontul y Topuz⁸⁷ afirman que la principal razón para el bajo rendimiento en secado por aspersión es la pegajosidad de los componentes del alimento debido a su baja temperatura de transición vítrea, razón por la cual se adicionan materiales portadores que elevan dicha temperatura.

En varias investigaciones como las de Nishad, *et al.*⁸⁸ Du, *et al.*⁸⁹ Goula y Adamopoulos⁹⁰ se ha obtenido un aumento en el rendimiento del proceso al incrementar la concentración de encapsulante. Adicionalmente Tontul y Topuz⁹¹ afirman que a menor concentración de encapsulante, la viscosidad de la alimentación es menor, lo que ocasiona que las gotas ingresan a mayor velocidad

⁸⁴ SERRA, Samantha, *et al.* Op. cit., p. 468.

⁸⁵ MOSQUERA, Luz. Op. cit., p. 17.

⁸⁶ SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Op. cit., 56.

⁸⁷ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. En: Trends in Food Science & Technology. Mayo, 2017. vol. 63. p. 95.

⁸⁸ NISHAD, Jyoti, *et al.* Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.). En: Journal of Food Science and Technology. Marzo, 2017. vol. 54. no. 3. p. 691.

⁸⁹ DU, Jing, *et al.* Op. cit., p. 1160.

⁹⁰ GOULA, Athanasia y ADAMOPOULOS, Konstantinos. A new technique for spray drying orange juice concentrate. En: Innovative Food Science & Emerging Technologies. Abril, 2010. vol. 11. no. 2. p. 342-351.

⁹¹ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Op. cit., p. 93.

y pueden colisionar con las paredes internas de la cámara de secado, causando mayores depósitos y menor rendimiento.

Chong y Wong⁹² observaron un incremento significativo en el rendimiento de encapsulación de jugo de *Manilkara zapota* de 20,87 a 57,42 %, cuando la concentración de maltodextrina aumento de 10 a 30 %; un incremento adicional de maltodextrina a 40 % no produjo aumento adicional en el rendimiento y a un nivel de 50 % se observó una disminución, debido al incremento excesivo en la viscosidad de la alimentación, lo que ocasiono problemas durante el secado. Perrazo⁹³ utilizó hasta 75 % de maltodextrina para el secado por aspersion de jugo de uchuva, obteniendo un rendimiento de 75,8 %.

7.1.2 Separación de fases. En la tabla 5 se presentan los resultados del análisis de varianza de la separación de fases

Tabla 5. Análisis de varianza para separación de fases de la dispersión de alimentación al secador.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad de agitación	3,07E-11	1	3,07E-11	0	1
B:Tiempo de agitación	10,9264	1	10,9264	13,99	0,1663
C:Encapsulante	1385,51	1	1385,51	1773,45	0,0151
AA	12,9748	1	12,9748	16,61	0,1532
AB	0,78125	1	0,78125	1	0,5
AC	12,5	1	12,5	16	0,156
BB	48,5097	1	48,5097	62,09	0,0804
BC	0,78125	1	0,78125	1	0,5
CC	69,0567	1	69,0567	88,39	0,0675
Falta de ajuste	50,7031	5	10,1406	12,98	0,2047
Error puro	0,78125	1	0,78125		
Total (corr.)	1546,78	15			

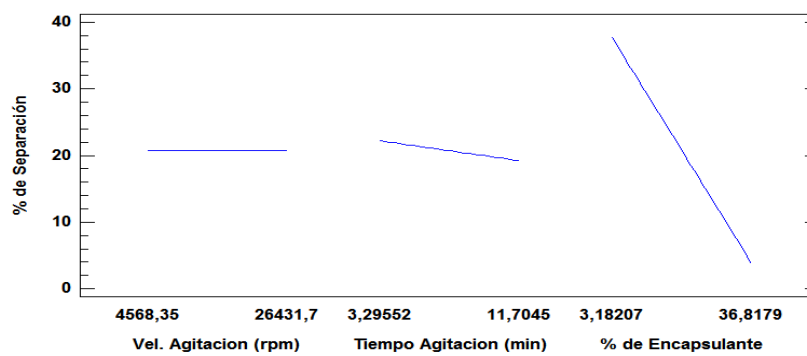
Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

⁹² CHONG, Siew y WONG, Chen. Production of Spray-Dried Sapodilla (*Manilkara zapota*) Powder from Enzyme-Aided Liquefied Puree. En: Food processing and preservation. Mayo, 2015. vol. 39. no. 6. p. 2609.

⁹³ PERRAZO, Aracelly. Estudio de secado por aspersion para la obtención de pulpa de uvilla (*Physalis peruviana* L) en polvo. Trabajo de Titulación, Modalidad: Proyecto de Investigación, previa a la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos. Universidad técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Ecuador. 2018. p. 25.

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica 96,67 % de la variable separación de fases. El estadístico R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 91,68 %. La prueba de Durbin-Watson dio un valor-P mayor a 0,05, por lo tanto no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 % esto quiere decir que las pruebas o ensayos se realizaron, ejecutaron en forma aleatoria. El análisis de varianza y la figura 4 indican que la concentración de encapsulante tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la separación de fases.

Figura 4. Efectos principales para separación de fases



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El aumento en la proporción de encapsulante ocasionó una disminución significativa en la separación de fases, lo que probablemente está relacionado con el aumento en la viscosidad de la solución. Lopez, Carvajal y Millan⁹⁴ explican que esto se debe a que la maltodextrina es un oligosacárido (carbohidrato complejo soluble), de esta forma contribuye a que el tiempo de formación de las fases se retarde, pero un gran número de polisacáridos tiene un impacto especialmente significativo en el aumento de viscosidad.

Sin embargo Tobón afirma que “las emulsiones o dispersiones son sistemas coloidales termodinámicamente inestables desde el punto de vista fisicoquímico, rápidamente o lentamente pueden presentar separación de fases.”⁹⁵ Esta

⁹⁴ LOPEZ, Beatriz.; CARVAJAL, Luz y MILLAN, Leonidas. Establecimiento de condiciones de la mezcla de pulpa de banano (*Musa paradisiaca* L.) Para someter a secado por aspersión. En: Vitae. Agosto, 2009. vol. 16. no. 3. p. 288.

⁹⁵ TOBÓN, Cynthia. Estandarización del proceso de secado por aspersión para la obtención de polvo de coco (*Cocos nucifera* L.). Trabajo de grado para optar al título de: Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Postgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. 2017. p. 39

separación se explica por la composición química de la maltodextrina Lopera, Seneida, *et al.*⁹⁶ Comenta que la maltodextrina posee unidades de D-glucosa unidas con enlaces α (1-4) y con un bajo número de enlaces α (1-6) en posición aleatoria. Moitre, Cocchi y Muzzio⁹⁷ explican también la composición de la maltodextrina, tiene moléculas de amilosa y amilopectina, la amilosa es un polímero lineal de unidades de glucosa unidas por enlaces α (1-4), en el cual algunos enlaces α (1-6) pueden estar presentes esta no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal. Mientras que la amilopectina es un polímero ramificado de unidades de glucosa unidas en un 94 – 96 % por enlaces α (1-4) y en un 4 – 6 % con uniones α (1-6) dichas ramificaciones se localizan aproximadamente a cada 15 – 25 unidades de glucosa, la amilopectina es parcialmente soluble en agua caliente.

7.1.3 Viscosidad. La tabla 6 presenta el análisis de varianza para los resultados de viscosidad de la solución.

Tabla 6. Análisis de varianza para la viscosidad de la dispersión

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Velocidad de agitación	0,556858	1	0,556858	2,99	0,3337
B:Tiempo de agitación	0,348258	1	0,348258	1,87	0,4018
C:Encapsulante	1426,7	1	1426,7	7668,37	0,0073
AA	0,267451	1	0,267451	1,44	0,4426
AB	0,0325125	1	0,0325125	0,17	0,7479
AC	0,0190125	1	0,0190125	0,1	0,803
BB	2,22321	1	2,22321	11,95	0,1793
BC	0,864613	1	0,864613	4,65	0,2765
CC	32,1688	1	32,1688	172,9	0,0483
Falta de ajuste	15,0658	5	3,01315	16,2	0,1838
Error puro	0,18605	1	0,18605		
Total (corr.)	1480,35	15			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

⁹⁶ LOPERA, Seneida, *et al.* Desarrollo y caracterización de micropartículas de ácido fólico formadas por secado por aspersión, utilizando goma arábica y maltodextrina como materiales de pared. *En: Vitae*. 2009. vol.16. no. 1. p. 57.

⁹⁷ MOITRE, Malena.; COCCHI, Florencia y MUZZIO, Mariana. Introducción, objetivos y características del producto final. *En: Producción de maltodextrina a partir de almidón de papa*. 1 ed. Argentina, 2018. p.15.

El valor de R^2 fue 98,97 %. La prueba de Durbin-Watson dio un valor-P mayor a 0,05, por lo tanto no hay indicación de auto-correlación serial en los residuos. La concentración de encapsulante y su efecto cuadrático tuvieron efecto significativo sobre la viscosidad de la dispersión de alimentación al secador. La variable viscosidad es importante en la preparación de la mezcla a secar para obtener un producto de buena calidad, una baja viscosidad permite una mejor fluidez de la mezcla en el sistema de secado, pero se necesita una alta concentración de sólidos totales para el rendimiento del producto final.

La maltodextrina debido a su gran número de ramificaciones como lo dice Lopez, Carvajal y Millan⁹⁸ adquiere una forma helicoidal de tamaño pequeño logrando volúmenes más pequeños, dando como resultado una mínima viscosidad; esto brinda la posibilidad de adicionar buenas cantidades de maltodextrina logrando un aumento en los sólidos solubles sin afectar de manera relevante la viscosidad final en la mezcla.

No obstante Aguirre⁹⁹ expresa que la concentración de maltodextrina no debe exceder los límites técnicos de operación del equipamiento (pueden elevar la viscosidad y perjudicar el desempeño del atomizador y boquillas de presión) .En conclusión la maltodextrina es un agente encapsulante que cumple con aumentar en gran proporción los sólidos solubles sin aumentar de manera drástica la viscosidad de la dispersión, sin embargo para esta investigación el porcentaje de encapsulante óptimo para tener una dispersión con estas características es del 25% debido a que si se pasa al 30% ya se encuentran problemas de fluidez de la dispersión en la bomba peristáltica por lo que se produce taponamientos en la manguera de la bomba y el secador requiere de mayor energía para llevar la mezcla hasta la boquilla.

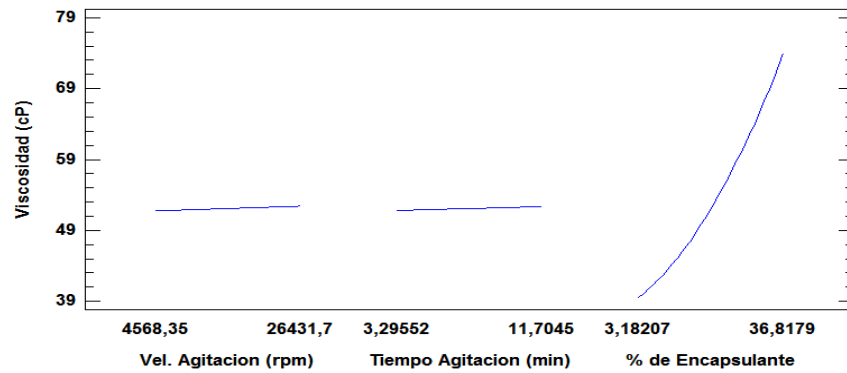
Estudios como el de Lopez, Carvajal y Millan¹⁰⁰ en pulpa de banano reportaron que La combinación de maltodextrina en un 39,95% con goma acacia en 3,29%, permitió obtener una mínima viscosidad de 634,59 cP y un máximo de 46,44% °Brix, combinación que era necesaria para encontrar el equilibrio entre las dos variables básicas que permitan el paso de la mezcla por el equipo de forma fluida con un rendimiento adecuado de producto. En el gráfico de efectos principales para la viscosidad, figura 5, se observa que a mayor concentración de encapsulante la viscosidad aumentó.

⁹⁸ LOPEZ, Beatriz.; CARVAJAL, Luz y MILLAN, Leonidas. Op. cit., p. 288.

⁹⁹ AGUIRRE, Juan. Optimización del proceso de secado por aspersion para la obtención de polvo de coco (*cocos nucifera* L.) fortificado con compuestos fisiológicamente activos. Trabajo de grado para optar al título de Doctor en Ciencias Agrarias. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Doctorado en Ciencias Agrarias. 2017. p. 29.

¹⁰⁰ LOPEZ, Beatriz.; CARVAJAL, Luz y MILLAN, Leonidas. Op. cit., p. 296.

Figura 5. Efectos principales para viscosidad

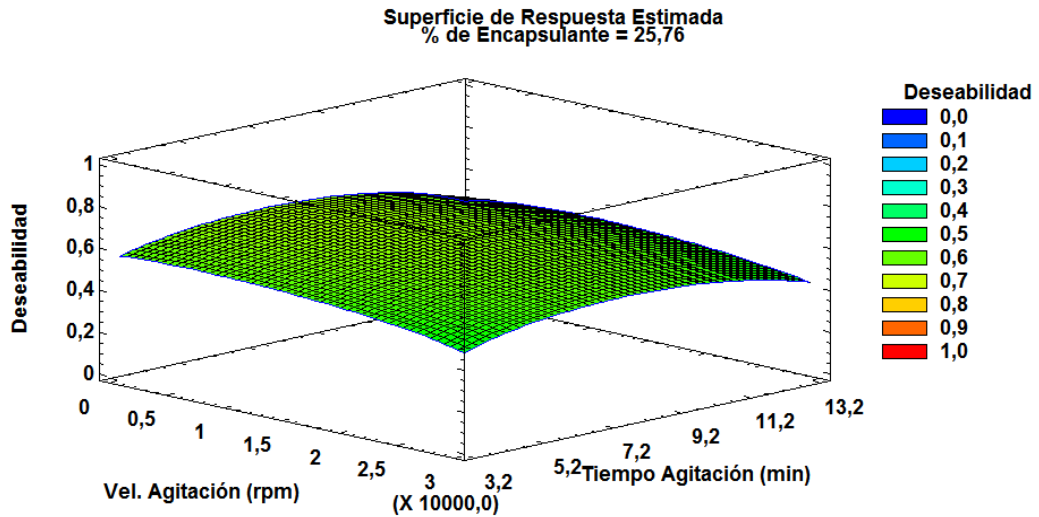


Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

7.1.4 Optimización multirespuesta de las condiciones de preparación de la dispersión. Para obtener la mejor estabilidad de la dispersión se evaluó un análisis multirespuesta en el DCCR con las siguientes metas. Rendimiento: Maximizar; Separación de fases: Minimizar; Viscosidad: Minimizar.

Como se observa en la figura 6, al mantener la cantidad de encapsulante a un nivel constante no se observa un cambio importante en la curvatura de la superficie de respuesta, esto demuestra que los factores velocidad de agitación y tiempo de agitación no afectan significativamente las variables de respuesta.

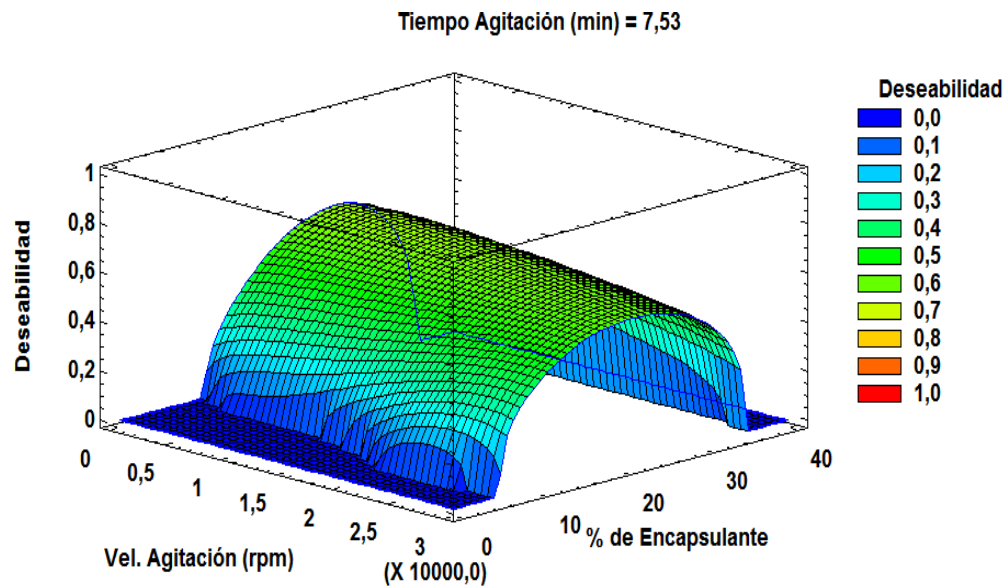
Figura 6. Superficie de respuesta concentración encapsulante constante



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

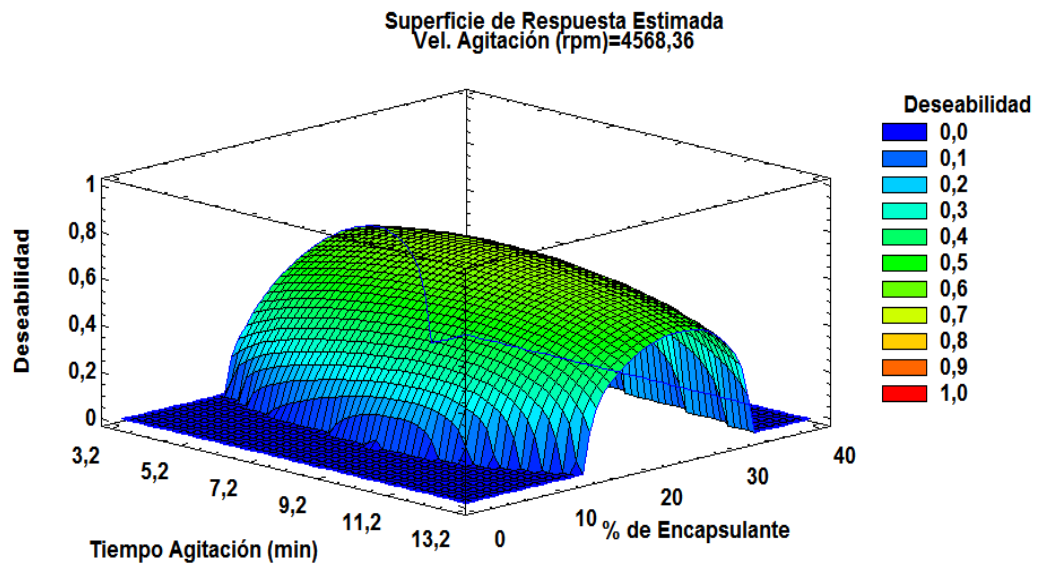
Cuando se varía el factor concentración de encapsulante, se tiende a ver un cambio importante en la forma de la superficie de respuesta. En las gráficas siguientes 7 y 8 se observa que este factor fue el único que tuvo efecto significativo sobre la estabilidad de la dispersión.

Figura 7. Superficie de respuesta a tiempo de agitación constante



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Figura 8. Superficie de respuesta a velocidad de agitación constante



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El resultado de la optimización del diseño realizado se indica en la tabla 7

Tabla 7. Optimización de la estabilidad de la dispersión

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Velocidad de agitación (rpm)	4568,35	26431,7	4568,36
Tiempo de agitación (min)	3,29552	11,7045	7,53318
Encapsulante (%)	3,18207	36,8179	25,7556

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Con los valores óptimos el DCCR predijo estadísticamente que las variables de respuesta, rendimiento de encapsulación obtuvo 9,44 %, porcentaje de separación de fases de 12,65 % y una viscosidad de 58,04 cP.

Estudios como el de Cárdenas, Velásquez y Ávila¹⁰¹ realizaron una optimización para la emulsión donde los valores óptimos para los agentes encapsulantes fueron de (maltodextrina 15,9% y goma arábiga 15,9%) con polisorbato 80 al 0,2%. La mezcla se homogeneizó durante 5 minutos a 10000 rpm con un sistema dispersor (Ultra-Turrax IKA-T25). La variable más importante fue la viscosidad la cual fue de 180 mPa.s (180 Cp) en un rango de 31 a 865 mPa.s, se mostró que el comportamiento de todas las emulsiones fue newtoniano y que en un líquido altamente viscoso, la difusividad de la molécula de sabor disminuye y cesa el flujo de circulación dentro de la gota pulverizada, además afecta negativamente la formación de las gotas en el dispositivo de atomización.

En el estudio de Cortés, Hernández y Ciro¹⁰² también utilizaron una misma metodología para obtener la suspensión para el secado spray. La suspensión de alimentación al secador por aspersión (pulpa más aditivo) se homogenizó utilizando un Ultraturax T25, (Janke & Kunkel IKA – Labortechnik) a 8000 rpm durante 2 minutos. Los resultados óptimos fueron MD (24%) y GA (0%) y la caracterización reológica de las suspensiones mostró un comportamiento tipo adelgazante con esfuerzo de cedencia (Modelo de Hershel-Bulkley) con un comportamiento de un fluido no newtoniano. Sin embargo se obtuvieron muestras con una mínima

¹⁰¹ CARDENAS, Jaime; VELÁSQUEZ, Héctor y ÁVILA, Esteban. Encapsulation of mandarin citrus flavor using spray drying technology and different wall materials. En: Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica.2015. vol.18. no. 1. p. 253.

¹⁰² CORTÉS, Misael; HERNÁNDEZ, Gustavo y CIRO, Héctor. Experimental optimization of cape gooseberry pulp (*Physalis peruviana*) formulation to improve its processing by spray drying. En: Vitae.2015. vol. 22.no. 2. p. 132

viscosidad aparente logrando el equilibrio entre las variables básicas que permiten el bombeo de la suspensión.

Los rangos utilizados por ellos son mucho más amplios que los usados por esta investigación debido a que el secador trabaja de manera eficiente dentro de los rangos propuestos en la matriz experimental y si se sobrepasa a un porcentaje mayor del 25% se produce un taponamiento de la boquilla. Los valores óptimos en cuanto a los agentes encapsulantes están entre 24% y 31% lo que coincide con el óptimo que se obtuvo en el diseño experimental DCCR (25,75%) y la manera de preparación de la dispersión fue muy similar en cuanto a la utilización del mismo sistema dispersor, donde las velocidades fueron mayores con un tiempo menor en comparación con los resultados óptimos obtenidos.

7.2 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO POR ASPERSIÓN

En la tabla 9 se muestran los resultados del DCCR para el proceso de secado por aspersión y microencapsulación de jugo de lulo. Las variables de respuesta fueron: Humedad, densidad aparente, solubilidad, rendimiento, humectabilidad, vitamina C.

Tabla 8. Resultados del DCCR para el proceso de secado por aspersión de jugo de lulo.

Ensayo	T° °C	VA m/s	CE mL/min	H %	R %	DA g/cm ³	TH Seg	S %	VC mg/100 g
1	190	7,53	10,15	6,20 ± 0,09	9,00 ± 0,54	0,58 ± 0,01	124,97 ± 2,16	90,76 ± 0,78	21,99 ± 1,99
2	150	5,55	15	10,06 ± 0,20	0,24 ± 0,06	0,61 ± 0,02	160,00 ± 5,02	81,11 ± 1,25	17,14 ± 2,42
3	190	10,85	10,15	4,65 ± 0,14	15,60 ± 0,71	0,48 ± 0,05	105,03 ± 2,38	92,28 ± 0,21	24,32 ± 0,95
4	190	7,53	10,15	5,85 ± 0,59	8,34 ± 0,36	0,53 ± 0,04	129,20 ± 5,60	90,42 ± 0,35	19,57 ± 0,80
5	190	4,2	10,15	9,12 ± 0,20	0,73 ± 0,01	0,69 ± 0,02	150,00 ± 2,10	85,47 ± 1,29	15,88 ± 0,95
6	230	5,55	5,3	5,02 ± 0,17	8,63 ± 0,03	0,61 ± 0,03	152,43 ± 5,58	91,30 ± 0,30	16,09 ± 0,91
7	150	9,5	5,3	4,80 ± 0,28	15,22 ± 0,09	0,67 ± 0,02	130,57 ± 5,57	93,24 ± 0,53	30,01 ± 1,64
8	230	5,55	15	7,43 ± 0,59	4,29 ± 0,10	0,49 ± 0,02	185,17 ± 4,19	89,10 ± 0,06	17,79 ± 2,44
9	230	9,5	15	5,05 ± 0,20	9,08 ± 0,45	0,43 ± 0,02	153,87 ± 6,17	92,17 ± 0,02	21,54 ± 2,19
10	122,73	7,53	10,15	7,78 ± 0,75	2,70 ± 0,06	0,76 ± 0,01	102,60 ± 4,00	88,72 ± 0,97	24,38 ± 0,91
11	150	9,5	15	6,67 ± 0,03	6,66 ± 0,14	0,55 ± 0,02	125,37 ± 4,47	90,69 ± 0,32	21,26 ± 1,30
12	190	7,53	1,99	4,50 ± 0,17	21,16 ± 0,09	0,74 ± 0,02	100,57 ± 5,06	92,48 ± 0,63	26,03 ± 3,13
13	190	7,53	18,31	7,62 ± 0,13	4,64 ± 0,16	0,53 ± 0,03	174,13 ± 4,27	88,48 ± 0,12	19,27 ± 2,44
14	257,27	7,53	10,15	5,40 ± 0,06	12,72 ± 0,23	0,45 ± 0,02	175,07 ± 2,02	92,56 ± 0,11	16,34 ± 2,45
15	190	7,53	10,15	6,50 ± 0,07	9,25 ± 0,12	0,57 ± 0,03	126,23 ± 5,78	90,69 ± 0,03	20,93 ± 2,65
16	190	7,53	10,15	6,60 ± 0,63	10,38 ± 0,06	0,54 ± 0,03	128,57 ± 2,39	90,02 ± 0,65	21,50 ± 1,28
17	230	9,5	5,3	4,44 ± 0,30	21,41 ± 0,14	0,55 ± 0,03	157,47 ± 2,71	91,83 ± 0,63	20,80 ± 1,99
18	150	5,55	5,3	6,02 ± 0,17	5,33 ± 0,07	0,86 ± 0,06	116,77 ± 2,70	90,22 ± 0,08	25,92 ± 1,10
19	190	7,53	10,15	5,89 ± 0,21	9,50 ± 0,25	0,57 ± 0,03	126,43 ± 1,52	90,93 ± 0,48	21,50 ± 1,41
20	190	7,53	10,15	6,66 ± 0,49	8,63 ± 0,04	0,59 ± 0,04	124,50 ± 3,10	91,89 ± 0,70	22,67 ± 1,25

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

VA = Velocidad aire de secado (m/s) R = Porcentaje de Rendimiento (%)
H = Porcentaje de Humedad (%) CE = Caudal entrada de alimentación (mL/min)
DA = Densidad aparente (g/cm³) TH = Tiempo de Humectabilidad (s)
S = Porcentaje de Solubilidad (%) VC = Contenido de Vitamina C en polvos (mg/100g)

7.2.1 Contenido de humedad de las microcápsulas. En la tabla 10 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable contenido de humedad en los polvos microencapsulados.

Tabla 9. Análisis de varianza para la humedad de los microencapsulados

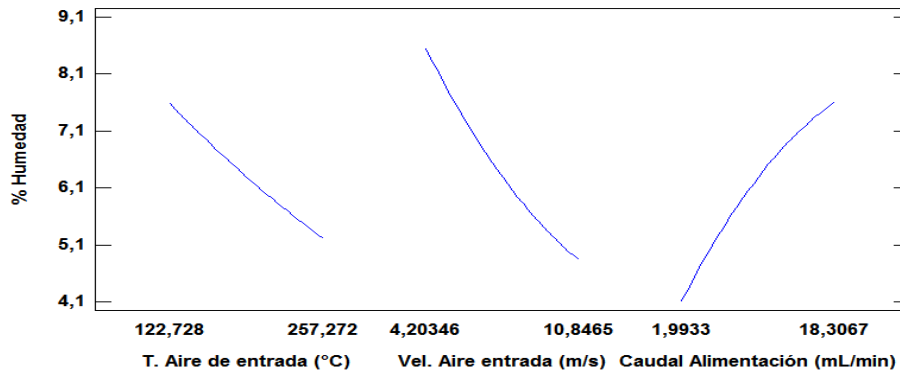
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura Entrada	6,76612	1	6,76612	52,98	0,0008
B: Vel. Aire Secado	16,6674	1	16,6674	130,51	0,0001
C: Caudal Alimentación	14,7175	1	14,7175	115,24	0,0001
AA	0,0196822	1	0,0196822	0,15	0,7108
AB	0,340313	1	0,340313	2,66	0,1635
AC	1,04401	1	1,04401	8,18	0,0354
BB	0,286867	1	0,286867	2,25	0,1942
BC	1,97011	1	1,97011	15,43	0,0111
CC	0,326088	1	0,326088	2,55	0,1709
Falta de ajuste	0,984965	5	0,196993	1,54	0,323
Error puro	0,638533	5	0,127707		
Total (corr.)	43,8348	19			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica 96,30 % de la variabilidad en Humedad. La prueba de Durbin-Watson, indicó que no hubo autocorrelación en los resultados. Los 3 factores evaluados, así como algunas de sus interacciones (AC y BC) tuvieron efecto significativo sobre el contenido de humedad de los microencapsulados.

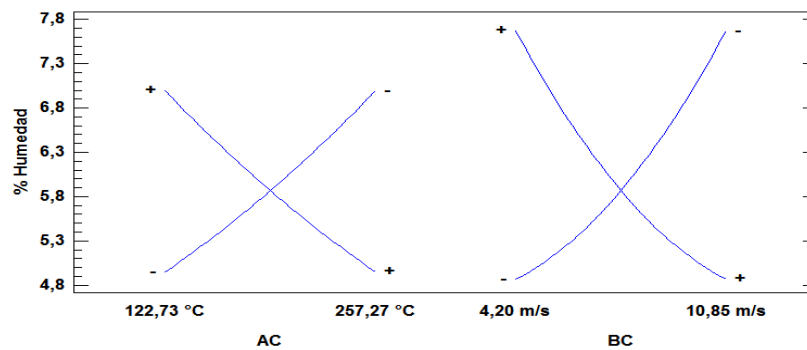
En la gráfica de efectos principales para humedad figura 9, se observa que ésta disminuyó al aumentar la temperatura de entrada del aire y la velocidad del aire de secado, mientras que al aumentar el caudal de alimentación el contenido de humedad también aumentó. En la figura 10 se observa la interacción de la temperatura de entrada con el caudal de alimentación y la interacción de la velocidad de aire de secado y el caudal de alimentación; si la temperatura aumenta con un nivel de caudal de alimentación alto la humedad tiende a disminuir. También se puede notar que al usar un nivel alto de caudal de alimentación y un aumento en la velocidad de aire de secado, el contenido de humedad desciende.

Figura 9. Efectos principales para humedad



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Figura 10. Interacciones en el contenido de humedad.



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El menor contenido de humedad (4,44 %) se obtuvo con una velocidad del aire de 9,5 m/s, temperatura de entrada de 230 °C y un caudal de alimentación de 5,3 mL/min, mientras que los contenidos de humedad más altos fueron 10,06 y 9,12 %, obtenidos en los ensayos 2 y 5 respectivamente, en los cuales los niveles de los factores fueron muy desfavorables para el secado.

“El agua es el solvente de peso molecular más bajo que tiene una temperatura de transición vítrea de -135 °C. Aunque la mayoría de los productos en polvo tienen menos del 5% de contenido de humedad, un pequeño aumento del contenido de humedad (por ejemplo, 1%) puede disminuir drásticamente la temperatura de transición vítrea”¹⁰³. De modo que es necesario un porcentaje bajo de humedad en los polvos obtenidos para obtener una estabilidad y calidad en estos.

¹⁰³ SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Op. cit., p. 51.

El contenido de humedad varía dependiendo la velocidad del aire de secado, “La velocidad del flujo de aire de secado también es un factor importante en el secado por pulverización, ya que la energía necesaria para la evaporación cambia dependiendo del suministro de aire de secado a la cámara”¹⁰⁴. En nuestro caso como se observa en el diagrama de efectos principales a medida que aumentó la velocidad de aire de secado la humedad en los polvos finales disminuyó. En la mayoría de los estudios pasa lo contrario, debido al tiempo de retención en la campana de secado, esto podría deberse a que los equipos de secado usados son de un diseño diferente algunos son a contracorriente y la mayoría tienen dispersión de discos, donde se puede controlar la velocidad de dispersión según la velocidad del disco, de este modo se afirma que “El aumento de los tiempos de residencia conduce a un mayor grado de eliminación de la humedad. Como resultado, un aumento en el flujo de aire de secado, disminuyendo el tiempo de residencia del producto en la cámara de secado, condujo a un mayor contenido de humedad”¹⁰⁵. En nuestro caso la velocidad de aire de secado ayuda a mejorar el gradiente de temperatura ya que el diseño del equipo usado ubica el soplador de aire de secado detrás de la resistencia que genera el calor para realizar el secado además “A temperaturas más altas del aire de entrada, hay un mayor gradiente de temperatura entre la alimentación atomizada y el aire de secado, lo que resulta en una mayor fuerza impulsora para la evaporación del agua y, por lo tanto, produce polvos con menor contenido de humedad”¹⁰⁶

Se observó un aumento en el contenido de humedad en los polvos al aumentar el caudal de alimentación, esto pudo deberse a que hubo mayor presencia de material para secar en la campana de secado y no se alcanzó a eliminar humedad en las gotas de pulpa rociadas en la campana, como lo afirman Tontul y Topuz¹⁰⁷ a una mayor velocidad de flujo de alimentación permitió una transferencia de calor y masa más lenta, esto dificultó el secado adecuado de las gotas, por lo tanto, produjo partículas húmedas que se pegaron en la pared de la cámara de secado; una velocidad de flujo de alimentación más alta no permite un tiempo de interacción adecuado entre las micro gotas de alimentación y el aire caliente, por lo tanto, el tiempo de contacto más corto hace que la transferencia de calor y masa sea menos efectiva y conduce a un mayor contenido de humedad en el producto final.

¹⁰⁴ *Ibíd.*, p. 57.

¹⁰⁵ GOULA, Athanasia y ADAMOPOULOS, Konstantinos. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. *En: Journal of Food Engineering*. Enero, 2005. vol. 66. p. 38.

¹⁰⁶ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Míriam. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. *Op. cit.*, p. 414.

¹⁰⁷ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. *Op. cit.*, p. 95.

En el estudio de Pishut¹⁰⁸ obtuvo algo similar y como consecuencia una menor evaporación de agua debido a que el flujo de alimentación con un caudal de alimentación más alto exige más energía para evaporar la misma cantidad de humedad de las gotas de alimentación. Otros estudios como el de Movahhed y Mohebbi¹⁰⁹ muestran los efectos de la combinación de temperatura del aire de entrada y la velocidad del flujo de alimentación en el contenido de humedad donde se observó que al mejorar el flujo de alimentación se incrementó el contenido de humedad porque el volumen de gota rociado era mayor y se aumentó el agua que quedaba en el producto. Así mismo Mestry, Mujumdar y Thorat¹¹⁰; Muzaffar y Kumar¹¹¹ reportaron resultados similares.

Shishir y Chen¹¹² dicen que la temperatura de entrada es un factor importante dentro del secado por aspersión porque influye en las propiedades fisicoquímicas del polvo debido a que ésta es la que controla el contenido de humedad de los polvos ya que las altas temperaturas suministran más calor a la campana de secado incrementando la velocidad del secado. Asimismo el bajo contenido de humedad cumple un papel importante en la reducción de la temperatura de transición vítrea.

Según Igual, *et al.*¹¹³, a temperaturas más altas del aire de entrada hubo un mayor gradiente de temperatura entre la alimentación atomizada y el aire de secado como resultado hubo una mayor tasa de transferencia de calor para la evaporación del agua, produciendo así polvos con bajo contenido de humedad. De igual manera se han hecho estudios como los de Muzaffar y Kumar¹¹⁴; Tonon, Freitas y Hubinger¹¹⁵;

¹⁰⁸ PHISUT, N. Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. En: International Food Research Journal. 2012. vol. 19. no. 4. p. 1302.

¹⁰⁹ MOVAHHED, Mohammad y MOHEBBI, Mohebbat. Spray Drying and Process Optimization of Carrot-Celery Juice. En: Journal of Food Processing and Preservation. Octubre, 2015. vol. 40. no. 2. p. 216.

¹¹⁰ MESTRY, A.; MUJUMDAR, A y THORAT, B. Optimization of Spray Drying of an Innovative Functional Food: Fermented Mixed Juice of Carrot and Watermelon. En: Drying Technology. Junio, 2011. vol. 29. p. 1125.

¹¹¹ MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Parameter optimization for spray drying of tamarind pulp using response surface methodology. En: Powder Technology. Julio, 2015. vol. 279. p. 182.

¹¹² SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Op. cit., p. 51.

¹¹³ IGUAL, Marta, *et al.* Op. cit., p. 236.

¹¹⁴ MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Op. cit., p. 182.

¹¹⁵ TONON, Renata; FREITAS, Samuel y HUBINGER, Míriam. Spray drying of açai (*euterpe oleraceae* mart.) juice: effect of inlet air temperature and type of carrier. Op cit., p. 694.

Kha, Nguyen y Roach¹¹⁶ Chegini y Ghobadian¹¹⁷ a temperaturas más altas del aire de entrada, se produce una buena evaporación que termina con una disminución del contenido de humedad en los polvos obtenidos.

7.2.2 Rendimiento. En la tabla 11 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable rendimiento del proceso de secado por aspersión.

Tabla 10 Análisis de varianza para el rendimiento del proceso de secado

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura Entrada	78,8321	1	78,8321	152,32	0,0001
B: Vel. Aire Secado	253,878	1	253,878	490,54	0
C:Caudal Alimentación	247,199	1	247,199	477,64	0
AA	6,69178	1	6,69178	12,93	0,0156
AB	0,19845	1	0,19845	0,38	0,5629
AC	1,14005	1	1,14005	2,2	0,1979
BB	3,88222	1	3,88222	7,5	0,0408
BC	16,4165	1	16,4165	31,72	0,0024
CC	19,1742	1	19,1742	37,05	0,0017
Falta de ajuste	11,8887	5	2,37773	4,59	0,0598
Error puro	2,58773	5	0,517547		
Total (corr.)	645,236	19			

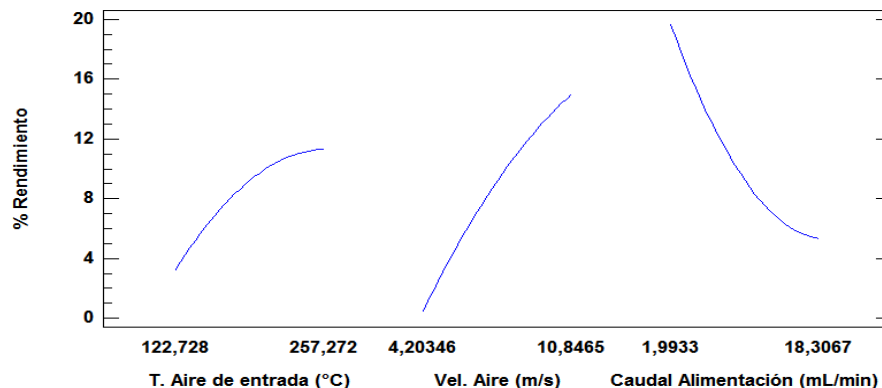
Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El valor de R^2 obtenido indica que el modelo explica 97,76 % de la variabilidad en el rendimiento. En la tabla de análisis de varianza tabla 11 siete efectos tuvieron una valor-P menor que 0,05 indicando que tuvieron efecto significativo sobre el rendimiento con un nivel de confianza del 95,0%. En la prueba de Durbin-Watson se obtuvo un valor de P de 0,7115, indicando que no hubo una auto-correlación en los datos. En la figura 11 se observa el comportamiento de los factores con respecto al rendimiento.

¹¹⁶ KHA, Tuyen; NGUYEN, Minh y ROACH, Paul. Op. cit., p. 387.

¹¹⁷ CHEGINI, G y GHOBADIAN, B. Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. En: Journal Drying Technology. Febrero, 2005. vol. 23. P.660.

Figura 11. Efectos principales para rendimiento



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Tontul y Topuz¹¹⁸ y Muzaffar y Kumar¹¹⁹ mencionan que un secado por aspersión exitoso debe tener un rendimiento del producto superior al 50 %, sin embargo en las pruebas realizadas solo se alcanzó un rendimiento máximo del 21,41 %. Esto es una gran preocupación ya que el rendimiento determina el beneficio, el costo de producción y la eficiencia del proceso.

En algunos ensayos se observó una alta adhesión de material en las paredes internas de la campana de secado, lo que indica que posiblemente se hubiera requerido adicionar una mezcla de coadyuvantes de secado para aumentar así la temperatura de transición vítrea de la solución. La principal causa del bajo rendimiento fue posiblemente el problema de pegajosidad que se deriva de una baja temperatura de transición vítrea de los componentes de la pulpa, tales como los azúcares y ácidos orgánicos. Tonon, Brabet y Hubinger¹²⁰ observaron que el goteo dentro de la campana de secado se debió a una atomización inadecuada por un alto caudal de alimentación resultando en un rendimiento reducido del proceso.

Además al trabajar con flujos altos de alimentación la eficiencia del secado fue baja, afectando el rendimiento del producto. Tontul y Topuz¹²¹ afirman que el aumento del flujo de alimentación a una presión de atomización constante aumenta el tamaño de gota al comienzo del secado afectando negativamente la transferencia de masa y de calor, por consiguiente la eliminación de agua durante el secado.

¹¹⁸ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Op. cit., p. 93.

¹¹⁹ MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Op. cit., p. 181.

¹²⁰ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Míriam. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. Op. cit., p. 414.

¹²¹ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Op. cit., p. 94.

El rendimiento de encapsulación mediante secado por aspersión se ve afectado por la temperatura de entrada, en algunos estudios este factor aumentó el rendimiento, mientras que en otros lo redujo. Por ejemplo en el trabajo de Largo, Cortes y Ciro¹²², el rendimiento disminuyó al aumentar la temperatura del aire de secado, lo que fue atribuido a la formación de depósitos en la cámara de secado. Mientras que los estudios de Jafari, Ghalenoei y Dehnad¹²³; Bazaría y Kumar¹²⁴ Bazaría y Kumar¹²⁵; Muzaffar y Kumar¹²⁶ y Fazaeli *et al.*¹²⁷, reportan un efecto positivo en el rendimiento al aumentar la temperatura de entrada, estos autores explicaron que el rendimiento mejora debido a que hay una transferencia de calor más eficiente en la cámara de secado.

De modo que existe un punto óptimo de temperatura del aire de secado para obtener la mejor recuperación de los polvos finales. Como se observa en la gráfica 11 de efectos principales, el aumento de temperatura muestra una tendencia a una inflexión en la recta en el punto más alto.

¹²² LARGO Esteban; CORTES, Misael y CIRO, Héctor. Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. Junio, 2015. vol. 68. no. 1. p. 7515.

¹²³ JAFARI, Seid; GHALENOEI, Malihe y DEHNAD, Danial. Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. En: Powder Technology. Abril, 2017. vol. 311. p. 61.

¹²⁴ BAZARIA, Bindu y KUMAR, Pradyuman. Effect of whey protein concentrate as drying aid and drying parameters on physicochemical and functional properties of spray dried beetroot juice concentrate. En: Food Bioscience. Junio, 2016. vol. 14. p. 24.

¹²⁵ BAZARIA, Bindu y KUMAR, Pradyuman. Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). En: Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. Septiembre, 2016. vol. 17. no. 4. p. 411.

¹²⁶ MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Op. cit., p. 181.

¹²⁷ FAZAEELI, Mahboubeh, *et al.* Op. cit., p 671.

7.2.3 Densidad aparente. En la tabla 12 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable densidad aparente.

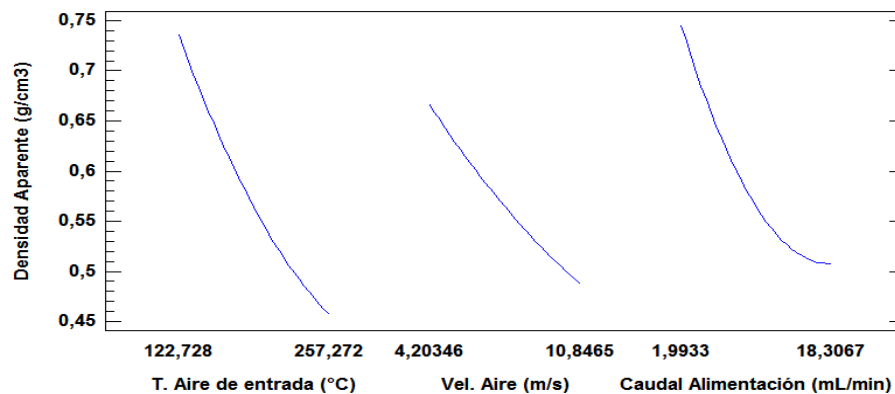
Tabla 11 Análisis de varianza para densidad aparente

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura Entrada	0,0937237	1	0,0937237	171,45	0
B: Vel. Aire Secado	0,0382944	1	0,0382944	70,05	0,0004
C: Caudal Alimentación	0,0679302	1	0,0679302	124,26	0,0001
AA	0,00194278	1	0,00194278	3,55	0,1181
AB	0,0021125	1	0,0021125	3,86	0,1065
AC	0,0021125	1	0,0021125	3,86	0,1065
BB	0,000295904	1	0,000295904	0,54	0,4949
BC	0,0021125	1	0,0021125	3,86	0,1065
CC	0,00711341	1	0,00711341	13,01	0,0154
Falta de ajuste	0,00514707	5	0,00102941	1,88	0,252
Error puro	0,00273333	5	0,000546667		
Total (corr.)	0,2226	19			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El estadístico R^2 indica que el modelo explica 96,46 % de la variabilidad en el factor densidad aparente. En la tabla de análisis de varianza para este caso, cuatro efectos tuvieron efecto estadísticamente significativo sobre la densidad aparente, con un nivel de confianza del 95,0%. En la figura de efectos principales figura 12 para densidad aparente, se observa una clara relación indirectamente proporcional con los tres factores.

Figura 12. Efectos principales para densidad aparente



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Nishad, *et al.*¹²⁸ Afirman que la densidad aparente es importante porque define el costo de transporte, la forma de empaquetar el producto terminado y está relacionada con la humedad, tamaño y forma de las partículas de polvos. En la presente investigación el aumento en la temperatura de entrada disminuyó la densidad aparente, lo que coincide con los resultados de Tontul y Topuz¹²⁹; Moghaddam, Pero y Askari¹³⁰ Fazaeli, Emam y Yarmand¹³¹; Suhag y Nanda¹³². Estos autores explican que una temperatura de secado alta aumenta la velocidad de evaporación del agua del material de entrada, lo que causa que las partículas secas sean más porosas, fragmentadas debido a la inflación de la partícula dando como resultado una densidad aparente menor.

“El efecto de la temperatura sobre la densidad aparente depende de su efecto sobre el contenido de humedad del polvo, ya que un producto de mayor humedad tenderá a tener un mayor volumen de carga causado por la presencia de agua, que es considerablemente más densa que el sólido seco”¹³³. Además Phisut dice que “El contenido de humedad disminuye con el aumento de la temperatura de secado, debido a la transferencia de calor más rápida entre el producto y el aire de secado. A temperaturas más altas del aire de entrada, hay un mayor gradiente de temperatura entre la alimentación atomizada y el aire de secado y resulta la mayor fuerza impulsora para la evaporación del agua.”¹³⁴

Tonon, Brabet y Hubinger¹³⁵ Descubrieron que “el aumento de la temperatura causaba la reducción de la densidad aparente. Un aumento en la temperatura del aire de entrada a menudo da como resultado una rápida formación de capa seca en

¹²⁸ NISHAD, Jyoti, *et al.* Op. cit., p.694.

¹²⁹ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Op. cit., p. 99.

¹³⁰ MOGHADDAM, Arasb; PERO, Milad y ASKARI, Gholam. Optimizing spray drying conditions of sour cherry juice based on physicochemical properties, using response surface methodology (RSM). En: Journal of Food Science and Technology. Enero, 2017. vol. 54. p. 182.

¹³¹ FAZAELI, Mahboubeh; EMAM, Zahra y YARMAND, Mohammad. Influence of Black Mulberry Juice Addition and Spray Drying Conditions on Some Physical Properties of Ice Cream Powder. En: International Journal of Food Engineering. Febrero, 2016. vol. 12. no. 3. p. 5.

¹³² SUHAG, Yogita y NANDA Vikas. Optimisation of process parameters to develop nutritionally rich spray-dried honey powder with vitamin C content and antioxidant properties. En: International Journal of Food Science and Technology. Abril, 2015. vol. 50. no. 8. p. 1774

¹³³ GOULA, Athanasia y ADAMOPOULOS, Konstantinos. Op. cit., p. 348.

¹³⁴ PHISUT, N. Op. cit., p. 1300.

¹³⁵ TONON, Renata; BRABET, Catherine y HUBINGER, Miriam. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. Op. cit., p. 417.

la superficie de la gota y el tamaño de las partículas, y provoca el desollamiento o endurecimiento de las gotas a las temperaturas más altas. Esto conduce a la formación de películas impermeables al vapor en la superficie de las gotas, seguido de la formación de burbujas de vapor y, en consecuencia, la expansión de las gotas

Por el contrario algunos autores como Horuz, Altan y Maskan¹³⁶ reportaron una mayor densidad aparente a mayor temperatura de entrada, debido a la formación de una corteza dura en la superficie de la partícula que impide la difusión y evaporación de la humedad. Según Tontul y Topuz¹³⁷ las diferencias en estos estudios podrían estar relacionadas con el rango de temperatura aplicada, los materiales encapsulantes utilizados y la naturaleza de la matriz a encapsular. Fazaeli, *et al.*¹³⁸ y Shishir y Chen¹³⁹ comentan que en general las partículas porosas o fragmentadas muestran una densidad aparente relativamente baja en comparación con las partículas finas.

Con respecto al caudal de alimentación hay estudios como el de Manickavasagan, *et al.*¹⁴⁰ Reportan, que este factor no tuvo significancia alguna. Sin embargo, en el presente estudio se observó que a mayor caudal de alimentación la densidad aparente disminuyó.

¹³⁶ HORUZ, Erhan; ALTAN, Aylin y MASKAN, Medeni. Spray Drying and Process Optimization of Unclarified Pomegranate (*Punica granatum*) Juice. En: Drying Technology. Abril, 2012. vol. 30. no. 7. 794.

¹³⁷ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Op. cit., p. 99.

¹³⁸ FAZAELI, Mahboubeh, *et al.* Op. cit., p. 672.

¹³⁹ SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Op. cit., p. 51.

¹⁴⁰ MANICKAVASAGAN, A, *et al.* Physicochemical characteristics of date powder produced in a pilot scale spray dryer. En: Drying Technology. Marzo, 2015. vol. 33. p. 14.

7.2.4 Humectabilidad. En la tabla 13 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable tiempo de humectación o humectabilidad en los polvos.

Tabla 12 Análisis de varianza para humectabilidad

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura Entrada	4151,49	1	4151,49	1162,32	0
B: Vel. Aire Secado	1102,24	1	1102,24	308,6	0
C: Caudal Alimentación	2668,02	1	2668,02	746,98	0
AA	702,236	1	702,236	196,61	0
AB	3,68561	1	3,68561	1,03	0,3563
AC	9,87901	1	9,87901	2,77	0,1572
BB	127,566	1	127,566	35,72	0,0019
BC	898,244	1	898,244	251,49	0
CC	600,582	1	600,582	168,15	0
Falta de ajuste	1480,34	5	296,067	82,89	0,0001
Error puro	17,8586	5	3,57172		
Total (corr.)	11563	19			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

El estadístico R^2 indica que el modelo explica 87,04 % de la variabilidad en Humectabilidad. Siete efectos fueron estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0 %. El valor-P menor a 0,05 en la prueba de falta de ajuste, significa que el modelo seleccionado no es adecuado para describir los datos observados y que se debería usar un modelo distinto. Se debería tener en cuenta la posibilidad que otros factores además de los incluidos en este estudio hayan tenido efecto sobre esta variable humectabilidad.

Serna, Torres y Ayala¹⁴¹ en su estudio con polvos de cascara de mango evidenciaron que existe una relación inversa significativa entre el diámetro de la partícula y la humectabilidad, a mayor diámetro de partícula, menor fue el tiempo de humectación. Este comportamiento se debe a que al aumentar el tamaño de partícula se aumenta la cantidad de poros de la microestructura y por consiguiente se aumenta la humectabilidad.

Serna, Torres y Ayala¹⁴² también afirman que la composición de los polvos juegan un papel importante, si la viscosidad del líquido de reconstitución aumenta considerablemente por la disolución de partículas de polvo, el tiempo de

¹⁴¹ SERNA, Liliana; TORRES, Cristian y AYALA, Alfredo. Op. cit., p. 44.

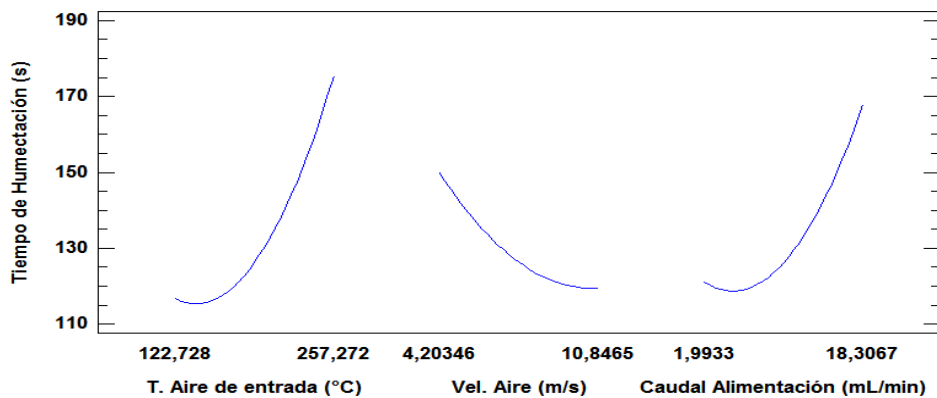
¹⁴² *Ibíd.* p. 44

humectación aumenta, también se aumenta el tiempo de reconstitución debido a la hinchazón de las partículas de polvo, de modo que la tensión superficial, la viscosidad y la hinchazón de los polvos también son factores que afectan el tiempo de humectación. Además al momento en que los polvos se sumergen, lo que más influye es la masa, tamaño y densidad de las partículas, si el producto a humectarse tiene partículas grandes y densas se hunden con mayor facilidad que las livianas, pero si las partículas de gran tamaño contienen aire esto puede afectar la capacidad de hundimiento.

Los grandes tiempos de humectación para partículas pequeñas, son la razón por la cual industrialmente se utilizan aglomerantes, con el fin de agrupar partículas las cuales pueden hundirse con mayor facilidad y reducir el tiempo de humectación. Según Ceballos¹⁴³ el método estático para medir la humectabilidad de un polvo en laboratorio es adecuado si las partículas tienen una densidad aparente mayor que la del agua, de esta forma el hundimiento de las partículas al fondo del líquido es buena. La densidad de los polvos obtenidos en este estudio fue inferior a la del agua.

Existe otro método de realizar la prueba de tiempo de humectación Ceballos¹⁴⁴ propone el método dinámico el cual consiste en adicionar una determina cantidad de polvo en un líquido que permanece con agitación, en este método se determina el tiempo que se tarda el ultimo grumo de polvo formado al momento de introducir el material a reconstituir en el líquido en deshacerse, mientras el disolvente está en constante agitación. En la figura 13 de efectos principales para tiempo de humectación se observa un aumento de la humectabilidad al incrementar la temperatura y el caudal de entrada y una disminución con la velocidad de aire.

Figura 13. Efectos principales para humectabilidad



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

¹⁴³ CEBALLOS, Adela. Op. cit., p. 17.

¹⁴⁴ *Ibíd.*, p. 18.

En el artículo de Chegini y Ghobadian se afirma que, el aumento de la temperatura del aire de entrada da como resultado un aumento en el tiempo promedio de humectación, “a temperaturas más altas, se forma una capa de superficie dura sobre las partículas de polvo que evita que el agua entre en las partículas y, por lo tanto, aumenta el porcentaje de sólidos insolubles”¹⁴⁵.

“la humectabilidad está en función del contenido de humedad y el tamaño de partícula”¹⁴⁶. Se observa que el contenido de humedad afecta el tiempo de humectación “como se concluye de los resultados, el alto contenido de humedad y el gran tamaño de partícula del polvo de PSJ lo hace altamente humectable (144.25 s) en comparación con el polvo de CSJ”¹⁴⁷. Como se observó en estos estudios, el tiempo que tardan los polvos en absorber agua y mojarse depende en gran manera del tamaño de partícula y un factor adicional que reduce el tiempo de humectación es el contenido residual de humedad en los polvos al final del proceso de secado. Entonces lo mejor es tener polvos microencapsulados con el menor contenido de humedad para conservar las otras propiedades de los polvos y usar aglomerantes para tener un menor tiempo de humectación.

7.2.5 Solubilidad. En la tabla 14 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable solubilidad.

Tabla 13 Análisis de varianza para solubilidad

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura Entrada	17,8156	1	17,8156	45,21	0,0011
B: Vel. Aire Secado	55,9664	1	55,9664	142,04	0,0001
C: Caudal Alimentación	30,0182	1	30,0182	76,18	0,0003
AA	0,0361596	1	0,0361596	0,09	0,7741
AB	10,125	1	10,125	25,7	0,0039
AC	12,005	1	12,005	30,47	0,0027
BB	6,53377	1	6,53377	16,58	0,0096
BC	10,3513	1	10,3513	26,27	0,0037
CC	0,163943	1	0,163943	0,42	0,5473
Falta de ajuste	2,85123	5	0,570247	1,45	0,3475
Error puro	1,97015	5	0,39403		
Total (corr.)	147,701	19			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

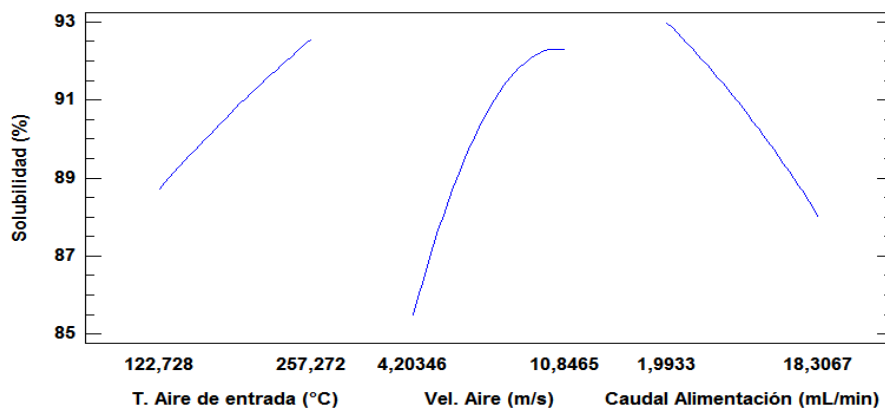
¹⁴⁵ CHEGINI, G y GHOBADIAN, B. Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. Op. cit., p. 661.

¹⁴⁶ NISHAD, Jyoti, *et al.* Op. cit., p. 694.

¹⁴⁷ *Ibid.*, p. 695.

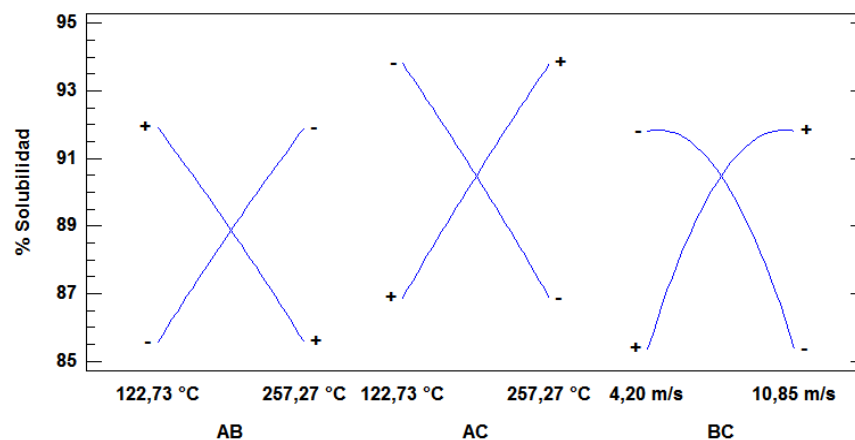
Según el valor de R^2 , el modelo explica 96,74 % de la variabilidad en Solubilidad. En la tabla de análisis de varianza para esta variable de respuesta, siete efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95,0%. La prueba de auto correlación serial de residuos arrojó un valor-P de 0,4029 indicando que los ensayos se realizaron al azar. En la figura 14 de efectos principales para Solubilidad se observa una relación directamente proporcional con la temperatura y velocidad de aire, por otro lado, el caudal de alimentación tuvo un efecto inversamente proporcional con la solubilidad.

Figura 14. Efectos principales para solubilidad



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Figura 15. Interacciones en el porcentaje de solubilidad



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

En la figura 15 se presentan las interacciones, donde se expresa que a un nivel alto de velocidad de aire de secado la solubilidad disminuye cuando la temperatura de entrada aumenta, si se usa un nivel bajo de velocidad de aire de secado, la solubilidad aumenta a medida que aumenta la temperatura. La temperatura también tiene una interacción significativa con el caudal de alimentación, si el caudal está en un nivel bajo la solubilidad disminuye con el aumento de la temperatura, si el caudal tiene un nivel alto a medida que sube la temperatura la solubilidad baja. Por último la interacción del caudal de alimentación con un nivel bajo la solubilidad decrece cuando aumenta la velocidad de aire de secado, con el nivel alto de caudal de entrada la solubilidad aumenta a medida que sube la velocidad de aire de secado.

La solubilidad es una propiedad de calidad importante de los productos en polvo, ya que determina el comportamiento de reconstitución de los productos alimenticios secados por pulverización. Tontul y Topuz mencionan que

La solubilidad, la capacidad de los polvos para formar una solución o suspensión en agua, se define como el criterio más confiable para evaluar el comportamiento del polvo en una solución acuosa. Este parámetro muestra la capacidad del polvo secado por pulverización para formar una solución o suspensión en agua. Es deseable una mayor solubilidad, especialmente cuando el polvo obtenido se usa como aditivo en la producción de diferentes productos. La solubilidad de un polvo está influenciada por las propiedades de las materias primas, los materiales de soporte y las propiedades de los polvos, como el contenido de humedad, el tamaño de partícula y el estado físico de la partícula (el estado amorfo es más soluble)¹⁴⁸.

Los polvos de lulo obtenidos tuvieron una solubilidad entre el 85 y 93 %, lo que probablemente se debió al uso de maltodextrina como material encapsulante, ya que ésta es bastante soluble en agua. Tontul y Topuz, mencionan que “La solubilidad de los polvos alimentarios está directamente relacionada con las propiedades del material portador. Dado que el material portador a base de carbohidratos como la maltodextrina y la goma arábica tienen una solubilidad superior, estos materiales afectan positivamente la solubilidad de los productos”¹⁴⁹.

De igual manera se observó efecto positivo de la velocidad del aire de secado en la solubilidad, ya que contribuyó a obtener polvos de lulo con menor contenido de humedad y por consiguiente, mayor solubilidad. El aumento en caudal de alimentación disminuyó la solubilidad de los polvos, lo que concuerda con los hallazgos de Muzaffar y Kumar¹⁵⁰ Manickavasagan, *et al.*¹⁵¹ Muzaffar, Dinkarrao y

¹⁴⁸ TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Op. cit., p. 97

¹⁴⁹ *Ibíd.*, p. 97

¹⁵⁰ MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Op. cit., p. 183

¹⁵¹ MANICKAVASAGAN, A, *et al.* Op. cit., p. 15.

Kumar¹⁵². A bajos caudal de alimentación se obtienen polvos con menor contenido de humedad y más solubles. El aumento en la temperatura de entrada del aire redujo el contenido de humedad en los polvos finales, afectando de manera positiva la solubilidad, lo que coincide con los resultados de los estudios de Tontul y Topuz¹⁵³ Bakar, *et al.*¹⁵⁴ Reportaron solubilidad de 90,88 – 94,83 % Moghaddam, Pero y Askari¹⁵⁵ obtuvieron un porcentaje de solubilidad de 70,7 – 08 % Vardin y Yasar¹⁵⁶ Muzaffar y Kumar¹⁵⁷ consiguieron porcentajes de 49,93 hasta 71,58 % Muzaffar, Dinkarrao y Kumar¹⁵⁸ en estudio de jugo de granada se obtuvo un rango de 87,96 % a 99,12 %.

En el estudio de Tafur¹⁵⁹ explica que la solubilidad está relacionada con su microestructura las formas cristalinas y amorfas de las superficies de los polvos, las propiedades químicas, la solubilidad en el agua y la higroscopicidad. Tafur¹⁶⁰ también explica que esto se debe a que los polvos tiene un alto contenido de solidos solubles de la maltodextrina y menor cantidad de fibra o a un mayor grado de superficies amorfas, pues los sólidos amorfos tienen una mayor solubilidad y velocidad de disolución.

En el mismo estudio de Tafur¹⁶¹ Las altas temperaturas causan la perdida de humedad, en consecuencia puede darse una rápida formación de la capa externa de las partículas. Mayores temperaturas en la superficie de la partícula incrementan

¹⁵² MUZAFFAR, Khalid; DINKARRAO, Bijamwar y KUMAR, Pradyuman. Optimization of spray drying conditions for production of quality pomegranate juice powder. En: Cogent Food & Agriculture. Enero, 2016. vol. 2. p. 1.

¹⁵³ *Ibid.* p. 97.

¹⁵⁴ BAKAR, Jamilah, *et al.* Spray-drying optimization for red pitaya peel (*Hylocereus polyrhizus*). En: Food and Bioprocess Technology. Abril, 2013. vol. 6. p. 1338.

¹⁵⁵ MOGHADDAM, Arasb; PERO, Milad y ASKARI, Gholam. *Op. cit.*, p. 180.

¹⁵⁶ VARDIN, Hasan y YASAR, Mehmet. Optimisation of pomegranate (*Punica Granatum* L.) juice spray-drying as affected by temperature and maltodextrin content. En: Journal of Food Science & Technology. Septiembre, 2012. vol. 47. p. 173.

¹⁵⁷ MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. *Op. cit.*, p. 183

¹⁵⁸ MUZAFFAR, Khalid; DINKARRAO, Bijamwar y KUMAR, Pradyuman. *Op. cit.*, p. 4.

¹⁵⁹ TAFUR, Meiry. Determinación de parámetros tecnológicos para el atomizado de pulpa de mango (*Mangifera indica*) con agua de coco (*Cocos nucifera*) edulcorado con estevia. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Agroindustrial. Tarapoto Perú: Universidad Nacional de San Martín. 2018. 40 p.

¹⁶⁰ *Ibid.*, p. 88.

¹⁶¹ *Ibid.*, p. 88.

la tasa evaporativa reduciendo la humedad, quedando los puntos activos (proteínas, maltodextrina u otros) de la superficie más expuestos para la solvatación, pudiendo mejorar la solubilidad.

Los estudios de Arrazola, Herazo y Alvis¹⁶² Weerachet, *et al.*¹⁶³ En la microencapsulación de antocianinas de berenjena y la producción de polvo de tamarindo respaldan resaltan que la solubilidad de sus polvos fueron afectados por la temperatura de entrada y la concentración de encapsulante debido a que las altas temperaturas del aire de secado producen más porosidad de los polvos. La mayor porosidad da lugar a una mayor superficie específica de polvo, lo que resulta en un área de contacto más grande entre el polvo y el agua.

7.2.6 Contenido de vitamina C. En la tabla 15 se presentan los resultados del análisis de varianza para la variable contenido de vitamina C.

Tabla 14 Análisis de varianza para contenido de vitamina C.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura Entrada	73,2643	1	73,2643	66,11	0,0005
B: Vel. Aire Secado	69,7408	1	69,7408	62,93	0,0005
C:Caudal Alimentación	51,2617	1	51,2617	46,26	0,001
AA	1,21315	1	1,21315	1,09	0,3434
AB	0,0078125	1	0,0078125	0,01	0,9363
AC	49,8501	1	49,8501	44,98	0,0011
BB	2,0974	1	2,0974	1,89	0,2273
BC	0,108112	1	0,108112	0,1	0,7674
CC	3,88904	1	3,88904	3,51	0,1199
Falta de ajuste	1,10941	5	0,221883	0,2	0,9489
Error puro	5,5412	5	1,10824		
Total (corr.)	258,872	19			

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

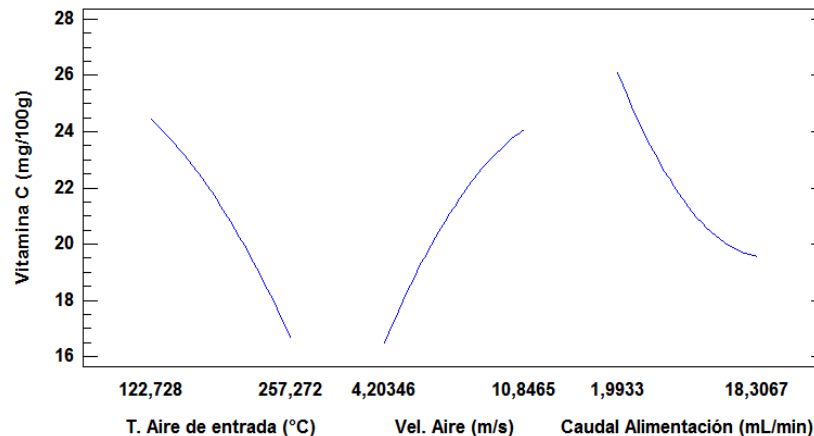
Según el valor de R^2 el modelo explica 97,43 % de la variabilidad en Vitamina C. Cuatro efectos tuvieron un valor-P menor que 0,05, indicando que fueron estadísticamente significativos. No se observó falta de ajuste en el modelo. En la

¹⁶² ARRAZOLA, Guillermo., HERAZO, Irina y ALVIS, Armando. Microencapsulación de antocianinas de berenjena (*solanum melongena* L.) mediante secado por aspersión y evaluación de la estabilidad de su color y capacidad antioxidante. En: Información Tecnológica. 2014. vol. 25. no. 3. p. 35.

¹⁶³ WEERACHET, Jittanit, *et al.* Production of tamarind powder by drum dryer using maltodextrin and arabic gum as adjuncts. En: Songklanakarin J. Sci. Technol. February, 2011. vol. 33. no. 1. p. 38.

figura 16 de efectos principales se observa que el contenido de vitamina C en los polvos disminuyó con el aumento en la temperatura del aire y el caudal de alimentación y aumentó con el incremento en la velocidad del aire de secado.

Figura 16. Efectos principales para contenido de vitamina C.



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Ceballos¹⁶⁴ indica que el valor nutricional de la vitamina C o ácido ascórbico es de gran importancia en la dieta humana, debido a que esta nos proporciona múltiples beneficios, contribuye a mantener el colágeno, disminuir los daños por estrés, siendo un antioxidante ayuda a la biosíntesis de aminoácidos. La mayor fuente de vitamina C son las frutas y vegetales donde la mayor parte es encontrada en vegetales de hojas verdes, cítricos y algunas frutas tropicales. La vitamina C es la más sensible de las vitaminas por lo que se degrada con facilidad debido a los cambios ambientales.

Ceballos¹⁶⁵ también afirma que la vitamina C se ve afectada por el tipo de proceso a la cual es sometida, en el caso del secado por aspersión es afectada por el régimen de tiempo-temperatura empleados y la intensidad de energía térmica. La mayor retención de vitamina C se presenta a temperaturas bajas de secado y tiempos cortos. La degradación de la vitamina C también se debe en gran parte a la oxidación que se presenta por la incorporación de aire durante el despulpado y la incorporación de la maltodextrina.

¹⁶⁴ CEBALLOS, Adela. Op. cit., p. 20.

¹⁶⁵ *Ibíd.* p. 21.

Mendoza, Arteaga y Pérez¹⁶⁶ afirman que la vitamina C se caracteriza por ser termo sensible, en su estudio con pulpa de mango, a temperaturas por debajo de 140°C, obtuvieron valores de recuperación de vitamina C constantes, pero al aumentar la temperatura se afectó considerablemente el contenido de vitamina C en los polvos encapsulados. Además Lee, *et al.*¹⁶⁷, también observaron que el contenido de vitamina C en jugos de mandarina disminuyó a medida que la temperatura de entrada y la cantidad de agentes portadores aumentaron. Muzaffar, Dinkarrao y Kumar¹⁶⁸ encontraron que el aumento de la temperatura del aire de entrada disminuyó el contenido de ácido ascórbico en microencapsulados de granada, debido a la destrucción del ácido ascórbico a altas temperaturas. La tasa de conversión del ácido ascórbico en ácido 2,3 dicetogulónico aumenta notablemente a temperaturas elevadas, reduciendo así la actividad de la vitamina C. Patil, Chauhan y Singh¹⁶⁹ obtuvieron resultados similares de pérdidas de vitamina C con el aumento de la temperatura del aire durante la producción de guayaba en polvo.

A mayor velocidad de aire de secado mayor es la retención de vitamina C ya que disminuye considerablemente el contenido de humedad, como lo menciona Ceballos “Es posible que la degradación del ácido ascórbico dependa de la temperatura y de la humedad, siendo menor a medida que la humedad es menor”¹⁷⁰. Es decir que entre menos humedad contengan los polvos menos pérdidas de vitamina C se tendrá.

La velocidad del flujo de alimentación afecta la retención de vitamina C. Los polvos de lulo se vieron afectados negativamente en la retención de vitamina C al aumentar el caudal de alimentación. Este efecto negativo puede deberse a la degradación del ácido ascórbico influenciada principalmente por el contenido de humedad, según Nicoletti, *et al.*¹⁷¹ El mayor caudal proporciona mayor contenido de humedad por consiguiente la disminución de la retención de vitamina C, además a mayor velocidad del flujo de alimentación se pierde gran proporción de material que no logra ser encapsulado y queda adherido a la pared de la campana de secado.

¹⁶⁶ MENDOZA, Fernando; ARTEAGA, Margarita y PÉREZ, Omar. Op. cit., p. 162.

¹⁶⁷ LEE, Ki-Chang, *et al.* Effects of inlet air temperature and concentration of carrier agents on physicochemical properties, sensory evaluation of spray-dried mandarin (Citrus unshiu) beverage powder. En: Applied Biological Chemistry. Febrero, 2017. vol. 60. no. 1. p. 38.

¹⁶⁸ MUZAFFAR, Khalid; DINKARRAO, Bijamwar y KUMAR, Pradyuman. Op. cit., p. 5.

¹⁶⁹ PATIL, Vaibhav; CHAUHAN, Anil y SINGH, Ravi. Optimization of the spray-drying process for developing guava powder using response surface methodology. En: Powder Technology. Febrero, 2014. vol. 253. p. 233.

¹⁷⁰ Ceballos, Adela. Op. cit., p. 21.

¹⁷¹ NICOLETI, Joel, *et al.* Influence of Drying Conditions on Ascorbic Acid during Convective Drying of Whole Persimmons. En: Drying Technology. Junio, 2007. vol. 25. no. 5. p. 891.

7.2.7 Optimización multirespuesta del proceso de secado. Con ayuda del programa estadístico Statgraphics Centurion XVI, se realizó un análisis multirespuesta para obtener los mejores resultados para las distintas variables evaluadas en una relación de compromiso entre ellas, se estableció el objetivo para cada una de las variables de respuesta: contenido de humedad – minimizar, densidad aparente – maximizar, porcentaje de solubilidad – maximizar, porcentaje de rendimiento – maximizar, tiempo de humectación – minimizar, contenido de vitamina C en polvos – maximizar. En el DCCR el ensayo donde se obtuvieron los mejores resultados en las variables de respuesta analizadas fue el ensayo 12 (tabla 9) donde la temperatura de entrada fue 190 °C, velocidad de aire de secado de 7,53 m/s y el caudal de alimentación menor de 2 mL/min.

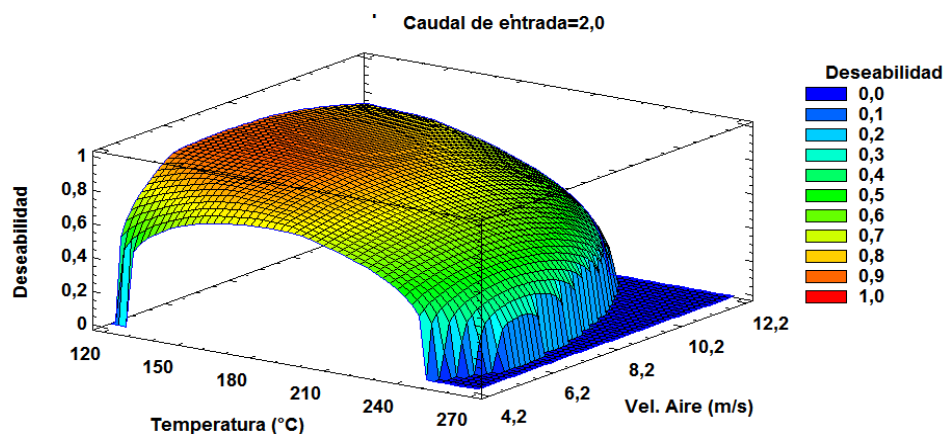
Los valores óptimos propuestos por el programa estadístico que conducirían a obtener un mayor grado de deseabilidad se presentan en la tabla 16.

Tabla 15 Niveles óptimos para factores del proceso de secado por aspersión

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura (°C)	122,728	257,272	144,238
Velocidad de aire (m/s)	5,55	10,8465	7,31148
Caudal de entrada (mL/min)	1,9933	18,3067	1,9933

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

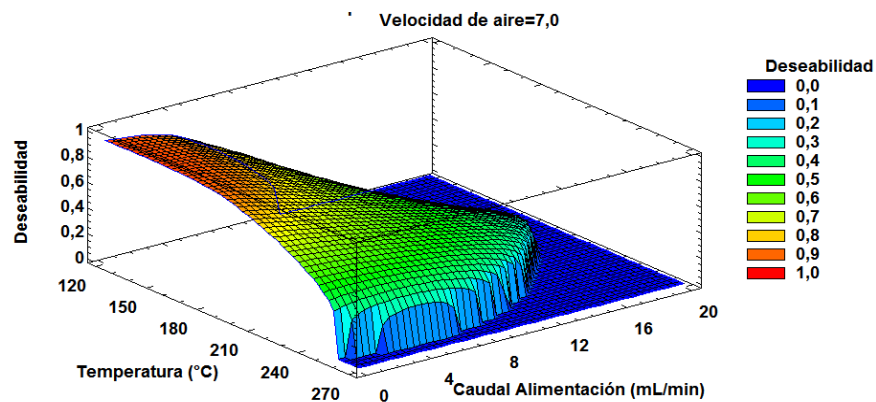
Figura 17. Superficie de respuesta para deseabilidad con caudal de alimentación constante.



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

En la gráfica de superficie de respuesta, con un caudal de entrada en un nivel bajo constante, se observa que la mayor deseabilidad se encuentra a temperaturas bajas y medias, cuando la temperatura de entrada supera los 240 °C la deseabilidad baja considerablemente, para la velocidad de aire de secado los mejores niveles son los intermedios.

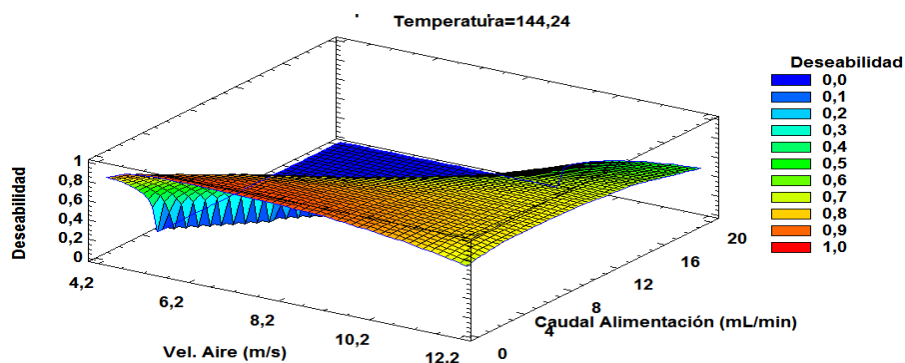
Figura 18. Superficie de respuesta para deseabilidad con velocidad aire de secado constante



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Como se observa en la gráfica, cuando la velocidad de aire se mantiene constante, los mejores resultados se obtienen con el nivel de caudal de alimentación más bajo, con esta grafica es fácil determinar que los volúmenes de alimentación altos no producen buenos resultados en el proceso de secado. En cuanto a la temperatura de aire de entrada se observa que a partir de los 210 °C se obtienen valores de deseabilidad inferiores a 0,8.

Figura 19. Superficie de respuesta para deseabilidad con temperatura entrada del aire constante.



Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

En la optimización al mantener constante la temperatura de entrada, se presenta mayor deseabilidad a velocidades de aire de secado entre los 7 y 8 m/s, y el caudal de alimentación muestra mejores valores de deseabilidad por debajo de los 4 mL/min.

En la tabla 17 se presentan los valores óptimos de las variables de respuesta analizadas en el desarrollo del diseño experimental de superficie de respuesta, que el programa estadístico predice si se trabajaran con las mejores condiciones para cada factor.

Tabla 16 Valores estimados a obtener en las variables de respuesta al trabajar en las condiciones optimas

Respuesta	Óptimo
Humedad (%)	4,33764
Rendimiento (%)	14,5457
Densidad Aparente (g/cm ³)	0,897233
Humectabilidad (s)	107,041
Solubilidad (%)	93,8022
Vitamina C (mg/100g)	32,8851

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

7.3 PERDIDA DE VITAMINA C

En cada ensayo se procesaron 400 g de pulpa con encapsulante, con una concentración promedio de vitamina C de 14 mg/100 g, que equivale a 0,14 mg/g. Para conocer la masa de vitamina C que entra en el proceso se multiplico por la concentración.

$$\begin{aligned} \text{Vitamina C a la entrada del proceso} &= 400 \text{ g} * 0,14 \text{ mg/g} \\ &= 56 \text{ mg} \end{aligned}$$

Para conocer la masa de vitamina C a la salida, se realizó el mismo cálculo, con la concentración de vitamina C en los polvos y el peso total de éstos.

Ejemplo Ensayo 1:

$$\begin{aligned} \text{Vitamina C en la salida del proceso} &= 32 \text{ g} * 0,22 \text{ mg/g} \\ &= 7,04 \text{ mg} \end{aligned}$$

Con ayuda de la ecuación número 2 se obtuvo la masa de vitamina C que no se recuperó en los polvos finales (pérdidas).

$$P = E - S$$

$$P = 56 \text{ mg} - 7,04 \text{ mg}$$

$$P = 48,96 \text{ mg}$$

La relación entre las pérdidas y el total de vitamina C que entra en el proceso se consideró como el porcentaje de pérdida en el proceso de secado por aspersión.

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{\text{mg vitamina C perdidos (P)}}{\text{mg vitamina C iniciales (E)}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{48,96 \text{ mg}}{56 \text{ mg}} * 100$$

$$\% \text{ Pérdidas} = 87,43 \%$$

En la tabla 18 se presenta el porcentaje de pérdida de vitamina C en cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 17. Porcentaje de pérdida de vitamina C en cada uno de los ensayos

Ensayo N°	Porcentaje de Pérdida %	Ensayo N°	Porcentaje de Pérdida %
1	87,43	11	86,35
2	99,63	12	57,64
3	69,83	13	95,87
4	89,21	14	86,89
5	99,84	15	84,68
6	90,09	16	85,6
7	74,24	17	70,17
8	90,77	18	89,51
9	81,73	19	85,41
10	96,28	20	84,83

Fuente: Elaboración con programa estadístico Statgraphics Centurion XVI

Los resultados obtenidos muestran valores de pérdidas de vitamina C superiores a 50%. La menor pérdida de vitamina C se presentó en el ensayo 12, con 57,64 % en esta prueba se usó una temperatura de entrada de 190 °C, velocidad de aire de secado de 7,53 m/s y un caudal de alimentación de 2 mL/min. En contraparte las mayores pérdidas fueron en los ensayos 2 y 5 con 99,63 % y 99,84 % respectivamente. La vitamina C es bastante termo sensible, razón por la cual

probablemente se conservó más en las pruebas donde se usaron temperaturas de entrada menores, en cuanto a los ensayos con mayores pérdidas (2 y 5), en el ensayo 2 se trabajó con el mayor caudal de alimentación (15 mL/min) y en el ensayo 5 con la menor velocidad de aire de secado (4,2 m/s), condiciones que al realizar el proceso de encapsulación arrojaron los rendimientos más bajos, dejando como resultado una disminución en la recuperación de polvos bastante considerable y, por ende, una gran pérdida no solo de vitamina C.

Igual, *et al.*¹⁷² Redactan en su artículo que la conservación de vitamina C depende de la temperatura de entrada y del tipo de agente encapsulante. Los rangos de retención de vitamina C. en el estudio de optimización de secado por aspersión de pulpa de lulo, los polvos obtenidos tuvieron una concentración en un rango de 31 a 243 mg/100 g de sólidos totales de lulo.

En el estudio de secado por aspersión de mandarina realizado por Lee, *et al.*¹⁷³ Se obtuvo un rango de 105.37 ± 0.17 mg/100g de polvo a 104.05 ± 1.63 mg/100g de polvo en un rango de temperatura de 135 °C a 150 °C con un porcentaje de maltodextrina al 25%.

Según Naddaf, Avalo y Oliveros¹⁷⁴ en el estudio de encapsulados de jugo de naranja reporta la pérdidas de vitamina C en un tratamiento con goma arábica presento un porcentaje de retención de vitamina C de un 78,72 % y una pérdida del 21,28 %, a diferencia de los tratamientos con maltodextrina donde el porcentaje de retención promedio fue de 51,66 % con una pérdida del 48,34 %.

¹⁷² IGUAL, Marta, *et al.* Op. cit., p. 234.

¹⁷³ LEE, Ki-Chang, *et al.* Op. cit., p. 39.

¹⁷⁴ NADDAF, Luisana; AVALO, Belkis y OLIVEROS, Mariaudy. Spray-dried natural orange juice encapsulants using maltodextrin and gum arabic. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 2012. vol.35. no. 1. p. 26.

8. CONCLUSIONES

- El factor que tuvo mayor efecto en la estabilidad de la dispersión de alimentación al secador fue la concentración de encapsulante (maltodextrina), ya que al aumentar la dispersión fue más estable y se observó un mayor rendimiento de recuperación de los polvos microencapsulados; sin embargo un exceso de encapsulante eleva mucho la viscosidad, un efecto poco deseado, debido a que ocasiona obstrucciones en la boquilla del secador. El tiempo y la velocidad de agitación no tuvieron efecto significativo sobre la estabilidad de la dispersión, pero si afectaron la concentración de vitamina C, por lo que se debe fijar un nivel mínimo de estos factores que garantice la total dispersión del material encapsulante según la concentración adicionada.
- En el proceso de secado por aspersión niveles altos de temperatura y velocidad del aire contribuyen a una mejor calidad de los microencapsulados, al obtener polvos con baja humedad, alta solubilidad, mayor densidad aparente; sin embargo altas temperaturas del aire de secado pueden afectar negativamente los compuesto bioactivos de la matriz, tales como la vitamina C.
- Las condiciones del proceso de secado que ocasionan menor degradación de vitamina C son velocidades altas del aire de secado, bajo caudal de alimentación y baja temperatura del aire.
- Caudales altos de alimentación al secador ocasionan que la aspersión no sea uniforme y se presente goteo en la boquilla, adicionalmente se generan bajos rendimientos porque el aire de secado no alcanza a remover toda la humedad, acumulándose material en la campana de secado.

RECOMENDACIONES

- Evaluar el comportamiento de las características fisicoquímicas los microencapsulados bajo distintas condiciones de almacenamiento para determinar su vida útil.
- Evaluar otras concentraciones de maltodextrina y otros tipos de encapsulantes a diferentes concentraciones y combinaciones entre ellos con el fin de mejorar el rendimiento de encapsulación y reducir la degradación de vitamina C.
- Es necesario realizar un análisis sensorial de los microencapsulados reconstituidos para determinar si el proceso de secado afecta significativamente el sabor y olor característicos del lulo y además determinar cuáles son las condiciones de proceso que permiten obtener polvos con características adecuadas pero conservando también el sabor y olor natural de la pulpa de lulo.
- Realizar la evaluación de la humectabilidad con un método distinto al usado en esta investigación, dado que hubo mucha variabilidad en los resultados y éstos tuvieron falta de ajuste estadísticamente significativa, en este caso podría ser más conveniente utilizar el método dinámico en lugar del estático.
- Analizar el efecto de las variables de proceso sobre la microestructura de los microencapsulados con el fin de correlacionar los resultados con las características tecnológicas de los mismos.

9. REFERENCIAS

AGUIRRE, Juan. Optimización del proceso de secado por aspersión para la obtención de polvo de coco (*cocos nucifera* L.) fortificado con compuestos fisiológicamente activos. Trabajo de grado para optar al título de Doctor en Ciencias Agrarias. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Doctorado en Ciencias Agrarias. 2017. p. 29.

AGRONET. Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. [en línea]. Agronet.gov.co. 2019. [Consultado el 4 de junio del 2019]. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co/Paginas/default.aspx>.

ALAMILLA, L.; CHANONA, Jorge.; JIMENEZ, Antonio.; GUTIERREZ, G. Description of morphological changes of particles along spray drying. En: Journal of Food Engineering. Marzo, 2005. vol. 67. p. 179-184.

ALCANTARA, Yanilka.; ALCANTARA, Yulisa.; ESCOTTO, Andrea.; ROS, Gaspar. Effect of different concentrations of pulverized mesocarp of *Citrus paradisi* Macf. on the bromatological characteristics of spray-dried lemon juice powder. En: Food Science & Nutrition. Julio, 2018. vol. 6. no. 5. p. 1261–1268.

ARANEDA, C. y VALENZUELA., F. Microencapsulación de extractantes: una metodología alternativa de extracción de metales. En: Revista Ciencia Ahora. 2009. vol. 22. no. 11. p. 9-19.

ARIAS, Francisco y RENDÓN, Sebastián. Inteligencia de mercados para la cadena del lulo (*Solanum quitoense*). En: Journal of Agriculture and Animal Sciences. Diciembre, 2014. vol. 3. no. 2. p. 38-47.

ARRAZOLA, Guillermo., HERAZO, Irina y ALVIS, Armando. Microencapsulación de antocianinas de berenjena (*solanum melongena* L.) mediante secado por aspersión y evaluación de la estabilidad de su color y capacidad antioxidante. En: Información Tecnológica. 2014. vol. 25. no. 3. p. 31-42.

BAKAR, Jamilah.; MUHAMMAD, Kharidah.; HASHIM, Dzulkify.; ADZAHAN, Noranizan. Spray-drying optimization for red pitaya peel (*Hylocereus polyrhizus*). En: Food and Bioprocess Technology. Abril, 2013. vol. 6. p. 1332-1342.

BARLOW, Susan. European legislative framework controlling the use of food additives. In M. Saltmarsh, M. Saltmarsh, & S. Barlow (Eds.), Essential guide to food additives. En: Cambridge: RSC Publishing. Mayo, 2013. p. 44-53.

BAYRAM, Özgür.; BAYRAM, Mustafa y TEKIN, Ali. Spray drying of sumac flavour using sodium chloride, sucrose, glucose and starch as carriers. En: Journal of Food Engineering. Julio, 2005. vol. 69. no. 2. p. 253-260.

BENNETT, L.; JEGASOTHY, H.; KONCZAK, I.; FRANK, D.; SUDHARMARAJAN, S.; CLINGELEFFER, P. Total polyphenolics and anti-oxidant properties of selected dried fruits and relationships to drying conditions. En: Journal of functional foods. 2011. vol. 3. no. 2. p. 115-124.

BHUSARI, Nitin.; MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Effect of carrier agents on physical and microstructural properties of spray dried tamarind pulp powder. En: Powder Technology. Junio, 2014. vol. 266. p. 354-364.

BAZARIA, Bindu y KUMAR, Pradyuman. Effect of whey protein concentrate as drying aid and drying parameters on physicochemical and functional properties of spray dried beetroot juice concéntrate. En: Food Bioscience. Junio, 2016. vol. 14. p. 21-27.

BAZARIA, Bindu y KUMAR, Pradyuman. Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). En: Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. Septiembre, 2016. vol. 17. no. 4. p. 408-415.

CAEZ, K. y CASTRO, N. Microencapsulación del jugo de mango (*mangifera indica* L.) para la obtención de un concentrado con la utilización de maltodextrina como material pared. Trabajo de grado presentado para optar el título de Ingeniero de Alimentos. Universidad de Cartagena. 2012. p. 72.

CEBALLOS, Adela. Estudio comparativo de tres sistemas de secado para la producción de un polvo deshidratado de fruta. Tesis de grado para la obtención del título de Magister en ingeniería química. Universidad nacional de Colombia, Manizales. 2008.

CHEN, Xiao y ÖZKAN, Necati. Stickiness, Functionality, and Microstructure of Food Powders. En: Drying Tecnology. Junio, 2007. vol. 25. p. 969-979.

CHEGINI, G y GHOBADIAN, B. Effect of Spray-Drying Conditions on Physical Properties of Orange Juice Powder. En: Journal Drying Technology. Febrero, 2005. vol. 23. P.657-668.

CHEGINI, G. y GHOBADIAN, B. Spray dryer parameters for fruit juice drying. En: World Journal of Agricultural Sciences. 2007. vol. 3. p. 230-236.

CHONG, Siew y WONG, Chen. Production of Spray-Dried Sapodilla (Manilkara zapota) Powder from Enzyme-Aided Liquefied Puree. En: Food processing and preservation. Mayo, 2015. vol. 39. no. 6. p. 2604-2611.

CORTÉS, Misael; HERNÁNDEZ, Gustavo y CIRO, Héctor. Experimental optimization of cape gooseberry pulp (*Physalis peruviana*) formulation to improve its processing by spray drying. En: Vitae. 2015. vol. 22.no. 2. p. 130-139

CORTÉS, Misael.; HERNÁNDEZ, Gustavo y ESTRADA, Eliana. Optimization of the spray drying process for obtaining cape gooseberry powder: an innovative and promising functional food. En: Vitae. Marzo, 2017. vol. 24. no. 1. p. 59-67.

DAG, Dalma.; KILERCIOGLU, Mete y OZTOP, Mecit. Physical and chemical characteristics of encapsulated goldenberry (*Physalis peruviana* L.) juice powder. LWT En: Food Science and Technology. 2017. vol. 83. p. 86–94.

DANE. Encuesta Nacional Agropecuaria. [en línea]. Dane.gov.co. 2018 [Consultado el 4 de agosto de 2018]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2015/boletin_ena_2015.pdf

DIAZ, Yessica.; TORRES, Laura.; SERNA, Johanna.; SOLETO, Luz. Efecto de la encapsulación en el secado por atomización de biocomponentes de pitahaya amarilla con interés funcional. En: Información Tecnológica. Diciembre, 2017. vol. 28. no. 6. p. 23-34.

DORDEVIC, V.; PARASKEVOPOULOU, A.; MANTZOURIDOU, F.; LALOU, S.; PANTIC, M.; BUGARSKI, B.; NEDOVIC, V. Encapsulation Technologies for Food Industry. Emerging and Traditional Technologies for Safe, Healthy and Quality Food. 2016. p. 329-382.

DU, Jing.; GE, Zhen.; XU, Ze.; ZOU, Bo.; ZHANG, Ying.; LI, Chun. Comparison of the Efficiency of Five Different Drying Carriers on the Spray Drying of Persimmon Pulp Powders. En: Drying Technology. Junio, 2014. vol. 32. p. 1157-1166.

FAZAELI, Mahboubeh.; EMAM, Zahra.; KALBASI, Ahmad.; OMID, Mahmoud. Effect of spray drying conditions and feed composition on the physical properties of black mulberry juice powder. En: Food and Bioproducts Processing. Octubre, 2012. vol. 90. no. 4: p. 667-675.

FAZAELI, Mahboubeh.; EMAM, Zahra y YARMAND, Mohammad. Influence of Black Mulberry Juice Addition and Spray Drying Conditions on Some Physical Properties of Ice Cream Powder. En: International Journal of Food Engineering. Febrero, 2016. vol. 12. no. 3. p. 1-9.

FIGUEROA, Paola.; CEBALLOS, Miguel y HURTADO, Andrés. Microencapsulación mediante secado por aspersión de aceite de mora (*Rubus glaucus*) extraído con

CO₂ supercrítico. En: Revista Colombiana de Química. Agosto, 2016. vol. 45. no. 2. p. 39-47.

FORERO, Diana.; ORREGO, Carlos.; PETERSON, Devin.; OSORIO, Coralia. Chemical and sensory comparison of fresh and dried lulo (*Solanum quitoense* Lam.) fruit aroma. En: Food Chemistry. Febrero, 2015. vol. 169. p. 85-91.

FORNY, Laurent.; MARABI, Alejandro y PALZER, Stefan. Wetting, disintegration and dissolution of agglomerated water soluble powders. En: Powder Technology. Enero, 2011. vol. 206. p. 72-78.

FUCHS, M.; TURCHIULI, C.; BOHIN, M.; CUVELIER, M.; ORDONNAUD, C.; PEYRAT, M.; DUMOULIN, E. Encapsulation of oil in powder using spray drying and fluidized bed agglomeration. En: Journal of Food Engineering. 2006. vol. 75. no. 1. p. 27-35.

FRASCARELI, E.; SILVA, Vanessa.; TONON, Renata.; HUBINGER, Miriam. Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. En: Food and Bioproducts Processing. Julio, 2012. vol. 90. no. 3. p. 413-424.

GABAS, Ana.; TELIS, Javier.; GIRALDO, Gloria.; TELIS, Vania. Propiedades termodinámicas de sorción de agua de pupa de lulo en polvo con encapsulantes. En: Ciencia y Tecnología de los Alimentos. 2009. vol. 29. no. 4. p. 911-918.

GARCÍA, A.; GIRONES, A.; LEÓN, P.; MORENO, D.; STINCO, C.; MELÉNDEZ, A.; RUALES, J. Banana Passion Fruit (*Passiflora mollissima* (Kunth) L.H. Bailey): Microencapsulation, Phytochemical Composition and Antioxidant Capacity. En: Molecules. Enero, 2017. vol. 22. no. 1. p. 1-12.

GARCÍA, Jaime; CIRO, Héctor y LARGO, Esteban. Encapsulation of mandarin citrus flavor using spray drying technology and different wall materials. En: U.D.CA. Actualidad y Divulgación científica. Enero, 2015. vol. 18. no.1. p. 251–260.

GHARSALLAOUI, A.; ROUDAUT, G.; CHAMBIN, O.; VOILLEY, A.; SAUREL, R. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. En: Food Research International. 2007. vol. 40. no. 9. p. 1107-1121.

GOULA, Athanasia y ADAMOPOULOS, Konstantinos. A new technique for spray drying orange juice concentrate. En: Innovative Food Science & Emerging Technologies. Abril, 2010. vol. 11. no. 2. p. 342-351.

------. Spray drying of tomato pulp in dehumidified air: II. The effect on powder properties. En: Journal of Food Engineering. Enero, 2005. vol. 66. p. 35-42.

HORUZ, Erhan.; ALTAN, Aylin y MASKAN, Medeni. Spray Drying and Process Optimization of Unclarified Pomegranate (*Punica granatum*) Juice. En: Drying Technology. Abril, 2012. vol. 30. no. 7. 787-798.

HORSZWALD, Anna.; JULIEN, Heritier y ANDLAUER, Wilfried. Characterisation of Aronia powders obtained by different drying Processes. En: Food Chemistry. Mayo, 2013. vol. 141. no. 3. p. 2858-2863.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Lulo. NTC 1265. Bogotá D.C: El Instituto. 1979. p. 5.

----- . Frutas frescas: Lulo de castilla. Especificaciones. NTC 5093. Bogotá D.C: El Instituto. 2002. p. 19.

IGUAL, Marta.; RAMIRES, S.; MOSQUERA, L.; MARTÍNEZ, Nuria. Optimization of spray drying conditions for lulo (*Solanum quitoense* L.) pulp. En: Powder Technology. Febrero, 2014. vol. 256. p. 233-238.

JAFARI, Seid.; GHALENOEI, Malihe y DEHNAD, Danial. Influence of spray drying on water solubility index, apparent density, and anthocyanin content of pomegranate juice powder. En: Powder Technology. Abril, 2017. vol. 311. p. 59-65.

JAYA, S. y DAS, H. A vacuum drying model for mango pulp. En: Drying Technology. 2004. vol. 21. no. 7. p. 1215-1234.

JAYASUNDERA, Mithila.; ADHIKARI, Benu.; ADHIKARI, Raju.; ALDRED, Peter. The effects of proteins and low molecular weight surfactants on spray drying of model sugar-rich foods: powder production and characterisation, En: Journal of Food Engineering. Mayo, 2011. vol. 104. p. 259-271.

KELEBEK, Hasim. Sugars, organic acids, phenolic compositions and antioxidant activity of Grapefruit (*Citrus paradisi*) cultivars grown in Turkey. En: Industrial Crops and Products. Noviembre, 2010. vol. 32. no. 3. p. 269-274.

KHA, Tuyen.; NGUYEN, Minh y ROACH, Paul. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder. En: Journal of Food Engineering. Junio, 2010. vol. 98. no. 3. p. 385–392.

LARGO Esteban.; CORTES, Misael y CIRO Héctor. Influence of Maltodextrin and Spray Drying Process Conditions on Sugarcane Juice Powder Quality. En: Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. Junio, 2015. vol. 68. no. 1. p. 7509-7520.

LEE, Ki-Chang.; YOON, Yeung.; LI, Fan-Zhu.; Eun, Jong-Bang. Effects of inlet air temperature and concentration of carrier agents on physicochemical properties,

sensory evaluation of spray-dried mandarin (*Citrus unshiu*) beverage powder. En: Applied Biological Chemistry. Febrero, 2017. vol. 60. no. 1. p. 33-40.

LEÓN, F.; MÉNDEZ, L y RODRÍGUEZ, J. Spray drying of nopal mucilage (*Opuntia ficus-indica*): Effects on powder properties and characterization. En: Carbohydrate Polymers. Abril, 2010. vol. 81. no. 4. p. 864-870.

LOPERA, Seneida.; GUZMÁN, Cielo.; CATAÑO, Carlos.; GALLARDO, Cecilia. Desarrollo y caracterización de micropartículas de ácido fólico formadas por secado por aspersión, utilizando goma arábiga y maltodextrina como materiales de pared. En: Vitae. 2009. vol.16. no. 1. p. 55-65.

LOPEZ, Beatriz.; CARVAJAL, Luz y MILLAN, Leonidas. Establecimiento de condiciones de la mezcla de pulpa de banano (*Musa paradisiaca* L.) Para someter a secado por aspersión. En: Vitae. Agosto, 2009. vol. 16. no. 3. p. 287-296.

LÓPEZ, Darío. Microencapsulación de sustancias oleosas mediante secado por aspersión. En: Revista Cubana de Farmacia. 2010. vol. 44. no. 3. p. 381-389.

MANICKAVASAGAN, A.; THANGAVEL, K.; DEV, S.; ANIESRANI, D.; NAMBI, E.; ORSAT, V. Physicochemical characteristics of date powder produced in a pilot scale spray dryer. En: Drying Technology. Marzo, 2015. vol. 33. p. 1-38.

MARQUÉS, L.; PRADO, M y FREIRE, J. Rehydration characteristics of freeze-dried tropical fruits. LWT. En: Food Science and Technology. 2009. vol. 42. no. 7. p. 1232-1237.

MARTINS, Isabel.; BARREIRO, M.; COELHO, Manuel.; RODRIGUES, Alírio. Microencapsulation of essential oils with biodegradable polymeric carriers for cosmetic applications. En: Chemical Engineering Journal. Junio, 2014. vol. 245. p. 191-200.

MASKAN, Medeni. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. En: Journal of Food Engineering. Mayo, 2001. vol. 48. p. 169-175.

MEJÍA, Clara.; GAVIRIA, Duverney.; DUQUE, Alba.; RENGIFO, Lucero.; AGUILAR, Enrique.; ALEGRÍA, Alvaro. Physicochemical characterization of the lulo (*Solanum quitoense* Lam.) castilla variety in six ripening stages. En: Vitae. Julio, 2012. vol. 19. p. 157-165.

MENDOZA, Fernando.; ARTEAGA, Margarita.; PÉREZ, Omar. Comportamiento de la vitamina C en un producto a base de lactosuero y pulpa de mango variedad Magdalena River (*Mangífera Indica* L.) durante el secado por aspersión. En: Revista Chilena de Nutrición. Febrero, 2016. vol. 43. no. 2. p. 159-166.

MESTRY, A.; MUJUMDAR, A y THORAT, B. Optimization of Spray Drying of an Innovative Functional Food: Fermented Mixed Juice of Carrot and Watermelon. En: Drying Technology. Junio, 2011. vol. 29. p. 1121-1131.

MILLER, Dave y GIL, Marco. Spray-Drying Technology. Formulating Poorly Water Soluble Drugs. 2012. p. 363-442.

MOGHADDAM, Arasb.; PERO, Milad y ASKARI, Gholam. Optimizing spray drying conditions of sour cherry juice based on physicochemical properties, using response surface methodology (RSM). En: Journal of Food Science and Technology. Enero, 2017. vol. 54. p. 174-184.

MOITRE, Malena.; COCCHI, Florencia y MUZZIO, Mariana. Introducción, objetivos y características del producto final. En: Producción de maltodextrina a partir de almidón de papa. 1 ed. Argentina, 2018. p. 10-16.

MOREIRA, Germano.; COSTA, Mayra.; SOUZA, Arthur.; BRITO, Edy.; MEDEIROS, Maria.; AZEREDO, Henriette. Physical properties of spray dried acerola pomace extract as affected by temperature and drying aids. En: Food Science and Technology. 2009. vol. 42. no. 2. p. 641–645.

MOSQUERA, Luz. Influencia de la humedad y de la adición de solutos (maltodextrina o goma arábica) en las propiedades fisicoquímicas de borjón y fresa en polvo. Tesis doctoral. España. Universidad Politécnica De Valencia. 2010. p. 1-247.

MOVAHHED, Mohammad y MOHEBBI, Mohebbat. Spray Drying and Process Optimization of Carrot-Celery Juice. En: Journal of Food Processing and Preservation. Octubre, 2015. vol. 40. no. 2. p. 212–225.

MUÑOZ, Johanna.; RODRIGUEZ, Luis y BERMUDEZ, Lilia. Análisis de competitividad del sistema de producción de lulo (*Solanum quitoense* Lam.) en tres municipios de Nariño. En: Revista Colombiana De Ciencias Hortícolas. Diciembre, 2013. vol. 7. no. 2. p. 173-185.

MUZAFFAR, Khalid.; DINKARRAO, Bijamwar y KUMAR, Pradyuman. Optimization of spray drying conditions for production of quality pomegranate juice powder. En: Cogent Food y Agriculture. Enero, 2016. vol. 2. p. 1127583.

MUZAFFAR, Khalid y KUMAR, Pradyuman. Parameter optimization for spray drying of tamarind pulp using response surface methodology. En: Powder Technology. Julio, 2015. vol. 279. p. 179-184.

NADDA, Luisana; AVALO, Belkis y OLIVEROS, Mariaudy. Spray-dried natural orange juice encapsulants using maltodextrin and gum arabic. En: Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia. 2012. vol.35. no. 1. p. 20-27.

NICOLETI, Joel.; SILVEIRA, Vivaldo.; TELIS-ROMERO, Javier.; TELIS, Vânia. Influence of Drying Conditions on Ascorbic Acid during Convective Drying of Whole Persimmons. En: Drying Technology. Junio, 2007. vol. 25. no. 5. p. 891-899.

NISHAD, Jyoti.; SELVAN, Cynthia.; MIR, Shabir.; BOSCO, Sowriappan. Effect of spray drying on physical properties of sugarcane juice powder (*Saccharum officinarum* L.). En: Journal of Food Science and Technology. Marzo, 2017. vol. 54. no. 3. p. 687–697.

OCHOA, Luz.; GONZALES, Silvia.; MORALES, Julia.; ROCHA, Nuria.; TRANCOSO, N.; URBINA Marcela. Propiedades de rehidratación y funcionales de un producto en polvo a base de jugo de granada y manzana. En: Ciencia U. A. Q. 2011. vol. 4. no. 2. p. 19-25.

PATIL, Vaibhav.; CHAUHAN, Anil y SINGH, Ravi. Optimization of the spray-drying process for developing guava powder using response surface methodology. En: Powder Technology. Febrero, 2014. vol. 253. p. 230-236.

PERRAZO, Aracelly. Estudio de secado por aspersion para la obtención de pulpa de uvilla (*Physalis peruviana* L) en polvo. Trabajo de Titulación, Modalidad: Proyecto de Investigación, previa a la obtención del Título de Ingeniero en Alimentos. Universidad técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Ecuador. 2018. p. 25.

PHISUT, N. Spray drying technique of fruit juice powder: some factors influencing the properties of product. En: International Food Research Journal. 2012. vol. 19. no. 4. p. 1297-1306.

SÁNCHEZ, Zain. Evolución de propiedades fisicoquímicas, morfológicas y sensoriales de micro encapsulados de cacao obtenido por spray drying. Tesis de investigación para optar por el título Magister en ciencia y tecnología de alimentos. Bogotá D. C.: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. 2016. p. 25.

SANTHALAKSHMY, Swaminathan; DON BOSCO, Sowriappan; FRANCIS, Sneha; SABEENA, Mallela. Effect of inlet temperature on physicochemical properties of spray-dried jamun fruit juice powder. En: Powder Technology. 2015. vol. 274. p. 37–43.

SERNA, Liliana.; TORRES, Cristian y AYALA, Alfredo. Evaluación de Polvos Alimentarios obtenidos de Cáscaras de Mango (*Mangifera indica*) como fuente de

Ingredientes Funcionales. En: Información Tecnológica. Octubre, 2015. vol. 26. no. 2. p. 41-50.

SERRA, Samantha.; SOUZA, Bruna.; MARTIN, Adriana.; BAGNARA, Fabio.; RAGADALLI, Sandro.; COSTA, Aline. Drying by spray drying in the food industry: micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. En: African Journal of Food Science. Septiembre, 2015. vol. 9. no. 9. p. 462-470.

SIPSA. El cultivo del lulo (*Solanum Quitoense*), una fruta agradable y de gran valor nutritivo. [en línea]. Dane.gov.co. 2014. [Consultado el 3 de Agosto de 2019]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/sipsa/insumos_factores_de_produccion_may_2014.pdf.

SHISHIR, Mohammad y CHEN, Wei. Trends of spray drying: A critical review on drying of fruit and vegetable juices. En: Trends in Food Science & Technology. Mayo, 2017. vol. 65. p. 49-67.

SUHAG, Yogita y NANDA, Vikas. Optimisation of process parameters to develop nutritionally rich spray-dried honey powder with vitamin C content and antioxidant properties. En: International Journal of Food Science and Technology. Abril, 2015. vol. 50. no. 8. p. 1771-1777.

TAN, Sing.; KHA, Tuyen.; PARKS, Sophie.; STATHOPOULOS, Costas.; ROACH, Paul. Effects of the spray-drying temperatures on the physicochemical properties of an encapsulated bitter melon aqueous extract powder. En: Powder Technology. Mayo, 2015. vol. 281. p. 65-75.

TOBÓN, Cynthia. Estandarización del proceso de secado por aspersion para la obtención de polvo de coco (*Cocos nucifera* L.). Trabajo de grado para optar al título de: Magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agrarias. Postgrado en Ciencia y Tecnología de Alimentos. 2017. p. 39.

TONON, Renata.; BRABET, Catherine y HUBINGER, Míriam. Influence of process conditions on the physicochemical properties of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) powder produced by spray drying. En: Journal of Food Engineering. Octubre, 2008. vol. 88. no. 3. p. 411-418.

TONON, Renata.; FREITAS, Samuel y HUBINGER, Míriam. Spray drying of açai (*Euterpe oleraceae* Mart.) juice: effect of inlet air temperature and type of carrier. En: Journal of food processing and preservation. Abril, 2011. vol. 35. no. 5. p. 691-700.

TONTUL, Ismail y TOPUZ, Ayhan. Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. En: Trends in Food Science & Technology. Mayo, 2017. vol. 63. p. 91–102.

VARDIN, Hasan y YASAR, Mehmet. Optimisation of pomegranate (*Punica Granatum* L.) juice spray-drying as affected by temperature and maltodextrin content. International. En: Journal of Food Science & Technology. Septiembre, 2012. vol. 47. p. 167-176.

VILLACREZ, José.; CARRIAZO, José y OSORIO, Coralia. Microencapsulation of andes berry (*Rubus glaucus* Benth.) aqueous extract by spray drying. En: Food and Bioprocess Technology. Mayo, 2013. vol. 7. no. 5. p. 1445–1456.

WEERACHET, Jittanit., MAYTHAWEE, Chantara-in., TITHIYA, Deying., WANTANEE, Ratanavong. Production of tamarind powder by drum dryer using maltodextrin and arabic gum as adjuncts. En: Songklanakarin J. Sci. Technol. February, 2011. vol. 33. no. 1. p. 33-41.

WEERACHET, Jittanit.; SIRIWAN, Niti-Att y ONUMA Techanuntachaikul. Study of spray drying of pineapple juice using maltodextrin as an adjunct. En: Chiang Mai J. Sci. 2010. vol. 37. no.3. p. 498-506.

YAĞCI, Sibel y GÖĞÜS, Fahrettin. Response surface methodology for evaluation of physical and functional properties of extruded snack foods developed from food-byproducts. En: Journal of Food Engineering. Mayo, 2008. vol. 86. p. 122–132.

YAÑEZ, J.; SALAZAR, J.; CHAIRES, L.; JIMENEZ, J.; MARQUEZ, M.; RAMOS, E. Aplicaciones biotecnológicas de la microencapsulación. En: Revista Avance Y Perspectiva. Septiembre-Octubre, 2002. vol. 21. p. 313-319.

ZAREIFARD, Mohammad.; NIAKOUSARI, Mehrdad.; SHOKROLLAHI, Zohre.; JAVADIAN, Shahram. A Feasibility Study on the Drying of Lime Juice: The Relationship between the Key Operating Parameters of a Small Laboratory Spray Dryer and Product Quality. En: Food and Bioprocess Technology. 2011. vol. 5. no. 5. p. 1896–1906.

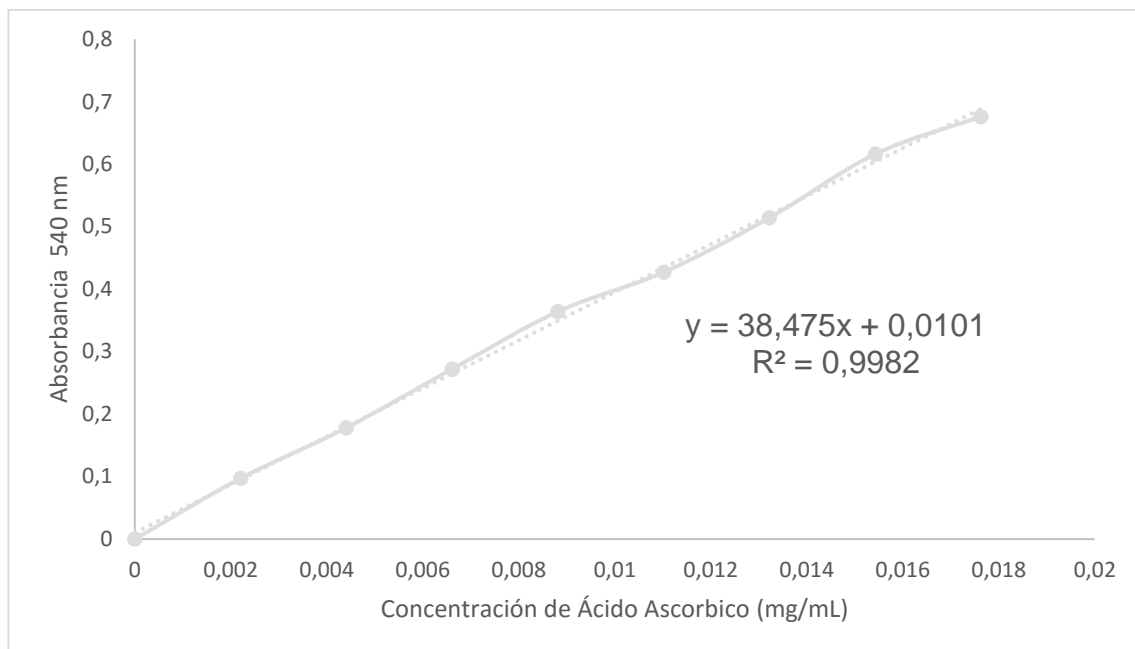
ZHONGXIANG, Fang y BHESH, Bhandari. Comparing the efficiency of protein and maltodextrin on spray drying of bayberry juice. En: Food Research International. Octubre, 2012. vol. 48. no. 2. p. 478-483.

ZOTARELLI, M. Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem. Tese De Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. 2014. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. p. 25.

ANEXOS

CURVA DE CALIBRACIÓN PARA VITAMINA C EN POLVOS

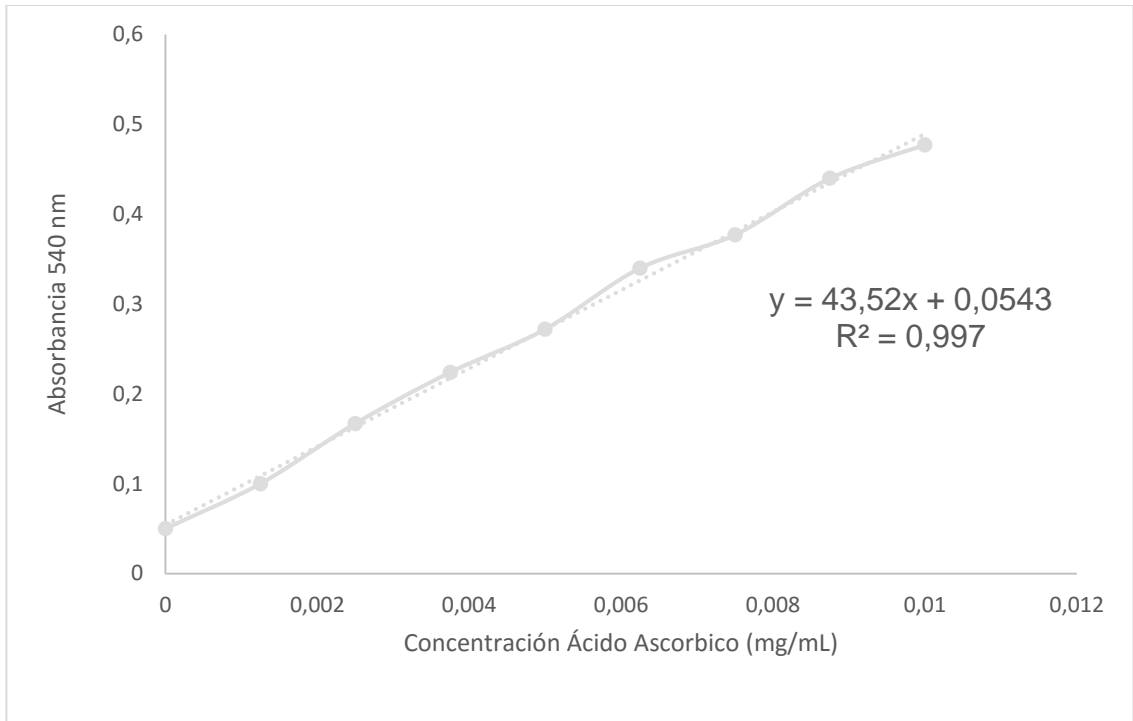
Anexo A. Curva de calibración para vitamina C en polvos



Fuente: Esta investigación

CURVA DE CALIBRACIÓN PARA VITAMINA C EN PULPA

Anexo B. Curva de calibración para vitamina C en pulpa



Fuente: Esta investigación